

STANISLAS DEHAENE

A rugalmas agy

TEST ÉS LÉLEK

SOROZATSZERKESZTŐ
KOVÁCS ILONA • PLÉH CSABA

STANISLAS DEHAENE

A rugalmas agy

MIÉRT TANULUNK
HATÉKONYABBAN,
MINT A GÉPEK?

FORDÍTOTTA
JAKABFFY ÉVA, JAKABFFY IMRE


TYPOTEX

A könyv megjelenését a Nemzeti Kulturális Alap
a kiadói program keretében támogatta



Nemzeti Kulturális Alap

Cet ouvrage, publié dans le cadre du Programme d'aide à la publication (P.A.P.)

Kosztolányi, a bénéficiaire du soutien de l'Institut français en Hongrie.

Ez a mű a Magyarországi Francia Intézet támogatásával

a Kosztolányi Könyvtámogatási Program (P.A.P.) keretében jelent meg.

**INSTITUT
FRANÇAIS**
BUDAPEST

Apprendre ! Les talents du cerveau, le défi des machines

Copyright © 2018 by Stanislas Dehaene. All rights reserved.

Hungarian translation © Jakabffy Éva, Jakabffy Imre, 2022

Hungarian edition © Typotex, Budapest, 2022

Engedély nélkül semmilyen formában nem másolható!

Lektorálta: Dr. Csépe Valéria

ISBN 978 963 493 186 7

ISSN 1417-6793

Kedves Olvasó!

Köszönjük, hogy kínálatunkból választott olvasnivalót!

Újabb kiadványainkról, akcióinkról a www.typotex.hu

és a [facebook.com/typotexkiado](https://www.facebook.com/typotexkiado) oldalakon értesülhet.

Typotex Kiadó

Alapította Votisky Zsuzsa, 1989

A kiadó az 1795-ben alapított Magyar Könyvkiadók
és Könyvterjesztők Egyesülésének tagja.

Felelős kiadó: Németh Kinga

Felelős szerkesztő: Mandl Orsolya

Tördelés: Fodor Gábor

Borítóterv: Kathi Zsolt

Nyomta és kötötte: Generál Nyomda Kft., Szeged

Felelős vezető: Hunya Ágnes

TARTALOM

Bevezetés	11
ELSŐ RÉSZ Mi a tanulás?	25
1. fejezet Hogyan tanulnak a neurális hálózatok?	29
2. fejezet Miért tanul jobban az agyunk, mint a gépek?	48
MÁSODIK RÉSZ Hogyan tanul az agyunk?	67
3. fejezet A láthatatlan tudás: a babák megdöbbentő intuíciói	71
4. fejezet Az agy születése	84
5. fejezet A tanultak megosztása	92
6. fejezet Az agyi újrahajszosítás	123
HARMADIK RÉSZ A tanulás négy pillére	143
7. fejezet A figyelem	147
8. fejezet Aktív bevonódás	171
9. fejezet Visszajelzés hiba esetén	189
10. fejezet Konszolidáció (megszilárdítás)	208

Következtetés A tanulás újragondolása az idegtudományok fényében	221
Köszönetnyilvánítás	229
Jegyzetek	231
Felhasznált irodalom	253
Képmelléklet	299

*Aurore-nak, aki ebben az évben született, és mindenkinek,
aki valaha is volt csecsemő*

Kezdjétek tanítványaitok alaposabb tanulmányozásán; mert egész bizonyos, hogy nem ismeritek őket eléggé...¹

Jean-Jaques Rousseau: *Emil vagy a nevelésről* (1762)

Furcsa és szinte mehökkentő dolog, hogy ismerjük az emberi test minden zugát, katalogizáltuk a bolygó összes állatát, leírtuk és elkereszteltük az összes fűszálat, ugyanakkor a pszichológiai technikákat évszázadok óta meghagytuk a maguk empirizmusában, mintha kisebb jelentőségűek lennének a kurzuslók, az állattenyésztők vagy a földművesek technikáinál.

Jean Piaget: *La pédagogie moderne*
(Modern pedagógia, 1949)

BEVEZETÉS

2009 szeptemberében megismerkedtem egy különleges gyermekkel, és ez a találkozás késztetett arra, hogy alaposan felülvizsgáljam a tanulással kapcsolatos elképzeléseimet. A brazíliavárosi Sarah Kórházba, egy Oscar Niemeyer hatását mutató fehér épületben működő neurológiai rehabilitációs központba látogattam el, amellyel laboratóriumom vagy tíz éve együttműködik. Az igazgató, Lucia Braga megkért, hogy találkozzam egyik betegével, Felipével, egy hétéves kislánnyal, aki életének felét a kórházban töltötte. Elmesélte, hogy a gyermeket négyéves korában eltalálta egy eltévedt golyó (ami sajnos nem ritka Brazíliában). A lövedék átvágta a gerincvelőjét, és mind a négy végtagja csaknem teljesen lebénult (*tetraparesis*). A golyó a látókérget is széttroncsolta, így teljesen megvakult. Légzésének megkönnyítése érdekében a légszövéhez a nyaka alján egy nyílást alakítottak ki. Az elmúlt három évben a gyermek egy kórházi szobában élt, tehetetlen testének korporsójába zárva.

A szobájához vezető folyosón lelkiileg felkészültem arra, hogy egy nagyon súlyos fogyatékos fogok látni. Aztán találkoztam... Felipével, egy kislánnyal, aki olyan volt, mint bármely hétéves: arca élettel teli, beszédes, minden érdekelte. Remekül, gazdag szókinccsel fejezte ki magát, és nagy huncutul francia szavakat kérdezett tőlem. Megtudtam, hogy rájong a nyelvekért, és soha nem hagy ki egyetlen alkalmat sem, hogy háromnyelvű szókincsét (portugál, angol és spanyol) gyarapítsa. Vak és ágyhoz kötött mivoltától a mesék írásába menekült, amire a Sarah Kórház csapata is ösztönözte. Néhány hónap alatt megtanulta lediktálni történeteit egy asszisztensnek, majd számítógéphez csatlakoztatott

billentyűzet és hangkártya segítségével leírni őket. A gyermekorvosok és a logopédusok egymást váltották ágya mellett, hogy műveit valódi tapintható, relief-rajzokkal illusztrált könyvekké alakítsák, amelyeket büszkén tapogattak ujjainak megmaradt, csekély érzőképességével. Története hősookról és hősnőkről, hegyekről és tavakról szólnak, amelyeket soha nem fog látni, de amelyekről éppúgy álmodik, mint bármely kisfiú.

