

Eötvös Loránd Tudományegyetem Pedagógiai és Pszichológiai Kar

Pszichológiai Doktori Iskola - Kognitív Pszichológiai program

A Pszichológiai Doktori Iskola vezetője: Dr. Oláh Attila, DSc

A Kognitív Pszichológiai program vezetője: Dr. Czigler István, DSc



Boha Roland

**A számolási műveletekkel kapcsolatos kognitív folyamatok
életkorfüggő változásainak elektrofiziológiai jellemzői**

doktori (PhD) disszertációjának téziszülete

Témavezető: Dr. Molnár Márk, DSc

Budapest, 2015.

A számolási képességek kapcsán közismert a munkamemória fontos szerepe, azonban ez idáig kevés olyan vizsgálat ismert, melyek kísérletet tesznek arra is, hogy az emlékezeti folyamatokat a számolásaitól a lehető legnagyobb mértékben elkülönítsék, majd azokon az egészséges öregedés hatásait vizsgálják. Jelen dolgozatban számolási feladatok (összeadási és kivonási műveletek) során egészséges fiatal és idős felnőttekre jellemző funkcionális kapcsolati hálózat vizsgálatát végeztük az EEG theta (4-8 Hz) frekvencia sávjában. A hagyományosnak tekinthető teljesítménysűrűség-spektrum elemzés mellett meghatároztuk a fázisszinkronizáció (PLI) mérésén alapuló gráfelméleti leírókat, melyek a lokális kapcsolatok erősségét jellemző klaszterkoefficiens (C) és a hálózat globális összekapcsoltságát jellemző úthossz (L) értéke. Hasonló elven elemeztük a minimális feszítő fák- és a modulok mutatóit, a központiságot, fokszámot, átmérőt, excentricitást és a levelek számát vizsgálva. Az összeadási és kivonási feladatot egy instrukció nélküli ingersor-megtekintése (kontroll helyzet) és egy számfelismerési helyzet előzte meg. Az összeadás és a kivonás okozta változások hasonlóak voltak, a legtöbb feladattípusnál magasabb theta teljesítményt, illetve fázisszinkronizációt találtunk a fiatalokban, továbbá hálózati paramétereik is sokkal inkább „small world” jellegzetességeket mutattak, mint az időseknél. Az idős korcsoport véletlenszerű hálózatok felé tolódó topológiai átszerveződése a szakirodalomban ismert, és elképzelhető, hogy kiterjedt agyi erőforrás felhasználással való kompenzációra utalhat. Az életkorral összefüggően csökkent a hálózati integráció mértéke, a feladathelyzetnek megfelelően változott a PLI (nőtt a nehézség mértékével), valamint a ráépülő gráf paraméterek is. Az idősek számfelismerési feladata során, több mutatóban is a fiataloknál látottakkal, és a feladat nehézségének mértékével is ellentétes változásokat találtunk. Az eredmény háttérében az irodalmi adatokkal konzisztens, a természetes öregedési folyamatokkal magyarázható, egyszerű emlékezeti feladatoknál jelentkező deficit állhat, mely nagyobb terhelésnél kiterjedt kompenzáló mechanizmusok hatására eltűnik. Regionálisan a feladatreleváns frontális szinkronizáció több módszerrel mérhető volt, továbbá több mutató is emelkedett occipitalis szinkronizációt mutatott, mely a vizuális ingerlés és az arab számokkal végzett műveletek következménye lehet. Emellett megmutattuk, hogy a minimális feszítő fák módszere alkalmas keretet szolgáltat az agyi feladat indította átszerveződések objektív vizsgálatára, az általunk kifejlesztett megjelenítési formák pedig könnyen értelmezhetővé teszik azok eredményeit. A disszertációban agyi elektromos tevékenység vizsgálatára modern gráfelméleti megközelítéseket használunk fel, melyek alapján képesek voltunk feltérképezni az alapvető agyi hálózatok szervezettségét, megtalálni az öregedési folyamatok hatására felértékelődött, vagy elszigetelődő területeket és mindezt könnyen átlátható formában megjeleníteni.

