

TEHETSÉG ÉS IDEGTUDOMÁNY: ADATOK A KREATIVITÁS ÉS A MATEMATIKA TERÜLETÉRŐL

CZIGLER ISTVÁN¹ – CSIZMADIA PETRA^{1,2} – NAGY BOGLÁRKA^{1,2} –
GAÁL ZSÓFIA ANNA¹

¹Természettudományi Kutatóközpont Kognitív Idegtudományi és Pszichológiai Intézet

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Természettudományi Kar,
Pszichológia Doktori Iskola

E-mail: czigler.istvan@ttk.hu

Beérkezett: 2020. november 13. – Elfogadva: 2021. január 17.

A tanulmány a tehetséghez kapcsolódó két terület, a kreativitás és a matematikai tehetség idegtudományi kutatásait foglalja össze. Mind a két területen az első megközelítések a két agyfélteke feltételezett eltérő működését hangsúlyozták, és alapvető módszerként az elektroencefalogram frekvencia-összetevőinek változását elemezték az éppen előtérben lévő elméleti általánosítások függvényében. Fokozatosan dominálóná váltak a hálózati elemzéseken alapuló munkák, melyek egyaránt támaszkodtak elektrofiziológiai és képalkotási eredményekre. A kreativitás témakörében a legnagyobb problémát az idegtudományi kutatásokban is a kreativitás körülvevő bizonytalanság jellemzi. A matematikai tehetség esetében a résztvevők teljesítménye könnyebben hozzáférhető, azonban a kiemelkedő tehetségek sajátosságait vizsgáló kutatások ezen a területen is a kezdeteknél tartanak. Közös a két területben, hogy alapvetőnek tartja a frontális területek, a parietális és esetenként a szenzoros területek hatékony kapcsolatát. Ugyanakkor naivitásnak tűnik, hogy akár a kreativitás, akár a matematikai tehetség esetében specifikus strukturális elrendezéseket vagy mechanizmusokat találjunk.

Kulcsszavak: *kreativitás, matematikai tehetség, elektrofiziológia, idegrendszeri mechanizmusok*

BEVEZETÉS

Neumann János, Rippl-Rónai József, Papp László, Esterházy Péter, Bartók Béla, Polgár Judit, Rubik Ernő: ha lenne megfelelő módszerünk, vajon találánk-e valami közöset, ami megkülönböztetné őket a népességből vett véletlen mintától? Biztos választ a kérdésre nem lehet adni, már azért sem, mert a kérdés rossz. Mikor is végeznénk a vizsgálatot? Amikor a résztvevők éppen nem csinálnak semmit (van ilyen?), amikor éppen a szakmájukat művelik (legyen ez egy matematikai probléma, az ellenfél elleni taktika kidolgozása, egy benyomás Piacsek bácsiról és így tovább), vagy éppen akkor, amikor valami egészen mást csinálnak, mint amiben kiválóak? Ha mégis feltesszük, hogy a válasz „igen”, hol várhatjuk az eltérést? A legtágabb értelemben vett megismerési folyamatok területén, a motivációs működésekben, talán eddig ismeretlen folyamatokban (ha vannak ilyenek), melyek értékválasztásokhoz köthetők? Ha nem sci-fi-írók vagyunk, és valamelyest ismerjük eszközeink lehetőségeit, a közös és megkülönböztető sajátosságokkal kapcsolatos kérdésekre az intuitív válasz inkább a „nem”, a tudományos válasz pedig a „fogalmunk sincs”. Talán nem a valóságtól elrugaszkodott az a lehetőség (mely nem idegen a szakma felfogásától), hogy a kiváló teljesítményt olyan működések, folyamatok kölcsönhatása alapozza meg, melyekben *talán* van valami közös, de területről területre is változik, így egyetlen összetevő önmagában keveset mond, legjobb esetben „szükséges, de nem elégséges” feltétel. További nehézség, mint számtalan más területen is, hogy a pszichológiai és idegtudományi kategóriák összeillesztése egyáltalán nem könnyű, és nemritkán a kutató hiedelmein, önbizalmán (pl. tudja, hogyan működik az agy) vagy elfogultságán alapul.

Amit intelligenciának mondunk, valószínűleg több területen lényeges feltétel. Ugyanakkor az intelligencia mibenléte köztudottan vitatott: van-e g-faktor, ha igen, ez statisztikai termék vagy valódi entitás, és akár így, akár úgy, mi a g-faktoron kívüli intelligencia? Az intelligenciával kapcsolatosan természetesen lehetőség van a pszichológia egyik legcinikusabb közhelyének használatára: „Intelligencia az, amit az intelligenciatesztek mérnek.” (De melyik?) Így leszűkítve a kérdést (pl. Raven-teszt), a Web of Science a {(Raven) AND (fMRI OR ERP OR “event-related-potential” OR EEG)} keresésre már 126 egységet ad ki, amiből kiindulva akár összefoglalás is írható. A jelen tanulmány tárgya azonban ennél szűkebb.

Kiindulhatnánk egy, a köznapihoz közel álló gondolkodásból: a tehetséges ember *okos* (lásd az előző bekezdést), gondolkodása rugalmas, de nem szétszórt, eltökélt, területét ismeri, és ezen a területen felismeri a lényegét. Így – az intelligencia mellett – jól működik nála a kontroll- (végrehajtó) rendszer, az észlelés (beleértve a figyelmi szelektivitást, de ugyanakkor az információfelvétel szélesebb sávját is), és még az érzelmi rendszere is (pl. önkontroll vagy ennek ellentéte). Ha ugyanezt idegrendszeri terminológiában írjuk le, szerepelne a prefrontális és parietális lebeny, specifikus perceptuális területek, például a temporális és okcipitális lebeny, a bazális előagyi struktúrák, a cinguláris kéreg, a mediális temporális kéreg, az amygdala stb., azaz *szinte az egész agy*, és nem melleleg a kapcsolatok rendszere e területek között. Mindez együtt a fentebb írottakkal (milyen helyzetben történjek a vizsgálat, mit és hogyan vizsgáljunk) arra ösztönöz, hogy a feltehető kérdéseket alaposan korlátozzuk. Végül egy további kérdés: *Kik is a vizsgálat résztvevői?*

Az első mondatban különböző területek kiválóságait soroltuk fel. Mint látni fogjuk, a kreativitás területén megfogalmazzák a „Nagy-C és kis-c”, különbségét, az előbbi

utal a kimagasló kreatív teljesítményekre, az utóbbi pedig valamiféle (vélt vagy valódi) mindennapi kreativitásdimenzióban elfoglalt pozícióra. A tanulmányban két területtel foglalkozunk, a kreativitással és a matematikai tehetséggel. A kreativitás mibenlétével, definíciójával kapcsolatban (mint a pszichológia legtöbb területén) nincs szakmai egyetértés. Mindazonáltal léteznek elterjedt eljárások, melyekkel a kreativitás több vonatkozása értékelhető. Az idegtudományi vizsgálatok száma e területen tetemes, és e vizsgálatok többsége a kreativitást hasonló módon jellemezte. A tanulmány második része a matematikai tehetséggel foglalkozik, ami lényegesen szűkebb terület, és ennek megfelelően a vizsgálatok száma is kisebb. E témakör előnye, hogy itt a tényleges teljesítmény viszonylag megbízhatóan mérhető. A ma ismert humán idegtudományi módszereket ez a témakör is felhasználta.

A KREATIVITÁS VIZSGÁLATA A KOGNITÍV IDEGTUDOMÁNYBAN

A kreativitás az egyik legizgalmasabb emberi képesség, amely nagyban hozzájárult civilizációnk fejlődéséhez. Jelentőségének megfelelően kutatása több évtizedre nyúlik vissza, ennek ellenére a mai napig nem sikerült megfogni a folyamat lényegét, nem tudjuk pontosan definiálni mi is áll mögötte. A leggyakrabban használt meghatározás szerint (Guilford, 1950) a kreativitás az a folyamat, melynek során olyan ötletek, problémamegoldások, „termékek” születnek, amelyek két kritériumnak is megfelelnek: újak (eredetiek), és megfelelnek a céljuknak (megvalósíthatók és potenciálisan hasznosak).

Ezek a szempontok felvetik a kérdést, hogy mi is számít eredetinek vagy megfelelőnek egy célra. Ez korszakonként, illetve kultúránként is változhat (például Van Gogh csak a halála után lett világhírű festő, vagy gondoljunk a japán nó színházra, amely európai szemmel kevésbé érthető meg), így nincs objektív eszközünk ennek mérésére, ezért a legmegbízhatóbb értékelési mód, ha az adott terület szakértői ítélik meg (pl. Amabile, 1982). Bár ezen a területen is inkább egységes tesztekkel igyekeznek megállapítani a személyek kreativitását, ebben sok fejlődés nem történt az elmúlt évtizedekben, a mai napig leggyakrabban használt kreativitást mérő teszteket még a 60-as években alakították ki. Ezek a Szokatlan Használat Teszt (Alternative Uses Test, AUT, Guilford, 1967), a Távoli Asszociációk Tesztje (Remote Associates Test, RAT, Mednick, 1962) és a Torrance-teszt (Torrance Test of Creative Thinking, TTCT, Torrance, 1966), amelyeknek valamilyen adaptációját alkalmazzák gyakran az idegtudományi kutatásokban is. Sokszor a kreativitást területáltalános és nem területspecifikus képességként kezelik, és a kutatásokban nem definiálják egyértelműen, melyik domént (területet) is vizsgálják, ami több esetben is megkérdőjelezheti az eredmények hasznosságát (pl. Baer, 2010). Az elkülönítés indokoltságát jelzi például, hogy művészek esetén a kreativitás pozitív korrelációt mutat a pszichiátriai rendellenességekkel, míg ilyen összefüggés nem figyelhető meg a tudósok esetén (Kaufman, 2001). Ráadásul a kreativitástréningekkel is csak területspecifikus javulást lehet elérni (Dow és Mayer, 2004). Bár a kreativitás egyes komponensei több doménen is átívelhetnek, mint a divergens gondolkodás, intrinzik motiváció, élményekre való nyitottság, a kétértelműség tolerálása vagy a szakértelem, végül nem kerülhető el, hogy definiáljuk, melyik területen milyen szakértelemről is van szó (Baer, 2015) – például Einstein kreativitását valószínűleg nem valamilyen vizuális teszten elért eredményével jellemeznénk.

A kreativitás sokféle nézőpontból vizsgálható. Fókuszálhatunk a zsenikre (Nagy-C), vagy vizsgálhatjuk a mindennapokban egy-egy átlagos személy kreativitását (kis-c, Simonton, 1994, vagy beszélhetünk mini-c-ről és Pro-c-ről is, Kaufman és Beghetto, 2009), továbbá az egyéni szint helyett koncentrálhatunk a kreativitás szociokulturális aspektusára (Glavenau, 2010). A kognitív személyiség- és szociálpszichológiának, de még a genetikának is megvan a saját álláspontja arról, mi tesz egy személyt kreatív-
vá. Ebben a tanulmányban abból indulunk ki, hogy a kreativitás a humán kognitív folyamatok – az emlékezet különböző formái, figyelem, problémamegoldás és végrehajtó funkciók – komplex összjátékának eredményeként jön létre. Bár a kreativitás definíciója alapvetően a kimenetre koncentrál, a „termék” (pl. egy vers, zenemű, de akár egy új recept) kreativitását ítéli meg (pl. Piffer, 2012, szerint egy személy kreativitását a produktumai kreativitásának összege adja meg), mi a folyamatra vagyunk kíváncsiak, arra, hogy milyen kognitív működés, illetve mely agyterületek milyen típusú együttműködése tesz minket kreatívvá. Összefoglalónknak nem célja a kreativitás átfogó szakirodalmi bemutatása, itt kifejezetten az idegtudományi eredményekre és az azokat megalapozó kísérletekre koncentrálunk.

Mint említettük, az idegtudományban alkalmazott feladatok többsége a legnépszerűbb tesztek (TTCT, AUT, RAT) adaptációja erre a speciális helyzetre, tekintve, hogy az idegtudományi eljárásoknak megvannak a saját módszertani igényei. Például az fMRI-kísérleteknél nagyon fontos szempont, hogy megfelelő kontrollhelyzetet találjunk ahhoz, hogy a két helyzet különbségként rátaláljunk azokra az agyi régiókra, melyek ténylegesen a kreativitásért és nem egyéb folyamatokért felelősek. Ennek megfelelően összehasonlíthatunk olyan feladatokat, melyek hasonló kognitív folyamatokat érintenek, de az egyik igényli a kreativitást, a másik pedig nem, vagy összehasonlíthatjuk az azonos feladatban kapott kreatív és kevésbé kreatív ötletek alatt mért agyi tevékenységet, esetleg megnézhetjük, miben tér el a kreatív és kevésbé kreatív személyek agyi aktivitása.

Az idegtudományi kutatások számos olyan módszertani megkötetést tartalmaznak, melyek megnehezítik a kreativitás vizsgálatát. Ilyenek például a kevés inger tartalmazó, a laikus számára szokatlan laboratóriumi környezet, az, hogy a műtermékeket elkerülendő nem szabad mozogni a mérés alatt, nagy az idői nyomás a résztvevőkön a feladat befejezésére (pár másodperctől egy-két percig), a technikából adódóan nagyszámú ismétlés fordulhat elő, illetve az fMRI-nél nagy a háttérzaj, vagy esetleg a hideg, a bezártság okozhat nehézséget a résztvevőknek. Mindezek miatt a leggyakrabban használt feladatok, ahogy azt a későbbiekben részletezzük, a kreatív folyamat egy-egy aspektusára összpontosítanak csak (pl. konvergens vs. divergens gondolkodás).

A kreativitás vizsgálata EEG-vel

Az alfa sáv teljesítménye és a kreatívötlet-generálás folyamata

A kreativitás vizsgálata az EEG módszerével néhány kivételtől (Martindale és Hasen-
fus, 1978; Martindale és Hines, 1975; Martindale, Hines, Mitchell és Covello, 1984) el-
tekintve lényegében az 1990-es évek végétől kezdett elterjedni. A kreativitás elektrofi-

ziológiai korrelátumainak azonosítására leggyakrabban az EEG-oszcillációk elemzését használják (frekvenciaanalízis, teljesítményspektrum, koherencia), míg az eseményhez kötött potenciál (EKP) technika alkalmazása lényegesen ritkább (pl. Dietrich és Kanso, 2010; Rutter és mtsai, 2012a, Stevens és Zabelina, 2019). A kreativitást vizsgáló EEG-t alkalmazó tanulmányok eredményei meglehetősen változatosak, gyakran ellentmondásosak, az alkalmazott paradigmák sokfélesége, a különböző kreativitásteszték és eltérő módszerek alkalmazása megnehezíti összehasonlításukat, amely problémákra több összefoglaló is rávilágít (pl. Arden, Chavez, Grazioplene és Jung, 2010; Dietrich és Kanso, 2010; Sawyer, 2011; Runco és Yoruk, 2014). Mindezen nehézségek ellenére az EEG-vizsgálatok egyik legkonzisztensebb eredménye az EEG alfa sáv és a divergens gondolkodás, illetve a kreatívötlet-generálás kapcsolata: az alfateljesítmény megnövekszik a kreatívötlet-generálás során, főként a prefrontális és (jobb) poszterior parietális területeken (Benedek, 2018a; Benedek, 2018b; Fink és Benedek, 2014; Stevens és Zabelina, 2019).

Széles körben elfogadott, hogy a divergens gondolkodás (DT – divergent thinking) képessége hasznos jelzője a kreatív potenciálnak (Runco és Acar, 2012), és mivel a kreativitás komplex konstrukció, amit nehéz objektíven és mennyiségileg meghatározni, ezért a legtöbb tanulmány a divergens gondolkodást mint a kreativitás egy kulcsfontosságú folyamatát tekinti a kreativitás indikátorának. (Megjegyzendő, hogy habár a kreativitás laboratóriumi vizsgálatában általánosan elterjedt a divergens gondolkodást mérő tesztek használata, az, hogy a mindennapi kreatív teljesítményt is megjósolják-e, megkérdőjelezhető, pl. Zabelina és Ganis, 2018). A divergens gondolkodást nyitott végű (open-ended) feladatokkal vizsgálják, melyeknek több eltérő eredetiségű megoldása is lehetséges, ezért számos tanulmány azonosítja a divergens gondolkodást a kreatívötlet-generálás folyamatával (Fink és Benedek, 2014; Benedek, 2018a). A leggyakrabban alkalmazott DT-feladat a Szokatlan Használat Teszt (Guilford, 1967), amelyben a résztvevő feladata, hogy egy hétköznapi tárgyhoz (pl. téglá) minél több eredeti felhasználási lehetőséget soroljon fel. A leggyakrabban mért változók a fluencia (a generált válaszok száma), az originalitás (a válaszok eredetiségének mértéke) és a flexibilitás (a használt kategóriák vagy témák száma), amely változók tükrözik a személy képességét a kreatív ötletek megalkotására.

Martindale és munkatársai az elsők között figyelték meg nagyobb alfateljesítményt kreatívabb személyeknél, mint a kevésbé kreatívoknál (Martindale és Hines, 1975), továbbá azt találták, hogy az alfateljesítmény nagyobb egy történet kitalálása közben, mint az elaboráció, azaz a történet leírása során (Martindale és Hasenfus, 1978). Azóta számos tanulmány megerősítette ezeket az eredményeket, illetve hasonlókat találtak, melyek konzisztensen azt mutatják, hogy az EEG-alfasáv-aktivitás többféle szempontból is érzékeny a kreativitásra (Benedek, 2018a). A továbbiakban néhány ilyen eredményt mutatunk be.

