

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM

Pedagógiai és Pszichológiai Kar

TDK dolgozat

Kisebb hippocampusz, több hamis emlék? A hippocampusz térfogatának és a hamis emlékeknek a kapcsolata 4 éves gyerekeknél

Témavezető:

Dr. Keresztes Attila

Egyetemi adjunktus

Készítette:

Ferencz Boróka

2025

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	2
Absztrakt.....	3
Elméleti háttér.....	4
Az epizodikus emlékezet.....	4
A gyerekek emlékezeti sajátosságai, hamis emlékei.....	4
A hippocampusz és az emlékezet.....	5
A hippocampusz strukturális fejlődése.....	6
A hippocampusz mérete és az emlékezeti teljesítmény gyerekeknél.....	6
A hippocampusz mérete és a hamis emlékek.....	6
A kutatás célja és hipotézisei.....	6
Módszerek.....	8
Résztevők.....	8
Eljárás.....	8
Az esemény emlékezetet vizsgáló feladat.....	8
A feladat pontozása.....	9
A generalizációra utaló hamis emlékek elkülönítése a többi hamis emléktől.....	10
A strukturális MR adatok.....	10
A strukturális MR adatok feldolgozása.....	11
Eredmények.....	14
Leíró statisztika.....	14
A hamis emlékek mennyisége.....	14
A generalizációra utaló hamis emlékek.....	15
A hippocampusz és alrégiók térfogata.....	15
Hipotézisek vizsgálata.....	16
Diszkusszió.....	21
Limitációk és továbbfejlesztési lehetőségek.....	22
Következtetések.....	24

Absztrakt

Emlékezeti rendszerünk sokszor megbízhatatlan. Különösen igaz ez az óvodás korú gyerekekre, akiknek a generalizáció folyamata dominálja memóriájukat, vagyis hasonló tapasztalatokból általánosítás révén tudást alkotnak a világról, viszont emlékeik még nem elég specifikusak. A hippocampusz elengedhetetlen szerepet játszik az emlékezés folyamataiban, többek között a specificitás és generalizáció folyamataiban is. Ennyi idős korban pedig még nem elég fejlett a hippocampusz azon része, amely a specificitásért felel, a gyrus dentatus nevű alrégió, és 4 éves kor után még jelentős fejlődésen megy át a hippocampusz. De ez azt is jelenti, hogy a kisebb hippocampusz több hamis emléket eredményez? Ahhoz, hogy erre választ kapjunk, egy esemény emlékezetet vizsgáló feladat során felidézett hamis emlékek mennyiségének összefüggését vizsgáltuk a hippocampusz és alrégióinak térfogatával, óvodás korú gyerekeknél. Egyelőre még nem világos, hogy 4 éves korban is mutat-e szignifikáns összefüggést a hippocampusz mérete és a hamis emlékek mennyisége. Illetve az is kérdéses, hogy a hamis emlékek csak a specificitás hiányának következményei, vagy esetleg a generalizáció folyamatának dominanciája is hozzájárul a létrejöttükhöz. Az itt bemutatott előzetes eredmények egy nagymintás (tervezett $N=100$) longitudinális kutatás első hullámának részmintáján alapulnak ($N=25$, $M_{\text{életkor}}=4,52$ év, $SD_{\text{életkor}}=0,26$ év, 10 lány). Vizsgáltuk a hippocampusz térfogatának és hamis emlékek mennyiségének összefüggését, külön elemeztük az azonnali és késleltetett hamis emlékek kapcsolatát a DG-CA3 és CA1-CA2 alrégiók térfogatával. Valamint még azt is megnéztük, hogy a CA1-CA2 alrégiók térfogata milyen összefüggést mutat azokkal a hamis emlékekkel, amelyek a generalizáció folyamata révén jöttek létre. A hippocampusz és alrégióinak térfogatát nagy-felbontású mágneses rezonancia képalkotással készült felvételek félig-automatikus szegmentációjával nyertük ki. Előzetes eredményeink egyik hipotézisünket sem támogatták, sem az azonnali, sem a késleltetett hamis emlékekre. Elemzéseink során számos limitációt azonosítottunk – ezek kiküszöbölése és a teljes minta felvétele előtt erős következtetéseket még nem tudunk levonni, de a hatáshiányok esetleges okait spekulatívan diszkutálom.

Elméleti háttér

Az epizodikus emlékezet

Tulving (1972) agysérült betegeknél figyelt meg az emlékezeti teljesítményükben egy disszociációt, miszerint míg egyes képességeik sérültek, más emlékezeti képességük épen maradt. Emiatt a disszociáció miatt különítette el az epizodikus emlékeket a szemantikus emlékektől, amelyekért különböző neurális mechanizmusokat tett felelőssé. Korai elméletét kiegészítve szerinte egy epizodikus emlék olyan szubjektív élményeket foglal magába, amely helyhez és időhöz kötöttek, az ő szavaival élve az epizodikus emlékek a mi, mikor és hol kérdéseket kell lefedjék. És ezeket az élményeket újraépítjük előhíváskor (Tulving, 2002).

A gyerekek emlékezeti sajátosságai, hamis emlékei

Epizodikus emlékezeti rendszerünk olykor nem megbízható, mivel emlékeinket felidézéskor újraépítjük. És bár a gyerekek rengeteg információt elsajátítanak nap mint nap, epizodikus emlékezeti rendszerük még fejlődik, így az ő emlékeik még inkább hajlamosak hibákra. A korai tanulmányokban leginkább a szuggesztibilitást emelték ki, amely miatt a gyerekek több hamis emléket hoznak létre a felnőttekhez képest. Ez kifejezetten fontos témává vált, például törvényszéki kihallgatásoknál, ahol a gyerekek vallomása korántsem annyira megbízható, mint ahogy azt addig gondolták. És épp az emlékezet egy általános, nagyon fontos tulajdonsága miatt lehetséges, hogy sok hamis emléket hoznak létre: a rekonstrukció miatt, mert nem pontosan kódolják és tárolják az eseményeket, ezért a felidézés körülményei nagyobb hatást tudnak gyakorolni (Loftus & Davies, 1984).

A gyerekek sok emléket halmoznak fel, ezek az emlékek viszont még nem elég specifikusak (Keresztes és mtsai, 2018). A 4 év körüli gyerekek például kevésbé helyesen, kevesebb részlettel idéznek fel eseményeket már az 5 év fölötti gyerekekhez képest is (Martin-Ordas és mtsai., 2017; Uehara, 2000), illetve több spontán hamis emléket is hoznak létre (Otgaar és mtsai, 2014).

Emlékeinket két általunk vizsgált folyamat teszi sajátossá: a generalizáció és emlékezeti specificitás folyamata. A generalizáció lehetővé teszi, hogy minél több információt elsajátítsunk, és az egyik szituációban megszerzett tudást más szituációban is fel tudjuk használni. Az emlékezeti specificitás pedig ennek kiegészítéseként lehetővé teszi a részletekre való emlékezést, hogy hasonló emlékeket külön tudjunk választani. A két folyamat pedig más fejlődési ívet mutat

gyerekkorban, miszerint az emlékezeti specificitás később fejlődik (Keresztes és mtsai, 2018; Ngo és mtsai., 2017, 2021).

A hippocampusz és az emlékezet

A hippocampusz fontosságáról az emlékezeti folyamatokban Brenda Milner neuropszichológiai eredményei óta tudunk. Egy páciense, H.M., súlyos epilepsziában szenvedett, emiatt eltávolították a mediális temporális lebenyének jelentős részét 1952-ben, így a hippocampuszt is, és súlyos retrográd és anterográd amnéziás tüneteket mutatott a műtét után. Csak a korai emlékei maradtak épek. A műtét utáni teljesítményében a meglepő eredmény az volt, hogy bár új motoros készségeket képes volt elsajátítani, a deklaratív, és azon belül az egyedi, saját életére vonatkozó emlékei súlyosan sérültek, a műtét után már nem volt képes új, epizodikus emléket elsajátítani. Így kezdődött a hippocampusz szerepének tanulmányozása az emlékezetben (Milner és mtsai, 1968).

A hippocampuszban sejt strukturális különbségek alapján több, eltérő folyamatért felelős területet lehet elkülöníteni. Először Marr (1971) javasolta, hogy a hippocampusz különböző neurális komputációkat végezhet. Ilyen komputációk: a mintázat elválasztás és mintázat-kiegészítés.

