

TEMATIKUS ÖSSZEÁLLÍTÁS

Biológiai érettség és fejlődési utak serdülőkorban: a jövő generációjának formálódása

Biological Maturity and Developmental Pathways in Adolescence: Shaping the Future Generation

Vendégszerkesztő: Kovács Ilona

Bevezetés

Introduction

Kovács Ilona

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

Absztrakt

A serdülőkori fejlődésről szóló tematikus tanulmánygyűjtemény bemutatja, hogy az agy strukturális és funkcionális változásai miként kapcsolódnak a biológiai érés üteméhez. Kiemelkedő szerepet kap az ultrahangos csontkormérés módszere, amely lehetővé teszi az életkortól független érettségi szint meghatározását. A kutatások három érettségi csoport összehasonlításán keresztül vizsgálják a kognitív, motoros, érzelmi és idegrendszeri fejlődést, különös tekintettel a pubertás akcelerációjára és a környezeti hatásokra. Az eredmények rávilágítanak arra, hogy a biológiai érettség pontos ismerete kulcsfontosságú a fejlődés megértéséhez és az egészséges felnőtté válás támogatásához.

Abstract

This thematic collection of studies focuses on adolescent development, highlighting how structural and functional brain changes are linked to the pace of biological maturation. A key methodological advance is the use of ultrasound bone age assessment, which allows the level of maturity to be determined independently of chronological age. The studies compare three groups of adolescents at different stages of maturity, investigating cognitive, motor, emotional, and neural development. There is a particular focus on the impact of accelerated puberty and environmental influences. The findings emphasize the importance of understanding biological maturity in supporting healthy development and transitions into adulthood.

Kulcsszavak: serdülőkori fejlődés, biológiai érés, csontkormérés, agyi plaszticitás, cirkadián ritmus

Keywords: adolescent development, biological maturation, bone age assessment, brain plasticity, circadian rhythm

Az ezredforduló óta forradalmi változások történtek az agy fejlődésének megértésében, aminek meghatározó szerepének kell lennie abban, hogyan tekintünk a gyermekek és serdülők fejlődési szakaszaira, hogyan tervezzük el az oktatási programokat, mit teszünk egészségük érdekében, és milyen politikai intézkedésekkel támogatjuk őket. A legjelentősebb idegtudományi előrelépés az agy alkalmazkodóképességével, tanulási kapacitásával, azaz plaszticitásával kapcsolatos (Sydnor et al. 2023). A fejlődés során megmutatkozó fokozott plaszticitásnak jellegzetes „ablakai” vannak: az első ablak a kisgyermekkor végéig, az iskolakezdésig tart; a következő a serdülőkor kezdetéig, a középiskolába lépésig; végül a felnőttre jellemző, nagyon hatékony, de kevésbé plasztikus agyműködés valamikor a húszas évekre alakul ki a serdülés folyamatában. A fejlődési plaszticitás ablakainak hosszát viselkedésbeli, fiziológiai, anatómiai, illetve molekuláris szintű jellemzők egyéni eltérései határozzák meg. Ezek az egyéni eltérések adják egyben az evolúció, azaz a hosszú távú fejlődés legfontosabb hajtóerejét az adott populáció esetén, mivel a változó környezeti feltételekhez kifejezetten egy minél változatosabb populáció tud jól alkalmazkodni. Éppen ezért lényeges az egyéni eltérések felismerése, azok rugalmas figyelembevételével, az átlagostól eltérő fejlődésük kibontakozásának biztosítása.

A serdülőkor az emberi fejlődés alapvető szakasza, szexuális éréshöz és testi növekedéshez vezet, miközben együtt jár az agy jelentős szerkezeti változásaival (Bethlehem et al. 2022), az intellektuális, szociális és érzelmi területeken történő fejlődéssel, valamint meghatározza a felnőttkori mentális egészséget. A serdülőkor kezdetének, a pubertásnak az időpontja széles tartományban változhat, és mivel az agy felnőttre jellemző strukturális átalakulásának kezdete a pubertáshoz kötődik, ennek nagy jelentősége van. Az érési folyamatok pontos és objektív leírása azért kiemelten fontos, mert lehetővé teszi az egészséges fejlődést szolgáló oktatási/nevelési stratégiák, illetve megfelelő korai intervenciók kifejlesztését.