2.1 ÖSSZEADÁS

H1- A számolási műveletek magukban foglalják a számok rövidtávú emlékezeti fenntartását és a számok reprezentációján végzett kognitív manipulációt. Feltételezésünk szerint az emlékezeti fenntartás- és a számolási manipulációs folyamatok elektrofiziológiai korrelátumai elkülöníthetők egymástól. Alaphelyzetként feladat nélküli számingerek megtekintését, továbbá számok rövidtávú emlékezeti fenntartását igénylő- valamint számolási feladatok elektrofiziológiai korrelátumait hasonlítottunk össze. Az összeadási feladatban egyjegyű számokkal kellett műveleteket végezni, melyek végeredménye egy kétjegyű szám volt.

H2- Feltételezésünk szerint az aritmetikai folyamatokkal összefüggésbe hozható neurális mechanizmusok az életkor előrehaladtával a feladat nehézségétől függetlenül kevésbé hatékonyak, amely a viselkedéses teljesítmény hanyatlásában is megnyilvánul. Mivel ezek nem csupán egy-egy mutató emelkedett, vagy csökkent értékében, hanem azok területi megoszlásában is megmutatkozhatnak, így ennek megfelelően a fiatalokhoz képest az idős csoportban olyan területileg másképpen elosztott rendszer meglétét feltételeztük, ahol a feladatreleváns frontális területek mellett parietalis, esetleg occipitalis régiók is részt vesznek a feladat megoldásában. Emiatt több módszerrel is elemeztük adatainkat, melyeket –amennyiben ezt a módszer lehetővé tette- frontális, centralis, temporalis, parietalis, occipitalis agyi régiókra bontva vizsgáltunk.

2.2 KIVONÁS

H3- Hasonlóan az összeadási feladathoz, azt feltételeztük, hogy a tisztán emlékezeti feladat és a kivonás összehasonlításával ezen folyamatok egyes komponensei elkülöníthetőek. Ennek értelmében alaphelyzetként itt is egy feladat nélküli ingersorozat megtekintését, egy tisztán emlékezeti terhelést igénylő, valamint egy számolási feladatok elektrofiziológiai korrelátumait hasonlítottuk össze e feltételezés igazolására. A kivonási feladat során a személyeknek egy kétjegyű számból kellett kivonni egy kétjegyű és egy egyjegyű számot.

H4- Az összeadási feladathoz hasonlóan a kivonás során is területspecifikus időskori változásokat feltételeztünk az aritmetikai feladat során, a feladat nehézségétől függetlenül. A korábbi feladat mintájára, azon módszerekkel, amelyek topológiai információ feltárására alkalmasak, az

összehasonlításokat kiterjesztettük a frontalis, centralis, temporalis, parietalis, occipitalis agyi régiókra.

2.3 MINDKÉT MŰVELETTÍPUSRA ÉRVÉNYES KÉRDÉSEK

H5- Gráfelméleti módszerek alkalmazása az idegtudományban egyre inkább elterjedt gyakorlattá válik, az agy „small world” szervezettségét már több tanulmány is tárgyalta. Mindezek mellett szükség volt egy olyan vizsgálati módszerre, amely mentes a hagyományos küszöbértékválasztási problémától és nem támaszkodik más, szubjektív döntésre sem (mint például bizonyos műveleti paraméterek megválasztása), viszont hatékonyan feltárja az agy feladat-, és/vagy i csoport-specifikus funkcionális (át)szerveződését. Feltételezésünk szerint a minimális feszítő fák (MFF) módszere erre alkalmas eljárás, Ennek tesztelésére az MFF-módszerrel nyert eredményeket hagyományos (teljesítménysűrűség spektrum és PLI) módszerekkel nyert eredményekkel vetettük össze.

H6- A minimális feszítő fák módszere a komplex hálózatok dinamikus működésének teljes körű leírását szolgáltatja (pl. levelek aránya, szomszédsági viszonyok, területi arányok, hubok és más felértékelődött csomópontok), melyek megjelenítése -a szubjektív elemek kizáráshoz hasonlóan- fontos. Ennek megfelelően megvizsgáltuk, miként lehet egy MFF-t ábrázolni úgy, hogy azon a fenti szempontok jól elkülöníthetőek legyenek, majd kidolgoztunk két eljárást, melyek a MFF minden fontos információját megjelenítik.