A Felipével való találkozás felkavart, és arra ösztönzött, hogy agyunk talán legnagyobb tehetségével kezdjek el foglalkozni: a tanulással. Ez a gyermek ékes példáját mutatta a reménynek, egyúttal kihívást is jelentett az idegtudósok számára. Hogyan tudnak ellenállni a kognitív képességek ilyen fokú károsodásoknak? Függetlenül az élet viszontagságaitól, hogyan próbál utat törni magának a tanulási képesség szinte minden emberben azonos módon? Számos idegtudós empirista: a felvilágosodásra nagy hatást gyakorló angol filozófussal, John Locke-kal (1632–1704) együtt úgy vélik, hogy az agy a környezetéből nyeri tudását. Szerintük az agykérgi áramkörök legfőbb tulajdonsága plaszticitásuk, alkalmazkodóképességük. Valóban, az idegsejtek folyamatosan módosítják szinapszisaikat a kapott bemenetek függvényében. De akkor Felipének, aki meg van fosztva a látás és a mozgás révén beérkező információktól, gyökeresen más lénynek kellene lennie. Milyen csoda folytán alakultak ki nála kifejezetten normális kognitív képességek?

Felipe esete egyáltalán nem elszigetelt: széles körben ismert Helen Keller vagy Marie Heurtin története, akik siketvakok voltak, de megtanulták a jelnyelvet, majd társadalmi életet élő felnőttekké váltak.²

A könyv lapjain további embereket is bemutatok, akiknek az esete reményeim szerint megkérdőjelezi az olvasó tanulással kapcsolatos esetleges előítéleteit. Emmanuel Giroux például 11 éves kora óta vak, de kiváló matematikus, aki szerint „mindazt, ami a geometriában alapvető, csak a szellem látja jól, a szemnek láthatatlan”. Hogyan tud eligazodni az algebrai geometriában, síkokkal, gömbökkel és sokszögekkel foglalatlanok nélkül, hogy valaha is látná őket? Kiderül majd, hogy ugyanazokat az agyi áramköröket használja, mint más matematikusok, de látókérgét, amely korántsem inaktív, szintén újrahasznosította a matematika műveléséhez.

Bemutatom majd Nicót is, a fiatal festőt, aki a párizsi Marmottan Múzeumban tett egyetlen látogatása során kiváló másolatot készített Monet híres festményéről, *A felkelő nap impressziójáról* (lásd az 1. ábrát a képmellékletben). Mi ebben a kivételes? Semmi, hacsak nem az, hogy

Nicónak egyetlen agyféltekéje van, a bal – hároméves korában szinte a teljes jobb féltekéjét eltávolították! Nico agya azonban alkalmazkodott ehhez a helyzethez, így összes képessége a megmaradt bal féltekébe került, kezdve a beszédétől az íráson, olvasáson, rajzoláson, festésen és informatikán át a vívásig, amelyben a nemzetközi kerekesszékes versenyek egyik bajnoka. Felejtünk el mindent, amit a két félteke szerepéről tudni vélünk, mert Nico esete azt bizonyítja, hogy a jobb félteke segítségével nélkül is lehet valaki művész: az agyi plaszticitás csodákra képes!

Meglátogatjuk a baljós emlékezetű bukaresti árvaházakat is, ahol a gyermekek születésüktől kezdve szinte teljesen elhagyatva éltek – mégis néhányan, akiket egy- vagy kétéves koruk előtt örökbe fogadtak, évekkel később csaknem normális iskolai pályát futottak be.

Mindezek a példák az emberi agy rendkívüli ellenálló képességét szemléltetik: a tanulás szikráját még olyan súlyos traumák sem tudják kioltani, mint a vakság, az egyik agyfélteke elvesztése vagy a társadalmi elszigeteltség. Nyelv, olvasás, matematika, művészi alkotás: az emberi faj összes kivételes képessége, amellyel egyetlen más főemlős sem rendelkezik, ellenáll az egyik agyfélteke, a látás vagy a mozgásképesség elvesztésének. Egyszóval a tanulás létfontosságú elv – az emberi agynak pedig óriási a rugalmassága, képes megváltoztatni magát és alkalmazkodni. Ugyanakkor felfedezünk majd drámai ellenpéldákat is, ahol a tanulási képesség, úgy tűnik, kihuny. Vegyük a tiszta alexiát, vagyis azt, hogy valaki képtelen egyetlen szót is elolvasni. Személyesen vizsgáltam meg több felnőttet, valaha kiváló olvasókat, akik egy apró, az agy nagyon kis területére korlátozódó stroke miatt még olyan egyszerű szavakat sem tudtak kibetűzni, mint például a „te” vagy a „tó”. Emlékszem egy ragyogóan okos, három nyelven beszélő hölgyre, a *Le Monde* hűségese olvasójára, aki azon kesergett, hogy agysérülése óta a napilap minden oldala megfejtethetetlen hieroglifáknak tűnik számára. Motivációja, hogy újból megtanuljon olvasni, csak elveszettségéhez volt mérhető. De még kétévnyi erőfeszítést követően sem tudta meghaladni a kezdő első osztályosok olvasási szintjét, amely betűről betűre botladozik, és elakad minden szónál. Miért nem tudott tanulni többé? És miért mutatják bizonyos diszlexiás, diszkalkuliás vagy diszpraxiás gyermekek ugyanezt a vakságot az olvasás, a számolás vagy a mozdulatok terén?

Az agyi plaszticitás szeszélyesnek tűnik: néha óriási hiányosságokat küzd le, néha viszont sorsára hagy motivált, intelligens, de bizonyos, tartósan tűnő hiányosságokkal sújtott gyermekeket és felnőtteket. Ta-

lán speciális agyi áramköröktől függ? Vajon felnőttkorban bezárulnak? Meg lehet-e újra nyitni őket? Milyen szabályok irányítják? Hogyan lehet a gyermek agya születésétől kezdve egész fiatalsága alatt ennyire hatékony? Milyen algoritmusokat ültetett az evolúció agyi áramköreinkbe, hogy azok le tudják képezni a külvilágot? Megértésük lehetővé tenné-e, hogy jobban és gyorsabban tanuljunk? Vajon ihletet meríthetünk-e belőlük arra, hogy hatékonyabbá tegyük a gépeket, a mesterséges intelligenciát, amely végső soron minket fog utánozni vagy akár felül is múl? Többek között ilyen kérdésekre kísérel meg választ adni ez a könyv multidiszciplináris nézőpontból, a kognitív tudomány és az idegtudomány felfedezéseire támaszkodva, valamint a mesterségesintelligencia- és az oktatáskutatás adatainak felhasználásával.