A feladatok kreativitásigénye hatással van az alfateljesítményre – minél nagyobb kreativitást igényel, annál nagyobb alfaszinkronizáció figyelhető meg (pl. Fink, Benedek, Grabner, Staudt és Neubauer, 2007; Jauk, Benedek és Neubauer, 2012). Jauk és munkatársai (2012) vizsgálatának célja az agyi aktivitás megkülönböztetése volt a konvergens és a divergens gondolkodásmóddal kapcsolatban ugyanazon a feladaton belül. A tanulmány résztvevői AUT-feladatot és szótársítási feladatokat hajtott

tak végre, miközben vagy gyakori, tipikus válaszok (konvergens kondíció), vagy nem gyakori, eredeti, kreatív válaszok (divergens kondíció) generálására utasították őket. A konvergens feltétel mindkét feladatban az alfaterjesztmény sokkal erőteljesebb deszinkronizációját eredményezte, mint a divergens feltétel, ami inkább az alfaterjesztmény szinkronizációját mutatta a frontális kérgi területeken.

Az alfaterjesztmény nagyobb az eredeti ötletek generálása során, mint a gyakori ötletek esetén (pl. Fink és Neubauer, 2006; Grabner, Fink és Neubauer, 2007; Schwab, Benedek, Papousek, Weiss és Fink, 2014). Grabner és munkatársai (2007) az alfaterjesztményt az ötletek eredetisége alapján (a résztvevők saját értékelésére támaszkodva) vizsgálták. Szignifikáns hatást az alsó alfa sávban (8–10 Hz) találtak, az eredetibb ötletek előállítása nagyobb jobb féltekei alfaszinkronizációt mutatott, mint a kevésbé eredeti ötletek generálása, a bal agyféltekében viszont nem találtak különbségeket az ötletek eredetisége alapján.

Az alfaterjesztmény nagyobb a kreatív személyeknél a kevésbé kreatívokhoz képest (pl. Martindale és Hines, 1975; Fink és Neubauer, 2008; Fink és mtsai, 2009). Fink és munkatársai (2009) vizsgálatuk résztvevőit az AUT-feladat során generált ötleteik eredetisége alapján kevésbé kreatív és kreatívabb csoportokba osztották. A kreatívötlet-generálás viszonylag magas feladathoz kapcsolódó alfa- (10–12 Hz) szinkronizációt eredményezett a frontális régiókban. Megmutatkozott továbbá a hátsó parietális agyi régiók szerepe is, amikor összehasonlították a csoportokat: a kreatívabb személyek az alfaterjesztmény tekintetében viszonylag nagy féltekei aszimmetriát mutattak, a jobb oldalon magasabb feladattal kapcsolatos alfaszinkronizációval, mint a bal féltekében. A kevésbé kreatív személyeknél nem mutatkoztak féltekei különbségek.

A fentiekben túl olyan eredmények is születtek, melyek azt mutatják, hogy az alfaterjesztmény a kreatívötlet-generálás során a kreatív folyamat szakaszának függvényében változik (pl. Schwab és mtsai, 2014; Rominger és mtsai, 2018; Rominger és mtsai, 2019), vagy hogy az alfaterjesztmény fokozódása figyelhető meg kreativitástréningek hatására (Benedek, Fink és Neubauer, 2006), akár már rövid, a kreatív teljesítmenyt növelő beavatkozások után is (Fink, Schwab és Papousek, 2011).

Összességében tehát a divergens-konvergens feladatok vagy kreatív-kevesbé kreatív személyek/termékek összehasonlítása során arra a következtetésre juthatunk, hogy a kreativitás megnövekedett alfaszinkronizációval jár együtt a frontális és a jobb oldali parietális régiókban.

Az alfaterjesztmény funkcionális szerepe és jelentése

Kezdetben, annak a gyakori megfigyelésnek köszönhetően, hogy a legtöbb kognitív feladat végrehajtása alfadeszinkronizációt (ERD) eredményezett – a feladat alatti alfaterjesztmény csökkenését a feladat előtti szinthez hasonlítva –, az eseményhez kötött alfaszinkronizációról (ERS) általánosan úgy gondolták, hogy az adott régió neuronális hálózatának csökkent információfeldolgozását tükrözheti (Pfurtscheller, Stancák és Neuper, 1996; Pfurtscheller, 1999). Ezt a nézetet alátámasztja, hogy a nyitott szemek az alfaterjesztmény csökkenését, míg a csukott szemek az alfaterjesztmény növekedését eredményezik, ami értelemszerűen a vizuális rendszerbe kerülő információk bejutásának megakadályozásán keresztül csökkent információfeldolgozást is eredményez egyben. Így a korai elképzelések az alfaszinkronizációt a kreativitás kapcsán egy

csökkent információfeldolgozási állapotnak („üresjárat”, „cortical idling”) tekintették (Pfurtscheller és mtsai, 1996; Fink és Benedek, 2014; Benedek, 2018a). Ezt a felfogást követve a kreativitás és az alfateljesítmény kapcsolatáról azt tartották, hogy az alacsony kérgi aktiváció, a defókuszált figyelem (Martindale, 1999; Mendelsohn, 1976) vagy a „hipofrontális” (Dietrich, 2003; Fink és Neubauer, 2006) állapotát tükrözheti (Benedek, 2018a).

Ma már egyre több eredmény támasztja alá, hogy az alfaszinkronizáció nem csökkent mentális aktivitást („üresjáratot”) jelent (Cooper, Croft, Dominey, Burgess és Gruzelier, 2003; Jensen, Gelfand, Kounios és Lisman, 2002; Klimesch, Sauseng és Hanslmayr, 2007), hanem aktív információfeldolgozási folyamatokkal áll kapcsolatban. Például vannak olyan vizsgálatok, ahol emlékezeti és képzeleti feladatokat alkalmazva a legnehezebb feladatoknál kapták a legnagyobb alfateljesítményt (Cooper és mtsai, 2003; Jensen és mtsai, 2002). Ezt támasztja alá Fink és munkatársainak (2009) eredménye is, ahol EEG- és fMRI-módszereket kombinálva azt találták, hogy a kreatív kognitív feladat frontálisan alfaszinkronizációt eredményezett, majd ugyanaz a feladat az MRI-szkennerben megnövekedett BOLD- (blood-oxygen-level-dependent) választ eredményezett a frontális területeken. A legutóbbi értelmezések szerint az alfaszinkronizáció különösen érzékeny a szenzoros gátlásra, figyelmi igényekre (Jensen, Bonnefond és VanRullen, 2012), belső feldolgozási folyamatokra, és kapcsolható a kontrollált memória-visszakereséshez is (Klimesch, 2012; Fink és Benedek, 2014; Benedek, 2018a). Már Ray és Cole (1985) vizsgálatában – amely során EEG rögzítése közben a résztvevők olyan feladatokon dolgoztak, amelyek vagy külső információk bevitelét és feldolgozását igényelték (pl. papírhajtogatási feladat), vagy a belső információfeldolgozásra összpontosítottak (pl. egy képzeletbeli séta vagy fejszámolás) – az alfateljesítmény nagyobb volt az „érzékelésfüggetlen” feladatok során, mint az „érzékeléses” feladatok esetében. A szerzők arra a következtetésre jutottak, hogy az alfateljesítmény összefügg a figyelem fókuszával: nagyobb a befelé irányuló figyelmi állapotokban, mint a kívülre orientálódó figyelmi helyzetekben. Jensen és munkatársai (2002) pedig úgy értelmezték a megfigyelt alfateljesítmény-növekedést az okcipitális-parietális régiókban, hogy a növekvő memóriaterhelés mellett a vizuális rendszerből származó bemenet elnyomását indukálja annak érdekében, hogy ne zavarja meg a munkamemória-folyamatokat a frontális agyterületeken. Benedek és munkatársai (2011) azt vizsgálták, hogy a kreatívötlet-generálás során az alfaszinkronizáció mennyiben kapcsolódik kreativitáspecifikus folyamatokhoz, vagy inkább figyelmi igényeknek tudható-e be. Minden próbában egy négybetűs szót mutattak be (pl. POST), és a résztvevőknek vagy egy eredeti négyszavas mondatot kellett megalkotniuk ezeknek a betűknek a felhasználásával (divergens gondolkodás), vagy pedig megfelelő anagrammamegoldást kellett találniuk (konvergens gondolkodás), alacsony vagy magas belső feldolgozási igények mellett. A nagy belső feldolgozási igényű kondíció az ingerként szolgáló betűk eltakarásával valósult meg – rövid, fél másodperces kódolási időszak után –, biztosítva, hogy a feladatot belsőleg kelljen feldolgozni. Az alacsony belső feldolgozási igényekkel járó kondícióban az inger látható maradt, és ez lehetővé tette a folyamatos (alulról felfelé irányuló) feldolgozást. Eredményeik frontális alfaszinkronizációt csak a magas belső feldolgozási állapotban mutattak – ám azt mind a konvergens, mind a divergens feladat esetében. Így arra a következtetésre jutottak, hogy az ötletgenerálás során megnövekedett alfateljesítmény alapvetően a magas belső figyelmi igényeknek

köszönhető. Az, hogy a tanulmány nem figyelt meg egyértelmű, szignifikáns feladathatást – vagyis nagyobb alfasáv-teljesítményt divergens gondolkodás során a konvergens gondolkodáshoz képest –, újdonság volt a számos egyértelmű különbséget kimutató korábbi kutatás fényében. Magyarázatként az alkalmazott divergens gondolkodási feladat (négyzavas mondatok) sajátossága merült fel: a négyzavas mondatok generálása négy egymással nem összefüggő betű manipulálásával jár, és így valószínűleg a külső információk folyamatos feldolgozására támaszkodik, ami könnyítés a munkamemória számára. Ezért az ilyen feladatok „érzékeléses” feladatnak tekinthetők. Ezzel szemben a legtöbb divergens gondolkodási feladat csak egyetlen szemantikai fogalom (pl. tégl) feldolgozását foglalja magába, amely nem igényli az inger folyamatos feldolgozását, így ezek a feladatok „érzékelésfüggetlen” feladatoknak tekinthetők (Benedek, 2018a). Következésképpen felmerült, hogy az alfateljesítmény nemcsak akkor növekedhet, ha a figyelem belső orientációját az ingermaszkolás kényszeríti, hanem akkor is, ha a feladat nem igényli a külső inger feldolgozását, annak ellenére, hogy a feladathoz tartozó ingerek láthatóak. Ezt az elképzelést Benedek és munkatársai (2014) megvizsgálták egy másik hasonló EEG-vizsgálatban, ismét a négyzavas mondatalkotási feladatot (azaz egy érzékeléses feladatot) alkalmazva, de egy Szokatlan Használat Teszttel (AUT) kiegészítve, ami tipikusabb divergens gondolkodási feladat, vagyis nagyrészt független a szenzoros feldolgozástól. Eredményeik azt mutatták, hogy a magas belső feldolgozási állapot (vagyis ingermaszkolás esetén) csak az érzékeléses feladatban (négyzavas mondatalkotás) vezetett fokozott alfateljesítményhez, az érzékelésfüggetlen feladatnál (AUT) nem. Sőt, az alfaaktivitás általánosan nagyobb volt az érzékeléstől független feladatban, mint az érzékelésesben. Azaz az alfateljesítmény abban a három állapotban volt nagyobb, amelyek tartós belső orientációjú figyelmet igényeltek, és ez az alfaaktivitás a jobb féltéke parietális régióiban volt a legnyilvánvalóbb. De nemcsak verbális, hanem figurális feladatok esetében is megfigyelhető az alfa szerepe a befelé irányuló figyelem háttérében. Például Rominger és munkatársai (2018) a TTCT (Torrance, 1974) Képiegészítés alfeladatának számítógépes változatát alkalmazva azt figyelték meg, hogy az ötletgenerálási szakaszban (a feladat a bemutatott képkezdmények eredeti és kreatív kiegészítése volt először képzeletben, majd ténylegesen is lerajzolták azokat) az alfateljesítmény csökkent a parietális és okcipitális régiókban, jelezve a megnövekedett vizuális feldolgozási igényeket. Ezzel szemben, amikor a résztvevők mentálisan jobban kidolgozták a rajzukat (a feladat, hogy képzeletben, majd ismét rajzban is módosítsák, növeljék a korábbi rajz eredetiségét), ugyanezekben a régiókban az alfateljesítmény nagyobb volt, mint a kezdeti létrehozási szakaszban, ami a befelé orientált figyelmet tükrözhetette.

A fentiek alapján elmondhatjuk, hogy a kreatív feladatmegoldás során megfigyelhető alfateljesítmény-növekedés az intenzív befelé irányuló figyelmi állapot korrelátuma.

Alacsony frekvenciasávok (delta, théta) teljesítménye

Bár a legtöbb vizsgálat az alfateljesítmény növekedéséről számol be divergens gondolkodás során, a delta (0,5–4 Hz) és a théta (4–8 Hz) frekvenciasávok teljesítményében is figyeltek meg változásokat, mégpedig csökkenést. Például Boot és munkatársai

(2017a) a Szokatlan Nevek feladatot (Alternate Name Task, ANT) alkalmazva – amely során különböző kategóriakon belül (pl. fájdalomcsillapítók) három, egyforma végződésű példa szó (pl. paradon, maladon, haptadon) bemutatása után a résztvevőknek minél több, a kategóriába illő nevet kellett kitalálniuk – a különböző kreatív folyamatok (divergens kondíció: a példaszavakétól eltérő végződésű nevek vs. konvergens kondíció: a példaszavakéval megegyező végződésű nevek) összehasonlíthatóságát növelve azt találták, hogy a kreatívötlet-generálás viszonylag rugalmas, divergens folyamatai a delta sáv teljesítményének csökkenésével járnak a szisztematikusabb, konvergensebb folyamatokhoz képest. Wokke és munkatársai (2018) vizsgálatukban pedig, amelyben a résztvevők feladata a számítógép képernyőjén megjelenő szokatlan jeleneteknek való címadás volt, azt találták, hogy a csökkent középfrontális théta-sáv-teljesítmény összefügg a magasabb kreativitáspontszámokkal (naiv résztvevők által értékelve). Továbbá arról is beszámoltak, hogy a megnövekedett frontális-okcipitális funkcionális konnektivitás (a területek működésük során összekapcsolódnak, hatással vannak egymásra – thétafázis-szinkronitás) a théta sávban fokozott kreativitással társult. Mivel az alacsony frekvenciasávokon a távoli régiók közötti, illetve a kiterjedt neurális hálózatok interakciója valósul meg, a magas frekvenciasávokon pedig a lokális neurális hálózatoké (Clayton, Yeung és Kadosh, 2015), a fenti eredményekből arra lehet következtetni, hogy a kreativitás a kreatív funkciókért felelős régiók közötti távoli oszcillációs kommunikáció eredménye is lehet. A théta sáv aktivitása egyébként a frontális régiókban a fokozott kognitív kontrollhoz is társul, amelyről kiderült, hogy kulcsfontosságú szerepet játszik a divergens gondolkodásban (Cavanagh és Frank, 2014). Ezt alátámasztják Zabelina és Ganis (2018) eredményei is, akik pozitív korrelációt találtak a divergens gondolkodás és az N2 komponens között. A kognitív kontroll a kreativitás formájától függően eltérhet: a divergens gondolkodás magasabb szintű kognitív kontrollhoz (hatékonyabb figyelmi flexibilitáshoz) kapcsolódott, amit a kakukktojás (oddball) feladat sztenderd és ritka célingerei közötti nagyobb N2- (az N2 a referenciához képest negatív polaritású eseményhez kötött potenciál, mely az inger megjelenését követően kb. 200–350 ms latenciával jelenik meg, jelen esetben az elülső agyterületek felett) különbségek jeleztek, vagyis azok a személyek, akik jobban teljesítettek a DT-feladatokban, hatékonyabban vették igénybe a kognitív kontroll folyamatokat, ha váratlan figyelmi váltásra volt szükség.

Az alacsony frekvenciasávok teljesítménye tehát csökken a kreatív folyamat során, a théta frekvenciasávban megfigyelhető megnövekedett fázisszinkronizáció pedig a távoli agyi régiók fokozott együttműködésére utal.

