



مغز پویا

مغز پویا

پشت پرده‌ی تغییرات پیوسته‌ی مغز



دیوید ایگلمن

نویسنده کتاب مغز: داستان شما

ترجمه‌ی دکتر قاسم کیانی مقدم

انتشارات مازیار

سرشناسه	: ایگلمن، دیوید، ۱۹۷۱ - م. Eagleman, David
عنوان و نام پدیدآور	: مغز پویا : پشت پرده‌ی تغییرات پیوسته‌ی مغز/ دیوید ایگلمن ؛ ترجمه‌ی قاسم کیانی مقدم.
مشخصات نشر	: تهران: مازیار ، ۱۳۹۹.
مشخصات ظاهری	: ۳۳۶ص؛ ۲۱/۵ × ۱۴/۵ س.م.
فروست	: قلمرو علم
شابک	: ۹۷۸-۶۲۲-۷۰۶۱۱۲-۳
وضعیت فهرست‌نویسی: فیبا	
یادداشت	: عنوان اصلی: Livewired : the inside story of the ever-changing brain, 2020
عنوان دیگر	: پشت پرده‌ی تغییرات پیوسته‌ی مغز.
موضوع	: Neurosciences -- Popular works
موضوع	: عصب پایه‌شناسی -- به زبان ساده
موضوع	: اعصاب
موضوع	: Nervous system
موضوع	: مغز-- به زبان ساده
موضوع	: Brain-- Popular works
شناسه افزوده	: کیانی مقدم، قاسم، ۱۳۴۹، مترجم
رده‌بندی کنگره	: RC۳۵۱
رده‌بندی دیویی	: ۶۱۲/۸۲
شماره کتابشناسی ملی	: ۷۴۳۸۴۳۸

www.mazyarpub.ir
mazyarpub@yahoo.com

انتشارات مازیار

مقابل دانشگاه تهران، ساختمان ۱۲۹۶ (ظروفچی) طبقه اول، واحد ۴، تلفن ۶۶۴۶۲۴۲۱
ثبت علامت تجاری: ۳۵۳۴۲۴

مغز پویا

پشت پرده‌ی تغییرات پیوسته‌ی مغز

دیوید ایگلمن

ترجمه‌ی دکتر قاسم کیانی مقدم

صفحه‌آرایی مروا ک.

چاپ اول ۱۳۹۹

شمارگان ۱۲۰۰

لیتوگرافی، چاپ و صحافی طیف‌نگار

شابک ۹۷۸-۶۲۲-۷۰۶۱-۱۲-۳

فهرست مطالب

۷	۱. مغستان صورتی ظریف
۲۵	۲. فقط دنیا را اضافه کنید
۳۵	۳. درون آینه‌ی بیرون است
۶۳	۴. سر درآوردن از ورودی‌ها
۱۳۱	۵. چگونه بدن بهتری داشته باشیم؟
۱۶۵	۶. چرا تمرین اهمیت دارد؟
۱۸۹	۷. چرا عشق تا لحظه‌ی جدایی از ژرفای خود خبر ندارد؟
۲۰۷	۸. تعادل بر لبه‌ی تغییر
۲۲۷	۹. چرا یاد دادن ترفند جدید به سگ‌های پیر سخت‌تر است؟
۲۴۷	۱۰. یادآوری و زمان
۲۷۷	۱۱. گرگ و مریخ‌نورد
۲۸۹	۱۲. پیدا کردن عشق گم‌شده‌ی اوتزی
۲۹۵	سپاسگزاری
۲۹۷	یادداشت‌ها
۳۳۲	دانلود منابع و عکس‌های رنگی
۳۳۳	نمایه
۳۳۶	در ستایش کتاب

’
هر کسی به عنوان چند آدم به دنیا می آید و یک آدم از
دنیا می رود.

— مارتین هایدگر
,

تصور کنید که به جای اینکه مریخ نوردی صد و هشتاد کیلویی را به مریخ بفرستیم، فقط کُره‌ای را روانه‌ی این سیاره کنیم که در سر یک سنجاق جا می‌شود. این کره از منابع اطراف خود انرژی می‌گیرد و آن قدر تکثیر می‌شود که ارتشی از کره‌های متنوع را پدید می‌آورد. کره‌ها دور هم جمع می‌شوند و اجزای مختلفی را ایجاد می‌کنند: چرخ، عدسی، حسگر دما، و سامانه‌ی درونی کاملی برای مسیریابی. اگر به راه افتادن چنین سیستمی را ببینید، قطعاً مبهوت می‌شوید.

ولی کافی است به هر زایشگاهی بروید تا این رخداد را در عمل ببینید. بچه‌های گریانی را خواهید دید که ابتدا به صورت یک تخم میکروسکوپی گشوده شروع شده‌اند و اکنون در جریان تبدیل شدن به پیکر انسانی بزرگی هستند که شامل آشکارسازهای فوتونی، ضمائم چندمفصلی، حسگرهای فشار، پمپ خون، و ماشین‌آلاتی برای متابولیسم کردن انرژی از اطراف خود هستند. و تازه این بهترین ویژگی ما انسان‌ها نیست. ما قابلیت شگفت‌انگیزتری نیز داریم. تجهیزاتی که در بدن ما هست، از قبل به طور کامل برنامه‌نویسی نشده است، بلکه از طریق تعامل با جهان، خود را مرتباً شکل می‌دهد. به تدریج که بزرگ می‌شویم، مدارهای مغز ما پیوسته بازنویسی می‌شود تا امکان رویارویی با چالش‌ها، بهره‌گیری از فرصت‌ها، و فهمیدن ساختارهای اجتماعی اطراف ما را فراهم سازد.

گونه‌ی ما توانسته جای‌جای دنیا را به تسلط خود درآورد، زیرا ما عالی‌ترین نمونه‌ی ترفندی هستیم که مادر طبیعت کشف کرده است، و آن این است که تمام مغز را از قبل برنامه‌نویسی نمی‌کند، بلکه قطعات سازنده‌ی اساسی را در

آن قرار می‌دهد و آن را وارد دنیا می‌کند. کودک نالان نهایتاً دست از گریه کردن برمی‌دارد، به اطراف خود نگاه می‌کند، و جهان اطراف خود را جذب می‌کند. این کودک خود را براساس محیط اطراف قالب‌ریزی می‌کند، همه چیز را از زبان محلی گرفته تا فرهنگ و سیاست جهانی فرامی‌گیرد، باورها و سوگیری‌های افرادی را که پرورش‌اش می‌دهند، اخذ می‌کند. تمام خاطرات خوبی که دارد و هر درسی که یاد می‌گیرد، هر اطلاعاتی که به او می‌رسد، تمام این‌ها مدارهای او را شکل می‌دهند و نتیجه‌ی آن چیزی می‌شود که از قبل برنامه‌ریزی نشده، بلکه منعکس‌کننده‌ی جهان اطراف او است.

در این کتاب، خواهیم دید که چگونه مغز ما بی‌وقفه مدارهای خود را بازآرایی می‌کند، و خواهیم دید که این پدیده برای زندگی و آینده‌ی ما چه تأثیری دارد. در طول این مسیر، پرسش‌های چندی داستان را برای ما روشن خواهد کرد: چرا افراد در دهه‌ی ۱۹۸۰ (و فقط در آن دهه) صفحات کتاب‌ها را اندکی قرمز می‌دیدند؟ چرا بهترین کمانگیر دنیا بی‌دست است؟ چرا هر شب خواب می‌بینیم، و این چه ارتباطی با چرخش زمین دارد؟ قطع داروی اعتیادآور، چه ارتباطی با دل‌شکستگی دارد؟ چگونه است که دشمن خاطرات زمان نیست، بلکه خاطرات دیگر است؟ چگونه یک انسان نابینا می‌تواند یاد بگیرد که با زبان خود ببیند، یا یک آدم ناشنوا می‌تواند یاد بگیرد که با پوست خود بشنود؟ آیا روزی خواهیم توانست جزئیات تقریبی زندگی یک فرد را از ساختمان میکروسکوپی جای‌گرفته در جنگل سلول‌های مغزی او بخوانیم؟

کودکی با نصف مغز

یک روز والری اس. داشت برای رفتن به سر کار آماده می‌شد که پسر سه‌ساله‌اش ماتیو نقش زمین شد.^۱ او از جا بلند نمی‌شد. لب‌هایش کبود شده بود. والری وحشت‌زده به شوهرش تلفن کرد. شوهرش فریاد زد: «چرا به من زنگ می‌زنی؟ به دکتر زنگ بزن!»

بچه را به اورژانس بردند، و بعد از آن هم مدت‌ها به مطب پزشک در رفت‌وآمد بود. متخصص اطفال توصیه کرد که قلب ماتیو معاینه شود. متخصص قلب برای او یک دستگاه پایش قلبی نصب کرد، ولی ماتیو مرتب آن

را جدا می‌کرد. در تمام این ویزیت‌ها چیز خاصی پیدا نشد. گویا آن واقعه‌ی هراس‌انگیز فقط همان یک بار بود.

یعنی آن‌ها این‌طور فکر می‌کردند. ولی یک ماه بعد، زمانی که ماتئو مشغول غذا خوردن بود، حالت عجیبی بر چهره‌اش نقش بست. چشمانش وحشت‌زده شد، دست راستش سفت شد و روی سرش بلند شد، و حدود یک دقیقه هیچ‌گونه پاسخی نمی‌داد. والری دوباره او را شتابان پیش دکتر برد. این بار هم تشخیص روشنی داده نشد.

آنگاه روز بعد هم این اتفاق تکرار شد.

پزشک متخصص اعصاب کلاهی از الکترودها را روی سر ماتئو قرار داد تا فعالیت مغزی او را ثبت کند، و با این کار بود که نشانه‌ی مشخص صرع ظاهر شد. برای ماتئو، داروهای تشنج شروع شد.

داروها تا حدودی مؤثر بود، ولی این تأثیر دیری نپایید. خیلی زود ماتئو دچار یک رشته تشنج‌های درمان‌ناپذیر شد، که فاصله‌ی آن‌ها از یکدیگر ابتدا یک ساعت بود، بعد چهل و پنج دقیقه، و بعد سی دقیقه — مانند فاصله‌ی بین انقباضات زایمانی در زن‌ها که مرتب کوتاه‌تر می‌شود. پس از مدتی، هر دو دقیقه یک بار دچار تشنج می‌شد. هر بار این سلسله‌ی تشنج‌ها شروع می‌شد، والری و شوهرش، جیم، ماتئو را سریعاً به بیمارستان می‌بردند، و او چند روز تا چند هفته در آنجا بستری می‌شد. پس از چند بار که این کار تکرار شد، دیگر صبر می‌کردند که فاصله‌ی «انقباضات» او به بیست دقیقه برسد، بعد به بیمارستان زنگ می‌زدند، سوار ماشین می‌شدند، و سر راه بیمارستان هم برای ماتئو ساندویچ می‌گرفتند.

در این اثنا، ماتئو هم سعی می‌کرد در فواصل بین تشنج‌ها از زندگی خود لذت ببرد.

این خانواده هر سال ده بار به بیمارستان می‌رفتند. این روال تا سه سال ادامه یافت. کم‌کم والری و جیم برای از دست رفتن سلامتی فرزندشان عزا گرفتند — نه اینکه او بخواهد بمیرد، بلکه به خاطر اینکه امکان داشتن زندگی نرمال را از دست داده بود. از مراحل خشم و انکار عبور کردند. زندگی عادی‌شان به هم خورد. سرانجام، یک بار که ماتئو سه هفته در بیمارستان بستری بود، متخصصان

اعصاب مجبور به پذیرش این واقعیت شدند که این مشکل از حد توان آنها در بیمارستان محلی بالاتر است.

از این رو، خانواده‌ی ماتیو او را با آمبولانس هوایی از خانه‌شان در آلبوکرکی، نیومکزیکو، به بیمارستان جانز هاپکینز در بالتیمور بردند. در بخش مراقبت‌های ویژه‌ی کودکان در این بیمارستان بود که فهمیدند که ماتیو دچار آنسفالیت راسموسن است، که نوعی بیماری التهابی مزمن نادر است. مشکل این بیماری آن است که فقط قطعه‌ی کوچکی از مغز را درگیر نمی‌کند، بلکه تمام یک نیمه‌ی مغز را گرفتار می‌سازد. والری و جیم درباره‌ی روش‌های درمانی سؤال کردند و بسیار شوکه شدند که به آنها گفته شد که برای بیماری ماتیو، فقط یک راه درمان شناخته شده است و آن نیمکره‌برداری، یعنی برداشتن یک نیمه‌ی کامل مغز با عمل جراحی، است. والری به من گفت: «اصلاً نفهمیدم بعد از آن دکترها چی گفتند. ذهنم خاموش شده بود، انگار همه داشتند به زبان خارجی حرف می‌زدند.»

والری و جیم گزینه‌های دیگری را امتحان کردند، ولی هیچ‌کدام فایده‌ای نبخشید. وقتی که چند ماه بعد، والری به بیمارستان جانز هاپکینز زنگ زد تا برای نیمکره‌برداری وقت عمل بگیرد، دکتر از او پرسید: «مطمئنید؟» او گفت: «بله.»

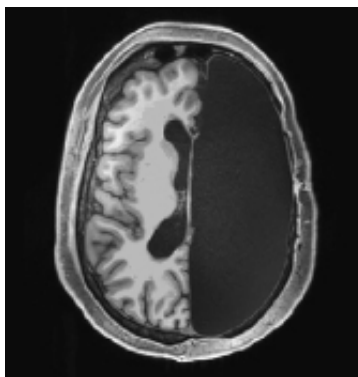
«می‌توانید هر روز در آینه به خودتان نگاه کنید و بدانید کاری را که لازم بوده، انتخاب کرده‌اید؟»

والری و جیم از شدت اضطراب نمی‌توانستند بخوابند. آیا ماتیو از عمل زنده بیرون خواهد آمد؟ آیا اصلاً امکان زندگی بدون نصفی از مغز وجود دارد؟ و اگر هم این امکان وجود داشته باشد، نکند برداشتن یک نیمکره از مغز به قدری ناتوان‌کننده باشد که شرایط زندگی برای ماتیو ارزش آن را نداشته باشد؟ ولی چاره‌ی دیگری نبود. نمی‌توان زیر سایه‌ی چند بار تشنج در روز، زندگی نرمال داشت. از یک طرف با مشکلات قطعی ماتیو روبه‌رو بودند و از طرف دیگر نتیجه‌ی جراحی با قطعیت معلوم نبود.

والدین ماتیو او را با هواپیما به بیمارستان بالتیمور بردند. در آنجا، ماسک کوچکی سبزه‌ای روی صورت ماتیو قرار داده شد و او را بیهوش کردند. با

تیغ جراحی به دقت شکافی را در پوست سرش که موهای آن تراشیده شده بود، بریدند. با استفاده از متهی استخوان، سوراخ مدوری را در جمجمه‌ی او ایجاد کردند.

جراح با شکیبایی طی چند ساعت، نیمی از ماده‌ی صورتی ظریفی را که مسئول هوش، هیجان، گفتار، شوخ‌طبعی، ترس‌ها، و آرزوهای ماتیو بود، خارج کرد. بافت خارج شده‌ی مغزی را که در خارج از محیط بیولوژیک آن به دردی نمی‌خورد، داخل ظروف کوچکی قرار دادند. نیمه‌ی خالی جمجمه‌ی ماتیو به آهستگی از ماده‌ی مغزی نخاعی پر شد که در تصویربرداری عصبی به‌صورت یک ناحیه‌ی خالی سیاه‌رنگ دیده می‌شود.^[۲]



نیمی از مغز ماتیو با عمل جراحی برداشته شد.

در اتاق ریکاوری بیمارستان، والدین ماتیو در حالی که قهوه می‌خوردند، منتظر بودند که ماتیو چشمانش را باز کند. متعجب بودند که پسرشان حالا چگونه خواهد بود؟ او با داشتن تنها نیمی از مغزش، چه کسی خواهد بود؟



از میان تمام اشیایی که گونه‌ی ما بر روی این زمین خاکی کشف کرده است، هیچ چیزی از نظر پیچیدگی به پای مغز خودمان نمی‌رسد. مغز انسان متشکل از هشتاد و شش میلیارد سلول موسوم به نورون است: سلول‌هایی که اطلاعات را با سرعت زیاد به‌صورت جهش‌های سیار ولتاژ انتقال می‌دهد.^[۲] نورون‌ها

اتصالات متراکمی به صورت شبکه‌های جنگل‌مانند ظریف با یکدیگر دارند، و تعداد کل اتصالات بین نورون‌ها در سر شما به صدها تریلیون (حدود 0.2×10^{15} کوادریلیون) می‌رسد. برای اینکه دقیق‌تر بفهمید، می‌توانید این‌طور فکر کنید: تعداد اتصالات موجود در یک میلی‌متر مکعب از بافت قشر مغز، بیشتر از تعداد تمام انسان‌های روی زمین است.

ولی آنچه مغز را جالب می‌کند، تعداد اجزای سازنده‌ی آن نیست؛ بلکه نحوه‌ی تعامل آن اجزا است.

معمولاً در کتاب‌های درسی، رسانه‌ها، و فرهنگ عامه، مغز را به صورت عضوی نشان می‌دهند که مناطق مختلف آن به کارهای خاصی اختصاص داده شده است. یک ناحیه‌ی خاص برای بینایی است، یک قطعه‌ی معین برای یادگیری نحوه‌ی استفاده از ابزارها ضروری است، یک منطقه هنگام مقاومت در برابر آب‌نبات فعال می‌شود، و یک لکه‌ی خاص هنگام فکر کردن درباره‌ی یک معضل اخلاقی به فعالیت درمی‌آید. هر کدام از این نواحی را برچسب‌گذاری و دسته‌بندی کرده‌اند.

ولی این مدل کتابی کافی نیست، و مهم‌ترین بخش داستان را نگفته باقی می‌گذارد. مغز سامانه‌ای پویا است و مدام مدارهای خود را تغییر می‌دهد تا با تقاضاهای محیط و قابلیت‌های بدن هماهنگ باشد. اگر یک دوربین ویدئویی جادویی می‌داشتید که می‌توانستید روی دنیای زنده‌ی میکروسکوپی درون سرتان زوم کنید، مشاهده می‌کردید که استطاله‌های چنگال‌مانند نورون‌ها به اطراف کشیده می‌شوند، با یکدیگر برخورد می‌کنند، و به دنبال برقرار کردن اتصالات مناسب یا رها کردن اتصالات هستند، مانند شهروندان یک کشور که اقدام به برقراری دوستی، ازدواج، تشکیل محله، احزاب سیاسی، انتقام‌گیری، و شبکه‌های اجتماعی می‌کنند. می‌توانید مغز را مانند جامعه‌ی زنده‌ای از تریلیون‌ها موجود درهم‌تنیده در نظر بگیرید. مغز بسیار عجیب‌تر از تصویر آن در کتاب‌های درسی است، و در واقع، نوعی ماده‌ی محاسباتی مرموز است، یک نسج سه‌بعدی زنده که واکنش نشان می‌دهد و خود را تغییر داده و تعدیل می‌کند تا کارایی خود را به حداکثر برساند. الگوی پیشرفته‌ی اتصالات مغز — یعنی مدارهای آن — سرشار از زندگی است: اتصالات بین نورون‌ها بی‌وقفه

شکوفه می‌زنند، می‌میرند، و بازآرایی می‌شوند. شما امسال نسبت به سال گذشته شخص دیگری هستید، زیرا مغز شما مانند تابلوفرش عظیمی است که دوباره به شکل جدیدی بافته شده است.

وقتی که چیز جدیدی یاد می‌گیرید — مثلاً جای رستورانی که دوست دارید، شایعه‌ای درباره‌ی رئیس‌تان، یک آواز پرترفدار جدید از رادیو — مغز شما به‌طور فیزیکی تغییر می‌کند. زمانی هم که چیزی مانند موفقیت مالی، رسوایی اجتماعی، یا بیداری عاطفی را تجربه می‌کنید، همین اتفاق می‌افتد. وقتی که یک توپ بسکتبال را پرتاب می‌کنید، با یکی از همکاران‌تان مخالفت می‌کنید، با هواپیما به شهر جدیدی می‌روید، به یک عکس نوستالژیک خیره می‌شوید، و یا صدای آهنگین شخص محبوب خود را می‌شنوید، جنگل انبوه درهم‌تنیده‌ی مغز شما اندکی با آنچه یک لحظه قبل بود، تفاوت پیدا می‌کند. مجموع این تغییرات، خاطرات ما است: نتیجه‌ی زندگی کردن و دوست داشتن‌های ما. این تغییرات بی‌شمار مغز که طی دقیقه‌ها و ماه‌ها و دهه‌ها انباشته می‌شوند، بر روی هم چیزی را می‌سازند که شما هستید.

یا لاقلاً شمایی که الان هستید. دیروز با امروز کمی فرق داشتید. و فردا هم باز کس دیگری خواهید بود.

راز دیگر زندگی

در سال ۱۹۵۳، فرانسیس کریک فاتحانه وارد کافه‌ی ایگل آند چایلد شد، و به مشتریان یک‌خورده‌ی آنجا اعلام کرد که او و جیمز واتسون راز حیات را کشف کرده‌اند: آن‌ها راز ساختمان مارپیچ دوگانه‌ی DNA را گشوده بودند. این یکی از بزرگ‌ترین لحظات کافه‌ای علم بود.

ولی از قضای روزگار، کریک و واتسون فقط نیمی از این راز را کشف کرده بودند. نیمه‌ی دیگر آن در توالی جفت بازهای DNA نوشته نشده است، و در کتاب‌های درسی هم آن را نخواهید یافت. نه حالا و نه هیچ‌وقت.

زیرا نصف دیگر در دور و بر شما است. یعنی شامل تمام تجربیاتی است که با دنیا دارید: بافت و مزه‌ی چیزها، نوازش‌ها و حوادث ترافیکی، زبان‌ها و داستان‌های عشقی.^[۴]

برای اینکه منظور از این مطلب را بفهمید، فرض کنید سی هزار سال پیش به دنیا آمده بودید. دقیقاً همین DNA را می‌داشتید، ولی از شکم مادر که خارج می‌شدید، در دوره‌ی زمانی متفاوتی چشم به دنیا می‌گشودید. در این صورت، چه شکلی می‌بودید؟ آیا پوستین می‌پوشیدید و در حالی که با حیرت به ستارگان نگاه می‌کردید، دور آتش می‌رقصیدید؟ آیا از بالای درخت فریاد می‌کشیدید تا نزدیک شدن ببرهای تیزدندان را هشدار بدهید؟ آیا وقتی ابرهای باران‌زا بر فراز سرتان ظاهر می‌شد، نگران خوابیدن در فضای بیرون بودید؟ هر چیزی هم که **فکر می‌کنید بودید، اشتباه است**. این پرسشی انحرافی است.

زیرا شما دیگر شما نمی‌بودید. به‌هیچ‌وجه. آن آدم غارنشین که DNA یکسان با شما دارد، شاید به علت داشتن دستورالعمل ژنومی یکسان، به‌ظاهر اندکی شبیه شما باشد، ولی مثل شما فکر نخواهد کرد. به‌علاوه، نحوه‌ی راهبردسازی، تخیل، عشق‌ورزی، و شبیه‌سازی گذشته و آینده برای غارنشین درست مانند شما نخواهد بود.

