

# A STATISZTIKAI TANULÁS HATÁRAI ÚJSZÜLÖTT CSECSEMŐKNÉL

## LIMITS OF STATISTICAL LEARNING IN NEWBORN INFANTS

Winkler István<sup>1</sup>, Háden Gábor Péter<sup>2</sup>, Tóth Brigitta<sup>3</sup>

<sup>1</sup>az MTA doktora, tudományos tanácsadó, HUN-REN Természettudományi Kutatóközpont Kognitív Idegtudományi és Pszichológiai Intézet, Budapest  
winkler.istvan@ttk.hu

<sup>2</sup>PhD, tudományos munkatárs, HUN-REN Természettudományi Kutatóközpont Kognitív Idegtudományi és Pszichológiai Intézet, Budapest  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Kar  
Távközlési és Médiainformatikai Tanszék, Budapest  
haden.gabor@ttk.hu

<sup>3</sup>PhD, tudományos munkatárs, HUN-REN Természettudományi Kutatóközpont Kognitív Idegtudományi és Pszichológiai Intézet, Budapest  
toth.brigitta@ttk.hu

### ÖSSZEFOGLALÁS

A statisztikai tanulás szűk értelemben az ingersorok elemei közötti ún. átmeneti valószínűségeknél (milyen valószínűséggel követi A ingert B inger) a környezetből beérkező ingersorokból történő kiemelését, tárolását és felhasználását jelenti. Az eddig elvégzett vizsgálatok alátámasztják a statisztikai tanulás elsődleges szerepét a korai (csecsemőkori) tanulásban. Jelen cikkben négy, kutatócsoportunk által újszülötteken elvégzett vizsgálat eredményeit mutatjuk be, melyek segítségével két kérdésre szeretnénk választ adni: 1) a statisztikai tanulás önmagában magyarázza-e a korai kognitív fejlődésben tapasztalható nagyszabású tanulási teljesítményeket, mint például az anyanyelv elsajátítását, illetve 2) milyen más tanulási formák működnek születéskor? Eredményeink alapján levonható a következtetés, hogy a statisztikai tanulás fontos szerepet tölt be a csecsemők korai kognitív fejlődésében, minősége például előrejelzi a beszédfejlődés későbbi menetét. Ugyanakkor az ingerek időbeli megjelenésének szerkezetét a statisztikai tanulástól független módon emeljük ki. Sőt, az ingerek beérkezésének időbeli egyenletessége (általában, bejósolhatósága) elősegíti a statisztikai tanulás eredményességét. Továbbá eredményeink arra is utalnak, hogy a statisztikai tanulás alkalmazkodik az ingersorok magasabb rendű struktúrája kiemelésének folyamataihoz, ahogyan a szótanulás a kifejezések, mondatok megértésének elsajátításához szükséges részfolyamat.

### ABSTRACT

Statistical learning, in a narrow sense, is the extraction, storage, and use of the so-called transition probabilities (the probability that stimulus A is followed by stimulus B) that characterize the sequence of stimuli received from the environment. Previous studies support the notion that statistical learning plays primary role in early (infant) learning. In the present paper, we review

the results of four studies conducted by our research group on newborn infants to answer two questions: 1) whether statistical learning alone explains the extensive learning achievements in early cognitive development, such as the acquisition of one's native language, and 2) what other forms of learning are functional at birth. Our results lead us to conclude that statistical learning plays an important role in early infantile cognitive development; for example, its quality predicts the later course of speech development. At the same time, we extract the temporal structure of stimulus presentation independently of statistical learning. Moreover, isochrony (in general, temporal predictability) of the incoming stimuli facilitates the effectiveness of statistical learning. Further, our results also suggest that statistical learning adapts to the processes of extracting the higher-order structure of the stimulus sequence, just as word learning is a sub-process necessary for learning to comprehend phrases and sentences.

**Kulcsszavak:** statisztikai tanulás, újszülött csecsemő, predikció, hangfeldolgozás

**Keywords:** statistical learning, newborn infant, prediction, sound processing

## BEVEZETÉS

A pszichológia és az idegtudományok elmúlt negyven évének egyik legjelentősebb felismerése, hogy az ember (és valószínűleg, legalábbis a fejlett állatok) észlelése és viselkedése inkább proaktív, mint reaktív (Gregory, 1980; Friston, 2005). Jól szemlélteti ezt a klasszikus kondicionálás értelmezésének megváltozása. A klasszikus kondicionálás során a választ kötelezően kiváltó (feltétlen) inger előtt következetesen bemutatott, eredetileg a válaszhoz nem kötődő (feltételes) inger a sokszori társítás eredményeképpen önmagában is kiváltja a választ. Ezt általában Ivan Petrovics Pavlov (valójában ebben a formában soha el nem végzett) kísérletével szokás szemléltetni, melyben egy kutya minden falat megkapása (feltétlen inger) előtt egy csengőhangot hall (feltételes inger). A társítás után a csengőhang önmagában is kiváltja a nyáleválasztást (válasz). E tanulási alapjelenség hagyományos magyarázata, hogy a feltételes inger asszociáció révén aktiválja a választ – azaz az agy a feltételes ingerre reagál. Ma inkább azt mondanánk, hogy az agy megtanulta, hogy a feltételes ingert a feltétlen követi, és előkészül annak fogadására – azaz proaktívan működik.