Funkcionális konnektivitás, végrehajtó kontroll

A munkamemóriát vizsgáló alfakonnektivitási tanulmányok azt mutatják, hogy ha nem pusztán az információ fenntartása a feladat, hanem azzal valamilyen műveletet is végre kell hajtani (pl. fejben tükrözni a bemutatott elrendezést), a prefrontális és az okcipitális régiók között erősebb funkcionális alfa-összekapcsolódás jön létre. Ezt a kognitív kontroll vizuális régiókra gyakorolt hatásaként – a nem releváns, külső vizuális információk feldolgozásának gátlásaként – értelmezték (Sauseng és mtsai, 2005). Tehát az EEG-alfateljesítmény egy olyan neuronális mechanizmus is lehet, amely az irreleváns

külső ingerek szenzoros feldolgozásának gátlásával segíthet megvédeni a belső reprezentációkat az interferenciától (Benedek 2018b; Fink és Benedek, 2014). Másképp megfogalmazva, a kreatívötlet-generálás során megfigyelt alfateljesítmény-növekedés (a fentiekkel összhangban) tükrözi a befelé irányuló figyelmet, amelyet a külső, alulról felfelé irányuló stimuláció hiánya, illetve a feladatban nem releváns kognitív folyamatok gátlása, azaz egy aktív felülről lefelé irányuló kontroll jellemez. Ez a felülről lefelé irányuló moduláció az érzékszervi feldolgozásra a prefrontális és hátsó régiók kapcsolatával érhető el az alfa sávban (Benedek, 2018b). Rominger és munkatársai (2019) vizsgálatukban az eseményhez kötött alfateljesítmény-változás követése mellett a frontális és parietális-okcipitális területek funkcionális konnektivitását (fáziskapcsoltság; Lachaux, Rodriguez, Martinerie és Varela, 1999) is vizsgálták a kreatívötlet-generálási szakaszban. A résztvevők AUT-feladatokat végeztek EEG rögzítése alatt. Az eredetibb válaszokat adó személyeknél megnövekedett alfateljesítmény volt látható az inger megjelenése után (kezdeti szakasz) és az ötletgenerálás folyamatának befejezése (vagyis válaszadás) előtt. Ezt az U alakú alfateljesítmény-mintázatot pedig a frontális és a parietális-okcipitális régiók közötti funkcionális konnektivitás fokozódása kísérte. (A kevésbé eredeti válaszokat adó résztvevők nem mutattak szignifikáns időbeli változásokat az alfateljesítményben, és a funkcionális konnektivitás fokozódása későbbi volt a kreatívabbakhoz képest.) A szerzők arra következtettek, hogy a kreatívötlet-generálás kezdeti szakaszában az alfateljesítmény növekedése tükrözheti a nem irányított, asszociatív gondolkodást, amelyben a figyelem a külső ingerfeldolgozásról olyan belső folyamatokra irányul, mint például az asszociatív információk visszakeresése az emlékezetből, amely értelmezést erősíti a frontális és parietális területek közötti konnektivitás alacsony mértéke, ami pedig arra enged következtetni, hogy ezt a korai szakaszt viszonylag alacsony végrehajtói igények jellemzik. A második fázisban az alfateljesítmény az előző szakaszhoz képest csökkent, míg a frontális és parietális területek közti konnektivitás fokozódott, valószínűsíthetően jelezve a központi végrehajtó kontrollfolyamatok bekapcsolódását. Majd az utolsó, azaz a válaszadást megelőző szakaszban volt a legnagyobb a konnektivitás mértéke, ami az újbóli megnövekedett alfateljesítménnyel a megnövekedett belső figyelmi igények mellett működő végrehajtó kontrollfolyamatokat jelezhet. Ezek alapján az értékelési és a kidolgozási folyamatok ebben a végső szakaszban mehetnek végbe (Jaarsveld és mtsai, 2015; Schwab és mtsai, 2014).

Távoli asszociációk, konvergens gondolkodás, belátás

A viszonylag távoli fogalmak és elképzelések összekapcsolásának képessége, illetve a konvergens gondolkodás szintén hozzájárulhat a kreatív produktum létrehozásához (Mednick, 1962). A konvergens gondolkodás fontos a zárt végű (closed-ended) – azaz egyetlen jó megoldással rendelkező – problémák megoldásában, a logikus érvelés, a szabályok felismerésének, valamint a különböző ötletek közül a legmegfelelőbb megoldás kiértékelésének képessége által. A Távoli Asszociációk Teszt (RAT; Mednick és Mednick, 1971) egyetlen helyes megoldással rendelkezik, és a távoli fogalmak összekapcsolásának képességét méri. Az ilyen feladatokban általában három, látszólag egymástól független szót (pl. kontakt, főzelék, szem) kell összekapcsolni egy negyedik által (a példa esetében a megoldás a lencse). Ezen feladatok megoldásának legalább

két módja van: az „Aha! pillanat”, azaz belátás, amikor hirtelen jön a megoldás (a feladatot megoldó nem igazán tudja megmondani, hogyan is oldotta meg a feladatot) és a megfontolt, hibaelemző megközelítés, azaz analitikus mód (Kounios és Beeman, 2014; Stevens és Zabelina, 2019). Számos vizsgálat talált a belátással (insight) és az analitikus megoldási módokkal kapcsolatos specifikus agyiaktivitás-mintázatokat, előbbi esetében hasonlóságokat találva a divergens gondolkodásnál megfigyeltekkel: a problémák megoldása a befelé orientált figyelemhez kapcsolódik, szemben a kifelé orientált figyelmi móddal, amelyet az analitikus problémamegoldás során lehet megfigyelni (Kounios és mtsai, 2006; Stevens és Zabelina, 2019). Ezzel összhangban Rothmaler és munkatársai (2017) azt találták, hogy az alfateljesítmény nő a parietális régiókban a belátás során, ami értelmezhető a szenzoros információk gátlásaként a befelé irányuló figyelem és hatékony feldolgozás érdekében. Valójában már korábban, Jung-Beeman és munkatársai (2004) figyelték meg elsőként az alfateljesítmény megnövekedését belátásnál. De azon túl, hogy az alfateljesítmény nőtt az okcipitális kéreg felett, azt egy magas frekvenciájú gammaszinkronizáció követte a jobb temporális lebenyből közvetlenül a válaszadás előtt, ami a felülről lefelé és alulról felfelé irányuló információk összekötését és egyeztetését tükrözhetette. Továbbá úgy tűnik, hogy a belátásos vagy analitikus megoldásra való hajlam már előre bejósolható a nyugalmi EEG alapján. Például Erickson és munkatársai (2018) nagyobb alfa- és thétaoszillációt figyeltek meg a bal temporális területeken nyugalmi helyzetben belátásos stratégiájú alanyoknál. Ez esetben a megnövekedett alfateljesítmény jelezheti az aktivitás gátlását a bal temporális lebenyben, elősegítve ezzel a közeli asszociációk elnyomását, míg a thétaoszillációk a távoli integrációs folyamatokban betöltött szerepük révén a távoli, nem automatikus asszociációk létrehozását segíthetik (Stevens és Zabelina, 2019). Kounios és munkatársai (2006) pedig kisebb alfateljesítményt találtak a poszterior kérgi régiókban az analitikus problémamegoldás előtt, mint a belátás előtt, amelyet úgy értelmeztek, hogy az analitikus problémamegoldásra való felkészülés nagyobb valószínűséggel valósult meg a figyelem kifelé irányításával, míg a belátással történő feladatok megoldására való felkészülés a figyelem befelé orientálódásával járt.

Új irány, azaz túl a divergens gondolkodáson

Félretéve a divergens és konvergens gondolkodás kereteit és korlátait, jó megközelítésnek tűnhet, ha a kreatív problémamegoldáshoz nélkülözhetetlen kognitív folyamatokat próbáljuk meg közvetlenül vizsgálni, kihasználva az EEG nagyszerű időbeli felbontását és az EKP-technika lehetőségeit az adott eseményhez képest azonnali, gyors folyamatok megfigyeléséhez. Ezt kísérelték meg Rutter és munkatársai (2012a) vizsgálatukban, amelyben összefüggést találtak a fogalomkiterjesztés – amely mind a divergens, mind a konvergens gondolkodásban felmerülhet – és az N400 komponens között (az N400 eseményhez kötött potenciál akkor jelenik meg, amikor egy esemény nem, vagy csak nehezen illeszkedik az éppen adott események kontextusába, pl. „labdát” szó egy olyan mondatban, hogy: „A postás bedobta a ládába a labdát.”). A résztvevőknek különböző frázisokat kellett értékelniük szokványosság, illetve elfogadhatóság szempontjából. Például: „Felhők haladtak a város felett.” – megszokott és elfogadott, szó szerint értendő mondat, vagy: „Felhők olvastak a város felett.” – nem szokványos és

értelmetlen, vagy: „Felhők táncoltak a város felett.” – nem szokványos, de elfogadható, újszerű, metaforikus kifejezés. A kreatív (újszerű, metaforikus) kifejezések esetében nagyobb N400-amplitúdót találtak a szó szerint értendő kifejezésekhez képest, ami a két egymással nem összefüggő fogalom közötti kapcsolat kialakításához szükséges erőfeszítést tükrözhet. A tanulmány eredményei rávilágítanak az EKP-komponensek fontosságára a passzív koncepciókiterjesztés mint kreatív kognitív folyamat működésének jelzőire. Megjegyzendő azonban, hogy a koncepciókiterjesztés csak egy a sok kognitív folyamat közül, amely a kreativitás összetett konstrukcióját alkotja, és önmagában nem következtethető belőle a kreatív teljesítmény.

Összefoglalásul elmondhatjuk, hogy az EEG-kutatások eredménye, hogy a kreatív problémamegoldás során az alfateljesítmény nő, miközben az alacsony frekvenciasávok teljesítménye csökken, illetve jellemző a viszonylag távoli területek működésének összekapcsolódása. Mindezek egy befelé irányuló figyelmi állapotot jeleznek, melyet a külső ingerek kizárása és egy felülről lefelé irányuló kontroll jellemez.

A kreativitás vizsgálata képalkotó módszerekkel

Kiemelkedő agyi területek – Funkcionális mágnesesrezonancia-vizsgálat (fMRI)

A kognitív idegtudomány másik fontos módszere az EEG mellett a funkcionális mágnesesrezonancia-vizsgálat, melynek során a nyugalmi vagy feladatfüggő helyzetben mért agyi hemodinamikusan válasz vizsgálható az oxihemoglobin és a deoxihemoglobin eltérő elektromágneses tulajdonságain keresztül, amelynek segítségével felderíthetők az eltérő agyi aktivációs mintázatok. Bár a korábban már említett módszertani problémák a kreativitás neurobiológiai kutatásával kapcsolatban ennél a képalkotó módszerrel is felmerülnek (nem egységes kreativitásteszték, a divergens gondolkodást vizsgáló feladatok hangsúlya, ezáltal pedig a kreativitás komplex konstruktumának túlzott leegyszerűsítése), ennek ellenére központi szerepet játszik a vizsgálatok során a nagy térbeli pontossága és az agyi hálózatok és kapcsolatok feladat- és csoportfüggő különbségeinek felderítése által.

A képalkotó vizsgálatok eredményeiből kevés olyan agyi terület emelkedik ki egyértelműen, amely általánosságban és specifikusan fontos szerepet játszik a kreatív teljesítményben. Ez abból a központi problémából eredeztethető, hogy a kísérletek során nagyon eltérő és különböző doméneket vizsgáló paradigmákat alkalmaznak (pl. verbális-szemantikai és vizuális-művészi, belátáson alapuló feladatok). Arden és munkatársai (2010), valamint Dietrich és Kanso (2010) összefoglaló munkáikban a prefrontális kéreg és a parietotemporális területek megnövekedett aktivációját hangsúlyozták ki a kreativitással kapcsolatban, főként a divergens gondolkodást vizsgáló feladatok során, ezen belül pedig a jobb mediális frontális gyrus, dorzolaterális és ventrolaterális prefrontális kéreg, jobb szuperior temporális gyrus, bal anterior cinguláris kéreg, bal inferior frontális kéreg és inferior parietális lebeny aktivitását. Mivel ezek a területek olyan általános kognitív képességekhez köthetők, mint a végrehajtott funkciók, a figyelmi folyamatok vagy a szemantikai feldolgozás, ezért nem tekinthetjük ezeket kreativitásspecifikus aktivációs mintázatoknak.

Bár a kreativitáskutatásban a divergens gondolkodásbeli teljesítménnyel kapcsolatos agyi tevékenységek játsszák a főszerepet, fontos megemlítenünk azon más szempontokat is, amelyek alapján vizsgálható a kreatív problémamegoldás. A konvergens gondolkodáshoz köthető belátásos problémamegoldás során, amelyet például távoli asszociációkkal, anagrammákkal, implicit tanulással vagy logikai problémákkal vizsgálnak, főként az anterior cinguláris kéreg és a temporális lebeny, ezen belül is a jobb szuperior temporális gyrus aktivációja tűnik kulcsfontosságúnak, amely területek a konfliktus- és stratégiamonitorozásban, illetve a szemantikai feldolgozásban és integrációban játszanak szerepet (Dietrich és Kanso, 2010; Kounios és Beeman, 2014). A kreatív problémamegoldás különböző szintjeinek vizsgálatával és kontrollfeladatokkal történő összehasonlításával még részletesebb képet kaphatunk a kreativitáshoz köthető agyi aktivációkról. Míg az ötletek generálásának és a koncepciók kiterjesztésének folyamatát Abraham és munkatársai (2012a) úgy vizsgálták, hogy nehéz és könnyű divergens gondolkodást igénylő feladatokat (szokatlan használat vs. átlagos tárgyak egy adott helyiségben) hasonlítottak össze nehéz és könnyű, konvergens problémamegoldású feladatokkal (2-vissza vs. 1-vissza feladat), addig Rutter és munkatársai (2012b) a korábban tárgyalt EKP-kísérlethez hasonlóan egy fMRI-vizsgálatban is szokatlan kifejezéseket alkalmaztak, amelyekről el kellett dönteniük a résztvevőknek, hogy újszerűek és megfelelőek-e. Mindkét kísérletben a koncepciótudáshoz és integrációhoz köthető területek megnövekedett aktivációja volt megfigyelhető, mint az anterior inferior frontális gyrus, a temporális pólusok és a laterális frontopolaris kéreg (Rutterék kísérletében inkább a bal féltekében). Ehhez kapcsolódóan Huang és munkatársai (2015) arra keresték a választ, hogy milyen agyi aktivációkülönbség figyelhető meg a kreatív válaszok két fő jellemzője, az újszerűség és a megfelelőség feldolgozása során. Míg az előzőhöz a procedurális emlékezettel (nucleus caudatus), a jutalmazással (substantia nigra) és a téri-vizuális feldolgozással (parietális lebeny) kapcsolatba hozott területek aktivációja társul, addig az utóbbihoz a deklaratív emlékezet (hippokampusz), az érzelmi arousal (amygdala) és az ortografikus feldolgozás (szuperior és inferior parietális kéreg, temporális gyrus) területei tartoznak. Emellett Ellamil és munkatársai (2012) az ötletek generálása és kivitelezése közti különbségeket tárták fel könyvborítók megtervezésén keresztül. Ennek során az ötletgenerációs fázishoz a mediális temporális lebeny (limbikus rendszer), míg az ötletkivitelezéshez a rostrolaterális prefrontális kéreg, az insula és a temporopolaris kéreg (végrehajtó és alapértelmezett üzemmódú hálózat) aktivációja tartozott. Ezenkívül Abraham és munkatársainak különböző agyi léziós pácienseken és kontrollalanyokon végzett vizsgálata (2012b) arra a következtetésre jutott a kreatív problémamegoldással kapcsolatban, hogy míg a parietotemporális területek aktivációja a fluenciáért (válaszok száma) és a frontolaterális területek aktivációja az originalitásért felelhetnek, addig a bazális ganglionok és frontopolaris területek deaktivációja a kiemelkedő szemantikus zavaró ingerek figyelmen kívül hagyásában játszanak szerepet.

A kreativitásra hatást gyakorló egyéb tényezők vizsgálata során a következő felfedezésekre jutottak: mások ötleteinek bemutatása után megnövekedett az aktiváció a jobb temporoparietális, kétoldali mediofrontális és poszterior cinguláris kérgi területeken, illetve a résztvevők eredetibb ötleteket találtak ki (Fink és mtsai, 2010); a kamaszoknál a felnőttekhez képest jobb volt a kreatív problémamegoldási teljesítmény és nagyobb

a laterális prefrontális kérgi aktiváció (Kleibecker és mtsai, 2013); valamint munkamemória-tréning hatására (Vartanian és mtsai, 2013) megnőtt a ventrolaterális és dorzolaterális prefrontális kérgi aktivitás divergens gondolkodási feladatban (Szokatlan Használat Teszt).

Kiemelkedő agyi területek – Strukturális mágnesesrezonancia-vizsgálat (sMRI) és diffúziós tenzoros képalkotás (DTI)

A kreatív problémamegoldással járó agyi strukturális különbségek felderítésére különböző képalkotó módszerek alkalmazhatóak: a kérgi szürkeállomány vastagságát és térfogatát, illetve a kérgi és kéreg alatti régiók térfogatát vizsgáló voxelalapú morfolometriás mérés sMRI-felvételek alapján készül, míg a fehérállomány integritásának, és ezáltal az idegi ingerületátvitel hatékonyságának vizsgálata diffúziós tenzoros képalkotással (DTI) valósítható meg.

Arden és munkatársai (2010) a kreativitáshoz kapcsolódó agyi szerkezeti változásokat foglalják össze, mely szerint főként a bal frontális és kéreg alatti területek (orbitofrontális kéreg, inferior frontális kéreg, anterior cinguláris kéreg) csökkent szürkeállományi vastagsága és az idetartozó fehérállományi kötegek (pl. superior longitudinális fasciculus) csökkent frakcionális anizotrópiája¹ jellemzi a kreatív személyeket, ami hipofrontalitással és a kognitív kontrollfunkciókat szabályozó területek alulműködésével jár együtt. Jung és munkatársainak vizsgálata során (2009) a kreatív teljesítmény (a Creative Achievement Questionnaire – CAQ – alapján; Carson, Peterson és Higgins, 2005) szintén negatív korrelációt mutatott a bal laterális orbitofrontális kérgi vastagsággal, de pozitív korrelációt a jobb anguláris gyűrűvel, míg a divergens gondolkodást mérő feladatokban nyújtott kreatív teljesítmény negatívan korrelált a linguális gyűrű vastagságával, de pozitívan a jobb poszterior cinguláris kéreg vastagságával. Más kutatások eredményei alapján a kreatív teljesítmény CAQ-kérdőívvel mérve negatívan korrelál a rostrális és dorzális anterior cinguláris kéreg térfogatával, de pozitívan a superior frontális gyűrű és a ventromediális prefrontális kéreg térfogatával (Chen és mtsai, 2014). Pozitív korrelációt találtak a mindennapi kreativitás (Creative Behavioral Inventory – CBI – alapján; Hocevar, 1979) és a jobb premotoros kéreg között, amely agyi terület főként az új cselekvések tervezésében és kiválasztásában játszik fontos szerepet (Zhu és mtsai, 2016), illetve a divergens gondolkodásbeli teljesítmény (Szokatlan Használat Teszttel mérve) pozitívan korrelált az alapértelmezett üzemmódú hálózathoz (default mode network, DMN) tartozó agyi területek térfogatával (Kühn és mtsai, 2014), amit úgy értelmeztek, hogy a kevésbé kontrollált folyamatok fontos szerepet játszanak a kreatív teljesítmény elérésében. A fehérállományi integritás és a kreativitás kapcsolatát vizsgálva Takeuchi és munkatársai (2010) pozitív kapcsolatot találtak a divergens gondolkodást igénylő feladatok teljesítménye és a prefrontális kéreghez,

¹ Izotrópiáról beszélünk, ha a víz diffúziójának a valószínűsége minden irányban azonos. Ezzel szemben az idegsejtekben a myelinhévely nem engedi a víz szabad mozgását a falak irányában, ezért annak diffúziója az axon tengelye mentén sokkal valószínűbb (anizotróp). Ha a frakcionális anizotrópia magas, az a fehérállomány magas fokú szerkezeti koherenciáját jelzi, az axonkötegek többnyire párhuzamosan futnak a vizsgált voxelben. Az alacsony érték ellenben kisebb szerkezeti koherenciára utal, a myelinhévely vékonyabb lehet az axon mentén, és így az kevésbé szigetel.

bazális ganglionokhoz, temporoparietális határterülethez és a jobb inferior parietális lebenyhez tartozó fehérállományi területek, illetve a corpus callosum integritása között, amely eredmények a kreativitással összefüggésbe hozható kiterjedt információ-integrációs folyamatokat támasztják alá.