A bemutatott vizsgálatok során egy korcsoportonként változó felépítésű, a számolási feladatok végzésével párhuzamosan átszerveződő, frontalis-occipitalis hálózatot írtunk le. A különböző művelettípusokhoz fűződő főbb szignifikáns változásokat az alábbi táblázatokban foglaljuk össze. Ezek rendre a fiatal korcsoport eredményei (1. táblázat), az idős korcsoport eredményei (2. táblázat) és a fiatal-idős eredmények összehasonlítása (3. táblázat).

<i>fiatal korcsoport mutatói</i>	<i>a feladat jellege</i>	<i>feladat a kontrollhoz képest</i>	<i>feladat a számfelismeréshez képest</i>
teljesítménysűrűség spektrum	összeadás	bal oldali többlet	
	kivonás	hasonló eredmények	
PLI	összeadás	magasabb PLI	
	kivonás	magasabb PLI	
klaszter koefficiens	összeadás	magasabb C	
	kivonás	magasabb C	
úthossz	összeadás	rövidebb úthossz	
	kivonás	rövidebb úthossz	
BC	összeadás	alacsonyabb BC	hasonló eredmények
	kivonás	hasonló eredmények	
fokszám	összeadás	magasabb fokszám	
	kivonás	hasonló eredmények	
átmérő	összeadás	kisebb átmérő	
	kivonás	kisebb átmérő	hasonló eredmények
excentricitás	összeadás	csökkenő excentricitás	
	kivonás	csökkenő excentricitás	hasonló eredmények
levelek aránya	összeadás	nőtt a levelek száma	
	kivonás	a feladat nehézségével nő	

1. TÁBLÁZAT

<i>idős korcsoport mutatói</i>	<i>a feladat jellege</i>	<i>feladat a kontrollhoz képest</i>	<i>feladat a számfelismeréshez képest</i>
teljesítménysűrűség spektrum	összeadás	occipitalis teljesítményemelkedés	
	kivonás	occipitalis teljesítményemelkedés	
PLI	összeadás	hasonló eredmények	magasabb PLI
	kivonás	hasonló eredmények	magasabb PLI
klaszter koefficiens	összeadás	hasonló eredmények	magasabb C
	kivonás	hasonló eredmények	magasabb C
úthossz	összeadás	rövidebb úthossz	
	kivonás	hasonló eredmények	rövidebb úthossz
BC	összeadás	hasonló eredmények	alacsonyabb BC
	kivonás	hasonló eredmények	
fokszám	összeadás	magasabb fokszám	
	kivonás	hasonló eredmények	magasabb fokszám
átmérő	összeadás	hasonló eredmények	kisebb átmérő
	kivonás	hasonló eredmények	kisebb átmérő
excentricitás	összeadás	csökkenő excentricitás	
	kivonás	hasonló eredmények	csökkenő excentricitás
levelek aránya	összeadás	nőtt a levelek száma	
	kivonás	a feladat nehézségétől függetlenül nő	

2. TÁBLÁZAT

<i>fiatalok az idősökhöz képest</i>	<i>a feladat jellege</i>	<i>feladat</i>	<i>kontrollhelyzetek</i>
teljesítménysűrűség spektrum	összeadás	magasabb teljesítmény	
	kivonás	magasabb teljesítmény	
PLI	összeadás	magasabb PLI	idősöknél jelentős PLI csökkenés a számfelismerésnél
	kivonás	occipitalis PLI többlet, nincs csoportkülönbség	
klaszter koefficiens	összeadás	hasonló eredmények	idősöknél jelentősen alacsonyabb C a számfelismerésnél
	kivonás	magasabb C érték	idősöknél alacsonyabb C a számfelismerésnél
úthossz	összeadás	hasonló eredmények	idősöknél jelentősen nőtt az úthossz a számfelismerésnél
	kivonás	rövidebb úthossz	idősöknél jelentősen nőtt az úthossz a számfelismerésnél
BC	összeadás	mindkét csoportban magasabb BC occipitalisan	
	kivonás	mindkét csoportban magasabb BC occipitalisan	
fokszám	összeadás	frontalis-occipitalis többlet mindkét csoportban	
	kivonás	frontalis-temporalis-occipitalis többlet mindkét csoportban	
átmérő	összeadás	hasonló eredmények	kissé növekedő átmérő az idősök számfelismerési helyzetében
	kivonás	hasonló eredmények	kissé növekedő átmérő az idősök számfelismerési helyzetében
excentricitás	összeadás	hasonló eredmények	kissé növekedő excentricitás az idősök számfelismerési helyzetében
	kivonás	hasonló eredmények	kissé növekedő excentricitás az idősök számfelismerési helyzetében
levelek aránya	összeadás	hasonló eredmények	csökkent a levelek száma az idősök számfelismerési helyzetében
	kivonás	hasonló eredmények	idősöknél a levelek száma nem változott a feladat nehézségével

