

ARITMETIKAI FELADAT ELEKTROFIZIOLÓGIAI ELEMZÉSE A „MINIMÁLIS FESZÍTŐ FÁK” MÓDSZERÉVEL

BOHA Roland^{1, 2}, TÓTH Brigitta^{1, 2}, KARDOS Zsófia^{1, 3}, FILE Bálint⁴, GAÁL Zsófia Anna¹, MOLNÁR Márk^{1, 5}

¹MTA, Természettudományi Kutatóközpont, Kognitív Idegtudományi és Pszichológiai Intézet, Budapest

²ELTE, PPK, Pszichológiai Doktori Iskola, Budapest

³BME, Kognitív Tudományi Tanszék, Budapest

⁴PPKE, Információs Technológiai Kar, Budapest

⁵ELTE, PPK, Pszichológiai Intézet, Budapest



Hungarian | <http://dx.doi.org/10.18071/isz.69.0169> | www.elitmed.hu

ANALYSIS OF MENTAL ARITHMETIC TASK BY THE “MINIMUM SPANNING TREE” METHOD

Boha R; Tóth B, PhD; Kardos Zs; File B; Gaál ZsA, PhD; Molnár M, MD, DSc

Idegyogy Sz 2016;69(5–6):169–176.

Célkitűzés – A jelen tanulmányban elemi aritmetikai műveletekhez kötődő idegrendszeri funkcionális kapcsolatok átrendeződését vizsgáltuk, melyhez az elméleti idegtudományokban és a klinikai gyakorlatban is egyre nagyobb teret nyerő gráfelméleti elemzést használtuk.

Kérdésfelvetés – A számolási képességek kapcsán közismert a munkamemória fontos szerepe, azonban ez idáig kevés olyan vizsgálat ismert, melyben kísérletet tesznek arra, hogy az emlékezeti folyamatokat elkülönítsék azokról, melyek közvetlenül a számolási műveletben szerepelnek. Tanulmányunkban megkíséreltük elkülöníteni az egyes rész-funkciók mögött álló idegrendszeri hálózatokat.

A vizsgálat módszere és alanyai – Erre a célra a gráfelmélet részeként ismert „minimális feszítő fák” (MFF) módszerét használtuk feladatvégzés közben elvezetett EEG elemzésére. Összeadási, passzív megtekintés, valamint számfelismerési feladatok végzése során egészséges fiatal felnőttek (összeadás: 17 fő; passzív megtekintés és számfelismerés: 16 fő) funkcionális kapcsolati hálózatának vizsgálatát végeztük az EEG θ (4–8 Hz) frekvenciasávjában és elemeztük a fázisszinkronizáció (PLI) mérésén alapuló minimális feszítő fák mutatóit.

Eredmények – Az összeadási művelettel összefüggésben több mutató is a feladatvégzéssel kapcsolatos emelkedett occipitalis szinkronizációra utalt, mely a vizuális ingerlés következménye lehet. Az átmérőt, az excentricitást és a levelek arányát tekintve az egyes feladatokban különböző mértékű változásokat találtunk.

Következtetések – Megfigyeléseink arra utalnak, hogy a fenti változások lehetőséget adnak a feladatvégzésben domináns funkciók mögött álló hálózatok elkülönítésére. Ebből arra következtettünk, hogy a minimális feszítő fák módszere alkalmas az agy feladatfüggő átszerveződésének vizsgálatára.

Kulcsszavak: mentális aritmetika, MFF, EEG, gráfelmélet, kapcsolataelemzés

Goals – In the present study basic arithmetic induced rearrangements in functional connections of the brain were investigated by using graph theoretical analysis what becomes increasingly important both in theoretical neuroscience and also in clinical investigations.

Research questions – During mental arithmetic operations (working) memory plays an important role, but there are only a few studies in which an attempt was made to separate this effect from the process of arithmetic operations themselves. The goal of our study was to separate the neural networks involved in cognitive functions.

Methods – As an attempt to clarify this issue the graph-theoretical “minimal spanning tree” method was used for the analysis of EEG recorded during task performance. The effects of passive viewing, number recognition and mental arithmetic on PLI based minimal spanning trees (MST) were investigated on the EEG in young adults (adding task: 17 subjects; passive viewing and number recognition: 16 subjects) in the θ (4–8 Hz) frequency band.

Results – Occipital task relevant synchronization was found by using the different methods, probably related to the effect of visual stimulation. With respect to diameter, eccentricity and fraction of leafs different task-related changes were found.

Discussion – It was shown that the task related changes of various graph indices are capable to identify networks behind the various relevant dominant functions. Thus the “minimal spanning tree” method is suitable for the analysis of the reorganization of the brain with respect to cognitive functions.

Keywords: mental arithmetic, MST, EEG, graph theory, connectivity analysis

Levelező szerző (correspondent): BOHA Roland, MTA, Természettudományi Kutatóközpont; 1117 Budapest, Magyar tudósok körútja 2. Telefon/fax: (06-1) 382-6200, e-mail: roland@boharoland.hu

Érkezett: 2015. július 2. Elfogadva: 2015. szeptember 28.