MIÉRT LÉTEZIK TANULÁS?

Miért kell tanulnunk? A tanulási készség pusztán léte is kérdéseket vet fel. Nem lenne jobb, ha gyermekeink az első naptól kezdve tudnák, hogyan kell beszélni és gondolkodni, mint Pallasz Athénéé, aki a legenda szerint fegyverrel és sisakban, csatakiáltással ugrott elő Zeusz fejéből? Miért nem születünk előre huzalozottan, programozott szoftverrel és a túléléshez szükséges összes tudással? Az életért folytatott darwini küzdelemben vajon nem egy éretten született, másoknál többet tudó élőlény volna a nyertes? Miért találta fel az evolúció a tanulást?

Válaszom egyszerű: az agy teljes előhuzalozása nem lehetséges és nem is kívánatos. De tényleg lehetetlen? Igen, mert ha a DNS-nek meg kellene határoznia tudásunk minden részletét, akkor egyszerűen nem lenne meg hozzá a szükséges tárolási kapacitása. A 23 kromoszómánk hárommilliárd pár A, C, G, T betűt tartalmaz (adenin-, citozin-, guanin- és timinmolekulák). Vajon ez mekkora információmennyiség? Az információt bitekben mérjük: bináris döntés, 0 vagy 1. Mivel a genom kódjának mindkét betűje 2 bit (ezeket kódolhatjuk 0 0-val, 0 1-gyel, 1 0-val és 1 1-gyel), ez összesen hatmilliárd bit – de vigyázat, a mai számítógépeken byte-okban számolunk, amelyek 8 bites szekvenciák. Az emberi genom tehát mintegy 750 megabyte-ra csökken – nem több, mint egy CD-ROM vagy egy kis USB-pendrive tartalma! És ez

az elemi számítás még nem veszi figyelembe a DNS-ünkben szerte előforduló redundanciákat sem.

Ebből az evolúció több millió éve alatt átöröklődött szerény információmennyiségből genomunk, mely kezdetben egyetlen sejtre, a megtermékenyített petesejtre korlátozódott, képes az egész testet megszervezni – májunkt, vesénk, izmaink minden egyes sejtjének összes molekuláját, és természetesen agyunkét is: 86 milliárd idegsejtet, ezerbillió összeköttetést. Hogyan is tudná egyenként meghatározni őket? Feltéve, hogy az összes kapcsolat csak egy bitet kódol – ami minden bizonnyal alábecslés –, agyunk kapacitása 100 terabyte (kb. 10^{15} bit), vagyis százezerszer nagyobb, mint a genomunkban található információ mennyisége. Paradoxon: agyunk, ez a fantasztikus palota, százezerszer több részletet tartalmaz, mint az építész terve! Csak egy magyarázatot látok: a nagy vonalak az építész (genomunk) iránymutatásai szerint épültek ki, míg a részletek a projektmenedzserre maradtak, aki hozzáigazította azokat a környezethez. Az emberi agy előzetes, minden részletre kiterjedő huzalozása semmiképp sem lehetséges, ezért a gének munkáját a tanulásnak kell kiteljesítenie.

Ez az egyszerű számításra épülő érv azonban nem elég annak megmagyarázására, hogy a tanulás miért általánosan elterjedt az állatvilágban. Tekintsünk olyan egyszerű, agykéreg nélküli szervezeteket, mint a földigiliszták, a gyümölcslegyek vagy a tengeri uborkák: nem egy viselkedésük még nekik is tanult. A *C. elegans* nevű kis féreg – más néven fonálféreg – rövid idő alatt a laboratóriumok sztárjává vált. Ez a szervezet hihetetlen mértékben előre huzalozott: a legtöbb egyed pontosan 959 sejtet tartalmaz, köztük 302 idegsejtet, amelyek valamilyeni összeköttetése ismert és reprodukálható. De még ez a faj is tanul.³ A kutatók kezdetben egyfajta automatának tekintették, amely alig tud előre- vagy hátraúszni, de aztán rájöttek, hogy legalább kétféle tanulási formával rendelkezik: a habituációval (megszokás) és az asszociációval (társítás). A habituáció azt jelenti, hogy a test alkalmazkodik az inger ismételt jelentkezéséhez (például egy molekulához a vízben), és végül már nem reagál rá. Az asszociáció viszont annak felfedezése és emlékezetbe vésése, hogy a környezet mely vonatkozásai jeleznek előre élelmiszer- vagy veszélyforrásokat. A fonálféreg asszociációs bajnoknak bizonyult: képes emlékezni arra, hogy az adott íz, illat vagy

hőmérséklet a múltban milyen táplálékkal (baktériumokkal) vagy undort keltő molekulákkal (fokhagymaszag) társult, és ezen információk alapján választja meg útját a környezetében.

Mivel a fonálféregnek kis számú idegsejtje van, lehetett volna teljesen előhuzalozott is. De mégsem az, aminek az az oka, hogy túlélése szempontjából előnyösebb alkalmazkodnia azokhoz a sajátos körülményekhez, amelyekben életre kel. Még a genetikailag azonos szervezetek sem találkoznak okvetlenül ugyanolyan környezettel. Mindegyiküknek jobb, ha gyorsan alkalmazkodnak a meglehetősen kiszámíthatatlan fel-tételekhez. A természetes szelekció, e Darwin által leírt algoritmus révén alkalmazkodnak az egyes szervezetek az ökológiai fülkékükhöz (*niche*), de ezt kínos lassúsággal teszik: nem alkalmazkodó egyedek nemzedékeinek kell kihalniuk, mígnem a kedvező mutáció elkezd növelni a túlélési esélyeket. A tanulási képesség sokkal gyorsabban működik: néhány perc alatt megváltoztathatja a viselkedést. És ez teszi a tanulást annyira érdekessé: általa a lehető leghamarabb lehet alkalmazkodni a kiszámíthatatlan körülményekhez.