Agyi hálózatok és neurális dinamizmusok

A kreativitás neurobiológiai hátterének kutatásában kezdetben központi szerepet játszott a jobb agyfélteke dominanciájának vizsgálata, amely eredményeket Mihov és munkatársai (2010) metaanalízise foglalja össze. Az újabb kutatások viszont a féltekék közti és a nagyobb kiterjedésű agyi hálózatok közti kapcsolat és integráció fontosságát emelik ki (Lindell, 2011). Például Carlsson és munkatársai (2000) megnövekedett bilaterális aktivitást találtak a regionális agyi vérátáramlás módszerével (rCBF) a verbálisan kreatív egyéneknél, míg a kevésbé kreatív személyeknél a bal félteke dominanciája jelentkezett. Emellett Kowatari és munkatársai 2009-es kutatásában, ahol egy újfajta tollat kellett terveznie a laikus és a formatervező résztvevőknek, azt találták, hogy a képzés a szakembereknél a parietofrontális hálózatra hatott, és a laikusokhoz képest megfigyelt nagyobb kreativitás a megnövekedett féltekék közti interakció eredménye, melyben több agyi régió is érintett volt.

A féltekei dinamizmusok vizsgálatán túlhaladva az utóbbi években kiemelkedő kutatási területté vált a neurális interakciók és kiterjedt agyi hálózatok aktivációjának vizsgálata a kreativitás során, amelyben Beaty és kutatócsoportja kiemelkedő eredményeket ért el, főként az alapértelmezett üzemmódú hálózat (default mode network, DMN) és a végrehajtó kontrollhálózat (executive control network, ECN) közti kapcsolat feltérképezésében. Míg az előbbi a belső figyelmi folyamatokhoz köthető önmonitorozás, spontán gondolatok, jövőbeli tervezés, mentális szimuláció és az önéletrajzi emlékezés során aktiválódó és célorientált feladatok során deaktiválódó kérgi közepsonali és poszterior inferior parietális területeket tartalmazza, addig az utóbbi hálózat a célorientált, végrehajtó funkciókat és külső ingerek által irányított figyelmet igénylő feladatok kivitelezése során aktiválódó laterális prefrontális és anterior inferior parietális kérgi területekre utal. Alapvetően a két hálózat ellentétes aktivációja figyelhető meg nyugalmi és feladatorientált helyzetek során (nyugalmi helyzetben aktiválódó DMN és deaktiválódó ECN, célorientált viselkedés során deaktiválódó DMN és aktiválódó ECN), de Beatyék több szempontból is azt találták, hogy a kreatív alanyokban magas funkcionális konnektivitás és egyidejű aktiváció figyelhető meg ezeknél a hálózatoknál. A nyugalmi helyzetben vizsgált funkcionális konnektivitás során egy divergens gondolkodást mérő tesztbatteria segítségével (3 szokatlan használat feladat, 3 kreatív problémamegoldási feladat) alakították ki a magas és alacsony kreativitású csoportokat, akiknél a bal, illetve jobb inferior prefrontális kérgi területek (IFG) és az alapértelmezett üzemmódú hálózat (DMN) régióinak kapcsolatát vizsgálták (Beaty és mtsai, 2014). Kétféle módszerrel is megnövekedett nyugalmi funkcionális konnektivitást találtak a magas kreativitású alanyok bal IFG-régiója és a 4 fő DMN-régió között (mediális prefrontális kéreg – mPFC, poszterior cinguláris kéreg – PCC, kétoldali inferior parietális lebeny – IPL), valamint a jobb IFG-régió és a kétoldali IPL, valamint a bal dorzolaterális prefrontális kéreg (DLPFC) között. Ezáltal a kreatív alanyokban egyide-

júleg megfigyelhető az alacsony szintű, spontán és újszerű konceptuális kombinációk kialakításának, valamint az egyértelmű, de nem eredeti válaszok gátlásának képessége a kognitív kontrollhoz köthető területek és a DMN funkcionális együttműködése által. A kutatócsoport 2018-as vizsgálatában viszont egyrészt a Szokatlan Használat Teszt végrehajtása során detektálható feladatfüggő funkcionális konnektivitást vizsgálták, másrészt az ennek során megállapított kreatív teljesítményhez köthető funkcionális hálózatokat alapul véve 3 független kreativitást vizsgáló fMRI-mintán konnektómalapú előrejelzési modellel megállapították ezen funkcionális hálózatok robusztusságát, illetve hogy az agyi aktivációs mintázatokból megállapítható-e az alany kreativitása. Ennek során a magas kreativitású alanyoknál az alapértelmezett üzemmódú (DMN), a végrehajtó (ECN) és a kiemelő (salience, SN) hálózatok funkcionális kapcsolata és együttműködése volt megfigyelhető, amelyben a hálózatok fő csomópontjai a poszterior cinguláris kéreg (DMN), a jobb dorzolaterális prefrontális kéreg (ECN) és a bal anterior insula (SN) voltak, ráadásul ennek a funkcionális kapcsolatnak a jelenléte robusztusan előrejelzi a kreativitást. Ezzel szemben az alacsony kreativitású alanyokat a szubkortikális, szenzorimotoros és kisagyi funkcionális kapcsolatok jellemezték, amelyek alapján ezek az alanyok nem a kreatív problémamegoldást, hanem procedurális folyamatokat és korábban megtanult sémákat és válaszokat alkalmaznak a kreativitást igénylő feladatok során. Emellett fontos megemlíteni, hogy ezen vizsgálat során erős korrelációt találtak a divergens gondolkodás alapján nyújtott kreatív teljesítmény, az önbevallásos kreatív képességek, valamint a művészi és tudományos teljesítmény között.

A kreativitással kapcsolatos nyugalmi és feladatfüggő funkcionális konnektivitást vizsgáló kutatások további fontos és az előzőeket alátámasztó és kiegészítő eredményekre jutottak. A nyugalmi helyzet agyi aktivációs mintázatait vizsgálva fény derült a kognitív flexibilitás kreatív teljesítményre (önbevallásos kreatív teljesítmény meghatározása CAQ-val) gyakorolt hatására, amely során a kreativitás, valamint a dorzális anterior cinguláris kéreg (kiemelő hálózat, valamint a kognitív kontrollfunkciók fő csomópontja) és a mediális superior frontális gyrus közti funkcionális konnektivitás fordított kapcsolatát a kognitív flexibilitás mértéke határozta meg, amelyet egy feladatváltási paradigma során mért váltási költséggel (váltási és ismétlési helyzetek közti reakcióidő-különbség) határoztak meg (Chen és mtsai, 2014). Emellett a kreatív tréning (mások válaszainak megismerése a Szokatlan Használat Teszt során) pozitív hatása volt megfigyelhető a kreatív teljesítményre és a DMN nyugalmi aktivációjára (magnövekedett funkcionális konnektivitás a középső prefrontális kérgi területek és a középső temporális gyrus között; Wei és mtsai, 2014), valamint a funkcionális hálózatok dinamikus rekonfigurációja és integrációja is fontos szempont a kreativitással kapcsolatban (Feng és mtsai, 2019). A nyugalmi, kreatív (szokatlan használat) és kontrollfeladat (tárgyjellemzés) során mért agyi aktivációs mintázatokból az derült ki, hogy amíg a poszterior DMN és a jobb frontoparietális kontrollhálózat (FPN) funkcionális kapcsolata erősebb a kreatív feladat teljesítése közben a kontrollfeladathoz képest, addig a jobb és bal FPN-hálózat konnektivitása gyengébb, valamint az anterior DMN- és bal FPN-hálózatok nyugalmi funkcionális kapcsolatának erőssége pozitív korrelációt mutat a kreatív teljesítménnyel, illetve a kreatív feladat során a poszterior DMN és a jobb FPN közti korrelációval (Shi és mtsai, 2018). Az agyi hálózatok kreatív egyénekben megváltozott aktivációját és dinamizmusát találták Takeuchi és munkatársai is (2011)

a DMN csökkent célorientált feladat indukálta deaktivációján keresztül, amelyet a precuneus (a DMN egyik fő agyi régiója) aktivációja és a divergens gondolkodás (szokatlan használat) közti pozitív korreláció jelzett a 2-vissza munkamemória-feladat során.

Összességében tehát azt láthatjuk, hogy a kreatív kogníció és teljesítmény hatására megváltozik a kiterjedt agyi hálózatok közti dinamikus kapcsolat, és a nyugalmi, illetve feladatorientált helyzetben alapvetően ellentétesen működő és aktiválódó alapértelmezett üzemmódú és végrehajtó kontrollhálózat között megnövekedett funkcionális kapcsolat és együttműködés figyelhető meg (Beaty, Benedek, Silvia és Schacter, 2016). Ez a megváltozott agyi hálózati dinamizmus segíti a kreatív kogníciót a különböző kognitív folyamatok szabályozásával, mint a prepotens válaszok gátlása, a belső figyelmi orientáció előtérbe helyezése, a célorientált felidézés és a szemantikai asszociációk kialakítása, ezáltal pedig más agyi hálózatok működését is befolyásolják, mint például a kiemelő hálózatot, a dorzális és ventrális figyelmi hálózatot vagy a vizuális és auditoros hálózatot (Beaty, Seli és Schacter, 2019).

Eredmények a verbális vs. vizuális domének alapján

Bár a kreativitáskutatás területén leggyakrabban a verbális divergens gondolkodást igénylő feladatokat vizsgálják, fontos megfigyeléseket és következtetéseket szűrhetünk le a verbális és vizuális kreatív teljesítmény mögött álló agyi strukturális és funkcionális hasonlóságok és különbségek feltérképezésekor, amelynek során választ kaphatunk a kreativitás domén generikus vagy specifikus természetére. Boccia és munkatársai 2015-ös metaanalízise erre a kérdésre keresi a választ, amelyben az aktiválás valószínűség becslés (activation likelihood estimation, ALE) analízis módszerével vizsgálták meg külön a verbális, térbeli-vizuális (és zenei) kreativitáshoz köthető fMRI-cikkek eredményeit. Míg a verbális kreativitáshoz kiterjedt agyi területek aktivációja tartozott, mint főként a baloldali prefrontális kéreg, középső és superior temporális gyrus, az inferior parietális lebeny, a postcentrális és szupramarginális gyrus, a középső okcipitális gyrus, az insula, illetve a jobb oldali inferior frontális gyrus és linguális gyrus; addig a térbeli-vizuális kreativitás csak a jobb középső és inferior frontális gyrus, a kétoldali talamusz és a bal precentrális gyrus aktivációját eredményezte. Ez alapján a verbális kreativitáshoz széles körű kognitív funkciók szükségesek, mint a tárolt emlékek és információk belső és célorientált figyelmi folyamatok által irányított keresése, felidézése és asszociációja, valamint a végrehajtó funkciók által szabályozott feldolgozása és manipulációja, míg a térbeli-vizuális kreativitáshoz inkább a vizuális feldolgozáshoz és manipulációhoz köthető területek aktivációja tartozik. (A vizuális kreativitáshoz köthető fMRI- és EEG-vizsgálatok ugyanilyen metaanalitikus módszerrel elemzett és hasonló eredményre jutó vizsgálata Pidgeon és munkatársai 2016-os tanulmánya.)

A vizuális és verbális kreativitás közti esetleges funkcionális konnektivitásbeli különbségeket Zhu és munkatársai (2017) vizsgálták meg a már korábban részletezett, alapértelmezett üzemmódú (DMN) és frontoparietális (végrehajtó kontroll, FPN) hálózatokra alapozva. Mindkét doménben (amelyeket a TTCT figurális és verbális altesztjével mértek; Torrance, 1966) detektálható volt nyugalmi helyzetben a megnövekedett funkcionális konnektivitás a hálózatok között, valamint a csökkent funkcionális konnektivitás a superior parietális lebeny (FPN) területén, de amíg a vizuális

kreativitás negatívan korrelált a precuneus (poszterior DMN) és a jobb középső frontális kérgi területek (FPN) funkcionális konnektivitásával, addig a verbális kreativitás a mediális prefrontális kérgi területek (anterior DMN) funkcionális konnektivitásával mutatott negatív korrelációt. Ezáltal ezeknek a hálózatoknak a doménspecifikus csökkent belső konnektivitása segíti a rugalmas hálózatok közötti együttműködés kialakulását a kreativitás során. Ezzel szemben bár Li és munkatársai (2016) ugyancsak a vizuális kreativitás (TTCT figurális altesztjével mérve) negatív korrelációját mutatták ki a precuneus és a mediális prefrontális kérgi területek közötti funkcionális konnektivitással nyugalmi helyzetben (csökkent funkcionális konnektivitás DMN-hálózaton belül vizuális kreativitás hatására), addig a bal és jobb dorzolaterális prefrontális kérgi területek funkcionális konnektivitásával pozitívan korrelált a vizuális kreatív teljesítmény (megnövekedett funkcionális konnektivitás a végrehajtó hálózaton belül vizuális kreativitás hatására). Emellett a verbális kreativitással kapcsolatban a kiterjedt agyi hálózatok közti magas nyugalmi funkcionális konnektivitásbeli variabilitás, tehát a hálózatok dinamikus rekonfigurációja is fontos szempontnak tűnik, főként a DMN és a frontoparietális kontroll, valamint a figyelmi hálózatok között (Feng és mtsai, 2019; Sun és mtsai, 2019).

Eredmények a művészi vs. tudományos domének alapján

A kreativitás domén specifikusságának egy másik fontos dimenziója a művészi és tudományos kreativitás közti neurális különbségek felderítése, bár ilyen összehasonlítások még kevés cikkben jelennek meg. Shi és munkatársai (2017) strukturális agyi különbségeket vizsgáltak, melynek során az egyének művészi és tudományos kreatív teljesítményét a CAQ teszt kétfaktoros modellje szerint határozták meg (Carson és mtsai, 2005). Ennek során amíg a művészi kreatív teljesítmény negatív korrelációt mutatott a szupplementer motoros area és az anterior cinguláris kéreg szürkeállományi térfogatával, ezáltal pedig a kiemelő hálózattal, addig a tudományos kreatív teljesítmény pozitív korrelációt mutatott a bal középső frontális gyurus és bal inferior okcipitális gyurus térfogatával, ami a végrehajtó kontroll és a szemantikai feldolgozás fontosságát mutatja. Emellett divergens gondolkodás során (Szokatlan Használat Teszt) a vizuális művészi kreatív csoport megnövekedett aktivációt mutatott a jobb inferior frontális gyurus és a bal supramarginális gyurus területén a tudományos kreatív csoporthoz képest, de mindkét kreatív csoportban kisebb volt a frontális, végrehajtó funkciókhoz köthető területek aktivációja az intelligenciában illesztett, de nem kreatív csoporthoz képest. A konvergens gondolkodást igénylő feladat során (Távoli Asszociációk Teszt) viszont sem doménspecifikus, sem kreativitásbeli különbségek nem jelentkeztek az agyi aktivációs mintázatokban (Japardi, Bookheimer, Knudsen, Ghahremani és Bilder, 2018).

Eredmények a zenei domén alapján

A zenei kreativitást azért tárgyaljuk itt külön, mert talán az improvizáción keresztül tudjuk a leginkább megvizsgálni a komplex kreatív folyamatot ökológiailag valid módon. Az improvizáció során a zenészek az idegtudományi vizsgálatok időkeretein belül

is valódi kreatív teljesítményt nyújtanak, amihez a kísérletekben egy tanult darab eljátszása biztosítja a kontrollkondíciót.

Sawyer 2011-es összefoglaló cikkében a zenei kreativitáshoz és improvizációhoz tartozó addigi eredmények összefoglalásán keresztül főként a dorzális premotoros kéreg, az anterior cinguláris kéreg, illetve az inferior frontális gyrus megnövekedett aktivációját, valamint a laterális prefrontális kérgi területek csökkent aktivációját figyelte meg a különböző kontrollhelyzetekhez képest. Ez egyrészt az új zenei szekvenciák megalkotásához, motoros tervezéséhez és kivitelezéséhez, illetve a döntéshozatali folyamatához tartozó agyi területek megnövekedett aktivációját jelenti, másrészt a gátlási folyamatok, mint a hiba- és célorientált monitorozás és korrekció csökkent szerepét mutatja. Ehhez hasonló eredményekre jutott Boccia és munkatársainak metaanalízise (2015) is a zenei kreativitáshoz köthető agyi területeket illetően.