Sok alapvető kognitív tevékenység ismert, melyek idegtudományi háttere e működések hétköznapi volta ellenére is feltáratlan. Ide tartoznak a számolási műveletek is, melyek közül jelen közleményben egyszerű összeadási feladatot vizsgálunk meg, új típusú gráfelméleti elemzések előnyeit kihasználva.

A számolás fogalma alatt olyan komplex műveletvégzést értünk, mely sokféle kognitív funkcióra támaszkodva a számokkal végzett manipulációt valósítja meg.

Dehaene és munkatársai¹ tanulmányunk szempontjából is releváns, számokkal történő vizuális ingerlés feldolgozását úgy írták le, hogy az inger megjelenésekor a jobb és bal féltekében a vizuális számformátumnak megfelelően a gyurus fusiformis, ezt követően a mennyiségi reprezentációnak betudhatóan az intraparietális sulcus horizontális része aktiválódik. Ezzel párhuzamosan a domináns (bal) féltekében a tárolt összefüggések felidézése folyik, amit követően a verbális reprezentációk aktiválják az angularis gyrust. További tanulmányok is megerősítették az intraparietális sulcus és az angularis gyrus számolás során emelkedő aktivációját². Vitathatatlanság tény továbbá, hogy a számolás a hosszú- és rövidtávú emlékezetre is támaszkodó, összetett műveletsor^{1, 3, 4}.

A fent leírt folyamatok sok struktúra együttműködését, kiterjedt szinkronizációját követelik meg. A jó idői felbontással bíró neurofiziológiai technikák alkalmasak az egyes frekvenciasávokon megvalósított, kiterjedt téri integráció vizsgálatára. Mindezt lokális és globális szinten a fázisszinkronizáció valósítja meg⁵, mely alatt a hagyományos elnevezések szerint két jelforrás ritmusának (frekvenciájának) összehangolódását, fáziskapcsoltságát értjük. Az agy specifikus területeinek összehangolt működését (szinkronizációját), melyeket kognitív folyamatok is kiváltak, a mentális erőfeszítés velejárójának tekinthetjük⁵. Tanulmányunkban a fázisszinkronizációt a PLI módszerével⁶ vizsgáltuk, melynek erőssége, hogy képes eliminálni a referenciaválasztás és a volumenvezetés okozta problémákat.

A modern hálózatelmélet „small world”⁷ nézőpontját kombinálva például a fázisszinkronizációs változásokra érzékeny módszerekkel az egyes idegrendszeri területek közti kommunikáció még hatékonyabban vizsgálható, ugyanis a csomópontok közti relációk matematikai leírása, azok hierarchiája az ilyen típusú adatokból kinyerhető. *Stam* és munkatársai⁸ Alzheimer-kóros betegek nyugalmi EEG-jét vizsgálták ilyen módszerekkel. Az α -tartományban egészséges kontrollcsoporthoz képest a

betegekben szétagoltabb, véletlenszerűen szervezett hálózatot találtak.

Dimitriadis és kutatócsoportja⁹ fiatal felnőttekkel végeztek szám-összehasonlítási és kétjegyű szorzásos feladatokat, melyek során a gráfelméleti mutatók változásai a kifejezettebb „small world” karakterisztikára utaltak.

A jelen közleményben tárgyaltakhoz hasonlóan korábban kísérletet tettünk az emlékezeti és a számolási teljesítmény elektrofiziológiai korrelátumainak szétválasztására. Ennek során azt találtuk, hogy θ -sávban a kivonási helyzet hatására az agyi hálózat szervezettsége a számolás során „small world” irányba tolódott. Azonban a fent bemutatott elemzések kényszerűen szubjektív elemei (például a küszöbérték-, és a szurrogátumméret választása) mindeddig megoldatlanok maradtak, ezért módszereinket *Tewarie* és munkatársainak¹¹ közleménye alapján fejlesztettük tovább, melynek során a szerzők gráfelméleti vizsgálatokat végeztek a minimális feszítő fák (MFF) módszerre alapozva sclerosis multiplexben szenvedő betegek hálózati topológiájának feltérképezésére. Jelen esetben az algoritmus úgy válogatja ki a csomópontok közötti legerősebb kapcsolatokat, hogy az elkészült összefüggő gráf körmentes, így minden csomópontja (n darab) a gráfon belüli éleken ($n-1$ darab) haladva elérhető, ezek fontossága vizsgálható. Az új módszer további előnye, hogy segítségével olyan hálózati elrendezések elemezhetők, melyek egy-egy kognitív funkció szempontjából, azok működési hatékonyságát tekintve ideálisak, így valószínűleg azok a legfontosabb megvalósításért felelős szerkezetek.