Ugyanakkor azt is érdemes figyelembe venni, hogy a pubertás időpontja nemcsak egyéni eltéréseket, de időszakos változásokat, ún. szekuláris trendeket is mutat. Az ipari forradalom kezdete óta, pontosan az iparosodás hatására a pubertás mintegy öt évvel tolódott korábbra a fejlett társadalmakban, és ez a trend napjainkban is folytatódik (Parent et al. 2003; lásd még Gerván Patrícia és Meskó Zita tanulmányát ebben a tematikus összeállításban). A serdülőkori fejlődés felgyorsulása egyre növekvő aggodalmat vált ki a Covid19-járvány és az ehhez kapcsolódó megnövekedett nagyon korai éréssel (nyolcéves kor előtti pubertással) orvoshoz forduló gyermekek esetén (Street et al. 2021). Bár a felgyorsult érés nemcsak a szélsőséges eseteket érintheti, hanem egy egész generációt, egyelőre sem az okaival, sem a következményeivel nem vagyunk tisztában. A túl korai érés a felnőtt magasság csökkenése, pszichoszociális kihívások és későbbi egészségügyi problémák kockázatával járhat. Egyelőre nem tudjuk, hogy ehhez az akcelerációhoz miként fog alkalmazkodni az emberiség. Fennáll annak a lehetősége is, hogy a fejlődési folyamatok rugalmassága nem teljes mértékben kompenzálja a jelenleg is gyorsuló trendeket. A Covid19 utáni időszakban kulcsfontosságú azonosítani

és kezelni az esetleges későbbi években jelentkező hasonló válságokat. Fel kell készülnünk arra, hogy gondoskodást és támogatást nyújtsunk a jövő generációinak, amihez alaposabb megértésre van szükség a felgyorsult fejlődési idővonalakkal kapcsolatban. Egyre valószínűbbnek tűnik, hogy ugyanazok az antropogén tényezők, amelyek hozzájárulnak a globális klímaváltozáshoz, az emberi fejlődésre is hatással vannak.

Ez a tematikus összeállítás a serdülőkori fejlődés vizsgálatán belül a különböző pszichológiai funkciók és a serdülő agy érésfüggő változásait mutatja be. A HUN-REN-ELTE-PPKE Serdülőkori Fejlődés Kutatócsoport munkatársai nemrégiben vezették be a serdülőkor kutatásába az ultrahangos csontkormérést, amely a korábbiaknál jóval pontosabb és objektívabb becslést ad a kamaszok érettségéről. A viselkedéses és agyi fejlettséget vizsgáló munkákban három eltérő érettségű serdülőcsoporton van a fókusz. Az átlagos fejlettségű résztvevők csontkora megfelel az életkoruknak, a decelerált csoportban lévőké alacsonyabb, az akcelerált csoport tagjainak csontkora magasabb annál. Cikksorozatunk azt vizsgálja, hogy az eltérő érettségű csoportok kognitív képességei, mozgásos és érzelmi-szociális fejlődése, agykérgi szerveződése mutat-e eltéréseket, valamint kitér a serdülők biológiai órájának tipikus eltolódására.

Annak ellenére, hogy a pubertás kezdetének időpontja mind az agyi, mind a viselkedéses fejlődési pályákat meghatározza, a terület eddigi kutatásai során a szakemberek kevésbé kontrollálták ezt a változót. A biológiai érettség megállapítására korábban alkalmazott módszerek elavultak, az életkor és a biológiai kor szétválasztása eddig nem történt meg hatékonyan. Egy serdülő fejlettségi szintjét leginkább a másodlagos nemi jegyek vizuális felmérése alapján állapították meg, ami nemcsak nagyon szubjektív és pontatlan, de a vizsgált személy számára is kellemetlen lehet. Modern technikai eszközökkel azonban többféle lehetőség is adódik a biológiai kor megállapítására, amint azt Utczás Katinka és Tróznai Zsófia bemutatják az első tanulmányban, kiemelt hangsúlyt helyezve a csontkormérés módszerére.