Ezenkívül Bashwimer és kutatócsoportja különböző kiterjedt neurális hálózatokhoz tartozó agyi területek strukturális (2016) és nyugalmi funkcionális konnektivitásbeli (2020) különbségeit vizsgálta zenei kreativitás alapján, amit önbevallásos tesztekre és kérdőívekre adott válaszok alapján végeztek. Az eredmények alapján a zenei kreativitással rendelkező alanyoknál megnövekedett a kérgi és kéreg alatti szürkeállományi térfogat olyan agyi területeken, melyek az alapértelmezett üzemmódú hálózathoz, a motoros tervezési hálózathoz, illetve a limbikus rendszerhez tartoznak, valamint megnövekedett a nyugalmi funkcionális konnektivitás is ezek között az agyterületek között. Mindebből arra következtettek, hogy a területspecifikus zenei szakértelem a DMN-hez kapcsolódó kognitív stílussal és az intenzív érzelmi élménnyel közösen facilitálja a zenei kreativitást.

Az ebben a fejezetben bemutatott kutatások rámutatnak annak a felfogásnak a fontosságára, miszerint a kreativitást területspecifikus képességként kell kezelnünk, hiszen a különböző doménekből vizsgált kreativitásadatok bizonyítják, hogy nemcsak eltérő hálózatok aktiválódnak, de más kognitív működések is kapnak hangsúlyt annak megfelelően, hogy milyen területet vizsgálunk, azaz semmiképpen sem beszélhetünk egy területáltalános képességről a kreativitás kapcsán.

A dopamin szerepe a kreativitásban

A kreativitás neurobiológiai kutatásában fontos szerepet játszik a dopaminerg rendszer vizsgálata. A dopaminerg rendszer egyrészt szükséges a hatékony motoros, végrehajtó és epizodikus emlékezeti funkciókért, valamint a jutalmi ingerek által közvetített ingerfeldolgozásért, tanulásért és előrejelzésért, másrészt központi szerepet tölt be a kognitív flexibilitás és perzisztencia szabályozásában és ezek egyensúlyának kialakításában és fenntartásában. A nigrostriális dopaminerg pálya, amely a bazális ganglionok dopaminerg szabályozását hozza létre, felel a flexibilis kognitív feldolgozásért, a cél-reprezentációk frissítéséért a megjelenő új ingerek hatására és a feladatok és stratégiák közti váltásért. Ezzel szemben a mezokortikális dopaminerg pálya, amely a ventrális tegmentális területből projektál a prefrontális kérgi területek felé, a perzisztens kognitív feldolgozást szabályozza, ezáltal pedig fenntartja a figyelmet, a munkamemória és a kognitív kontroll hatékonyságát. Ezek alapján Boot és munkatársai 2017-es össze-

foglaló cikkükben (2017b) létrehozták azt az elméleti keretrendszert, amely alapján a kreatív kogníció szabályozásában a dopaminerg rendszer kulcsfontosságú. Míg a divergens gondolkodásért, az ötletek és perspektívák közti váltásért és a távoli koncepciók összekapcsolásáért a striátális dopaminszint felel, addig a konvergens gondolkodásért, az egy kategóriába tartozó ötletek generálásáért és az analitikus feldolgozásért a prefrontális dopaminszint felel. A hatékony kreatív kogníció megvalósulásához a két dopaminerg rendszer közötti egyensúlynak kell fennállnia, amely fordított-U alakú lefutást követ a két terület dopaminszintjében. Emellett a dopaminerg rendszer olyan más pszichológiai faktorokat is befolyásol, amelyek kreatív hajtóerőként hatnak, mint például a motiváció, a jutalomfeldolgozás, az újdonságkeresés vagy a hangulat szabályozása főként a mezolimbikus dopaminerg pályán keresztül (Khalil, Godde és Karim, 2019).

A kreativitás idegtudományi modelljei

Összességében az idegtudományi kutatások előtérbe helyezik az egyes agyi régiók és neurotranszmitterek szerepét, összekapcsolva ezeket bizonyos kognitív funkciókkal, és ezek vizsgálatán keresztül gazdagítják számos új hipotézissel a kreativitás kutatását. Míg például Beversdorf (2019) a noradrenerg és dopaminerg rendszerek egymásra hatását hangsúlyozza a kreatív viselkedésben, azok szerepét a végrehajtó funkciókban és kognitív flexibilitásban, addig Chrysikou (2019, Chrysikou, Weber és Thompson-Schill, 2014) azt emeli ki, hogy a kreativitás különböző részfolyamatai eltérő igényekkel rendelkeznek, így a teljesítmény attól függ, hogy a prefrontális végrehajtó rendszer és a poszterior kéreg alatti régiók, köztük a DMN milyen arányban vesznek részt a folyamatban. Ezzel az elképzeléssel áll összhangban Nijstad és munkatársainak (2010), illetve Zhang és munkatársainak (2020) modellje is, amelyekben a kreativitás két ösvénye a kognitív flexibilitás és a kognitív perzisztencia. Kleimnitz és munkatársai (2019) a kreativitás kettős modelljében az ötletek generálásának és kiértékelésének ciklikus változását vizsgálják, melynek során az új és megfelelő ötletek további kidolgozásra kerülnek, míg a nem megfelelőeket elutasítják. Beaty és munkatársai (2019) elképzelésében a DMN és az ECN funkcionális konnektivitása kerül előtérbe. A célirányított emlékezeti előhívás esetén a két hálózat összekapcsolódásával történik az epizodikus, szemantikus emlékezetben a feladathoz szükséges információ stratégiai keresése, kiválasztása, az elemek kombinálása a divergens feladatban. A domináns válasz gátlása a nyilvánvaló ötletek elvetésével segíti a kreatív megoldásokat. Míg a DMN az automatikus válaszok aktiválásában, addig az ECN a nyilvánvaló, irreleváns válaszok gátlásában játszik szerepet. A modell harmadik eleme a befelé fókuszált figyelem, amely szintén fontos eleme a divergens gondolkodásnak, és az ECN poszterior része segíti ezt a szenzoros ingerek csillapításával. Végül Jauk (2019) bio-pszicho-viselkedéses modelljét említjük, melyben kísérletet tesz a mindennapi kreatív viselkedés, a pszichológiai konstruktumok (élményekre való nyitottság, kognitív kreatív potenciál, intelligencia) és a neurobiológiai elképzelések (dopaminerg rendszer, DMN, ECN) integrálására.

Befejezésül Sunavsky és Poppenk 2020-ban megjelent vizsgálatával foglaljuk össze a kreativitáshoz köthető agyi strukturális és funkcionális változások képkalkoló eljárásokkal elért eddigi eredményeit. Kísérletükben egy multimodális megközelítést alkal-

maztak: a korábbi kutatásokban a kreativitás mérésére használt főbb tesztekett vették fel (a divergens gondolkodás vizuális és verbális tesztjei, mindennapi kreatív viselkedés, kreatív teljesítmény), és ezt kombinálták a képalkotó eljárásokkal mért térfogati, fehérállományi és funkcionális konnektivitási adatokkal. Ezek alapján a kreativitás bejósolható az inferior frontális gyirus (végrehajtó kontrollhálózat része) és az inferior parietális lebeny (alapértelmezett üzemmódú hálózat része) szürkeállományi térfogata, fehérállományi integritása, valamint a két terület közti fehérállományi integritás (a superior longitudinális fasciculuson keresztül), illetve a funkcionális konnektivitás alapján. Megállapítható tehát, hogy a kreativitás neurobiológiai hátterében nagyon fontos szerepet játszik az alapértelmezett üzemmódú hálózat, a végrehajtó/frontoparietális kontrollhálózat és a köztük levő funkcionális együttműködés. Emellett a bazális ganglionok fehérállományi integritása, a kisagy anterior lebenye, valamint a parahippokampális gyirus szerkezeti tulajdonságai is bejósolják a kreativitást, ami a motoros tervezés és kivitelezés, a munkamemória és emlékezet, a döntéshozatali folyamatok, illetve a dopaminerg rendszer fontosságát is jelzi a kreativitással kapcsolatban.

Bár az itt összefoglalt eredmények nagyon ígéretesek a kreativitás megismeréséhez vezető úton, és viszonylag koherens képet mutatnak annak neurobiológiai hátteréről, van olyan elképzelés is, mely szerint a kreativitás kutatása alapvetően rossz úton jár: a tesztek validitása megkérdőjelezhető, mint ahogy az is, a mindennapi életről mondanak-e valamit (Dietrich, 2019). A legtöbb kutatás csak egy részfolyamatot vizsgál, és ezzel valószínűleg a teljes folyamat lényege veszik el. Ebből kifolyólag a kutatási terület elméleti és fogalmi megújulása vezethetne csak el ahhoz, hogy valódi előrelépés történjen a kreativitás megértésében.

MATEMATIKAI TEHETSÉG ÉS IDEGTUDOMÁNY

Féltekei aktiváció

A terület kutatásairól összefoglalójukban nem festenek túl optimista képet Myers és munkatársai (2017), akik két fő kritikát fogalmaztak meg. Az egyik a kutatások statisztikai ereje. Elemzésük szerint az összefoglalójukban bemutatott idegtudományi módszerekkel végzett kísérletek közül egyetlenegy sem érte el a legalább közepes hatásmagnúság kritériumát. A másik probléma az, amit Poldrack (2006) nyomán „visszamenőleges következtetésnek” (backward interference) neveznek. Képalkotási módszerekkel számos agyi terület aktivitásának változása különböző pszichológia terminusokkal leírható működésben is megfigyelhető. Ha elvégeznek egy vizsgálatot, ahol az adott terület aktivitása változik, annak vélelmezése, hogy e feladatban milyen szerepet töltött be az illető terület, félrevezető lehet (egyszerűen szólva, a sokféle funkció közül „ki lehet mazsolázni” az éppen megfelelőnek ítéltet), különösen akkor, ha párhuzamosan nem végeztek vizsgálatot az illető funkció által kiváltott aktivitásról. Egy másik, hasonló időben íródott összefoglalás (Zhang, Gan és Wang, 2017) mellőzi a kritikai észrevételeket, és kizárólag az idegtudományi eredményekre koncentrálna részletesebben bemutatja a releváns területeket. Jelen összefoglalás nem törekszik teljességre, de igyekszik bemutatni a módszereket és a területen legaktívabb kutatócsoportok eredményeit és

nézeteit. A bemutatott vizsgálatokban, mint a terület hagyományos pszichológiai eszközökkel végzett kutatásainak döntő többségében, serdülőket vizsgáltak. Ennek egy technikai és egy (talán) gyakorlati oka van. A technikai: e korosztályt vizsgálva rendelkezésre állnak az iskolai eredmények a matematika területén, elvégezhető intelligenciát mérő eljárások, és alkalmazhatók az idegtudományi módszerek (agyi elektromos regisztráció, képalkotási eljárások). A gyakorlati ok: a kutatások egyik célja az olyan módszerek kialakítása lehet, melyek segítségével előrejelezhető, kik azok, akik potenciálisan jól teljesítenek majd olyan területeken, ahol jelentős a matematika szerepe. Hogy ettől a kutatások milyen távolságban vannak, a következtetésekben térünk vissza, de az olvasó maga is megítélheti. A matematika területén, mint a legtöbb egyéb területen, érvényes, hogy a produktivitásnak vannak (1) általános kognitív tényezői (olyanok, melyeket az intelligenciatesztek mérnek), (2) olyanok, melyek területspecifikusak, (3) melyek a kreativitáshoz kapcsolódnak (beleértve a területre specifikusakat), és (4) vannak motivációs jellemzők. A kutatások az (1) és (2) tényezőre koncentrálnak. Ezen belül a vizsgálatok egyik része a pszichológiában egyébként használt módszereket alkalmaz (pl. mentális forgatás, London-torony, globális-lokális ingerazonosítás), más kutatások a logikai gondolkodásra koncentrálnak (szillogizmusok igazságértéke), és van olyan irány, mely speciálisan matematikai feladatokat vizsgál (képlet-diagram egyeztetés, számtani műveletsorok felismerése).

Az 1990-es években még a tudományban is élt (és a közvélekedésben még ma is domináló) nézet, mely a két agyfélteke eltérő funkciójával a féltekék önálló kompetenciájára összpontosított, és kevésbé azok együttműködésére. A matematikai tehetség vizsgálatában a kiindulópontot a matematikai tehetség esetén a feltételezett jobb féltekei dominancia jelentette. Példaként O'Boyle és munkatársai (1991) 12–14 éves, fiúkból álló, matematikában kiváló és átlagos csoportot hasonlított össze az alfateljesítmény szempontjából (az alfa súlyának csökkenése a fokozott aktivitás mutatója) nyugalmi helyzetben, és akkor, amikor félig semleges, félig vidám arcképelekből összeállított arcokról kellett döntenie, hogy a kép mennyire vidám. Az arcképekre a matematikában kiváló személyeknél a jobb oldalon a temporális területek felett az alfateljesítmény csökkent, a matematikában átlagos csoportban viszont nem voltak laterális eltérések. Verbális feladatban (főnév vagy ige volt a bemutatott szó) nem volt eltérés. Később a témában jelentős kutató, O'Boyle árnyaltabb eredményeket mutatott be, és az interpretáció is árnyaltabb lett. Singh és O'Boyle (2004) értelmezése szerint a bal és jobb félteke eltérő kognitív specializációja oly szorosan fonódik össze, hogy neurológiailag egészséges személyeknél konfliktus csak elvétve adódik. Ennek megfelelően a matematikában kiválóaknál a két félteke integrációjának módja az, mely megkülönböztethető az e téren átlagostól: a jobb félteke fokozott aktivitációját a két félteke fokozott együttműködése kíséri. Singh és O'Boyle (2004) kísérletében a SAT-teszt² matematikai részében kiváló és speciális tehetségfejlesztési programban részt vevő 13–14 évesek, egy átlagos teljesítményt mutató, korban illesztett csoport, és egy átlagosan 20 év körüli pszichológia szakos csoport vett részt. A feladat

² A SAT (Scholastic Aptitude Teszt) az amerikai egyetemeken általánosan alkalmazott, több részből álló felvételi teszt. Léteznek nem angol nyelvű változatai. A SAT-ról ld. <https://collegereadiness.collegeboard.org/sat>

a Navon (1977) által bevezetett lokális-globális feladat módszer egy változata volt. Az eljárásban a globális szintű betűket lokális szintű betűkből állítják össze. A globális szintű betű vagy azonos lokális szintű betűkből vagy eltérő lokális szintű betűkből állhat. Jelen feladatban két globális szintű betűt mutattak be egymás felett a bal vagy a jobb látótérben, vagy bilaterálisan (az egyik betű az egyik, a másik a másik oldalon). A résztvevőknek a globális feladatban a két globális betű azonosságáról vagy különbözőségéről kellett döntenie, a lokális szinten pedig a lokális betűk azonosságáról vagy különbségéről. Az ilyen feladatokban a globális és lokális betű eltérése általában a lokális feladatban rontja a teljesítményt, és ez a hatás akkor nagyobb, ha a feldolgozás a bal látótér – jobb félteke rendszerében történik. Singh és O'Boyle (2004) eredményei szerint az átlagos teljesítményű és az egyetemista csoport ilyen eredményeket mutatott. A kiváló matematikus csoportban e hatás kisebb volt, és ami a leglényegesebb, amikor az egyik betű az egyik, a másik a másik oldalon jelent meg, a matematikában kiváló teljesítményű csoportban a lokális döntésben a globális zavaró hatás lényegesen kisebb volt, mint a másik két csoportban. Az eredmények szerint e csoportban a két félteke együttműködése mutatkozott hatékonyabbnak.

A két félteke eltérő bevonódása nem minden vizsgálatban mutatkozott meg. Haier és Benbow (1995) a pszichológiai tematikában ma kevesebbet használt pozitronemissziós tomográfia (PET) módszerével vizsgálta matematikai gondolkodási feladatok alatt (a feladatok a SAT matematikai anyagából kerültek ki) az idegrendszeri aktivációt ~17 éves korcsoportban. A személyek a matematikai eredményesség szerint magas vagy átlagos teljesítményt mutattak. Az agyi glükózfelhasználáson alapuló eredmények szerint sem a nőknél, sem a férfiaknál nem mutatkozott jobb féltekei aktivitásfölény, ami – legalábbis e módszertan szerint – nem utal féltekei eltérésre.

Téri feladatok, fluid intelligencia

Desco és munkatársai (2011) a matematikai tehetségre jellemző esetleges idegrendszeri jellemzőket két feladat esetében vizsgálták 12–14 éves gyermekeknél. Az egyik csoport speciális matematikai orientációjú tehetségprogramban vett részt, a kontrollcsoport matematikai teljesítménye átlagos volt. A vizsgálatban fMRI-aktivációt vizsgáltak a Raven-teszt és London-torony feladat alatt,³ mindkét teszt esetében könnyű és nehéz feladatok alkalmazásával. A két neuropszichológiában használatos eljárás átfogja (de nem elemzi részleteiben) a fluid intelligenciához tartozó következtetést, a téri-vizuális munkamemóriát, a tervezést és a végrehajtó működések több vonatkozását. A fentieknek megfelelően várakozásuk szerint a jellegzetes változások a felső parietális kéregben, intraparietális kéregben és a dorzolaterális prefrontális kéregben várhatók, és aktivitásuk a feladat nehézségétől függően fokozódhat. Megjegyzendő, hogy e területeknek számos egyéb funkció is tulajdonítható, és mint erről fentebb szó

³ A London-torony feladat némileg hasonlít a Hanoi-torony feladathoz. Három korongot kell áthelyezni a megadott minta szerint két pálca felhasználásával, ahol az egyikre kettő, a másikra egy korong fér fel. A feladat nehézsége változtatható (Culbertson és Zillmer, 1998).

volt, a két félteke közti kapcsolatok erősödése különösen a matematikában tehetséges gyerekeknél volt várható (O'Boyle és mtsai, 2005).