A θ -frekvenciasáv és a mentális erőfeszítés közötti kapcsolat jól ismert. *Klimesch*⁴ részletes vonatkozó elemzései óta általánosan elfogadott, hogy a θ -sávnak fontos szerepe van a hosszú távú memória fenntartásában, valamint az új információk kódolásában, így ennek elemzése jelen kontextusban megalapozottnak tekinthető.

E tanulmányban azt vizsgáltuk meg, hogy miként alkalmazható az MMF-módszer egyszerű számolási művelet során rögzített EEG-tevékenység analízisében.

Feltevésünk szerint a mentális erőfeszítés hatására erősödő hálózati kapcsolatokat mérhetünk a memória- és számolási feladatokkal egyaránt kapcsolatba hozható frontális területnek megfelelően, továbbá a vizuális ingerlés hatására occipitalisan. Ezen túlmenően feltételeztük, hogy az új elemző eljárások alkalmazásával olyan, feladat-, illetve helyzetfüggő interregionális kapcsolatváltozásokra is nyerhetők adatok, melyek korábban – módszertani okoknál fogva – nem voltak ismertek.

Módszerek

RÉSZTVEVŐK

A számolási helyzet vizsgálatában 17 egészséges, jobbkezes egyetemi hallgató (átlagéletkor: 21 év, SD: 1,696) vett részt, közülük 10 nő. A Magyar Wechsler Intelligencia (továbbiakban MAWI) -tesztrel mért átlagos intelligenciahányadosuk 119,824 (SD: 5,306). A passzív és számfelismerési helyzetben a fenti csoporttal nem átfedően 16 egészséges, jobbkezes egyetemi hallgató (átlagéletkor: 22,313 év, SD: 3,341) vett részt, közülük kilenc nő. A MAWI-tesztrel mért átlagos intelligenciahányadosuk 117 (SD: 8,066). A csoportok tagjainak korábban sem neurológiai, sem pszichiátriai betegsége nem volt. Nem szedtek olyan gyógyszert, mely az EEG-t befolyásolta volna. Visusuk normális, illetve szemüveggel megfelelően korrigált volt. A vizsgálatot a kérdésben illetékes tudományetikai bizottság engedélyezte.

VIZSGÁLATI HELYZETEK

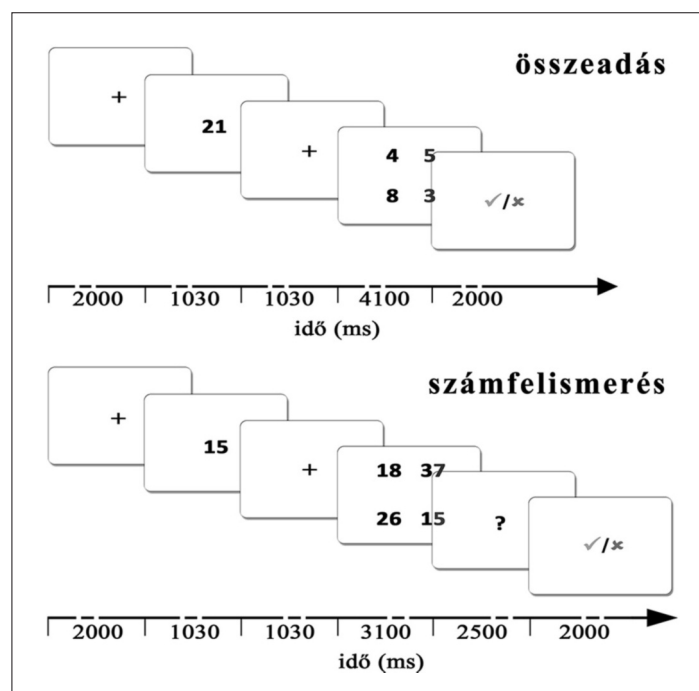
Jelen tanulmányban egy összeadási feladat elektrofiziológiai korrelátumait hasonlítottuk össze egy számfelismerési és egy instrukció nélküli, passzív megtekintési helyzet által kiváltottakkal. A vizsgált személyek kényelmes székben ültek, 2 m távolságra egy 19" átmérőjű CRT monitortól. A képernyő közepén megjelenő ingereket az alanyok 3,5°-os szögben látták. A számolási feladat kezdetén – egy 2000 ms- ideig látható fixációs keresztet követően – 1030 ms időtartamig megjelent egy kétjegyű szám (körülbelül 70×70 mm területen), melyet 1030 ms ideig mutatott fixációs kereszt váltott fel. Ezt követően négy, mátrixosan elrendezett egyjegyű szám bemutatása következett egy megközelítőleg 200×200 mm-es területen.

