

Az agy fejlődésének Goldilocks-zónája serdülőkorban

The Goldilocks Zone of Brain Development in Adolescence

Szakács Hanna¹ – Gombos Ferenc² – Kovács Ilona³

¹ PhD-hallgató, Semmelweis Egyetem Doktori Iskola, Budapest;
HUN-REN-ELTE-PPKE Serdülőkori Fejlődés Kutatócsoport, Budapest
szakacs.miriam.hanna@btk.ppke.hu

² doktorjelölt, Budapesti Műszaki Egyetem Pszichológia Doktori Iskola, Budapest;
Pázmány Péter Katolikus Egyetem Pszichológiai Kutatólaboratórium, Budapest;
HUN-REN-ELTE-PPKE Serdülőkori Fejlődés Kutatócsoport, Budapest
gombos.ferenc@btk.ppke.hu

³ az MTA levelező tagja, HUN-REN-ELTE-PPKE Serdülőkori Fejlődés Kutatócsoport, Budapest;
Eötvös Loránd Tudományegyetem Pedagógiai és Pszichológiai Kar Pszichológiai Intézet, Budapest
kovacs.ilona@ppk.elte.hu

Absztrakt

A Goldilocks-zóna kifejezés az űrkutatásból szivárgott át más tudományágak szótárába, és egy olyan tartományt ír le, amelyben bizonyos körülmények (például a bolygóközi távolság vagy a pH-érték) éppen megfelelőek, ezen kívül pedig problémák, betegségek lépnek fel. A serdülőkor számos Goldilocks-zónával jellemezhető, például a tanórák és edzések mennyiségének, illetve az agyi szinaptikus met-szegetés mértékének tekintetében. Ez utóbbi kardinális kérdés serdülőkorban, ugyanis folyamatosan gyarapodnak a tudományos bizonyítékok arra vonatkozóan, hogy a pubertáskori érést elindító gonadotrop hormonok emelkedése és az agy serdülőkori strukturális-funkcionális átrendeződése szorosan összekapcsolódó folyamatok. Feltáratlan kérdés azonban, hogy a pubertáskori érés tempója hogyan befolyásolja ezt a kapcsolatot. Eredményeink alapján a pubertáskori érés tempójának is van Goldilocks-zónája, amely mellett az agy hierarchikus szerveződése optimális.

Abstract

The term “Goldilocks zone” originated in space research but has since spread to various other scientific disciplines. It describes a range within which certain conditions (such as interplanetary distance and pH levels) are just right; however, deviations from this range can lead to problems and diseases. Adolescence can be characterized by several Goldilocks zones, such as the number of hours spent studying or exercising, and the level of synaptic pruning in the brain. The latter is particularly important during this period, as growing scientific evidence suggests a close connection between the rise of puberty-triggering gonadotropin hormones and the structural and functional reorganization of the adolescent brain. However, the manner in which the pace of pubertal maturation influences this relationship remains elusive. Recent findings suggest that the pace of pubertal maturation also has a Goldilocks zone, within which the brain’s hierarchical organization is optimal.

Kulcsszavak: elektroencefalográfia, agyi fejlődés, pubertáskori érés

Keywords: electroencephalography, brain development, pubertal maturation

A pubertás hatása az agyra

A serdülőkori markáns és meghatározó eseménye a pubertás, melynek során a gonadotrop hormonok szintjének emelkedése számos jelentős, gyakran a felnőtt életre is kiható változást indít el a serdülőkben. Néhány ezek közül, mint a másodlagos nemi jellegek fejlődése – ideértve a fizikai, viselkedéses és érzelmi átalakulásokat egyaránt –, könnyen észrevehető változásokat eredményez, mások azonban a szem elől elrejtve bontakoznak ki. Az utóbbi kategóriába sorolható az agy strukturális és funkcionális átalakulása (Blakemore–Burnett–Dahl 2010), mely szintén kapcsolatban áll a gonadarchéval, a gonadotrop hormonok mennyiségének növekedésével serdülőkori korban.