چرا؟ زیرا تجربیات غارنشین با شما متفاوت است. با آنکه DNA بخشی از داستان زندگی شما است، ولی فقط بخش کوچکی از آن است. بقیه‌ی داستان شامل جزئیات غنی تجربیات و محیط شما است، که همگی تابلوی میکروسکوپی پهناور سلول‌های مغزی شما و اتصالات آن‌ها را شکل می‌دهند. آنچه ما به‌عنوان شما در نظر می‌گیریم، ظرف تجربه‌ای است که نمونه‌ی کوچکی از فضا و زمان درون آن ریخته می‌شود. شما فرهنگ و فناوری محل خود را از طریق حواستان دریافت می‌کنید. اینکه شما چه کسی هستید، همان قدر که به DNA درون شما مربوط می‌شود، به محیط پیرامون شما نیز مربوط می‌شود. حالا در مقابل این داستان، اژدهای کومودویی را در نظر بگیرید که امروز متولد شده و یکی دیگر که سی هزار سال پیش متولد شده است. احتمالاً خیلی سخت‌تر خواهد بود که بین رفتار آن‌ها هرگونه تمایزی قائل شوید.

تفاوت در چیست؟

علت آن است که مغز اژدهای کومودو هر بار تقریباً پیامد یکسانی را پدید می‌آورد. مهارت‌هایی که این جانوران در چننه دارند، عمدتاً از قبل مشخص

است (بخور! جفت گیری کن! شنا کن!)، و این مهارت‌ها به آن‌ها امکان می‌دهد که جایگاه پایداری را در اکوسیستم اشغال کنند. ولی کارشان فاقد انعطاف‌پذیری است. اگر آن‌ها را سوار هواپیما کنید و از محل زندگی‌شان در جنوب شرقی اندونزی به مناطق برفی کانادا ببرید، دیری نخواهد پایید که اثری از آن‌ها بر جای نخواهد ماند.

برعکس، ما انسان‌ها در آب‌وهوای مختلف سراسر جهان به زندگی خود ادامه می‌دهیم، و خیلی زود به گُرَات دیگر خواهیم رفت. علت چیست؟ به خاطر این نیست که ما قوی‌تر، محکم‌تر، یا زمخت‌تر از جانداران دیگریم: از این نظر، چه بسا بسیاری از حیوانات از ما بالاترند. بلکه علت آن است که ما با مغزی به دنیا می‌آییم که تا حد زیادی ناکامل است. در نتیجه، دوره‌ی کودکی ما که کار چندانی از دست ما برنمی‌آید، به‌طور منحصربه‌فردی طولانی است. ولی این هزینه ارزش آن را دارد، چون مغز ما به‌گونه‌ای است که جهان آن را شکل می‌دهد — و بر این اساس است که حریصانه زبان، فرهنگ، رسم و رسوم، سیاست، مذهب، و اخلاقیات را از محیط محلی خود فرامی‌گیریم.

وارد شدن به دنیا با مغز نیمه‌آماده، راهبرد پیروزمندی برای انسان‌ها بوده است. ما از همه‌ی گونه‌های دیگر روی زمین جلو زده‌ایم: خشکی‌ها را درنوردیده‌ایم، دریاها را فتح کرده‌ایم، و حتی قدم به کره‌ی ماه نهاده‌ایم. طول عمرمان را سه برابر کرده‌ایم. می‌توانیم سمفونی تصنیف کنیم، آسمان‌خراش بسازیم، و جزئیات مغز خودمان را با دقتی روزافزون اندازه‌گیری کنیم. هیچ‌کدام از این کارها به‌صورت ژنتیکی کد نشده است.

لااقل می‌توان گفت که به‌صورت مستقیم کد نشده است. بلکه در عوض، ژنتیک ما مبتنی بر یک اصل ساده است: سخت‌افزار غیرقابل‌انعطاف نسا؛ بلکه سیستمی بساز که با دنیای پیرامون خود سازگار شود. DNA ما نقشه‌ی ثابتی برای ساختن یک موجود نیست؛ بلکه سیستم پویایی را ایجاد می‌کند که مدام مدارهای خود را بازسازی می‌کند تا منعکس‌کننده‌ی جهان اطراف خود باشد و بتواند کارایی خود را در محیط بهینه‌سازی کند.



کودکی مدرسه‌ای را در نظر بگیرید که به کره‌ی جغرافیایی نگاه می‌کند و فکر می‌کند که مرزهای کشورها کاملاً قطعی و بدون تغییرند. ولی یک تاریخدان حرفه‌ای می‌داند که مرزهای کشورها براساس پیشامدها تعیین شده‌اند و در هر مورد ممکن بود داستان به صورت دیگری رقم بخورد: ممکن بود کسی که قرار است شاه شود، در کودکی بمیرد؛ مزارع ذرت از آفت در امان بماند؛ یا یک کشتی جنگی در دریا غرق شود و سرنوشت یک جنگ به صورت دیگری نوشته شود. تغییرات کوچک می‌توانست به صورت آبخاری به نقشه‌ی متفاوتی از جهان منجر شود.

در مورد مغز هم همین طور است. گرچه در تصاویر سنتی کتاب‌های درسی چنین نمایش داده می‌شود که گویی نورون‌های مغز مانند دانه‌های اسمارتیز در یک شیشه، خوش و خرم در کنار هم قرار گرفته‌اند، ولی نباید گول این گونه تصاویر را بخورید: نورون‌ها به سختی برای بقا با هم رقابت می‌کنند. نورون‌ها هم درست مانند کشورهای هم‌جوار، مرزهای خود را مشخص می‌کنند و همواره از آن دفاع می‌کنند. آن‌ها در تمام سطوح برای قلمرو و بقای خود می‌جنگند: هر نورون و هر اتصال میان نورون‌ها بر سر منابع با دیگران در نبرد است. با تداوم جنگ مرزها در طول عمر مغز، نقشه‌ها به گونه‌ای بازآرایی می‌شود که تجربیات و اهداف شخص همواره در ساختار مغز منعکس می‌شود. اگر یک حسابدار کار خود را رها کند تا نوازنده‌ی پیانو شود، ناحیه‌ی عصبی اختصاص یافته به انگشتان او گسترش می‌یابد؛ اگر اپراتور میکروسکوپ شود، قشر بینایی او تفکیک‌پذیری بالاتری برای جزئیات کوچکی که در پی دیدن آن است، پیدا می‌کند؛ اگر کارشناس عطر شود، ناحیه‌ی مغزی مربوط به بویایی در او بزرگ‌تر خواهد شد.

تنها با مسامحه و تقریب می‌توان مغز را مانند یک کره‌ی جغرافیایی پنداشت که مرزهای معین و مشخصی دارد.

مغز منابع خود را براساس آنچه اهمیت دارد، توزیع می‌کند، و برای این منظور، رقابتی سرنوشت‌ساز را در میان تمام اجزای تشکیل‌دهنده ترتیب می‌دهد. این اصل اساسی می‌تواند بسیاری از پرسش‌هایی را که به زودی به آن‌ها خواهیم رسید، روشن کند: چرا بعضی وقت‌ها حس می‌کنید موبایل در جیب‌تان لرزش

می‌کند، بعد که نگاه کردید، می‌بینید روی میز است؟ چرا آرنولد شوارتزنگر، هنرپیشه‌ی متولد اتریش، موقع صحبت کردن به انگلیسی آمریکایی، شدیداً لهجه دارد، در حالی که میلا کونیس، هنرپیشه‌ی متولد اوکراین، لهجه ندارد؟ چرا یک کودک مبتلا به سندروم ساوانت اوتیستی می‌تواند مکعب روبیک را در چهل و نه ثانیه حل کند، ولی قادر نیست با فرد دیگری یک صحبت معمولی بکند؟ آیا انسان‌ها می‌توانند با استفاده از فناوری، حواس جدیدی بسازند، تا بتوانند نور فروسرخ، الگوهای جهانی آب‌وهوا، و یا بازار سهام را به‌طور مستقیم ادراک کنند؟

اگر ابزاری را ندارید، آن را بسازید

در پایان سال ۱۹۴۵، توکیو با وضعیت بغرنجی روبه‌رو شده بود. در طول دوره‌ای که مشتمل بر جنگ روس و ژاپن و دو جنگ جهانی بود، توکیو بالغ بر چهل سال منابع فکری خود را به تفکر نظامی اختصاص داده بود. این کار استعدادهایی را در اختیار این کشور قرار داده بود که فقط برای یک کار مناسب بود و آن ساختن جنگ‌افزار بود. ولی بمب‌های اتمی و خستگی نبرد، اشتباهات این کشور را برای فتوحات جنگی در آسیا و اقیانوسیه کور کرده بود. جنگ دیگر تمام شده بود. دنیا تغییر کرده بود، و کشور ژاپن نیز باید با آن تغییر می‌کرد.

ولی تغییر، پرسش دشواری را پیش می‌کشید: ژاپنی‌ها با تعداد انبوه مهندسان جنگی‌شان که از آغاز قرن تنها برای تولید جنگ‌افزار بهتر آموزش دیده بودند، چه باید می‌کردند؟ این مهندسان با آرزوی جدید ژاپن که حفظ آرامش بود، جور در نمی‌آمدند.

یا ظاهراً این‌طور به نظر می‌رسید. ولی در طول چند سال بعد، توکیو مهندسان خود را در کارهای جدید به خدمت گرفت و توانست چشم‌انداز اجتماعی و اقتصادی خود را تغییر دهد. هزاران نفر از آن‌ها مسئول ساختن قطار سریع‌السیر جدیدی به نام شینکانسن شدند.^{۱۵} کسانی که قبلاً هواپیماهای آئرو دینامیک نیروی دریایی را طراحی می‌کردند، حالا واگن‌های قطار پیشرفته می‌ساختند. کسانی که روی هواپیماهای جنگنده‌ی میتسوبیشی زرو کار می‌کردند، حالا چرخ، محور، و ریل تعبیه می‌کردند تا قطار سریع‌السیر بتواند ضمن حفظ

ایمنی، با سرعت بالا حرکت کند.

توکیو منابع خود را به گونه‌ای شکل‌دهی کرد که با محیط بیرونی انطباق بهتری داشته باشد. شمشیرها را به خیش تبدیل کرد. ماشین‌آلات خود را به نحوی تغییر داد که با نیازهای روز سازگار باشد.

توکیو همان کاری را کرد که مغز می‌کند.

مغز همواره خود را تعدیل می‌کند به گونه‌ای که منعکس‌کننده‌ی چالش‌ها و اهداف خود باشد. منابع را به گونه‌ای شکل‌دهی می‌کند که با نیازها و شرایط آن سازگار باشد. اگر چیزی را که نیاز دارد، نداشته باشد، خودش آن را شکل می‌دهد. حالا چرا این راهبرد برای مغز مناسب است؟ هرچه باشد، فناوری‌های ساختمانی دست بشر، که از راهبرد کاملاً متفاوتی استفاده می‌کند، بسیار موفق بوده است. ما دستگاه‌های سخت‌افزاری ثابتی با برنامه‌های نرم‌افزاری ساخته‌ایم که کاری را که نیاز داریم، انجام می‌دهند. چه مزیتی دارد که تمایز بین این لایه‌ها را از میان برداریم، به‌طوری که ماشین با اجرای برنامه‌ها، مدام در حال بازطراحی خود باشد؟

نخستین مزیت آن، سرعت است.^[۶] شما با سرعت روی لپ‌تاپ‌تان تایپ می‌کنید، زیرا مجبور نیستید درباره‌ی جزئیات مربوط به موقعیت انگشتان، اهداف، و مقاصد خود فکر کنید. این کار خودبه‌خود و انگار به‌صورت جادویی انجام می‌شود، چرا که تایپ کردن بخشی از مدارهای مغزی شما شده است. با بازآرایی مدارهای عصبی، این گونه کارها اتوماتیک می‌شوند، به‌طوری که تصمیم‌گیری و عمل سریع امکان‌پذیر می‌شود. تکامل انسان در سیر چند میلیون ساله‌ی خود، ظهور زبان مکتوب را پیش‌بینی نکرده است، چه رسد به استفاده از صفحه‌کلید، با این حال، مغز ما هیچ مشکلی برای بهره‌گیری از این نوآوری‌ها ندارد.

در مقایسه با این، در نظر بگیرید می‌خواهید کلیدهای ابزار موسیقی‌ای را بزنید که قبلاً با آن کار نکرده‌اید. برای این‌گونه کارهای آموزش‌نندیده، باید از تفکر آگاهانه‌ی خود استفاده کنید، و این در مقایسه بسیار کند است. به خاطر همین تفاوت سرعت بین عملکرد آماتوری و حرفه‌ای است که کسی که تفریحی فوتبال بازی می‌کند، به راحتی توپ را به رقیب واگذار می‌کند. برعکس، بازیکن حرفه‌ای سیگنال‌های حریف‌ها را می‌خواند، با حرکات زیبا

توپ را در اختیار می‌گیرد، و آن را با دقت بالا شوت می‌کند. اعمال ناخودآگاه سریع‌تر از تفکر آگاهانه هستند. شخم زدن با خیش سریع‌تر از شمشیر است. دومین مزیت تخصصی کردن ماشین‌آلات برای کارهای مهم، کارایی انرژی است. بازیکن تازه‌کار فوتبال نمی‌تواند از مجموع حرکات زمین بازی سر در بیاورد، ولی بازیکن حرفه‌ای به طرق مختلف بازی را هدایت می‌کند تا بتواند گل بزند. مغز کدام یک فعال‌تر است؟ شاید فکر کنید که مغز بازیکن خبره‌ای که گل‌های زیادی می‌زند — زیرا ساختار بازی را درک می‌کند و تمام گزینه‌های ممکن، تصمیمات، و حرکات ظریف را با سرعت بررسی می‌کند. ولی این حدس غلط است. مغز بازیکن خبره مدارهای عصبی ویژه‌ای برای فوتبال تشکیل داده است، به‌طوری که می‌تواند با فعالیت مغزی نسبتاً اندکی، حرکات را انجام دهد. به یک معنا، بازیکن خبره خودش را با بازی یکی کرده است. برعکس، مغز بازیکن آماتور با تمام قوا در حال فعالیت است. دارد تلاش می‌کند بفهمد کدام حرکات اهمیت دارد. تفسیرهای متعددی برای موقعیت ارائه می‌کند و سعی می‌کند مشخص کند کدام یک از آن‌ها درست است. با توجه به اینکه در یک بازیکن حرفه‌ای، فوتبال در مدارها گنجانده شده است، لذا عملکرد او هم سریع است و هم کارآمد. او مدارهای درونی خود را برای چیزهایی که در جهان بیرونی‌اش اهمیت دارد، بهینه‌سازی کرده است.

سیستمی پیوسته در تغییر

روانشناس آمریکایی ویلیام جیمز براساس مفهوم سیستمی که بر اثر رویدادهای خارجی تغییر می‌کند — و شکل جدید خود را حفظ می‌کند — اصطلاح «پلاستیسته» [شکل‌پذیری] را وضع کرد. به شیئی شکل‌پذیر گفته می‌شود که بتوان آن را شکل داد و بتواند آن شکل را حفظ کند. ماده‌ای هم که پلاستیک می‌نامیم، نام خود را از اینجا گرفته است: ما پلاستیک را به شکل کاسه، اسباب‌بازی، یا تلفن قالب‌ریزی می‌کنیم، و ماده شکل خود را حفظ می‌کند و دوباره به شکل اولیه‌ی خود که بی‌فایده است، در نمی‌آید. در مورد مغز هم همین طور است: تجربه آن را تغییر می‌دهد، و مغز این تغییر را حفظ می‌کند. «شکل‌پذیری مغز» (که به آن شکل‌پذیری عصبی نیز گفته می‌شود) اصطلاحی

است که در علوم اعصاب استفاده می‌کنیم. ولی من در این کتاب تنها در موارد اندکی از این اصطلاح استفاده خواهم کرد، چرا که گاه خطر آن دارد که معنای مورد نظر را نرساند. خواسته یا ناخواسته، اصطلاح «شکل‌پذیری» این تصور را در ذهن ایجاد می‌کند که هدف آن است که چیزی را یک بار قالب‌ریزی کنیم و آن را برای همیشه به همان شکل نگه‌داریم؛ اسباب‌بازی پلاستیکی را درست کنیم و دیگر آن را تغییر ندهیم. ولی این کاری نیست که مغز می‌کند. مغز در سرتاسر عمر شما مرتب خود را بازآرایی می‌کند.

شهری در حال توسعه را در نظر بگیرید و ببینید که چگونه رشد می‌کند، خود را بهینه‌سازی می‌کند، و به جهان پیرامون خود پاسخ می‌دهد. مشاهده کنید که پایانه‌های باری کجا ساخته می‌شود، سیاست‌های مهاجرتی چگونه تدوین می‌شود، و نظام آموزشی و قضایی چگونه تغییر می‌کند. یک شهر همیشه در حرکت است. این‌گونه نیست که برنامه‌ریزان شهری، شهر را طراحی کنند و سپس آن را مانند یک اسباب‌بازی پلاستیکی ثابت نگه‌دارند. شهر بی‌وقفه توسعه پیدا می‌کند.

مغزها هم مانند شهرها هرگز به نقطه‌ای پایان نمی‌رسند. ما تمام عمر در حال شکوفایی به سمت چیزی هستیم، هر چند که هدف هم در حال حرکت است. فکر کنید وقتی مطلبی را می‌خوانید که سال‌ها پیش در دفتر یادداشتان نوشته‌اید، چه احساسی پیدا می‌کنید. این مطلب نشان‌دهنده‌ی تفکر، عقاید، و دیدگاه کسی است که با امروز شما اندکی متفاوت بوده، و آن شخص قبلی حتی ممکن است تا حدودی برای شما تشخیص‌ناپذیر باشد. با وجود یکی بودن اسم و سوابق قبلی، طی سال‌های بین نگارش و تفسیر مطلب، راوی دگرگون شده است.

از کلمه‌ی «پلاستیک» [«شکل‌پذیر»] به‌طور موسّع می‌توان معنای تغییر مداوم را نیز استنباط کرد، و من هم برای حفظ پیوند با منابع علمی موجود، گهگاه آن را به کار می‌برم.^[۷] ولی شاید بتوان گفت که دورانی که تحت تأثیر مفهوم قالب‌ریزی پلاستیکی قرار می‌گرفتیم، سپری شده است. هدف ما در اینجا فهمیدن این مطلب است که این سیستم زنده چگونه کار می‌کند، و برای این منظور من اصطلاحی را وضع می‌کنم که بهتر مفهوم را بیان می‌کند: «مدارسازی

پویا» (livewired). به طوری که خواهیم دید، واقعاً نمی‌توان مغز را به دو لایه‌ی سخت‌افزار و نرم‌افزار تقسیم کرد. بلکه نیاز به مفهوم مدارسازی پویا داریم تا بتوانیم این سیستم اطلاعات‌یاب پویا و سازگارپذیر را بیان کنیم.



برای اینکه قدرت یک سیستم خودشکل‌دهنده را بهتر درک کنیم، به داستان ماتیو برمی‌گردیم. او پس از برداشتن یک نیم‌کره‌ی کامل مغزش، دچار بی‌اختیاری شد، نمی‌توانست راه برود یا حرف بزند. بدترین هراس‌های والدینش واقعیت پیدا کرده بود.

ولی با انجام فیزیوتراپی و گفتاردرمانی روزانه، کم‌کم توانست دوباره زبان را یاد بگیرد. فراگیری او تابع همان مراحل بود که در کودکان دیده می‌شود: اول یک کلمه، بعد دو تا، و بعد جملات کوتاه.

سه ماه بعد، از نظر تکاملی به سطح مناسب رسید — درست همان جایی که باید می‌بود.

اکنون که سال‌ها گذشته، ماتیو نمی‌تواند از دست راستش خوب استفاده کند، و موقع راه رفتن هم کمی می‌لنگد.^[۸] ولی از سایر جهات زندگی نرمالی دارد و اصلاً معلوم نمی‌شود که چنین ماجرای خارق‌العاده‌ای را پشت سر گذاشته است. حافظه‌ی بلندمدت او عالی است. او سه ترم به کالج رفت، ولی به خاطر اینکه نوشتن با دست راست برایش مشکل بود، دانشگاه را رها کرد و در یک رستوران مشغول کار شد. در آنجا او تلفن جواب می‌دهد، خدمات مشتریان را به انجام می‌رساند، غذاها را به سر میز می‌برد، و تقریباً هر کاری را که لازم باشد، انجام می‌دهد. افرادی که با او سر و کار دارند، اصلاً متوجه نمی‌شوند که او نصف مغزش را ندارد. به قول خود والری: «اگر کسی به آن‌ها نگفته باشند، هرگز متوجه نمی‌شوند.»

چطور ممکن است چنین عمل عصبی بزرگی، بدون نشانه باشد؟ علتش این است: بقیه‌ی مغز ماتیو به طور پویا مدارکشی شده تا کارکردهای از دست رفته را بر عهده گیرد. نقشه‌ی دستگاه عصبی او خود را تغییر داده تا در فضای کوچک‌تری جا شود — تا تمام کارکردهای زندگی را با نصف

ماشین‌آلات به انجام برساند. در حالی که اگر شما نصف مدارهای الکترونیکی گوشی هوشمندتان را در بیاورید، دیگر نخواهید توانست با آن تلفن بزنید، زیرا سخت‌افزار شکننده است. ولی پویاافزار مغز ماندگار است.



در سال ۱۵۹۶، نقشه‌نگار فلاندري آبراهام اورتلیوس به نقشه‌ی زمین با دقت نگاه کرد و فکری به ذهنش رسید: قاره‌های آمریکا و آفریقا به گونه‌ای بودند که انگار مانند قطعات جورچین با یکدیگر جور درمی‌آمدند. انطباق کاملی به نظر می‌رسید، ولی او به هیچ وجه نمی‌دانست که چه چیزی «آن‌ها را از هم جدا کرده است». در سال ۱۹۱۲، ژئوفیزیکدان آلمانی آلفرد وگنر مفهوم رانش قاره‌ای را حدس زد: گرچه قبلاً تصور می‌شد قاره‌ها در جای خود ثابت هستند، ولی شاید مانند برگ‌های نیلوفر شناور عظیمی هستند که به اطراف حرکت می‌کنند. این رانش به کندی صورت می‌گیرد (سرعت حرکت قاره‌ها مانند سرعت رشد ناخن‌های شما است)، ولی اگر فیلمی میلیون‌ساله از زمین گرفته می‌شد، نشان می‌داد که توده‌های خشکی بخشی از یک سیستم پویا و روان هستند که براساس قوانین گرما و فشار، بازتوزیع می‌شود.

مغز هم مانند کره‌ی زمین، سیستمی پویا و در جریان است، ولی قوانین آن چیست؟ تعداد مقالات علمی درباره‌ی شکل‌پذیری مغزی به صدها هزار رسیده است. ولی حتی امروزه هم وقتی که به این ماده‌ی صورتی خودشکل‌دهنده‌ی عجیب نگاه می‌کنیم، هیچ چارچوب جامعی نداریم که بگویید مغز چرا و چگونه کارش را انجام می‌دهد. در این کتاب سعی بر آن است که طرحی از این چارچوب ارائه شود تا بهتر بتوانیم بفهمیم کی هستیم، چگونه به اینجا رسیده‌ایم، و کجا داریم می‌رویم.

وقتی که طرز فکر مدارسازی پویا را کسب کردیم، ماشین‌های کنونی ما که مدارسازی ایستا دارند، برای آینده‌ی ما بسیار ناکافی به نظر خواهند رسید. در واقع، در مهندسی سنتی، همه‌ی چیزهای مهم از قبل به دقت طراحی می‌شوند. زمانی که یک شرکت خودروسازی، شاسی یک خودرو را طراحی می‌کند، ماه‌ها وقت صرف تولید موتوری متناسب با آن می‌کند. ولی تصورش را بکنید

که بدنه را هر جور دلتان می‌خواهد درست کنید و بگذارید که موتور خودش را با آن تطبیق دهد. به‌طوری که خواهیم دید، وقتی که اصول مدارسازی پویا را درک کردیم، می‌توانیم به تقلید از مادر طبیعت، ماشین‌های جدیدی بسازیم: دستگاه‌هایی که با بهینه‌سازی کردن خودشان براساس ورودی‌ها و یاد گرفتن از تجربه، مدارهای خودشان را به‌صورت پویا تعیین می‌کنند.