3. TÁBLÁZAT

4.1 ÖSSZEADÁS

H1-Theta sávban az összeadási feladat során a relatív spektrum teljesítményének értéke bal oldalon magasabb volt, mint jobb oldalon. Továbbá a C értéke nagyobb, az L pedig kisebb volt a kontroll- és a számfelismerési helyzethez képest is, melyek mellett az összeadási helyzet hatására a MFF-ban rövidülő átmérőt és utakat, valamint több levelet is találtunk a többi helyzethez képest. Mindemellett az egyes mutatók változásai jól jellemezték az összehasonlított helyzetek közti különbségeket, azok valószínűleg a számolási tevékenység korrelátumai és nem az emlékezeti fenntartásé. Több mutatóban (úgy, mint teljesítménysűrűség spektrum, PLI, C, L) a számfelismerési feladat során az időseknél deficitet írtunk le, mely egyrészt a kontroll és az összeadási feladatokhoz képest is, másrészt a fiatalok számfelismerési feladatához képest is jelen volt és az életkorral járó, emlékezeti folyamatokban lezajlott hanyatlásra utal.

H2- A fiatal csoport spektrális theta teljesítménye—az összeadás és a számfelismerés során is—magasabb volt, mint az időseké, továbbá az időseknél e két feladathelyzeténél occipitalisan magasabb theta teljesítményt mértünk, mint a többi területen. A PLI-ben minden helyzetet tekintve magasabb fázisszinkronizációt találtunk fiataloknál, mint az időseknél, viszont az idősekben a számfelismerés során -a fiatalokkal ellentétben- szignifikáns csökkenést találtunk a passzív- és az összeadási helyzethez képest. A C értékét alacsonyabbnak, míg az L értékét magasabbnak találtuk az idős csoportban a fiatalokéhoz képest az életkori főhatás során, továbbá az idős csoportban tendenciaszerű változás látszott, mely alacsonyabb C és magasabb L értéket mutatott a számfelismerési feladat során a másik két feladattípushoz képest. A MFF paramétereiben hasonló tendenciát találtunk (BC szignifikánsan alacsonyabb volt a számfelismerésnél, mint az összeadásnál; az átmérő és az úthossz a számfelismerés alatt nőtt a számoláshoz képest), mely arra enged következtetni, hogy az idős korcsoportban a természetes öregedést emlékezeti deficitet kíséri, míg a számolási műveletek képessége —akár nagyobb területi aktiváció árán - megtartottak lehetnek.

4.2 KIVONÁS

H3- A kivonási feladat során a theta sávban vizsgált PLI magasabb volt, ahogyan a C is emelkedett, az L pedig csökkent mindkét korcsoportban. Az MFF-re vonatkozóan feladat helyzetben kisebb átmérőt, rövidebb utakat és növekvő levélszámot találtunk. A passzív- és a számfelismerési helyzet ezen elemzések eredményei alapján nem különültek el egymástól, noha a feladat nehézségével összefüggő

tendenciákat –az összeadáshoz hasonlóan- itt is tapasztaltunk. Az itt felsorolt változások tehát a kivonási tevékenységhez köthetők és nem az emlékezeti teljesítményhez.