A feladat az volt, hogy a résztvevők jegyezzék meg az elsőként látott kétjegyű számot, majd a négy egyjegyű számot összeadva gombnyomással jelezzék, hogy az eredmény és a korábban látott (első) kétjegyű szám egyenlő-e. A válaszadásra a négy szám megjelenésétől számított maximum 4100 ms állt rendelkezésre. Minden választ visszajelzés követett, melynek során a képernyő 2000 ms időtartamra zöldre (jó válasz), vagy pirosra (rossz válasz) változott, melyet a következő blokk kezdetét jelentő kétjegyű szám bemutatása követett (**1. ábra**). A fenti próbát két blokkban, összesen 40 alkalommal ismételték meg a személyek, véletlenszerűen kiválasztott számokkal.

A fent ismertetett feladattal azonos elrendezésben bemutatva, ám minden korábban ismertetett

képernyő-pozícióban kétjegyű ingerekkel alkalmaztunk egy olyan számfelismerési feladatsort is, ahol a vizsgálati alanyoknak gombnyomással jelezniük kellett, hogy az először látott kétjegyű számot megtalálták-e a felvillanó számok között. Az összeadási és a számfelismerési feladat között az volt a különbség, hogy a számfelismerés esetében a személyek 3100 ms ideig láttak négy kétjegyű számot, melyekkel kapcsolatban – az instrukciónak megfelelően – el kellett dönteni, hogy köztük van-e a korábban látott kétjegyű szám, vagy nem. Erre a kérdésre válaszképpen a következő 2500 ms-os intervallumban kellett gombnyomással felelni, melyet a képernyő közepén felvillanó kérdőjel jelzett. A válasz helyességéről a személyek itt is visszajelzést kaptak, 2000 ms-ra a képernyő zöldre (helyes válasz) vagy pirosra (helytelen válasz) változott (**1. ábra**). Erre a helyzetre későbbiekben számfelismerésként hivatkozunk.

Eredményeinket összehasonlítottuk egy olyan



1. ábra. A feladatok során használt ingercsoportok ábrái. A kétjegyű számot 1030 ms ideig mutattuk be, majd ezt 1030 ms fixációs periódus követte. Ezután a személyek 4100 ms hosszan látták az elvégzendő műveletet, vagy 3100 ms hosszan azt a négy darab kétjegyű számot, amelyek közül ki kellett választani a korábban látott kétjegyűt. A személyeknek gombnyomással kellett jelezniük az összeadási feladat eredménye és a korábban látott kétjegyű szám közötti relációt, illetve azt, hogy felismerték-e a korábban látott kétjegyű számot a később bemutatott négy kétjegyű között (a kérdőjellel jelzett 2500 ms-nyi intervallumon). Válaszukat 2000 ms-ig zöld „pipa” (helyes), illetve piros X (helytelen) felvillanása követte

passzív kontrollhelyezettel is, amelynek elrendezése és időzítései teljesen azonosak voltak az összeadási feladatával, azonban ebben az esetben a személyek semmilyen instrukciót nem kaptak, csupán követniük kellett a felvillanó számokat. Az instrukció nélkül végignézett helyzetet minden esetben a számfelismerés követte, a számolást végző csoport más feladatot nem végzett.

EEG-ELVEZETÉS

A vizsgálat elektronikusan és akusztikusan árnyékolva, gyengén megvilágított helyiségben történt. Az EEG-t Nuamps differenciálerősítővel (Compumedics Limited; Abbotsford, VIC, Ausztrália) 1000 Hz-es mintavételezési frekvenciával, 33 elektródon, DC-70 Hz szűréssel rögzítettük. Az elvezetés a szabványos, nemzetközi 10–20-as pozícióknak megfelelően a következő elektródokkal történt: FP1, FP2, F7, F3, Fz, F4, F8, FT9, FC5, FC1, FC2, FC6, FT10, T7, C3, Cz, C4, T8, TP9, CP5, CP1, CP2, CP6, TP10, P7, P3, Pz, P4, P8, PO9, O1, O2, PO10. Földpontként az Fz és Cz elektródok között elhelyezett, referenciaként pedig az orra helyezett elektród szolgált. A szemmozgásokat a laterális szemzugokban, valamint a jobb szem felett és alatt elhelyezett elektródokkal regisztráltuk. Az elektródok impedanciáját a mérések során 5 kOhm alatt tartottuk.

ADATFELDOLGOZÁS

Viselkedéses adatok

A viselkedéses adatok elemzésekor vizsgáltuk a helyes válaszok arányát és a reakcióidőt ott, ahol a vizsgálati helyzet ezt lehetővé tette (a kontrollhelyzetben a személyeknek nem volt olyan feladata, mely erre alkalmas lehetett volna).