A tanulás nem más tehát, mint az evolúció találmánya. Nemzedékek során „felfedezte”: a test bizonyos paraméterei esetében hasznos lehet engedni, hogy gyorsan változhassanak, így jobban tudnak alkalmazkodni a környezet leginkább változó jellemzőihez. A világ fizikájának egyes jellemzői szigorúan kötöttek: a gravitáció egyetemes, a fény vagy a hangok terjedése a levegőben nem változik egyik napról a másikra. Ezért aztán szerencsére nem kell megtanulnunk, hogyan kell kinövesztetni a fülünket, a szemünket vagy a testünk gyorsulását mérő egyensúlyi rendszer labirintusait: testünk és agyunk mindezen tulajdonságai genetikailag kódoltak. Másrészt a szemeink távolsága, a végtagjaink súlya és hossza vagy a hangmagasságunk egyénenként eltérő: mindezekhez agyunknak meg kell tanulnia alkalmazkodni. Gondolkodásunk kompromisszum eredménye: sok a velünk született elem (az összes nagy intuitív kategória, amellyel a világot képekre, hangokra, mozgásokra, tárgyakra, állatokra, emberekre, okokra és okozatokra osztjuk fel), de mégis több a tanult, amely ezeket a korai képességeket finomítja.

Az emberi faj specialitásává vált a tanulás. Agyunkban paraméterek milliárdjai alkalmazkodhatnak szabadon környezetünkhöz, nyelvünkhöz, kultúránkhöz, rokonainkhoz, ételeinkhez stb. Az evolúció pontosan meghatározta, hogy agyunkban mely agyi áramkörök vannak előre huzalozva, és melyek nyitottak a környezetre. Fajunk esetében a tanulás

részesedése különösen nagy, mert gyermekkorunk hosszú évekre kitolódott. A nyelv és a matematika segítségével hipotéziseink tere potenciálisan végtelen kombinációvá sokszorozódik – még akkor is, ha ezek mind evolúciónk során örökölt rögzített, változatlan alapokon nyugszanak.

HOMO DOCENS

Ha egyetlen szóval kellene összefoglalnom fajunk különleges tehetségét, a „tanulás” főnevet választanám. Nem egyszerűen *Homo sapiensek* vagyunk, hanem *Homo docensek*, mert amit a világról általában tudunk, annak nagy része nem adott a számunkra: a környezetünktől vagy a körülöttünk lévő személyektől tanultuk meg. Egyetlen állatfaj sem tudta hozzánk hasonlóan felfedezni a természet világának titkait. A tanulás rendkívüli rugalmasságának köszönhetően fajunknak sikerült elhagynia szavannai szülőföldjét, átkelnie a sivatagokon, a hegyeken, az óceánokon, és mindössze néhány ezer év alatt meghódítania a legtávolabbi szigeteket, a legmélyebb barlangokat, a jégmezőket, sőt még a holdat is. A tűzgyújtástól és az eszközök készítésétől kezdve a mezőgazdaság, a hajózás feltalálásán át az atommaghasadás előidézéséig az emberiség története állandó felfedezés. Mindezeknek a diadaloknak a forrása egyetlen titok: agyunk rendkívüli képessége révén képesek vagyunk hipotéziseket megfogalmazni és kiválasztani közülük azokat, amelyeket a környezetünkről alkotott szilárd tudássá alakítunk.

Az emberiség története során arra is rájött, hogy e figyelemre méltó tanulási képességünk fokozható, méghozzá az oktatás segítségével. Az aktív pedagógia fajunk jellemzője: egyetlen állat sem áldoz időt arra, hogy új készségeket tanítson utódainak, miközben aktív figyelmet fordít nehézségeikre és hibáikra. Az iskola mint találmány azzal, hogy az összes emberi társadalomban jelen lévő informális oktatást rendszerbe foglalta, megtízszerezte agyi potenciálunkat. Megértettük: ki kell aknáznunk a gyermeki agynak ezt a mérhetetlen plaszticitását, hogy a lehető legtöbb információt és készséget plántálhassuk belé. Az évszázadok folyamán iskolarendszerünk hatékonyságát tovább javítottuk azáltal, hogy a képzés egyre korábban kezdődik, és legalább tizenöt évig tart. Emellett mind többen és többen részesülhetnek a felsőfokú oktatásból, ami valóságos „neurális finomítóként” működik, ahol az agyi áramkörökből a lehető legjobb eredményt lehet kihozni.

Ma a közoktatás agyunk egyfajta „gyorsítójaként” is felfogható. Hogy miért foglal el olyan kitüntetett helyet az állam kiadási tételei között, az könnyen indokolható: nélküle agykérgi áramköreink csiszolatlan gyémántok maradnának. Modern társadalmaink összetettsége annak a számos fejlesztésnek tudható be, amelyeket az agykéreg az oktatásnak köszönhet: olvasás, írás, számolás, algebra, zene, idő- és térérzék, az emlékezet finomítása stb. Tudjuk-e például, hogy egy írástudatlan személy rövid távú memóriájának kapacitása – a szótagok vagy számjegyek száma, amelyeket meg tud ismételni – csupán feleakkora, mint egy iskolázotté?

TANULJUNK TANULNI!

Az oktatás megsokszorozza agyunk amúgy is jelentős képességeit – de lehetne-e javítani rajtuk? Az iskolában, az egyetemen és a munkahelyen, egyre gyorsabb alkalmazkodásra kényszerítve, agyunk tanulási algoritmusaival zsonglörködünk. Csakhogy ezt intuitív módon tesszük, anélkül, hogy valaha is megtanultuk volna, hogyan kell tanulni! Senki sem magyarázta el nekünk azokat a szabályokat, amelyek alapján agyunk az emlékezetbe vés és megért dolgokat, vagy éppen ellenkezőleg, felejt és téveszt. Kár, mert az adatok bőségesek. A brit Education Endowment Foundation (EEF) által létrehozott kiváló weboldal felsorolja azokat az oktatási módszereket, amelyek valóban működnek.⁴ Ezek közül az egyik leghatékonyabb a metakogníció, azaz saját kognitív működésünk jobb ismerete. Az iskolai siker egyik legfontosabb tényezője a tanulni tudás.