H4- A kivonási feladat során a fiatalok theta teljesítménye magasabb volt, mely életkori főhatásként jelentkezett, továbbá itt is leírtuk emelkedett teljesítményt találtunk időseknél occipitalisan minden más régióhoz képest. Az idősek PLI értékei alacsonyabbak voltak a fiatalokénál. Az idős csoportban számfelismerés során szignifikánsan alacsonyabb PLI-t találtunk, mint a kivonások alkalmával, melyhez hasonlóan alakultak a C és L értékek is. Az idősekben a fiatalokhoz képest kisebb C és nagyobb L értékeket mértünk, míg a kivonási helyzethez képest jelentősen csökkentek a számfelismerés során számított mutatóik. Az MFF paramétereiben is csökkenő fokszámot, növekvő átmérőt és excentricitást találtunk a számfelismerés során a kivonáshoz képest. Az egészséges öregedéssel járó csökkenő theta sávi teljesítmény és –szinkronizáció - mint statisztikailag is mérhető főhatás - jól ismert az irodalomban. Az emlékezeti feladat felidézési fázisában mért deficit az összeadáshoz hasonlóan itt is megjelent, így valószínű, hogy az öregedés hatása e funkciók vizsgálatával érhető tetten.

4.3 MINDKÉT MŰVELETTÍPUSRA ÉRVÉNYES KÉRDÉSEK

H5- A régebb óta vizsgált C és L paraméterekhez képest az MFF-k elemzése kiküszöböli a szubjektív küszöbérték-választás problémáját, azonban ezen túl nem csak összevethető a PLI eredményekkel, de az agy hierarchikus szerveződését tekintve képes azokhoz új információkat is adni. Az egymástól elkülönített és egymással összekapcsolt csomópontok vizsgálatának eredményei a PLI adatokban csak indirekten –jelen dolgozatban régiókra lebontva- jelennek meg, azonban az MFF használatával lehetőség van a legerősebb kapcsolatok vizsgálata mellett azt is elemezni, hogy bizonyos területek mekkora és milyen erős kapcsolati hálót építenek ki, miközben a vizsgálati személy bizonyos típusú feladatokat old meg. Saját eredményeinkben ezen túl az MFF használatának legfontosabb hozama az, hogy paramétereik vizsgálata során minden olyan összefüggést sikerült megmutatnunk, melyek kimutatására korábban csak több másik módszer együttes alkalmazásával volt lehetőség. Az összes tapasztalt változásra egyik korábban használt eljárás sem mutatott ilyen mértékű érzékenységet, a teljesítménysűrűség spektrum például nem ad információt az egyes területek kapcsolatáról, ahogyan a PLI eredményekben sem lehetett kiemelni a legfontosabb regionális kapcsolatokat. A BC-t tekintve összeadás és kivonás során is kitűnt az occipitalis terület szerepének fontossága. A fokszám érzékenyen követte az összeadás során a feladat nehézségét, azzal arányosan változott, míg a kivonások során frontális, temporalis, occipitalis területen felerősödő kapcsolatokat is jelzett. E mutató eredményeink alapján alkalmas lehet a műveletek elkülönítésére is. Az átmérőt, az

excentricitást és a levelek arányát vizsgálva is jól leírhatók az agyi hálózatban bekövetkező változások, mindegyik mutatóval kapcsolatban a nehezedő feladattal egyidejűleg bekövetkező „small world” típusú elrendeződésre utaló változásokat mértünk.

H6- A minimális feszítő fák felrajzolhatók egyszerű gráfokként is, azonban kutatócsoportunkkal olyan megoldásokat dolgoztunk ki a megjelenítésükre, melyek egyaránt magukban hordoznak területi, topológiai és kapcsoltsági információkat is. A BC mutató occipitalis felértékelődést jelzett, a fokszám a frontalis-temporalis-occipitalis átszerveződés jelzésével alkalmasnak bizonyult a két típusú alapművelet elkülönítésére, továbbá az átmérővel, az excentricitással és a levelek arányával együtt a feladatnehézséggel párhuzamosan változott, jól követve az agyi hálózat átszerveződését. Mindezeket könnyen áttekinthető formában jeleníti meg File Bálint e célra kifejlesztett számítógépes programja (File et al., 2012), melynek eredménye a hagyományos térképezéshez hasonló eloszlási kép a gráf felépítéséről (skalpszerűen felrajzolt, csomópontok között futó élek). Ezt jól kiegészíti, és az eredményeket szemlélteti a közös fejlesztésű programunk, amely az adatokból MFF-kat készít (skalpeloszlás nélkül). Az így felrajzolt MFF-ban az elektródjelölések mellett egyaránt megtalálhatók a területi, kapcsolati (azok erősségével együtt) csoportok és a legnagyobb forgalmú csomópontok is (File et al., 2012).