هیجان زندگی به این نیست که ما کی هستیم، بلکه این است که داریم چه کسی می‌شویم. به همین ترتیب، جادوی مغز ما در عناصر تشکیل‌دهنده‌ی آن نیست، بلکه در این است که این عناصر به‌طور بی‌وقفه خودشان را بازآرایی می‌کنند و **یک بافتار** پویا، فعال، و زنده را پدید می‌آورند.

با همین چند صفحه که از این کتاب خوانده‌اید، مغز شما تغییر کرده است: این نمادهای روی صفحه میلیون‌ها تغییر کوچک را در دریای پهنای اتصالات نورونی شما ایجاد کرده‌اند، و شما را به کسی تبدیل کرده‌اند که با کسی که در ابتدای فصل بودید، اندکی متفاوت است.

چگونه مغز خوبی را پرورش دهیم؟

مغز به صورت یک لوح خالی به دنیا نمی‌آید، بلکه از قبل دارای برخی توانایی‌ها است. مثلاً تولد یک جوجه را در نظر بگیرید: جوجه چند لحظه پس از آنکه سر از تخم درآورد، به حرکت درمی‌آید و می‌تواند ناشیانه راه برود و به اطراف حرکت کند. واقعاً جوجه در محیط خود آن قدر وقت ندارد که چندین ماه یا سال را صرف یاد گرفتن نحوه‌ی راه رفتن کند.

در انسان‌ها نیز بچه‌ها با مقدار زیادی برنامه‌نویسی قبلی به دنیا می‌آیند. مثلاً ما از ابتدا با توانایی فراگیری زبان متولد می‌شویم. یا اینکه یک شیرخوار به تقلید از یک فرد بزرگسال زبان خود را از دهان بیرون می‌آورد، که این کار نیاز به توانایی پیشرفته‌ای برای ترجمه کردن بینایی به عمل حرکتی دارد.^[۱] و یا اینکه الیف عصبی چشم شما مجبور نیستند یاد بگیرند که چگونه هدف خود را در اعماق مغز پیدا کنند؛ آن‌ها به سادگی نشانه‌های مولکولی را دنبال می‌کنند و به هدف خودشان می‌رسند — همیشه. تمام این نوع مدارسازی ایستا^۱ به لطف ژن‌های ما امکان‌پذیر شده است.

ولی مدارسازی ایستای ژنتیکی، خصوصاً در انسان‌ها، کل داستان را بیان نمی‌کند. سازمان‌دهی سیستم، زیادی پیچیده است، و تعداد ژن‌ها خیلی کم است. حتی وقتی که برش دادن و شکستن ژن‌ها را نیز در نظر بگیریم که باعث ایجاد انواع متفاوت از هر ژن می‌شود، باز هم تعداد کل نوروها و اتصالات

۱. در این کتاب، اصطلاح “livewiring” به «مدارسازی پویا»، و در مقابل، اصطلاح “hardwiring” به «مدارسازی ایستا» ترجمه شده است. م

آن‌ها وسیعاً بیشتر از تعداد ترکیبات ژنتیکی است.

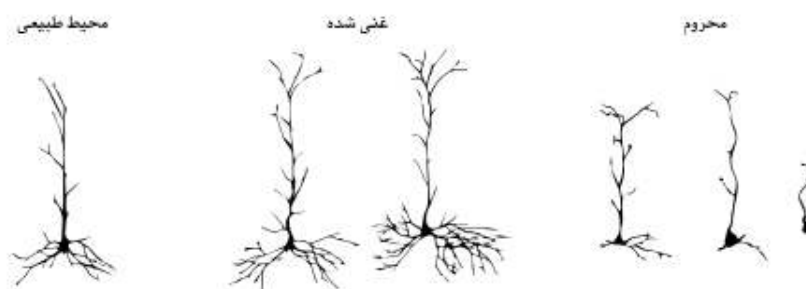
پس می‌دانیم که جزئیات مدارکشی مغز به چیزی بیش از ژنتیک مربوط می‌شود. و دو قرن قبل، اندیشمندان به تدریج متوجه شدند که جزئیات تجربه حائز اهمیت است. در سال ۱۸۱۵، یوهان اشپورتس‌هایم فیزیولوژیست پیشنهاد کرد که مغز را هم، مانند ماهیچه‌ها، می‌توان با تمرین، بیشتر کرد: فکر او این بود که خون تغذیه‌ی لازم برای رشد را انتقال می‌دهد، و «به جاهایی که تحریک شده‌اند، به مقدار بیشتری فرستاده می‌شود».^[۲] سال ۱۸۷۴، چارلز داروین این پرسش را مطرح کرد که آیا اساساً همین مسئله است که سبب می‌شود که خرگوش‌های وحشی مغز بزرگ‌تری نسبت به خرگوش‌های خانگی داشته باشند؟ او فکر می‌کرد که خرگوش‌های وحشی بیشتر از خرگوش‌های خانگی مجبور به استفاده از هوش و فهم خود می‌شوند، و اندازه‌ی مغزشان به همین دلیل بزرگ‌تر است.^[۳]

در دهه‌ی ۱۹۶۰، پژوهشگران با دقت به بررسی این موضوع پرداختند که آیا مغز می‌تواند مستقیماً در نتیجه‌ی تجربه به صورت قابل اندازه‌گیری تغییر کند؟ ساده‌ترین راه برای پاسخ دادن به این سؤال این بود که موش‌های صحرایی را در محیط‌های متفاوتی پرورش دهند — مثلاً یک محیط غنی که پر از اسباب‌بازی و چرخ‌های در حال حرکت است، و یا یک محیط محروم که شامل یک قفس خالی انفرادی است.^[۴] نتایج بسیار جالب توجه بود: محیط، ساختمان مغز موش‌ها را تغییر می‌داد، و ساختمان مغز با توانایی جانوران برای یادگیری و حافظه همبستگی داشت. موش‌هایی که در محیط غنی پرورش یافته بودند، عملکرد بهتری در انجام کارها داشتند، و در کالبدشکافی، دندریت‌های بلند و انبوهی داشتند (دندریت‌ها شاخه‌های درخت‌مانندی هستند که از جسم سلولی بیرون زده‌اند).^[۵] برعکس، موش‌هایی که در محیط محروم پرورش یافته بودند، توانایی ضعیفی برای یادگیری داشتند، و نورون‌های‌شان کوچک و غیرعادی بودند. همین تأثیر محیط در پرندگان، میمون‌ها، و سایر پستانداران نیز مشاهده می‌شود.^[۶] یعنی برای مغز، محیط اهمیت دارد.

آیا در انسان‌ها هم همین اتفاق می‌افتد؟ در اوایل دهه‌ی ۱۹۹۰، پژوهشگران در کالیفرنیا متوجه شدند که می‌توانند با انجام کالبدشکافی، مغز کسانی را

۲ | فقط دنیا را اضافه کنید ۲۷

که تحصیلات دبیرستانی داشتند، با کسانی که تحصیلات دانشگاهی داشتند، مقایسه کنند. همانند مطالعات جانوری، در اینجا نیز مشاهده کردند که ناحیه‌ی مربوط به درک زبان در کسانی که تحصیلات دانشگاهی داشتند، دندریت‌های بیشتری داشت.^[۷]



یک نورون به‌طور نرمال مانند شاخه‌های درخت رشد می‌کند و به نورون‌های دیگر متصل می‌شود. در محیط غنی، انشعابات بیشتری ایجاد می‌شوند، اما در محیط محروم، شاخه‌ها کوچک می‌شوند.

پس درس اولی که می‌گیریم، این است که ساختار ظریف مغز منعکس‌کننده‌ی محیطی است که در آن قرار گرفته است. و این فقط در مورد دندریت‌ها نیست. به‌طوری که به زودی خواهیم دید، تجربیات زندگی تقریباً تمام جزئیات قابل اندازه‌گیری مغز را، از مقیاس مولکولی گرفته تا آناتومی کلی مغز، کم و زیاد می‌کند.

تجربه‌ی لازم

اینشتین چرا اینشتین شد؟ شکی نیست که ژنتیک اهمیت داشته است، ولی جایگاهی که او در کتاب‌های تاریخ ما پیدا کرده، به خاطر همه‌ی تجربیاتی است که داشته است: کار کردن با ویولنسل، معلم فیزیکی که در سال آخر تحصیل داشت، جواب ردّ دختری که دوست داشت، اداره‌ی ثبت اختراعات که در آنجا کار می‌کرد، مسائل ریاضی که به خاطر حل کردن آن‌ها تشویق می‌شد، داستان‌هایی که می‌خواند، و میلیون‌ها تجربه‌ی دیگر — همه‌ی این‌ها دستگاه عصبی او را به‌صورت یک ماشین بیولوژیک که ما به‌عنوان آلبرت اینشتین

می‌شناسیم، شکل داده است. هر سال، هزاران کودک با همان قابلیت‌های او متولد می‌شوند، ولی در معرض فرهنگ‌ها، شرایط اقتصادی، و ساختارهای خانوادگی قرار می‌گیرند که در آن بازخورد مثبت کافی دریافت نمی‌کنند. و ما به آن‌ها اینشتین نمی‌گوییم.

اگر DNA تنها چیزی می‌بود که اهمیت داشت، آنگاه دلیل خاصی وجود نمی‌داشت که برنامه‌های اجتماعی مهمی ایجاد کنیم تا تجربیات خوبی را برای کودکان فراهم کنیم و آن‌ها را در مقابل تجربیات بد محافظت نماییم. ولی مغز برای اینکه به درستی نمو پیدا کند، نیاز به محیط مناسب دارد. وقتی که در آغاز این هزاره، نخستین پیش‌نویس پروژه‌ی ژنوم انسان تکمیل شد، یکی از چیزهایی که همه را غافلگیر کرد، این بود که انسان‌ها فقط حدود بیست هزار ژن دارند.^(۸) این عدد برای زیست‌شناسان تعجب‌آور بود: با توجه به پیچیدگی مغز و بدن، تصور می‌شد که صدها هزار ژن مورد نیاز باشد.

پس مغز با این همه پیچیدگی و با هشتاد و شش میلیارد نورونی که دارد، چگونه با یک چنین کتاب دستورالعمل کوچکی ساخته می‌شود؟ پاسخ آن مبتنی بر راهبرد هوشمندانه‌ای است که ژنوم به کار می‌گیرد، و آن این است که ساخت را به‌طور ناکامل انجام می‌دهد و اجازه می‌دهد که تجربیات زندگی کار را تکمیل کند. لذا در مورد انسان‌ها، مغز در زمان تولد تا حد زیادی ناقص است، و تعامل با دنیا برای کامل کردن آن ضروری است.

چرخه‌ی خواب و بیداری را در نظر بگیرید. ساعت درونی بدن، موسوم به ریتم شبانه‌روزی، تقریباً با چرخه‌ی بیست و چهار ساعته‌ی عمل می‌کند. اما اگر چند روز را در درون غاری به سر ببرید — که در آنجا هیچ نشانه‌ای از چرخه‌ی روشنایی و تاریکی معمول سطح زمین وجود ندارد — ریتم شبانه‌روزی شما منحرف شده و مدت آن بین بیست و یک تا بیست و هفت ساعت می‌شود. اینجا است که راه‌حل ساده‌ی مغز آشکار می‌شود: ساعت ناکاملی بسازید و بگذارید که با چرخه‌ی خورشید تنظیم شود. با این ترفند زیبا، دیگر نیازی نیست که تنظیم دقیق ساعت کدگذاری شود. دنیا خودش آن را کوک می‌کند. انعطاف‌پذیری مغز امکان آن را فراهم می‌کند که رویدادهای زندگی شما مستقیماً در پارچه‌ی عصبی شما دوخته شوند. این ترفند بزرگی از سوی مادر

طبیعت است، که مغز را قادر می‌سازد که زبان، دوچرخه‌سواری، و فیزیک کوانتوم را فراگیرد، و همه‌ی این کارها را با استفاده از مجموعه‌ی کوچکی از ژن‌ها انجام دهد. DNA ما یک نقشه نیست؛ بلکه صرفاً نخستین قطعه‌ی دومینو است که نمایش را شروع می‌کند.

از این نظرگاه، به آسانی می‌توان فهمید که چرا برخی از شایع‌ترین مشکلات بینایی — از قبیل ناتوانی در دیدن عمق به صورت صحیح — بر اثر عدم تعادل در الگوی فعالیت ارسال شده از دو چشم به قشر بینایی انجام می‌شود. مثلاً وقتی که کودکان با انحراف چشم به داخل یا خارج متولد می‌شوند، فعالیت دو چشم (بر خلاف حالت طبیعی که چشم‌ها هم‌راستا هستند) با یکدیگر هماهنگ نخواهد بود. اگر مشکل اصلاح نشود، دید عمقی نرمال — یعنی توانایی تعیین عمق براساس تفاوت اندک بین دید دو چشم — در کودک ایجاد نخواهد شد. یکی از چشم‌ها به تدریج ضعیف‌تر می‌شود، به طوری که غالباً به حد کوری می‌رسد. بعداً به این موضوع برمی‌گردیم تا ببینیم در این مورد چه می‌توان کرد و چرا. فعلاً نکته‌ی مهم آن است که پیدایش مدارهای نرمال بینایی متکی بر داشتن ورودی بینایی نرمال است. یعنی وابسته به تجربه است.

بنابراین، دستورالعمل‌های ژنتیکی تنها نقش کوچکی در جزئیات تشکیل اتصالات قشری دارد. جز این هم نمی‌توانست باشد: با داشتن بیست هزار ژن و دویست تریلیون اتصال بین نورون‌ها، چطور می‌شد آن‌ها را از قبل مشخص کرد؟ چنین مدلی هرگز عملی نمی‌شد. بلکه شبکه‌های نورونی برای تکوین صحیح خود نیازمند تعامل با جهان هستند.^[۱۹]

قمار بزرگ طبیعت

روز ۲۹ سپتامبر ۱۸۱۲، کودکی به دنیا آمد که قرار بود وارث تاج و تخت دوک بزرگ منطقه‌ی بادن آلمان باشد. متأسفانه این کودک هفده روز بعد مُرد و ماجرا به پایان رسید.

یا شاید هم نه. شانزده سال بعد، مرد جوانی به نام کاسپار هاووزر در شهر نورمبرگ آلمان ظاهر شد. این مرد یادداشتی در دست داشت که روی آن توضیح داده شده بود که او در کودکی رها شده، و ظاهراً فقط چند جمله بلد

است، از جمله اینکه «می‌خواهم یک سواره‌نظام باشم، مانند پدرم». او توجه زیادی را در میان مردم به خود جلب کرد و به حضور افراد قدرتمند رسید؛ خیلی‌ها به این فکر افتادند که شاید او شاهزاده‌ی وارث تاج و تخت بادن باشد که در هفته‌های اول زندگی با کودکی در حال مرگ عوض شده است، توطئه‌ای شرورانه از سوی کسانی که می‌خواستند تاج و تخت به خودشان برسد.

آوازه‌ی این داستان به خارج از مسئله‌ی سلطنت نیز کشیده شد: کاسپر به عنوان نمونه‌ای از کودک رمیده شناخته شد. او به گفته‌ی خودش، تمام کودکی‌اش را تنها در سلول تاریکی گذرانده بود. این حجره یک متر عرض، دو متر طول، و یک متر و نیم ارتفاع داشت. درون آن تختی از پوشال و یک اسب چوبی کوچک قرار داشت. هر روز صبح که بیدار می‌شد، مقداری نان و آب آنجا برایش گذاشته شده بود و لاغیر. او شاهد ورود یا خروج کسی نبود. بعضی وقت‌ها مزه‌ی آبی که می‌خورد، کمی متفاوت بود و پس از آن کمی خواب‌آلود می‌شد — و وقتی که بیدار می‌شد، می‌دید که موها و ناخن‌هایش را کوتاه کرده‌اند. ولی درست در زمان آزادی‌اش بود که با انسان دیگری تماس برقرار کرد، مردی که نوشتن را به او آموخت، ولی همیشه چهره‌اش را مخفی می‌کرد.

داستان کاسپار هاوزر توجه بین‌المللی زیادی را برانگیخت. او بعداً مطالب تکان‌دهنده‌ی زیادی را درباره‌ی دوران کودکی‌اش نوشت. قصه‌ی او امروزه هم در نمایش‌نامه‌ها، کتاب‌ها، و آثار موسیقی بازگو می‌شود؛ شاید بتوان گفت مشهورترین داستان تاریخ درباره‌ی کودکان رمیده است.

ولی تقریباً با اطمینان می‌توان گفت که ادعای کاسپار نادرست بود. گذشته از تحلیل‌های گسترده‌ی تاریخی که آن را رد می‌کند، یک دلیل عصب‌شناختی نیز برای رد آن وجود دارد: کودکی که بدون تعامل با انسان‌ها بزرگ شود، نمی‌تواند مانند کاسپار با موفقیت یاد بگیرد که راه برود، حرف بزند، بنویسد، سخنرانی کند، و پیشرفت نماید. پس از یک قرن مطالب عامیانه درباره‌ی کاسپار، کارل لئونارد روان‌پزشک تکلیف آن را معلوم کرد:

اگر او آن‌گونه که می‌گوید، از زمان کودکی در چنان شرایطی زندگی کرده بود، نمی‌توانست از حد یک فرد کودن بالاتر برود؛ در واقع، حتی مدت زیادی زنده نمی‌ماند. قصه‌ی او چنان پر از مهمالات است که عجیب است

که کسی آن را باور کرده و حتی امروزه هم خیلی‌ها آن را باور می‌کنند.^[۱۰]

باید گفت که با آنکه بعضی چیزها از قبل براساس ژنتیک تعیین می‌شود، ولی رویکرد طبیعت برای ایجاد مغز متکی بر دریافت مجموعه‌ی وسیعی از تجربیات است، از قبیل تعامل اجتماعی، گفت‌وگو، بازی، تماس با دنیا، و بقیه‌ی مسایلی که در زندگی طبیعی یک انسان وجود دارد. راهبرد تعامل با جهان امکان می‌دهد که ماشین‌آلات عظیم مغزی از مجموعه‌ی نسبتاً کوچکی از دستورالعمل‌ها شکل بگیرد. رویکردی است هوشمندانه برای ساختن مغز (و بدن) از یک سلول واحد میکروسکوپی.

ولی از طرف دیگر، این راهبرد، نوعی قمار نیز هست. روش نسبتاً پرخطری است — روشی که در آن بخشی از کار شکل‌دهی مغز به جای مدارسازی ایستا، بر عهده‌ی تجربه‌ی زندگی گذاشته می‌شود. به هر حال، امکان دارد که کودکی واقعاً در شرایط کاسپار قرار گیرد و دوران کودکی او با سهل‌انگاری کامل والدین همراه باشد. آنگاه چه می‌شود؟

متأسفانه ما پاسخ این پرسش را می‌دانیم. در یک نمونه در ژوئیه‌ی سال ۲۰۰۵، مأموران پلیس در شهر پلنت سیتی، فلوریدا، برای انجام تحقیقات به جلوی خانه‌ی مخروبه‌ای رفتند. یکی از همسایه‌ها به پلیس خبر داده بود که چند بار دختری را از پشت پنجره داخل آن خانه دیده است، ولی هرگز ندیده که آن دختر از خانه خارج شود، و فرد بزرگسالی را نیز از پشت پنجره با او ندیده است. مأموران پلیس چند نوبت در خانه را زدند، تا آنکه سرانجام زنی در را به روی آن‌ها باز کرد. آن‌ها به زن گفتند که حکم تفتیش برای جست‌وجوی دخترش در داخل خانه دارند. آن‌ها وارد خانه شدند و راهروها و چند اتاق را جست‌وجو کردند، و بالاخره وارد یک اتاق خواب کوچک شدند. دخترک آنجا بود. یکی از مأموران حالش به هم خورد.

دانیل کراکت، دختری کوچک‌جثه و تقریباً هفت‌ساله، تمام مدت کودکی‌اش در اتاقک تاریکی محبوس بود. وقتی او را پیدا کردند، آلوده به مدفوع بود و سوسک‌ها روی او راه می‌رفتند. غیر از قوت بخور و نمیر، هیچ‌وقت کسی او را نوازش نکرده بود، هرگز با کسی گفت‌وگو نکرده بود، و به احتمال زیاد، هرگز از خانه خارج نشده بود. به هیچ‌وجه توانایی تکلم نداشت. وقتی که افسران

پلیس (و بعداً مددکاران اجتماعی و روان‌شناسان) با او ملاقات کردند، اصلاً به آن‌ها نگاه نمی‌کرد؛ هیچ نشانه‌ای از تعامل طبیعی انسانی در او دیده نمی‌شد. او نمی‌توانست غذای جامد را بجود، بلد نبود از توالت استفاده کند، نمی‌توانست سرش را به علامت تأیید یا انکار تکان دهد، و بعد از یک سال هنوز یاد نگرفته بود از لیوان نی‌دار بنوشد. پس از آزمایش‌های بسیار، پزشکان تأیید کردند که او هیچ‌گونه مشکل ژنتیکی از قبیل فلج مغزی، اوتیسم (درخودماندگی)، یا سندروم داون ندارد. بلکه تکوین طبیعی مغز او براساس محرومیت اجتماعی شدید از مسیر خود خارج شده بود.



دانیل، دختری رمیده که در سال ۲۰۰۵ در فلوریدا پیدا شد. با آنکه این عکس چهره‌ی زیبای یک کودک را نشان می‌دهد، ولی او فاقد رفتارها و حالت‌های چهره‌ی مربوط به تعامل طبیعی انسان‌ها است: او دوره‌ی بحرانی دریافت ورودی مناسب از جهان را از دست داده است.

علی‌رغم تلاش زیاد پزشکان و مددکاران اجتماعی، وضعیت دانیل پیش‌آگهی بدی دارد؛ او به احتمال زیاد زندگی خود را در یک آسایشگاه خواهد گذراند و شاید نهایتاً بتواند بدون پوشک زندگی کند.^[۱۱] شوربختانه داستان او نوع واقعی ماجرای کاسپار هاووزر است که پیامدهای واقعی در زندگی او داشته است. دانیل بدان علت چنین سرنوشت ناخوشایندی پیدا کرده که مغز انسان به‌صورت ناقص وارد دنیا می‌شود. تکوین صحیح نیازمند ورودی مناسب است. مغز تجربه را می‌گیرد تا برنامه‌های خود را به‌ظهور برساند، و تمام این کار صرفاً در یک پنجره‌ی زمانی که به سرعت بسته می‌شود، صورت می‌پذیرد. وقتی که

این پنجره بسته شود، باز کردن دوباره‌ی آن دشوار یا حتی غیرممکن است. هم‌راستا با ماجرای دانیل، می‌توان به یک سری آزمایش‌های جانوری در اوایل دهه‌ی ۱۹۷۰ اشاره کرد. هری هارلو، محققی در دانشگاه ویسکانسین، برقراری پیوند عاطفی بین مادر و فرزندان را در میمون‌ها مورد مطالعه قرار داد. او زندگی علمی فعالی داشت، ولی زمانی که همسرش در سال ۱۹۷۱ بر اثر سرطان فوت کرد، دچار افسردگی شد. همچنان به کارش ادامه می‌داد، ولی دوستان و همکارانش می‌فهمیدند که او دیگر همان آدم سابق نیست. از آن پس، تلاش علمی‌اش را بر مطالعه‌ی افسردگی متمرکز کرد.