EEG

A feldolgozás során a kontrollhelyzetben a négy egyjegyű szám megjelenését 500 ms-mal követő 2048 ms hosszú szakaszokat elemeztük. A számfelismerési feladatban a jó válaszokat (ennek megfelelő gombnyomás, lásd fent) megelőző, a négy szám megjelenését 500 ms-mal követő, 2048 ms hosszú szakaszokat vizsgáltuk. A számolási helyzetben az aritmetikai művelet szimbólumainak (négy egyjegyű szám) megjelenését követő időperiódus került elemzésre úgy, hogy kizárólag a jó válaszokat megelőző 2048 ms hosszú szakaszokat vettük tekintetbe. Azon szakaszokat, ahol a személyek 2200 ms-nál gyorsabban válaszoltak, a további számítások-

nál nem vettük tekintetbe. Az idősorokból független komponens elemzéssel (Independent Component Analysis, ICA¹², valamint¹³) eltávolítottunk minden olyan további összetevőt, melyek műtermék-eredetűek voltak. Ezt követően FIR szűrővel, Kaiser-ablakkal (a szűrés paraméterei: 280 pont, $\beta=3,39532$) sávszűrést (θ : 4–8 Hz) végeztünk és a továbbiakban a fázisszinkronizációs alapú, gráfelméleti mutatókat vizsgáltuk (lásd később).

Az elemzések során tekintetbe vettük a teljes skalpot, valamint a jobb és bal oldal frontális, centrális, parietális, temporalis és occipitalis területeinek megfelelő elektródokat csoportonként.

Statisztika

A MAWI-mutatók és a viselkedéses adatok különbözőségét egy szempontos varianciaanalízissel vizsgáltuk.

Több szempontos varianciaanalízist végeztünk az alábbi faktorok figyelembevételével: helyzet (kontroll, számfelismerés, számolás), terület (frontális, centrális, parietális, temporalis, occipitalis) és oldaliság (bal, jobb). Ahol szükséges volt, a Greenhouse–Geisser-korrekciót alkalmaztuk: ezekben az esetekben a feltüntetett p az így korrigált értéknek felel meg. A post-hoc elemzést Tukey HSD-tesztel végeztük. A viselkedéses adatok két feladat közötti összehasonlítását egy szempontos varianciaanalízissel végeztük.

A minimális feszítő fák módszere

Kutatócsoportunk korábban az *Ideggyógyászati Szemlében* részletes áttekintést közölt¹⁰ az egyszerűbb gráfelméleti mutatók számításával kapcsolatban. A szubjektív elemként értelmezhető átlagos elektródokra vetített kapcsolatszám megválasztásának problémája miatt olyan új módszereket kerestünk, melyek alkalmasak az elektrofiziológiai eredményekből képzett gráfok hierarchikus vizsgálatára és feloldják a küszöböléssel kapcsolatos említett nehézséget. A jelen tanulmányban a gráfelméleti számításokat PLI-vel⁶ (phase lag index; a számítás részletei megegyeznek a korábbi közleményünkben¹⁰ ismertettekkel) súlyozott gráfok vizsgálatára alapoztuk, és a minimális feszítő fák (MFF) módszerét alkalmaztuk¹¹.

Az eljárás során a PLI-vel súlyozott, összefüggő gráfból a Kruskal-algoritmussal¹¹ létrehozunk a minimális feszítő fát, amely n csúcs között n–1 kapcsolatot reprezentál.

Az MFF mutatói között fontos jellemző a gráf csomópontjainak kiinduló (vagy befutó) élek száma, mely a foksám és a csomópontok fontosságá-

ra reflektál. Egy meghatározott csúcson, vagy élen átfutó legrövidebb utak hányada a *központosság* (*betweenness centrality, BC*). A gráf átmérője a benne megtalálható két legtávolabbi csomópont közötti legrövidebb út, mely elsősorban a hálózat integrációjának mutatója. Az excentricitás egy referencia-csúcsból bármely másik csúcsba futó legtöbb élből álló legrövidebb út, értelmezése az átmérőhöz hasonló. Az úgynevezett levelek (az egy szomszédal bíró csúcsok) számának növekedése bizonyos csomópontok körüli csoportosulások kialakulására utal. A jelen vizsgálatban a teljes gráf csúcsainak számával normált arányokat adjuk meg az egyes mutatók értékeiként.