A mintázat elválasztás egy olyan komputáció, amely során a hasonló információkat egymással nem átfedőekként tudunk tárolni. A Gyrus Dentatus (továbbiakban az angol dentate gyrus alapján: DG) nevű alrégió teszi ezt lehetővé, amelynek granuláris sejtei olyan sűrű hálózatot hoznak létre, amely így képes a különbségeket leképezni a beérkező információban (Yassa & Stark, 2011). Ez a komputáció az alapja az emlékezeti specificitásnak (Keresztes és mtsai, 2018).

Egy másik – már Marr által is feltételezett – komputáció, amelyet a hippocampusz végez a mintázat-kiegészítés. A Cornu Ammonis 3 (CA3) nevű alrégióba több helyről érkezik be információ, és olyan neurális-köröket tartalmaz, amely azt teszi lehetővé, hogy részleges információ alapján a teljes emléket helyre tudjuk állítani, ki tudjuk egészíteni (Ngo és mtsai., 2021). Ez a komputáció a generalizációval hozható összefüggésbe (Keresztes és mtsai, 2018). A Cornu Ammonis 1 alrégiót is ehhez a folyamathoz kapcsolták (Guo és mtsai, 2021).

A DG alrégió (és mivel jelenleg még nem lehet szétválasztani adatfeldolgozás során, a CA3 alrégió is) később fejlődik, és feltehetőleg ezért lehetséges, hogy a 4 éves gyerekek még mintázat-elválasztási képességeik, emlékezeti specificitásuk kevésbé fejlett (Bouyeure és mtsai, 2021; Keresztes és mtsai, 2018).

A hippocampusz strukturális fejlődése

A hippocampusz a harmadik trimeszertől egészen 2 éves korig nagyon gyors ütemben növekedik, majd ez a növekedés kezd lassulni 2 éves kor után (Nichols et al., 2023), viszont nem áll meg a növekedés (Canada és mtsai, 2020). Körülbelül 13 éves korig mutatható ki a növekedése a hippocampusznak, és feltehetőleg a hippocampuszban a pruning (felesleges szinapszisok eltávolítása az agy fejlődése során) serdülőkorban válik hangsúlyossá (Krogsrud és mtsai, 2014). A DG alrégió a neurogenézis, és mielinizáció miatt mutathat nyújtottabb fejlődési ívet a többi alrégióhoz képest (Ábrahám és mtsai, 2010; Kalkan és mtsai, 2013; Yu és mtsai, 2013)

A hippocampusz mérete és az emlékezeti teljesítmény gyerekeknél

Botdord és mtsai (2022) egy metaanalízisben alacsony, viszont pozitív kapcsolatot találtak az emlékezeti teljesítmény és hippocampusz mérete között gyerekeknél. Huszonöt tanulmányt, összesen 1357 résztvevő eredményét összegezték. Bár egy korábbi metaanalízisben gyerekeknél épp ellenkezőleg, a kisebb hippocampuszt hozták összefüggésbe a jobb emlékezettel (Von Petten, 2002). Még 4 éves gyerekeknél is vizsgálták az epizodikus memória teljesítmény és hippocampusz méretének összefüggését. Riggins és mtsai (2015) találtak összefüggést 6 éveseknél a hippocampusz feje és az emlékezeti teljesítmény között, viszont 4 éveseknél ez nem volt kimutatható. Illetve 4 és 8 év közötti gyerekeknél vizsgálták Riggins és mtsai (2018) az emlékezeti teljesítményt és a különböző alrégiók térfogatainak kapcsolatát, és ebben ez életszakaszban a CA2-4/DG alrégiók térfogata pozitív összefüggést mutatott a teljesítménnyel, míg a CA1 térfogata negatív összefüggést.

A hippocampusz mérete és a hamis emlékek

Lee és mtsai (2014) 8-13 éveseknél vizsgálták az epizodikus teljesítmény és hippocampusz alrégióknak a kapcsolatát. Eredményeik szerint a jobb oldali DG-CA3 mutatott pozitív kapcsolatot az emlékezeti teljesítménnyel, és negatív kapcsolatban állt a hamis emlékekkel. Keresztes és mtsai (2017) 6-14 éves gyerekeknél vizsgálva találtak szignifikáns, negatív összefüggést a hamis felidézés és a hippocampusz mérete között.

Olyan kutatás is található, ahol felnőtteknél vizsgálták a hippocampusz térfogat, az azonnali hamis emlékek és a hosszú távú hamis emlékek kapcsolatát. A kutatás eredménye az volt, hogy csak az azonnali hamis emlékek állnak összefüggésben a hippocampusz térfogatával (Zhu és mtsai, 2015).

A kutatás célja és hipotézisei

Az eddigi szakirodalomban kevés eredmény született arról, hogy milyen a kapcsolat a gyerekeknél az epizodikus emlékezeti teljesítmény, a hamis emlékek és a hippocampusz mérete között. Illetve a hippocampusz mérete és a hamis emlékek kapcsolatát kizárólag 6 évesnél idősebb gyerekeknél vizsgálták. Ez többek között annak is betudható, hogy kis gyereknél agyi képalkotás vizsgálatot alkalmazni kutatásokban több praktikus kihívást jelent, mint felnőtteknél vagy idősebb gyerekeknél. Kifejezetten fontos már 4 éveseknél feltárni ezt az összefüggést, hiszen 4-6 éves kor között még jelentős változás valószínűsíthető a hippocampuszban. Feltételezzük, hogy 4 éveseknél a hamis emlékek a specifikus emlékek hiányának és a generalizáció folyamata dominanciájának a következménye, amely a még nem teljesen kifejlett DG alrégióknak tudható be, és így a mintázat-eltérő elválasztás képessége még nem elég fejlett.

H1: 4 éves gyerekeknél a hippocampusz térfogata negatívan korrelál egy esemény emlékezetet vizsgáló feladatban létrejött hamis emlékek mennyiségével.

H2: A DG-CA3 és a CA1-CA2 alrégiók térfogata összefüggésben van a hamis emlékek mennyiségével.

H3: A második hipotézisben megfogalmazott összefüggések erősebbek az azonnali hamis emlékekénél, a késleltetett hamis emlékekhez képest.

H4: Pozitív összefüggés mutatható ki a CA1-CA2 alrégiók térfogata és azok között a hamis emlékek között, amelyek a generalizáció folyamata miatt jönnek létre.

Módszerek

A kutatás a Neural Underpinnings of Memory Ontogeny (NeMO) longitudinális kutatás része, amely négy éves gyerekek emlékezet fejlődését vizsgálja három éven keresztül viselkedési feladatokkal és strukturális mágneses rezonancia (MR) adatokkal egyaránt. A kutatás adatfelvétele folyamatban van, így az adatok egy részét elemeztük ebben a kutatásban.

Résztvevők

A jelen kutatásban 25, négy éves magyar gyermek vett részt ($M_{\text{életkor}} = 4,52$ év, $SD_{\text{életkor}} = 0,26$), amelyből 10 lány. A legfiatalabb gyermek 3,9, míg a legidősebb 4,9 éves volt. A résztvevők nem valószínűségi mintavételi technikák alkalmazásával kerültek kiválasztásra: Facebook-hirdetés, valamint az ELTE Babalabor által biztosított adatbázis alapján telefonos megkeresés révén (az adatbázisban szereplő személyek korábban hozzájárultak ahhoz, hogy felkeressék őket kutatási célból). A telefonos toborzás során a szülőket tájékoztattuk arról, hogy ez egy longitudinális kutatási projekt, amelyet az ELTE Babalabor és a Hippocampal Circuit and Code for Cognition Lab (HCCCL) közösen végez, és így egyeztük meg az első alkalom időpontját. A toborzás során kizárási kritériumként szerepelt bármilyen neurológiai vagy pszichiátriai zavar diagnózisa. Az első alkalom során a szülők kitöltötték a beleegyező nyilatkozatot (lásd 1. Melléklet), és elolvasták adatkezelési tájékoztatónkat (2. Melléklet), mielőtt elkezdődött a kutatás. A részvételért a gyerekek egy (500–1500 Ft értékű) játékot választhattak jutalomként minden találkozás után. A kutatást az ELTE Pedagógiai és Pszichológiai Kar Kutatásetikai Bizottsága (engedélyszám: 2022/438) és az Egyesített Pszichológiai Kutatási Etikai Bizottság engedélyezte és az 2022/357 etikai engedélyszám alatt működik (3. Melléklet).