او با بهره‌گیری از میمون‌ها برای مدل‌سازی افسردگی انسانی، مطالعه‌ای برای بررسی انزوا ترتیب داد. بچه‌میمونی را درون قفسی فولادی و بدون پنجره گذاشت. در دیوار قفس آینه‌ی یک‌طرفه‌ای قرار داده شده بود که هارلو درون آن را ببیند، ولی میمون نمی‌توانست بیرون را ببیند. هارلو این آزمایش را با یک میمون به مدت سی روز انجام داد. بعد میمون دیگری را به مدت شش ماه به همین صورت مطالعه کرد. گروهی دیگر از میمون‌ها را نیز به مدت یک سال کامل محبوس کرد.

از آنجا که بچه‌میمون‌ها هرگز فرصت آن را پیدا نمی‌کردند که پیوندهای عاطفی نرمال برقرار کنند (چون مدت کوتاهی پس از تولد درون قفس قرار داده می‌شدند)، لذا با اختلالات عمیقی از قفس خارج می‌شدند. آن‌هایی که مدت انزوای طولانی‌تر داشتند، بیشتر شبیه دانیل بودند: آن‌ها هیچ‌گونه تعامل طبیعی با میمون‌های دیگر انجام نمی‌دادند و مبادرت به تفریح، همکاری، یا رقابت نمی‌کردند. تقریباً اصلاً حرکت نمی‌کردند. دو تا از آن‌ها دیگر غذا هم نمی‌خوردند.

علاوه بر این، هارلو متوجه شد که این میمون‌ها قادر به داشتن روابط جنسی طبیعی نیز نیستند. با تمام این احوال، ترتیبی داد که تعدادی از ماده‌های محبوس‌شده آبستن شوند تا ببیند این میمون‌های آشفته با فرزندان خود چه تعاملی خواهند داشت. نتایج مصیبت‌بار بود. میمون‌های منزوی به‌هیچ‌وجه توانایی بچه بزرگ کردن نداشتند. در بهترین حالت، کاملاً به بچه‌ها بی‌توجهی می‌کردند؛ در بدترین حالت، بچه‌ها را مصدوم می‌کردند.^[۱۲]

درسی که از میمون‌های هارلو می‌گیریم، همان درسی است که از دانیل می‌گیریم: راهبرد مادر طبیعت برای شکوفاسازی مغز متکی بر داشتن تجربیات مناسب در زندگی است. بدون آن، مغز درست تشکیل نمی‌شود و حالت مرضی پیدا می‌کند. مانند درختی که برای شاخه زدن نیاز به خاک غنی از مواد مغذی دارد، مغز نیاز به خاک غنی تعامل حسی و اجتماعی دارد.



با در دست داشتن این پیش‌زمینه، اکنون می‌توانیم ببینیم که مغز برای شکل‌دهی خودش از محیط بهره می‌گیرد. ولی دقیقاً به چه صورت جهان را جذب می‌کند — خصوصاً از درون غار تاریکی که در آن قرار دارد؟ وقتی که کسی دستش قطع می‌شود یا کر می‌شود، چه اتفاقی می‌افتد؟ آیا واقعاً افراد نابینا شنوایی بهتری پیدا می‌کنند؟ و تمام این‌ها چه ارتباطی با علت خواب دیدن ما دارد؟

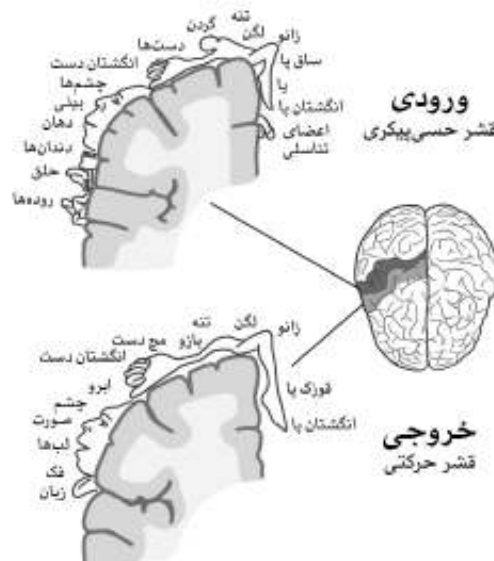
۳ | درون آینه‌ی بیرون است

ماجرای میمون‌های سیلور اسپرینگ

در سال ۱۹۵۱، وایلدِر پَنفیلد که جراح اعصاب بود، نوک الکتروود ریزی را تحت عمل جراحی به درون مغز مردی فروبرد.^[۱] در امتداد بافت مغزی درست در زیر جایی که آدم هدفون می‌گذارد، پَنفیلد چیز عجیبی را کشف کرد. اگر شوک الکتریکی کوچکی را به یک نقطه‌ی خاص وارد می‌کرد، بیمار احساس می‌کرد گویی چیزی را با دستش لمس کرده است. اگر پَنفیلد نقطه‌ای نزدیک آنجا را تحریک می‌کرد، بیمار لمس را روی تنه‌اش حس می‌کرد. باز یک نقطه‌ی دیگر مربوط به زانو بود. هر نقطه از بدن بیمار، نقطه‌ی مشخصی در مغز داشت. سپس پَنفیلد مطلب عمیق‌تری را متوجه شد: نواحی مجاور بدن با نواحی مجاوری در مغز نمایش داده می‌شود. نقطه‌ی مربوط به دست نزدیک ساعد بود، و آن هم نزدیک آرنج بود، و آرنج نزدیک بازو، و الی آخر. در این نوار مغزی، نقشه‌ی کاملی از بدن یافت می‌شد. او روی قشر حسی پیکری به آهستگی از نقطه‌ای به نقطه‌ی بعدی رفت، تا آنکه توانست تمام شکل بدن انسان را به دست آورد.^[۲]

و تازه این تنها نقشه‌ای نبود که پیدا کرد. روی قشر حرکتی (نوازی درست در جلوی قشر حسی پیکری) نیز به همان نتیجه دست یافت: دادن یک شوک الکتریکی کوچک سبب می‌شد که ماهیچه‌های ناحیه‌ی خاصی از بدن به حرکت درآید، و نقطه‌های مجاور مربوط به نواحی مجاور بود. در اینجا هم همه چیز به‌طور منظم قرار گرفته بود.

او این نقشه‌های بدن را هومونکولوس، یعنی «آدمک»، نامید.



در جایی که ورودی‌ها وارد مغز می‌شوند (قشر حسی پیکری، بالا) و خروجی‌ها خارج می‌شوند (قشر حرکتی، پایین)، نقشه‌ای از بدن یافت می‌شود. بخش‌هایی که حس دقیق‌تر یا حرکت ظریف‌تری دارند، ناحیه‌ی بیشتری را به خود اختصاص داده‌اند.

ولی وجود این نقشه‌ها شگفت‌آور و غیرمنتظره است. چگونه این‌ها می‌توانند وجود داشته باشند؟ هرچه باشد، مغز در تاریکی مطلق در درون جمجمه محبوس است. این یک و نیم کیلوگرم بافت مغزی که نمی‌داند بدن چه شکلی است؛ مغز به هیچ طریقی نمی‌تواند مستقیماً بدن را ببیند. به هیچ چیزی دسترسی ندارد، مگر جریان مداومی از پالس‌های الکتریکی که از رشته‌های کلفت کابل‌های داده‌ای که به آن‌ها عصب می‌گوییم، عبور می‌کند. مغز که در زندان استخوانی‌اش محبوس شده، قاعدتاً نباید بداند که چه اندام‌هایی به کدام اعصاب متصل هستند، یا اینکه کدام اعضا در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. پس چگونه نقشه‌ای از بدن در درون این خزانه‌ی بی‌نور وجود دارد؟

شاید پس از چند لحظه فکر کردن به ساده‌ترین جواب برسید: نقشه‌ی بدن باید به صورت ژنتیکی از قبل برنامه‌نویسی شده باشد. حدس خوبی است! ولی غلط است.

بلکه این معما پاسخی زیرکانه‌تر دارد.



سرنخی برای حل معمای نقشه‌ها چند دهه‌ی بعد در رویدادهایی غیرمنتظره به دست آمد. ادوارد تاوب، از محققان مؤسسه‌ی پژوهش رفتاری در سیلور اسپرینگ، مریلند، می‌خواست بفهمد که قربانیان آسیب مغزی چگونه می‌توانند حرکت خود را بازیابند. برای این منظور، هفده میمون را جمع‌آوری کرد و بر روی آن‌ها به مطالعه‌ی امکان بازسازی عصب‌های قطع‌شده پرداخت. در هر کدام از میمون‌ها، با دقت یک دسته‌ی عصبی را که متصل‌کننده‌ی مغز به یکی از دست‌ها یا پاها بود، قطع می‌کرد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، میمون‌های بدبخت هرگونه حس اندام مربوطه را از دست می‌دادند، و تاوب بررسی می‌کرد ببیند آیا راهی هست که میمون‌ها دوباره امکان استفاده از اندام خود را به دست آورند.

در سال ۱۹۸۱، داوطلب جوانی به نام آلکس پاچکو در آزمایشگاه شروع به کار کرد. گرچه او خود را به‌عنوان دانشجویی علاقه‌مند معرفی کرده بود، ولی در واقع، جاسوس سازمان نوپایی به نام بنیاد مردمی رعایت اصول اخلاقی در برابر جانوران (PETA) بود. شب که می‌شد، پاچکو عکس می‌گرفت. ظاهراً بعضی از عکس‌ها را صحنه‌سازی می‌کرد تا رنج و عذاب میمون‌ها را با اغراق نمایش دهد،^[۲] ولی به هر حال، به نتیجه‌ی مورد نظر دست یافت. در سپتامبر ۱۹۸۱، پلیس شهرستان مونته‌گویری به آزمایشگاه یورش برد و آن را تعطیل کرد. دکتر تاوب به شش فقره سهل‌انگاری در ارائه‌ی مراقبت دامپزشکی مناسب محکوم شد. تمام اتهامات در فرجام‌خواهی رد شد؛ ولی با این حال، این رویدادها منجر به تصویب قانون رفاه جانوران در سال ۱۹۸۵ شد، که در آن کنگره مقررات جدیدی را برای مراقبت از جانوران در محیط‌های پژوهشی تعریف کرد.

گرچه این حوادث نقطه‌ی عطفی برای حقوق حیوانات بود، ولی اهمیت این داستان فقط از جهت اتفاقات کنگره نیست. هدف از نقل این داستان، اتفاقی است که برای هفده میمون افتاد. بلافاصله پس از اتهام، افراد بنیاد مردمی به آزمایشگاه وارد شدند و میمون‌ها را با خود بردند، که منجر به اتهام دزدی ادله‌ی دادگاه شد. مؤسسه‌ی پژوهشی تاوب با عصبانیت خواستار برگرداندن میمون‌ها شد. دعوای حقوقی بالا گرفت و نزاع بر سر تصاحب میمون‌ها به دیوان عالی

آمریکا کشید. دیوان درخواست بنیاد مردمی برای نگهداشتن میمون‌ها را رد کرد، و در عوض سرپرستی میمون‌ها را به یک طرف ثالث، مؤسسات ملی بهداشت، سپرد. در حالی که انسان‌ها در دادگاه‌ها به سر و کله‌ی هم می‌پريدند، میمون‌های معلول از بازنشستگی زودرس بهره‌مند شدند و ده سال را به خوردن و خوابیدن و بازی کردن با یکدیگر گذراندند.

در اواخر این دوره، یکی از میمون‌ها مریض و بسیار بدحال شد. دادگاه موافقت کرد که میمون را خلاص کنند. در اینجا بود که ورق برگشت. گروهی از پژوهشگران علوم اعصاب پیشنهادی به قاضی دادند: درخواست کردند که درست قبل از قتل ترحم‌آمیز میمون، زیر بیهوشی یک مطالعه‌ی نقشه‌برداری مغز روی او انجام شود تا قطع کردن عصب او بیهوده نبوده باشد. پس از مقداری بحث و جدل، دادگاه اجازه را صادر کرد.

در روز ۱۴ ژانویه ۱۹۹۰، تیم پژوهشی الکترودهای ثبت‌کننده را در قشر حسی‌پیکری میمون قرار دادند. درست به همان طریقی که وایلدنر پنفیلد روی بیمار انسانی‌اش عمل کرده بود، محققان نقاط مختلف دست، بازو، صورت، و غیره را در میمون لمس کردند، و هم‌زمان فعالیت نورون‌ها در مغز را ثبت کردند. به این طریق، نقشه‌ی بدن را در مغز آشکار کردند.

این یافته موحی را در جامعه‌ی علوم اعصاب به راه انداخت. نقشه‌ی بدن در طول سال‌ها تغییر کرده بود. همان گونه که انتظار می‌رفت، لمس ملایم دست میمون که عصب آن قطع شده بود، دیگر هیچ‌گونه پاسخی را در قشر برنمی‌انگیخت. ولی تعجب‌آور این بود که ناحیه‌ی کوچکی از قشر که قبلاً نماینده‌ی دست بود، حالا با لمس صورت تحریک می‌شد.^[۴] نقشه‌ی بدن بازآرایی شده بود. آدمک مغزی هنوز شبیه میمون بود، ولی میمونی بدون دست راست.

با این کشف، این احتمال که نقشه‌ی بدن به‌صورت ژنتیکی برنامه‌نویسی شده باشد، رد شد. معلوم شد فرایند جالب‌تری در جریان است. ورودی‌های دریافتی از بدن به‌طور انعطاف‌پذیر نقشه‌ی بدن را در مغز تعریف می‌کند. اگر بدن تغییر کند، آدمک نیز تغییر می‌کند.

همین مطالعات نقشه‌برداری مغزی بعداً روی دیگر میمون‌های سیلور اسپرینگ نیز انجام شد. در هر کدام از آن‌ها، قشر حسی‌پیکری به‌طور شگرفی

بازآرایی شده بود: مناطقی که قبلاً نشان‌دهنده‌ی اندامی بود که عصب آن قطع شده بود، در اختیار نواحی مجاور قشر قرار گرفته بود. آدمک به‌گونه‌ای تغییر یافته بود که با طرح جدید بدن میمون هماهنگ باشد.^[۵] و اما وقتی مغز به این روش بازآرایی می‌شود، چه احساسی در فرد ایجاد می‌شود؟ متأسفانه میمون‌ها نمی‌توانند به ما بگویند. ولی آدم‌ها می‌توانند.

زندگی آخری دست راست لرد هوریشیو نلسون

دریادار لرد هوریشیو نلسون (۱۷۵۸-۱۸۰۵)، فرمانده نیروی دریایی بریتانیا، قهرمانی است که تندیس او بر روی ستونی در مقابل میدان ترافالگار لندن قرار دارد.^[۶] این مجسمه‌ی بلند شاهی بر رهبری کاریزماتیک، قدرت تاکتیکی، و تدبیرهای جنگی زیرکانه‌ی او است، که بر روی هم فتوحات قاطعی را بر روی دریاها از آمریکا گرفته تا رود نیل و کپنهاگ برای این کشور به ارمغان آورد. او در آخرین نبردش — نبرد ترافالگار — که یکی از بزرگ‌ترین فتوحات دریایی بریتانیا به شمار می‌رود، قهرمانانه کشته شد.

دریادار نلسون علاوه بر تأثیری که بر نیروی دریایی داشت، خدمتی نیز به علوم اعصاب انجام داد — ولی این کاملاً اتفاقی بود. دخالت او در این موضوع از زمان حمله‌اش به سانتا کروز د تریف آغاز شد که ساعت یازده شب ۲۴ ژوئیه ۱۷۹۷، گلوله‌ای که از یک تفنگ فتیله‌ای اسپانیایی شلیک شده بود، مسیر خود را با سرعت سیصد متر بر ثانیه طی کرد و به بازوی راست لرد نلسون اصابت کرد. استخوانش خرد شد. پسرخوانده‌ی نلسون تکه‌ای از سربند او را محکم دور بازویش بست تا جلوی خون‌ریزی را بگیرد، و ملاحان با قدرت به پارو زدن پرداختند تا به کشتی اصلی بازگردند که جراح در آنجا مضطربانه منتظر بود. پس از معاینه‌ی فیزیکی سریع، خبر خوب این بود که نلسون احتمالاً زنده می‌ماند. ولی خطر بد این بود که به علت خطر قانقاریا، لازم بود دست او قطع شود. دست راست نلسون را با عمل جراحی از بالای آرنج قطع کردند و آن را از عرشه‌ی کشتی به درون آب انداختند.

در طول هفته‌های بعد، نلسون به‌تدریج یاد گرفت که کارهایش را بدون دست راست انجام دهد — غذا خوردن، استحمام کردن، و حتی تیراندازی

کردن. حتی به شوخی ته‌مانده‌ی دست قطع‌شده‌اش را «باله» می‌نامید. ولی چند ماه پس از حادثه، عوارض عجیبی پدیدار شد. لرد نلسون کم‌کم دچار این احساس شد — واقعاً لمس می‌کرد — که دستش هنوز وجود دارد. حس آن را دریافت می‌کرد. با آنکه دست راستش را از دست داده بود، ولی با اطمینان حس می‌کرد که ناخن‌های آن دست به کف دستش فرو می‌رود و ایجاد درد می‌کند.

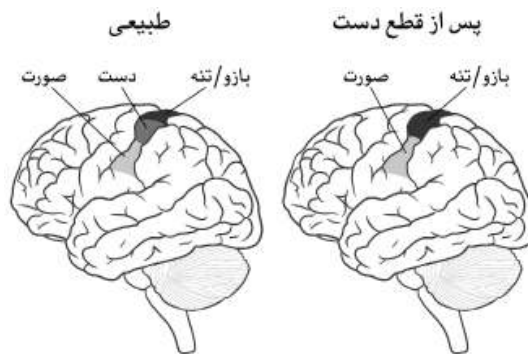
نلسون برای این اندام خیالی تفسیر خوش‌بینانه‌ای ارائه کرد: او متقاعد شده بود که این احساس، مدرک انکارناپذیری بر وجود زندگی پس مرگ است. به هر حال، اگر یک اندام از دست رفته می‌تواند حسی آگاهانه را برانگیزد — یعنی برای خودش نوعی شبیح داشته باشد — پس لابد برای تمام بدن نیز این امکان وجود دارد.



گرچه تابلوها و مجسمه‌های زیادی از لرد هوریشیو نلسون در موزه‌های بریتانیا وجود دارد، ولی اکثر بازدیدکنندگان متوجه فقدان دست راست او نمی‌شوند. قطع این دست در سال ۱۷۹۷ منجر به یک مورد بالینی اولیه از حس اندام خیالی شد که نلسون برای آن تفسیر متافیزیکی جالب ولی نادرستی ارائه کرد.

نلسون تنها کسی نبود که متوجه این‌گونه حس‌های عجیب شد. چند سال بعد در آن سوی اقیانوس اطلس، پزشکی به نام سیلاس ویر میچل شرح چندین مورد قطع اندام سربازان جنگ داخلی را در بیمارستانی در فیلادلفیا ثبت کرد. چیزی که او را حیرت‌زده می‌کرد، این بود که خیلی از آن‌ها به اصرار می‌گفتند که هنوز اندام قطع‌شده‌ی خود را حس می‌کنند.^[۷] آیا این اثباتی بر نامیرایی جسمانی نلسون بود؟

باید گفت که نتیجه‌گیری نلسون عجولانه بود. مغز او داشت نقشه‌هایش را بازآرایی می‌کرد، درست همان اتفاقی که در میمون‌های سیلور اسپرینگ افتاد. با گذشت زمان، همان‌گونه که تاریخ‌دانان جابه‌جایی مرزهای امپراتوری بریتانیا را پیگیری می‌کردند، دانشمندان یاد گرفتند که جابه‌جایی مرزها در مغز انسان را نیز ردیابی نمایند.^[۸] با تکنیک‌های تصویربرداری مدرن، می‌توانیم ببینیم که وقتی که یک بازو قطع می‌شود، ناحیه‌ی مربوط به آن در قشر مغز مورد دست‌اندازی نواحی مجاور قرار می‌گیرد. در این حالت، در اطراف نواحی قشری مربوط به دست و ساعد، قلمروهای مربوط به بازو و صورت قرار گرفته است. (حالا چرا صورت؟ صرفاً به این خاطر که وقتی بخواهیم بدن را روی یک نقشه‌ی خطی نمایش دهیم، به این صورت واقع می‌شود.) بنابراین، این قسمت‌ها جایی را که در گذشته متعلق به دست بوده، تصاحب می‌کنند. درست مانند میمون‌ها، نقشه‌ها به‌گونه‌ای تغییر می‌کند که منعکس‌کننده‌ی شکل کنونی بدن باشد.



مغز خود را با طرح بدن سازگار می‌کند. وقتی که دستی قطع می‌شود، مناطق مجاور قشر مغز اقدام به غصب ناحیه‌ای می‌کنند که قبلاً در تصرف دست بوده است.

با این حال، در اینجا معمای دیگری نیز نهفته است. چرا نلسون هنوز دستش را حس می‌کرد و چرا وقتی که به صورتش دست می‌زدید، احساس می‌کرد که دست خیالی او را لمس کرده‌اید؟ آیا نواحی مجاور، قسمتی را که معرف دست بوده، تصرف نکرده بودند؟ پاسخ آن است که حس لمس دست فقط وابسته به سلول‌های قشر حسی پیکری نیست، بلکه وابسته به سلول‌های پایین‌دستی مرتبط با آن‌ها، و حتی سلول‌های پایین‌دست‌تر از اینها نیز هست. بنابراین، گرچه نقشه در قشر حسی پیکری به سرعت خودش را تغییر داده است، ولی در نواحی پایین‌دستی جابه‌جایی هرچه کمتری صورت گرفته است. در کودکی که بدون دست متولد می‌شود، نقشه کاملاً متفاوت خواهد بود — ولی در یک فرد بزرگسال، مانند لرد نلسون، سیستم انعطاف‌پذیری کمتری برای بازنویسی وضعیت ظاهری خود دارد. در اعماق مغز لرد نلسون، نوروهای پایین‌دست قشر حسی پیکری اتصالات خود را زیاد تغییر نداده بودند، و لذا فکر می‌کردند که فعالیتی که دریافت می‌کنند، ناشی از لمس شدن دست است. در نتیجه، نلسون حضور شبح‌وار اندام از دست رفته‌اش را حس می‌کرد.^[۹]



میمون‌ها و دریا‌دارها و کهنه‌سربازان جنگ داخلی همگی داستان واحدی را تعریف می‌کنند: وقتی که ورودی ناگهان قطع می‌شود، نواحی حسی قشر مغز بایر نمی‌مانند. بلکه مورد تهاجم نواحی همسایه واقع می‌شوند.^[۱۰] اکنون که هزاران مورد قطع اندام حرکتی با دستگاه‌های تصویربرداری مغز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، به روشنی می‌توانیم ببینیم که ماده‌ی مغزی مانند سخت‌افزار نیست، بلکه به‌طور پویا خود را بازتخصیص می‌دهد.