A serdülőkori agyi átalakulás mind a fehér-, mind a szürkeállományt érinti. Keresztmetszeti kutatások (például Jernigan et al. 1991; Reiss et al. 1996) már az 1990-es évek elején kimutatták, hogy kisgyermekkorban a szürkeállomány relatív térfogata még növekszik, majd a serdülőkori során folyamatosan csökken (más szóval elvékonyodik), valamint hogy a fehérállomány szürkeállományhoz viszonyított térfogati aránya a serdülőkori során növekedést mutat. Giedd és munkatársai (1999) vizsgálták azonban elsőként ezeket a változásokat hosszmetzeti mintán is 145, egészséges gyermekek agyáról készült mágnesesrezonancia-felvétel segítségével, megerősítve a szürke- és fehérállomány arányának változására vonatkozó korábbi, keresztmetszeti adatokat. Eredményeik szerint a szürkeállomány maximális térfogata a fiúk esetén 12, míg a lányoknál 11 éves korban volt kimutatható, ezt követte a felnőttkorig tartó elvékonyodás. Ezek a nemenként eltérő életkorok egybevágnak a két nem általános gonadarche-életkorával (Blakemore–Burnett–Dahl 2010), amikor a gonadotrop hormonok jellemzően emelkedni kezdenek, elindítva a pubertást és az érést. Jay N. Giedd és munkatársainak eredményei tehát támogatják azt a hipotézist, mely szerint a pubertás és a serdülőkori lezajló agyi, különösen az agykérgi átszerveződés között szoros kapcsolat áll fenn.

A serdülőkori hormonális folyamatokhoz fűződik továbbá a szinaptikus metszegetés, angolul *pruning*. Az elnevezés rendkívül kifejező, ugyanis a hipotézis szerint a folyamat során az agy megszabadul a feleslegesnek ítélt szinaptikus kapcsolatoktól a gazdaságos és hatékony működés érdekében (Cafasso 2018), mintegy elmetszi azokat a kapcsolatokat, amelyek a ritka használat következtében elgyengültek. Az egyik első, a metszegetés életkori lefutását feltérképező tanulmány (Huttenlocher 1979) a frontális lebenyből származó szövetminták segítségével vizsgálta a szinaptikus sűrűséget az életkor függvényében. Az eredmények szerint a gyermek- és a felnőttkor között jelentős és statisztikailag szignifikáns csökkenés jön létre a szinaptikus sűrűségben. 16 éves kor után megáll a csökkenés, és a szinaptikus sűrűség körülbelül 74 éves korig stabil marad. Később Irwin Feinberg beépítette az érés változóját is a szinaptikus metszegetés egyenletébe. 1990-ben Feinberg és munkatársai a szinaptikus sűrűséget, az alvás alatti elektroencefalográfia- (EEG) delta-hullámok amplitúdóját, valamint az agykérgi anyagcsere mértékének csökkenését vizsgálták születéstől 30 éves korig

(Feinberg et al. 1990). A vizsgált változók, amelyek mind közvetlenül tükrözik az agyi szinaptikus sűrűség mértékét, megerősítették az 1979-ben Peter R. Huttenlocher által leírt mintázatot. Jelentős különbség azonban a két tanulmány között, hogy Feinberg és szerzőtársai az értelmezés során már kitértek a megfigyelt folyamatok lehetséges hormonális hátterére is. 2012-ben Ian G. Campbell, Feinberg és kollégáik ismét az EEG-delta-amplitúdó csökkenését vizsgálták 9–18 éves longitudinális mintán, immár explicit módon feltéve a kérdést, hogy a szinaptikus sűrűség e mutatójában megfigyelhető változások a pubertáskori éréshez köthetők-e (Campbell et al. 2012). Az eredmények szerint a delta-amplitúdó először fokozatosan csökkent 9 és 12 éves kor között, majd meredeken 12 és 16,5 éves kor között. A statisztikai elemzés során a szerzők szignifikáns összefüggést mutattak ki a legjelentősebb delta-amplitúdó-csökkenéssel jellemezhető életkor és a leggyorsabb éréssel jellemezhető életkor között, továbbá kimutatták, hogy a gyors érés időben megelőzi a delta-amplitúdó meredek csökkenésének kezdetét. Megvizsgálták ezen túl a nemi különbségeket is: a lányoknál a felgyorsult érés egy évvel korábban következett be, mint a fiúknál. Összességében a delta-amplitúdó csökkenése szignifikáns és független kapcsolatot mutatott mind a biológiai nemmel, mind az éréssel.