Eljárás

Az esemény emlékezetet vizsgáló feladat

A gyerekek hamis és specifikus emlékeit egy olyan feladattal mértük, amely során 3 mesét néztek meg első alkalommal, majd kérdeztük őket emlékeikről azonnal majd késleltetve. A gyerekek a következő meséket tekintették meg a feladat során: A szülinap (50 másodperc), A téli játék (57 másodperc), Az utazás (56 másodperc). A feladatot Bauer és munkatársainak (2015) kísérlete inspirálta. A mesék egyaránt tartalmazznak vizuális elemeket és verbális narrációt (lásd 4.

Melléklet). A vizuális elemek a <https://www.freepik.com/> weboldalról lettek felhasználva. A mesék struktúrája azonos: két állat a szereplő, három helyszín jelenik, három tárgy, ezekhez tartozó három jelző, és akciók, cselekvések.

Első alkalommal a mesék között különböző, más feladatokat végeztek a gyerekek. A mesék megtekintése előtt azt az utasítást kapják, hogy: “Most egy rövid mesét fogunk megnézni, aminek a címe a Szülinap/Téli játék/Utazás. Figyelj alaposan, mert utána beszélgetni fogunk róla”. Minden mese megtekintése után rögtön a gyerekeket kikérdeztük előre meghatározott módon 2 fázisban: először a következő nyílt kérdésekkel: “Mesélj, mit láttál?” Majd még kétszer megkérdeztük, hogy ‘Emlékszel még valamire?’. Ezek után, a felidézés második fázisában előre meghatározott sorrendben és módon tettünk fel a segítő kérdéseket a gyerekeknek. A további kérdések is nyílt végű kérdések (lásd 5. Melléklet): például mi történt az adott helyszínen, hol találkoztak, milyen tárgy volt a szereplőnél. A gyerekek válasza hangrögzítésre került, majd ezek szöveges átirata készült el, így lehetett elkészíteni a résztvevők pontozását.

Második alkalommal, napok elteltével ($M = 14$ nap, $SD = 9,58$) ugyanolyan módon kérdeztük ki, ahogy első alkalommal: először megkértük hogy idézzék fel, amire emlékeznek, majd ugyanazokkal a segítő kérdésekkel idézték fel emlékeiket. A különbség a második alkalommal, hogy ekkor már a résztvevők nem tekintették meg a meséket, csak a felidézésre került sor, és rögtön egymás után kérdeztük ki mindhárom mesét.

A feladat pontozása

A feladat pontozását két független pontozó végezte. A résztvevő minden felidézett szava/kifejezése pontozásra került. A pontozás (lásd 6. Melléklet) során elkülönítettük a specifikus pontokat, amelyek vagy a verbális narráció szó szerinti, pontos felidézését jelentette vagy egy olyan elem felidézését, amely csak vizuálisan jelent meg. Ha a résztvevőnek az emléke nem volt teljesen pontos, a verbális narrációban megjelent kifejezéshez képest, szinonimaként jegyeztük fel az adott emléket. Ezen kívül a gyerekek hamis emlékeit is feljegyeztük. A pontozók közötti megegyezést intra-class korrelációval (ICC) mértük, és addig finomítottuk a pontozási rendszert amíg kiváló megegyezést értünk el ($ICC_{(two-way, agreement, single)} = 0.980$).

Így végeredményként kaptunk egy hamis emlék pontszámot minden résztvevőre külön az azonnali és késleltetett felidézésre is.

A generalizációra utaló hamis emlékek elkülönítése a többi hamis emléktől

A résztvevők összes hamis emlékéből elkülönítettük azokat a hamis emlékeket, amelyek a generalizációra utaltak. Ehhez ChatGPT 4.0 segítségét vettük igénybe. Olyan hamis emlékeket szerettünk volna elkülöníteni, amelyek során a gyerekek a felidézett emlékeiket olyan hamis emlékekkel egészítették ki, amelyek általános forgatókönyvekből lettek kiragadva: pl. ha elindult a vonat felé, akkor felszállt a vonatra, születnapozás közben tortát ettek. ChatGPT-nek a következő utasítást adtuk: például 'Az utazás' című történetnél a következő kritériumok alapján kellett történeteket írjon: "Kérlek, írd 10 darab szöveget 'Az utazás' címmel, 694 karakterből álljon egy ilyen szöveg szókész nélkül. Egy tipikus utazás történetet szeretnék látni, ami 4 éves gyerekeknek szól. Minden szöveg tartalmazzon 2 szereplőt (ezek állatok legyenek), 3 különböző helyszínt, 3 tárgyat, amivel valamit csinálnak, minden tárgynak legyen valamilyen jelzője: pl. rózsaszín bicikli. És persze egy teljes történet legyen, szóval cselekvések is legyenek benne.". Ahogyan a 7. Mellékletben látható, minden tematikában írtunk 10-10 történetet ChatGPT-vel, majd a gyerekek hamis emlékeit kerestük meg ezekben a történetekben. Minden hamis emléket csak egyszer kerestünk meg, tehát ha több találat is volt, az nem számított több hamis emlékeknek (OpenAI, 2024).

A strukturális MR adatok

A gyerekek a kutatás során egy harmadik találkozás alkalmával mágneses rezonancia (MR) képalkotás vizsgálatban is részt vesznek, amely során strukturális adatokat veszünk fel velük. A vizsgálatban való részvétel a résztvevő és szülőjének együttes beleegyezésével történt. A gyerekek egy játékos felkészítő során ismerkedtek meg a gép sajátosságaival: hogy milyen hangokat ad ki a gép, hogyan kell benne feküdni stb.

Az MR adatokat a HUN-REN Természettudományi Kutatóközpont Agyi Képalkotó Központjában (AKK), Budapesten gyűjtjük, egy 3T Siemens Prisma készülékkel, amelyhez 32 csatornás fejtekercset használunk. Az MR vizsgálat során két felvétel készült a résztvevőkről: egy nagy felbontású, 3D súlyozott Magnetization Prepared Rapid Gradient Echo (MPRAGE) szekvencia, az alábbi paraméterekkel: Ismétlési idő (TR) = 1700 ms; Echo idő (TE) = 3,03 ms; Inverziós idő (TI) = 900 ms; dőlésszög = 9°; látómező (FOV) = 256 mm; voxelméret = 1 mm izotróp; a GeneRalized Autocalibrating Partial Parallel Acquisition (GRAPPA) gyorsítási tényező 2. A felvétel ideje: 3 perc 58 másodperc. A másik felvétel, amelyet felhasználtunk egy nagy felbontású,

2D protondenzitás (PD) turbo spin echo (TSE) szekvencia, amelyet a bal oldali hippocampus hosszanti tengelyére merőlegesen tájoltunk. A szekvencia paraméterei: TR = 5700 ms; TE = 16 ms; FOV = 206 mm; voxelméret = 0,4 x 0,4 x 2 mm; dőlésszög = 120°; távolsági tényező = 0%; turbo faktor = 11; echo távolság = 15,7 ms; echo train száma szeletenként = 38. A felvétel ideje: 3 perc 44 másodperc.

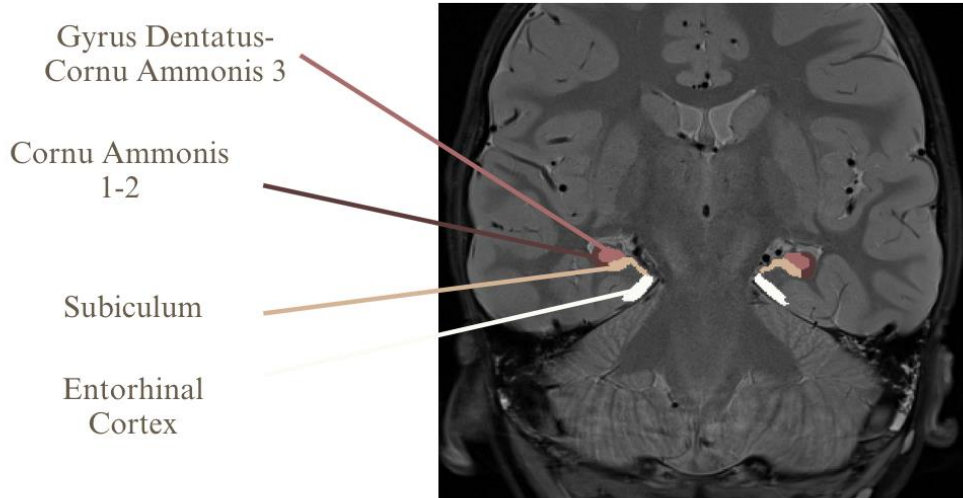
A kutatásban az előzőleg leírt két felvételt használtuk fel. Abban az esetben viszont, ha csak a PD felvételt sikerült elkészíteni, akkor egy harmadik, úgynevezett SCOUT vagy localizer felvételt is felhasználtunk. A SCOUT az MR vizsgálat kezdeti lépése, amely során alacsony felbontású képeket készítenek az agyról 20 másodperc alatt. Ez a felvétel segít a FOV pontos beállításában, pl. a helyes orientáció meghatározásában a további, nagyobb felbontású szekvenciákhoz.