A proaktív viselkedés előfeltétele az előrejelzés, melyet az ingersorok szabályainak kiemelése alapoz meg. Habár a modern pszichológia szinte a kezdetektől fogva vizsgálja az ingersorok tanulását, érdekes módon a csecsemőkori nyelvtanulás magyarázatának igénye irányította rá a figyelmet a sorrend jelentőségére az ingersorok egységeinek kiemelésében és ezáltal a szabályok hierarchiájának elszámításában. Jenny R. Saffran és szerzőtársai (1996) alapvető jelentőségű kísérletükben azt találták, hogy a vizsgálati személyek megkülönböztették a korábban hallott mesterséges szavakat azoktól, melyekkel még nem találkoztak. Kísérle-

tükben a hallott és nem hallott mesterséges szavak csupán abban tértek el egymástól, hogy a korábban szünetek nélkül bemutatott szótagsorban az őket alkotó szótagok gyakran vagy ritkán követték-e egymást a megfelelő sorrendben. Azaz az egymásra következés valószínűsége (az ún. átmeneti valószínűség) lehetővé teszi, hogy egy strukturált hangsorban elhatároljuk egymástól a hangsort alkotó egységeket – a beszédre vonatkoztatva például a szavakat. Szűk értelemben az átmeneti valószínűségek tanulását nevezzük statisztikai tanulásnak (a fogalom kiterjesztését lásd például Fiser–Lengyel, 2022). A tény, hogy az emberi agy érzékeny az átmeneti valószínűségekre, alátámasztja az agy proaktív működését feltételező szemléletet, hiszen ezek az információk alkalmasak a hamarosan bekövetkező események előrejelzésére.

Fontos kérdés tehát, hogy az újszülött agy is érzékeny-e az átmeneti valószínűségekre, illetve használja-e ezeket az ingerekre adott válaszok kialakításában. Számos vizsgálat kimutatta, hogy az újszülöttek detektálják egy hangsor szabályosságait megsértő hangokat (Kushnerenko et al., 2013). Valószínűsíthető, hogy ennek során, a felnőttekhez hasonlóan, felhasználják az agyuk által automatikusan előállított előrejelzéseket (Háden et al., 2015). A nyelvelsajátítási vizsgálatokból pedig leszűrhető, hogy az újszülöttek is kiemelik a hangsorokból az egységek közötti átmeneti valószínűségeket, és ez a képességük valószínűleg fontos szerepet tölt be az anyanyelv elsajátításában. Ugyanakkor kétségtelen, hogy a statisztikai tanulás nem az egyetlen tanulási forma, amely elősegíti az észlelés fejlődését és ezen belül a nyelvelsajátítást (összefoglalót lásd Winkler–Lukács, 2017). A továbbiakban saját, a közelmúltban végzett kutatásainkból adunk ízelítőt a statisztikai és azt ezt kiegészítő tanulási formák működéséről újszülött csecsemőkön végzett vizsgálateink alapján.

## STATISZTIKAI TANULÁS ÚJSZÜLÖTT CSECSEMŐKNÉL

Bár a statisztikai tanulás elmélete eredetileg a nyelvelsajátítás kontextusában alakult ki, és a korai vizsgálatok elsősorban a szótanulásra fókuszáltak, az azóta lefolytatott nagyszámú vizsgálat bebizonyította, hogy egy általános mechanizmusról van szó, mely bármilyen modalitású (például képekből álló) ingersor feldolgozásában szerepet játszik, és egyaránt érvényesül az alacsonyabb (például szavak) és magasabb rendű ingeregységek (például kifejezések) elhatárolásában és elsajátításában (Aslin, 2016). A statisztikai tanulás további fontos tulajdonságai közé tartozik, hogy nem igényel explicit instrukciókat, azaz elegendő hozzá, hogy az alany találkozzon az adott strukturált ingersorral, akár úgy is, hogy nem figyel rá. Ráadásul a statisztikai tanulás igen gyorsan végbemegy: a struktúra bonyolultságától függően lehet néhány másodperc (például egy ismétlődő hangsor), de legfeljebb néhány órát vesz igénybe (például egy ismeretlen nyelvben

milyen fonémák követik szokásosan egymást egy szón belül). Ezek a tulajdonságok alapvetően szükségesek ahhoz, hogy a bennünket körülvevő változó, zajos környezetben ki tudjuk emelni egy ingersor szabályosságait. Az anyanyelv elsajátítása során például meg kell küzdeni a beszéddel párhuzamosan a környezetben előforduló zajokkal, az egyes beszélők egymástól eltérő, a beszéd tartalmához, a beszélő belső állapotához és a közlés érzelmi töltéséhez alkalmazkodó, időben is változó artikulációjával (csecsemőknél részletesebben lásd Winkler, 2015).