Bár az eredmények igencsak meggyőzőek, a 2012-es tanulmány gyengesége, hogy az érettség vizsgálatára a Tanner-féle osztályozást használta, mely amellett, hogy kellemetlen a vizsgálati résztvevők számára, szubjektív is, és nem tükrözi megfelelően a serdülőkori fejlődést leíró szekuláris trendeket, így az utóbbi években validitása erősen megkérdőjelezhetővé vált (Walker et al. 2020). Továbbra is nagy szükség van tehát olyan tudományos munkákra a témában, melyek az érést objektív és megbízható eszközökkel mérik, mint például az ultrahangos csontkor-meghatározás (Kovács et al. 2022).

Goldilocks-zónák földön és égen

Bár az agyban lezajló átrendeződés kapcsolata a gonadotrop hormonokkal már régóta a tudományos érdeklődés tárgya, pontos természete még ismeretlen. Válaszra vár továbbá az a kérdés is, hogy az érés tempója hogyan befolyásolja ezeket a kulcsfontosságú, strukturális-funkcionális változásokat. A pubertás kezdete rendkívül nagy egyéni variabilitást mutat egészséges kamaszokban is, és az itt eddig ismertetett kutatási eredmények alapján joggal feltételezhető, hogy ennek a változatosságnak megfelelően indulnak el a serdülőkori agykérgi fejlődés folyamatai. Vajon van-e a pubertásnak egy ideális tempója, egyfajta Goldilocks-zónája az agykéreg fejlődésének szempontjából?

A Goldilocks-zóna kifejezés az űrkutatásban vált először használatossá, és azt a zónát jelöli a csillagok körül, melyen belül a bolygók éppen olyan távolságra vannak az adott csillagtól, amely lehetővé teszi, hogy a víz folyékony halmazállapotú maradjon a felszínükön. Ezek a bolygók tehát sem nem túl forrók, sem nem túl hidegek, hanem egy ideális, kiegyensúlyozott állapot jellemzi őket. A kifejezés Robert Southey angol

szerző közismert meséjére utal, amelyben a címszereplő Aranyfürtöske (Goldilocks) betéved egy háromtagú medvecsalád házába, és belekóstol mindhárom tányér zabkásába, amelyet az asztalon talál. Végül azt az adagot választja, amelyik nem túl forró, de még nem is hűlt ki, hanem éppen jó. Az úrkutatás után számos tudományág – például az ökológia, a gazdaságtudomány, a statisztika, a kognitív tudomány és az orvostudomány is – beépítette saját szótárába a kifejezést. Számos tényezőnek, változónak és élettani jellemzőnek van Goldilocks-zónája, tehát egy olyan tartománya, amelyen belül az értékek optimálisak, azon kívül pedig komoly problémák léphetnek fel, illetve jelezhetnek betegségeket. Ilyen az ivóvíz pH-értéke (Cirino 2019) vagy a magasság és testsúly aránya (Shah–Sucher–Hollenbeck 2006).