A strukturális MR adatok feldolgozása

A hippocampusz szegmentálását az Automatic Segmentation of Hippocampal Subfields (Yushkevich és mtsai., 2014) programmal végeztük, amely a PD és MPAGE felvételek felhasználásával történik. A program bejelöli a hippocampuszt, a Gyrus dentatus-Cornu Ammonis 3, Cornu Ammonis 1-2, Subiculum és Entorhinális kortex alrégiókat (lásd 1. ábra), illetve kiszámolja azok térfogatait. A szegmentáláshoz egy egyedi atlaszt használtuk fel, amely 6-79 év közötti emberek agyára lett optimalizálva, és kiváló reliabilitási és validitási mutatókkal rendelkezik, így erre esett választásunk (Bender és mtsai, 2017). Abban az esetben, amikor nem sikerült MPAGE felvételt is készíteni, a Scout felvételt használtuk fel, amely megbízhatónak bizonyult, ugyanis elvégeztük a szegmentálást 10 résztvevőre a Scouttal és az MPAGE-dzsel is, és a térfogatok 0,95 fölötti korrelációt mutattak egy résztvevő adatait leszámítva, amelynél a felvételek minősége alacsony volt.

1.ábra

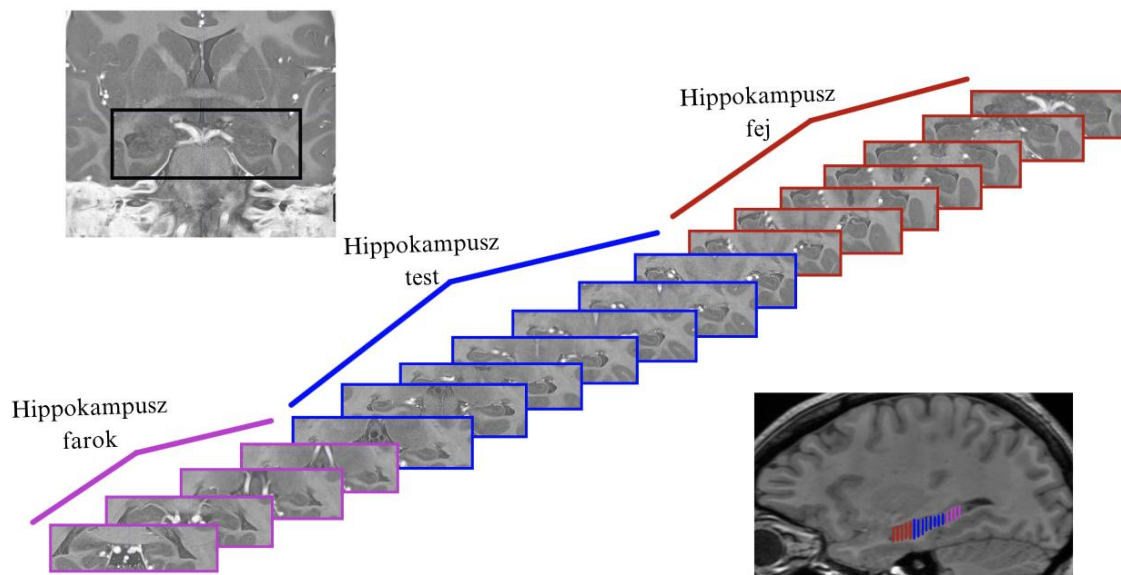
A hippocampusz és alterületeinek ábrázolása koronális agyszeleten. Az ASHS szegmentálása



Két független értékelő a felvételeken bejelölte a hippocampusz testet, ugyanis jelenleg a hippocampusz testben választhatók szét valid módon a különböző alterületek. Minden felvételen bejelöltük a hippocampusz test kezdetét, ez az első agyszelet, ahol már az uncal apex és hippocampusz fej nem látszik, illetve a hippocampusz test vége azt az utolsó agyszeletet jelenti, ahol a lamina quadrigemina még látszik. A hippocampusz test kezdetének bejelölésére 0,77 kappát kaptunk, amely jelentős egyezést jelent a két értékelő között, a hippocampusz test utolsó szeletének jelölése során pedig tökéletes lett az egyezés ($\kappa = 1$, lásd 2. ábra). Az ASHS által végzett szegmentációt egy egyedi, FSL parancsokat minden résztvevőn alkalmazó Bash shell scripttel lekorlátoztuk a hippocampusz testre.

2.ábra

A hippocampusz fej, test és farkok a különböző agyszeleteken



A korlátozás után intrakraniális térfogatot számoltunk az MPRAGE és Scout felvételekből az FSL (FSL 6.0.7.11, Jenkinson és mtsai., 2012) szoftver Brain Extraction Tool-jának (BET) segítségével. Vizuális ellenőrzést végeztünk ezután, hogy minden felvételen megfelelően sikerült-e a koponya eltávolítása. Majd lineáris regresszió segítségével korrigáltuk a kapott alrégiók térfogatait az intrakraniális térfogattal, hogy kiküszöböljük a testméretből adódó egyéni eltérések zavaró hatását.

Eredmények

Leíró statisztika

A hamis emlékek mennyisége

Az előzetes elemzésbe bevont minden résztvevő rendelkezett MR adattal, viszont egy résztvevőnek hiányzott az esemény emlékezet azonnali felidézésének a hangfelvétele, és két résztvevőnek a késleltetett hangfelvétele. Ezeket hiányzó adatként kezeltük.

A gyerekek az azonnali felidézés során átlagosan 6,42 (SD = 4,94) hamis emléket idéztek fel, a késleltetett felidézés során átlagosan 8,83 (SD = 4,49) hamis emléket idéztek fel (lásd 1. táblázat). Azért, hogy a mért hamis emlékek számát befolyásoló nyelvi teljesítményt és felidézett emlékek számát kontrolláljuk, minden résztvevőnél a hamis emlékek számát elosztottuk a saját összes emlékének a mennyiségével, amelyben mind a specifikus emlékek, a szinonimák és a hamis emlékek is megtalálhatók.

1. Táblázat

A hamis emlékek mennyisége az esemény emlékezetet vizsgáló feladatban

	<i>N</i>	<i>Átlag</i>	<i>Szórás</i>	<i>Medián</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>
Azonnalis hamis emlékek	24	6,42	4,94	5	1	22
Késleltetett hamis emlékek	23	8,83	4,49	9	0	19
Összes hamis emlék	22	15,05	8,7	13,5	5	41
Korrigált azonnali hamis emlékek	24	0,13	0,1	0,09	0,02	0,46
Korrigált késleltetett hamis emlékek	23	0,24	0,12	0,25	0	0,54

Korrigált összes hamis emlék	22	0,18	0,1	0,16	0,06	0,49
------------------------------	----	------	-----	------	------	------

A hamis emlékek eloszlását vizsgáltuk a korrekció után. A korrigált hamis emlékek eloszlását Shapiro-Wilk teszt segítségével vizsgáltuk, amely szerint nem teljesül a normál eloszlás feltétele ($W = 0,83$, $p < ,001$). A korrigált késleltett hamis emlékek ehhez képest normál eloszlást mutatnak ($W = 0,98$, $p = ,89$). Illetve az összes korrigált hamis emlék eloszlását is megvizsgáltuk, ahol az azonnli hamis emlékekhez hasonlóan, nem teljesült a normál eloszlás feltétele ($W = 0,87$, $p = ,008$).