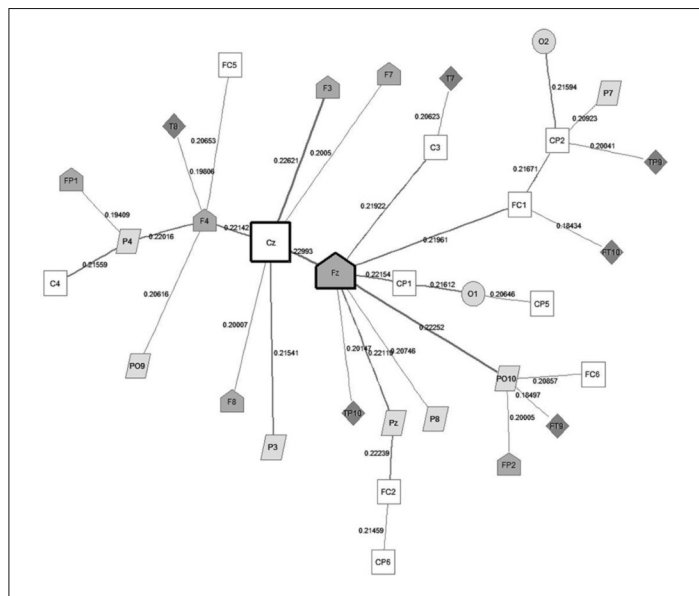
Eredmények

A viselkedéses mutatók elemzése alkalmával a helyes válaszok arányát tekintve szignifikáns feladat főhatást találtunk [$F(1, 31)=73,838, p>0,001; \eta^2=0,704$]: a számfelismerési feladathoz képest az összeadási feladat végzése közben jelentősen csökkent a jó válaszok száma. A válaszüti vizsgálatakor szignifikáns feladat főhatást találtunk [$F(1, 31)=862,04, p<0,001; \eta^2=0,965$], melynek során szignifikánsan növekedett a válaszüti feladat során a számfelismerési feladathoz képest.

Az MFF számítható mutatóinak kvantitatív elemzése előtt kísérletet tettünk az egyes feladathelyzetek során rögzített tevékenységből az MFF ábrázolására is. Az instrukció nélküli helyzet során (2. ábra) egy frontális-centrális központokkal bíró, egyenletesen elosztott élsúlyokkal rendelkező hálózatot találtunk. A számfelismerési feladat hatására hasonló központokkal bíró hálózatot figyeltünk meg, ahol a feladatvégzés hatására a frontális területekhez kötődő kapcsolatok felerősödtek (3. ábra). A számolási feladathelyzet során, a korábbiakhoz hasonlóan frontális központokat és a régióban tovább erősödő kapcsolatokat észleltünk (4. ábra).

Az MFF kvantitatív mutatóinak statisztikai elemzése során a BC-paraméterben szignifikáns terület \times feladat interakciót találtunk [$F(8, 184)=3,227, p=0,002; \eta^2=0,123$], melyet a szignifikáns feladat [$F(2, 46)=4,997, p=0,011; \eta^2=0,178$] és területi [$F(4, 184)=2,462, p=0,047; \eta^2=0,05$] főhatás magyarázott. A területi változásokat vizsgálva tendenciaszerű emelkedést találtunk occipitalisan a parietalis ($p=0,069$) és a temporalis ($p=0,062$) területekhez képest. A feladat hatását vizsgálva a kontrollhoz képest szignifikáns mértékben ($p=0,012$) csökkenő BC-értéket találtunk a feladathelyzet során.

A fokszám vizsgálata során szignifikáns terület



2. ábra. Az ingersorok feladat nélküli megtekintése során felrajzolható MFF ábrája. Az ábrán az összes elektród (csomópontok) fel van tüntetve, a köztük lévő legerősebb 32 kapcsolattal. Az egyes elektródok elnevezései szabványosak, az azokat befoglaló síkidomok (és ezek szürkeárnyalatai) megfelelnek az egyes ROI-knak: frontális (ötszög); centrális (négyzet); parietalis (rombusz); temporalis (deltoid); occipitalis (kör). Az ábrán feltüntetettük még a legtöbb kapcsolattal bíró csomópontokat (nagyított síkidomok vastag, fekete kerettel) és a kapcsolatokat, melyek erősségét az utakat jelképező vonalak vastagsága reprezentálja. Az MFF topográfiai információk nem szerepelnek. A passzív feladathelyzet során frontális-centrális csomópontokkal bíró, egyenletesen súlyozott hálózatot találtunk

\times feladat interakciót találtunk [$F(8, 184)=3,472, p<0,001; \eta^2=0,131$], melyet a szignifikáns területi [$F(4, 184)=14,406, p<0,001; \eta^2=0,238$] főhatás magyarázott. Ezt tovább elemezve a feladat jellegétől függetlenül a frontális, temporalis és occipitalis régiókban, a centrális és parietalis területekhez képest szignifikánsan magasabb ($p<0,001$ mindenhol) fokszámot találtunk.

Az átmérőben szignifikáns feladat főhatást találtunk [$F(2, 46)=5,301, p=0,008; \eta^2=0,187$], melyben a feladat hatására szignifikáns mértékben csökkent a gráf átmérője a passzív ($p=0,01$) és a számfelismerési ($p=0,046$) helyzethez képest is.

Az excentricitást tekintve szignifikáns feladat főhatást találtunk [$F(2, 46)=4,917, p=0,011; \eta^2=0,176$]: a feladat hatására szignifikáns mértékben csökkent a gráfban mérhető excentricitás a passzív ($p=0,016$) és a számfelismerési ($p=0,046$) helyzethez képest is.