A hallási deviánsdetekció egyike azoknak a területeknek, melyen gyakran vizsgálják különböző hangsorok szabályosságainak kiemelését nem figyelt helyzetekben. A legegyszerűbb esetben a vizsgálati személy egyetlen ismétlődő hangból (standard) álló hangsort hall, miközben valamilyen elterelő (például látási) feladatot teljesít. Az ismétlődő hangsorba a kísérletezők időnként egy-egy eltérő hangot (deviáns) iktatnak be. Ez az ún. kakuktktojás paradigma. A deviáns és a standard hangra adott agyi elektromos válasz különbsége egy olyan jelösszetevőt (komponenst) tartalmaz, mely az eltérés detektálását jellemzi: ezt nevezzük eltérési negativitásnak (EN) (Näätänen, 1990). A modern elméletek szerint az EN-komponens az agyban a hangsor folytatására kialakult előrejelzések megsértésének detektálását jelzi (Fitzgerald–Todd, 2020). Bár az EN keletkezésének más lehetséges magyarázatai is vannak, ez a hipotézis kompatibilis valamennyi publikált EN-tanulmány eredményével. Ezen belül az EN megjelenése azokban a kísérletekben, ahol a deviánst csak valamilyen hangok közötti reláció különbözteti meg a standardtól, viszonylag erős érv az előrejelzési hipotézis mellett, mert azt mutatja, hogy az EN mögött álló ingerfeldolgozási műveletek nemcsak az egyedi hangokat, hanem azoknak az előző hanghoz való viszonyát is figyelembe veszik. Ez jól illeszkedik a statisztikai tanulás, és általánosabban az előrejelző észlelés elvéhez. Ilyen bizonyítékot szolgáltat újszülöttekre vonatkozóan Hádén Gábor Péter és szerzőtársainak (2015) vizsgálata, melyben folytonosan ereszkedő hangok sorában jelentek meg időnként emelkedő hanglépések. A hangsor közepén megjelenő emelkedő hangközre adott agyi választ összehasonlítva a hangsor legelején ugyanerre a mintázatra kapott válasszal (amikor még nem állapítható meg, hogy a hangsor szabályossága az ereszkedő dallam), kimutatható volt az EN csecsemőkre jellemző változata (az eltérési válasz, EV). Hádén és szerzőtársai (2015) eredménye azt valószínűsíti, hogy a hangfeldolgozás újszülött csecsemők esetében is a felnőttekhez hasonló elvek alapján megy végbe.

A deviánsdetekció mellett az agyi elektromos aktivitás változása, legalábbis felnőtteknél, jelzi azt is, amikor egy adott hangmintázat bejósolhatóvá válik az agy számára, például mert valószínűleg megegyezik egy korábban már hallott mintázattal (Barascud et al., 2016). Mindezek alapján a hallási eseményfüggő elektromos agyi aktivitás mérése és a deviánsdetekciós paradigma felhasználható (és általunk is használt) módszerek a hangsorok tanulásának vizsgálatára, ezen belül a statisztikai tanulás hatásainak tesztelésére (az összefoglalót lásd Kujala et al., 2023).

*Hangmintázatok ismétlődésének detektálása újszülötteknél*

Egy nemrégiben közölt vizsgálatunk hangmintázatok tanulási folyamatát mérte alvó újszülötteken (Tóth et al., 2023). Az újszülöttek két különböző típusú, három másodperces hangmintát hallgattak véletlenszerű sorrendben. Az egyik típusú hangminta hatvan tiszta, különböző hangmagasságú hang véletlenszerű sorozata volt. A másik típus szintén hatvan hang sorozata volt, de ebben az esetben az első tíz hang alkotta hangsort ötször megismételtük (szabályos hangsor). A szabályos hangsor esetében a hallórendszernek módja volt a tíz hangból álló hangmintázat ismétlődését megtanulni. A véletlenszerű és a szabályos hangsor hatására megjelenő agyi aktivitást összehasonlítva azt találtuk, hogy azok a szabályos hangsorban ismétlődő tíz hangból álló mintázat harmadik bemutatásától (második ismétlődésétől, a hangsor kezdetétől számítva egy másodperctől) kezdve statisztikai értelemben jelentősen eltértek egymástól. A megfigyelt tanulási hatás rendkívül gyors, és ezért nem magyarázható egyszerű idegrendszeri fáradási mechanizmusokkal. A szabályos hangsort a szabálytalantól megkülönböztető elektromos agyi aktivitás forrása parietális régiókhöz köthető, nem pedig az elsődleges hallókéreghez, ahol a hangok alapvető tulajdonságainak kiemelése zajlik. Ezzel szemben a parietális kéregben az inger modalitásától független általánosabb összefüggések kiemelése zajlik. Ezért eredményünk arra utal, hogy a mintaismétlődés detektálása magasabb szintű kognitív folyamat. A tanulás hatékonyságának felmérésére a vizsgálatban használt hangsorokat egy matematikai modell segítségével is kiértékeljük (Information Dynamics of Music, IDyOM) (Pearce et al., 2010), mely a statisztikai (bayesi) értelemben ideális észlelő szempontjából mutatja ki, hogy az előzmények alapján mekkora az adott hang megjelenésének meglepetésértéke (információs tartalma). A matematikai modell a véletlenszerű és a szabályos hangsorok között átlagosan a második ismétlődés felénél tud különbséget tenni. Ez csak néhány száz millisekondummal előzi meg az újszülött hallórendszerének teljesítményét. Összességében eredményeink alátámasztják, hogy hangmintázatok statisztikai tanulása újszülött csecsemők esetében is a felnőttekéhez (illetve az ideális észlelő modelljéhez; Barascud et al., 2016) hasonló elvek alapján megy végbe, csak valamivel lassabban.