A generalizációra utaló hamis emlékek

Az elemzések során megpróbáltuk elkülöníteni azokat a hamis emlékeket, amelyeket a gyerekek tipikus helyzetekből egészítettek ki. Ehhez minden résztvevő hamis emlékét kerestük meg a ChatGPT által generált történetekben. Ahogyan a 2. táblázatban látható, átlagosan 3 ilyen hamis emléket találtunk ($SD = 3,52$).

2. Táblázat

A generalizációra utaló hamis emlékek

	<i>N</i>	Átlag	Szórás	Medián	Minimum	Maximum
Összes generalizációs-hamis emlék	22	3	3,52	3	0	17

A generalizációra utaló hamis emlékek nem normál eloszlásúak ($W = 0,64$, $p < .001$).

A hippocampusz és alrégiók térfogata

A félig automatizált szegmentálás eredményeként megkaptuk a két oldali DG-CA3, a CA1-CA2, a subiculum és az entorhinális kéreg térfogatait. A külön oldalak térfogatait összeadtuk, így kaptuk meg, hogy az adott résztvevőnek összesen mekkora az adott területe. Illetve a hippocampusz térfogatot az alrégiók számoltuk. Így a hippocampusz térfogata csak a hippocampusz test térfogatát jelenti.

A DG-A3 alrégiók térfogata átlagosan $488,9 \text{ mm}^3$ volt ($SD = 73,9$), a CA1-2 alrégióknak $359,6 \text{ mm}^3$ ($SD = 362,23$), míg a hippocampusz térfogatának átlaga $2060,08 \text{ mm}^3$ ($SD = 239,375$) volt

(lásd 3. táblázat). Mindhárom térfogat normál eloszlásnak bizonyult: DG-CA3 alrégióknál: $W = 0,97$, $p = .552$, a CA1-2 térfogatoknál: $W = 0,95$, $p = .265$, a hippocampusz térfogatánál: $W = 0,955$, $p = .329$.

3. Táblázat

A hippocampusz és az alrégiók térfogata

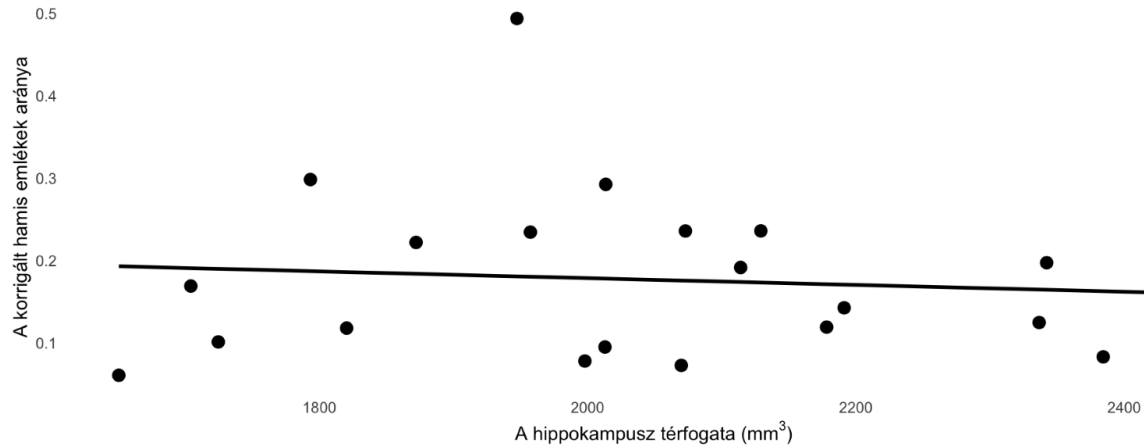
	<i>N</i>	<i>Átlag</i>	<i>Szórás</i>	<i>Medián</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>
A DG-CA3 térfogata (mm ³)	25	488,9	73,92	488,90	351,81	636,8
A CA1-CA2 térfogata (mm ³)	25	359,6	49,62	359,6	256,55	430,19
A hippocampusz térfogata (mm ³)	25	2060,08	239,38	2069,08	1650,38	2448,31

Hipotézisek vizsgálata

Az első hipotézisnél vizsgáltuk a hippocampusz test térfogatát és a hamis emlékek mennyiségét, pozitív kapcsolatot várva. Kendall's Tau B próbát alkalmazva, mivel a hamis emlékek mennyisége nem mutat normál eloszlást, és a mintanagyság alacsony, nem találtunk szignifikáns összefüggést ($\tau = -,004$, $p = 1$, lásd 3.ábra).

3.ábra

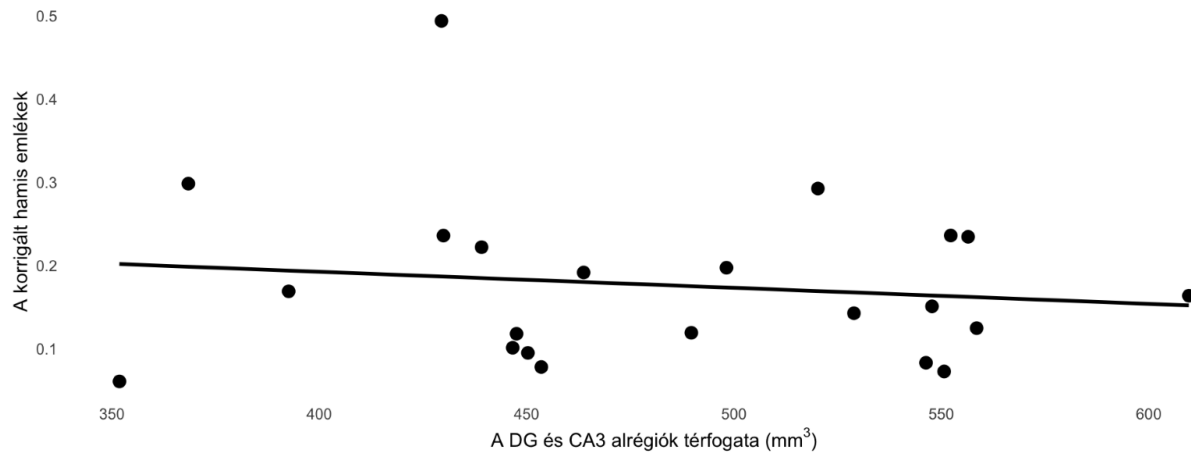
A hippocampusz térfogatának és a hamis emlékek mennyiségének kapcsolata

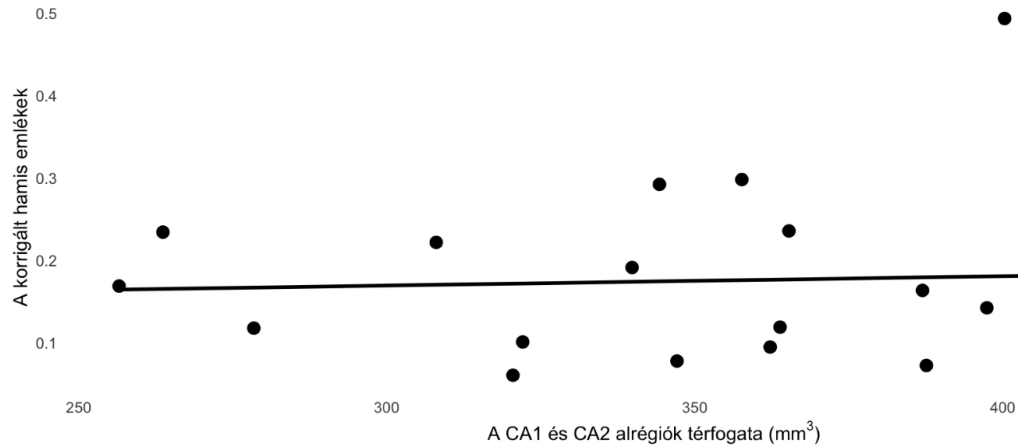


A második hipotézisnél vizsgáltuk (lásd 4. ábra), hogy a DG-CA3 és CA1-CA2 térfogatok milyen összefüggést mutatnak a hamis emlékek mennyiségével. Kendall's Tau B próbával vizsgáltuk ezt a hipotézist is. A DG-CA3 alrégiók térfogatával vizsgálva a hamis emlékek mennyiségét, a próba nem érte el a szignifikáns szintet ($\tau = -,056$, $p = ,738$). Illetve a CA1-CA2 alrégiók térfogata és hamis emlékek mennyisége sem mutat szignifikáns összefüggést ($\tau = ,056$, $p = ,738$).