A levelek arányában szintén szignifikáns feladat főhatást találtunk [$F(2, 46)=13,057, p<0,001; \eta^2=0,362$]: a feladat hatására szignifikáns mérték-

sabb BC-értékeket mértünk, mint a többi területnek megfelelően. Az occipitalisan jelentkező BC-többlet a vizuális feladatmegoldás (arab számok feldolgozása) folyamataira reflektálhat (például¹), mely csak a számolási helyzetben csökkent számottevően. Utóbbi csökkenés viszont nem alulműködést jelöl, hanem a frontális túlsúlyra, melyre a gráf ilyen módon, a súlyozás megváltoztatásával reflektált. A számolási feladatok végzése során megjelenő frontális túlsúlyt már több közlemény is tárgyalta, mely a vizsgálat típusától függően jelentkezhett EEG-teljesítménytöbbletben¹⁰, vagy aktivációnövekedésben is¹.

A fokszám az egyes csomópontok szomszédjainak számát adja meg, mely így lokális összeköttetésekre reflektál. A fokszám a BC-értékét jól kiegészíti, a két mutató együtt értelmezhető. A minimális feszítőfára vetített fokszámot tekintve szignifikáns területi főhatást tapasztaltunk. Ezt tovább elemezve azt találtuk, hogy a centrális és parietális régiókhoz képest a fokszám jelentősen nőtt a frontális, temporális és occipitalis területeken. A frontális és temporális területeken észlelt fokszámemelkedés a (munkamemóriát igénybe vevő) feladat által kiváltott lokális klaszterek létrejöttére utal, mely végső soron szinkronizációnak tekinthető. *Langer* és munkatársai³ a munkamemóriával összefüggő frontoparietális aktivációváltozásokról számoltak be, mely folyamatok hatása e feladatokban, illetve az eredményekben is valószínűleg megjelenik.

Az átmérő alatt itt a teljes hálózatot értelmeztük, legtöbb élből álló legrövidebb utat értjük, arányosítva az összes csúcs számához. Ez a gráf legtávolabbi pontjai közötti távolságok mérőszáma, ahol a távolság az ugrások számát jelöli, és nem valódi hossz mérték. Az ugrásokat itt azon éleknek kell tekintenünk, amelyeken keresztül haladva elérünk a gráf egyik csomópontjából a másikba. Ha tehát egy gráfban az átmérő egyik feladathelyzetről a másikra csökken, akkor ez azt jelenti, hogy olyan utakon keresztül vált elérhetővé egy távoli csúcs, melyek korábban nem álltak rendelkezésre (tehát a feladatvégzésbe köztes területek is beléptek, vagy közvetlen huzalozottság jött létre). A kontroll- és a számfelismerési helyzethez képest is szignifikánsan csökkent az átmérő a feladathelyzet során. Ez utal a rendezettség „small world” típusú hálózatok irányába való eltolódására, mely itt a korábbi eredményekhez hasonlóan, a feladathelyzet során igénybe vett nagyobb erőforrások feladatvégzésbe való bekapcsolódásának hatása. Emellett a csökkenés a számolási feladattal megjelenő nagyobb mentális igénybevétellel volt párhuzamba állítható, mely megfeleltethető a korábbi irodalmi adatoknak.⁹

Az excentricitás egy rögzített csúcshoz képest adja meg a legtöbb élből álló legrövidebb utak éleinek számát. Ez a mérőszám az átmérő kiegészítője, ugyanis ott a leghosszabb utat vizsgáltuk, míg az excentricitás minden csomóponttra megadja a hozzá képest legmesszebb eső másik csomópontba jutás úthosszát. A mutató vizsgálata során kisebb mértékű excentricitást találtunk a feladathelyzetben, mint a passzív megtekintés, vagy a számfelismerés során. Ez azt jelenti, hogy a gráf minden csomópontján rövidült a tőle legtávolabbi másik pontba vezető út, esetleg nőtt az egy csomópont köré csoportosuló levelek száma. Mindkettő önmagában is növekvő szinkronizációt és „small world” jellegű karakterisztikát jelent¹⁰.

A hálózaton belül a leveleken azokat a csomópontokat értjük, melyeknek pontosan egy olyan szomszédjuk van, amellyel összeköttetésben állnak. Ha egy hálózatban nő a levelek aránya, az azt jelenti, hogy csoportosulás alakul ki bizonyos csomópontok körül, mely a hálózat szinkronizációjának erősödésére utalhat. A levelek aránya a számolási feladathelyzet során ugrásszerűen növekedett meg a passzív és a számfelismerési helyzethez képest, mely valószínűleg a feladathelyzet hatására bekövetkező szinkronizációnövekedés következménye^{9, 10}.

Természetesen az alkalmazott feladatok több más funkció működését is indukálják, ilyenek a vizuális percepció, a döntéshozatal, vagy a motoros képességek. Kísérleti elrendezéseinkkel és az elemzett szakaszok, valamint a vizsgálati paraméterek megválasztásával igyekeztük ezek hatásait minimálisra csökkenteni. Elemzésünk kiterjeszhető volna több más frekvenciatartományra is (például β , γ) és a köztük fennálló interakciók tekintetbevételére.

