

Az autizmus komputációs pszichiátriai megközelítései

PURCSSEL BOGLÁRKA^{1,2}, FARKAS KINGA²

¹ ELTE Bárczi Gusztáv Gyógypedagógiai Kar, Budapest

² Pszichiátriai és Pszichoterápiás Klinika, Semmelweis Egyetem, Budapest

Célkitűzés: Az elmúlt évtizedek komputációs idegtudományi kutatásai egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek a mentális zavarok- és az idegrendszer fejlődési zavarainak patofiziológiai hátterének megértésére. A kutatások célja, hogy feltárják az agyi folyamatok és a viselkedési eltérések közötti összefüggéseket, különös figyelmet fordítva a prediktív kódolás szerepére. E megközelítés révén az autizmus spektrum zavar neurobiológiai alapjai új kontextusba helyezhetőek. A dolgozat célja, hogy feltárja az autizmussal élő egyének világról alkotott reprezentációinak (priorok) kialakításában tapasztalható eltéréseit, valamint az ezekhez kapcsolódó neurobiológiai és kognitív mechanizmusokat. **Módszerek:** A dolgozat a prediktív kódolás elméletének megértése érdekében a releváns szakirodalom szisztematikus áttekintésére támaszkodik. Az autizmus komputációs idegtudományi megközelítésben jelenleg három domináns hipotézis uralkodik: a szenzoros precízió hipotézise, a gyenge prior hipotézis, és a rugalmatlan priorok elmélete. A dolgozat a három megközelítés tükrében elemzi a releváns kutatási eredményeket. A szakirodalmi feldolgozás során kiemelt figyelmet szenteltünk a priorok kialakításával kapcsolatos megállapítások vizsgálatára. **Eredmények:** A tanulmányok áttekintése alapján három fő területen különböző típusú eltérések azonosíthatóak. Elsőként a szenzoros precízió (feldolgozás pontossága) eltérését vizsgáljuk, mely autizmusban a perceptuális információk feldolgozásának sajátos jellemzőit tükrözi. Ezt követően a gyenge prior hipotézisre vonatkozó eredményeket tekintjük át, azaz amikor a korábbi tapasztalatok nem képesek érdemben befolyásolni az új információk feldolgozását, a releváns információk integrálását és az előzetes tudás hatékony alkalmazását korlátozzák. Végül azokat az eredményeket tárgyaljuk, melyek arra utalnak, hogy a rugalmatlan priorok frissítése és alakítása terén tapasztalt nehézségek hozzájárulnak az autisták környezeti változásokra adott szokatlan reakcióinak kialakításához. **Következtetések:** A dolgozat rávilágít arra, hogy a prediktív képességek fejlődése a neurotipikus és autista populációban eltérést mutat. Ugyanakkor, további kutatások szükségesek a prediktív képességek fejlődésének mélyebb megértéséhez, a különböző életkorban megfigyelhető eltérések összehasonlító vizsgálata segítségével.

(Neuropsychopharmacol Hung 2025; 27(2): 121–133)

Kulcsszavak: autizmus, prediktív kódolás, bayesi következtetés

BEVEZETÉS

A pszichiátria különleges orvosi terület, amely esetében a diagnosztikus folyamat nehezen megfogható, közvetett jelenségekkel dolgozik. A DSM (*Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders*, jelenleg érvényben: DSM-5-TR, APA, 2022) felépítéséből következően nagyfokú komorbiditás és heterogén betegcsoportok állnak elő, amely kérdéses, mennyiben tükrözik az egyes betegségek eloszlásának jellemzőit. Újabban alternatív osztályozási rendszerek kidolgozása indult el (Research Domain Criteria [RDoC], Hierarchical Taxonomy of Psychopathology [HiTOP] és a hálózati szempontú megközelítés [network approach] [Hitchcock et al., 2022]), amelyek a jelenlegi diagnosztikus gyakorlat fejlesztése felé mutatnak, attól transzdiagnosztikus és dimenzionális megközelítés irányába elmozdulva, ahol a patológiás és normál működés közös spektrumra kerül.

A komputációs idegtudomány az agyat komputációs modellekkel vizsgálja és arra a feltételezésre épül, hogy az agy működésének létezik olyan magas szintű leírása, ahol „hardver-független” működési elvek emelhetők ki (Turing, 1950). Az idegtudományi kutatás számára ezt Marr fogalmazta meg (1982), az agyműködés leírásának problémáját három szintre bontotta. A komputációs szint funkciója az agy által végzett feladat feltárása a bemeneti és kimeneti változók megadásával, az algoritmikus szinten történik a megoldáshoz szükséges számítások végrehajtása, illetve reprezentációk kialakítása, míg az implementációs szinten zajlik a konkrét fiziológiai feladatok kijelölése, amelyek ezen számítások elvégzésére alkalmasak. A top-down komputációs megközelítés csak abban az esetben lehet eredményes, ha folyamatos empirikus kutatásokkal kapcsoljuk össze (Buzsáki, 2006), amely a következőképpen folyhat le: 1. komputációs modell megalkotása, 2. modell tesztelésére alkalmas kísérlet tervezése, 3. kísérleti adatok szimulációja a modell segítségével, végül 4. a valódi adatok összehasonlítása a szimulációból nyert adatokkal (Wilson & Collins, 2019).

A komputációs modellek kölcsönözhetnek algoritmusokat a statisztika, kibernetika, és egyéb természettudományok területéről. Ezen modellek közül az utóbbi években egyre növekvő népszerűsége tett szert a *bayesi agy hipotézis*, amely az agy fontos feladatában, a külvilág statisztikai jellemzőinek megismerésében és felhasználásában a bayesi statisztika alkalmazását feltételezi, ahol a szubjektív valószínűség kiszámításában egyaránt támaszkodunk a prior (múltbeli információkon alapuló) eloszlásra és az éppen

beérkező adatokra (likelihood) a külvilág észlelése során (a becslés posterior eloszlásként jelenik meg). A múltbeli és friss információk súlyozását a precíziónak nevezett tényező határozza meg, az egyes információforrások megbízhatóságát tükrözve. A komputációs modellek pszichiátria területén történő alkalmazási lehetőségeiről Pálffy és munkatársai írtak korábban magyar nyelven (Pálffy, 2022).

Az autizmus bayesi keretben való értelmezését Pellicano & Burr (2012) vetették fel, ezt követve Friston és munkatársai (2012) írták le az autizmus prediktív kódolás alapján való értelmezését. Az autizmusra jellemző hiper- illetve hiposzenzitivitás, azaz a percepció működés megváltozásából fakadó tüneteket a prediktív képességek megváltozásából vezették le. Ez később számos különböző hipotézis születéséhez vezetett, amelyek a prediktív működések különböző elemeinek megváltozását vetették fel, emellett pedig több publikáció is született, amely az autizmus tüneteiből visszafelé következtetve, azok lehetséges kialakulási folyamatát mutatja be a prediktív kódolás szemszögéből (pl. a „fészkelődés” levezetése Perikkad és Hohwy (2020) cikkében).

CÉLKITŰZÉS

Az autizmus prediktív kódolás elméletét áttekintő legnagyobb ívű szakirodalmi cikk Chrysaitis és Series (2023) szisztematikus összefoglalója, amely a „felborult prior-likelihood egyensúly” hipotézisét vizsgálta 83 tanulmány alapján. A cikkek három fő csoportba rendeződtek: strukturális vagy kontextuális priorok, illetve adaptációs eltérések vizsgálata szerint. Ezen kívül különválasztották a szociális és nem szociális priorokat, valamint az explicit és implicit kontextuális priorok kialakulását. Az eredmények azonban vegyesek voltak, különösen az implicit priorok esetében, ahol a kutatások fele szignifikáns eltéréseket talált, míg a másik fele nem (Chrysaitis és Series, 2023). Az ellentmondásos eredmények arra utalnak, hogy a prediktív kódolás eltéréseit ez a felosztás nem képes megragadni maradéktalanul.

Az autizmus spektrumzavar (ASD) komputációs pszichiátriai megközelítése arra épít, hogy az autista személyek eltérő módon alakítják ki a világról alkotott reprezentációkat (priorokat). A dolgozat célja a három domináns hipotézis – 1) Van de Cruys és mtsai (2014) szenzoros precízió hipotézise, 2) Pellicano és Burr (2012) gyenge prior hipotézise (1. ábra), és 3) Lieder és mtsai (2019) rugalmatlan priorok elmélete (2. ábra) – értékelése a kapcsolódó kutatások alapján. Cikkünkben a vonatkozó eredményeket ezek mentén

tárgyaljuk, hogy átfogóbb képet kapjunk a prediktív működésről a hipotézisek közötti különbségek vizsgálata segítségével.