A serdülőkori fejlődés potenciális Goldilocks-zónái

A serdülők testi és mentális egészségének megóvása és támogatása számos, Goldilocks-zónával jellemezhető változón múlik, ahol a pozitív hatások egy bizonyos pontig kimutathatók, azon túl viszont felszaporodnak a problémák, rendellenességek. Az egyik legnehezebb kérdés az időbeosztás, pontosabban a tanórák, különórák, edzések és egyéb fejlesztő foglalkozások beiktatása a napirendbe úgy, hogy azok valóban segítsék a tanulók iskolai előrehaladását és mentális-fizikai egészségét. Carolina Caetano, Gregorio Caetano és Eric Nielsen (2024) azt vizsgálták, hogy a különböző tevékenységek (tanórák, különórák, sport, aktív és passzív pihenés, alvás, házimunka), amelyekből a kisiskolások és középiskolások hétköznapi állnak, valóban eléri-e a kívánt hatást. Eredményeik több szempontból is érdekesek. Egyrészt az adatok azt mutatják, hogy a középiskolások vállalát jelentősebben nyomja a tanulással és házimunkával töltött órák súlya, valamint hogy a tanulmányi fejlődésre fordított idő (középiskolásoknál ez közel heti 35 órányi elfoglaltságot jelentett) utolsó órája már nem javította a teljesítményt, és negatívan korrelált a szociális készségekkel. A társas készségekre gyakorolt negatív hatás sarkalatos, hiszen ebben az életkorban minden korábbinál fontosabbá válnak a kortárskapcsolatok, melyek minősége erősen befolyásolja a serdülők mentális jóllétét.

Ha a tanórákat és különórákat már sikerült beosztani, ideje helyet találni az edzéseknek is. Az aktuális egészségügyi irányelvek szerint (Morin 2024) a serdülőknek legalább 60 percnyi mozgásra van szükségük heti öt-hat alkalommal. A mozgásszegény életmód veszélyei a fiatalokra nézve is jól ismertek, ebből kifolyólag pedig egyértelmű, hogy a serdülőknek szükségük van a rendszeres mozgásra. Felmerül azonban a kérdés, hogy lehetséges-e túl sokat edzeni. Amy Morin cikke ezt a kérdést a túl sokat mozgó serdülő motivációi felől közelíti meg, mint például a bevitt kalóriák kompenzációjára irányuló igyekezet, a hízástól való túlzott félelem vagy a negatív testkép, ezek ugyanis a testedzésfüggőség jelei lehetnek, melyek mind pszichésen, mind testileg erősen megviselik a serdülőket. A túlzott edzés továbbá amenorrhéához, vagyis a menstruáció hiányához vezethet a serdülő lányoknál (Warren–Stiehl 1999).

A korábban itt említett szinaptikus metszegetésről is születtek már arra utaló eredmények, amelyek szerint az „alulmetszés” és a „túlmetszés”, vagyis az elégtelen vagy éppen túlzott *pruning* a serdülőkorban komoly negatív következményekkel járhat a mentális egészségre nézve. A skizofréniát, amely jellemzően serdülőkorban jelentkező kórkép, Matcheri S. Keshavan, Stewart Anderson és Jay W. Pettegrew (1994) a túlzott serdülőkori *pruning*hoz kötötte (Feinberg elméletére építve). David A. Lewis (2009) szakirodalmi áttekintése szerint a skizofréniával diagnosztizált páciensek agyában jelentős dendrittüske-csökkenés figyelhető meg a dorzolaterális prefrontális kéregben, mely terület az ún. végrehajtó funkciókért felelős. Idetartozik többek között a munkamemória, az előre tervezés, valamint a gondolkodás és viselkedés rugalmas igazítása a változó körülményekhez.

Az érem másik oldalát mutatja be Ahmed Eltokhi és munkatársai (2020) szakirodalmi összefoglalója, melyben a különböző fejlődési és pszichés zavarok, a szinaptikus metszegetés diszregulációja és a kiegyensúlyozatlan belflóra lehetséges kapcsolatait vizsgálják. Az áttekintésben tárgyalt rendellenességek közül különösen releváns a figyelemhiányos hiperaktivitás-zavar (ADHD): a szerzők szerint több korábbi eredmény is arra utal, hogy az ADHD-val diagnosztizált gyermekek agykérge egyfajta érési késéssel jellemezhető, ami a késleltetett szinaptikus metszegetésben, tehát alulmetszésben nyilvánul meg.