گرچه قطع اندام حرکتی منجر به بازآرایی شگرفی در قشر مغز می‌شود، ولی تغییر شکل مغز را با تغییرات خفیف‌تر بدن نیز می‌توان القا کرد. مثلاً اگر یک کاف فشارسنج را سفت دور بازوی شما ببندم، بدن به علت ضعیف شدن سیگنال‌های ورودی، خودش را تطبیق می‌دهد و منطقه‌ی کوچک‌تری را به آن بخش از بدن اختصاص می‌دهد.^[۱۱] به همین ترتیب، اگر اعصاب بازوی شما با استفاده از ماده‌ی بی‌حسی به مدت طولانی مسدود شود، همین اتفاق می‌افتد. در

واقع، حتی اگر دو انگشتان را به هم ببندید — به طوری که دیگر نه به صورت مستقل از هم، بلکه به صورت یک واحد عمل کنند — نمایش قشری آن‌ها نهایتاً از دو منطقه‌ی متمایز به یک ناحیه‌ی واحد ادغام خواهد شد.^[۱۲]

پس مغز که محدود به آشیانه‌ی تاریک خود است، چگونه می‌تواند مدام شکل بدن را زیر نظر داشته باشد؟

زمان مهم‌ترین عامل است

تصور کنید که از بالا به محله‌ی خود نگاه می‌کنید. مشاهده می‌کنید که بعضی از افراد هر روز ساعت شش صبح سگ‌شان را برای پیاده‌روی بیرون می‌برند. برخی دیگر از افراد بعد از ساعت نه، سگ‌شان را بیرون می‌برند. بعضی‌ها هم بعد از ناهار این کار را انجام می‌دهند. و گروهی هم پیاده‌روی شبانه را ترجیح می‌دهند. اگر مدتی رفت‌وآمدهای محله را زیر نظر داشته باشید، متوجه می‌شوید که افرادی که در یک زمان پیاده‌روی می‌کنند، معمولاً با هم دوست می‌شوند: به یکدیگر برخورد می‌کنند، با هم گپ می‌زنند، و سرانجام یکدیگر را برای دورهمی دعوت می‌کنند. دوستی تابع زمان‌بندی است.

در مورد نورون‌ها هم همین‌طور است. آن‌ها کسر کوچکی از وقت خود را صرف ارسال پالس‌های الکتریکی ناگهانی می‌کنند (که به آن‌ها اسپایک یا نیزه‌ی ولتاژ گفته می‌شود). زمان این پالس‌ها اهمیت زیادی دارد. مثلاً یک نورون معمولی را در نظر می‌گیریم. این نورون با ده هزار نورون مجاور ارتباط برقرار می‌کند. ولی رابطه‌ی آن با همه‌ی آن ده هزار نورون به یک اندازه قوی نیست. بلکه شدت رابطه براساس زمان‌بندی است. اگر نورون ما پالس بفرستد و یک نورون متصل به آن هم درست بعد از آن پالس بفرستد، پیوند بین آن‌ها تقویت می‌شود. این قانون را می‌توان به این صورت خلاصه کرد که نورون‌هایی که با هم شلیک می‌کنند، با هم مدار می‌سازند.^[۱۳]

در یک مغز جوان که مانند محله‌ای نوپا است، اعصابی که از بدن به مغز می‌آیند، به صورت وسیعی شاخه می‌زنند. ولی در جاهایی ریشه‌های دائمی می‌دوانند که زمان‌بندی شلیک کردن آن‌ها به نورون‌های دیگر نزدیک‌تر است. به علت این همگامی، پیوندهای آن‌ها تقویت می‌شود. آن‌ها دورهمی

نمی‌گیرند، ولی میانجی‌های عصبی بیشتری آزاد می‌کنند، یا اینکه گیرنده‌های بیشتری برای دریافت میانجی‌های عصبی می‌سازند، و این موجب برقراری پیوند قوی‌تری بین آن‌ها می‌شود.

چگونه این ترفند ساده منجر به ایجاد نقشه‌ای از بدن می‌شود؟ در نظر بگیرید که وقتی در محیط خود به اشیاء برخورد می‌کنید، به آن‌ها دست می‌زنید، آن‌ها را در بغل می‌گیرید، به آن‌ها لگد یا ضربه می‌زنید، و یا با ملایمت به آن‌ها می‌زنید، چه اتفاقی می‌افتد. وقتی که یک لیوان قهوه را برمی‌دارید، عموماً تکه‌هایی از پوست انگشتان شما به‌طور هم‌زمان فعال می‌شوند. وقتی که کفش می‌پوشید، بخش‌هایی از پوست پای شما هم‌زمان فعال می‌شوند. برعکس، لمس انگشت حلقه‌ی شما و انگشت کوچک پایتان معمولاً همبستگی کمتری با یکدیگر دارد، زیرا کمتر موقعیتی در زندگی هست که این دو انگشت با هم در یک لحظه فعال شوند. همین‌مطلب در مورد تمام بدن صحت دارد: قطعه‌هایی که مجاور هم هستند، عموماً بیشتر از قطعه‌هایی که مجاور نیستند، به‌طور هم‌زمان فعال می‌شوند. پس از مدتی تعامل با جهان، مناطقی از پوست که هم‌زمان فعال هستند، به ناحیه‌ای مجاور یکدیگر متصل می‌شوند، و مناطقی که با یکدیگر همبستگی ندارند، عموماً از یکدیگر دور خواهند بود. نتیجه‌ی سال‌ها هم‌فعالیتی، اطلسی از نواحی مجاور است، یعنی نقشه‌ای از بدن. به عبارت دیگر، علت اینکه مغز دارای نقشه‌ای از بدن است، قاعده‌ی ساده‌ای است که بر نحوه‌ی ایجاد اتصالات سلول‌های مغزی با یکدیگر حاکم است: نورون‌هایی که فعال شدن آن‌ها از نظر زمانی به یکدیگر نزدیک است، بین خودشان اتصال برقرار می‌کنند و آن اتصالات را حفظ می‌کنند. به این طریق است که نقشه‌ای از بدن در تاریکی ظاهر می‌شود.^[۱۴]

ولی چرا وقتی ورودی تغییر می‌کند، نقشه هم تغییر می‌کند؟

مستعمره‌سازی یک کار تمام‌وقت است

در آغاز قرن هفدهم، فرانسه شروع به مستعمره‌سازی آمریکای شمالی کرد. با چه تکنیکی؟ با فرستادن کشتی‌هایی پر از افراد فرانسوی. و مؤثر هم بود. مهاجران فرانسوی در سرزمین جدید سکنی گزیدند. در سال ۱۶۰۹، فرانسوی‌ها پایگاهی برای تجارت خز بر پا کردند که بعدها تبدیل به شهر کبک شد، که

مقدر بود پایتخت فرانسه ی نو باشد. طی بیست و پنج سال، فرانسوی ها تا ویسکانسین رسیده بودند. با سفرهایی که مهاجران جدید فرانسوی در آن سوی اقیانوس اطلس می کردند، قلمرو آن ها بزرگ تر می شد.

ولی نگهداری فرانسه ی نو کار آسانی نبود: قدرت های دیگری که کشتی های خود را به این سرزمین می فرستادند، به خصوص بریتانیا و اسپانیا، همواره با آن در رقابت بودند. از این رو، پادشاه فرانسه، لوئی چهاردهم، متوجه درس مهمی شد: اگر او می خواست که فرانسه ی نو استحکام یابد، باید مدام کشتی بفرستید — زیرا بریتانیا هم کشتی های بیشتری می فرستاد. او آگاه بود که کبک به خاطر فقدان زنان با سرعت کافی رشد نمی کند، و لذا ۸۵۰ زن را (به نام دختران پادشاه) به آنجا فرستاد تا جمعیت محلی فرانسویان را تقویت کند. این اقدام کمک کرد که جمعیت فرانسه ی نو از هفت هزار نفر در سال ۱۶۷۴ به پانزده هزار نفر در سال ۱۶۸۹ برسد.



مسئله این بود که بریتانیایی ها مردان و زنان جوان خیلی بیشتری می فرستادند. در سال ۱۷۵۰، که فرانسه ی نو شصت هزار نفر جمعیت داشت، مستعمره های بریتانیا از جمعیت یک میلیون نفر برخوردار بود. این عاملی تعیین کننده در جنگ های بعدی بین این دو قدرت بود: فرانسوی ها، با وجود پیوندهایی که با بومیان آمریکا داشتند، از نظر جمعیت به شدت در موضع ضعف بودند. تا مدتی، دولت فرانسه زندانیانی را که به تازگی آزاد می شدند، وادار می کرد که با روسپیان محلی ازدواج کنند، و زوج های تازه ازدواج کرده را به زنجیر می کشید و رهسپار لوئیزیانا می کرد تا در آنجا ساکن شوند. ولی حتی این کارها هم بسنده نبود.

فرانسوی ها بعد از ششمین جنگ شان متوجه شدند که شکست خورده اند. فرانسه ی نو منحل شد. غنایم کانادا تحت کنترل بریتانیای کبیر قرار گرفت، و سرزمین لوئیزیانا به کشور نوپای ایالات متحده ملحق شد.^[۱۵]

افت وخیز تسلط فرانسه بر دنیای نو کاملاً به این مربوط می شد که چه تعداد کشتی روانه ی آنجا می کرد. با توجه به رقابت شدید، فرانسوی ها واقعاً تعداد افراد کافی به آنجا نفرستاده بودند تا بتوانند قلمرو خود را حفظ کنند. در نتیجه،

امروزه تنها چیزی که از حضور فرانسه به جا مانده، فسیل‌های زبان‌شناختی است، مانند اسامی مکان‌ها از قبیل لوئیزیانا، ورمونت، و ایلینوی. اگر رقابتی در کار نباشد، مستعمره‌سازی کار آسانی است، ولی در صورت وجود رقابت، حفظ قلمرو نیازمند کار مداوم است. همین داستان در مغز نیز پیوسته در جریان است. وقتی که بخشی از بدن دیگر اطلاعات نمی‌فرستد، قلمرو خود را از دست می‌دهد. دست دریادار نلسون، فرانسه بود، و قشر مغز او دنیای نو. در اوایل کار، مستعمره‌سازی موفق بود، و اسپایک‌های اطلاعاتی مفیدی را از طریق اعصاب برای مغز می‌فرستاد، و در دوران جوانی نلسون، سرزمین مطلوبی را به تسلط خود درآورد. ولی بعد گلوله از راه رسید، و چند ساعت بعد از آن، دست خُرد شده‌ی او به دریای تاریک افکنده شد... و حالا دیگر مغزش هیچ‌گونه اطلاعاتی از آن بخش از بدن دریافت نمی‌کرد. با گذشت زمان، دست قطع شده قلمرو عصبی خود را از دست داد. در نهایت، تنها چیزی که باقی ماند، فسیل‌هایی از حضور پیشین دست بود، از قبیل احساس درد خیالی.

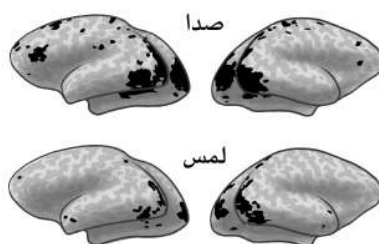
آمریکای شمالی، ۱۷۵۰



این درس‌ها که از مستعمره‌سازی می‌گیریم، فقط برای دست مصداق ندارد: برای هر سیستمی که اطلاعات به مغز می‌فرستد، قابل اعمال است. وقتی که چشم‌های شخصی آسیب می‌بیند، دیگر سیل سیگنال‌ها وارد مسیر قشر پس‌سری (قسمتی در پشت مغز که غالباً آن را قشر «بینایی» به شمار می‌آورند) نمی‌شود. و لذا آن بخش از قشر دیگر مربوط به بینایی نخواهد بود. دیگر خبری از رسیدن کشتی‌های حامل داده‌های بصری نیست، از این رو، قلمرو محبوب آن‌ها نصیب دیگر حکومت‌های رقیب مربوط به اطلاعات حسی شده است.^[۱۶]

در نتیجه، وقتی که یک شخص نابینا دستش را روی نقطه‌های برجسته‌ی شعری که به خط بریل نوشته شده است، می‌کشد، قشر پس‌سری او صرفاً بر اثر لمس فعال می‌شود.^[۱۷] اگر او دچار سکته‌ی مغزی شود که در قشر پس‌سری او ایجاد آسیب کند، توانایی‌اش برای فهمیدن خط بریل را از دست خواهد داد.^[۱۸] قشر پس‌سری او، مستعمره‌ی حس لمس شده است.

فقط هم حس لمس نیست، بلکه در مورد تمام منابع اطلاعات به همین صورت است. وقتی که افراد نابینا به صداها گوش می‌کنند، قشر شنوایی آن‌ها و نیز قشر پس‌سری آن‌ها فعال می‌شود.^[۱۹]



بازآرایی قشر: قشر استفاده نشده به تصرف مناطق مجاور درمی‌آید. در این اسکن مغزی، صدا و لمس موجب فعال‌سازی قشر بلااستفاده‌ی پس‌سری در یک فرد نابینا می‌شوند (رنگ سیاه نشان‌دهنده‌ی مناطقی است که در فرد نابینا فعال‌تر از فرد بینا هستند). برای بهتر دیده شدن تپه‌ها و دره‌های قشر، در اینجا شکل مغز با استفاده از کامپیوتر «متورم» شده است.

نه تنها لمس و صدا می‌تواند قسمتی از قشر مغز نابینایان را که قبلاً مربوط به بینایی بوده است، فعال کند، بلکه بویایی، چشایی، به یاد آوردن رویدادها، و حل مسائل ریاضی نیز همین تأثیر را دارد.^[۲۰] در اینجا هم مانند نقشه‌ی ینگه دنیا، قلمرو نصیب قوی‌ترین رقبا می‌شود.

این داستان در سال‌های اخیر باز هم جالب‌تر شده است: وقتی که اشغالگران جدید وارد قشر بینایی می‌شوند، برخی از معماری‌های سابق را حفظ می‌کنند — مانند برخی مساجد ترکیه که در گذشته کلیساهای جامع رومی بوده است. مثلاً ناحیه‌ای که در افراد بینا زبان مکتوب بصری را پردازش می‌کند، همان ناحیه‌ای می‌شود که زمانی که نابینایان خط بریل را می‌خوانند، فعال می‌شود.^[۲۱] به‌طور مشابه، ناحیه‌ی اصلی که در افراد بینا وظیفه‌ی پردازش حرکت بصری

را بر عهده دارد، در نابینایان برای حرکت لمسی فعال می‌شود (مثلاً وقتی که چیزی روی نوک انگشتان یا زبان حرکت می‌کند).^[۲۲] شبکه‌ی عصبی اصلی که در افراد بینا در بازشناسی بصری اشیا دخالت دارد، در نابینایان با لمس فعال می‌شود.^[۲۳] این گونه مشاهدات منجر به این فرضیه شده است که مغز یک «ماشین وظیفه» است — یعنی کارهایی مانند شناسایی حرکت یا اشیا در دنیا را انجام می‌دهد — نه اینکه سیستمی که به وسیله‌ی حواس خاصی تشکیل شده باشد.^[۲۴] به عبارت دیگر، مناطق مختلف به دنبال حل انواع خاصی از وظایف هستند، صرف نظر از اینکه اطلاعات از طریق کدام کانال حسی به آن‌ها برسد. در اینجا نکته‌ی شایان توجهی است که بعداً در فصول بعد به آن برمی‌گردیم، و آن اهمیت مسئله‌ی سن است. در کسانی که کور به دنیا می‌آیند، قشر پس سری آن‌ها کاملاً از سوی حواس دیگر اشغال می‌شود. اگر شخصی در سنین پایین — مثلاً در سن پنج‌سالگی — نابینا شود، این تصرف کامل نخواهد بود. در افرادی که «نابینای دیررس» هستند (یعنی بینایی خود را پس از سن ده‌سالگی از دست داده‌اند)، میزان تصرف قشر باز هم کمتر است. هرچه مغز پیرتر می‌شود، انعطاف‌پذیری آن برای مستقرسازی مجدد کمتر است، همان گونه که مرزهای آمریکای شمالی حالا که دیگر پنج قرن است مهاجران در آنجا ساکن شده‌اند، خیلی کم تغییر می‌کند.

همان چیزی که در نابینایی دیدیم، برای سایر حواس هم اتفاق می‌افتد. مثلاً در ناشنوایان، قشر شنوایی برای بینایی و وظایف دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد.^[۲۵] درست همان طور که وقتی دست لرد نلسون قطع شد، منطقه‌ی قشری آن از سوی نواحی مجاور اشغال شد، با از دست رفتن شنوایی، بویایی، چشایی، و یا هر حس دیگری نیز همین اتفاق می‌افتد. نقشه‌ی مغز مدام تغییر می‌کند تا به بهترین وجه معرف داده‌های ورودی باشد.^[۲۶]

وقتی که دنبال آن بگردید، خواهید دید که این رقابت بر سر قلمرو در همه جا در جریان است. مثلاً فرودگاهی را در یک شهر بزرگ در نظر بگیرید. اگر پروازهای زیادی از یک شرکت هواپیمایی خاص (مثلاً یونایتد) وارد فرودگاه شوند، ولی پروازهای شرکت دیگری (مثلاً دلتا) کم باشند، جای تعجب نخواهد بود که تعداد باجه‌های شرکت یونایتد زیاد شوند و تعداد باجه‌های دلتا کاهش

یابند. تعداد بیشتری از گیت‌ها، محل‌های تحویل اثاثیه، و فضای مانیتورها در اختیار یونایتد قرار خواهد گرفت. اگر یک شرکت هواپیمایی دیگر (مثلاً ترنس ورلد ایرلاینز) منحل شود، در آن صورت تمام فضای آن شرکت در فرودگاه به سرعت از سوی دیگران تصاحب خواهد شد. در مورد مغز و ورودی‌های حسی آن نیز همین طور است.

حالا فهمیدیم که رقابت چگونه تصاحب را هدایت می‌کند. ولی همه‌ی اینها به پرسشی منتهی می‌شود: وقتی که حسی فضای بیشتری را به دست آورد، آیا قابلیت بیشتری پیدا می‌کند؟

هر چه بیشتر، بهتر

پسرکی به نام رانی در شهر رابینزویل، کارولینای شمالی، متولد شد. مدت کوتاهی پس از تولد، معلوم شد که او نابینا است. وقتی که بچه یک سال و یک روز سن داشت، مادرش او را رها کرد و گفت که نابینایی فرزندش، تنبیهی از سوی خداوند برای اوست. بچه را پدر بزرگ و مادر بزرگش در فقر بزرگ کردند و او را به مدرسه‌ی نابینایان فرستادند.

وقتی که شش ساله بود، مادرش فقط یک بار به دیدن او آمد. حالا فرزند دیگری داشت، یک دختر. مادرش گفت: «رانی، به چشم‌هایش دست بزن. آخر چشم‌هایش خیلی قشنگ است. او برخلاف تو مرا شرمندانه نکرد. او می‌تواند ببیند.» این آخرین باری بود که رانی با مادرش دیدار کرد.

با همه‌ی سختی‌هایی که در کودکی کشید، معلوم شد که رانی استعداد بالایی در موسیقی دارد. معلم‌ها استعداد او را کشف کردند و رانی به‌طور رسمی شروع به مطالعه‌ی موسیقی کلاسیک کرد. یک سال پس از آنکه شروع به یاد گرفتن ویولن کرد، معلمانش او را هنرمندی خوش‌قریحه اعلام کردند. او در ادامه پیانو، گیتار، و چندین ساز زهی و بادی دیگر را یاد گرفت.

رانی بعداً یکی از پرطرفدارترین نوازندگان روزگار خود شد، و هر دو بازار موسیقی پاپ و کانتری و سترن را فتح کرد. چهل آهنگ او رتبه‌ی اول را در سطح کشور کسب کرد. شش بار برنده‌ی جایزه‌ی گرمی شد.

رانی میلسپ تنها یکی از بسیار موسیقیدانان نابینا است: برخی دیگر شامل

آندرنّا بوچلی، ری چارلز، استیوی واندر، دیان شور، خوزه فلیسیانو، و جف هیلی هستند. مغز آن‌ها یاد گرفته است که به سیگنال‌های صدا و لمس محیط حساس‌تر باشد، و این‌ها را بهتر از افراد بینا پردازش می‌کنند.

گرچه تضمینی نیست که هر فرد نابینایی ستاره‌ی موسیقی شود، ولی بازآرایی مغز به‌طور حتمی در او صورت می‌گیرد. در نتیجه، زیرویمی دقیق موسیقایی در مغز افراد نابینا فضای بیشتری را به خود اختصاص داده است، و این افراد ده برابر بهتر از افراد معمولی می‌توانند زیر و بم بودن یک موسیقی را تشخیص دهند.^[۲۷] در واقع، فضای اختصاص داده شده به کار شنوایی در مغز آن‌ها بیشتر است. در مطالعه‌ای جدید، در شرکت‌کنندگان بینا و نابینا، یک گوش را پنبه گذاشتند و از آن‌ها خواستند که جهت صداها را در اتاق تشخیص دهند. از آنجا که مشخص کردن جهت صدا براساس مقایسه‌ی سیگنال‌های هر دو گوش انجام می‌شود، انتظار می‌رفت که هر دو گروه در این کار کاملاً ناموفق باشند. واقعاً هم در مورد افراد بینا همین طور شد. ولی افراد نابینا توانستند جهت صداها را به‌طور کلی تشخیص دهند.^[۲۸] چرا؟ چون شکل دقیق غضروف گوش خارجی (حتی فقط در یک گوش) صداها را به‌گونه‌ای منعکس می‌کند که می‌تواند محل صدا را مشخص کند — ولی تنها در صورتی که شخص دقت کافی را برای دریافت آن سیگنال‌ها کسب کرده باشد. در افراد بینا، بخش کوچک‌تری از قشر مغز به صدا اختصاص یافته است، و بنابراین، توانایی آن‌ها برای استخراج اطلاعات ظریف صدا کمتر توسعه یافته است.

این نوع استعداد بالا در زمینه‌ی صدا در افراد نابینا شایع است. مثلاً بن آندروود را در نظر بگیرید. او در دوسالگی دید چشم‌پیش را از دست داد. مادرش او را پیش دکتر برد و خیلی زود معلوم شد که هر دو چشم او دچار سرطان شبکه است. پس از آنکه شیمی‌درمانی و پرتودرمانی سودی نبخشید، جراحان هر دو چشم او را درآوردند. ولی بن تا هفت‌سالگی برای خودش تکنیک مفید غیرمنتظره‌ای ابداع کرده بود: با دهانش صدا درمی‌آورد و به پژواک آن گوش می‌داد. با این روش می‌توانست محل درهای باز، افراد، ماشین‌های پارک شده، سطل آشغال، و امثال آن را شناسایی کند. کاری که او می‌کرد، جهت‌یابی پژواکی بود: فرستادن امواج صوتی به محیط و گوش کردن پژواکی که برمی‌گردد.^[۲۹]

یک فیلم مستند که درباره‌ی بن ساخته شده بود، با این جمله شروع می‌شد: «او تنها کسی در جهان است که از طریق جهت‌یابی پژواکی می‌بیند».^[۳۰] این جمله از یکی دو جهت نادرست بود. اولاً شاید نتوان گفت که بن به آن معنایی که برای افراد بینا مطرح است، می‌بیند؛ تنها چیزی که می‌دانیم، این است که مغز او می‌توانست امواج صدا را تبدیل به نوعی ادراک از اشیای بزرگ پیش روی او کند. ولی در این مورد بعداً بیشتر صحبت می‌کنیم.

ثانیاً نکته‌ی مهم‌تر این است که بن تنها کسی نبود که می‌توانست از جهت‌یابی با پژواک استفاده کند: هزاران فرد نابینا این کار را کرده‌اند.^[۳۱] در حقیقت، این پدیده دست‌کم از دهه‌ی ۱۹۴۰ مورد بحث بوده است، که در آن زمان برای نخستین‌بار اصطلاح «جهت‌یابی پژواکی» در مقاله‌ای در مجله‌ی ساینس با عنوان «جهت‌یابی پژواکی در انسان، خفاش، و رادار» به کار برده شد.^[۳۲] مؤلف این مقاله نوشت: «بسیاری از افراد نابینا با گذشت زمان این توانایی خارق‌العاده را به دست می‌آورند که از طریق نشانه‌های سمعی حاصل از صدایی که خودشان تولید می‌کنند، از برخورد با اشیاء اجتناب کنند». مثلاً این صداها شامل صدای پا، ضربه زدن با عصا، و یا بشکن زدن است. او نشان داد که سروصدای مزاحم یا گوش‌گیر می‌تواند توانایی آن‌ها برای جهت‌یابی با پژواک را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد.