MÓDSZEREK

A kéziratban feldolgozásra kerülő tanulmányok három adatbázisban való keresés találataiból kerültek kiválasztásra. A keresést a Web of Science, Scopus, illetve Pubmed weboldalakon végeztük. A keresés során az angol nyelvű közleményekre fókuszáltunk, melyek címükben, absztraktjukban vagy kulcsszavai között tartalmazták az „autism”, illetve a „Bayes” vagy a „predictive coding” kifejezéseket. A keresésben megjelenő cikkek áttekintése után kiválasztásra kerültek azok, amelyek releváns kutatási eredményekről számoltak be, azaz a vizsgálat során prior (valamilyen előzetes elvárás) kialakítását követelték meg a résztvevőktől.

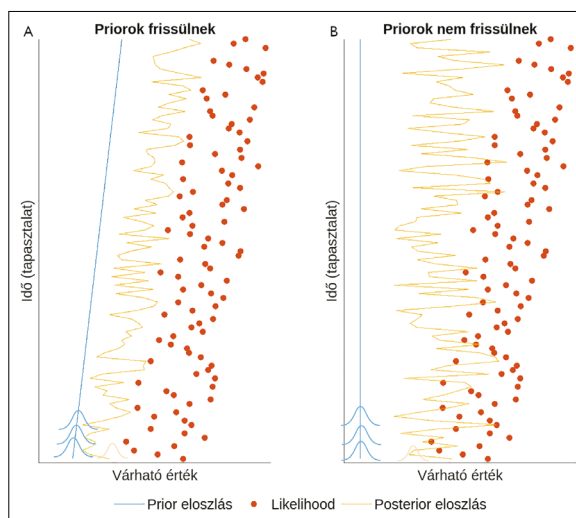
Az eredeti keresés 34 közleményt eredményezett, melyet ezen cikkek referenciáinak áttekintése után további 17 tanulmánnyal egészítettünk ki; a végleges elemzésbe így 51 cikk került be. A publikációk ezután annak megfelelően kerültek elemzésre, hogy melyik hipotézis szempontjából hoznak releváns eredményeket, és a megfelelő részben kerülnek bemutatásra.

A VILÁGRÓL ALKOTOTT REPREZENTÁCIÓK (PRIOROK) KIALAKÍTÁSÁNAK ELTÉRÉSEI AUTIZMUSBAN

Szenzoros precízió eltérése

Az autizmus hátterében álló eltérések közül a prediktív kódolás keretrendszerében elsőként említendő az atipikus szenzoros precízió elmélete. A hipotézis első megfogalmazása Van de Cruys és munkatársai (2014) nevéhez kötődik, és a percepció folyamatában a bottom-up (érzékszervekből, közvetlenül a környezeti ingerekből származó) szignálokhoz rendelt magasabb precízió révén ezek megnövekedett befolyását feltételezik autizmus spektrum zavar esetében. A környezet statisztikai jellemzőit tükröző priorok (elvárások, reprezentációk) kialakítása azért nehezített, mivel túl nagy hangsúly esik a környezet véletlenszerű változásaira, azaz a prediktív működés nem képes elkülöníteni a releváns információt hordozó és az irreleváns, a forrás zajosságából származó predikciós hibát, azokat egyaránt fontos jelként kezelve. A megnövekedett érzékszervi precízitás következtében csökken a korábbi elvárások (priorok) hatása az érzékelés folyamatára,

1. ábra A prediktív kódolás folyamatának sematikus ábrázolása (saját ábra, MatLab R2024b)



a) Perceptuális következtetések során a korábbi tapasztalataink és az aktuálisan megfigyelt információ közösen alakítja az utólagos következtetést.

b) Magas szenzoros precízitás esetén a környezet statisztikai jellemzőit tükröző priorok (elvárások, reprezentációk) kialakítása azért nehezített, mivel túl nagy hangsúly esik a környezet véletlenszerű változásaira.

c) A prior elsajátításának nehézsége esetén az előzetes elvárások tágabb spektruma (priorok szélesebb eloszlása) miatt nagyobb az egyedi események hatása az aktuális következtetésre

ami a szenzoros ingerek általi elárasztottság tüneteivel (szenzoros túlérzékenység) hozható összefüggésbe (1. ábra).

A fokozott szenzoros precízió hipotézis mellett erős bizonyítékot szolgáltatnak az elméletet agyi képpalkotó- és elektrofiziológiai módszerekkel tesztelő vizsgálatok. Thillay és mtsai (2016) EEG vizsgálatukban a predikciós hiba megemelkedett precízióját mutató CNV (contingent negative variation) jelet mértek, amely a célingerre való felkészültséget jelzi. ASD-ben emelkedett CNV-t regisztráltak neurotipikus (NT) résztvevőkhöz képest a bizonytalan, random ingerek bemutatása során. Egy funkcionális mágneses rezonancia képpalkotás (fMRI) vizsgálatban autizmusban a NT résztvevőkhöz képest a putamen aktivitása szorosabban követte a predikciós hiba változásait (Sapey-Triomphe és mtsai, 2023b), valamint a jobb inferior frontális gyrus területén, a prediktív működés egyik feltételezett magas szintű központjában megemelkedett glutamátszintet találtak, ami az excitátoros működés túlsúlyára utal, összhangban a szenzoros precízió hipotézissel.

Zaidel és munkatársai (2015) egy randompontmozgás feladatban szintén a hipotézissel összecszen-

gő eredményre jutottak. Az autista résztvevők teljesítménye az ingerek zajszintjének emelkedésekor nagymértékben romlott a neurotipikus résztvevőkhöz képest, míg a zaj nélküli kondícióban megegyezett azzal. Schneebeli és munkatársai (2022) random pont mozgásos feladatában nem alkalmazott különböző zajszinttel bíró ingereket, így a szenzoros működésben nem is volt kimutatható különbség a csoportok között. Az illúziókra való fogékonyság csökkent mértéke a magasabb AQ pontszámmal mutatott összefüggést Aru és munkatársainak vizsgálatában (2018).

A kéziratban vizsgált cikkekben többször is felbukkant az ASD résztvevők esetében a vizuális modalitás túlsúlya a multiszenzoros, a vizuális és a vestibuláris információk integráció során. Zaidel és munkatársainak (2021), illetve Noel és munkatársai (2022) kutatásában a vizuális információ a vizuális és auditoros inger nagymértékű össze nem illése esetén is befolyásolta az autisták válaszát, míg ez NT résztvevők esetében nem volt megfigyelhető.

Gu és munkatársainak adatai (2018) a figyelmi működés fokozódására utalnak a fájdalomingerek esetében. Allenmark és munkatársainak (2021) szemmozgáskövetéses vizsgálata is a predikciós hiba megemelkedett precízióját igazolta, míg Finnemann és munkatársai (2021) a szenzoros csillapítást (sensory attenuation) mérő feladata során nem volt az ASD és NT résztvevők teljesítménye között kimutatható különbség. A kontrakciós hiba elemzését használó kutatások közül Lieder és munkatársainak kutatása (2019) a korábban, Jaffe-Dax és Eigsti (2020) az adott stimulust közvetlenül megelőző információk csökkent hatását találta, a hipotézist nem támogató eredményre jutva; emellett a szignáldetekciós paradigmát vizsgáló kutatások szintén nem találtak különbséget a diszkriminációs képességben (d' paraméter), amelyet Van de Cruys és munkatársai hipotézisének tesztelésére alkalmaztak (Skewes, 2015; Skewes és Gebauer, 2016; Amoroso és mtsai, 2019).

A hipotézist támogató eredményt hoztak tehát az agyi képpalkotó módszereket használó kutatások, és a szemmozgáskövetés által az implicit következtetést mérő vizsgálatok, ugyanakkor a viselkedéses adatok ellentmondásosak, nem minden esetben erősítették meg a felvetést.

Prior elsajátításának nehézsége

Az autizmus jelenségét a prediktív kódolás keretében magyarázó elméletek közül több is a priorok eltérését emeli ki: Pellicano és Burr (2012) az előzetes elvárások tágabb spektrumát (priorok szélesebb eloszlása)

vázolták fel az autizmussal összefüggő tünetek hátterében; ezt később Friston, Lawson és Frith, (2012) értelmezte a prediktív kódolás szemszögéből (1. ábra). A priorok esetében több irányú eltérés is megjelenik a vizsgált cikkekben a neurotipikus működéshez képest: az elsajátításához szükséges idő (gyorsabb vagy lassabb elsajátítás), vagy annak körülményei is eltérhetnek; ez utóbbi megnyilvánulhat a környezet zajosságában, a szabályosságok explicit vagy implicit jellegében, valamint a célingerek típusának különbségeiben (pl. szociális és nem szociális típusú célinger, különböző modalitásokat célzó ingerek). Az eltérő működés megjelenhet emellett a percepció hierarchia különböző szintjein, így mutathatnak atipikus működést az alacsony szintű, vagy magasabb szintű priorok vonatkozásában is.