Az idevonatkozó korábbi kutatási eredmények rövid és közel sem teljes áttekintése után is világos lehet az olvasó számára, hogy a szakirodalomból jelenleg hiányoznak azok a kutatások, amelyek egyesítik az érés objektív mérését serdülőkorban az agyi fejlődésre vonatkozó mutatókkal, és ez utóbbit képesek az eltérő érési tempók függvényében vizsgálni. 2024-ben megjelent cikkünket (Szakács et al. 2024), melynek célja a serdülők agykérgi hierarchikus fejlődésének érésfüggő vizsgálata volt, ez a hiány inspirálta.

Goldilocks és az entrópiaprodukción

Tanulmányunkban (Szakács et al. 2024) összesen 61 serdülő lány és 26 fiatal felnőtt nő nagy felbontású EEG- (HD-EEG) adatait elemeztük, melyeket éber nyugalmi állapotban vettünk fel. A serdülő résztvevőkön először ultrahangos csontkor-meghatározást végeztünk, majd ezt követően érettségi csoportokba soroltuk őket az életkoruk és a csontkoruk eltérése alapján: a decelerált csoportba kerültek azok a résztvevők, akiknek csontkora alacsonyabb volt az életkoruknál, az átlagos csoportban a csontkor és az életkor közel megegyezett, míg az akcelerált csoport résztvevőinél magasabb volt a csontkor. Az alkalmazott EEG-elemzési módszer a termodinamika második törvényére épít, mely szerint egy rendszerben a folyamatok az idő előrehaladtával egyre rendezetlenebbé válnak, ezáltal az entrópia, a rendezetlenség mérőfoka is növekedni fog. Ugyanebben a kontextusban az entrópia növekedése együtt jár a folyamatok visszafordíthatatlanságával; más szóval a folyamatok egyre inkább egy irányban zajlanak le. Minél inkább jellemző a folyamatokra a visszafordíthatatlanság, annál hierarchikusabb a rendszer. Az EEG-adatok elemzéséhez e termodinamikai

elvek mentén dolgoztunk ki egy eljárást, melynek során először jól elkülöníthető agyi aktivitási mintázatokra (*brain state*) bontottuk le az egyes EEG-felvételeket, majd elemeztük a mintázatok szekvenciáját a felvételekben. Minden egyes agyi aktivitási mintázatnál megállapítható, milyen valószínűséggel fog bármelyik a másikba átváltani (például A mintázatból B mintázatba, A mintázatból C-be és így tovább), valamint ki lehet számítani azt is, hogy a visszafelé váltásnak mi a valószínűsége (például B mintázatból A mintázatba). A jelentős eltérés a váltás és a visszaváltás valószínűsége között bármely két agyi aktivitási mintázat esetén a folyamatok visszafordíthatatlanságára utal, tehát ezeknél az agyi aktivitási mintázatoknál a folyamatok hierarchizáltak. A hierarchia mértékegységeként használtuk tanulmányunkban az entrópiaprodukciónak kifejezést, utalva az eljárást megalapozó termodinamikai törvényre. Összefoglalva: minél kevésbé visszafordíthatók, annál erőteljesebben hierarchizáltak a folyamatok, ennek mértékét pedig az entrópiaprodukciónak mint mérőszám fejezi ki.