Az eredmények (némileg meglepő) vonatkozása, hogy a viselkedéses mérésekben a két csoport között az eltérések csak abban mutatkoztak meg, hogy a London-torony feladatban a hibás válaszokban a matematikailag tehetségesebb csoport gyorsabb volt, a Raven-tesztben pedig a nehéz feladatban a helyes válaszok száma volt magasabb ebben a csoportban. Az fMRI-vel mért aktiváció széles területeket érintett a frontális, parietális és temporális kéregben, mely a matematikában tehetséges csoportban mindig kétoldali volt, és több területre terjedt ki. A könnyű feladatoknál a jobb oldali aktiváció az ellenoldalhoz képest erősebb volt, mint a nehéz feladatoknál. Összehasonlítva a két csoportot, a kontrollcsoport sehol sem mutatott nagyobb aktivációt, mint a matematikában tehetséges. Kiemelendő a központi végrehajtó működésekben általában szereplő dorzolaterális prefrontális kéregaktivitás fokozódása és a jobb félteke fokozottabb bevonódása nehéz feladatokban a matematikában tehetséges csoportban.

A parietális területek szerepe a téri feldolgozásban és a számtannal kapcsolatosan általánosan elfogadott (pl. Dehaene, Piazza, Pinel és Cohen, 2003), és kapcsolata a frontális területekkel mint fronto-parietális hálózat alapvető a fluid intelligenciában (Jung és Haier, 2007). Az eredmények felvetik a terület (kevés) elméleti vonatkozásából az egyik legfontosabbat, az idegrendszeri hatékonyság lehetőségét (pl. Neubauer és Fink, 2009) szemben a fokozódó bevonódással. Az idegrendszeri hatékonyság elve szerint a jobb teljesítmények mögött a hálózatok hatékonysága áll, a fokozott bevonódás pedig olyan területek működését feltételezi, melyek nehezebb feladatok esetében magasabb teljesítményhez vezethetnek. Tulajdonképpen a két lehetőség nem zárja ki egymást, és Desco és munkatársai (2011) ebbe az irányba mutatnak.

Amennyiben a téri-vizuális sajátosságoknak lényeges a szerepe a matematikai tehetségben, úgy várható, hogy ennek jelentős hatása lesz egy olyan paradigmában, mely erősen erre a funkcióra irányul. Ilyen a mentális forogtási eljárás. Hoppe és munkatársai (2012) fMRI-mérés alatt adtak mentális forogtási feladatot (Shepard és Metzler, 1971) 15–18 éves fiúknak és lányoknak, egy matematikában tehetséges (iskolai javaslat, illetve matematikai versenyen való részvétel) és matematikában átlagos kontrollcsoportban. Az eredmények szerint az inferior parietális kéreg aktivitását befolyásolta a feladat nehézsége, viszont az aktivitás a matematikában tehetséges fiúknál volt a legnagyobb.

A mentális forogtás módszerét szintén fMRI-kísérletben vizsgálták Prescott és munkatársai (2010). Céljuk a féltekén belüli és féltekék közötti kapcsolatok vizsgálata volt, kiemelve a dorzolaterális prefrontális kérget (azaz a központi végrehajtó rendszerhez tartozó területet), a parietális területeket (melyek többek között a téri-vizuális feldolgozásban szerepelnek) és a premotoros területeket. A vizsgálatban ~14 éves fiúk vettek részt. A matematikában tehetséges csoportot a SAT matematikai részének ausztrál változata alapján választották ki. A csoport magas performációs IQ-ja meghaladta a verbális IQ-t. A kontrollcsoportban a performációs és verbális IQ nem különbözött, az előbbi alacsonyabb volt a matematikában tehetségesekénél. A mentális forogtási eljárásban a két csoport teljesítménye sem a hibázások számában, sem pedig a reakcióidőben nem tért el. Eltérések mutatkoztak viszont a feladatok közben regisztrált aktivi-

tásban. A két csoport között különbség volt a fronto-parietális kapcsolatokban, melyek erősebbek voltak mindkét féltekében a matematikában tehetséges csoportban. Erősebbek voltak a féltekék közötti kapcsolatok e csoportban a dorzolaterális prefrontális kéreg és a premotoros kéreg esetében is.

Intelligencia és matematikai teljesítmény

Az eddigi vizsgálatokban az intelligencia és a matematikai kiválóság nem szerepelt külön faktorként külön csoportokban. A következő kutatássorozatban azt vizsgálták, hogy miben állhat a matematikai tehetség idegtudományi módszerrel jellemezhető specifikuma a tehetség általános, intelligenciával jellemezhető vonatkozásaival szemben serdülőknél. Olyan csoportokat állítottak össze, ahol a matematikai tehetség és az intelligencia egyaránt magas volt, ahol a matematikai tehetség magas volt, de az intelligencia nem volt kiemelkedő, ahol a matematikai tehetség nem volt kiemelkedő, de az intelligencia igen és ahol sem a matematikai tehetség, sem az intelligencia nem emelkedett ki az átlagból. A kutatásokban részt vett egy a matematikában különlegesen teljesítő csoport, ennek tagjai már egyetemi szinten tanultak matematikát, vagy tagjai voltak a nemzetközi olimpiai csapatnak informatikából. A kísérletekben matematika-specifikus feladatokat alkalmaztak. A vizsgálatokban sajnos a csoportok elemszáma alacsony volt, és az eseményekhez kötött agyi elektromos tevékenység alkalmazott mutatói behatárolták az elemzés érzékenységét.

Waisman és munkatársai (2014) vizsgálatában a feladatokban először megjelent egy grafikusán ábrázolt függvény, majd egy képlet, a részvevőknek pedig el kellett dönteni, hogy ezek megfelelnek-e egymásnak, vagy sem. Ennek megfelelően az agyi elektromos tevékenységet mérték a grafikus megjelenítésre és a képlet megjelenésére. A próbákban az inger megjelenését követő agyi elektromos aktivitás (eseményhez kötött potenciál) átlagából a korai, perceptuális folyamatokra jellemző P1 összetevő nagyságát és latenciáját (a P1 a referenciához képest pozitív hullám, az inger megjelenése után ~100 ms maximális amplitúdóval és latenciával), valamint a késői pozitív összetevő nagyságát mérték. A késői pozitívítás nem köthető valamilyen pszichológiai fogalommal leírható folyamathoz (Verleger, 2020), de általában nagyobb, ha a kognitív folyamatok nagyobb intenzitásúak.

A feladatban a viselkedéses adatok szerint a leglassabb a magas intelligenciaértékű, de matematikában nem kiemelkedő csoport volt (szignifikánsan lassabb a két matematikában tehetséges csoportnál), a legkisebb hibaszámot és a leggyorsabb válaszokat pedig a matematikában extrém tehetséges csoport adta.

A grafikus ábrázolás bemutatásakor a P1 komponens latenciája az extrém tehetséges csoportnál hosszabb volt, mint a matematikában tehetséges, de a Raven-tesztben nem kiemelkedő csoportban, amit a szerzők az előbbi csoportba tartozó személyeknél az elmélyültebb perceptuális értékelésnek tekintettek. Ugyanakkor viszont a késői komponenst a legnagyobb amplitúdóval éppen az utóbbi csoportban mérték, ami arra utal, hogy itt volt szükség a legnagyobb intenzitású „mentális erőfeszítésre”, amivel egybecseng, hogy a válaszok latenciaideje itt volt a leghosszabb. Az eredmé-

nyek szerint az extrém matematikai tehetség olyan képesség, mely e vizsgálat elektrofiziológiai mutatóiban (az óvatosan kezelendő P1 latencianövekedés kivételével) nem mutatkozhatott meg.

A szerzők a második elektrofiziológiai kísérletben (Waisman, Leikin és Leikin, 2016) logikai következtetéseket igénylő geometriai feladatot adtak, az előző (Waisman és mtsai, 2014) kísérlethez hasonló résztvevőkkel és elektrofiziológiai módszerekkel. Az első szakaszban bemutattak egy részállítást (a legkönnyebb példa: egy olyan négy-szögben, ahol az oldalak egyenlőek, és az átlók is egyenlőek), ezt követte (második szakasz) az állítás második fele (példánkban: négyzet). A válasz a helyes vagy helytelen gomb lenyomása volt reakcióidő helyzetben. Az agyi eseményhez kötött potenciálokat a szakaszokra külön elemezték.

A matematikában extrém kiváló és kiváló csoport pontossága felülmúlta a matematikában átlagos csoportokat. E csoportok a feladat első szakaszában reagáltak nagyobb késői pozitívításmplitúdóval. Ugyanakkor a második szakaszban az eseményhez kötött potenciálok késői szakaszában a legalacsonyabb amplitúdó az extrém tehetséges csoportnál adódott. A szerzők ezt az idegrendszeri hatékonyság elve szerint értékelték: viszonylag alacsony terhelés mellett a hatékonyabban működő idegrendszeri hálózatok alacsonyabb aktivitása is elégséges, az aktivitás magasabb terhelés mellett növekszik (Neubauer és Fink, 2009). Meg kell jegyezni, hogy az előző kísérletben markáns eredményt, a Raven-tesztben nem kiemelkedő, de a matematikában tehetséges csoport kiemelkedően magas aktivitását a késői szakaszban e kísérlet eredményei nem ismételték meg.

Hálózati eltérések

Matematikában tehetséges és átlagos csoportban az idegrendszeri összeköttetések esetleges eltéréseit vizsgálták Navas-Sanchez és munkatársai (2012) a fehérállomány aktivitását regisztráló diffúziós tenzoros képalkotással. A résztvevők 11–15 éves gyerekek voltak, a matematikában tehetséges csoport speciális matematikai tehetséggondozó programban vett részt, az életkorilag összemért kontrollcsoport matematikai teljesítménye átlagos volt. A két csoportban az intelligencia mérésére a Wechsler-teszt spanyol változatának részpróbáit alkalmazták. A csoportok között a verbális és a performancia kvóciensek esetében is a matematikában tehetséges csoport magasabb értékeket ért el, mint a kontrollcsoport. A képalkotási eljárás szerint (frakcionális anizotrópia) az egész mintára nézve az intelligencia és a két féltékét összekötő corpus callosum rostrendszerének kiterjedtsége között pozitív korrelációs kapcsolatot találtak. Az intelligenciakülönbségek korrekciója után a matematikában tehetséges csoportban az elülső területeket erősebb pályarendszerek kötötték össze a kéreg alatti területekkel, a frontális lebenyt a parietális lebennyel, és erősebbek voltak az összeköttetések a corpus callosumon keresztül. E strukturális vizsgálat adatai így hasonló képet mutatnak, mint korábban más említett funkcionális vizsgálatok adatai.

A vizsgálatok egy sorozata az elektromos működésben az egyes frekvenciasávok agyterületek közötti szinkronizált működése alapján megállapítható hálózatok elemzését vizsgálta. Az első kísérletben (Zhang, Gan és Wang, 2015a) a théta hullámsáv szinkro-

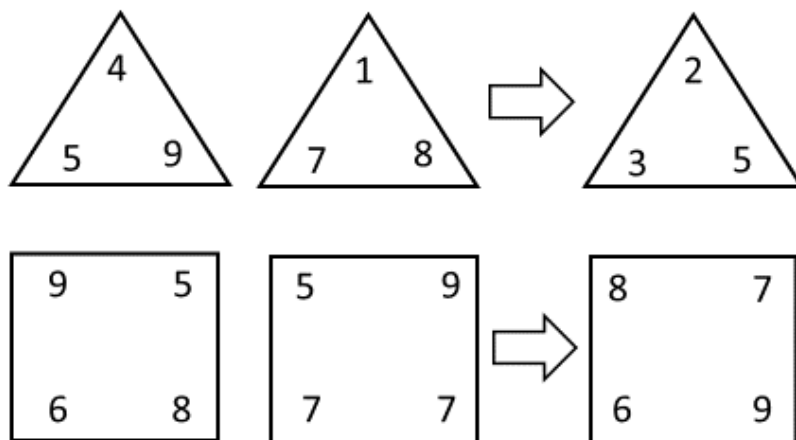
nizációját vizsgálták (a théta az EEG 4–7 Hz frekvenciájú sávja, mely a munkamemória kontrollfolyamataival állhat kapcsolatban, pl. Sauseng, Griesmayr, Freunberger és Klimesch, 2010). Feltételezésük szerint a matematikában tehetséges serdülőknél szillogizmusok igazságtartalmának megítélésekor a frontoparietális hálózat, és különösen a két félteke közötti kapcsolatok (konnektivitás) hatékonyabban működnek, és az agy számos területe, így a központi végrehajtó működésben szerepet játszó más területek, továbbá a premotoros kéreg is bevonódik a feldolgozásba. E feltételezés az összefoglalásban korábban bemutatott adatokra (pl. Prescott és mtsai, 2010, Desco és mtsai, 2011) alapoz. A szerzők feltételezése szerint ezáltal kiszélesedik az a „munkaterület”, mely közreműködik a feladat megoldásában.

A vizsgálatban 15–18 évesek vettek részt. A matematikában tehetséges csoport tagjai országos kiválasztás után speciális osztályokba jártak, Raven-teszt-eredményük kiemelkedő volt, a kontrollcsoport tagjai átlagos osztályokba jártak. A kísérletekben a feladat deduktív következtetések igazságának megítélése volt, reakcióidő feltételben. A szillogizmusokat elvont formában mutatták be. Elsőként a felső premisszát mutatták be (pl. Egyetlen A sem B), majd ezzel együtt az alsó premisszát is (pl. Egyetlen A sem B; Minden X B), végül megjelent a következtetés is (pl. Egyetlen A sem B; Minden X B; Egyetlen A sem X). A személyeknek ezt követően kellett „igaz”-„nem igaz” döntést hozni. A thétaaktivitás változását következtetést nem igénylő próbákhoz képest mérték, és az eredményekből az ingerhez kapcsolódó, a thétafázisok területek közötti koherenciáját elemezték, különös tekintettel a két oldal közötti frontális, és az oldalakon belüli frontoparietális kapcsolatokra. Az eredmények szerint a matematikában tehetséges csoportban jellemző volt a frontoparietális szinkronizáció fokozódása, és főként a frontális területeken az egyes csomópontok kiterjedésének növekedése, míg a kontrollcsoportban a kapcsolatok összhosszúságának növekedése jelentkezett.

A csoport következő vizsgálata (Zhang, Gan és Wang, 2015b) a gammasávban (30–60 Hz) mutatkozó szinkronizációt vizsgálta. A gammaoszilláció szinkronitása kisebb területeken a helyi információfeldolgozás indikátora, területek között azok együttműködésének mutatója. A vizsgált minta kialakítása azonos volt az előzőleg bemutatott kísérletével. A feladat háromelemes (könnyebb változat) és négyelemes (nehezebb változat) indukciós gondolkozási feladat volt. Az 1. ábra illusztrálja a feladatot. A résztvevők maguk állították be, mennyi ideig volt látható az ábra bal oldalán (elsőként bemutatott) három vagy négy számból álló együttes.

Az 1. ábra bemutatására a nehezebb feladatban a résztvevők hosszabb időt vettek igénybe. A matematikában tehetséges csoport a helyes válaszokban és a reakcióidőben is felülmúlta a kontrollcsoportot, a teljesítmények mindkét mutatója természetesen jobb volt a könnyebb feladatban. A teljesítményeltérések a csoportok között megnöttek a nehéz feladatban.

Az első szám együttes bemutatásakor a matematikában tehetséges csoport a könnyebb feladatban kisebb, a nehezebb feladatban nagyobb általános aktivitást mutatott, mint a kontrollcsoport, ami megfelel az idegrendszeri hatékonyság modelljének. Ugyanakkor a nehéz feladatban az együttesek bemutatása során az aktivitás a tehetséges csoportban csökkent nagyobb ütemben, ami szintén egybecseng az idegrendszeri hatékonyság modelljével. A fronto-parietális hálózat aktivitására a könnyű feladatban jellemző volt a csökkenés a matematikában tehetséges csoportban, dominánsabban a



1. ábra. A 3 és 4 elemes feladat példája. Először a bal oldali háromszöget, illetve négyszöget mutatják be, majd ezt a középsőkkel együtt, végül a jobb oldalt is. A résztvevőnek arról kell döntenie, hogy a jobb oldali számok megfelelnek-e vagy sem annak a szabálynak, amelyet a másik két együttes meghatározott

jobb oldalon. Más szóval, e csoportnak ilyenkor kisebb szüksége volt a frontális kontrollrendszer használatára.

A kutatócsoport legújabb vizsgálata (Zhang, Gan, Zhu, Wang és Wang, 2020) egy lépéssel tovább ment. A vizsgálatokban az agyi elektromos tevékenység elemzésének olyan lehetőségét alkalmazták, mely a gamma oszcilláció szinkronizációjának alapján rövid, 50 ms-os szakaszokban elemez jellegzetes agyikapcsolat-együtteseket (hálózatokat), és ezek alapján az egyes hálózatok között az egymásba való átmenetek valószínűségét. A jellegzetes kapcsolatokat szinkronállapotoknak nevezik. A kísérlet résztvevőit a kutatócsoport előző vizsgálatához hasonlóan válogatták. A feladat során dönteni kellett szillogizmusok igazságtartalmáról, ahogy Zhang és munkatársai (2015a) kísérletében. A feldolgozás módszerével hét jellegzetes hálózatot (szinkronállapotot) határoztak meg. Ezek közül a matematikában tehetséges csoportban a központi végrehajtó működésekre jellemző hálózat (dorzolaterális prefrontális kérgi centrummal és gazdag féltekék közötti kapcsolatokkal) és a jobb oldali frontotemporális hálózat működésének időtartama mutatkozott a kontrollcsoporténál nagyobboknak. Ennél is újszerűbb az az eredmény, hogy ebben a csoportban megnőtt annak a valószínűsége, hogy a többi hálózat aktivitását e két hálózat működése kövesse.