4.ábra

A DG-CA3 és CA1-CA2 alrégiók térfogatának és a hamis emlékek mennyiségének kapcsolata

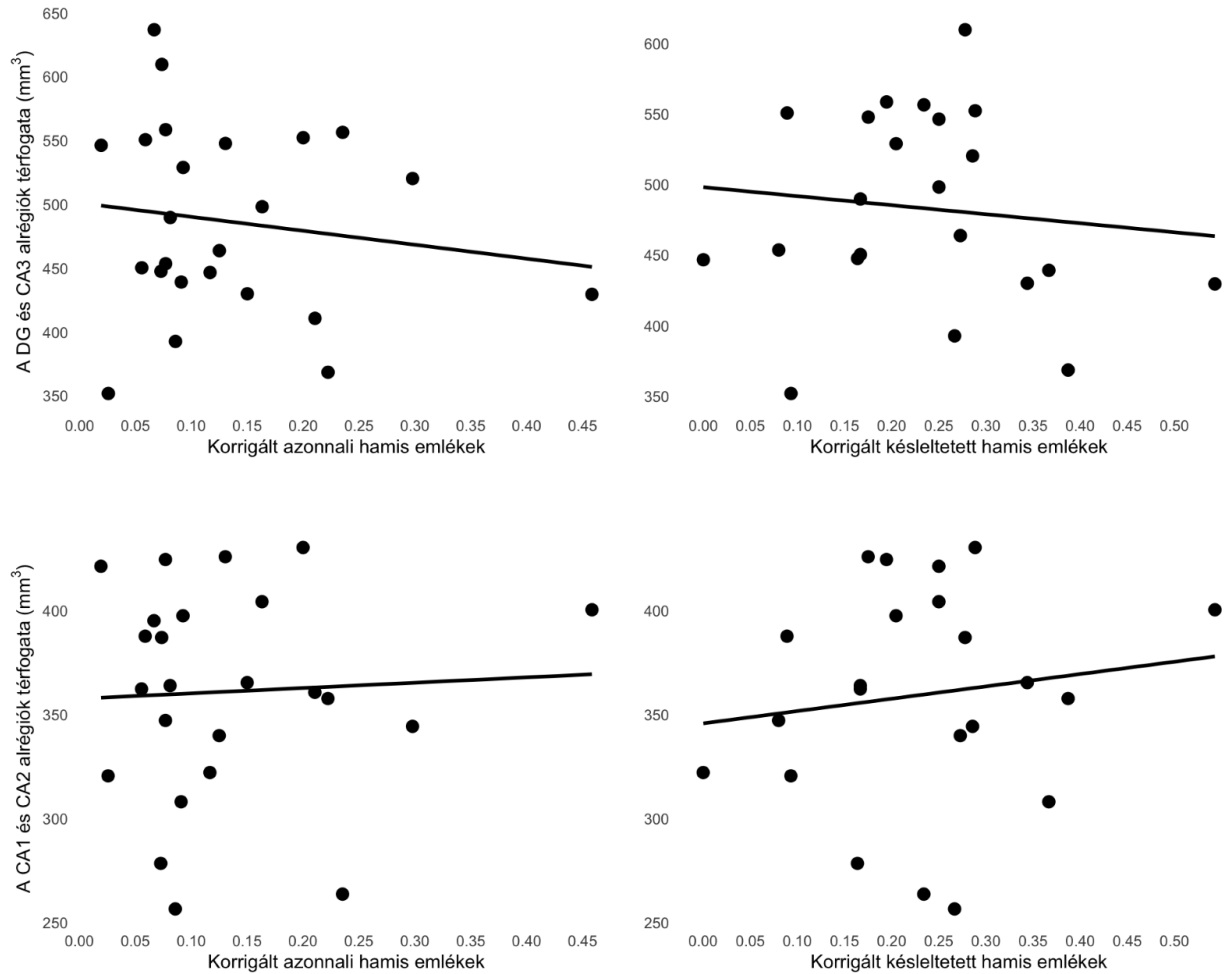




A harmadik hipotézisnél (lásd 5. ábra) külön vizsgáltuk a DG-CA3, CA1-CA2 térfogatok kapcsolatát az azonnali és a késleltett hamis emlékekkel. Az azonnali hamis emlékek és DG-CA3 térfogat kapcsolatának vizsgálatára Kendall's Tau B próbát alkalmaztunk, amely próba nem mutatott szignifikáns kapcsolatot ($\tau = -.113$, $p = .442$). A CA1-CA2 térfogatok és azonnali hamis emlékek kapcsolatának elemzése során szintén nem találtunk szignifikáns összefüggést ($\tau = .011$, $p = .941$). A késleltett hamis emlékek mennyiségének és a DG-CA3 térfogatok kapcsolatának a vizsgálata során Pearson korrelációt néztünk, amely próba eredménye nem lett szignifikáns ($r = -.037$, $p = .866$). Továbbá szintén a késleltetett hamis emlékeket vizsgálva a CA1-CA2 alrégiók térfogatával, a statisztikai teszt eredménye nem érte el a szignifikáns szintet ($r = .080$, $p = .716$). Annak ellenére nem lett egyik összefüggés sem szignifikáns, hogy egy páros mintás t-próbával vizsgálva, az azonnali ($M = 0,133$, $SD = 0,099$) és a késleltett hamis emlékek ($M = 0,241$, $SD = 0,241$) között szignifikáns összefüggés mutatható $t(21) = -5,19$, $p < ,001$, vagyis szignifikánsan nőtt a hamis emlékek mennyisége.

5.ábra

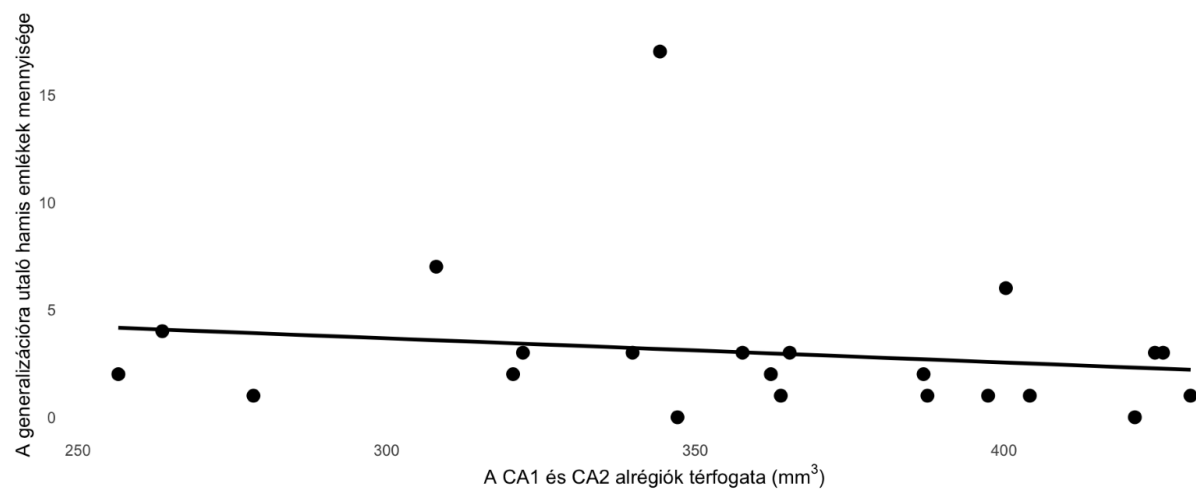
Az azonnali és késleltett hamis emlékek kapcsolata a DG-CA3 alrégiók térfogatával



Az utolsó hipotézisnél (lásd 6. ábra) azokat a hamis emlékeket vizsgáltuk a CA1-CA2 térfogatokkal összefüggésben, amelyek a generalizáció folyamatára utalnak, vagyis azoknak a hamis emlékeknek a mennyiségével, ahányat megtaláltunk a ChatGPT által generált történetekben. A Kendall's Tau B próba eredménye nem lett szignifikáns ($\tau = -,208$, $p = .202$).