Az elmúlt harminc évben jelentős előrelépés történt az agy plaszticitásának és a tanulás alapjainak megértése terén. A memória működése, a figyelem szerepe, az alvás fontossága megannyi felfedezés, amelyek mindannyiunkra nézve számos következményt vonnak maguk után. A könyv végére érve remélem, hogy sokkal többet tud majd az olvasó saját tanulási folyamatairól. Alapvetőnek tartom, hogy minden gyermek és felnőtt teljes mértékben ráébredjen saját agyának lehetőségeire – és természetesen korlátaira is. A kortárs kognitív tudományok azzal, hogy szisztematikusan boncolgatják mentális algoritmusainkat és ezek agyi mechanizmusait, újból eljutnak a híres szókratészi mondáshoz: „Ismerd meg önmagad!” Ma már nem az önmegfigyelés járja, hanem a gondolatainkat létrehozó finom idegi mechanizmus jobb megisme-

rése, hogy azt egyre inkább kézben tarthassuk és ízlésünk, igényeink szolgálatába állíthassuk.

És természetesen gondolkodom a tanulás szakembereire is: a tanítókra és a tanárookra. Mély meggyőződésem szerint nem lehet megfelelően tanítani anélkül, hogy implicit vagy explicit módon mentális modellünk lenne arról, mi zajlik a tanuló elméjében, milyenek az intuíciói, helyesek vagy tévesek, milyen szakaszokon kell végigmennie a fejlődéshez, és milyen tényezők segítik képességeinek kibontakoztatásában.

Az életet minden gyermek hasonló felépítésű aggyal kezdi. Ezért mindenfajta tanítás során, amennyiben hatékonyak akarunk lenni, tiszteletben kell tartani bizonyos alapelveket. Ebben a könyvben számos példát áttekintünk majd. Az igen kis gyermekek nyelvi, számtani, logikai vagy valószínűségbecslési készségei olyan korai, elvont intuíciók létezését támasztják alá, amelyekre a tanításnak építenie kell. A fejlődési eltérések – mint például a diszlexia, a diszkalkulia, a diszpraxia vagy a figyelemzavarok – valódisága már nem kétséges, ahogy léteznek módszerek ezek mérésére és ellensúlyozására is. A könyv egyik célja e tudás hatékonyabb terjesztése, hogy minden tanár és szülő levonhassa a maga számára a következtetéseket, és ezekhez igazíthassa tanítási módszereit.

A GÉPEK KIHÍVÁSA

Az emberi intelligencia ma új kihívással szembesül: immár nem az egyetlen, ami tanulni képes. Az algoritmusok minden tudásterületen kihívást jelentenek fajunk számára, mert elsajátítják – néha még nálunk is jobban – az arcok vagy hangok felismerését, a beszéd átírását, az idegen nyelvek fordítását, a gépek vezérlését, sőt még a sakkot vagy a go játékot is. Ma a *machine learning* (gépi tanulás) több milliárd dolláros iparággá vált, amelyet egyre inkább az agyunk működése inspirál. Hogyan működnek ezek a mesterségesintelligencia-algoritmusok? Segítenek-e nekünk az alapelveik megérteni, mi a tanulás? Sikerül-e már utánozniuk agyműködésünket, vagy még mindig sokat kell tanulniuk?

Ebben a könyvben teljes fejezetet szentelek ezeknek a kérdéseknek. Noha a számítógép-tudomány jelenlegi fejlődése lenyűgöző, határai világosak. A hagyományos mélytanulási algoritmusok agyunk működésének csak egy kis részét utánozzák: azt, amely megfelel a szenzoros feldolgozás első lépéseinek, ama nevezetes 200 vagy 300 milliszekun-

dumnak, amely alatt agyunk nem tudatos módban működik. Nem arról van szó, hogy ez a feldolgozás megmaradna felszínesnek: a másodperc törtrészában agyunk nemcsak felismer egy arcot vagy szót, hanem képes azt összekapcsolni egy háttérrel, megérteni, vagy egy kisebb mondatba illeszteni. Ez azonban szigorúan alulról felfelé építkező – *bottom-up* –, azaz adatvezérelt, gondolkodáshoz nem kötött folyamat.

Csak a második, sokkal lassabb, tudatosabb és gondolkodóbb szakaszban képes agyunk az érvelés, a következtetés és a rugalmasság kiaknázására, és e téren a mai gépek még mindig igencsak le vannak maradva. Csupán bizonyos számítógépes architektúrák kezdik létrehozni a maguk számára a világ absztrakt modelljeit.

A jelenlegi algoritmusok még kedvenc területük, a gyors mintázatfelismerés kapcsán is felvetnek egy második problémát: sokkal kevésbé hatékonyak agyunknál. A *machine learning* ma úgy néz ki, hogy egy számítógép több millió vagy akár több milliárd alkalommal is próbálkozik. Ennél minden kisbaba sokkal jobban teljesít – egy új szó elsajátításához csak egy-két ismétlésre van szüksége. Az adatgazdaságosság még mindig idegen a számítógépektől. Számukra a *machine learning* a *big data* szinonimája: adatok tömkelege nélkül az algoritmusok nehezen tudnak absztrakt ismereteket kihámozni és azokat új helyzetekre általánosítani. Röviden, e gépek az adatokat messze nem a leghatékonyabban használják fel.

Agyunk működése viszont közelít az optimálishoz: gyakran a legkisebb megfigyelésből is ki tudja nyerni a lényegét. Ha a számítógéptudósok ugyanazt a teljesítményt akarják elérni, meríteniük kell abból a számtalan tanulási trükkből, amelyet az evolúció épített be agyunkba: ilyen például a figyelem, amely lehetővé teszi, hogy kiválasszunk és felerősítsünk egy releváns információt; vagy az alvás mint egyfajta algoritmus, amellyel agyunk az előző napon tanultakat összegzi. Mára már napvilágot láttak a hasonló tulajdonságokkal felszerelt új gépek, amelyek teljesítménye egyre nő – a közeljövőben ezek kelnek majd versenyre agyunkkal.

De egy valódi általános mesterséges intelligencia eléréséhez valószínűleg a számítógépeink felépítésének alapelveit is felül kell vizsgálnunk, mivel az emberi agy, más fajokéval ellentétben, nagyon speciális algoritmusokkal rendelkezik a külvilágról alkotott elméletek megfogalmazására. A „gondolat nyelvének” segítségével, a valószínűségek elmélete alapján módszeresen fel tudja tárni az összes lehetséges szabály összes kombinációját.