A prior elsajátításához szükséges eltérő idő vonatkozását vizsgáló kutatásban a feladatban megfigyelt személy céljának kikövetkeztetéséhez az autistáknak több időre volt szükségük a segítséget nyújtó implicit szabályosságok megtanulására (Ganglmayer és mtsai, 2020).

Számos kutatás a priorok csökkent precíziójára utaló eltérést talált, amely a priorok gyengébb befolyásában és a szenzoros információ erőteljesebb hatásában nyilvánul meg.

A priornak a percepcióra gyakorolt hatása jól mérhető az ún. centrális tendencia megjelenésével; ezt vizsgálva Karaminis és munkatársai az ASD esetében a szélesebb, kevésbé precíz prior eloszlást találtak egy időintervallum reprodukciós feladatban (2016). Jaffe-Dax és Eigsti (2020) auditoros percepciót mérő vizsgálatában az autista résztvevők esetében csökkent mértékben jelent meg a centrális tendencia neurotipikusokhoz képest. A auditoros lokalizáció terén pedig Skewes és Gebauer (2016) a priorok kialakításának nehézségéből fakadó szuboptimális teljesítményt írták le az ASD csoportban.

A vizuális modalitás vizsgálata során forgásirány becslésekor az ASD csoportban a priorok gyengébb hatását találták neurotipikusokhoz képest (Sapey-Triomphe és mtsai, 2022); hasonló tendencia mutatkozott vizuális feladatban magas és alacsony AQ pontszámmal rendelkező résztvevők között Karvelis és munkatársainak (2018) vizsgálatában.

A priorok működésének vizsgálatát teszik lehetővé azok a feladatok, ahol kísérlet résztvevői a jelzőinger alapján egy előzetes elképzelést, prior hiedelmet alakítanak ki a várható ingerről, amely kongruens kondícióban a teljesítmény javulását (gyorsabb, és/vagy pontosabb válaszadás) vagy a válasznak a prior hiedelem felé való eltolódását váltja ki. Pontok moz-

gási irányának érzékelését értékelő kutatásban ez a hatás jelentősen gyengébb volt az autista résztvevők teljesítményében (Schneebeli és mtsai, 2022). Egy multiszenzoros feladatot alkalmazó EEG vizsgálat szintén különbséget talált az ASD és NT csoport anticipációs folyamataiban (Beker és mtsai, 2021).

Greene és munkatársainak (2019) szemmozgáskövetéses vizsgálatában ASD résztvevők többet néztek a jelzőingerrel inkongruens helyre és kevesebbet a előrejelzéssel kongruens helyre az NT csoporthoz képest (az elvárásokkal ellentétes módon). Ez az eltérő preferencia vizsgálati csoporttól függetlenül is összefüggést mutatott több ASD tünettől.

Noel és munkatársai vizsgálatában (2022) azt találták, hogy az ASD csoportban a különböző ingerek közös okra való visszavezethetőségét képviselő prior (vagyis előzetes feltételezés) erősebben hatott a perceptuális (érzékelési) teljesítményre. Ez azt eredményezte, hogy ezek a személyek hajlamosabbak voltak arra, hogy a különböző ingereket egy közös okokkal magyarázzák. Azaz, az autisták hajlamosak voltak azt feltételezni, hogy a különböző ingerek egyazon okból származnak, és ez befolyásolta az érzékelési teljesítményüket.

Az előzőekkel ellentétes irányú eredmény, hogy az ASD résztvevők stabil tanulási környezetben egy taktilis diszkriminációs feladat során precízebb priort tanultak meg a NT résztvevőkhöz képest (Sapey-Triomphe és mtsai, 2023a)

A priorok elsajátításának sikerességében több kutatás is talált különbséget az információ implicit és explicit bemutatása között, rendszerint az explicit bemutatás hatására javuló teljesítményt találtak.

Az implicit módon jelen levő statisztikai összefüggés megtanulása és a prior eloszlás hatása kisebb mértékű volt az ASD résztvevőknél a neurotipikusokhoz képest egy vizuális feladatban; viszont amikor explicit módon kérték meg a résztvevőket a szabály figyelésére, az ASD csoport is elsajátította azt (Sapey-Triomphe, 2017).

Amoruso és mtsai (2019) kutatásukban azt találták, hogy a mozgás szándékára való következtetésben az ASD és a NT gyerekek a mozgás kinematikai (fizikai) jellemzőinek figyelembevételében nem mutattak különbséget, viszont a kontextuális jelzőingert csak a NT gyerekek voltak képesek hasznosítani. Hudson és munkatársainak kutatásában (2021) a szociális helyzetben a cselekvő szándékával kapcsolatban az ASD résztvevők ki tudtak alakítani elvárásokat a NT résztvevőkhöz hasonlóan, amennyiben explicit információkat kaptak arról; az implicit jelzőingereket azonban nem tudták figyelembe venni.

Maurer és munkatársai vizsgálatában az ASD résztvevők az explicit információ alapján a neurotipikusokhoz hasonlóan kialakították a szociális priort (társas helyzetre vonatkozó előzetes elvárást), és a kísérlet során a bizalmi játék résztvevőinek kooperatív viselkedése alapján az implicit módon szerzett információkat felhasználva képesek is voltak ezt reciprocitási priorként regisztrálni, ám azok nem tudták megfordítani az explicit információ hatását (Maurer és mtsai, 2018), amely összecseng azzal a megfigyeléssel, hogy a mindennapi életben is nehezebben érzékelik a kapcsolatok minőségének megváltozását.

Míg Bianco és munkatársai (2022) az explicit információ intakt használatának képességét találta ASD résztvevőknél, Chambon és munkatársainak (2017) kutatásában a priorok használatának specifikus sérülése mutatkozott a szociális ingerek területén, amelyet azonban megfigyeléses tanulás révén képesek voltak kompenzálni.

A priorok eltérő működésére utal az a jelenség is, amikor a priornak ellentmondó ingerek a neurotipikusokhoz képest kisebb „meglepetést” jelentenek az ASD résztvevők számára. A Mismatch Negativity (MMN) olyan eseményhez kötött potenciál, amely egy ritka, a többi ingertől elütő inger észlelése után mérhető, az ingert követő meglepetés elektrofiziológiai korrelátuma. A MMN lehetővé teszi a priorok hatásának mérését, hiszen ezek az elvárások módosíthatják a stimulus meglepetés-értékét. Ezt a módszert alkalmazták Goris és munkatársai (2018) EEG vizsgálatában, ahol az elvárásoktól eltérő ingerekre adott reakciót egy hierarchikus auditoros oddball feladatban mérték a MMN jel segítségével. A MMN kisebb mértékben módosult a kontextus hatására az ASD csoportban. Ugyanakkor, míg a kontextus alapján kialakított elvárások hatásában eltérés mutatkozott, a tudatos elvárást jelölő P3b szignál nem jelzett különbséget a két csoport között.

Grisoni és munkatársai cselekvéshez kapcsolódó, természeti és mesterségesen létrehozott egyszerű hangok (szemben a környezetünkben előforduló komplex hangokkal) szemantikus előfeszítő hatását és ennek a késői MMN válasza gyakorolt hatását vizsgálták. A szemantikus előfeszítés nem jelent meg természeti vagy egyszerű hang esetében, de olyan hangok esetében igen, amelyek ugyanahhoz a testrésztől kötődtek, amelyre az őket követő szó utalt (pl. füttyülés hang a beszélő szó előtt). Ezen előfeszítő hangok után ugyanis szignifikánsan alacsonyabb MMN válasz követte a szó bemutatását, mint amikor az előfeszítő hang más testrésztől kötődött (pl. taps hang a beszélő szó előtt).

Az ASD csoport az eredmények tanúsága szerint gyengébb testrész-függő priort alakított ki, így a NT csoporttal szemben nem volt különbség a testrészhez kapcsolódó és nem a testrészhez kapcsolódó hangokat követő szavak után megjelenő MMN válaszokban.

Egy évvel később Knight és munkatársai azonban nem találtak eltérő működést kutatásukban az MMN mérésekor: minél kiszámíthatóbb lett a környezet, annál nagyobb volt a meglepetés (MMN) a deviáns inger megjelenésekor mind a neurotipikus, mind az ASD csoportban (Knight és mtsai, 2020).