Az entrópiaprodukciónak összehasonlítottuk a három érettségi csoportban. Az entrópiaprodukciónak az átlagos érettségű csoportban szignifikánsan magasabb volt, mint mind a decelerált, mind az akcelerált csoportban. Ez az eredmény az IQ-eredményektől jelentősen eltérő mintázatot mutatott (lásd Oláh Gyöngyi és munkatársai cikkét a tematikus összeállítás 164–171. oldalain). Eredményeink arra utalnak, hogy az agy fejlődésében, pontosabban az agykérgi folyamatok hierarchikus szerveződésében is megállapítható egy Goldilocks-zóna, mely az érés tempójával áll összefüggésben. A fejlődés ezen aspektusának szempontjából optimálisnak tűnik, ha az érés sem nem túl gyors, mint az akcelerált csoportban, sem nem túl lassú, mint a decelerált résztvevőknél.

Az eredmények egy lehetséges értelmezése a metszegetés mértékével áll összefüggésben; lehetséges, hogy a decelerált és akcelerált csoportok alacsonyabb fokú agykérgi hierarchikus szerveződésének hátterében az alul-, illetve túlmetszegetés áll, az átlagos érési tempójú csoport esetében pedig a metszegetés mértéke sem nem túl kevés, sem nem túl sok, hanem éppen jó. Ez az értelmezési lehetőség felveti továbbá az érési tempó átlagostól való extrém eltéréseinek lehetséges negatív, akár hosszú távú hatásait az agyi fejlődésre.

Összefoglalás

Az ismertetett eredmények összességükben a pubertás által elindított változásokra, különösen az agyi strukturális-funkcionális átszerveződésre hívják fel a figyelmet. Felvetik továbbá az érés tempójának szempontját, melyet a serdülőkori fejlődéssel foglalkozó tanulmányok gyakran figyelmen kívül hagynak. A tematikus összeállítás cikkei ellenben éppen ennek az aspektusnak a fontosságát hangsúlyozzák, és megmutatják, hogy hatása tetten érhető a serdülőkori kognitív, érzelmi és mozgásfejlődésben, valamint az agykérgi hierarchikus szerveződésben egyaránt. Továbbra is megválaszolatlan a kérdés, hogy a serdülőkorban kimutatott hatások átmenetiek-e, vagy a felnőttkorban is megmutatkoznak. Az azonban már kirajzolódik, hogy az érés és annak

életkortól való eltérései kardinális kérdések a serdülők fejlődésének kutatásában, és a kutatási protokollokba való beemelésük elengedhetetlenül fontos ahhoz, hogy közelebb kerüljünk annak megértéséhez, hogyan válnak a gyermekek felnőtté, és hogyan tudjuk őket úgy támogatni ebben a folyamatban, hogy mentálisan egészséges felnőttekké váljanak.

Köszönetnyilvánítás

A munkát a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal K-134370 számú OTKA-témapályázata (vezető kutató: Kovács Ilona), a HUN-REN-ELTE-PPKE Serdülőkori Fejlődés Kutatócsoport, valamint a Pázmány Péter Katolikus Egyetem Bölcsész- és Társadalomtudományi Karának PPKE-BTK-KUT-23-1 számú kutatócsoportja támogatta.