Matematikai tétel bizonyítja: csak a valószínűségek, azaz a tanultakkal kapcsolatos bizonytalanságokra építő műveletek manipulálása teszi lehetővé, hogy minden információból a lehető legtöbbet nyerjük ki. Úgy tűnik, agyunk felfedezte azt a trükköt, hogy folyamatosan nyomon követi az egyes információkkal kapcsolatos bizonytalanságokat, és azokat minden egyes tanulás során frissíti.

Ezt nevezik a statisztikus agy elméletének: a valószínűségek manipulálása révén optimalizálja agyunk a tanulási képességét. E hipotézist számos kísérleti adat is alátámasztja. Még a csecsemők is megértik a valószínűségeket, amelyek mélyen be vannak vésődve agyi áramköreinkbe. Úgy tűnik, hogy minden gyerek tudóspalántaként viselkedik, mindezt anélkül, hogy tudná, agya hipotéziseket fogalmaz meg, valódi tudományos elméleteket, amelyeket minden újabb tapasztalatával tesztl. A valószínűségekkel kapcsolatos okoskodás szintén nem tudatos, de mélyen beépült a tanulás logikájába, és lehetővé teszi a hamis hipotézisek fokozatos elvetését, azt, hogy csak a működő elméletek őrződjenek meg.

Ma a bayesinek nevezett új algoritmusok – amelyeket Thomas Bayes matematikusról és tiszteletesről neveztek el (aki a 18. században vázolta valószínűségszámítási elméletét) – kezdik formalizálni és megvalósítani a tanulás ezen új elképzelését. Fogadni mernék arra, hogy ezek az algoritmusok forradalmasítják a *machine learninget*, hisz lassan már a tudósokhoz mérhető hatékonysággal képesek absztrakt információk kinyerésére.

*

Vizsgáljuk meg tehát, mit értünk ma tanulás alatt. Azt javaslom, tegyünk egy utazást, három állomással.

A *Mi a tanulás?* című első részben a tanulás jelenlegi elméleteit tekintjük át, figyelembe véve azok konkrét megvalósítását a számítógépekben. Ez egyben alkalmat kínál arra, hogy meghatározzuk, mit jelent a tanulás. Ha összehasonlítjuk a számítógépes algoritmusok teljesítményét agyunkéval – *in silico* az *in vivo*val szemben –, belátjuk majd, hogy az optimális tanulásnak a valószínűségek és a statisztikák észszerű felhasználására kell támaszkodnia. A „minden velünk született” és a „minden szerzett” között megjelenik egy új modell: a bayesi agy modellje, egy valóságos neurális statisztikus. Ezen elmélet szerint génjeink a fejlődő agyban *a priori* feltevések hatalmas tereit hozzák létre, valamint mechanizmusokat, amelyek lehetővé teszik azok adap-

tálását a külvilágból jövő bemenetekhez – és agyunk e hipotézisek közül választja ki azokat, amelyek a külvilághoz a legjobban illeszkednek.

De valóban megfelel ez az elmélet agyunk működésének? A *Hogyan tanul az agyunk?* című második részben az emberi csecsemő bölcsője fölé hajolunk; igazi kis tanuló gép, akit gyakran utánzunk, de soha nem érünk fel vele. A legfrissebb adatok azt mutatják: a gyermek valóban statisztikuspalánta, ahogyan a Bayes-féle elmélet előre jelzi. Káprázatos intuíciói a nyelv, a geometria, a számok vagy a statisztika területén megerősítik, hogy egyáltalán nem „üres lap” vagy *tabula rasa*. A gyermek idegi áramkörei születésétől kezdve jól szerveződnek és hipotéziseket vetnek fel a külvilággal kapcsolatban. De jelentős bennük a plaszticitás is, ami a sejtszintű módosulások állandó pezsgésében nyilvánul meg. Ebben a statisztikus gépben a veleszületett és a tanult korántsem elentétes, hanem kombinálódik egymással. Az eredmény egy jól szervezett és formálható rendszer, amely képes az önjavításra agykárosodás esetén, valamint az agyi hálózatok újrahatszámítására olyan készségek elsajátítása érdekében, mint például az olvasás megtanulása vagy a matematika művelése.

A tanulás négy pillére című harmadik részben néhány olyan trükköt ismertetek, amelyek agyunkat a tanulás ma ismert leghatékonyabb eszközévé teszik. Négy alapvető mechanizmus nagymértékben módosíthatja tanulási képességünket. Először is a figyelem: idegi áramkörök együttese, amelyek kiválasztják, felerősítik és terjesztik az általunk fontosnak értékelt jeleket, és megszámszorozzák vagy akár -ezerszerzik azok képviselőjét a memóriánkban. Másodszor az aktív bevonódás: egy passzív szervezet szinte semmit sem tanul, mert a tanuláshoz az szükséges, hogy az agy kíváncsian és aktívan hipotéziseket alkosson. Harmadik téma, egyben az aktív bevonódás természetes kiegészítése: a hiba és a meglepetés jelzései. Ezek azok, amelyek az egész agyban szétterjedve kijavítják mentális modelljeinket, kiiktatják a nem megfelelő hipotéziseket, és meghagyják a leghelyesebbeket. Végül a negyedik tényező a konszolidáció, avagy megszilárdítás: agyunk idővel összegyűjti mindazt, amire szert tett, és átvizsgálja a hosszú távú memóriába, hogy a további tanuláshoz erőforrásokat szabadítson fel. Az ismétlés alapvető szerepet játszik az emlékek megszilárdításában. De kitüntetett szerepe van e folyamaton belül az alvásnak is, amely távolról sem a tétlenség időszaka, mivel ilyenkor az agy átismétli és újrakódolja mindazt a tudást, amire a nap során szert tett.

Ezek a tényezők univerzálisak: legyen szó csecsemőről, gyermekről vagy felnőttéről, életkortól függetlenül, mindvégig alapvetően befolyásolják a tanulási képességet. Ezért kell megtanulnunk kézben tartani őket. Végül visszatérek e tudományos eredmények következményeire. Szokásaink megváltoztatása az iskolában, otthon vagy a munkahelyen nem feltétlenül olyan bonyolult, mint gondoljuk. A játékkal, az örömmel, a kíváncsisággal, a szocializációval, a figyelem összpontosításával vagy az alvással kapcsolatos igen egyszerű ötletek továbbfejleszthetik agyunk amúgy is legfőbb tehetségét: a tanulást.