*Szótagokból szavak – előrejelzés és statisztikai tanulás újszülötteknél*

A kísérletben a szótanulást vizsgáltuk újszülötteknél (Suppanen et al., 2022). Előszörként egy olyan hangsort hallottak, melyben két két szótagú szó szerepelt azonos gyakorisággal (a szótagokat betűkkel helyettesítve az AB és CD szavak). A szavak teljes hossza egységes volt, és ezen belül a második szótag mindig ugyanakkor kezdődött. A két egymást követő szót azonos hosszúságú csend választotta el. Ezután egy olyan hangsort mutattunk be, melyben magas valószínűséggel fordult elő az AB szó (standard), egymás között egyenlő valószínűséggel pedig négy különböző ritka deviáns szó: AD, AX, CB és CD. A teszt hangsor szavai közül tehát

a gyakori (AB) és az egyik ritka szó (CD) ismerős volt a babáknak a bemutató hangsorból. A másik három ritka szó közül kettő (AD és CB) olyan szótagokból állt, melyek szerepeltek a bemutató hangsorban, de sosem ebben a sorrendben. Végül az AX szóban az ismerős 'A' szótagot egy, a bemutató hangsorban nem hallott szótag ('X') követte. A szavaknak a finn nyelvben nem volt jelentésük, kivéve az AD kombinációt.

Az átmeneti valószínűségek tanulását a CD és CB deviánsok második szótagjára ('D', illetve 'B') adott válaszok összehasonlításával vizsgálhatjuk. Ha ugyanis az előzetes bemutatás során az újszülöttek megtanulták, hogy a 'C' szótagot mindig a 'D' szótag követi, akkor a CB szavak megsértik az ebből fakadó elvárást. Minden egyéb szempontból a CB és a CD szavak azonos módon szerepeltek a teszt hangsorban. Ha tehát a CD és CB szavakban a 'D' (ismerős folytatás a 'C' után) és a 'B' szótagra (a bemutatóban nem szereplő folytatás a 'C' után) különböző választ kapunk, akkor azt úgy értelmezhetjük, hogy az újszülött csecsemők a bemutatás során megtanulták a 'C' és az azt követő szótag közötti magas feltételes valószínűséget, és a teszt hangsorban detektálták, hogy a 'C' után beérkezett szótag megegyezett-e vagy sem az előre jelzett várható szótaggal. (A 'C' és a 'B' szótag akusztikai különbözőségéből származó hatást a kísérleti paradigma megfelelő kialakításával küszöböltük ki.)

A CD és CB szavak által kiváltott eseményfüggő agyi potenciálok statisztikai értelemben jelentősen különböztek a második szótag kezdetétől számított 200 és 400 ms közötti időszakban, míg a két szóra adott válasz egyetlen más időszámban sem tért el egymástól. Ez egyértelmű bizonyítéka annak, hogy az újszülött csecsemők agya megjegyzi a beszédhangok sorrendjének szabályosságait. A CD és CB szavakra adott válaszok nagyságának különbsége (tehát az előrejelzés megsértését követő agyi reakció mértéke) pedig statisztikai értelemben jelentősen összefüggött az ugyanezen babák által két éves korban használt szavak átlagos hosszúságával (MacArthur-Bates Communicative Development Inventory, [MB] CDI). A beszédben használt szavak átlagos hossza jól jellemzi a csecsemők/kisgyerekek beszédfejltségét. Eredményünk eszerint arra is utal, hogy a szótagok közötti átmeneti valószínűségek megtanulásának foka (vagy a tanult átmeneti valószínűségek megsértésére való érzékenység mértéke) összefüggésben áll a beszédtanulás minőségével és/vagy sebességével.

## TÚL A STATISZTIKAI TANULÁSON

Sok kutatás foglalkozott a nyelvelsajátítás statisztikai tanuláson túli jelzőmozzanataival (az összefoglalót lásd Winkler–Lukács, 2017). A legjelentősebb közülük a prozódia (Gervain, 2018), mely önmagában is elegendő a szóhatárok kijelölésére csecsemőknél (Fló et al., 2019). Azonban a prozódia nem egy elemi hangvonalas,

hanem a beszéd során több független hangtulajdonság (például hangerő, hangmagasság, időzítés) együttes modulációjával alakítjuk ki, mondandónknak, érzelmi állapotunknak, a partnerrel való kapcsolatunknak megfelelően. Ezért érdemes megvizsgálni, hogy a csecsemők a prozódia jelzőmozzanatai közül mely hangtulajdonságokat használják fel egy hangsor strukturálására.

Egy másik fontos kutatási irány a hangsorok magasabb rendű struktúrájának szerepét vizsgálja. Ismét a beszédből kiindulva, tudjuk, hogy a szavak sokszor kifejezésekben jelennek meg, és mondatokat alkotnak. Vajon a lokális statisztikai tanulás milyen viszonyban áll a tágabb struktúra kiemelésével csecsemőknél? Az alábbiakban e kérdések megválaszolására végzett vizsgálatainkból adunk ízelítőt.