همان‌گونه که پیش از این دیدیم، لوب پس‌سری می‌تواند از سوی وظایف متعددی، نه فقط شنوایی، اشغال شود. مثلاً این فضای قشری اضافه می‌تواند برای یادسپاری مفید واقع شود. در یک مطالعه، افراد نابینا از نظر حفظ کردن لیستی از کلمات مورد بررسی قرار گرفتند. افرادی که قسمت بیشتری از قشر پس‌سری آن‌ها اشغال شده بود، نمره‌ی بالاتری گرفتند: آن‌ها فضای بیشتری در اختیار داشتند که آن را به کار حافظه اختصاص دهند.^[۳۳]

به‌طور کلی، داستان مشخص است: هرچه فضا بیشتر باشد، بهتر است. این بعضی وقت‌ها منجر به نتایجی می‌شود که خلاف شهود است. اکثر افراد با سه نوع گیرنده‌ی نوری برای دید رنگی متولد می‌شوند، ولی بعضی افراد فقط دو نوع یا یک نوع دارند یا اینکه هیچ نوعی ندارند، به‌طوری که توانایی آن‌ها برای تشخیص دادن رنگ‌ها کاهش می‌یابد (یا از بین می‌رود). با این حال، افرادی که

کوررنگی دارند، خیلی هم ضرر نمی‌کنند: آن‌ها توانایی بهتری برای تشخیص دادن فام‌های خاکستری دارند.^[۲۴] چرا؟ زیرا آن‌ها همان میزان از فضای قشر را دارند، ولی ابعاد رنگ کمتری را باید تشخیص دهند. وقتی که همان میزان فضا به کار ساده‌تری اختصاص داده شود، منجر به عملکرد بهتر می‌شود. گرچه در ارتش سربازان کوررنگ را از بعضی از کارها کنار می‌گذارند، ولی آن‌ها متوجه شده‌اند که کوررنگ‌ها بهتر از افرادی که دید رنگی طبیعی دارند، می‌توانند استتار دشمن را تشخیص دهند.

این را هم باید دانست که گرچه ما در اینجا برای معرفی نکات مهم از دستگاه بینایی استفاده کردیم، ولی بازتخصیص قشری در همه جا اتفاق می‌افتد. وقتی که فردی شنوایی خود را از دست می‌دهد، بافت مغزی که مربوط به «شنوایی» تلقی می‌شد، به حواس دیگر تخصیص داده می‌شود.^[۲۵] به این ترتیب، جای تعجب نیست که افراد ناشنوا دید محیطی بهتری دارند، یا اینکه آن‌ها می‌توانند لهجه‌ی شما را ببینند: آن‌ها می‌توانند بگویند که شما اهل کدام منطقه از کشور هستید، زیرا در لب‌خوانی مهارت زیادی دارند. به‌طور مشابه، در افرادی که اندام حرکتی آن‌ها قطع شده است، حس قسمت باقی‌مانده‌ی اندام ظریف‌تر می‌شود. اکنون فرد می‌تواند لمس را با فشار کمتری حس کند و دو لمس نزدیک به هم را به‌صورت دو لمس جداگانه و نه یکی احساس نماید. از آنجا که مغز اکنون فضای بیشتری را به نواحی سالم باقی‌مانده اختصاص می‌دهد، لذا تفکیک‌پذیری حس بالاتر می‌رود.



بازتخصیص عصبی الگوی انعطاف‌پذیرتری را جایگزین آموزه‌ی قدیمی نواحی از پیش تعیین شده‌ی مغزی می‌کند. فضا می‌تواند به وظایف مختلفی تخصیص داده شود. مثلاً نورون‌های قشر بینایی ویژگی خاصی ندارند. آن‌ها تنها نورون‌هایی هستند که اتفاقاً برای پردازش لبه‌ها و رنگ‌ها در افرادی که چشم بینا دارند، به کار گرفته شده‌اند. همان نورون‌ها می‌توانند در افراد نابینا، انواع دیگری از اطلاعات را پردازش کنند.

در آموزه‌ی قدیمی گفته می‌شد که بخشی از آمریکای شمالی که لوئیزیانا

نامیده می‌شود، از قبل به افراد فرانسوی تخصیص داده شده است. در آموزه‌ی جدید اصلاً تعجب‌آور نیست که منطقه‌ی لوئیزیانا فروخته شود و شهروندانی از نقاط مختلف جهان در آنجا ساکن شوند.

با توجه به اینکه مغز باید تمام وظایف خود را در حجم محدود قشر توزیع کند، امکان دارد که برخی اختلالات بر اثر بهینه نبودن توزیع بروز کند. یک نمونه‌ی آن سندروم ساوانت اوتیستی است، که در آن بچه‌ای که نقایص شناختی و اجتماعی شدیدی دارد، ممکن است در بعضی کارها، مانند حفظ کردن دفترچه‌ی تلفن یا کپی کردن صحنه‌های بصری، و یا حل کردن مکعب رویک با سرعت حیرت‌انگیز، نابغه باشد. همراه شدن کم‌توانی‌های شناختی با استعداد خارق‌العاده منجر به ارائه‌ی نظریه‌های بسیاری شده است؛ آنچه در اینجا مورد نظر ما است، توزیع غیرمعمول فضای قشر است.^[۳۶] این نظریه به این صورت است: در صورتی که مغز بخش بزرگی از فضای خود را به یک کار (از قبیل یادسپاری، تحلیل بصری، یا حل پازل) اختصاص دهد، ممکن است شخص توانایی‌های غیرمعمولی به دست آورد. ولی این توانایی‌های برتر به قیمت از دست رفتن کارهای دیگر حاصل می‌شود که مغز به‌طور عادی به آن فضا اختصاص می‌دهد، از قبیل وظایفی که بر روی هم مهارت‌های قابل اعتماد اجتماعی را پدید می‌آورد.

با سرعت کور کننده

در دهه‌های اخیر، نکات زیادی درباره‌ی شکل‌پذیری مغز روشن شده است، ولی شاید از همه جالب‌تر، سرعت آن است. چند سال قبل، پژوهشگران دانشگاه مک‌گیل افراد بزرگسالی را که به تازگی دچار نابینایی شده بودند، درون اسکنر مغزی قرار دادند. از شرکت‌کنندگان خواسته شد که به صداهایی گوش بدهند. طبیعی است که این صداها موجب فعالیت در قشر شنوایی آن‌ها شد. ولی صداها در قشر پس‌سری آن‌ها نیز ایجاد فعالیت کرد — فعالیتی که همان چند هفته قبل که شرکت‌کنندگان هنوز توانایی بینایی داشتند، وجود نداشت. شدت این فعالیت به اندازه‌ی افرادی نبود که مدتی طولانی نابینا بودند، ولی به هر حال، در حد قابل تشخیص بود.^[۳۷]

این نشان می‌داد که مغز در زمانی که بینایی از بین می‌رود، تغییرات را با سرعت انجام می‌دهد. ولی با چه سرعتی؟ یکی از پژوهشگران به نام آلوارو پاسکوال-لئون درباره‌ی سرعت تغییرات عمده‌ای که در مغز اتفاق می‌افتد، کنجکاو شد. او مشاهده کرد در مدارس نابینایان، کسانی که می‌خواهند معلم شوند، باید هفت روز کامل چشم‌های‌شان را با نواری ببندند تا تجربه‌ای دست اول از چگونگی زندگی دانش‌آموزان به دست آورند. اکثر معلمان احساس می‌کردند که نسبت به صدا حساس‌تر شده‌اند — از نظر تعیین جهت صدا، استنباط فاصله‌ی آن، و شناسایی آن:

چندین نفر از معلمان می‌گویند که این توانایی را به دست آورده‌اند که افراد را همین که شروع به صحبت کردند، یا حتی به صرف راه رفتن از روی آهنگ قدم‌های آن‌ها، به سرعت و با دقت شناسایی کنند. چندین نفر یاد گرفته‌اند که ماشین‌ها را از روی صدای موتور آن‌ها تشخیص دهند، و حتی یک نفر از «لذت تشخیص دادن موتورسیکلت‌ها از روی صدای آن‌ها» سخن می‌گوید.^[۲۸]

این تجربه، پاسکوال-لئون و همکارانش را به این فکر انداخت که چشمان شخص بینایی را در آزمایشگاه به مدت چند روز ببندند و ببینند چه اتفاقی می‌افتد. آزمایش را انجام دادند و نتایجی به دست آوردند که واقعاً حیرت‌انگیز بود. آن‌ها کشف کردند که بازآرایی عصبی — از همان نوعی که در افراد نابینا رخ می‌دهد — در نابینایی موقتی افراد بینا نیز به وقوع می‌پیوندد. خیلی هم سریع. در یکی از مطالعات‌شان، چشم افراد بینا را به مدت پنج روز بستند و طی این مدت، برای آن‌ها یک دوره‌ی فشرده‌ی آموزش خط بریل برگزار کردند.^[۲۹] در پایان پنج روز، افراد شرکت‌کننده مهارت خوبی در زمینه‌ی تشخیص تفاوت‌های ظریف بین نویسه‌های بریل به دست آورده بودند — خیلی بهتر از گروه شاهد که افراد بینایی بودند که همان آموزش را بدون بستن چشم‌ها دریافت کردند.

ولی نکته‌ی جالب‌تر اتفاقی بود که برای مغز آن‌ها افتاد و در اسکن مغزی قابل مشاهده بود. ظرف پنج روز، افرادی که چشم‌های‌شان بسته شده بود، هنگام لمس کردن اشیاء، قشر پس‌سری خود را به کار می‌گرفتند. افراد شاهد،

همان گونه که انتظار می‌رفت، فقط از قشر حسی پیکری خود استفاده می‌کردند. افراد چشم‌بندزده در مقابل اصوات و کلمات نیز پاسخ پس‌سری نشان می‌دادند. زمانی که این فعالیت جدید لوب پس‌سری در آزمایشگاه عمداً با استفاده از پالس‌های مغناطیسی دچار اختلال شد، مزیت افراد چشم‌بندزده از نظر خواندن خط بریل از بین رفت — بدان معنا که به خدمت گرفتن این ناحیه‌ی مغز یک اثر جانبی اتفاقی نبود، بلکه جزء مهمی از بهبود عملکرد رفتاری بود. وقتی که چشم‌بند برداشته شد، پاسخ قشر پس‌سری به لمس و صدا ظرف یک روز از بین رفت. بعد از آن، مغز شرکت‌کنندگان از سایر افراد بینا غیرقابل تشخیص بود.

در مطالعه‌ی دیگری، نواحی بینایی مغز با روش‌های قوی‌تر تصویربرداری عصبی نقشه‌برداری شد. شرکت‌کنندگان چشم‌بند زده شدند و درون اسکنر قرار داده شدند، و از آن‌ها خواسته شد کاری را که نیازمند تشخیص دقیق لمس با انگشتان بود، انجام دهند. در این شرایط، محققان توانستند پس از بستن چشم‌ها به مدت تنها چهل تا شصت دقیقه، ظاهر شدن فعالیت در قشر اولیه‌ی بینایی را مشاهده کنند.^[۴۰]

آنچه در این یافته‌ها مایه‌ی حیرت بود، سرعت بالای تغییرات بود. شکل‌پذیری مغز مانند یخ‌رفت (glacial drift) صفحات قاره‌ای نیست، بلکه می‌تواند بسیار سریع باشد. در فصل‌های بعد، خواهیم دید که محرومیت بینایی موجب آشکار شدن ورودی‌های غیربصری به قشر پس‌سری می‌شود که از قبل هم وجود دارد، و خواهیم دید که مغز همیشه مانند فنر فشرده‌ی یک تله‌موش، برای پیاده‌سازی تغییرات سریع آماده است. ولی فعلاً نکته‌ی مهم آن است که تغییرات مغز حتی از هر آنچه خوش‌بین‌ترین متخصصان علوم اعصاب در آغاز این قرن جرات حدس آن را به خود می‌دادند، سریع‌تر است.



در اینجا بد نیست قدمی به عقب برداریم و تصویر بزرگ‌تر را در نظر بگیریم. درست همان گونه که دندان‌های تیز و پاهای تندرو برای بقا سودمند است، انعطاف‌پذیری عصبی نیز همان طور است: به مغز امکان می‌دهد که عملکرد

خود را در انواع محیط‌ها بهینه‌سازی کند. ولی رقابت در مغز می‌تواند عیبی نیز داشته باشد. هر گاه تعادل فعالیت حواس مختلف به هم بخورد، ممکن است یک حس جای حس دیگر را بگیرد، و این کار می‌تواند خیلی هم سریع انجام شود. بازتوزیع منابع در مواقعی که یک اندام حرکتی یا یک حس به‌طور دایمی قطع شده یا از دست رفته است، بهترین فایده را دارد، ولی در سایر مواقع لازم است که با اشغال سریع قلمرو، فعالانه مبارزه شود. براساس همین موضوع است که من و یکی از دانشجویان سابقم به نام دان وان نظریه‌ی جدیدی را برای اتفاقاتی که در تاریکی شب در مغز می‌افتد، ارائه کردیم.

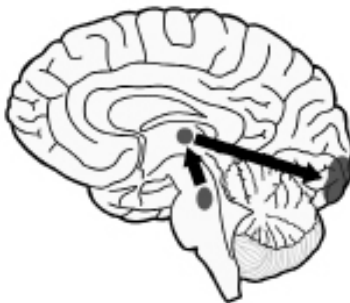
خواب دیدن چه ارتباطی با چرخش زمین دارد؟

یکی از معماهای حل نشده‌ی علوم اعصاب این است که چرا مغز رؤیا می‌بیند؟ دلیل این توهمات عجیب شبانه چیست؟ آیا این‌ها معنایی دارد؟ یا اینکه صرفاً نوعی فعالیت عصبی تصادفی در جست‌وجوی داستانی منسجم است؟ و اصلاً چرا رؤیاها این‌قدر منظره‌ی بصری پرمایه‌ای دارد که هر شب قشر پس‌سری را به فعالیت و غلیان درمی‌آورد؟

این مسئله را در نظر بگیرید: در رقابت همیشگی و بی‌رحمانه‌ای که برای فضای مغز در جریان است، دستگاه بینایی با مشکل خاصی روبه‌رو است. به خاطر چرخش زمین، در هر چرخه به‌طور متوسط به مدت دوازده ساعت به خاموشی فرومی‌رود. (این مطلب برای ۹۹/۹۹۹۹ درصد تاریخ تکاملی گونه‌ی ما صادق است، نه دوران‌های اخیر که از نعمت برق برخوردار هستیم.) دیدیم که محرومیت حسی سبب می‌شود که مناطق مجاور، ناحیه را اشغال کنند. بنابراین، دستگاه بینایی چگونه با این محرومیت غیرمنصفانه مواجه می‌شود؟

کاری که می‌کند، این است که قشر پس‌سری را در طول شب فعال نگه می‌دارد. نظر ما این است که هدف از رؤیا دیدن آن است که مانع از اشغال شدن قشر بینایی از سوی نواحی مجاور شود. چرا که چرخش زمین تأثیری بر توانایی شما برای لمس کردن، شنیدن، چشیدن، یا بوییدن ندارد؛ فقط بینایی شما در تاریکی دچار مشکل می‌شود. در نتیجه، قشر بینایی هر شب در معرض خطر

اشغال شدن از سوی حس‌های دیگر است و با توجه به سرعت تغییراتی که ممکن است در قلمرو اتفاق بیفتد (همان طور که دیدید، در یک مطالعه در عرض چهل تا شصت دقیقه مشاهده شد)، این تهدید واقعاً قابل توجه است. رؤیا وسیله‌ای است که قشر بینایی از طریق آن مانع از اشغال خود می‌شود. برای درک بهتر این مطلب، اجازه بدهید که تصویر بزرگ‌تر را بنگریم. با آنکه وقتی کسی خواب است، به نظر می‌رسد که کاملاً آسوده و خاموش است، ولی مغزش از نظر الکتریکی کاملاً فعال است. طی اکثر مدت شب، خبری از رؤیا نیست. ولی در خواب REM (حرکت سریع چشم)، اتفاق خاصی می‌افتد. نرخ ضربان قلب و تعداد تنفس بالا می‌رود، پرش‌هایی در ماهیچه‌های کوچک رخ می‌دهد، و امواج مغزی کوچک‌تر و سریع‌تر می‌شوند. در این مرحله از خواب است که رؤیا دیدن اتفاق می‌افتد.^[۴۱] خواب REM بر اثر مجموعه‌ی خاصی از نورون‌ها در قسمتی از ساقه‌ی مغز به نام پل مغز ایجاد می‌شود. افزایش فعالیت در این نورون‌ها دو نتیجه در پی دارد. اول اینکه گروه‌های عضلات بزرگ فلج می‌شوند. مدارهای عصبی پیشرفته‌ای بدن را حین رؤیا دیدن بی حرکت نگه می‌دارد، و پیشرفته بودن آن مؤید اهمیتی است که خواب همراه با رؤیا دارد؛ می‌توان فرض کرد که این مدارها اگر کارکرد مهمی نمی‌داشت، تکامل پیدا نمی‌کرد. از کار افتادن ماهیچه‌ها به مغز امکان می‌دهد که تجربیات زندگی را شبیه‌سازی کند، بدون آنکه بدن واقعاً به اطراف حرکت کند.



در زمان خواب همراه با رؤیا، امواج فعالیت در ساقه‌ی مغز شروع می‌شود و در قشر پس‌سری خاتمه می‌یابد. پیشنهاد ما این است که این تحریک فعالیت از آن جهت ضرورت پیدا کرده که زمین بر اثر چرخش خود به تاریکی فرومی‌رود: دستگاه بینایی نیاز به راهبردهای خاصی دارد تا قلمرو خود را دست‌نخورده نگه دارد.

دومین پیامد آن اهمیت بیشتری دارد: امواجی از نيزه‌های عصبی از ساقه‌ی مغز به طرف قشر پس‌سری سرازیر می‌شود.^[۴۲] وقتی که نيزه‌ها به آنجا رسید، فعالیت به‌صورت بصری تجربه می‌شود. یعنی می‌بینیم. به خاطر این فعالیت است که رؤیاها تصویری و مانند فیلم است، نه اینکه مفهومی یا انتزاعی باشد. این ترکیب موجب ایجاد تجربه‌ی رؤیا می‌شود: هجوم امواج الکتریکی به قشر پس‌سری، دستگاه بینایی را فعال می‌کند، در حالی که فلج عضلانی مانع از آن می‌شود که بیننده‌ی رؤیا بر مبنای آن تجربیات عمل کند.

ما این نظریه را ارائه می‌کنیم که مدارهای ایجادکننده‌ی رؤیاهای بصری رخدادی تصادفی نیست. بلکه دستگاه بینایی برای جلوگیری از اشغال قلمرو مربوط به خود، مجبور شده مبارزه کند و زمانی که زمین بر اثر چرخش خود به تاریکی فرومی‌رود، حملاتی از فعالیت را ایجاد کند.^[۴۳] با توجه به رقابت همیشگی بر سر فضای حسی، نوعی سازوکار دفاعی برای ناحیه‌ی پس‌سری پدید آمده است. به هر حال، بینایی اطلاعات بسیار حیاتی را پردازش می‌کند، ولی فضای آن نیمی از اوقات در معرض سرقت است. بنابراین، رؤیاها ممکن است فرزند عجیب شکل‌پذیری عصبی و چرخش زمین باشد.

نکته‌ی مهمی که باید در نظر داشت، این است که این دوره‌های شبانه‌ی فعالیت از نظر آناتومیک بسیار دقیق است. این امواج از ساقه‌ی مغز شروع می‌شود و فقط به سمت یک محل جریان می‌یابد: قشر پس‌سری. اگر این مدارها شاخه‌های خود را به‌صورتی گسترده و بی‌ملاحظه پهن می‌کرد، انتظار داشتیم که با نواحی زیادی در سرتاسر مغز پیوند برقرار کند. ولی این‌طور نیست. این سیستم از نظر آناتومیک به‌طور دقیق فقط یک ناحیه را هدف قرار داده است: ساختمان ریزی به نام هسته‌ی زانویی جانبی، که اختصاصاً سیگنال‌ها را به قشر پس‌سری می‌فرستد. از دید متخصصان کالبدشناسی عصبی، این اختصاصی بودن بالای مدار نشان‌دهنده‌ی یک نقش مهم است.

از این دیدگاه، جای تعجب نخواهد بود که حتی شخصی که کور به دنیا آمده، مثل سایر افراد همان مدارهای ساقه‌ی مغز به لوب پس‌سری را دارد. حالا در مورد رؤیای افراد نابینا چه می‌توان گفت؟ آیا می‌توان انتظار داشت که این افراد هیچ‌گونه رؤیایی نبینند، چرا که مغزشان اهمیتی به تاریکی نمی‌دهد؟

این پرسش، پاسخ آموزنده‌ای دارد. افرادی که از زمان تولد نابینا بوده‌اند (یا در سن خیلی پایین نابینا شده‌اند) در رؤیاهای خود هیچ‌گونه تصاویر بصری را تجربه نمی‌کنند، ولی تجربیات حسی دیگر را دارند، مثلاً اینکه حس می‌کنند که در داخل اتاق پذیرایی راه می‌روند یا صدای پارس کردن عجیب حیوانی را می‌شنوند.^[۴۴] این کاملاً با درس‌هایی که پیش از این فراگرفتیم، هماهنگی دارد: یعنی اینکه قشر پس‌سری **شخص** نابینا به تصرف حواس دیگر درآمده. لذا در افرادی نیز که کور مادرزاد هستند، فعالیت شبانه‌ی پس‌سری رخ می‌دهد، ولی به‌صورت چیزی غیربصری تجربه می‌شود. به عبارت دیگر، در شرایط نرمال، ژنتیک شما به این صورت است که تلاش می‌کند نقیصه‌ی غیرمنصفانه‌ی ناشی از تاریکی را با فرستادن امواج فعالیت در طول شب به قشر پس‌سری جبران کند؛ این مطلب در مغز نابینایان نیز درست است، گرچه در آن‌ها هدف واقعی این کار از دست رفته است. هم‌چنین، دقت کنید که افرادی که پس از سن هفت‌سالگی نابینا می‌شوند، بیش از کسانی که در سنین پایین‌تر نابینا می‌شوند، محتوای بصری در رؤیاهای خود دارند — که این با این واقعیت سازگار است که لوب پس‌سری در افراد نابینای دیررس کمتر به وسیله‌ی حواس دیگر اشغال می‌شود، و بنابراین، فعالیت مذکور بیشتر به‌صورت بصری تجربه می‌شود.^[۴۵]

نکته‌ی جالبی که در اینجا شایان ذکر است، این است که دو ناحیه‌ی دیگر مغزی، هیپوکامپ و قشر جلوپیشانی در حین خواب همراه با رؤیا فعالیتی کمتر از زمان بیداری دارند، و احتمالاً به همین خاطر است که به یاد آوردن رؤیاها برایمان مشکل است. چرا مغز این نواحی را خاموش می‌کند؟ یک احتمال آن است که اگر هدف اصلی رؤیا دیدن، مبارزه‌ی فعالانه‌ی قشر بینایی با نواحی مجاور باشد، اصولاً نیازی به نوشتن خاطرات نخواهد بود.