ELSŐ RÉSZ
MI A TANULÁS?

Az intelligenciát felfoghatjuk úgy, mint a nyers információk hasznos és kiaknázható ismeretökké alakításának képességét.

Demis Hassabis, a DeepMind alapítója (2017)

Mit jelent az, hogy tanulni? Ennek az igének a latin gyökere ugyanaz, mint az *appréhendre*-nak: „megfog, elkap, megragad”. Tanulni tehát annyi, mint gondolkodással megragadni: magunkban hordozni a valóság egy darabját, a világ szerkezetének egy modelljét. Ahogyan a DeepMind igazgatója és az egyik legaktívabb mesterségesintelligencia-kutató, Demis Hassabis megjegyzi: tanulás az, amikor az információt hasznos és kiaknázható ismeretvé alakítjuk át. A tanulás révén az érzékszerveinket érő nyers adatok absztrakt gondolatokká alakulnak át, amelyek annyira kifinomultak és általánosak, hogy új helyzetekben is felhasználhatjuk őket. A kognitív tudományokban ezeket nevezzük *belső modellek*nek.

A következő oldalakon áttekintjük, amit a mesterséges intelligencia és a kognitív tudományok tanítottak nekünk a belső modellekről és arról, hogyan alakulnak át ezek a tanulás során. Először a hagyományos neurális hálózatokat, más néven ideghálózatokat vizsgáljuk, ezeket az agy által ihletett számítógépes modelleket. Hogyan tudják beállítani paramétereiket a külvilág modellezéséhez? Látni fogjuk, hogy sikereik ellenére eddig az emberi agy képességeinek csak a töredékét tudták utánozni. A nyelvhez és a matematikához sokkal több kell egy neurális hálózatnál: igazi belső nyelvre van szükség, amely képes a fogalmakat kombinálni, és e kombinációkat statisztikai plauzibilitásuk szerint kiválogatni. Ebből egy olyan statisztikus agy víziója tárul elénk, amely a tudóshoz hasonlóan hipotéziseket fogalmaz meg, és a kapott adatok alapján elfogadja vagy elutasítja azokat.

1. FEJEZET

HOGYAN TANULNAK A NEURÁLIS HÁLÓZATOK?

A tanulás a világról alkotott modell finomítása. Agyunk a külvilág több ezer modelljét hordozza magában. Metaforával élve, ezek olyanok, mint a makettek, azaz redukált, de az általuk ábrázolt valósághoz többé-kevésbé hű modellek. Mindannyiunk fejében ott van például a környezetünk, házuk vagy irodánk mentális térképe – becsukhatjuk a szemünket, és gondolatban láthatjuk őket.

E nagyrészt nem tudatos elméleti reprezentációk gazdagsága minden képzeletet felülmúl. Felnőtt agyunk a világ több ezer redukált modelljének ad otthont. Például az anyanyelv hatalmas mentális modellje teszi lehetővé, hogy megértsük az éppen most olvasott szavakat, és sejtjük, hogy a *plastovski* nem magyar szó, míg a *cselló* az, a *zuholás* pedig esetleg az lehet. Agyunk több modellel is rendelkezik a testünkről: ezek olyasmiket kódolnak, mint hogy merre vannak a végtagok, hogyan lehet őket irányítani, milyen gyorsan mozognak, hogyan tarthatjuk fenn az egyensúlyt stb. Más mentális modellek a tudásunkat reprezentálják tárgyakra és a velük való interakciókra: hogyan kell tartani a tollat, hogyan kell írni vagy kerékpározni. További modellek mások elméjét képezik le: kiterjedt mentális katalógus a hozzánk közel álló emberekéről, külsejükről, hangjukról, ízlésükről és különféle hóbortjaikról.

Ezek a mentális modellek lenyűgözően valószerűek. Azért, hogy erről meggyőződünk, gondoljunk arra, hogy az agyunk néha a valóság megtévesztő szimulációit futtatja le, amelyekben járunk, mozgunk, táncolunk, új helyeket keresünk fel, ragyogó beszélgetéseket folytatunk, erős emóciókat érzünk..., még hozzá álmunkban! Izgalmas felismerés, hogy az álmokban előkerülő összes – néha nagyon bonyolult – gondolat

csak az agyunkban létező belső modellek terméke. De a valóságról is álmodunk: agyunk folyamatosan hipotéziseket és értelmezési kereteket vetít elénk a külvilágról, amelyek értelmet adnak az érzékelésekből hozzánk eljutó adatfolyamnak. Belső modell nélkül ezek a nyers bemenetek felfoghatatlanok maradnának.

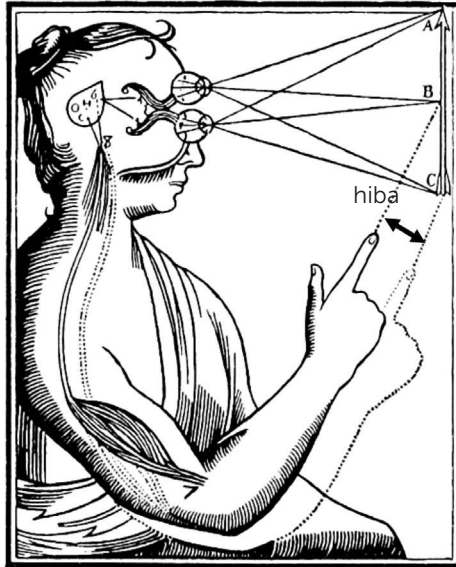
Tanulni annyi, mint megalkotni agyunkban a világ egy új modelljét. A tanulás teszi lehetővé az agy számára, hogy a valóság egy addig nem ismert szeletét ragadja meg. A külső valóságét, amennyiben történelemmel, botanikával foglalkozunk, vagy egy város térképével ismerkedünk. De szervezetünk szempontjából a belső valóságét is, amikor a hegedűjátékhoz megtanuljuk koordinálni a mozdulatainkat, összpontosítani a gondolatainkat. Agyunk minden esetben a valóság új oldalát *internalizálja*: úgy módosítja hálózatait, hogy egy addig általa nem uralt területet tegyen magáévá.