### RITMUSÉSZLELÉS A STATISZTIKAI TANULÁSON TÚL ÚJSZÜLÖTTEKNÉL

Újszülötteknél kimutatták, hogy képesek szabályosságokat kinyerni hangsorokból, mind az egyes hangok szabályos sorrendjének kiemelésével (lásd fentebb, az összefoglalót lásd Kushnerenko et al., 2013), mind pedig a hangsor idői periodicitásának kinyerésével (Winkler et al., 2009). Utóbbit a zenei irodalomban ritmus- vagy ütemérzékelésnek nevezik. Azonban a két különböző típusú szabályosság gyakran összekeveredik az azonos időközönként bemutatott hangokból álló (egyenletes ütemű) hangsorokban, mivel mind az átmeneti valószínűségekre alapuló statisztikai tanulás (hangsúlyos hangot mindig hangsúlytalan követ), mind az ütemérzékelés (a hangsúlyos és a hangsúlytalan hangok azonos idővel követik egymást) hatékony lehet a hangsúlyos és hangsúlytalan hangok rendszeres váltakozása esetén. Ennek a két folyamatnak az elkülönítéséhez egy elektroencefalográfiai (EEG) vizsgálatban (Háden et al., 2024) manipuláltuk a hangsorok bemutatásának egyenletességét, hogy elkülönítsük a statisztikai tanulást az ütemérzékeléstől alvó újszülötteknél, ahogy azt korábban felnőtteknél (Bouwer et al., 2016) és makákó majmoknál (Honing et al., 2018) már megtették. Egy felváltva hangsúlyos/hangsúlytalan hangsorozatot használtunk, amely egyenletes ütemben bemutatva erőteljes ütemérzetet idéz elő, de véletlenszerű időzítéssel nem kelti ugyanezt a benyomást. Ezután összehasonlítottuk a deviánsokkal kiváltott eltérési válaszokat (EV), attól függően, hogy a deviánsok hangsúlyos vagy hangsúlytalan pozíciókban jelentek-e meg a hangsorban. Az eredmények egyértelmű különbséget mutattak a hangsúlyos és hangsúlytalan pozíciók között az egyenletesen bemutatott hangsorban. Nem találtunk azonban ilyen különbséget a hangok sorrendjében azonos, de véletlenszerű időzítéssel bemutatott hangsorban. Ez az eredmény további bizonyítékot szolgáltat arra, hogy az ütemfeldolgozás újszülötteknél is megtörténik (Winkler et al., 2009), és a hangnak a hangsor ritmusában betöltött szerepe jelentősen befolyásolja a hang feldolgozását. Annak ellenére, hogy a statisztikai tanulás működését újszülötteknél több korábbi kísérlet ered-

ményei is alátámasztják (lásd fentebb; az összefoglalókat lásd Kujala et al., 2023; Winkler–Lukács, 2017), ebben a vizsgálatban nem találtunk erre bizonyítékot a véletlenszerű időzítéssel bemutatott hangsorok esetén: a deviáns hangok ekkor nem váltottak ki statisztikailag jelentős EV-t. Mivel a korábbi statisztikai tanulási vizsgálatok csecsemőknél egyenletes időzítéssel bemutatott hangsorokat alkalmaztak, a jövőben megvizsgálandó, hogy vajon az egyenletes időzítésű bemutatás hogyan támogatja a statisztikai tanulást csecsemőknél. Mindenesetre a jelen vizsgálat eredményei azt mutatják, hogy a ritmusérzékelés az újszülötteknél nem magyarázható kizárólag a hangok sorrendjének statisztikai tanulásával. Eredményeink arra utalnak, hogy a hangsorok idői szerkezetének kiemelése és a statisztikai tanulás valószínűleg kölcsönösen kiegészítik egymást a hangsorok észlelési/kognitív feldolgozásában és ezen belül a sorban várható hangok előrejelzésében.

*Átmeneti valószínűségek és tágabb struktúra feldolgozása újszülötteknél*

Vizsgálatunkban (Todd et al., 2022) két kakukktojás paradigmára adott agyi válaszokat hasonlítottunk össze. Az egyik a hagyományos változat volt, azaz a gyakori hosszú hangot időnként egy-egy rövidre cseréltük, vagy fordítva. A hangsorokat egyenletes ütemben mutattuk be kb. 40-40 perces hosszúságban. A másik kakukktojás paradigmában ugyanez a két hang szerepelt, és a hangok lokális valószínűsége is egyezett a hagyományos változattal. A különbség abban rejlett, hogy a másik hangsortípusban 4,2 percenként felcseréltük a gyakori és a ritka ingert. Azaz a hangsor első 4,2 percében a hosszú inger volt a gyakori, a rövid pedig a ritka, majd minden átmenet nélkül a rövid lett a gyakori, a hosszú pedig a ritka. A hangsorok négy ilyen ellentétes szakaszból álltak.

A kétfajta kakukktojás hangsor tehát tágabb struktúrájukat tekintve különbözött egymástól: míg az egyik teljes hosszában egynemű volt, a másik 4,2 percenként váltakozott. Bár a lokális átmeneti valószínűségek tekintetében a standard és a deviáns hang viszonya azonos volt a kétféle hangsorban, a tágabb struktúrát tekintve azonban a lokális deviánsok szerepe más és más volt. Az egynemű hangsorban a deviáns része volt a hangsor tágabb értelemben vett szerkezetének (többnyire az egyik, ritkábban a másik hang hallható), míg a váltakozó hangsorban a deviáns jelezte, hogy a tágabb struktúra (a váltakozó összetételű szakaszok) melyik elemét hallja éppen a csecsemő. Ha tehát eltérést találunk a ritka inger feldolgozását kísérő válaszokban, akkor az a tágabb struktúra hatását mutatja a hangsorok feldolgozására.