5.1 FOLYÓIRATCIKKEK

Boha R., Tóth B., Gaál Zs. A., Kardos Zs., File B., Molnár M. (2013) Számolási teljesítmény spektrális, fázisszinkronizációs és gráfelméleti EEG-jellemzői. *Ideggyógyászati Szemle*, 66:(5-6) pp. 175-183.

Molnár M., Tóth B., Boha R., Gaál Zs. A. (2012) Érzelmek hatása a válaszgátlásra - Életkori sajátosságok elektrofiziológiai adatok tükrében. *Pszichológia*, 32:(1) pp. 19-36.

Molnár M., Boha R., Benyovszky M., Gaál Zs. A., Tóth B. (2011) Öregedés és számolási teljesítmény: Az EEG spektrális, komplexitás- és hálózatjellemzői. *Ideggyógyászati Szemle*, 64:(1-2) pp. 41-49.

Gaál Zs. A., Boha R., Stam C. J., Molnár M. (2010) Age-dependent features of EEG-reactivity—Spectral, complexity, and network characteristic. *Neuroscience Letters*, 479: pp. 79-84.

Molnár M., Gaál Zs. A., Boha R., Tóth B., Benyovszky M., Czigler B. (2010) Kognitív folyamatok elemzése a neurális komplexitás elektrofiziológiai korrelátumainak alapján. *Magyar Pszichológiai Szemle*, 65:(4) pp. 621-634.

Molnár M., Boha R., Czigler B., Gaál Zs. A. (2010) The acute effect of alcohol on various memory processes. *International Journal of Psychophysiology*, 24:(4) pp. 249-252.

Boha R., Molnár M., Gaál Zs. A., Czigler B., Róna K., Kass K., Klausz G. (2009) The acute effect of low-dose alcohol on working memory during mental arithmetic I. Behavioral measures and EEG theta band spectral characteristics. *International Journal of Psychophysiology*, 73:(2) pp. 133-137.

Molnár M., Boha R., Czigler B., Gaál Zs. A., Benyovszky M., Róna K., Klausz G. (2009) The acute effect of low-dose alcohol on working memory during mental arithmetic II. Changes of nonlinear and

linear EEG-complexity in the theta band, heart rate and electrodermal activity. *International Journal of Psychophysiology*, 73:(2) pp. 138-142.

5.2 KONFERENCIAKÖZLEMÉNYEK

File B., Tóth B., Kardos Zs., Boha R., Molnár M. (2013) Source level based investigation of age-related changes in resting state functional connectivity. *Psychophysiology*, 50:(S1) p. S25.

Boha R., Tóth B., Gaál Zs. A. , Molnár M. (2012) The effect of age on time dependent EEG-synchronization changes during the performance of mental arithmetic task. *International Journal of Psychophysiology*, 85:(3) pp. 429-430.

File B., Tóth B., Boha R., Hidas Z., Gaál Zs.A., Stam C.J., Molnár M., (2012) Longitudinal study of resting state functional network characteristics in mild cognitive impairment. *Psychophysiology*, 49, Supplement , pp. S30.

Boha R., Tóth B., Gaál Zs. A., Benyovszky M., Molnár M. (2011) Electrophysiological correlates of age-dependent memory processes in mathematical cognition. *13th conference of the Hungarian Neuroscience Society (MITT) Edition*, Frontiers

Boha R., Tóth B., Gaál Zs. A. , Benyovszky M., Molnár M. (2010) Age-related correlates of mental arithmetic performance: Changes of EEG-spectra, complexity measures and network characteristics. *International Journal of Psychophysiology*, 77:(3) pp. 258-259.

Molnár M., Boha R., Benyovszky M., Gaál Zs. A., Tóth B. (2010) Exhaustion and stress during arithmetic performance - Age-related EEG and ECG characteristics. *International Journal of Psychophysiology*, 77:(3) pp. 219-220.

Boha R., Benyovszky M., Gaál Zs. A. , Tóth B., Molnár M. (2009) Age-dependent changes of EEG frequency characteristics and ECG-changes related to working memory processes in arithmetic task connectivity. *Psychophysiology*, 46: p. S35.