Két további agyi képalkotó vizsgálatban is találtak azonban különbségeket a várt illetve meglepő ingerekre való idegi reakció tekintetében: egy fMRI vizsgálatban a meglepő ingerpárokban mutatkozott eltérés a V1 aktivációjában (Utzerath és mtsai, 2018), egy EEG kutatásban pedig egy vizuális célingerdetekciós feladat során az előrejelzett ingerek esetében nem volt különbség a csoportok között, random, nem bejósolható ingereket az ASD résztvevők gyorsabban vettek észre a neurotipikusokhoz képest (Thillay és mtsai, 2016).

Az előzetes reprezentációk, elvárások, priorok az optimális percepció működés fontos elemei. Az autizmushoz köthető eltéréseket érintő hipotézisek a prediktív kódolás keretrendszerében a priorok területáltalános eltéréseit teszik fel, amely bizonyos értelmezések szerint az autizmus központi okaként funkcionálhat, de a kevésbé ambiciózus értelmezések is az autizmust jellemző tünetek széles skáláját magyarázzák a priorok eltérő működésével. A következőkben viszont olyan kutatások kerülnek felsorolásra, amelyek a prior információra épülő intakt prediktív működésre mutatnak rá.

A Mooney-képek olyan kétértelmű, fekete-fehér képek, amelyeken az alakok vagy tárgyak csak részben felismerhetők. Ehhez szükséges az előzetes információ (prior), amelyet az agy felhasznál a hiányzó részek kitöltéséhez. A priorok elsajátítását két kutatás is vizsgálta Mooney-képek segítségével autisták körében, és a viselkedési adatok mindkét esetben azt mutatták, hogy a prior elsajátítása megtörtént és megfelelő mértékben segíti a kép felismerését (Van de Cruys és mtsai, 2018, Król és Król, 2019).

Karvelis és munkatársai kutatásukat úgy tervezték meg hogy megfelelően tudják mérni a priorok elsajátításának eltéréseit neurotipikus résztvevők esetében egy vizuális statisztikai tanulási feladat segítségével. A résztvevők körében felmérték az autisztikus vonások és a szkizotípiás jegyek mértékét. A kutatásban nem találtak különbséget semelyik kontinuum mentén: a magasabb AQ-sel rendelkező résztvevők ugyanúgy

sajátították el a prior eloszlást mint az alacsonyabb AQ pontszámmal rendelkező résztvevők. Egy további kutatásban különböző mértékben megbízható előrejelző ingereknek a kimenetellel való asszociációjának megtanulására és a feladatban való alkalmazására volt szükség egy statisztikai tanulást mérő feladatban (Ong és Liu, 2022). A kutatásba különböző AQ pontszámmal rendelkező neurotipikus résztvevők kerültek bevonásra, akik az eredmények szerint az AQ pontszámuktól függetlenül képesek voltak megtanulni az előrejelző ingereket a statisztikai szabályosságok alapján. Szintén neurotipikus mintán az autisztikus vonások összefüggését vizsgálta az arcok prediktív feldolgozásával kapcsolatban egy fMRI kutatás, és nem találtak különbséget a magas és alacsony AQ pontszámmal rendelkező résztvevők között (Ewbank és mtsai, 2016). További három kutatás mozgó pontok irányával kapcsolatos prior kialakítását követelte meg a résztvevőktől, amelyekben az ASD csoport a neurotipikusokhoz mérhető teljesítményt mutatott (Retzler és mtsai, 2021; Sapey-Triomphe, 2023b és Sapey-Triomphe és mtsai, 2021).

Két további kutatás mutatott ki intakt prior működést gyerekek esetében: egy vizuális keresési feladatban a felnőttekhez képest kevésbé precíz teljesítményt találtak, ASD diagnózisra tekintet nélkül (Van de Cruys és mtsai, 2021), míg egy magas és alacsony ASD kockázatú gyerekeket bevonó vizsgálatban a gyerekek tanulási módja különbségeket mutatott (az ASD csoport gyorsabban tanulta meg a szabályt), de a prior elsajátításában vagy használatában nem találtak különbséget közöttük (Ward és mtsai, 2021).

Egy további kutatásban taktilis feladat elé állították a résztvevőket, ahol a rezgés frekvenciája alapján kellett az ingereket elkülöníteni; a vizsgálat az autista csoport esetében intakt prior elsajátítási képességeket talált (Sapey-Triomphe és mtsai, 2017).

Rybicki és munkatársainak (2021) a motoros tanulást vizsgáló kísérletében a résztvevőknek mozgások sorrendjét kellett elsajátítani. A tanulás mértékét úgy vizsgálták, hogy a résztvevőknek időnként nem a soronkövetkező, hanem egy „meglepetés” mozgást kellett végrehajtania: az eredmények nem mutattak különbséget a két csoport között.

Egy szintén jutalomfeldolgozásra épülő játékot alkalmazó kutatás során autista és neurotipikus gyerekeket vizsgáltak. Arra voltak kíváncsiak, hogy képesek-e ezek a gyerekek megfelelő prior eloszlást kialakítani (tehát előzetes tapasztalataik alapján megfelelően dönteni) és ennek segítségével kiválasztani az optimális stratégiát a döntési feladatban. A kutatás végül arra a következtetésre jutott, hogy az autista

gyerekek is képesek megtanulni azokat a választási lehetőségeket, amelyek nagyobb jutalommal kecsegtetnek (Manning és mtsai, 2017).

Összességében tehát, számos területen található eltérés a priorok elsajátításában, ez viszont az elemzett cikkek alapján gyakran nem az elsajátításra való képesség hiányában, hanem a folyamat meglássulásában tükröződik. Az a tény, hogy sok kutatás nem talált különbséget a prior elsajátításában, arra utal, hogy ez a késés is csupán bizonyos feltételek esetén jelenik meg.

Priorok frissítése, alakítása

Az előző két szakaszban tárgyalt eltérések a perceptuális következtetések statikus jellegzetességeire vonatkoznak, melyek idővel, a tapasztalatok bővülése révén változhatnak. A priorok frissítésének (updating) eltéréseit illetően Lieder (2019) a folyamat meglássulását (2. ábra), míg Palmer a priorok gyors frissítését veti fel (Palmer és mtsai, 2017).

Lieder és munkatársai kutatásában (Lieder, 2019) a résztvevők egy szeriális diszkrimináció feladatot végeztek, amely során az autista résztvevők válaszait a hosszú távon kialakított eloszlás dominálta a kutatás neurotipikus résztvevőihöz képest; ezzel összhangban Vishne szinkronizációs képességeket mérő kutatásában az ASD csoportot csökkent hibakorrektív ráta jellemezte (Vishne, 2021).

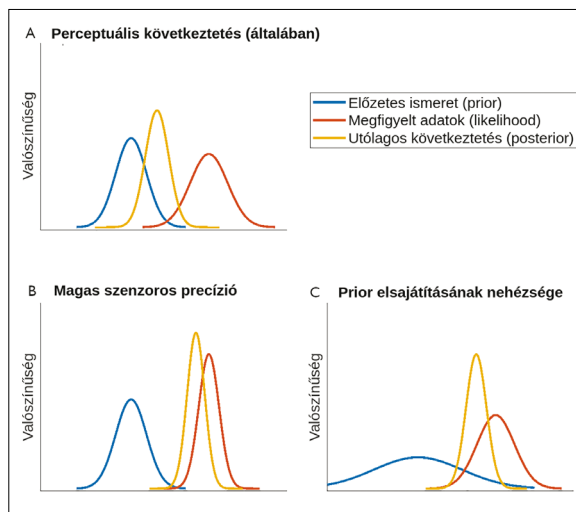
Andermane és munkatársainak kutatásában (2020) az autisztikus vonásokkal negatív összefüggést mutatott a perceptuális váltások mennyisége binokuláris rivalizációs feladatban, amely eredmény a magas szintű reprezentációk kompetíciója szintjén a priorok csökkent mértékű frissítésére utal.

Egy vizuális diszkriminációs feladatot alkalmazó vizsgálat szintén a prior precíziójának rugalmatlanságát találta az ASD csoportnál (Sapey-Triomphe és mtsai, 2021).

Sapey-Triomphe és munkatársai (2022) kutatásában, ahol a résztvevőknek egy hanginger után kellett megjósolni, egy pontpár rákövetkező forgási irányát a hang és az irány közötti összefüggés alapján, szabályváltással tesztelték a prior eloszlás módosításának idői jellemzőit; az ASD résztvevők a szabály változása után kisebb mértékben frissítették priorjukat, amely alátámasztja a hipotézist.

Lacroix (2021) érzelmi váltás feladata során a váltás nehezebb feladatnak bizonyult az ASD résztvevők számára a NT csoporthoz képest, nemi különbségeket is mutatva: női résztvevők az ASD és NT csoportban is jobban teljesítettek az említett feladaton.