6. ábra

A generalizációra utaló hamis emlékek és a CA1-CA2 alrégiók térfogatának a kapcsolata



Diszkusszió

A kutatás során vizsgáltuk 4 éveseknek egy esemény emlékezetet vizsgáló feladat során létrehozott hamis emlékeiknek az összefüggését a hippocampusz test és annak alrégióinak térfogataival. Egyik hipotézisünk sem igazolódott be. Bár valódi következtetést nem vonhatunk le az eredményeink alapján, a továbbiakban próbálunk spekulatíván magyarázatot adni arra is, hogy miért lehetséges az, ha valóban nincs összefüggés a változóink között.

Az első hipotézisnél vizsgáltuk 4 éves gyerekeknél az esemény emlékezetet vizsgáló feladat során létrejött hamis emléük mennyiségének és a hippocampusz térfogatának a kapcsolatát, ahol negatív összefüggést vártunk. A hipotézis nem igazolódott be, amely nem egyezik meg eddigi kutatások eredményével (Botdorf és mti, 2022, Lee és mtsai, 2014, Riggins és mtsai, 2018). Bár az eddigi szakirodalomban inkább az emlékezeti teljesítményt vizsgálták a volumetriával összefüggésben, lehetséges, hogy módszertani különbségek is hozzájárulnak ehhez az ellentmondáshoz, hogy az emlékezetnek más aspektusát ragadtuk meg, mint az eddigi kutatások, és lehetséges, hogy ebben a korban még valóban nincs kapcsolat a hippocampusz mérete és a hamis emlékek között.

A második hipotézisnél hipotézisnél vizsgáltuk a DG-CA3, CA1-CA2 térfogatok és hamis emlékek mennyiségének kapcsolatát. Ez az összefüggés sem lett szignifikáns, amely szintén nem egyezik meg az eddigi szakirodalommal (Lee és mtsai, 2014). A hamis emlékek kapcsolatát az alrégiók térfogatával eddig csak idősebb gyerekeknél vizsgálták, így lehetséges, hogy 4 éveseknél nincs kapcsolat, csak az idősebb gyerekeknél.

Vizsgáltuk még külön az azonnali és késleltett hamis emlékek kapcsolatát a DG-CA3 és CA1-CA2 térfogatokkal, ahol az azonnali hamis emlékekkel erősebb kapcsolatot vártunk. Ez a hipotézis sem igazolódott be, amely az eddigi kutatásokkal nem egyezik meg (Zhu és mtsai, 2015). Ezt eddig felnőtteknél vizsgálták, így lehetséges, hogy gyerekeknél más agyi mechanizmusok felelősek a hamis emlékekért.

Illetve még vizsgáltuk a kutatás során a CA1-CA2 alrégiók térfogatának kapcsolatát azokkal a hamis emlékekkel, amelyek a generalizáció folyamatára utalnak. A hipotézis nem igazolódott be, amely ellentmond az eddigi eredményeknek (Guo és mtsai, 2021). Feltételezhető, hogy a módszer

hibái miatt nem sikerült kellően megragadni azokat a hamis emlékeket, amelyek a generalizáció folyamatára utalnak, így a hipotézis sem tudott beigazolódni.

Limitációk és továbbfejlesztési lehetőségek

A kutatásnak több limitációja volt. Fontos kiemelni, hogy az eredmények még kezdetlegesek, mivel egy folyamatban lévő kutatás adatait dolgoztuk fel, így kis mintával, 25 résztvevő adataival dolgoztunk. Legalább 46 résztvevőre van szükség 0.4-es korrelációt várva, ahol a power 0,8, és 0,05 a szignifikanciaszint (Lee és mtsai, 2014).

További minőség kontroll elvégzésére lesz szükség, mert azok a szegmentációk, amelyek nem megfelelő módon lettek szegmentálva, még manuális korrekciót igényelnek. A minőség kontroll során megvizsgáljuk, hogy az automatikus szegmentáció hol jelölt be túl nagy vagy túl kis területet minden felvétel minden agyszeletén, majd ezeket manuálisan átrajzoljuk a helyes területre. 1-2 résztvevőnél igényel ez nagyobb javításokat, viszont vannak olyan felvételek, amelyeknél egyes szeletek még igényelnek korrekciót. Így az eredményeken kisebb mértékben még ez is módosíthat.

A gyerekek emlékeinek pontozása során két független értékelő jelölte be a hamis és specifikus emlékeket, és bár a hamis és specifikus emlékek elkülönítésére nagy megbízhatóságú módszert fejlesztettünk ki, ez a módszer csak durva megkülönböztetésre alkalmas (csak a szó szerinti egyezéseket kategorizáltuk specifikus emlékként, a nagyon hasonló kifejezéseket szinonimaként, és minden mást hamis emlékeknek vettünk). Jelenleg is dolgozunk egy olyan módszeren amely szemantikai hálózati modellek alapján a hamis emlékek és a célemlékhez hasonló emlékek finomabb elkülönítését teszi lehetővé.

A módszer, amelyet alkalmaztunk arra, hogy elkülönítsük azokat a hamis emlékeket, amelyek a generalizáció révén jöttek létre, továbbfejlesztést igényel. Egy olyan módszert alkalmaztunk, amely során tipikus történetekben kerestük meg a gyerekek hamis emlékeit. Viszont ezzel a módszerrel az egyszerűbb kifejezéseket tudtuk kiemelni a többitől csak, mint a színek, tárgyak, amelyek megjelentek ezekben a generált történetekben, és kevésbé azokat, amelyek olyan általános forgatókönyvekből történő kiegészítésekre utalnak, mint például, hogy ha teát ittak, akkor teát is főztek, vagy ha szülinapoztak, akkor tortát ettek. Jelenleg olyan módszeren dolgozunk, amely szemantikai távolság alapján dönti el, hogy mely hamis emlékek utalnak a generalizációra.

A DG-CA3 alrégiók elválasztása a jelenlegi szegmentálási protokollok alapján még nem lehetséges, amely szintén limitációt jelent, hiszen a két alrégió más komputációkat végeznek, és fejlődésük is más ütemben történik.

Végül, a szegmentációhoz használt atlasz nem 4 éves gyerekek agyára, hanem 6-79 év közötti személyek agyára lett optimalizálva. Így egy következő lépés, hogy 4-6 éves gyerekek agyára is kidolgozzunk és alkalmazzunk egy kiváló reliabilitási és validitási mutatókkal rendelkező atlaszt.

Következtetések

Fontos kiemelni, hogy a kutatás eredményei még kezdetlegesek, alacsony mintaszámmal dolgoztunk, így még erős következtetéseket nem tudunk levonni. Ugyanakkor az eredmények nem mutatnak tendenciát arra, hogy lenne kapcsolat 4 éveseknél a hamis emlékek, hippocampus és annak alrégióinak térfogata között. Lehetséges, hogy a limitációk kiküszöbölésével még változhatnak az eredményeink, és az is, hogy módszertani különbségek miatt nem egyezik meg ez a tendencia eddigi kutatások eredményeivel. Az eddigi kutatásokban más típusú feladattal mérték az emlékezeti teljesítményt. Illetve az sem elhanyagolható tény, hogy az eddigi szakirodalom a témában még eléggé korlátozott.

Elképzelhető, hogy valóban nincs összefüggés a 4 éveseknél. Ebben a korban nem eléggé fejlett a DG alrégió, lehetséges, hogy más, akár kortikális területek felelősek a hamis emlékekért. Feltételeztük, hogy a hamis emlékek az emlékezeti specifitás hiányában jönnek létre viszont van arra esély, hogy ez a feltételezés hibás. Jelentheti ez azt, hogy a hamis emlékek nem csak annak a ténynek a következményei, hogy a 4 évesek még nem képesek specifikus epizodikus emlékeket tárolni idősebb társaikhoz képest, hanem több folyamat fejletlenségének következménye.