می‌توانیم از منظر بین‌گونه‌ای چیزهای زیادی بفهمیم. بعضی از پستانداران نارس به دنیا می‌آیند — بدان معنا که قادر نیستند راه بروند، غذا پیدا کنند، دمای بدن‌شان را تنظیم کنند، یا از خودشان دفاع کنند. انسان، راسوی اهلی، و پلاتیپوس از این زمره‌اند. اما گروهی از پستانداران رسیده متولد می‌شوند — یعنی وقتی از رحم خارج می‌شوند، دندان و خز دارند، چشم‌هایشان باز است، می‌توانند دمای بدن‌شان را تنظیم کنند، از یک ساعت پس از تولد راه

بروند، و غذای جامد بخورند. نکته‌ی مهم آن است که جانورانی که نارس به دنیا می‌آیند، خواب REM خیلی بیشتری دارند — تا هشت برابر بیشتر — و این تفاوت خصوصاً در ماه اول زندگی واضح‌تر است.^[۴۶] تفسیر ما این است که وقتی یک مغز بسیار شکل‌پذیر وارد دنیا می‌شود، باید مدام در نبرد باشد تا بتواند همه چیز را در تعادل نگه دارد. اما وقتی که مغز عمدتاً تثبیت‌شده به دنیا می‌آید، نیاز کمتری به نبرد شبانه دارد.

اضافه بر این، خواب REM با افزایش سن نیز کاهش می‌یابد. تمام گونه‌های پستانداران بخشی از زمان خواب خود را در REM می‌گذرانند، و با افزایش سن این کسر پیوسته کوچک‌تر می‌شود.^[۴۷] در انسان‌ها، شیرخواران نیمی از مدت خواب خود را در REM می‌گذرانند، در حالی که افراد بزرگ فقط ۱۰ تا ۲۰ درصد خواب را در REM سپری می‌کنند، و این نسبت در افراد سالمند باز هم کمتر است. این روند بین‌گونه‌ای با این واقعیت سازگار است که مغز شیرخواران بسیار شکل‌پذیرتر است (که در فصل ۹ خواهیم دید)، و لذا رقابت برای قلمرو در آن‌ها حیاتی‌تر است. هرچه یک جانور مسن‌تر می‌شود، امکان کمتری برای اشغال نواحی قشری وجود خواهد داشت. کاهش شکل‌پذیری به موازات کاهش زمان سپری شده در خواب REM صورت می‌گیرد.

این فرضیه منجر به یک پیش‌بینی برای آینده‌ی دور می‌شود، زمانی که در سیارات دیگر، حیات کشف کنیم. برخی از سیارات (به‌ویژه آن‌هایی که به دور ستاره‌های کوتوله‌ی قرمز می‌گردند) در فضا قفل می‌شوند، به‌گونه‌ای که همیشه یک طرف آن‌ها به سمت ستاره است: یعنی در یک طرف سیاره همیشه روز است، و در طرف دیگر همیشه شب.^[۴۸] اگر موجودات زنده‌ی آن سیاره در مغز خود مدارسازی پویا تا حدودی مانند ما داشته باشند، پیش‌بینی می‌شود که موجوداتی که در سمت روز سیاره هستند، ممکن است بینایی شبیه ما داشته باشند، ولی رؤیا نخواهند داشت. برای سیاره‌هایی هم که چرخش آن‌ها خیلی سریع است، همین پیش‌بینی صادق خواهد بود: اگر مدت شب کمتر از زمان لازم برای تصرف قشری باشد، آنگاه ضرورتی به رؤیا دیدن نخواهد بود. شاید هزاران سال بعد متوجه شویم که ما که رؤیا می‌بینیم، در سطح عالم در اقلیت هستیم.

درون همچون بیرون

اکثر کسانی که از مجسمه‌ی دریادار نلسون در میدان ترافالگار لندن دیدار می‌کنند، احتمالاً به این فکر نمی‌کنند که در نیمکره‌ی چپ سر او چه میزان اعوجاج در قشر حسی‌پیکری وجود داشته است. ولی باید فکر کنند. این نشان‌دهنده‌ی یکی از جالب‌ترین موفقیت‌های مغز است: توانایی کدگذاری بهینه‌ی بدنی که با آن سر و کار دارد.

تا اینجا دیدیم که تغییرات ورودی‌های حسی (مانند قطع شدن اندام حرکتی یا نابینایی یا ناشنوایی) منجر به بازآرایی وسیع قشر مغز می‌شود. نقشه‌های مغزی از قبل به‌صورت ژنتیکی تعیین نشده‌اند، بلکه براساس ورودی‌ها قالب‌ریزی می‌شوند. وابسته به تجربه هستند. خاصیتی برآمده از رقابت‌های مرزی محلی هستند، نه نتیجه‌ی یک نقشه‌ی سراسری از پیش تعیین شده. از آنجا که نورون‌هایی که با هم شلیک می‌کنند، با هم مدار می‌سازند، لذا هم‌فعالیتی موجب قرار گرفتن در نواحی مجاور در مغز می‌شود. شکل بدن شما هرچه باشد، نقشه‌ی آن به‌طور طبیعی روی سطح مغز ایجاد می‌شود.

از نظر تکاملی، این‌گونه سازوکارهای وابسته به فعالیت امکان آن را برای انتخاب طبیعی فراهم می‌کند که انواع بی‌شمار بدن را — از چنگال گرفته تا باله، و از بال تا دُم گیرنده — به سرعت مورد آزمایش قرار دهد. طبیعت هر گاه بخواهد نقشه‌ی جدیدی را برای بدن امتحان کند، مجبور نیست مغز را به‌صورت ژنتیکی بازنویسی کند؛ بلکه به سادگی اجازه می‌دهد که مغز خودش را تعدیل کند. و این بر همان نکته‌ای تأکید می‌کند که در سرتاسر این کتاب بازگو شده است: اینکه مغز با یک کامپیوتر دیجیتال بسیار متفاوت است. باید تصوراتی را که از مهندسی متعارف داریم، کنار بگذاریم، و با چشمانی باز به اعماق قلمرو عصبی فروبرویم.

تغییر شکلی که در رابطه با نقشه‌ی بدن بروز می‌کند، نشان‌دهنده‌ی چیزی است که در تمام دستگاه‌های حسی رخ می‌دهد. دیدیم که وقتی که افراد نابینا به دنیا می‌آیند، قشر «بینایی» آن‌ها برای شنوایی، لمس، و حواس دیگر تنظیم می‌شود. و پیامد اشغال نواحی قشری از نظر حواس، افزایش حساسیت است:

هرچه فضای بیشتری در مغز به کاری اختصاص یابد، تفکیک پذیری آن بالاتر خواهد بود.

سرانجام، کشف کردیم که وقتی اشخاص دارای دستگاه‌های بینایی طبیعی حتی به مدت یک ساعت چشم‌بند می‌بندند، قشر اولیه‌ی بینایی آن‌ها با انجام کارهایی با انگشتان یا شنیدن آهنگ‌ها یا کلمات فعال می‌شود. با برداشتن چشم‌بند، قشر بینایی دوباره برگشت می‌کند و به ورودی بصری پاسخ می‌دهد. به‌طوری که در فصل‌های بعد بیشتر خواهیم دید، توانایی ناگهانی مغز برای «دیدن» با انگشتان و گوش‌ها بستگی به اتصالاتی از حواس دیگر دارد که از قبل هم وجود دارند، ولی مادام که چشم‌ها داده‌ها را می‌فرستند، فعال نیستند. بر روی هم، این ملاحظات ما را بر آن داشته است که پیشنهاد کنیم که رؤیاهای بصری یک محصول فرعی رقابت عصبی و چرخش زمین هستند. موجودی که می‌خواهد مانع از اشغال دستگاه بینایی از سوی حواس دیگر شود، مجبور است روشی تعبیه کند که دستگاه بینایی در زمانی که تاریکی همه جا را فرامی‌گیرد، فعالیت خود را حفظ کند.

پس حالا برای یک پرسش آماده‌ایم. ما تصویر قشر را به‌صورتی بسیار انعطاف‌پذیر ترسیم کردیم. حد این انعطاف‌پذیری تا کجا است؟ آیا هر نوع داده‌هایی را می‌توانیم به مغز بخورانیم؟ آیا مغز به سادگی خواهد فهمید با آن داده‌ها چه بکند؟

۴ | سر در آوردن از ورودی‌ها

هر کسی اگر بخواهد، می‌تواند شکل‌دهنده‌ی مغز خود باشد.

— سانتیاگو رامون ئی کاخال (۱۸۵۲-۱۹۳۴)، دانشمند علوم اعصاب و برنده‌ی جایزه‌ی نوبل

مایکل کوروست از بدو تولد کم‌شنوا بود و تا زمان جوانی از سمعک استفاده می‌کرد. ولی یک روز بعدازظهر که منتظر تحویل گرفتن ماشین کرایه‌ای بود، باتری سمعکش تمام شد. یعنی خودش این‌طور فکر می‌کرد. باتری را عوض کرد، ولی دید که باز هم هیچ صدایی را نمی‌شنود. سوار ماشین شد و به نزدیک‌ترین اورژانس رفت. معلوم شد که ته‌مانده‌ی شنوایی‌اش — باریکه‌ای که برای ارتباط سمعی با دنیا داشت — برای همیشه از میان رفته است.^[۱]

سمعک دیگر هیچ فایده‌ای برایش نداشت؛ چرا که سمعک تنها کاری که می‌کند، این است که صدای بیرون را می‌گیرد و آن را با بلندی بالاتری به دستگاه شنوایی بیمار می‌فرستد. این راهبرد برای برخی از انواع کم‌شنوایی مفید است، ولی فقط در صورتی مؤثر است که در پایین‌دست پرده‌ی گوش، همه چیز درست کار کند. اگر گوش درونی از کار افتاده باشد، هر چقدر هم صدا را تقویت کنید، مشکلی حل نخواهد شد. و این وضعیت مایکل بود. چنین به نظر می‌رسید که توانایی او برای ادراک صداها در دنیا به پایان رسیده است.

ولی بعد متوجه شد که هنوز یک راه باقی‌مانده است و در سال ۲۰۰۱ تحت عمل جراحی کاشت حلزون قرار گرفت. این دستگاه بسیار کوچک، سخت‌افزار خراب گوش درونی را دور می‌زند و مستقیماً اطلاعات را برای عصب بعد از آن که هنوز درست کار می‌کند، می‌فرستد (می‌توانید آن را مانند

یک کابل داده‌ها به حساب آورید). این ایمپلنت مانند نوعی مینی کامپیوتر است که مستقیماً داخل گوش درونی او قرار داده شده است؛ این دستگاه صداها را از جهان بیرون می‌گیرد و اطلاعات را به وسیله‌ی الکترودهای ریزی به عصب شنوایی می‌فرستد.

پس بخش آسیب‌دیده‌ی گوش درونی دور زده می‌شود، ولی این بدان معنا نیست که تجربه‌ی شنوایی به همین راحتی ایجاد می‌شود. مایکل می‌بایست سیگنال‌های الکتریکی خورانده شده به دستگاه شنوایی‌اش را که مانند یک زبان خارجی بود، یاد بگیرد:

وقتی که یک ماه بعد از جراحی دستگاه روشن شد، اولین جمله‌ای که شنیدم، این‌گونه به نظر می‌رسید: «زززز صززز چی خوززز؟» به تدریج مغزم یاد گرفت که سیگنال‌های بیگانه را تفسیر کند. طولی نکشید که «زززز صززز چی خوززز؟» تبدیل شد به «امروز صبحانه چی خوردی؟» پس از چند ماه تمرین، توانستم دوباره از تلفن استفاده کنم، و حتی در کافه‌ها و رستوران‌های شلوغ با دیگران گفت‌وگو کنم.

گرچه کاشتن یک مینی کامپیوتر در داخل بدن تا حدودی مانند داستان‌های علمی-تخیلی به نظر می‌رسد، ولی کاشت حلزون از سال ۱۹۸۲ انجام می‌شود، و بیش از نیم میلیون نفر درون سرشان این دستگاه‌های بیونیکی را دارند و از شنیدن صدای آدم‌ها و در زدن و خنده و نی‌لبک بهره‌مند می‌شوند. نرم‌افزار حلزون مصنوعی قابل‌هک و قابل‌آپدیت است، بنابراین، مایکل در طول سال‌ها توانسته بدون آنکه جراحی دیگری انجام دهد، کیفیت اطلاعات ورودی را بهبود بخشد. تقریباً یک سال پس از فعال‌سازی حلزون، برنامه‌ی آن را ارتقا داد، به‌طوری که تفکیک‌پذیری آن تقریباً دو برابر شد. به قول خود مایکل: «گوش دوستانم با افزایش سن ناگزیر بدتر خواهد شد، ولی شنوایی من مرتب بهتر می‌شود.»



تری بایلند نزدیک لس‌آنجلس زندگی می‌کند. برای او تشخیص رتینیت پیگمنتوزا داده شد، نوعی اختلال استحال‌ای شبکیه، یعنی پرده‌ی پشت چشم که گیرنده‌های نوری در آن قرار دارد. او می‌گوید: «در سن ۳۷ سالگی، آخرین

چیزی که آدم می‌خواهد بشنود، این است که قرار است کور شود، و هیچ کاری هم از دست کسی بر نمی‌آید.»^[۲]

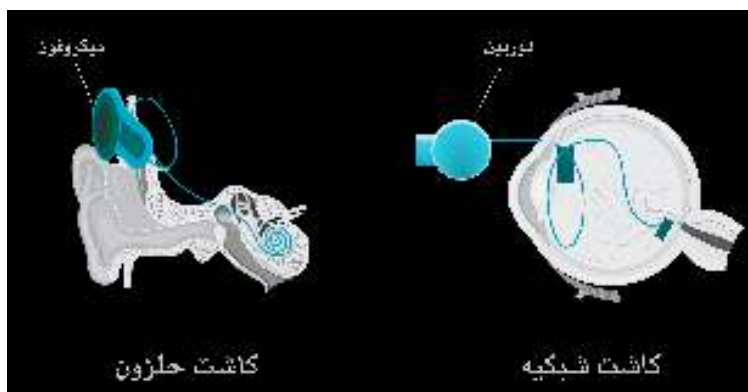
ولی بعد فهمید که یک راه چاره برای مشکل او هست، به شرطی که آن‌قدر شهادت داشته باشد که آن را انجام دهد. در سال ۲۰۰۴، او یکی از نخستین بیمارانی شد که تحت یک عمل تجربی قرار می‌گرفتند: کاشت یک تراشه‌ی بیونیک شبکیه. دستگاه ریزی با جدولی از الکترودها که روی شبکیه در پشت چشم نصب می‌شود. یک دوربین که روی عینک نصب می‌شود، سیگنال‌های خود را به این تراشه می‌فرستد. الکترودها جرقه‌های کوچک الکتریسیته را به سلول‌های شبکیه‌ای باقی‌مانده‌ی شبکیه‌ی تری می‌فرستند، و سیگنال‌هایی را در بزرگراه عصب بینایی که قبلاً خاموش بود، ارسال می‌کنند. چرا که عصب بینایی تری خیلی خوب کار می‌کرد: حتی با آنکه گیرنده‌های نوری مرده بودند، عصب تشنه‌ی دریافت سیگنال‌ها برای فرستادن به مغز بود.

یک تیم پژوهشی در دانشگاه کالیفرنیا جنوبی، تراشه‌ی مینیاتوری را در چشم‌تری کار گذاشتند. جراحی بدون هرگونه مشکلی انجام شد، و بعد آزمایش واقعی آغاز شد. تیم پژوهشی با دلشوره‌ای آرام تک‌تک الکترودها را روشن کردند تا آن‌ها را آزمایش کنند. تری می‌گوید: «خیلی عالی بود که بتوانم ببینم. وقتی که الکترودها را یکی‌یکی آزمایش می‌کردند، مانند لکه‌های کوچولوی روشنایی بود — حتی به اندازه‌ی یک سکه‌ی ده‌سنتی هم نبود.»

تا چند روز، تری فقط تجمعات کوچکی از لکه‌های نوری را تجربه می‌کرد که موفقیت چندان بزرگی نبود. ولی قشر بینایی او به تدریج یاد گرفت که چگونه اطلاعات بهتری را از سیگنال‌ها استخراج کند. پس از مدتی، توانست حضور فرزند هجده‌ساله‌اش را تشخیص دهد: «داشتم با پسر راه می‌رفتم... از وقتی که پنج‌ساله بود، اولین بار بود که او را می‌دیدم. راستش را بخواهید، آن روز چند اشک از چشمانم جاری شد.»

آنچه تری تجربه می‌کرد، یک تصویر بصری واضح نبود — بیشتر شبیه یک جدول پیکسلی ساده بود — ولی دری بود که اندکی به روی روشنایی باز شده بود. با گذشت زمان، مغزش توانست سیگنال‌ها را بهتر تفسیر کند. گرچه او نمی‌تواند جزئیات چهره‌ی افراد را ببیند، ولی می‌تواند آن‌ها را به‌طور مبهم

تشخیص دهد. و با آنکه تفکیک‌پذیری تراشه‌ی شبکه‌ای او پایین است، ولی می‌تواند به‌اشیایی که در مقابل او در محل‌های تصادفی قرار داده می‌شود، دست بزند، و قادر است با تشخیص دادن خطوط محل عبور عابر پیاده، از خیابان رد شود.^[۲] او با افتخار می‌گوید: «وقتی که در خانه‌ی خودم یا خانه‌ی کس دیگری هستم، می‌توانم به هر اتاقی که بخواهم بروم و چراغ را روشن کنم، یا اینکه نوری را که از پنجره وارد می‌شود، ببینم. وقتی که در خیابان راه می‌روم، می‌توانم از برخورد با شاخه‌های آویزان درختان اجتناب کنم — حاشیه‌ی شاخه‌ها را می‌بینم، و بنابراین، می‌توانم از برخورد با آن‌ها اجتناب کنم.»



این دستگاه‌های دیجیتال اطلاعاتی را ارسال می‌کنند که کاملاً با زبان زیست‌شناسی طبیعی انطباق ندارد. با این وجود، مغز یاد می‌گیرد که چگونه از این داده‌ها استفاده کند.

ایده‌ی ساخت پروتز برای گوش و چشم به مدت چندین دهه در محافل علمی با جدیت در دست بررسی بود. ولی کسی مطمئن نبود که این فناوری‌ها مؤثر واقع شود. چرا که گوش درونی و شبکه‌ی پردازش‌های پیشرفته‌ی حیرت‌انگیزی روی ورودی حسی دریافتی خود انجام می‌دهند. بنابراین، آیا مغز ما خواهد توانست حرف‌های یک تراشه‌ی الکترونیکی کوچک را، که به جای زبان زیست‌شناختی طبیعی اندام‌های حسی ما به لهجه‌ی سیلیکون ولی صحبت می‌کند، بفهمد؟ یا اینکه الگوی جرقه‌های الکتریکی مینیاتوری آن از سوی شبکه‌های عصبی پایین‌دستی به‌عنوان حرف‌های بی‌معنی تفسیر خواهد شد؟ این دستگاه‌ها مانند مسافر پررویی خواهند بود که به کشوری خارجی رفته و فکر می‌کند اگر مرتب

فریاد بزند، سرانجام همگان حرف‌هایش را خواهند فهمید.
جالب است که در مورد مغز، همین راهبرد زمخت مؤثر واقع می‌شود: مردم کشور یاد می‌گیرند که حرف‌های مسافر خارجی را بفهمند.
ولی چگونه؟

برای فهمیدن این موضوع، لازم است که به سطحی عمیق‌تر برویم: بافت یک و نیم کیلوگرمی مغز شما مستقیماً چیزی را از جهان پیرامون شما نمی‌شنود و نمی‌بیند. بلکه مغز شما در مغاک ساکت و تاریک درون جمجمه‌تان محبوس است. تنها چیزی که می‌بیند، سیگنال‌های الکتروشیمیایی هستند که از طریق کابل‌های داده‌ای مختلف به آن جریان می‌یابند. تنها چیزی که در اختیار دارد، همین است. گرچه هنوز داریم سعی می‌کنیم روش آن را بفهمیم، ولی مغز موهبت حیرت‌انگیزی در استخراج کردن الگو از این سیگنال‌ها دارد. مغز به این الگوها معنا می‌بخشد. با این معناها، شما تجربه‌ی ذهنی پیدا می‌کنید. مغز عضوی است که جرقه‌هایی در تاریکی را به نمایش تصویری دلپذیر جهان شما تبدیل می‌کند. تمام رنگ‌ها و عطرها و عواطف و احساسات زندگی شما در تریلیون‌ها سیگنال که در تاریکی جریان می‌یابند، کدگذاری می‌شوند، درست مانند محافظ زیبای صفحه‌ی نمایش کامپیوتر شما که از صفر و یک تشکیل شده است.

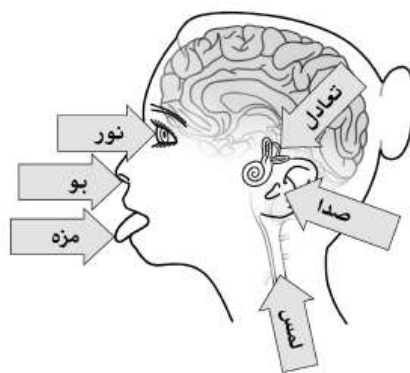
فناوری اعجاب‌انگیز سر سیب‌زمینی

تصور کنید که به جزیره‌ای رفته‌اید که مردم آن کور متولد می‌شوند. همه‌ی آن‌ها با خط بریل کتاب می‌خوانند و الگوهای ریز ورودی را با نوک انگشتان‌شان حس می‌کنند. آن‌ها را می‌بینید که در حالی که انگشت خود را روی برآمدگی‌های کوچک کاغذ می‌کشند، ناگهان به خنده می‌افتند یا اشک در چشمان‌شان حلقه می‌زند. چطور می‌توان آن همه احساسات را در نوک انگشت جای داد؟ برای‌شان توضیح می‌دهید که شما وقتی رمان می‌خوانید، گره‌های روی صورت‌تان را متوجه خطوط و منحنی‌های خاص روی کاغذ می‌کنید. هر گره دارای پهنه‌ای از سلول‌ها است که برخورد فوتون‌ها را ثبت می‌کنند، و به این طریق، می‌توانید شکل نمادها را تشخیص دهید. شما مجموعه‌ای از قواعد را حفظ کرده‌اید که بیان می‌کند که هر شکل نماینده‌ی صدای متفاوتی است. لذا برای هر شکل

خط، صدای کوچکی را در ذهن تان بازگو می‌کنید و تصور می‌کنید که اگر کسی می‌خواست آن را به صدای بلند بخواند، چه می‌گفت. الگوی سیگنال‌های شیمیایی عصبی حاصله سبب می‌شود که از خوشحالی به خنده بیفتید یا اینکه اشک از چشمان تان سرازیر شود. جای تعجب نخواهد بود اگر درک ادعاهای شما برای مردم جزیره دشوار باشد.

شما و آن‌ها باید سرانجام حقیقت ساده‌ای را بپذیرید: نوک انگشت یا کره‌ی چشم **صرفاً** دستگاه محیطی است که اطلاعات دنیای بیرون را تبدیل به نیزه‌های مغزی می‌کند. سپس تمام کار دشوار تفسیر را مغز انجام می‌دهد. شما و مردم جزیره می‌توانید دلتان را به این خوش کنید که در نهایت، تمام مسئله عبارت از ترلیون‌ها نیزه است که در مغز حرکت می‌کند — و روش ورود اطلاعات مسئله‌ی خیلی مهمی نیست.