2. ábra A priorok frissítésének folyamata változó környezetben a tapasztalatok alapján (saját ábra, MatLab R2024b)



a) Az előzetes elvárások új, a korábbiól következetesen eltérő tapasztalatok esetén fokozatosan formálódnak.

b) Amennyiben az előzetes elvárások rugalmatlanok, nem frissülnek, az attól következetesen eltérő tapasztalatok folyamatosan nagy (predikciós hibát) meglepetést okoznak

Az előbbi eredményeket árnyalja Schneebeli és munkatársainak (2022) vizsgálata, ahol egy pontfelhő mozgásáról kellett döntést hoznia a résztvevőknek: ebben az esetben nem a priorfrissítés folyamata, hanem az informatív kontextuális jelzések figyelembevétele jelentett nehézséget az ASD résztvevőknek számára. Ezzel összecsengően Allenmark és munkatársai (2021) sem találtak késleltetett prior frissítést autizmusban neurotipikusokhoz képest.

Egy további kutatásban az ágencia észlelésének vizsgálata során a magas AQ pontszámú résztvevők könnyebben feladták priorjaikat, azaz érzékenyebben reagáltak a predikciós hiba növekedésére, emellett a volatilitás növekedése is kifejezettebb hatást váltott ki esetükben. Arthur (2023), illetve a szociális jelzőinerek esetében Sevgi kutatása (2020) szintén eltérést talált a kontextuális jelzések priorfrissítésre gyakorolt hatásában, viszont ellenkező irányú eredményekkel: az ASD résztvevők ugyanis mereven ragaszkodtak a kialakított priorhoz, előzetes elvárásaikhoz.

Összességében, az ebben a szakaszban idézett tanulmányok többsége eltérést mutatott az autista és neurotipikus csoportok között: a priorok frissítése, alakítása meglássul, vagy csökken, alátámasztva Lieder és munkatársainak (2019) felvetését.

DISZKUSSZIÓ

A prediktív kódolás keretrendszerén belül számos különböző hipotézis emelkedett ki az évek során azzal a céllal, hogy egy olyan folyamatot emeljen ki, amelynek atipikus működése képes megmagyarázni az autizmus esetében látható eltéréseket. Ezekből a hipotézisekből sokszor egymással jelentősen átfedő előrejelzések következnek, így gyakran nehéz megítélni, mely hipotéziseket támasztja alá egy adott kutatás, ha annak felépítését nem kifejezetten a hipotézisek elkülönítésére tervezték. Emiatt sok tanulmány esetében a prediktív kódolás zavarát látjuk, ám az nem megállapítható, vajon milyen működésbeli eltérés áll a megfigyelt különbségek hátterében (ld. Jaffe-Dax és Eigsti, 2020). Számos vizsgálat alkalmazott azonban olyan módszereket, amelyek alkalmasak voltak a hipotézisek közti különbségtételre, konkrét alátámasztó, vagy az adott hipotézis feltevését kizáró eredményeket hozva. Tanulmányunk hipotézise az volt, hogy az autizmus spektrum zavar jellemző eltéréseit három, a prediktív működés különböző szintjeit magyarázó elmélet összegzése alapján egyértelmű következtetéseket tudunk levonni az egyes teóriák helytállóságáról. A különböző hipotéziseket érintő eredmények azonban nem mutatnak egy irányba: bár rendelkezésre állnak alátámasztó bizonyítékok, ugyanakkor valamennyi elmélet esetében vannak olyan vizsgálatok, amelyek cáfolják az adott hipotézis helyességét. Úgy tűnik tehát, hogy nem lehet egyetlen, területáltalános folyamat sérülésének számlájára írni az autizmussal összefüggő eltéréseket, hanem az agyi működés különböző területein és szintjein bizonyos működések intaktak maradnak, más működéseknél viszont eltéréseket találunk.

Az első hipotézis, amelyet az áttekintésben megvizsgáltunk, Van de Cruys és munkatársainak (2014) hipotézise volt, amely az ASD esetében tapasztalható eltérést a bottom-up irányú predikciós hiba megemelkedett precíziójában látta. Míg sok idézett vizsgálat is a szenzoros precízió megemelkedett mértéke mellett hozott evidenciát, és csak két cikk volt amely explicit módon kiemelte eredményeiknek Van de Cruys hipotézisével való ellentmondását, valójában mindazok a cikkek, amelyek a prediktív működés területén nem találtak különbséget az ASD és NT résztvevők között, implicit módon kizárják a megemelkedett szenzoros precízió jelenlétét (hacsak nem tesszük fel hogy a megemelkedett szenzoros precízió hatását kompenzációs mechanizmus maszkolja el). Ilyen módon a szenzoros precízió hipotézise ellen jelentős mennyiségű bizonyíték szól, és a hipotézis általános érvénye nem tartható.

A második hipotézis Pellicano és Burr tanulmányában került először leírásra, ahol a szerzők a szélesebb eloszlású, és így gyengébb priorokat vetették fel az eltérések okaként: ezt később Friston és munkatársai (2012) értelmezték a prediktív kódolás keretében. A hipotézis mellett számos vizsgált kutatás hozott támogató bizonyítékot, azonban csaknem annyi kutatás talált a neurotipikusokéhoz mérhető prior eloszlást, vagy nem hozott szignifikáns eredményt az autisztikus vonások magas illetve alacsony szintjét mutató neurotipikus csoport között.

Lieder és mtsai (2019) vizsgálatában az ASD résztvevők nem mutatták a prioroknak a tapasztalat alapján való módosítását, amely a neurotipikusoknál megjelent; fontos azonban megjegyezni, hogy több cikk talált ezzel ellenkező hatást. A dolgozatban szereplő cikkek közül csaknem háromszor annyi cikk szól a priorok frissítésének meglapátolása mellett, mint ellene. Az ellentmondó eredmények úgy értelmezhetők, hogy a priorok frissítésére az autista személyek mutathatnak nagyobb vagy kisebb hajlandóságot is, a priortól és a körülményektől függően.

Az idézett források arra utalnak, hogy a prediktív működések eltérései nem területáltalános eltérések. Ez megváltoztatja azt a módot, ahogyan ezeket az eredményeket értelmezni, és a későbbi kutatások tervezésében felhasználni érdemes. Az eredmények sokszínűsége kérdéseket vet fel azzal kapcsolatban, hogy ugyanaz a típusú prior jelenik-e meg a tanulmányokban bemutatott nagyon különböző vizsgálati helyzetekben. A priorok két típusának elkülönítése történt meg a kontextuális és strukturális priorok bemutatásával (Series és Seitz, 2013), de mivel a vizsgálati eredmények ezen felosztás után is nagy heterogenitást mutatnak, ennek megmagyarázásában felvetődik az a lehetőség, hogy a prioroknak számos, különböző típusa létezik. Ebből a feltevésből az következne, hogy az eredmények nem, vagy csak korlátozottan generalizálhatóak egyik feladattípusról a másikra. Az autizmus kérdésének esetében ennek alapján felvetődik annak a lehetősége, hogy az állapot kapcsán nem beszélhetünk általános, minden priortípust érintő sérüléséről; míg bizonyos folyamatok és bizonyos prior típusok sérülnek, eltérően működnek, más működések, más priortípusok épen maradnak -összhangban az áttekintés tanulságaival.

A prediktív kódolás hipotéziseinek finomítása során úgy tűnik, érdemes a kialakítandó priorok több szempont szerinti megfigyelése és osztályozása, mivel ezek a szempontok a különböző kutatásokban relevánsnak bizonyultak. Érdemes így elválasztani, mely modalitást célozzuk meg (pl. Zaidel és munka-