Oláh Gyöngyi, Gerván Patrícia és Kovács Kristóf a második tanulmányban meggyőzően mutatják be, hogy a serdülők kognitív képességeinek szintje nemcsak életkorukkal, hanem az ultrahangos csontkormérés segítségével megállapítható biológiai korukkal is összefügg (Kovács et al. 2022; Gerván et al. 2022). Ezek az eredmények egyértelműen jelzik azt, hogy a csontkor a serdülőkori fejlődés ígéretes prediktív változója lehet a terület jövőbeli kutatásai számára. Hazai és nemzetközi viszonylatban is ez az első olyan projekt, amely világosan szétválasztja az ember kamaszkori fejlődésének biológiai és tapasztalatfüggő elemeit, ezáltal lehetővé teszi a kamaszkori fejlődéssel kapcsolatos kérdések pontosabb megválaszolását.

A harmadik tanulmányban Berencsi Andrea és Fehér Lili Julia mutatják be a finommozgások érés- és tapasztalatfüggő fejlődésének jellegzetességeit. A kutatócsoport eredményei szerint a csontkor a komplex, szekvenciális ujjmozgásokat igénylő feladatban nyújtott teljesítményt határozza meg; ezzel szemben az életkor egyértelműen az egyszerű mozgási sebességgel van összefüggésben (Berencsi et al. 2022; Berencsi

et al. 2024). Ez azt jelenti, hogy a mozgásirányító agykérgi területek által mediált komplex feladatban fontos szerepe van a pubertáshoz kötődő agykérgi strukturális átalakulásnak, míg a perifériás idegpályák mielinizációjához kötődő mozgási sebesség egy előre programozott időrend szerint fejlődik. Hangszeres zenei tapasztalat esetén pedig olyan erős tapasztalati hatásról beszélhetünk, amely felülírhatja ezeket a hatásokat (Berencsi et al. 2022).

A serdülőkori érés felgyorsulásával és ennek az érzelmi fejlődésre tett hatásával foglalkozik a negyedik tanulmány Gerván Patrícia és Meskó Zita megfogalmazásában. Beszámolnak a Covid19-pandémia hatásának online kérdőíves vizsgálatáról, amely megmutatta a fiúk és lányok érzelmi sérülékenységének időbeli eltéréseit, és ezek összefüggését a szocioökonómiai státusszal (Gerván et al. 2022). Az agy kamaszkori fokozott sérülékenysége miatt számos pszichiátriai zavar köthető a gyermekkorból a felnőttkorba való átmenethez. Azzal, hogy ezt az érzékeny periódust időben pontosan meg tudjuk határozni, hozzájárulunk a betegségek megértéséhez, megelőzéséhez és kezeléséhez is. Ezen túl a tanulmány részletesen foglalkozik a pubertás kezdetével kapcsolatos szekuláris trendekkel, valamint az akceleráció és az érzelemszabályozás összefüggéseivel is.

Az alvás-ébrenlét ritmus serdülőkori megváltozásával és annak következményeivel foglalkozik az ötödik mű, Bocskai Gábor és Gombos Ferenc tanulmánya. Ezzel kapcsolatban fontos tudni, hogy a civilizáció előretörésével egyes alapvető emberi viselkedési mintázatok jelentősen megváltoztak. Például a napvégi tevékenységek köre kiszélesedett, a képernyő előtt töltött idő megnövekedett, általánosságban későbbre tolódott az alvásidő. Kialakultak egyben a modern kronotípusok, az egyénre jellemző alvás-ébrenlét ciklus, azaz a cirkadián ritmus egyéni változatai. Az „éjszakai baglyok” vagy „pacsirták” olyan természetes kronotípusváltozatok, amelyeknek egy belső óra diktálja a különböző aktivitások vagy a pihenés időzítését. A cirkadián ritmusnak azonban nemcsak az egyéni, de a fejlődésbeli, életkori csoportok szerinti eltérései is figyelemre méltóak. Minden szülő tudja, hogy a gyermekek leginkább pacsirták, ami azonban 14 éves kor körül jelentős mértékben megváltozik, és a kamaszok esti természetes lefekvési ideje legalább két órával kitolódik a gyermekekéhez képest (Randler–Faßl–Kalb 2017). Ez az „éjszakai bagoly”-időszak általában 19 éves korig tart, és szinte minden serdülőre jellemző. Amennyiben az iskolakezdés időpontja nem alkalmazkodik a serdülők cirkadián eltolódásához, az alvásidő jelentős rövidülésével számolhatunk a 14–19 éves korosztályban, ami pedig nemcsak egészségügyi kockázatokhoz, de a kockázatvállaló viselkedés fokozódásához (például szerhasználat, korai és kockázatos szexuális viselkedés), a tanulási képességek romlásához és mentális zavarokhoz is vezethet (Roberts–Duong 2016).