Meglepetésünkre a hosszú egynemű hangsor bemutatása alatt rögzített válaszok nem mutattak különbséget a gyakori és a ritka inger között. Ez ellentétben áll azokkal a korábbi vizsgálatokkal, melyekben a jelenhez hasonló egynemű ingersor bemutatásakor a ritka ingerekre adott válaszokban az EV-komponens jelenlétét mutatták ki. Ugyanakkor a váltakozó hangsorban a gyakori és a ritka ingerek a jelen vizsgálatban is eltérő válaszokat váltottak ki. Értelmezésünk szerint

az egynemű hangsorban az újszülöttek azért nem adtak eltérő választ a gyakori és a ritka ingerre, mert a jelen paradigmában sokkal hosszabb hangsort mutattunk be nekik (kb. negyven perc), mint ahogyan az a korábbi hasonló vizsgálatokban történt (tipikusan öt–tíz perc hosszú hangsorok). A hosszú hangsorban a deviáns egy idő után már nem hordoz új információt, pusztán megerősíti a tágabb struktúra fennállását. Ha tehát a csecsemők agya áttér ennek a tágabb struktúrának a reprezentációjára, akkor a lokális deviáns ingerek a tágabb struktúrában szabályosként értelmezhetők. Ez az eredmény azt sejteti, hogy születésünktől fogva agyunk a környezet szélesebb értelemben vett megértésére törekszik, és ennek alárendeli a lokális fluktuációk pontosabb leírását, kivéve, ha a pillanatnyi célunk szempontjából azok relevánsak.

A váltakozó hangsorokban a deviánsok a tágabb struktúra szakaszait jelölik, és ezért végig megmarad információs jelentőségük. Ezt az értelmezést támasztja alá, hogy amennyiben a csecsemők (és hasonlóképpen a felnőttek) agya felfedezi a hangsor tágabb struktúráját, akkor a hangsort ennek megfelelően dolgozza fel. Stefanics Gábor és szerzőtársai (2007) azt találták, hogy a felnőttekhez hasonlóan újszülött csecsemőknél sem jelenik meg az EV-komponens akkor, ha a kakukktojás paradigmában a ritka hang szabályos időközönként jelenik meg a gyakori hangok között (például AAAABAAAAB..., ahol 'A' a gyakori, 'B' pedig a ritka hangot jelöli). Eközben ugyanezeket a hangokat ugyanilyen arányban bemutatva a ritka hangok EV-t váltanak ki, amennyiben véletlenszerűen (nem bejósolható időközönként) jelennek meg.

Eredményünk tehát azt sugallja, hogy az átmeneti valószínűségeken alapuló statisztikai tanulás nem független a tágabb struktúra feldolgozásától. Sőt, a statisztikai tanulás már újszülött csecsemőknél is elsősorban megalapozza a tágabb struktúra kiemelését a hangsorokból. A beszédtanulásra átfordítva ez azt jelenti, hogy a csecsemők például a szavakat nem önmagukban, hanem egy-egy kifejezés vagy mondat részeként tanulják meg.

## ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KITEKINTÉS

Vizsgálataink eredményei egyértelműen arra mutatnak, hogy a statisztikai tanulás fontos szerepet tölt be a környezetből érkező, idői-sorrendi sorba rendezhető információk szerkezetének felderítésében, és az ezeken alapuló előrejelzések kialakításában. Különösen fontosnak látszik az az eredmény, mely szerint a statisztikai tanulás újszülött kori minősége előre jelzi az anyanyelv elsajátításának minőségét. Ugyanakkor a szűk értelemben vett statisztikai tanulás csak egy elem a különböző tanulási képességek rendszerében. Független tőle az ingerek idői struktúrájának felderítése, mely egyben segíti a statisztikai tanulást. A másik oldalon a statisztikai tanulás elősegíti az ingersorok magasabb rendű

szerkezetének kiemelését. A magasabb rendű szerkezet (hierarchia) felépítéséhez szükséges, hogy az agy teljes ingersorokat is képes legyen egységként kezelni. Ez lehetővé teszi azt is, hogy az egymást nem közvetlenül követő ingerek összefüggéseit is detektáljuk, és ezáltal ezekre is készülhessenek előrejelzések. Hozzá kell tenni, hogy a statisztikai tanulás fogalmának kiterjesztésével a cikkben vizsgált egyéb tanulási formákat is lehet statisztikai tanulásnak tekinteni, hiszen az idői struktúra is leírható statisztikai jellemzők segítségével, illetve az egység fogalmát az egyedi ingerről ingersorokra általánosítva a statisztikai tanulás az összetett struktúrák egymás közötti viszonyának leírásában is értelmezhető. Kérdés azonban, hogy az emberi agy ezekre a képességekre külön mechanizmusokkal rendelkezik-e, avagy egy általános statisztikai tanulási mechanizmust működtetünk, melyhez különböző előkészítő utak szolgáltatnak bemenetet.

Eredményeink alapján további kutatási kérdéseket lehet feltenni. Ilyen például az eltérő típusú hangok közötti összefüggések: hogyan változik a tanulási hatás, ha a hangmintázatok más típusú vagy összetettebb hangokra, például beszédre vagy zenei elemekre vonatkoznak, és vannak-e olyan jellemzők ezekben a hangkategóriákban, amelyek elősegítik vagy gátolják a tanulást? Hogyan befolyásolják a kontextuális tényezők, például a háttérzaj vagy a versengő hangforrások jelenléte a tanulás hatékonyságát? Milyen szerepet tölt be az ingermodalitások közötti egyezés a statisztikai tanulásban, illetve hogyan hasznosítható az egyik modalitásban (például hallásban) megtanult szabályosság egy másik modalitásban (például látás). Felmerül a hallási statisztikai tanulás összekapcsolása a cselekvés szervezésével. Milyen tanulási formák segítik elő a közös szinkronizált cselekvést?