társainak kutatásában (2015) eltérő prior használatot láthatunk a vizuális és a vesztibuláris érzékelés esetében), a perceptuális döntéshozás mely szintjére fókuszálunk (pl. Allenmark (2021) a figyelem irányítását vizsgálja, amely a perceptuális folyamat jóval korábbi szakasza, mint Retzler (2021) által mért perceptuális döntéshozás fázisa), mekkora mennyiségű inger kell figyelembe venni a prior kialakításához (több kutatás is ép prior kialakítást mutat be, amikor egyetlen inger alapján kialakított priorra van szükség a feladatban, míg a hosszabb idő alatt, több inger alapján kialakított priorok gyakran mutatnak eltérést a neurotipikus működéshez képest), explicit vagy implicit módon kell kialakítani a priort (ld. Hudson és mtsainak kutatásában (2021) a szociális helyzetben a cselekvő szándékával kapcsolatban az ASD résztvevők ki tudtak alakítani elvárásokat a NT-hoz hasonlóan, ha explicit információkat kaptak arról; az implicit jelzőingereket azonban nem tudták figyelembe venni). Emellett jó okunk van feltételezni idegrendszeri lokalizáció szerinti, moduláris különbségeket is: itt gondolhatunk a szociális ingerek megkülönböztetett szerepére (ld. Chambon és mtsai, 2017), illetve eltérések mutatkoznak a cselekvéshez kötött ingerek feldolgozásában (ld. Grisoni és mtsai, 2019), vagy akár kifejezetten a biológiai mozgás megfigyelésében és értelmezésében (ld. Hudson és mtsai, 2021). A különböző területeken megfigyelt különbségek fontos segítséget jelenthetnek a pedagógiai munkában, kijelölve azt, hogy mely képességek esetében várhatunk a neurotipikusokhoz hasonló teljesítményt, és mely képességek esetén kell kiemelt figyelmet szentelni az információ egyértelmű és explicit prezentálásának, vagy éppen a tanuláshoz szükséges megnövekedett idő és inger mennyiség biztosításának. Bár a területen befolyásos a prediktív képességek általános sérülésének hipotézise az autizmus esetében, a vonatkozó kutatások egyértelműen ellentmondanak egy ilyen mértékű eltérés létezésének. Sőt, a jelen elemzés során sem emelkedett ki olyan működés, amelynél a képességek szelektív kieséséről beszélhetnénk ennek az állapotnak az esetében; a talált eltérések csupán egyes működések lassabb, rugalmatlanabb jellegéről adnak tanúságot, amely kedvező a pedagógiai és terápiás feladat szempontjából, hiszen így megmarad a hatékony fejlesztés lehetősége, igaz, megváltozott feltételekkel.

A prediktív kódolás modellje pontos idegi leképeződése körül még sok a kérdés áll nyitva: kísérletes körülmények között hogyan lehet megragadni, milyen kutatási irányok alkalmasabbak alátámasztására, milyen egyéb folyamatokkal mutat összefüggést és melyektől független. Az elmélet maga matema-

tikai alapokon nyugszik, amelyre az agy működésének komputációs modellje épül. Annak feltárását, hogy az idegrendszer hogyan valósítja meg ezeket komputációs folyamatokat a különböző feladataival kapcsolatban, nehezíti, hogy gyakran ezeknek a feladatoknak a természete is kevésbé feltárt: míg például elég sokat tudunk a vizuális rendszer működéséről, és a prediktív kódolást végző folyamatok jól leírtak ezen a területen, például a tudat idegi leképeződése (pl. diszkrét és folyamatos modellek) vagy az idő érzékelésének képessége olyan területek, amelyekkel kapcsolatban jelenleg is sok a nyitott kérdés (Herzog és mtsai, 2020). Emellett vannak nyitott kérdések a prediktív kódolás keretrendszerében is, mint például a percepció és a figyelem nem teljes mértékig tisztázott kapcsolata. Miután azonban ezen folyamatok szoros összefüggését mutatták ki Andermane és munkatársai (2020), felvetődik a gondolat, hogy a figyelmi működés eltéréseinek vizsgálata szintén gyümölcsöző terület lehet az autizmus prediktív kódolás keretében való kutatása során.

A dolgozatban elemzett kutatások, miközben az autizmust jellemző eltéréseket a prediktív kódolás értelmezési keretének segítségével próbálják megragadni, számos különböző területet ölelnek fel, amely területek sokszor saját kérdéseikkel küzdenek. Ennek fényében nem meglepő, hogy a kutatások vegyes, nehezen értelmezhető képet rajzolnak ki; ebben olyan látásmód jelenthet előrelépést, amely a különböző kutatásokat saját területük viszonylatában is értelmezi az autizmus kutatás kerete mellett. A kutatások egyszerű összegzése, ahol a különbségeket leíró cikkek a mérleg egyik serpenyőjébe kerülnek, míg a különbségek hiányát igazoló vizsgálatok a másikba, jelenleg nem célszerű, ugyanis jelenleg aktuálisabb azt felmérni, hogy maguk a kutatások vajon milyen mértékben voltak képesek ugyanazon folyamatok a megragadására, vagy inkább különböző folyamatokat mérnek.

A működések modularitása felveti a tünetekkel való összefüggés kérdését. Ide vonatkozóan különösen szép eredményeket hozott Maurer és munkatársainak (2018) kutatása, ahol a prediktív működés különböző aspektusai különböző tüneti dimenziókkal mutattak összefüggést. A lehetséges összefüggést érdemes későbbi publikációkban faktoranalitikus módszerekkel tisztázni. További modularitást érintő kérdés a szociális és a nem szociális ingerek kérdése, mellette és ellene szóló eredményekkel; a szociális terület azonban nem az egyetlen terület, amelyen eltéréseket várhatunk, hiszen Grisoni és munkatársai (2019) a cselekvéssel összefüggő ingerek esetében is kimutatnak specifikus eltérést.

Amint Chrysatis és Series (2023) felvetették cikkükben, minél közvetlenebbül vagyunk képesek mérni a predikció folyamatait, annál jobb; mivel az agyi képpalkotó módszerekkel készített kutatások gyakrabban találnak szignifikáns eltérést mint a viselkedéses vizsgálatok, ennek oka lehet, hogy képesek olyan mélyen rejlő különbségek megragadására, amely a viselkedéses vizsgálatokban rejtve marad. A szemmozgáskövetést alkalmazó, illetve EEG-vel vagy fMRI-vel dolgozó vizsgálatoknak szignifikáns eredmények felé mutató tendenciáját a jelen dolgozat is alátámasztja. Emellett több kutatás is felhozható amellett, hogy ez a különbség a finomabb, mélyebb különbségek kiemelésére való alkalmasságban gyökerezik, ahol az előbbi módszerek egyike felfedhet olyan különbségeket egy feladat végzése során, amely ezzel párhuzamosan a viselkedéses adatokból nem kimutatható. Erre példa Król és Król (2019) vizsgálata, ahol a Mooney-képek felismerésében részt vevő folyamatok finom különbségeit tudták kiemelni szemmozgáskövetés módszerrel; Greene és munkatársai (2019) szintén a szemmozgáskövetés módszerrel fedtek fel a viselkedéses teljesítményben meg nem mutatkozó különbségeket. Hasonló módon voltak képesek a kutatók feltárni a viselkedéses feladatban nem látható prediktív működési különbségeket EEG (Coll és mtsai, 2020) és fMRI (Sapey-Triomphe, 2023b) használatával.

Az autizmus számos ponton mutat átfedést más pszichiátriai zavarokkal: ez megjelenik az etiológia terén, a közös kockázatot jelentő gének (Chawner és Owen, 2022), és környezeti tényezők esetében (Karimi és mtsai, 2017); illetve a tüneti kép hasonlóságaiban (Trevisan és mtsai, 2020). Emiatt fontos elkülöníteni, hogy egy adott vizsgálat eredményei valóban autizmus-specifikus eltérést, vagy egy általánosabb pszichopatológiához kötődő működést fednek fel. Így nagy előrelépést jelentenek azok a vizsgálatok, amelyekben az autista résztvevők mellett más diagnózissal rendelkező résztvevők teljesítménye is összehasonlításra kerül. Erre a vizsgált tanulmányokban jellemzően olyan módon került sor, hogy a vizsgált egészséges mintán autisztikus vonások mellett más pszichopatológiák szubklinikai megjelenésének felmérése és elemzése is megtörtént (ld. Coll és mtsai, 2020).

Mivel számos cikkben a neurotipikus populációban megjelenő autisztikus vonások kapcsolata került felmérésre a prediktív működéssel, fontos kérdés az autizmus tüneteinek, működésmódjának kontinuitása a neurotipikus populáció felé. Emellett fontos kérdésként emelkednek ki az életkori különbségek

is: a gyermekek prediktív működése hol eltérő a felnőttekétől és egy érésben lévő folyamatot mutat, hol a felnőtt teljesítménnyel megegyező. Érdekes kérdéseket vet fel Jaffe-Dax és Eigsti (2020) kutatása, ahol a gyermekkori autizmus diagnózisukat elvesztett felnőttek teljesítménye a neurotipikusokéhoz mérhető volt.

Összefoglalva elmondható, hogy a rendelkezésre álló sokszínű ismeretanyag ellenére jelenleg még további kutatásokra van szükség a prediktív képességek fejlődésének felfedésére a neurotipikus és autista populációban egyaránt; ebben jelentős előrelépést jelenthetnek olyan neurodevelopmentális szemléletű kutatások, ahol a résztvevők életkora kora gyermekkortól, serdülőkoron át, egészen a felnőttkorig terjed. További érdekes kérdés ezen képességeknek az öregeddéssel, illetve nemi jellegzetességekkel való kapcsolata neurotipikus és autista populációban.