Irodalomjegyzék

- Blakemore, Sarah-Jayne – Burnett, Stephanie – Dahl, Ronald E. (2010). „The Role of Puberty in the Developing Adolescent Brain”. *Human Brain Mapping* 31/6, 926–933. <https://doi.org/10.1002/hbm.21052>.
- Caetano, Carolina – Caetano, Gregorio – Nielsen, Eric (2024). „Are Children Spending Too Much Time on Enrichment Activities?” *Economics of Education Review* 98, 102503. <https://doi.org/10.1016/j.econedurev.2023.102503>.
- Cafasso, Jacquelyn (2018). „What Is Synaptic Pruning?” *Healthline* (2018. szept. 18.). <https://www.healthline.com/health/synaptic-pruning>.
- Campbell, Ian G. et al. (2012). „Sex, Puberty, and the Timing of Sleep EEG Measured Adolescent Brain Maturation”. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 109/15, 5740–5743. <https://doi.org/10.1073/pnas.1120860109>.
- Cirino, Natalie (2019). „What pH Should My Drinking Water Be?”. *Healthline* (2019. márc. 30.). <https://www.healthline.com/health/ph-of-drinking-water>.
- Eltokhi, Ahmed et al. (2020). „Dysregulation of Synaptic Pruning as a Possible Link Between Intestinal Microbiota Dysbiosis and Neuropsychiatric Disorders”. *Journal of Neuroscience Research* 98/7, 1335–1369. <https://doi.org/10.1002/jnr.24616>.
- Feinberg, Irwin et al. (1990). „Gamma Distribution Model Describes Maturation Curves for Delta Wave Amplitude, Cortical Metabolic Rate and Synaptic Density”. *Journal of Theoretical Biology* 142/2, 149–161. [https://doi.org/10.1016/s0022-5193\(05\)80218-8](https://doi.org/10.1016/s0022-5193(05)80218-8).
- Giedd, Jay N. et al. (1999). „Brain Development During Childhood and Adolescence: A Longitudinal MRI Study”. *Nature Neuroscience* 2/10, 861–863. <https://doi.org/10.1038/13158>.
- Huttenlocher, Peter R. (1979). „Synaptic Density in Human Frontal Cortex – Developmental Changes and Effects of Aging”. *Brain Research* 163/2, 195–205. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(79\)90349-4](https://doi.org/10.1016/0006-8993(79)90349-4).
- Jernigan, Terry L. et al. (1991). „Maturation of Human Cerebrum Observed in Vivo During Adolescence”. *Brain* 114/5, 2037–2049. <https://doi.org/10.1093/brain/114.5.2037>.
- Keshavan, Matcheri S. – Anderson, Stewart – Pettegrew, Jay W. (1994). „Is Schizophrenia Due to Excessive Synaptic Pruning in the Prefrontal Cortex? The Feinberg Hypothesis Revisited”. *Journal of Psychiatric Research* 28/3, 239–265. [https://doi.org/10.1016/0022-3956\(94\)90009-4](https://doi.org/10.1016/0022-3956(94)90009-4).
- Kovács Ilona et al. (2022). „Ultrasonic Bone Age Fractionates Cognitive Abilities in Adolescence”. *Scientific Reports* 12/1, 5311. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09329-z>.

- Lewis, David A. (2009). „Neuroplasticity of Excitatory and Inhibitory Cortical Circuits in Schizophrenia”. *Dialogues in Clinical Neuroscience* 11/3, 269–280. <https://doi.org/10.31887/DCNS.2009.11.3/dalewis>.
- Morin, Amy (2024). „Is Your Teen Getting Enough Exercise?” *Verywell Health* (letöltés 2024. okt. 13.).
- Reiss, Allan L. et al. (1996). „Brain Development, Gender and IQ in Children: A Volumetric Imaging Study”. *Brain* 119/5, 1763–1774. <https://doi.org/10.1093/brain/119.5.1763>.
- Shah, Bhumika – Sucher, Kathryn – Hollenbeck, Claire B. (2006). „Comparison of Ideal Body Weight Equations and Published Height-Weight Tables with Body Mass Index Tables for Healthy Adults in the United States”. *Nutrition in Clinical Practice* 21/3, 312–319. <https://doi.org/10.1177/0115426506021003312>.
- Szakács, Hanna et al. (2024). „Navigating Pubertal Goldilocks: The Optimal Pace for Hierarchical Brain Organization”. *Advanced Science* 11/21, 2308364. <https://doi.org/10.1002/advs.202308364>.
- Walker, Inna V. et al. (2020). „Methods for Determining Pubertal Status in Research Studies: Literature Review and Opinions of Experts and Adolescents”. *Journal of Developmental Origins of Health and Disease* 11/2, 168–187. <https://doi.org/10.1017/S2040174419000254>.
- Warren, Michelle P. – Stiehl, Amanda L. (1999). „Exercise and Female Adolescents: Effects on the Reproductive and Skeletal Systems”. *Journal of the American Medical Women's Association* (1972) 54/3, 115–120, 138.