Jövőbeli kutatásainkban arra is keressük a választ, hogy vannak-e kritikus vagy érzékeny időszakok a fejlődés során, amikor a statisztikai tanulás hatékonyabb vagy kevésbé hatékony, és ezek a periódusok hogyan kapcsolódnak a statisztikai tanulásban részt vevő különböző kognitív és idegi mechanizmusokéréséhez. Nagyon fontos a hosszú távú hatások kérdése is: vajon a korai életkorban alkalmazott hangmintázat-tanulási mechanizmusok befolyásolják-e a csecsemők későbbi kognitív fejlődését, például a beszédelsajátítást? E kérdések megválaszolása nagy előrelépést jelentene a tanulás és a gondolkodás kialakulásának megértésében: honnan indulunk, és mi teszi lehetővé a felnőttekre jellemző, a csecsemőkénél sokkal részletesebben vizsgált és leírt észlelési és kognitív működés kialakulását. Továbbá alvó újszülött csecsemőknél viszonylag tisztán vizsgálhatók a tanulás figyelmet és előzetes tudást nem igénylő folyamatai, melyek felnőtteknél csak közvetetten tanulmányozhatók. Másrészt a csecsemőkori tanulásról megszerzett ismeretek közvetlen gyakorlati célokat is szolgálnak: lehetőséget teremtenek az észlelési és tanulási készségek fejlesztésére, azaz a csecsemők észlelésének korai fejlesztésére irányuló terápiás vagy oktatási programok kialakítására. Az ilyen programokban nagy lehetőségek rejlenek, mert az agy plaszticitása ebben

az időszakban jelentősebb, mint a későbbi életkorokban. Ezért minél korábban történik meg egy célzott beavatkozás, annál nagyobb hatás várható tőle. Természetesen ehhez tudnunk kell, hogy melyek azok a korai folyamatok, melyek befolyásolják a későbbi, a mindennapi életben jelentős képességek alakulását, illetve a korai működés milyen eltérései jelzik előre a fejlődési problémákat. Kutatásaink során igyekszünk figyelembe venni mind a tudomány, mind pedig a gyakorlati alkalmazás lehetőségeinek szempontjait.

### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

E cikk megírásához támogatást nyújtott a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (ANN131305 pályázat T. B. számára, FK139135 H. G. P. számára és K147135 pályázat W. I. számára) és a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj (BO/00523/21/2 H. G. P. számára). A cikk a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-5-BME-429 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával (H. G. P. számára) készült.

### IRODALOM

- Aslin, Richard N. (2016): Statistical Learning: A Powerful Mechanism That Operates by Mere Exposure. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 8, 1–2, E1373. DOI: 10.1002/Wcs.1373, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5182173/>
- Barascud, Nicolas – Pearce, Marcus T. – Griffiths, Timothy D. et al. (2016): Brain Responses in Humans Reveal Ideal Observer-Like Sensitivity to Complex Acoustic Patterns. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 113, 5, E616–E625. DOI: 10.1073/pnas.1508523113m, <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1508523113>
- Bouwer, Fleur L. – Werner, Carola M. – Knetemann, Myrthe (2016): Disentangling Beat Perception from Sequential Learning and Examining the Influence of Attention and Musical Abilities on ERP Responses to Rhythm. *Neuropsychologia*, 85, 80–90. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2016.02.018m, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0028393216300549?via%3Dihub>
- Fiser József – Lengyel Gábor (2022): Statistical Learning in Vision. *Annual Review of Vision Science*, 8, 265–290. DOI: 10.1146/annurev-vision-100720-103343, <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-vision-100720-103343>
- Fitzgerald, Kaitlin – Todd, Juanita (2020): Making Sense of Mismatch Negativity. *Frontiers in Psychiatry*, 11, 468. DOI: 10.3389/fpsy.2020.00468, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsy.2020.00468/full>
- Fló, Ana – Brusini, Perrine – Macagno, Francesco et al. (2019): Newborns Are Sensitive to Multiple Cues for Word Segmentation in Continuous Speech. *Developmental Science*, 22, 4, e12802. DOI: 10.1111/desc.12802, [https://pure.manchester.ac.uk/ws/portalfiles/portal/85181273/Flo\\_DevSci2019\\_AAM.pdf](https://pure.manchester.ac.uk/ws/portalfiles/portal/85181273/Flo_DevSci2019_AAM.pdf)