LEVELEZŐ SZERZŐ: Farkas Kinga
E-mail: farkas.kinga@semmelweis.hu

IRODALOM

- Allenmark, F., Shi, Z., Pistorius, R.L., Theisinger, L.A., Koutsouleris, N., Falkai, P., Müller, H.J., Falter-Wagner, C.M. (2021). Acquisition and use of "priors" in autism: typical in deciding where to look, atypical in deciding what is there. *J. Autism Dev. Disord.* 51, 3744–3758.
<https://doi.org/10.1007/s10803-020-04828-2>.
- American Psychiatric Association. (2022). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders* (5th ed., text rev.).
<https://doi.org/10.1176/appi.books.9780890425787>
- Amoruso, L., Narzisi, A., Pinzino, M., Finisguerra, A., Billeci, L., Calderoni, S., Fabbro, F., Muratori, F., Volzone, A., Urgesi, C. (2019). Contextual priors do not modulate action prediction in children with autism. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 286, 20191319.
<https://doi.org/10.1098/rspb.2019.1319>
- Andermane, N., Bosten, J.M., Seth, A.K., Ward, J. (2020). Individual differences in the tendency to see the expected. *Conscious. Cogn.* 85, 102989
<https://doi.org/10.1016/j.concog.2020.102989>
- Aru, J., Tulver, K., Bachmann, T. (2018). It's all in your head: expectations create illusory perception in a dual-task setup. *Conscious. Cogn.* 65, 197–208.
<https://doi.org/10.1016/j.concog.2018.09.001>
- Arthur, T., Vine, S., Buckingham, G., Brosnan, M., Wilson, M., & Harris, D. (2023). Testing predictive coding theories of autism spectrum disorder using models of active inference. *PLoS Comput Biol.* 2023 Sep 11;19(9):e1011473.
<https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1011473>
- Beker, S., Foxe, J.J., Molholm, S. (2021). Oscillatory entrainment mechanisms and anticipatory predictive processes in children with autism spectrum disorder. *J. Neurophysiol.* 126, 1783–1798.
<https://doi.org/10.1152/jn.00329.2021>

8. Bianco, V., Finisguerra, A., Betti, S., D'Argenio, G., Urgesi, C. (2020). Autistic traits differently account for context-based predictions of physical and social events. *Brain Sci.* 10, 418. <https://doi.org/10.3390/brainsci10070418>
9. Buzsáki, G. (2006). *Rhythms of the brain*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195301069.001.0001>
10. Chambon, V., Farrer, C., Pacherie, E., Jacquet, P.O., Leboyer, M., Zalla, T. (2017). Reduced sensitivity to social priors during action prediction in adults with autism spectrum disorders. *Cognition* 160, 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2016.12.005>
11. Chawner, Samuel & Owen, Michael. (2022). Autism: A model of neurodevelopmental diversity informed by genomics. *Frontiers in Psychiatry*. 13. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2022.981691>
12. Chrysaitis, N. A., & Seriès, P. (2023). 10 years of Bayesian theories of autism: a comprehensive review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 145, 105022. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2022.105022>
13. Coll, M.-P., Whelan, E., Catmur, C., Bird, G., (2020). Autistic traits are associated with atypical precision-weighted integration of top-down and bottom-up neural signals. *Cognition* 199, 104236. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2020.104236>
14. Ewbank, M.P., von dem Hagen, E.A.H., Powell, T.E., Henson, R.N., Calder, A.J., (2016). The effect of perceptual expectation on repetition suppression to faces is not modulated by variation in autistic traits. *Cortex* 80, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.10.011>
15. Finnemann, J.J., Plaisted-Grant, K., Moore, J., Teufel, C., & Fletcher, P. C. (2021). Low-level, prediction-based sensory and motor processes are unimpaired in Autism. *Neuropsychologia*, 156, 107835. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2021.107835>
16. Friston, Karl & Lawson, Rebecca & Frith, Chris. (2012). On hyperpriors and hypopriors: Comment on Pellicano and Burr. *Trends in cognitive sciences*. 17. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.11.003>
17. Ganglmayer, K., Schuwerk, T., Sodian, B., Paulus, M., (2020). Do children and adults with autism spectrum condition anticipate others' actions as goal-directed? A Predictive coding perspective. *J. Autism Dev. Disord.* 50, 2077–2089. <https://doi.org/10.1007/s10803-019-03964-8>
18. Goris, J., Braem, S., Nijhof, A.D., Rigoni, D., Deschrijver, E., Van de Cruys, S., Wiersema, J.R., Brass, M. (2018). Sensory Prediction Errors Are Less Modulated by Global Context in Autism Spectrum Disorder. *Biol. Psychiatry Cogn. Neurosci. Neuroimag.* 3, 667–674. <https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2018.02.003>
19. Greene, R.K., Zheng, S., Kinard, J.L., Mosner, M.G., Wiesen, C.A., Kennedy, D.P., Dichter, G.S. (2019). Social and nonsocial visual prediction errors in autism spectrum disorder. *Autism Res* 12, 878–883. <https://doi.org/10.1002/aur.2090>
20. Grisoni, L., Moseley, R.L., Motlagh, S., Kandia, D., Sener, N., Pulvermüller, F., Roepke, S., Mohr, B. (2019). Prediction and mismatch negativity responses reflect impairments in action semantic processing in adults with autism spectrum disorders. *Front. Hum. Neurosci.* 13, 395. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00395>
21. Gu, X., Zhou, T.J., Anagnostou, E., Soorya, L., Kolevzon, A., Hof, P.R., Fan, J. (2018). Heightened brain response to pain anticipation in high-functioning adults with autism spectrum disorder. *Eur. J. Neurosci.* 47, 592–601. <https://doi.org/10.1111/ejn.13598>
22. Herzog, M. H., Drissi-Daoudi, L., & Doerig, A. (2020). All in Good Time: Long-Lasting Postdictive Effects Reveal Discrete Perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 24(10), 826–837. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2020.07.001>
23. Hitchcock, P. F., Fried, E. I., & Frank, M. J. (2022). Computational Psychiatry Needs Time and Context, 73, 243–270. <https://doi.org/10.1146/Annurev-Psych-021621-124910>
24. Hudson, M., Nicholson, T., Kharko, A., McKenzie, R., Bach, P. (2021). Predictive action perception from explicit intention information in autism. *Psychon. Bull. Rev.* 28, 1556–1566. <https://doi.org/10.3758/s13423-021-01941-w>
25. Jaffe-Dax, S., Eigsti, I.-M. (2020). Perceptual inference is impaired in individuals with ASD and intact in individuals who have lost the autism diagnosis. *Sci. Rep.* 10, 17085. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72896-6>
26. Karaminis, T., Cicchini, G.M., Neil, L., Cappagli, G., Aagten-Murphy, D., Burr, D., Pellicano, E. (2016). Central tendency effects in time interval reproduction in autism. *Sci. Rep.* 6, 28570. <https://doi.org/10.1038/srep28570>
27. Karimi, P., Kamali, E., Mousavi, S. M., & Karahmadi, M. (2017). Environmental factors influencing the risk of autism. *Journal of research in medical sciences: the official journal of Isfahan University of Medical Sciences*, 22. <https://doi.org/10.4103/1735-1995.200272>
28. Karvelis, P., Seitz, A.R., Lawrie, S.M., Seriès, P. (2018). Autistic traits, but not schizotypy, predict increased weighting of sensory information in Bayesian visual integration. *eLife* 7, e34115. <https://doi.org/10.7554/eLife.34115>
29. Knight, E.J., Oakes, L., Hyman, S.L., Freedman, E.G., Foxe, J.J. (2020). Individuals with autism have no detectable deficit in neural markers of prediction error when presented with auditory rhythms of varied temporal complexity. *Autism Res* 13, 2058–2072. <https://doi.org/10.1002/aur.2362>
30. Król, Magdalena, Król, Michał, (2019). The world as we know it and the world as it is: Eyemovement patterns reveal decreased use of prior knowledge in individuals with autism. *Autism Res* 12, 1386–1398. <https://doi.org/10.1002/aur.2133>
31. Lacroix, A., Duthel, F., Logemann, A., Cserjesi, R., Peyrin, C., Biro, B., Gomot, M., Mermillod, M. (2021). Flexibility in autism during unpredictable shifts of socioemotional stimuli: Investigation of group and sex differences. *Autism*. <https://doi.org/10.1177/13623613211062776>
32. Lieder, I., Adam, V., Frenkel, O., Jaffe-Dax, S., Sahani, M., Ahissar, M. (2019). Perceptual bias reveals slow-updating in autism and fast-forgetting in dyslexia. *Nat. Neurosci.* 22, 256–264. <https://doi.org/10.1038/s41593-018-0308-9>
33. Manning, C., Kilner, J., Neil, L., Karaminis, T., Pellicano, E. (2017). Children on the autism spectrum update their behaviour in response to a volatile environment. *Dev. Sci.* 20, e12435 <https://doi.org/10.1111/desc.12435>
34. Marr, D. (1982), *Vision: A Computational Approach*, San Francisco, Freeman & Co.
35. Maurer, C., Chambon, V., Bourgeois-Gironde, S., Leboyer, M., Zalla, T. (2018). The influence of prior reputation and reciprocity on dynamic trust-building in adults with and without autism spectrum disorder. *Cognition* 172, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2017.11.007>
36. Noel, Jean-Paul, Sabyasachi Shivkumar, Kalpana Dokka, Ralf M Haefner, Dora E Angelaki (2022) Aberrant causal inference and presence of a compensatory mechanism in autism spectrum disorder *eLife* 11:e71866 <https://doi.org/10.7554/eLife.71866>