A hatodik tanulmányban Szakács Hanna, Gombos Ferenc és Kovács Ilona arról számolnak be, hogy az agy hierarchikus hálózatainak fejlődése szempontjából létezik egy olyan optimális zóna, melyben a fejlődés üteme sem nem túl gyors, sem nem túl lassú (Szakács et al. 2024). Az agyi hálózat fejlődését vizsgáló kutatásban is

az említett három eltérő érettségű serdülőcsoport vizsgálata zajlott. Az agyi fejlődést nagy felbontású nyugalmi állapotú elektroencefalográfiával követték, ami az agy alapállapotú hálózatát regisztrálja. Az alapállapotú hálózat különösen akkor aktív, amikor kevés inger éri az agyat, és nincs meghatározott cselekvési cél. Ez a fajta ingerfüggetlen aktivitás rendkívül fontos a környezethez való alkalmazkodásban, annak interpretálásában, előrejelzésében. Az alapállapotú hálózat szerveztségének mértékét a termodinamikából kölcsönzött elméleti keretben elemezték. Az eredmények alapján a hálózat hierarchiájának fejlődése szempontjából az érettség mértéke meghatározó. Meglepő módon azonban ez nem egyenesen arányos az érettség mértékével. A legfejlettebb hierarchia az átlagos érettségű csoportnál volt megfigyelhető, ahol a csontkor egybeesik az életkorral. Az átlagos érettségű csoport tagjainál a pubertás kezdete és maga az érési folyamat sem nem lassú, sem nem gyors, hanem az ún. szekuláris trendeknek megfelelő átlagsebességgel zajlik, és itt tűnik a legoptimálisabbnak az agykérgi hierarchikus szerveződés.

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 Bölcsészeti- és Társadalomtudományi Karának PPKE-BTK-KUT-23-1 számú kutatócsoportja támogatta.

Irodalomjegyzék

- Berencsi, Andrea et al. (2022). „Musical Training Improves Fine Motor Function in Adolescents”. *Trends in Neuroscience and Education* 27, 100176. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2022.100176>.
- Berencsi, Andrea et al. (2024). „The Contributions of Biological Maturity and Experience to Fine Motor Development in Adolescence”. *BioRxiv – The Preprint Server for Biology*. <https://doi.org/10.1101/2024.09.02.610814>.
- Bethlehem, Richard A. I. et al. (2022). „Brain Charts for the Human Lifespan”. *Nature* 604, 525–533. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04554-y>.
- Gerván, Patrícia et al. (2022). „Maturation-Dependent Vulnerability of Emotion Regulation as a Response to COVID-19 Related Stress in Adolescents”. *Journal of Pediatric Nursing* 67, 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.pedn.2022.08.017>.
- 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>.
- Parent, Anne-Simone et al. (2003). „The Timing of Normal Puberty and the Age Limits of Sexual Precocity: Variations Around the World, Secular Trends, and Changes After Migration”. *Endocrine Reviews* 24/5, 668–693. <https://doi.org/10.1210/er.2002-0019>.
- Randler, Christoph – Faßl, Corina – Kalb, Nadine (2017). „From Lark to Owl: Developmental Changes in Morningness-Eveningness from Newborns to Early Adulthood”. *Scientific Reports* 7, 45874. <https://doi.org/10.1038/srep45874>.
- Roberts, Robert E. – Duong, Hao T. (2016). „Is There an Association Between Short Sleep Duration and Adolescent Anxiety Disorders?” *Sleep Medicine* 30, 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2016.02.007>.

- Street, Maria E. et al. (2021). „Precocious Puberty and Covid-19 into Perspective: Potential Increased Frequency, Possible Causes, and a Potential Emergency to Be Addressed”. *Frontiers in Pediatrics, Section Pediatric Endocrinology* 9. <https://doi.org/10.3389/fped.2021.734899>.
- Sydnor, Valerie J. et al. (2023). „Intrinsic Activity Development Unfolds Along a Sensorimotor-Association Cortical Axis in Youth”. *Nature Neuroscience* 26/4, 638–649. <https://doi.org/10.1038/s41593-023-01282-y>.
- 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>.