Matematikai tehetség: összefoglalás és konklúziók

A matematikai tehetség vizsgálatára alkalmazták a humán kognitív idegtudomány legtöbb módszerét. Az agyi elektromos tevékenység elemzése során a frekvenciatartományban kezdetben az egyszerű harmonikus elemzések alapján főleg az alfa hullám abszolút vagy relatív teljesítményváltozását vizsgálták, később a théta- és gammaoszci-

láció szinkronitása alapján azonosítottak hálózatokat, majd a hálózatok közötti átmenetek valószínűségeinek alapján igyekeztek feltárni a matematikai tehetség jellemző idegrendszeri működését. Hasonló volt a cél az eseményhez kötött agyi elektromos tevékenység elemzésével. A képalkotó eljárások területén a pozitronemissziós tomográfia, az fMRI-módszer és a fehérállományt vizsgáló diffúziós tenzorleképezés szintén bekerült a vizsgáló módszerek közé. A közös eredményekből kiemelkedik a homloklebeny és a parietális, valamint a homloklebeny és a temporális lebeny kapcsolatának fontossága csakúgy, mint a frontális területeken belüli összeköttetések szerepe (erősebben a jobb oldalon). Ami a frontális területek működését illeti, ott az aktivitás könnyű feladatoknál csökkenhet a matematikában tehetséges csoportban, viszont nehéz feladatoknál a kontrollcsoportokét meghaladhatja.

Elméleti szinten két alapvető, de (véleményünk szerint) nem egymást kizáró elv működését mutatják az eredmények. Az egyik a neurális hatékonyság, mely szerint a matematikában tehetséges személyeknél az egyébként is működő területek kapcsolata erősebb, és dinamikusabban változhat a területeken belüli aktivitás. Bemutattunk olyan eredményeket is, melyek szerint e csoportban a feladatvégzés kapcsán több terület vonódik be a kognitív működésekbe.

Főleg elméleti, de talán gyakorlati szempontból sem lényegtelen kérdés az intelligencia/tehetség területfüggetlen és matematikai szempontból specifikus vonatkozásainak elválasztása. A bemutatott kutatásokban erre viszonylag kicsi a törekvés. Abban a vizsgálatosorozatban, ahol a csoportokban faktoriálisan elkülönítették az intelligenciát és a speciális matematikai eredményességet, az elektrofiziológiai módszer sajnos nem volt a leghatékonyabb. Az extrém tehetség vizsgálata ugyanerre a kísérletosorozatra korlátozódott, itt a viselkedéses eredmények többet mondtak, mint az elektrofiziológia.

Mi lehet a matematikai tehetséggel foglalkozó idegtudományi vizsgálatok legtávolabbi célja? Valami olyasmi, hogy azonosítani lehessen azokat a gyerekeket, akik potenciálisan alkalmasak lehetnek arra, hogy olyan területeken, ahol a matematikának alapvető szerepe van, kiváló eredményeket érnek majd el. A bemutatott eredmények ettől a céltól „fényévnyi távolságra” vannak, és nem csupán azért, mert az eredményekben a hatásnagyság kicsi (Myers és mtsai, 2017). Olyan kutatások nem folytak, melyek a motiváció specifikus vonatkozásait idegrendszeri szinten elemeznék, a szintén specifikusan matematikai kreativitásról pedig keveset tudunk, bár itt a viselkedéses mutatók területén vannak kezdeti lépések (Leikin, Leikin, Paz-Baruch, Waisman és Lev, 2017).

KONKLÚZIÓK

A kreativitás és a matematikai tehetség területén a humán idegtudományi kutatások felhasználták a rendelkezésre álló módszereket, így az elektroencefalogram elemzésében különböző frekvenciatartományok elemzését (ezek változásait térben és időben) és az adatokból levonható egyes agyi területek közötti kapcsolatok alakulását. Az eseményhez kötött potenciálok elemzése lehetővé tette egyes részfunkciók súlyának elemzését, valamint ez a módszer is hozzá tett az idegrendszer különböző kapcsolatainak elemzéséhez. A képalkotó vizsgálatok egyre jobban elszakadtak a „modern frenológia” személettétől, attól, hogy „ez a terület ezt csinálja, az a terület azt csinálja”

(és ráadásul esetleg „amit csinál”, a modern pszichológia terminológiájában nem értelmezhető). A képalkotási vizsgálatok is – a többi módszerhez hasonlóan – hálózatok feltérképezésére töreksenek, a téri lokalizáció szempontjából pontosabban, az idői összefüggések esetében pedig kevésbé pontosan, mint az agyi elektromos jelenségeket elemző módszerek.

A két terület abban különbözik, hogy matematikai tehetség esetén a teljesítmény mérésének validitása viszonylag nagy, a kreativitás esetén viszont a tényleges kreatív teljesítmény (ha van ilyen) és a tesztekkel mért értékek kapcsolata vitatott. Az idegtudományi módszerekkel feltárt adatok ugyanakkor rokonságot mutattak a két terület között, főleg az elülső (frontális és elülső cinguláris) és hátsó (hátsó parietális és temporális, esetenként okcipitális) agyi struktúrák kapcsolatában.

A két terület kutatásának van egy általános tanulsága: a humán idegtudomány nem lehet meg párhuzamos pszichológiai kutatások nélkül, ami egyaránt jelenti az empirikus eredményeket és a pszichológiai elméletalkotást.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A projekt az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok finanszírozásával készült (OTKA K 115457).

IRODALOM

- Abraham, A., Beudt, S., Ott, D. V. M., & Yves von Cramon, D. (2012b). Creative cognition and the brain: Dissociations between frontal, parietal–temporal and basal ganglia groups. *Brain Research*, 1482, 55–70.
- Abraham, A., Pieritz, K., Thybusch, K., Rutter, B., Kröger, S., Schweckendiek, J., Stark, R., Windmann, S., & Hermann, C. (2012a). Creativity and the brain: Uncovering the neural signature of conceptual expansion. *Neuropsychologia*, 50(8), 1906–1917.
- Amabile, T. M. (1982). Social psychology of creativity: A consensual assessment procedure. *Journal of Personality and Social Psychology*, 43(5), 997–1013.
- Arden, R., Chavez, R. S., Grazioplene, R., & Jung, R. E. (2010). Neuroimaging creativity: A psychometric view. *Behavioural Brain Research*, 214(2), 143–156.
- Baer, J. (2010). Is creativity domain specific? In Kaufman, J. C., & Sternberg, R. J. (Eds), *Cambridge Handbook of Creativity* (pp. 321–341). New York: Cambridge University Press.
- Baer, J. (2015). The Importance of Domain-Specific Expertise in Creativity. *Roeper Review*, 37(3), 165–178.
- Bashwiler, D. M., Bacon, D. K., Wertz, C. J., Flores, R. A., Chohan, M. O., & Jung, R. E. (2020). Resting state functional connectivity underlying musical creativity. *NeuroImage*, 218, 116940.
- Bashwiler, D. M., Wertz, C. J., Flores, R. A., & Jung, R. E. (2016). Musical Creativity “Revealed” in Brain Structure: Interplay between Motor, Default Mode and Limbic Networks. *Scientific Reports*, 6(1), 20482.
- Beaty, R. E., Benedek, M., Silvia, P. J., & Schacter, D. L. (2016). Creative Cognition and Brain Network Dynamics. *Trends in Cognitive Sciences*, 20(2), 87–95.
- Beaty, R. E., Benedek, M., Wilkins, R. W., Jauk, E., Fink, A., Silvia, P. J., Hodges, D. A., Koschutnig, K., & Neubauer, A. C. (2014). Creativity and the default network: A functional connectivity analysis of the creative brain at rest. *Neuropsychologia*, 64, 92–98.

- Beaty, R. E., Kenett, Y. N., Christensen, A. P., Rosenberg, M. D., Benedek, M., Chen, Q., Fink, A., Qiu, J., Kwapił, T. R., Kane, M. J., & Silvia, P. J. (2018). Robust prediction of individual creative ability from brain functional connectivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *115*(5), 1087–1092.
- Beaty, R. E., Seli, P., & Schacter, D. L. (2019). Network neuroscience of creative cognition: Mapping cognitive mechanisms and individual differences in the creative brain. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *27*, 22–30.
- Benedek, M. (2018a). The neuroscience of creative idea generation. In Kapoula, Z., Volle, E., Renoult, J., & Andreatta, M. (Eds), *Exploring Transdisciplinarity in Art and Sciences* (pp. 31–48). Springer Nature.
- Benedek, M. (2018b). Internally directed attention in creative cognition. In Jung, R. E., & Vartanian, O. (Eds), *The Cambridge handbook of the neuroscience of creativity* (pp. 180–194). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Benedek, M., Bergner, S., Könen, T., Fink, A., & Neubauer, A. C. (2011). EEG alpha synchronization is related to top-down processing in convergent and divergent thinking. *Neuropsychologia*, *49*, 3505–3511.
- Benedek, M., Fink, A., & Neubauer, A. C. (2006). Enhancement of ideational fluency by means of computer-based training. *Creativity Research Journal*, *18*(3), 317–328.
- Benedek, M., Schickel, R. J., Jauk, E., Fink, A., & Neubauer, A. C. (2014). Alpha power increases in right parietal cortex reflects focused internal attention. *Neuropsychologia*, *56*, 393–400.
- Beverdsdorf, D. Q. (2019). Neuropsychopharmacological regulation of performance on creativity-related tasks. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *27*, 55–63.
- Boccia, M., Piccardi, L., Palermo, L., Nori, R., & Palmiero, M. (2015). Where do bright ideas occur in our brain? Meta-analytic evidence from neuroimaging studies of domain-specific creativity. *Frontiers in Psychology*, *6*, 1195.
- Boot, N., Baas, M., Mühlfeld, E., De Dreu, C. K., & Van Gaal, S. (2017a). Widespread neural oscillations in the delta band dissociate rule convergence from rule divergence during creative idea generation. *Neuropsychologia*, *104*, 8–17.
- Boot, N., Baas, M., Van Gaal, S., Cools, R., & De Dreu, C. K. W. (2017b). Creative cognition and dopaminergic modulation of fronto-striatal networks: Integrative review and research agenda. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *78*, 13–23.
- Carlsson, I., Wendt, P. E., & Risberg, J. (2000). On the neurobiology of creativity. Differences in frontal activity between high and low creative subjects. *Neuropsychologia*, *38*(6), 873–885.
- Carson, S. H., Peterson, J. B., & Higgins, D. M. (2005). Reliability, validity, and factor structure of the creative achievement questionnaire. *Creativity Research Journal*, *17*(1), 37–50.
- Cavanagh, J. F., & Frank, M. (2014). Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences*, *18*(8), 414–421.
- Chen, Q., Yang, W., Li, W., Wei, D., Li, H., Lei, Q., Zhang, Q., & Qiu, J. (2014). Association of creative achievement with cognitive flexibility by a combined voxel-based morphometry and resting-state functional connectivity study. *NeuroImage*, *102*, 474–483.
- Chrysikou, E. G. (2019). Creativity in and out of (cognitive) control. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *27*, 94–99.
- Chrysikou, E. G., Weber, M. J., & Thompson-Schill, S. T. (2014). A Matched Filter Hypothesis for Cognitive Control. *Neuropsychologia*, *62*, 341–355.
- Clayton, M. S., Yeung, N., & Kadosh, R. C. (2015). The roles of cortical oscillations in sustained attention. *Trends in Cognitive Science*, *19*(4), 188–195.
- Cooper, N. R., Croft, R. J., Dominey, S. J. J., Burgess, A. P., & Gruzelić, J. H. (2003). Paradox lost? Exploring the role of alpha oscillations during externally vs. internally directed attention and the implications for idling and inhibition hypotheses. *International Journal of Psychophysiology*, *47*(1), 65–74.

- Culbertson, W. C., & Zillmer, E. A. (1998). The Tower of London: A standardized approach to assessing executive functions in children. *Archives of Clinical Neuropsychology*, *13*(3), 285–301.
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, *20*(3), 487–506.
- Desco, M., Navas-Sanchez, F. J., Sanchez-González, J., Reig, S., Robles, O., Franco, C., Gutiérrez-De-Villoria, J. A., García-Barreno, P., & Arango, C. (2011). Mathematically gifted adolescents use more extensive and more bilateral areas of the fronto-parietal network than controls during executive functioning and fluid reasoning tasks. *NeuroImage*, *57*, 281–292.
- Dietrich, A. (2003). Functional neuroanatomy of altered states of consciousness: The transient hypofrontality hypothesis. *Consciousness and Cognition*, *12*, 231–256.
- Dietrich, A., & Kanso, R. (2010). A review of EEG, ERP, and neuroimaging studies of creativity and insight. *Psychological Bulletin*, *136*(5), 822–848.
- Dietrich, A. (2019). Where in the brain is creativity: a brief account of a wild-goose chase. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *27*, 36–39.
- Dow, G. T., & Mayer, R. E. (2004). Teaching students to solve insight problems: Evidence for domain specificity in creative training. *Creativity Research Journal*, *16*, 389–398.
- Ellamil, M., Dobson, C., Beeman, M., & Christoff, K. (2012). Evaluative and generative modes of thought during the creative process. *NeuroImage*, *59*(2), 1783–1794.
- Erickson, B., Truelove-Hill, M., Oh, Y., Anderson, J., Zhang, F. Z., & Kounios, J. (2018). Resting-state brain oscillations predict trait-like cognitive styles. *Neuropsychologia*, *120*, 1–8.
- Feng, Q., He, L., Yang, W., Zhang, Y., Wu, X., & Qiu, J. (2019). Verbal Creativity Is Correlated With the Dynamic Reconfiguration of Brain Networks in the Resting State. *Frontiers in Psychology*, *10*, 894.
- Fink, A., & Benedek, M. (2014). EEG alpha power and creative ideation. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *44*, 111–123.
- Fink, A., Benedek, M., Grabner, R. H., Staudt, B., & Neubauer, A. C. (2007). Creativity meets neuroscience: Experimental tasks for the neuroscientific study of creative thinking. *Methods*, *42*(1), 68–76.
- Fink, A., Grabner, R. H., Gebauer, D., Reishofer, G., Koschutnig, K., & Ebner, F. (2010). Enhancing creativity by means of cognitive stimulation: Evidence from an fMRI study. *NeuroImage*, *52*(4), 1687–1695.
- Fink, A., Grabner, R. H., Benedek, M., Reishofer, G., Hauswirth, V., Fally, M., Neuper, C., Ebner, F., & Neubauer, A. C. (2009). The creative brain: Investigation of brain activity during creative problem solving by means of EEG and fMRI. *Human Brain Mapping*, *30*(3), 734–748.
- Fink, A., & Neubauer, A. C. (2006). EEG alpha oscillations during the performance of verbal creativity tasks: Differential effects of sex and verbal intelligence. *International Journal of Psychophysiology*, *62*(1), 46–53.
- Fink, A., & Neubauer, A. C. (2008). Eysenck meets Martindale: The relationship between extraversion and originality from the neuroscientific perspective. *Personality and Individual Differences*, *44*(1), 299–310.
- Fink, A., Schwab, D., & Papousek, I. (2011). Sensitivity of EEG upper alpha activity to cognitive and affective creativity interventions. *International Journal of Psychophysiology*, *82*(3), 233–239.
- Glaveanu, V. P. (2010). Paradigms in the study of creativity: Introducing the perspective of cultural psychology. *New Ideas in Psychology*, *28*, 79–93.
- Grabner, R. H., Fink, A., & Neubauer, A. C., (2007). Brain correlates of self-rated originality of ideas: Evidence from event-related power and phase-locking changes in the EEG. *Behavioral Neuroscience*, *121*, 224–230.
- Guilford, J. P. (1967). *The Nature of Human Intelligence*. New York, McGraw-Hill.