37. Ong, J.H., Liu, F. Probabilistic Learning of Cue-Outcome Associations is not Influenced by Autistic Traits. *J Autism Dev Disord* 53, 4047–4059 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10803-022-05690-0>
38. Pálffy, Z., Farkas, K., & Polner, B. (2022). Mi köze a Bayes-szabálynak az elmegyógyászathoz? *Neuropharmacologica Hungarica*, 24(1), 4–16.
39. Palmer, C.J., Lawson, R.P., Hohwy, J. (2017). Bayesian approaches to autism: Towards volatility, action, and behavior. *Psychol. Bull.* 143, 521–542. <https://doi.org/10.1037/bul0000097>
40. Pellicano, E., Burr, D. (2012). When the world becomes "too real": a Bayesian explanation of autistic perception. *Trends Cogn. Sci.* 16, 504–510. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.08.009>
41. Retzler, C., Boehm, U., Cai, J., Cochrane, A., Manning, C. (2021). Prior information use and response caution in perceptual decision-making: no evidence for a relationship with autistic-like traits. *Q. J. Exp. Psychol.* 74, 1953–1965. <https://doi.org/10.1177/17470218211019939>
42. Rybicki, A.J., Galea, J.M., Schuster, B.A., Hiles, C., Fabian, C., Cook, J.L. (2021). Intact predictive motor sequence learning in autism spectrum disorder. *Sci. Rep.* 11, 20693. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00173-1>
43. Sapey-Triomphe, L.-A., Temmerman, J., Puts, N.A.J., Wagemans, J. (2021a). Prediction learning in adults with autism and its molecular correlates. *Mol. Autism* 12, 64. <https://doi.org/10.1186/s13229-021-00470-6>
44. Sapey-Triomphe, L.-A., Timmermans, L., Wagemans, J. (2021b). Priors bias perceptual decisions in autism, but are less flexibly adjusted to the context. *Autism Res* 14, 1134–1146. <https://doi.org/10.1002/aur.2452>
45. Sapey-Triomphe, L.-A., Weilhhammer, V.A., Wagemans, J. (2021c). Associative learning under uncertainty in adults with autism: Intact learning of the cue-outcome contingency, but slower updating of priors, *Autism*. <https://doi.org/10.1177/13623613211045026>
46. Sapey-Triomphe, L.A., Pattyn, L., Weilhhammer, V. et al. Neural correlates of hierarchical predictive processes in autistic adults. *Nat Commun* 14, 3640 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38580-9>
47. Sapey-Triomphe, L.A., Sanchez, G., Hénaff, MA. et al. Disentangling sensory precision and prior expectation of change in autism during tactile discrimination. *npj Sci. Learn.* 8, 54 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41539-023-00207-5>
48. Schneebeli, M., Haker, H., Rüesch, A., Zahnd, N., Marino, S., Paolini, G., ... & Stephan, K. E. (2022). Disentangling "Bayesian brain" theories of autism spectrum disorder. *medRxiv*, 2022-02. <https://doi.org/10.1101/2022.02.07.22270242>
49. Series, P., Seitz, A.R. (2013). Learning what to expect in visual perception. *Front. Hum. Neurosci.* 7. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00668>
50. Sevgi, M., Diaconescu, A.O., Henco, L., Tittgemeyer, M., Schilbach, L. (2020). Social bayes: using bayesian modeling to study autistic trait-related differences in social cognition. *Biol. Psychiatry* 87, 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2019.09.032>
51. Skewes, J.C., Gebauer, L. (2016). Brief report: suboptimal auditory localization in autism spectrum disorder: support for the bayesian account of sensory symptoms. *J. Autism Dev. Disord.* 46, 2539–2547. <https://doi.org/10.1007/s10803-016-2774-9>
52. Skewes, J. C., Jegindø, E. M., & Gebauer, L. (2015). Perceptual inference and autistic traits. *Autism*, 19(3), 301–307. <https://doi.org/10.1177/1362361313519872>
53. Thillay, A., Lemaire, M., Roux, S., Houy-Durand, E., Barth'el'emy, C., Knight, R.T., BidetCaulet, A., Bonnet-Brilhault, F. (2016). Atypical brain mechanisms of prediction according to uncertainty in autism. *Front. Neurosci.* 10. <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00317>
54. Trevisan DA, Foss-Feig JH, Naples AJ, Srihari V, Anticevic A and McPartland JC (2020) Autism Spectrum Disorder and Schizophrenia Are Better Differentiated by Positive Symptoms Than Negative Symptoms. *Front. Psychiatry* 11:548. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2020.00548>
55. Turing, A. M. (1950) I. Computing Machinery and Intelligence. *Mind*, 59, p. 236, 433–460, <https://doi.org/10.1093/mind/LIX.236.433>
56. Utzerath, C., Schmits, I.C., Buitelaar, J., de Lange, F.P. (2018). Adolescents with autism show typical fMRI repetition suppression, but atypical surprise response. *Cortex* 109, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.08.019>
57. Van de Cruys, S., Evers, K., Van der Hallen, R., Van Eylen, L., Boets, B., de-Wit, L., Wagemans, J. (2014). Precise minds in uncertain worlds: Predictive coding in autism. *Psychol. Rev.* 121, 649–675. <https://doi.org/10.1037/a0037665>
58. Van de Cruys, S., Lemmens, L., Sapey-Triomphe, L., Chetverikov, A., Noens, I., Wagemans, J. (2021). Structural and contextual priors affect visual search in children with and without autism. *Autism Res* 14, 1484–1495. <https://doi.org/10.1002/aur.2511>
59. Vishne, G., Jacoby, N., Malinovitch, T., Epstein, T., Frenkel, O., Ahissar, M. (2021). Slow update of internal representations impedes synchronization in autism. *Nat. Commun.* 12, 5439. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25740-y>
60. Ward, E.K., Buitelaar, J.K., Hunnius, S. (2021). Implicit learning in 3-year-olds with high and low likelihood of autism shows no evidence of precision weighting differences. *Dev. Sci.* <https://doi.org/10.1111/desc.13158>
61. Wilson, R. C., & Collins, A. G. E. (2019). Ten simple rules for the computational modeling of behavioral data. *ELife*, 8, 1–33. <https://doi.org/10.7554/eLife.49547>
62. Zaidel, A., Goin-Kochel, R.P., Angelaki, D.E. (2015). Self-motion perception in autism is compromised by visual noise but integrated optimally across multiple senses. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 112, 6461–6466. <https://doi.org/10.1073/pnas.1506582112>

Computational psychiatric approaches to autism

Objectives: Over the last decades studies on the field of computational neuroscience have been striving to achieve a deeper understanding of the relationship between the pathophysiological basis, the complex brain processes involved and the behavioural characteristics of a continuously expanding circle of mental and neurodevelopmental disorders, while focusing on predictive coding accounts. The purpose of this study is to uncover the different ways of creating representations of the world (priors) by people living with autism as well as the related neurobiological and cognitive mechanisms. **Methods:** The study helps to understand the implications of the theory of predictive coding by reviewing the relevant scientific literature in a systematic manner. Three dominant hypotheses stand out in the current computational neuroscientific approach of autism: the sensory precision hypothesis, the weak priors hypothesis and the rigid priors hypothesis. This study analyses the relevant research findings in the context of these hypotheses. The literature review centers on the process of prior acquisition in the analyses of related findings. **Results:** The analyses found several differences within the three main fields the included studies have been assigned to. The differences in the sensory precision (precision of processing) come from the special characteristics of processing perceptual information in autism. According to the weak prior hypothesis, past experiences cannot properly influence the processing of current information, the integration of relevant information thus limiting the effective use of preexisting knowledge. Finally we direct our attention to the empirical results pointing to problems of prior acquisition and updating by autistic people that could lead to unusual responses to environmental changes. **Conclusions:** The study points to different developmental trajectories of predictive abilities by neurotypical and autistic populations. To better understand the developmental process of the predictive abilities, further studies are needed, comparing these differences in various ages.

Keywords: autism, predictive coding, bayesian inference