A TANULÁS A MENTÁLIS MODELL PARAMÉTEREINEK BEÁLLÍTÁSA

A mentális modell módosítása néha nagyon egyszerű. Hogyan irányítjuk például mozdulatainkat, ha egy szemünk előtt lévő tárgyat el akarunk érni? Ezt már René Descartes is sejtette: meg kell tanulnunk átalakítani a vizuális bemeneteket az izmoknak szóló parancsokká (lásd az ábrát a következő oldalon). Néhány másodperc alatt magunk is megtapasztalhatjuk: próbáljunk megragadni egy botot, miközben valaki más – lehetőleg rövidlátó – szemüvegét viseljük. Még jobb, ha tudunk szerezni egy prizmás szemüveget, amely a látást tíz fokkal balra tolja el, és megpróbálunk kinyúlni egy tárgy után – ezt a kísérletet elvégezhetjük Párizsban a *Cité des sciences* által szervezett C3RV34U kiállításán. Látni fogjuk, hogy az első mozdulat nem megfelelő: a prizmák miatt a kezünk messze jobbra kerül a célzott bothoz képest. Fokozatosan balra igazítjuk a mozdulatainkat, mígnem azok a próbálgatások révén egyre pontosabbak lesznek: agyunk megtanulta kijavítani a látvány eltolódását. Most vegyük le a szemüveget, és fogjuk meg a botot: meglepve tapasztaljuk, hogy a kezünk rossz felé indul el, túlságosan balra!

Mi történt? E rövid tanulási folyamat során agyunk módosította belső látásmodellünket. A modell egy paraméterét, amely a vizuális kép és a test tájolása közötti eltolódásnak felel meg, újrakalibráltuk.

**Egyetlen paraméter beállítása:
a látás és a cselekvés közti eltérés**



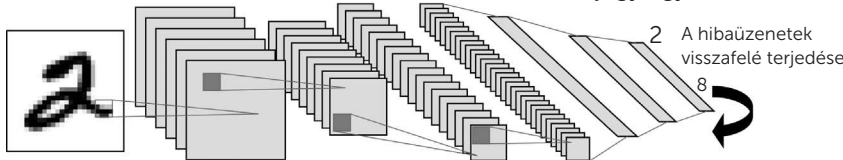
Bemenet:
pozíció
a retinán

Kimenet:
a mutatás
mozdulata

**Több millió paraméter beállítása:
a látást lehetővé tevő kapcsolatok**

Bemenet: kép
az azonosításhoz

Kimenet: a 10 lehetséges
számjegy egyike



1. ábra *Tanulni annyi, mint beállítani egy világmodell paramétereit. Például az újjal célzás tanulásakor a látás és a cselekvés közötti különbséget állítjuk be: minden hibajelzés elősegíti az irányzék helyesbítését. A mesterséges neurális hálózatokban az elv ugyanez, de az állítgatások száma mérhetetlenül nagyobb. Egy a képen jelen lévő szám felismeréséhez kapcsolatok millióit kell módosítani. Itt is minden hiba – esetünkben a 8-as szám túl sokszori aktiválása – lehetővé teszi az érték helyesbítését, és így a következő próbálkozás teljesítményének javítását.*

Agyunk úgy viselkedett, mint a mesterlövész, aki először lead egy próbálást, majd a pontosabb célzás végett feljebb állítja az irányzékot. Ez a tanulás nagyon gyors: néhány próba elegendő a mozdulat és a látvány közötti eltérés kijavításához. Az új beállítás azonban nem egyeztethető össze a réggel – ebből ered a szokásos hiba, amelyet mindannyian

elkövetünk, amikor levesszük a prizmás szemüveget, és visszatérünk a rendes látáshoz.

Kétségtelen, hogy ez a tanulás némiképp különleges, mert csak egyetlen paraméter beállítását követeli meg: a célzás szögéét. Ezért olyan gyors. A legtöbb tanulás ennél sokkal kifinomultabb, és több tíz, száz vagy akár több milliárd paraméter beállítását igényli – a szinapszisokét, amelyek meghatározzák agyi áramköreink aktivitását. Az elv azonban mindig ugyanaz: belső modellünk nagyszámú lehetséges kiigazítása közül megtalálni azokat, amelyek a legjobban illeszkednek a külső világ állapotához.

Vegyünk egy olyan nyelv elsajátítását, mint a japán. Amikor egy japán csecsemő megtanulja anyanyelvét, az agya fokozatosan ráállítja nyelvmodelljét a japán nyelv összes jellegzetességére. Próbáljunk meg elképzelni egy olyan gépet, amely minden szinten több millió beállítással rendelkezik. E beállítások némelyike a hallási bemenet szintjén határozza meg a japán nyelv által használt mássalhangzók és magánhangzók leltárát, valamint azokat a szabályokat, amelyek betartása e hangzók összeállítását lehetővé teszi. A japán családban született csecsemőnek azt kell felfedeznie, milyen hangkategóriákat használnak a japánban, és hol kell elhelyezni a határokat a hangok között. Az egyik paraméter például az /R/ és az /L/ hangok közötti különbségtételre vonatkozik: ez a franciában döntő jelentőségű, de nem az a japán nyelvben, amely nem tesz különbséget *élection* és *érection* között. Így aztán minden csecsemőnek rögzítenie kell azon paraméterek készletét, amelyek együttesen meghatározzák, hogy az anyanyelve szempontjából mely kategóriák relevánsak.

Ugyanez minden szinten igaz: a tanulás azt jelenti, hogy rögzítjük egy hierarchikus valóságmodell paramétereit. Vegyünk egy magasabb szintű példát, a nyelvtani szabályokat. Egy másik különbség a japán és a francia között a szórenddel kapcsolatos, amelyet a csecsemőnek szintén el kell sajátítania. Egy alanyból, igéből és tárgyból álló kanonikus mondatban a francia nyelv először az alanyt közli, majd az igét és végül a tárgyat: „János eszik almát.” Ezzel szemben japánul a leggyakoribb sorrend az alany, a tárgy, majd az ige: „János almát eszik.” Figyelemre méltó, hogy a sorrend a prepozíciók (amelyek logikusan posztpozíciókká válnak), a birtokos névmások és sok más szócsoport esetében is megfordul. Az a mondat, hogy „nagybátyám Párizsban akar lakni” (franciául: *mon oncle veut habiter à Paris*, azaz „enyém nagybáty