- Guilford, J. P. (1950). Creativity. *American Psychologist*, 5(9), 444–454.
- Haier, R. J., & Benbow, C. P. (1995). Sex Differences and Lateralization in Temporal Lobe Glucose Metabolism During Mathematical Reasoning. *Developmental Neuropsychology*, 11(4), 405–414.
- Hocevar, D. (1979). *The Development of the Creative Behavior Inventory (CBI)*.
- Hoppe, C., Fließbach, K., Stausberg, S., Stijanovic, J., Trautner, P., Elger, C. E., & Weber, B. (2012). A key role for experimental task performance: Effects of math talent, gender and performance on the neural correlates of mental rotation. *Brain and Cognition*, 78, 14–27.
- Huang, F., Fan, J., & Luo, J. (2015). The neural basis of novelty and appropriateness in processing of creative chunk decomposition. *NeuroImage*, 113, 122–132.
- Jaarsveld, S., Fink, A., Rinner, M., Schwab, D., Benedek, M., & Lachmann, T. (2015). Intelligence in creative processes: An EEG study. *Intelligence*, 49, 171–178.
- Japardi, K., Bookheimer, S., Knudsen, K., Ghahremani, D. G., & Bilder, R. M. (2018). Functional magnetic resonance imaging of divergent and convergent thinking in Big-C creativity. *Neuropsychologia*, 118, 59–67.
- Jauk, E., Benedek, M., & Neubauer, A. C. (2012). Tackling creativity at its roots: Evidence for different patterns of EEG alpha activity related to convergent and divergent modes of task processing. *International Journal of Psychophysiology*, 84(2), 219–225.
- Jauk, E. (2019). A bio-psycho-behavioral model of creativity. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 27, 1–6.
- Jensen, O., Bonnefond, M., & VanRullen, R. (2012). An oscillatory mechanism for prioritizing salient unattended stimuli. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(4), 200–206.
- Jensen, O., Gelfand, J., Kounios, J., & Lisman, J. E. (2002). Oscillations in the alpha band (9–12 Hz) increase with memory load during retention in a short-term memory task. *Cerebral Cortex*, 12(8), 877–882.
- Jung, R. E., Segall, J. M., Jeremy Bockholt, H., Flores, R. A., Smith, S. M., Chavez, R. S., & Haier, R. J. (2009). Neuroanatomy of creativity. *Human Brain Mapping*, 31(3), 398–409.
- Jung, R. E., & Haier, R. J. (2007). The Parieto-Frontal Integration Theory (P-FIT) of intelligence: converging neuroimaging evidence. *Behavioral and Brain Sciences*, 30(2), 135–154.
- Jung-Beeman, M., Bowden, E. M., Haberman, J., Frymiare, J. L., Arambel-Liu, S., Greenblatt, R., et al. (2004). Neural activity when people solve verbal problems with insight. *PLoS Biol*, 2(4), e97.
- Kaufman, J. C., & Beghetto, R. A. (2009). Beyond big and little: The four C model of creativity. *Review of General Psychology*, 13(1), 1–12.
- Kaufman, J. C. (2001). Genius, lunatics, and poets: Mental illness in prize-winning authors. *Imagination, Cognition, and Personality*, 20(4), 305–314.
- Khalil, R., Godde, B., & Karim, A. A. (2019). The Link Between Creativity, Cognition, and Creative Drives and Underlying Neural Mechanisms. *Frontiers in Neural Circuits*, 13, 18.
- Kleibeuker, S. W., Koolschijn, P. C. M. P., Jolles, D. D., Schel, M. A., De Dreu, C. K. W., & Crone, E. A. (2013). Prefrontal cortex involvement in creative problem solving in middle adolescence and adulthood. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 5, 197–206.
- Kleimnitz, O. M., Ivancovsky, T., & Shamay-Tsoory, S. G. (2019). The two-fold model of creativity: the neural underpinnings of the generation and evaluation of creative ideas. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 27, 131–138.
- Klimesch, W. (2012). Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information. *Trends in Cognitive Sciences*, 16, 606–617.
- Klimesch, W., Sauseng, P., & Hanslmayr, S. (2007). EEG alpha oscillations: the inhibition timing hypothesis. *Brain Research Review*, 53(1), 63–88.

- Kounios, J., & Beeman, M. (2014). The Cognitive Neuroscience of Insight. *Annual Review of Psychology*, 65(1), 71–93.
- Kounios, J., Frymiare, J. L., Bowden, E. M., Fleck, J. I., Subramaniam, K., Parrish, T. B., & Jung-Beeman, M. (2006). The prepared mind. Neural activity prior to problem presentation predicts subsequent solution by sudden insight. *Psychological Science*, 17, 882–890.
- Kowatari, Y., Lee, S. H., Yamamura, H., Nagamori, Y., Levy, P., Yamane, S., & Yamamoto, M. (2009). Neural networks involved in artistic creativity. *Human Brain Mapping*, 30(5), 1678–1690.
- Kühn, S., Ritter, S. M., Müller, B. C. N., Van Baaren, R. B., Brass, M., & Dijksterhuis, A. (2014). The Importance of the Default Mode Network in Creativity-A Structural MRI Study. *The Journal of Creative Behavior*, 48(2), 152–163.
- Lachaux, J. P., Rodriguez, E., Martinerie, J., & Varela, F. J. (1999). Measuring phase synchrony in brain signals. *Human Brain Mapping*, 8(4), 194–208.
- Leikin, R., Leikin, M., Paz-Baruch, N., Waisman, I., & Lev, M. (2017). On the four types of characteristics of super mathematically gifted students. *High Ability Studies*, 28, 107–125.
- Li, W., Yang, J., Zhang, Q., Li, G., & Qiu, J. (2016). The Association between Resting Functional Connectivity and Visual Creativity. *Scientific Reports*, 6(1), 25395.
- Lindell, A. K. (2011). Lateral thinkers are not so laterally minded: Hemispheric asymmetry, interaction, and creativity. *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, 16(4), 479–498.
- Martindale, C. (1999). Biological bases of creativity. In Sternberg, R. (Ed.), *Handbook of Creativity* (pp. 137–152). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Martindale, C., & Hasenpus, N. (1978). EEG differences as a function of creativity, stage of the creative process, and effort to be original. *Biological Psychology*, 6(3), 157–167.
- Martindale, C., & Hines, D. (1975). Creativity and cortical activation during creative, intellectual, and EEG feedback tasks. *Biological Psychology*, 3, 71–80.
- Martindale, C., Hines, D., Mitchell, L., & Covello, E. (1984). EEG alpha asymmetry and creativity. *Personality and Individual Differences*, 5, 77–86.
- Mednick, S. (1962). The associative basis of the creative process. *Psychological Review*, 69(3), 220–232.
- Mednick, S. A., & Mednick, M. T. (1971). *Remote associates test*. Houghton Mifflin.
- Mendelsohn, G. A. (1976). Associative and attentional processes in creative performance. *Journal of Personality*, 44, 341–369.
- Mihov, K. M., Denzler, M., & Förster, J. (2010). Hemispheric specialization and creative thinking: A meta-analytic review of lateralization of creativity. *Brain and Cognition*, 72(3), 442–448.
- Myers, T., Carey, E., & Szűcs, D. (2017). Cognitive and neural correlates of mathematical giftedness in adults and children. *Frontiers in Psychology*, 8, 1646.
- Navas-Sanchez, F. J., Aleman-Gomez, Y., Sanchez-Gonzalez, J., Guzman-De-Villoria, J. A., Franco, C., Robles, O., Arango, C., & Desco, M. (2012). White matter microstructure correlates of mathematical giftedness and intelligence quotient. *Human Brain Mapping*, 33, 2619–2631.
- Navon, D. (1977). Forest before trees: The precedence of global features in visual perception. *Cognitive Psychology*, 9(3), 353–383.
- Neubauer, A. C., & Fink, A. (2009). Intelligence and neural efficiency. *Biobehavioral Reviews*, 33(7), 1004–1023.
- Nijstad, B. A., De Dreu, C. K. W., Rietzschel, E. F., & Baas, M. (2010). The dual pathway to creativity model: Creative ideation as a function of flexibility and persistence. *European Review of Social Psychology*, 21(1), 34–77.
- O’Boyle, M. W., Alexander, C., & Benbow, P. (1991). Enhanced right hemisphere activation in the mathematically precocious: A preliminary EEG investigation. *Brain and Cognition*, 17, 138–153.

- O'Boyle, M. W., Cunnington, R., Silk, T. J., Vaughan, D., Jackson, G., Syngeniotis, A., & Egan, G. F. (2005). Mathematically gifted male adolescents activate a unique brain network during mental rotation. *Cognitive Brain Research*, 25(2), 583–587.
- Pfurtscheller, G. (1999). Quantification of ERD and ERS in the time domain. In Pfurtscheller, G., & Lopes da Silva, F. H. (Eds), *Event-related Desynchronization. Handbook of Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* (pp. 89–105). Amsterdam: Elsevier B. V.
- Pfurtscheller, G., Stancak Jr, A., & Neuper, C. (1996). Event-related synchronization (ERS) in the alpha band—an electrophysiological correlate of cortical idling: a review. *International Journal of Psychophysiology*, 24(1–2), 39–46.
- Pidgeon, L. M., Grealy, M., Duffy, A. H. B., Hay, L., McTeague, C., Vuletic, T., Coyle, D., & Gilbert, S. J. (2016). Functional neuroimaging of visual creativity: A systematic review and meta-analysis. *Brain and Behavior*, 6(10), e00540.
- Piffer, D. (2012). Can creativity be measured? An attempt to clarify the notion of creativity and general directions for future research. *Thinking Skills and Creativity*, 7, 258–264.
- Poldrack, R. A. (2006). Can cognitive processes be inferred from neuroimaging data? *Trends in Cognitive Sciences*, 10(2), 59–63.
- Prescott, J., Gavrilescu, M., Cunnington, R., O'Boyle, M. W., & Egan, G. F. (2010). Enhanced brain connectivity in math-gifted adolescents: An fMRI study using mental rotation. *Cognitive Neuroscience*, 1(4), 277–288.
- Ray, W. J., & Cole, H. W. (1985). EEG alpha reflects attentional demands, and beta activity reflects emotional and cognitive processes. *Science*, 228, 750–752.
- Rominger, C., Papousek, I., Perchtold, C. M., Benedek, M., Weiss, E. M., Schwerdtfeger, A., & Fink, A. (2019). Creativity is associated with a characteristic U-shaped function of alpha power changes accompanied by an early increase in functional coupling. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 19(4), 1012–1021.
- Rominger, C., Papousek, I., Perchtold, C. M., Weber, B., Weiss, E. M., & Fink, A. (2018). The creative brain in the figural domain: Distinct patterns of EEG alpha power during idea generation and idea elaboration. *Neuropsychologia*, 118, 13–19.
- Rothmaler, K., Nigbur, R., & Ivanova, G. (2017). New insights into insight: Neurophysiological correlates of the difference between the intrinsic “aha” and the extrinsic “oh yes” moment. *Neuropsychologia*, 95, 204–214.
- Runco, M. A., & Acar, S. (2012). Divergent thinking as an indicator of creative potential. *Creative Research Journal*, 24(1), 66–75.
- Runco, M. A., & Yoruk, S. (2014). The neuroscience of divergent thinking. *Activitas Nervosa Superior*, 56(1), 1–16.
- Rutter, B., Kröger, S., Hill, H., Windmann, S., Hermann, C., & Abraham, A. (2012a). Can clouds dance? Part 2: An ERP investigation of passive conceptual expansion. *Brain and Cognition*, 80, 301–310.
- Rutter, B., Kröger, S., Stark, R., Schweckendiek, J., Windmann, S., Hermann, C., & Abraham, A. (2012b). Can clouds dance? Neural correlates of passive conceptual expansion using a metaphor processing task: Implications for creative cognition. *Brain and Cognition*, 78(2), 114–122.
- Sauseng, P., Griesmayr, B., Freunberger, R., & Klimesch, W. (2010). Control mechanisms in working memory: a possible function of EEG theta oscillation. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 34(7), 1015–1022.
- Sauseng, P., Klimesch, W., Doppelmayr, M., Pecherstorfer, T., Freunberger, R. & Hanslmayr, S. (2005). EEG alpha synchronization and functional coupling during top-down processing in a working memory task. *Human Brain Mapping*, 26, 148–155.

- Sawyer, K. (2011). The Cognitive Neuroscience of Creativity: A Critical Review. *Creativity Research Journal*, 23(2), 137–154.
- Schwab, D., Benedek, M., Papousek, I., Weiss, E. M., & Fink, A. (2014). The time-course of EEG alpha power changes in creative ideation. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 310.
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of 3-dimensional objects. *Science*, 171, 701–703.
- Shi, B., Cao, X., Chen, Q., Zhuang, K., & Qiu, J. (2017). Different brain structures associated with artistic and scientific creativity: A voxel-based morphometry study. *Scientific Reports*, 7(1), 42911.
- Shi, L., Sun, J., Xia, Y., Ren, Z., Chen, Q., Wei, D., Yang, W., & Qiu, J. (2018). Large-scale brain network connectivity underlying creativity in resting-state and task fMRI: Cooperation between default network and frontal-parietal network. *Biological Psychology*, 135, 102–111.
- Simonton, D. K. (1994). *Greatness: Who makes history and why*. New York: Guilford Press.
- Singh, H., & O'Boyle M. W. (2004). Interhemispheric interaction during global–local processing in mathematically gifted adolescents, average-ability youth, and college students. *Neuropsychology*, 18, 371–377.
- Stevens Jr, C. E., & Zabelina, D. L. (2019). Creativity comes in waves: an EEG-focused exploration of the creative brain. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 27, 154–162.
- Sun, J., Liu, Z., Rolls, E. T., Chen, Q., Yao, Y., Yang, W., Wei, D., Zhang, Q., Zhang, J., Feng, J., & Qiu, J. (2019). Verbal Creativity Correlates with the Temporal Variability of Brain Networks During the Resting State. *Cerebral Cortex*, 29(3), 1047–1058.
- Sunavsky, A., & Poppenk, J. (2020). Neuroimaging predictors of creativity in healthy adults. *NeuroImage*, 206, 116292.
- Takeuchi, H., Taki, Y., Hashizume, H., Sassa, Y., Nagase, T., Nouchi, R., & Kawashima, R. (2011). Failing to deactivate: The association between brain activity during a working memory task and creativity. *NeuroImage*, 55(2), 681–687.
- Takeuchi, H., Taki, Y., Sassa, Y., Hashizume, H., Sekiguchi, A., Fukushima, A., & Kawashima, R. (2010). White matter structures associated with creativity: Evidence from diffusion tensor imaging. *NeuroImage*, 51(1), 11–18.
- Torrance, E. P. (1974). *Torrance Tests of Creative Thinking: norms and technical manual*. Lexington, MA: Personnel Press.
- Torrance, P. E. (1966). *Torrance tests of creative thinking: Norms-technical manual. Research edition. Verbal tests, forms A and B. Figural tests, forms A and B*. New Jersey, Princeton: Personnel Press.
- Vartanian, O., Jobidon, M.-E., Bouak, F., Nakashima, A., Smith, I., Lam, Q., & Cheung, B. (2013). Working memory training is associated with lower prefrontal cortex activation in a divergent thinking task. *Neuroscience*, 236, 186–194.
- Verleger, R. (2020). Effects of relevance and response frequency on P3b amplitudes: Review of findings and comparison of hypotheses about the process reflected by P3b. *Psychophysiology*, 57, e13542.
- Waisman, I., Leikin, M., Dhau, S., & Leikin, R. (2014). Brain activity associated with translation between graphical and symbolic representations of functions in generally gifted and excelling in mathematics adolescents. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 12(3), 669–696.
- Waisman, I., Leikin, M., & Leikin, R. (2016). Brain activity associated with logical inferences in geometry: focusing on students with different levels of ability. *ZDM Mathematics Education*, 48, 321–335.
- Wei, D., Yang, J., Li, W., Wang, K., Zhang, Q., & Qiu, J. (2014). Increased resting functional connectivity of the medial prefrontal cortex in creativity by means of cognitive stimulation. *Cortex*, 51, 92–102.

- Wokke, M. E., Ridderinkhof, K. R., & Padding, L. (2018). Creative minds are out of control: mid frontal theta and creative thinking. *bioRxiv*, 370494.
- Zabelina, D. L., & Ganis, G. (2018). Creativity and cognitive control: Behavioral and ERP evidence that divergent thinking, but not real-life creative achievement, relates to better cognitive control. *Neuropsychologia*, 118, 20–28.
- Zhang, L., Gan, J. Q., & Wang, H. (2015a). Mathematically gifted adolescents mobilize enhanced workspace configuration of theta cortical network during deductive reasoning. *Neuroscience*, 289, 334–348.
- Zhang, L., Gan, J. Q., Zhu, Y., Wang, J., & Wang, H. (2020). EEG source-space synchrostate transitions and Markov modeling in the math-gifted brain during a long-chain reasoning task. *Human Brain Mapping*, 41(13), 3620–3636.
- Zhang, L., Gan, J. Q., & Wang, H. (2015b). Localization of neural efficiency of the mathematically gifted brain through a feature subset selection method. *Cognitive Neurodynamics*, 9, 495–508.
- Zhang, L., Gan, J. Q., & Wang, H. (2017). Neurocognitive mechanisms of mathematical giftedness: A literature review. *Applied Neuropsychology: Child*, 6(1), 79–94.
- Zhang, W., Sjoerds, Z., & Hommel, B. (2020). Metacontrol of human creativity: The neurocognitive mechanisms of convergent and divergent thinking. *NeuroImage*, 210, 116572.
- Zhu, W., Chen, Q., Tang, C., Cao, G., Hou, Y., & Qiu, J. (2016). Brain structure links everyday creativity to creative achievement. *Brain and Cognition*, 103, 70–76.
- Zhu, W., Chen, Q., Xia, L., Beaty, R. E., Yang, W., Tian, F., Sun, J., Cao, G., Zhang, Q., Chen, X., & Qiu, J. (2017). Common and distinct brain networks underlying verbal and visual creativity: Brain Networks Underlying Verbal and Visual Creativity. *Human Brain Mapping*, 38(4), 2094–2111.

GIFTEDNESS AND BRAIN RESEARCH: CREATIVITY AND MATHEMATICS

CZIGLER, ISTVÁN – CSIZMADIA, PETRA – NAGY, BOGLÁRKA – GAÁL, ZSÓFIA ANNA

We reviewed neuroscience-oriented research on two subfields of giftedness: creativity and mathematical giftedness. In both fields the early studies focused on hemisphere differences, using methods of frequency analysis of electroencephalography. However, gradually the analysis of network activity became the main issue of research. These investigations applied various methods of electrophysiology and brain imaging. A central theoretical problem of the field is the ill-defined concept of creativity. In the field of mathematical giftedness performance measurement is available, but studies using highly gifted participants are rather rare.

Keywords: *creativity, mathematics, electrophysiology, brain mechanisms*

A cikk a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>) feltételei szerint publikált Open Access közlemény, melynek szellemében a cikk bármilyen médiumban szabadon felhasználható, megosztható és újraközölhető, feltéve, hogy az eredeti szerző és a közlés helye, illetve a CC License linkje és az esetlegesen végrehajtott módosítások feltüntetésre kerülnek. (SID_1)