- Friston, Karl (2005): A Theory of Cortical Responses. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B*, 360, 1456, 815–836. DOI: 10.1098/rstb.2005.1622, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1569488/>
- Gervain Judit (2018): Gateway to Language: The Perception of Prosody at Birth. In: Bartos Huba – den Dikken, Marcel – Bánréti Zoltán et al. (eds.): *Boundaries Crossed, at the Interfaces of Morphosyntax, Phonology, Pragmatics and Semantics*. Springer International Publishing AG, 373–384. DOI: 10.1007/978-3-319-90710-9\_23, [https://www.researchgate.net/publication/325968905\\_Gateway\\_to\\_Language\\_The\\_Perception\\_of\\_Prosody\\_at\\_Birth](https://www.researchgate.net/publication/325968905_Gateway_to_Language_The_Perception_of_Prosody_at_Birth)
- Gregory, Richard L. (1980): Perceptions as Hypotheses. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, B*, 290, 1038, 181–197. DOI: 10.1098/rstb.1980.0090
- Háden Gábor P. – Bouwer, Fleur L. – Honing, Henkjan et al. (2024): Beat Processing in Newborn Infants Cannot Be Explained by Statistical Learning Based on Transition Probabilities. *Cognition*, 243, 105670. DOI: 10.1016/j.cognition.2023.105670, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010027723003049?via%3Dihub>
- Háden Gábor P. – Németh Renáta – Török Miklós et al. (2015): Predictive Processing of Pitch Trends in Newborn Infants. *Brain Research*, 1626, 14–20. DOI: 10.1016/j.brainres.2015.02.048, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006899315001778?via%3Dihub>
- Honing, Henkjan – Bouwer, Fleur L. – Prado, Luis et al. (2018): Rhesus Monkeys (*Macaca mulatta*) Sense Isochrony in Rhythm, but Not the Beat: Additional Support for the Gradual Audiomotor Evolution Hypothesis. *Frontiers in Neuroscience*, 12, 475. DOI: 10.3389/fnins.2018.00475, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnins.2018.00475/full>
- Kujala, Teija – Partanen, Eino – Virtala, Paula et al. (2023): Prerequisites of Language Acquisition in the Newborn Brain. *Trends in Neurosciences*, 49, 9, 726–737. DOI: 10.1016/j.tins.2023.05.011, <https://tinyurl.com/bdeh9a59>
- Kushnerenko, Elena V. – Van den Bergh, Bea R. H. – Winkler István (2013): Separating Acoustic Deviance from Novelty During the First Year of Life: A Review of Event-Related Potential Evidence. *Frontiers in Psychology*, 4, 595. DOI: 10.3389/fpsyg.2013.00595, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2013.00595/full>
- Näätänen, Risto (1990): The Role of Attention in Auditory Information Processing as Revealed by Event-Related Potentials and Other Brain Measures of Cognitive Function. *Behavioral and Brain Sciences*, 13, 201–288. DOI: 10.1017/s0140525x00078407
- Pearce, Marcus T. – Müllensiefen, Daniel – Wiggins, Geraint A. (2010): The Role of Expectation and Probabilistic Learning in Auditory Boundary Perception: A Model Comparison. *Perception*, 39, 10, 1365–1389. DOI: 10.1068/p6507, <https://research.gold.ac.uk/id/eprint/5380/1/p6507.pdf>
- Saffran, Jenny R. – Newport, Elissa L. – Aslin, Richard N. (1996): Word Segmentation: The Role of Distributional Cues. *Journal of Memory and Language*, 35, 606–621. DOI: 10.1006/jmla.1996.0032, <https://tinyurl.com/ynsynxkk>
- Stefánics Gábor – Háden Gábor – Huotilainen, Minna et al. (2007): Auditory Temporal Grouping in Newborn Infants. *Psychophysiology*, 44, 697–702. DOI: 10.1111/j.1469-8986.2007.00540.x
- Suppanen, Emma – Winkler István – Kujala, Teija (2022): More Efficient Formation of Longer-Term Representations for Word Forms at Birth Can Be Linked to Better Language Skills at 2 Years. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 55, 101113. DOI: 10.1016/j.dcn.2022.101113, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878929322000561?via%3Dihub>
- Todd, Juanita – Háden Gábor P. – Winkler István (2022): Relevance to the Higher Order Structure May Govern Auditory Statistical Learning in Neonates. *Scientific Reports*, 12, 5905. DOI: 10.1038/s41598-022-09994-0, <https://www.nature.com/articles/s41598-022-09994-0>
- Tóth Brigitta – Velösy Péter K. – Kovács Petra et al. (2023): Auditory Learning of Recurrent Tone Sequences Is Present in the Newborn's Brain. *NeuroImage*, 281, 120384.

DOI: 10.1016/j.neuroimage.2023.120384, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1053811923005359?via%3Dihub>

- Winkler István (2015): Előbb az összetett, később az egyszerű: Csecsemők magasabb szintű hangfeldolgozási képességei a beszédértés előtti időszakban. *Magyar Pszichológiai Szemle*, 70, 4, 675–721. DOI: 10.1556/0016.2015.70.4.1, <https://real.mtak.hu/37475/1/0016.2015.70.4.1.pdf>
- Winkler István – Háden Gábor P. – Ladinig, Olivia et al. (2009): Newborn Infants Detect the Beat in Music. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 106, 7, 2468–2471. DOI: 10.1073/pnas.0809035106, <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.0809035106>
- Winkler István – Lukács Ágnes (2017): Beszédhangok észlelése csecsemőkorban: A statisztikai tanulás szerepe. In: Bánréti Zoltán (szerk.): *Általános Nyelvészeti Tanulmányok XXIX. Kísérletes nyelvészet*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 235–265. [https://real.mtak.hu/74396/1/anyt29\\_2017\\_10\\_31\\_\\_\\_nyomdai.pdf](https://real.mtak.hu/74396/1/anyt29_2017_10_31___nyomdai.pdf)