Eredményeinkből kitűnik, hogy az MFF módszer hatékonyan képes reprezentálni olyan kismértékű hálózati állapotváltozásokat is, amelyet például a nehezedő feladathelyzet okozott. Valószínűsíthető ezért, hogy – megfelelő kontrollkörülmenyek biztosításának függvényében – a módszer alkalmas lehet olyan klinikai jellegű kérdések elemzésére, mint például demenciával járó kórképek esetén a folyamat progressziójával járó hálózati átrendeződések követése. A hálózati struktúra átrendeződésének elemzése nagy jelentőséggel bírhat olyan neurológiai betegségek követésénél, mint például az Alzheimer-kór⁸. Az MFF-módszerrel nyert adatok használhatók lehetnek olyan állapotok vizsgálatakor, amikor a demenciára utaló panaszok még csak szubjektív zavaró elemként jelennek meg, de kórfolyamat iránya még eldöntetlen. Ilyen kérdéseket vet fel az enyhe kognitív zavar stabil, illet-

ve Alzheimer-kórba konvertáló formájának potenciális korai elkülönítésének lehetősége, melyben a gráfelméleti EEG-elemzés eredménye esetleges biomarkerként értékesíthető adatokkal szolgálhat¹⁴. Mindemellett a regionálisan elkülöníthető változások követése használhatóvá teszi például az epilepsziás góckutatás során¹⁵, melyet a módszer kis szá-

mítási igénye mellett könnyen értelmezhető formában megjelenített eredményei is elősegítenek.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmány az OTKA 77750 és az OTKA K104332 támogatásával készült. A szerzők köszönik Várkonyi Emese asszisztensi munkáját.

IRODALOM

1. Dehaene S, Molko N, Cohen L, Wilson AJ. Arithmetic and the brain. *Curr Opin Neurobiol* 2004;14(2):218-24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conb.2004.03.008>.
2. Rosenberg-Lee M, Chang TT, Young CB, Wu S, Menon V. Functional dissociations between four basic arithmetic operations in the human posterior parietal cortex: a cytoarchitectonic mapping study. *Neuropsychologia* 2011;49(9):2592-608. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.04.035>.
3. Langer N, von Bastian CC, Wirz H, Oberauer K, Jäncke L. The effects of working memory training on functional brain network efficiency. *Cortex* 2013;49:2424-38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cortex.2013.01.008>.
4. Klimesch W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Res Brain Res Rev* 1999;29(2-3):169-95. [http://dx.doi.org/10.1016/S0165-0173\(98\)00056-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-0173(98)00056-3)
5. Varela F, Lachaux JP, Rodriguez E, Martinerie J. The brainweb: phase synchronization and large-scale integration. *Nat Rev Neurosci* 2001;2(4):229-39. <http://dx.doi.org/10.1038/35067550>.
6. Stam CJ, Nolte G, Daffertshofer A. Phase lag index: assessment of functional connectivity from multi channel EEG and MEG with diminished bias from common sources. *Hum Brain Mapp* 2007;28(11):1178-93. <http://dx.doi.org/10.1002/hbm.20346>.
7. Watts DJ, Strogatz SH. Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature* 1998;393(6684):440-2. <http://dx.doi.org/10.1038/30918>
8. Stam CJ, de Haan W, Daffertshofer A, et al. Graph theoretical analysis of magnetoencephalographic functional connectivity in Alzheimer's disease. *Brain* 2009;132(Pt 1):213-24. <http://dx.doi.org/10.1093/brain/awn262>.
9. Dimitriadis S, Laskaris N, Tsirka V, Vourkas M, Micheliyannis S. What does delta band tell us about cognitive processes: a mental calculation study. *Neurosci Lett* 2010;483(1):11-5. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neulet.2010.07.034>.
10. Boha R, Tóth B, Gaál Zs A, Kardos Z, File B, Molnár M. Számolási teljesítmény spektrális, fázisszinkronizációs és gráfelméleti EEG-jellemzői. *Ideggyogy Sz* 2013;66:175-83.
11. Tewarie P, Hillebrand A, Schoonheim MM, et al. Functional brain network analysis using minimum spanning trees in Multiple Sclerosis: an MEG source-space study. *Neuroimage* 2014;88:308-18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.10.022>.
12. Delorme A, Makeig S. EEGLAB: An open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *J Neurosci Methods* 2004;134(1):9-21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jneumeth.2003.10.009>.
13. Mognon A, Jovicich J, Bruzzone L, Buiatti M. ADJUST: An automatic EEG artifact detector based on the joint use of spatial and temporal features. *Psychophysiology* 2010;1-12. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8986.2010.01061.x>.
14. Tóth B, File B, Boha R, et al. EEG network connectivity changes in mild cognitive impairment – Preliminary results. *Int J Psychophysiol* 2014;92(1):1-7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2014.02.001>
15. Horstmann MT, Bialonski S, Noennig N, et al. State dependent properties of epileptic brain networks: Comparative graph-theoretical analyses of simultaneously recorded EEG and MEG. *Clin Neurophysiol* 2010;121(2):172-85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clinph.2009.10.013>.