

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 bénéficié 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 újrahasznosítás	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 Konzolidáció (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 meghökkentő 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 kuruzslók, 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 kislúval, 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 lelkileg felkészültem arra, hogy egy nagyon súlyos fogyatékos fogok látni. Aztán találkoztam... Felipével, egy kislúval, 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 rajong 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 tapogattott ujjainak megmaradt, csekély érzékösségével. Történetei hősookról és hősnőokról, 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 jelyelvet, 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 foglalatatoskodni anélkül, hogy valaha is látná őket? Kiderül majd, hogy ugyanazokat az agyi áramköröket használja, mint más matematikusok, de látókérgét, amely korántsem inaktív, szintén újrhasználította 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, évekkal 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 megfejthetetlen hieroglifáknak tűnik számára. Motivációja, hogy újból megtanuljon olvasni, csak elvesztettségéhez 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 határozni 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 – májunk, 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 valamenynyire 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 túlélés 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 feltételekhez. 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 kinöveszteni 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

részesevé 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 sapiens*ek vagyunk, hanem *Homo docense*k, 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 aknázunk 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 zsonglőrködünk. 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 meggyőződés 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 törtrészében 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 kialakítására, 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, méríteniük 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 learning*et, 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 tanulógép, 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 újrahasznosítására olyan készségek elsajátítása érdekében, mint például az olvasás megtanulása vagy a matematika művelése.

A tanulás négy pillére című harmadik részben néhány olyan trükköt ismertettek, 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 megszázsorozzák vagy akár -ezerszerelik 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.