Bibliográfia

- Ábrahám, H., Vincze, A., Jewgenow, I., Veszprémi, B., Kravják, A., Gömöri, É., & Seress, L. (2010). Myelination in the human hippocampal formation from Midgestation to adulthood. *International Journal of Developmental Neuroscience*, 28(5), 401–410. <https://doi.org/10.1016/j.ijdevneu.2010.03.004>
- Bauer, P. J. (2015). Development of episodic and autobiographical memory: The importance of remembering forgetting. *Developmental Review*, 38, 146–166. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2015.07.011>
- Bender, A. R., Keresztes, A., Bodammer, N. C., Shing, Y. L., Werkle-Bergner, M., Daugherty, A. M., Yu, Q., Kühn, S., Lindenberger, U., & Raz, N. (2017). Optimization and validation of automated hippocampal subfield segmentation across the lifespan. *Human Brain Mapping*, 39(2), 916–931. <https://doi.org/10.1002/hbm.23891>
- Botdorf, M., Canada, K. L., & Riggins, T. (2022). A meta-analysis of the relation between hippocampal volume and memory ability in typically developing children and adolescents. *Hippocampus*, 32(5), 386–400. <https://doi.org/10.1002/hipo.23414>
- Bouyeure, A., Patil, S., Mauconduit, F., Poiret, C., Isai, D., & Noulhiane, M. (2021). Hippocampal subfield volumes and memory discrimination in the developing brain. *Hippocampus*, 31(11), 1202–1214. <https://doi.org/10.1002/hipo.23385>
- Canada, K. L., Botdorf, M., & Riggins, T. (2020). Longitudinal development of hippocampal subregions from early- to mid-childhood. *Hippocampus*, 30(10), 1098–1111. <https://doi.org/10.1002/hipo.23218>
- FMRIB Software Library. (n.d.). *FSL*. <https://fsl.fmrib.ox.ac.uk/fsl/fslwiki>
- Guo, J., Truong, D., Barreiro, A., Lin, D.-T., & Xu, W. (2021). *Distinct Hippocampal Neuronal Reactions Reveal Different Neuronal Codes for Memory Generalization*. <https://doi.org/10.1101/2021.06.24.449806>

- Jenkinson, M., Beckmann, C. F., Behrens, T. E. J., Woolrich, M. W., & Smith, S. M. (2012). FSL. *NeuroImage*, 62(2), 782–790. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.09.015>
- Kalkan, Y., Unal, B., Keles, O. N., & Kara, A. (2013). Numerical Analysis of age and gender-dependent neuronal cells in postnatal development of Rat Hippocampus. *Neurology, Psychiatry and Brain Research*, 19(1), 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.npbr.2012.08.002>
- Keresztes, A., Bender, A. R., Bodammer, N. C., Lindenberger, U., Shing, Y. L., & Werkle-Bergner, M. (2017). Hippocampal maturity promotes memory distinctiveness in childhood and adolescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(34), 9212–9217. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710654114>
- Keresztes, A., Ngo, C. T., Lindenberger, U., Werkle-Bergner, M., & Newcombe, N. S. (2018). Hippocampal maturation drives memory from generalization to specificity. *Trends in Cognitive Sciences*, 22(8), 676–686. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.05.004>
- Krogsrud, S. K., Tamnes, C. K., Fjell, A. M., Amlie, I., Grydeland, H., Sulutvedt, U., Due-Tønnessen, P., Bjørnerud, A., Søsnes, A. E., Håberg, A. K., Skrane, J., & Walhovd, K. B. (2014). Development of hippocampal subfield volumes from 4 to 22 years. *Human Brain Mapping*, 35(11), 5646–5657. <https://doi.org/10.1002/hbm.22576>
- Lee, J. K., Ekstrom, A. D., & Ghetti, S. (2014). Volume of hippocampal subfields and episodic memory in childhood and adolescence. *NeuroImage*, 94, 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.03.019>
- Loftus, E. F., & Davies, G. M. (1984). Distortions in the memory of children. *Journal of Social Issues*, 40(2), 51–67. <https://doi.org/10.1111/j.1540-4560.1984.tb01093.x>
- Marr, D. (1971). Simple memory: A theory for Archicortex. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 262(841), 23–81. <https://doi.org/10.1098/rstb.1971.0078>
- Martin-Ordas, G., Atance, C. M., & Caza, J. (2017). Did the popsicle melt? preschoolers' performance in an episodic-like memory task. *Memory*, 25(9), 1260–1271. <https://doi.org/10.1080/09658211.2017.1285940>

- Milner, B., Corkin, S., & Teuber, H.-L. (1968a). Further analysis of the Hippocampal Amnesic Syndrome: 14-year follow-up study of H.M. *Neuropsychologia*, 6(3), 215–234. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(68\)90021-3](https://doi.org/10.1016/0028-3932(68)90021-3)
- Milner, B., Corkin, S., & Teuber, H.-L. (1968b). Further analysis of the Hippocampal Amnesic Syndrome: 14-year follow-up study of H.M. *Neuropsychologia*, 6(3), 215–234. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(68\)90021-3](https://doi.org/10.1016/0028-3932(68)90021-3)
- Ngo, C. T., Benear, S. L., Popal, H., Olson, I. R., & Newcombe, N. S. (2021). Contingency of semantic generalization on episodic specificity varies across development. *Current Biology*, 31(12). <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.03.088>
- Ngo, C. T., Michelmann, S., Olson, I. R., & Newcombe, N. S. (2021). Pattern separation and pattern completion: Behaviorally separable processes? *Memory & Cognition*, 49(1), 193–205. <https://doi.org/10.3758/s13421-020-01072-y>
- Ngo, C. T., Newcombe, N. S., & Olson, I. R. (2017). The ontogeny of relational memory and pattern separation. *Developmental Science*, 21(2). <https://doi.org/10.1111/desc.12556>
- Nichols, E. S., Grace, M., Correa, S., de Vrijer, B., Eagleson, R., McKenzie, C. A., de Ribaupierre, S., & Duerden, E. G. (2023). Sex- and age-based differences in fetal and early childhood hippocampus maturation: A cross-sectional and longitudinal analysis. *Cerebral Cortex*, 34(1). <https://doi.org/10.1093/cercor/bhad421>
- OpenAI. (2024). ChatGPT (Nov 1 version) [Large language model]. <https://chat.openai.com/chat>
- Otgaar, H., Howe, M. L., Peters, M., Smeets, T., & Moritz, S. (2014). The production of spontaneous false memories across childhood. *Journal of Experimental Child Psychology*, 121, 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.11.019>
- Riggins, T., Blankenship, S., Mulligan, E., Rice, K., & Redcay, E. (2015). Developmental differences in relations between episodic memory and hippocampal subregion volume during early childhood. *Child Development*, 86(6), 1710–1718. <https://doi.org/10.1111/cdev.12445>

- Riggins, T., Geng, F., Botdorf, M., Canada, K., Cox, L., & Hancock, G. R. (2018). Protracted hippocampal development is associated with age-related improvements in memory during early childhood. *NeuroImage*, 174, 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.03.009>
- Squire, L. R. (1986). Mechanisms of memory. *Science*, 232(4758), 1612–1619. <https://doi.org/10.1126/science.3086978>
- Tulving, E. (2002). Episodic memory: From mind to brain. *Annual Review of Psychology*, 53(1), 1–25. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.53.100901.135114>
- Uehara, I. (2000). Differences in episodic memory between four- and five-year-olds: False information versus real experiences. *Psychological Reports*, 86(3), 745–755. <https://doi.org/10.2466/pr0.2000.86.3.745>
- Van Petten, C. (2004). Relationship between hippocampal volume and memory ability in healthy individuals across the lifespan: Review and meta-analysis. *Neuropsychologia*, 42(10), 1394–1413. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2004.04.006>
- Yassa, M. A., & Stark, C. E. L. (2011). Pattern separation in the hippocampus. *Trends in Neurosciences*, 34(10), 515–525. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2011.06.006>
- Yu, E. P., Dengler, C. G., Frausto, S. F., Putt, M. E., Yue, C., Takano, H., & Coulter, D. A. (2013). Protracted postnatal development of sparse, specific dentate granule cell activation in the mouse hippocampus. *The Journal of Neuroscience*, 33(7), 2947–2960. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.1868-12.2013>
- Yushkevich, P. A., Pluta, J. B., Wang, H., Xie, L., Ding, S.-L., Gertje, E. C., Mancuso, L., Klot, D., Das, S. R., & Wolk, D. A. (2014). Automated volumetry and regional thickness analysis of hippocampal subfields and medial temporal cortical structures in mild cognitive impairment. *Human Brain Mapping*, 36(1), 258–287. <https://doi.org/10.1002/hbm.22627>
- Zhu, B., Chen, C., Loftus, E. F., He, Q., Lei, X., Dong, Q., & Lin, C. (2015). Hippocampal size is related to short-term true and false memory, and right fusiform size is related to long-term true and false memory. *Brain Structure and Function*, 221(8), 4045–4057. <https://doi.org/10.1007/s00429-015-1145-1>