هرگونه اطلاعاتی به مغز داده شود، مغز خود را با آن سازگار می‌کند و هر چیزی را که بتواند، از آن استخراج می‌کند. مادام که داده‌ها ساختاری داشته باشد که منعکس‌کننده‌ی چیز مهمی در دنیای بیرون باشد (به همراه الزامات دیگری که در فصل‌های بعدی خواهیم دید)، مغز یاد خواهد گرفت که آن را رمزگشایی کند.



اندام‌های حسی، اطلاعات را از منابع مختلفی به مغز می‌رسانند.

این مسئله پیامد جالبی دارد: مغز شما نمی‌داند و برایش هم مهم نیست که داده‌ها از کجا آمده است. هرگونه اطلاعاتی وارد شود، مغز فقط راه بهره‌گیری از آن را مشخص می‌کند.

این سبب می‌شود که مغز ماشین بسیار کارآمدی باشد. مغز یک دستگاه رایانشی همه‌منظوره است. این دستگاه سیگنال‌های موجود را می‌گیرد و — به صورت تقریباً بهینه — مشخص می‌کند که با آن چه کاری می‌تواند انجام دهد. و نظریه‌ی پیشنهادی من این است که این راهبرد مادر طبیعت را آزاد می‌کند که با انواع مختلف کانال‌های ورودی کار کند.

من به این دیدگاه، مدل سر سیب‌زمینی برای تکامل می‌گویم. هدفم از این نام‌گذاری، تأکید بر این است که همه‌ی حسگرهایی که می‌شناسیم و از آن‌ها بهره می‌گیریم — مانند چشم‌ها و گوش‌ها و نوک انگشتان — صرفاً دستگاه‌های محیطی جازدنی هستند. آن‌ها را وصل می‌کنید و می‌توانید از آن‌ها استفاده کنید. مغز خودش می‌فهمد که با داده‌هایی که وارد می‌شود، چه کند.

در نتیجه، مادر طبیعت می‌تواند به سادگی با ساختن اعضای محیطی جدید، حواس جدید بسازد. به عبارت دیگر، وقتی که اصول کاری مغز را مشخص کرد، می‌تواند با انواع مختلف کانال‌های ورودی آزمایش کند، تا بتواند منابع گوناگون انرژی را از جهان اطراف دریافت کند. اطلاعاتی که با بازتاب امواج الکترومغناطیسی انتقال داده می‌شود، از سوی آشکارسازهای فوتونی در چشم‌ها اخذ می‌شود. امواج تراکم هوا به وسیله‌ی آشکارسازهای صدا در گوش گرفته می‌شود. اطلاعات مربوط به گرمی و بافت اشیا به وسیله‌ی ورقه‌های بزرگ ماده‌ی حسی که به آن پوست می‌گوییم، جمع‌آوری می‌شود. امضاهای شیمیایی از طریق بوییدن یا چشیدن با بینی یا زبان دریافت می‌شود. و تمام این‌ها به نیزه‌هایی ترجمه می‌شود که در گنبد تاریک مجموعه حرکت می‌کند.

این توانایی شگفت‌انگیز مغز برای پذیرش هر نوع ورودی حسی، بار تحقیق و توسعه‌ی حس‌های جدید را به حسگرهای بیرونی منتقل می‌کند. به همان طریقی که می‌توانید بینی یا چشم یا دهان دلخواهی را توی سر سیب‌زمینی فرو کنید، طبیعت هم ابزارهای مختلفی را در مغز جا می‌زند تا منابع انرژی دنیای بیرون را آشکارسازی کند.

مثلاً دستگاه‌های محیطی جازدنی کامپیوتر را در نظر بگیرید. اهمیت اصطلاح «جازدنی» از آن جهت است که کامپیوتر شما مثلاً درباره‌ی سوپرِوب کم JI-۳۰۰۰ که چند سال بعد در آینده اختراع خواهد شد، چیزی نمی‌داند؛ بلکه فقط لازم است

که قابلیت ارتباط با دستگاه‌های دلبخواه ناشناخته را داشته باشد و بتواند زمانی که آن دستگاه جا زده می‌شود، جریان داده‌ها را از آن دریافت کند. در نتیجه، هر بار که دستگاه محیطی جدیدی وارد بازار می‌شود، نیازی نیست که کامپیوتر جدیدی بخرید. شما تنها یک دستگاه مرکزی واحد دارید که می‌توانید دستگاه‌های محیطی را به صورت استاندارد به دریچه‌های پورت آن وصل کنید.^[۴]



فرضیه‌ی سر سیب‌زمینی: اعضای حسی را جا بزنید، مغز خودش می‌فهمد که چگونه از آن‌ها استفاده کند.

اینکه هر کدام از آشکارسازهای محیطی خودمان را مانند یک دستگاه مستقل در نظر بگیریم، شاید برایتان غیرقابل‌باور به نظر برسد؛ مگر نه این است که هزاران ژن در ساخت این دستگاه‌ها دخالت دارند، و هر کدام از این ژن‌ها با دیگر قطعات و اجزای بدن نیز در ارتباط هستند؟ آیا واقعاً می‌توان بینی، چشم، گوش، یا زبان را مانند دستگاه مستقلی در نظر گرفت؟ من درباره‌ی این مسئله تحقیقات عمیقی کرده‌ام. آخر اگر مدل سر سیب‌زمینی درست باشد، بدان معنا است که شاید سوئیچ‌های ساده‌ای را در ژنتیک پیدا کنیم که موجب وجود یا عدم وجود این دستگاه‌های محیطی می‌شود.

واقعیت این است که همه‌ی ژن‌ها یکسان نیستند. ژن‌ها با ترتیب بسیار دقیقی به ظهور می‌رسند، به طوری که بیان یک ژن با الگوریتم پیشرفته‌ای متشکل از بازخورد و پیش‌خوراند، منجر به بیان ژن‌های بعدی می‌شود. در نتیجه، در برنامه‌های ژنتیکی، گره‌هایی هستند که مثلاً برای ساختن بینی حیاتی‌اند. آن

برنامه را می‌توان روشن یا خاموش کرد. می‌دانید این را از کجا می‌دانیم؟ جهش‌هایی را که در پی یک رخداد ژنتیکی اتفاق می‌افتند، در نظر بگیرید. مثلاً در وضعیتی به نام آرینیا، که در آن کودکی بدون بینی به دنیا می‌آید. کلاً بینی در صورت بچه وجود ندارد. یک بچه‌ای به نام الی که در سال ۲۰۱۵ در آلاباما به دنیا آمد، کاملاً فاقد بینی است، و حفره‌ی بینی و دستگاه بویایی نیز ندارد.^[۵] چنین جهشی تکان‌دهنده و غیرقابل‌تصور به نظر می‌رسد، ولی در چارچوب جازدنی مورد نظر ما، آرینیا وضعیتی قابل‌پیش‌بینی است: با دستکاری مختصری در ژن‌ها، این دستگاه محیطی اصولاً ساخته نمی‌شود.



این شیرخوار، به نام الی، بدون بینی متولد شد.

اگر اعضای حسی ما را بتوان مانند دستگاه‌های جازدنی در نظر گرفت، می‌توانیم انتظار موارد پزشکی خاصی را داشته باشیم که مثلاً کودکی بدون چشم متولد می‌شود. و واقعاً هم چنین وضعیتی وجود دارد و آنوفتالمی نامیده می‌شود. یک نمونه‌ی آن کودکی به نام جوردی است که در سال ۲۰۱۴ در شیکاگو متولد شد.^[۶] زیر پلک‌های او، تنها چیزی که یافت می‌شود، پوستی صاف و براق است. در حالی که رفتار جوردی و تصویربرداری مغز او نشان می‌دهد که بقیه‌ی مغزش کاملاً درست کار می‌کند، ولی او فاقد دستگاه محیطی برای گرفتن فوتون‌ها است. مادر بزرگ جوردی می‌گوید: «او با لمس کردن ما را تشخیص خواهد داد.» مادرش، برانیا جکسون، عبارت «من جوردی را دوست دارم» را — با خط بریل — روی شانه‌ی راست خودش خال‌کوبی کرده تا جوردی از بچگی آن را لمس کند.



این شیرخوار، به نام جوردی، بدون چشم متولد شد؛ زیر پلک‌هایش پوست است. بعضی از بچه‌ها بدون گوش زاده می‌شوند. در این وضعیت نادر که آنوشیا نامیده می‌شود، کودکان با فقدان کامل بخش بیرونی گوش متولد می‌شوند. در همین ارتباط، جهش یک پروتئین واحد سبب فقدان ساختارهای گوش درونی می‌شود.^[v] نیازی به گفتن نیست که کودکانی که دچار این جهش‌ها هستند، کاملاً ناشنوایند، زیرا فاقد دستگاه‌های محیطی هستند که امواج فشار هوا را به نیزه‌های عصبی تبدیل می‌کنند.



کودکی بدون گوش.

آیا ممکن است که شما بدون زبان متولد شوید، ولی از سایر جهات سالم باشید؟ بله، البته. این اتفاقی است که برای یک کودک برزیلی به نام اوریستلا افتاد. او چندین سال در غذا خوردن، حرف زدن، و نفس کشیدن مشکل داشت.

حالا که به سن بزرگسالی رسیده، با عمل جراحی برای او زبان **ساخته‌اند**، و در حال حاضر خیلی سلیس حرف می‌زند و درباره‌ی دوران کودکی‌اش که بی‌زبان بوده، مصاحبه می‌کند.^[۸]

بدن ما به طرق مختلفی می‌تواند به هم ریخته شود و این لیست همچنان ادامه دارد. برخی از بچه‌ها بدون هرگونه گیرنده‌ی درد در پوست و اعضای داخلی متولد می‌شوند، به‌طوری که کاملاً نسبت به سوزش و درد در حوادث زندگی غیرحساس‌اند.^[۹] (در نگاه اول، شاید تصور کنید که رهایی از درد نوعی مزیت است. ولی این‌طور نیست: کودکانی که قادر به تجربه کردن درد نیستند، بدن‌شان پر از جوشگاه است و غالباً در سنین پایین می‌میرند، زیرا نمی‌دانند از چه چیزهایی باید اجتناب کنند.) غیر از درد، انواع دیگری از گیرنده‌ها نیز در پوست وجود دارند، از جمله گیرنده‌های کشش، خارش، و دما، و ممکن است در یک کودک بعضی از آن‌ها وجود نداشته باشد. این‌ها مجموعاً تحت اصطلاح «نابساوایی» قرار می‌گیرد، یعنی ناتوانی در حس لمس.

وقتی که به این مجموعه از اختلالات نگاه می‌کنیم، روشن می‌شود که آشکارسازهای محیطی ما بر اثر برنامه‌های ژنتیکی خاصی پدیدار می‌شوند. اختلال کوچکی در کارکرد ژن‌ها می‌تواند برنامه را متوقف کند، که در آن صورت مغز آن جریان داده‌ای خاص را دریافت نخواهد کرد.



براساس ایده‌ی قشر همه‌منظوره، مشخص می‌شود که مهارت‌های حسی جدید در حین تکامل چگونه افزوده می‌شوند: با جهش یافتن یک دستگاه محیطی، جریان جدیدی از داده‌ها به پهنه‌ای از مغز می‌رسد، و دستگاه پردازش عصبی به کار می‌افتد. به این ترتیب، برای مهارت‌های جدید، فقط پیدایش دستگاه‌های حسی جدید لازم است.

بدین خاطر است که اگر به **قلمرو** جانوران نگاه کنیم، انواع و اقسام دستگاه‌های محیطی عجیب را می‌بینیم، که هر کدام طی میلیون‌ها سال تکامل ساخته شده است. اگر شما یک مار می‌بودید، توالی DNA شما نوعی حفره‌های حرارتی ایجاد می‌کرد که قادر به دریافت اطلاعات فروسرخ بود. اگر یک کاردماهی شیخ

سیاه می‌بودید، حروف ژنتیکی شما حسگرهایی الکتریکی را پدید می‌آورد که آشفتگی‌های میدان الکتریکی را حس می‌کنند. اگر یک سگ بلادهوند می‌بودید، کد ژنتیکی شما حاوی دستورهایی برای ساختن پوزه‌ی عظیمی می‌بود که مملو از گیرنده‌های بویایی است. اگر یک میگوی آخوندکی می‌بودید، دستورهای ژنتیکی شما چشم‌هایی را می‌ساختند که حاوی شانزده نوع گیرنده‌ی نوری بودند. موش ستاره‌پوزه چیزی شبیه بیست و دو انگشت روی پوزه‌ی خود دارد، که با آن‌ها اطراف را حس می‌کند و مدلی سه‌بعدی از سیستم تونلی خود را می‌سازد. بسیاری از پرندگان، گاوها، و حشرات، گیرنده‌های مغناطیسی دارند، که با استفاده از آن براساس میدان مغناطیسی زمین، جهت‌یابی می‌کنند.

آیا مغز برای کار با این همه دستگاه‌های محیطی متنوع، هر بار باید طراحی مجدد شود؟ به نظر من، نه. در مسیر تکامل، جهش‌های تصادفی موجب ایجاد حسگرهای عجیب جدیدی می‌شوند، و مغز دریافت‌کننده به سادگی راهی برای استفاده کردن از آن‌ها پیدا می‌کند. وقتی که اصول عملکرد مغز مشخص شد، طبیعت دیگر فقط باید به فکر طراحی حسگرهای جدید باشد.

با این دیدگاه، درسی را فرامی‌گیریم: دستگاه‌هایی که با آن‌ها به این دنیا می‌آییم — چشم، بینی، گوش، زبان، نوک انگشتان — تنها مجموعه‌ی ابزارهایی نیستند که می‌توانستیم داشته باشیم. این‌ها صرفاً ابزارهایی هستند که طی مسیر طولانی و پیچیده‌ی تکامل به ارث برده‌ایم.

ولی شاید بتوان گفت که مجبور نیستیم همیشه با این مجموعه‌ی خاص حسگرها همراه باشیم.

هرچه باشد، توانایی مغز برای سر درآوردن از انواع مختلف اطلاعات ورودی، به‌طور ضمنی این پیش‌بینی عجیب را مطرح می‌کند که شاید بتوان کاری کرد که یک کانال حسی، اطلاعات کانال دیگری را منتقل کند. مثلاً آیا می‌توان جریان داده‌های یک دوربین ویدئویی را تبدیل به حس لمس پوست کرد؟ آیا مغز در نهایت خواهد توانست دنیای بصری را صرفاً با لمس کردن آن تفسیر کند؟

این است دنیای جایگزینی حسی که از تخیل هم عجیب‌تر است.

جایگزینی حسی

این ایده که بتوان داده‌ها را از طریق کانال اشتباهی وارد مغز کرد، فکری عجیب و غریب و فرضی به نظر می‌رسد. ولی نخستین مقاله‌ای که امکان این کار را نشان می‌داد، بیش از نیم قرن پیش در مجله‌ی نیچر منتشر شد. داستان از سال ۱۹۵۸ آغاز می‌شود، زمانی که پزشکی به نام پل باکی ریتا خبر وحشتناکی را دریافت کرد: پدرش که استادی شصت و پنج ساله بود، دچار سکته‌ی مغزی وسیعی شده بود. او اکنون مجبور به استفاده از صندلی چرخدار بود و به زحمت می‌توانست حرف بزند یا حرکت کند. پل و برادرش جورج، که در دانشگاه مکزیک دانشجوی پزشکی بود، به دنبال راهی برای کمک به پدرشان می‌گشتند. و با کمک هم، یک برنامه‌ی بازتوانی عجیب و غریب و اختصاصی را طراحی کردند.



جایگزینی حسی: وارد کردن اطلاعات به مغز از مسیرهای غیرمعمول.

به قول خود پل: «نوعی عشق سخت‌گیرانه بود.^۱ جورج [چیزی را روی زمین می‌انداخت و می‌گفت: 'بابا، برو آن را بردار.']^{۱۰۱} یا اینکه از پدرشان می‌خواستند که جلوی در خانه را جارو کند، با آنکه همسایه‌ها با ناراحتی تماشا می‌کردند. ولی این تقلا برای پدرشان مفید بود. پل از قول پدر می‌گفت: «این آدم به‌دردنخور دارد کاری انجام می‌دهد.»

بیماران سکته‌ی مغزی معمولاً فقط به‌طور نسبی بهبود می‌یابند — خیلی وقت‌ها هم اصلاً بهتر نمی‌شوند — از این رو، این دو برادر سعی کردند به خودشان امید کاذب ندهند. آن‌ها می‌دانستند که وقتی بافت مغز بر اثر سکته‌ی مغزی می‌میرد، دیگر هرگز باز نمی‌گردد.

ولی بهبود پدرشان برخلاف انتظار، سیر خیلی خوبی داشت. در واقع، تا بدان‌جا که پدرشان به کار استادی‌اش بازگشت و مدت‌ها بعد فوت کرد (بر اثر سکته‌ی قلبی، زمانی که در کالیفرنیا در ارتفاع دو هزار و هفتصد متری مشغول پیاده‌روی بود).

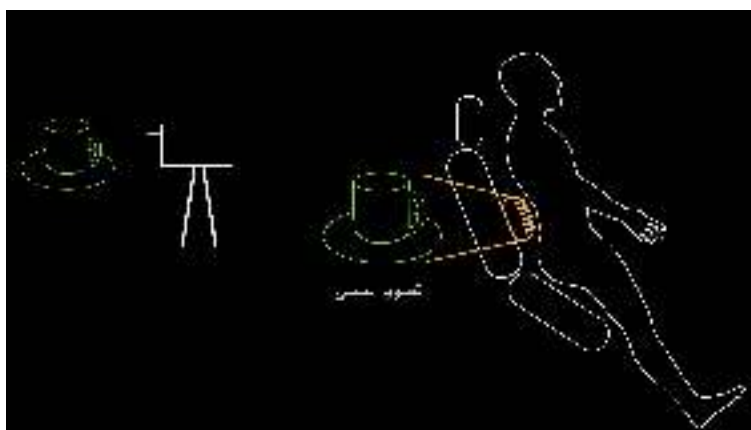
پل بسیار تحت تأثیر بهبودی وسیع پدرش قرار گرفت و این تجربه نقطه‌ی عطفی مهمی در زندگی او شد. او متوجه شد که مغز می‌تواند خودش را دوباره آموزش دهد، و حتی زمانی که بخش‌هایی از مغز برای همیشه نابود شده است، بخش‌های دیگر می‌تواند کارکرد آن را بر عهده گیرد. پل مقام استادی را در مؤسسه‌ی پژوهشی اسمیت-کتل‌ول در سان‌فرانسیسکو رها کرد و دستیار پزشکی توان‌بخشی در مرکز پزشکی سانتا کلارا ولی شد. می‌خواست روی افرادی همچون پدرش مطالعه کند. می‌خواست بفهمد که مغز چگونه خود را بازآموزی می‌کند.

تا اواخر دهه‌ی ۱۹۶۰، پل باکی‌ریتا نقشه‌ای را دنبال می‌کرد که اکثر همکارانش آن را احمقانه می‌دانستند. او یک فرد داوطلب نابینا را روی یک صندلی دندان‌پزشکی که تغییراتی در آن داده شده بود، می‌نشاند. در پشتی صندلی، شبکه‌ای از چهارصد سنجاق تفلونی به‌صورت جدولی بیست در بیست نصب شده بود. این سنجاق‌ها با استفاده از سیم‌لوله‌های مکانیکی امکان برآمده شدن و فرورفتن داشت. بر فراز سر مرد نابینا، دوربینی روی یک سه‌پایه نصب شده بود. براساس جریان ویدئویی دوربین، سنجاق‌ها روی پشت فرد داوطلب فروبرده می‌شد.

در حالی که شرکت‌کننده‌ی نابینا به دقت به حس لمس پشت خود توجه داشت، اشیایی از جلوی دوربین عبور داده می‌شد. در طول چندین روز آموزش، توانایی برای تشخیص دادن اشیاء براساس لمس بهتر شد — مثل آنکه یک نفر با انگشت خود روی پشت کس دیگری چیزی بنویسد و از او بخواهد که آن

شکل یا حرف را تشخیص دهد. البته این تجربه دقیقاً مانند بینایی نبود، ولی برای شروع کار خوب بود.

آنچه باکی‌ریتا مشاهده کرد، همه‌ی محققان این رشته را حیرت‌زده کرد: سوژه‌های نابینا می‌توانستند یاد بگیرند که خطوط افقی، عمودی، و مورب را تشخیص دهند. افراد پیشرفته‌تر توانستند یاد بگیرند که اشیای ساده و حتی چهره‌ی افراد را تشخیص دهند — آن هم تنها با حس فرورفتن سنجاق در پشت‌شان. او این یافته‌ها را تحت عنوان عجیب «جایگزینی بینایی با فرافکنی تصویر لمسی» در مجله‌ی نیچر منتشر کرد. این سرآغاز عصر جدیدی بود — عصر جایگزینی حسی.^[۱۱] باکی‌ریتا یافته‌هایش را با این جمله‌ی ساده خلاصه کرد: «مغز قادر است از اطلاعاتی که از پوست می‌رسد به‌گونه‌ای استفاده کند که گویی از چشم می‌آید.»



جریان داده‌های ویدئویی به لمس در ناحیه‌ی پشت فرد ترجمه می‌شود.

با تغییر ساده‌ای که باکی‌ریتا و همکارانش انجام دادند، این تکنیک بهبود قابل ملاحظه‌ای پیدا کرد: آن‌ها به جای اینکه دوربین را روی صندلی سوار کنند، هدایت آن را به خود کاربر نابینا دادند، تا با اراده‌ی خودش کنترل کند که این «چشم» به کجا نگاه می‌کند.^[۱۲] چرا؟ چون که ورودی حسی، زمانی بهتر یاد گرفته می‌شود که آدم بتواند با دنیا تعامل کند. وقتی که کنترل دوربین در اختیار کاربر قرار داده شد، حلقه‌ی بین خروجی ماهیچه‌ای و ورودی حسی

بسته شد.^[۱۳] ادراک را نباید به صورت غیرفعال در نظر گرفت، بلکه روشی است برای کاوش فعالانه‌ی محیط، و منطبق کردن بین یک عمل خاص و یک تغییر ویژه در چیزی که به مغز بازمی‌گردد. از نظر مغز اهمیتی ندارد که این حلقه چگونه برقرار می‌شود — از طریق حرکت دادن ماهیچه‌های خارج‌چشمی که چشم را جابه‌جا می‌کنند یا از طریق کج کردن یک دوربین با ماهیچه‌های دست. به هر طریقی که اتفاق بیفتد، مغز موفق می‌شود راهی برای انطباق خروجی با ورودی پیدا کند.

تجربه‌ی ذهنی کاربران به این صورت بود که حس می‌کردند که اشیای بصری «آن بیرون» هستند نه روی پوست پشت‌شان.^[۱۴] به عبارت دیگر، چیزی بود مانند بینایی. وقتی که به چهره‌ی دوست‌تان در کافی‌شاپ نگاه می‌کنید، با آنکه تصویر بر روی گیرنده‌های نوری شما نقش می‌بندد، ولی احساس نمی‌کنید که سیگنال در چشمان شما است. احساس می‌کنید که آن بیرون جلوی شما است، و دارد از آن طرف برایتان دست تکان می‌دهد. در مورد کاربران صندلی تغییر یافته نیز همین‌طور بود.

گرچه دستگاه باکی‌ریتا نخستین موردی بود که به اطلاع عموم رسید، ولی در واقع نخستین مورد تلاش برای جایگزینی حسی نبود. در آن سوی دنیا در اواخر دهه‌ی ۱۸۹۰، یک چشم‌پزشک لهستانی به نام کازیمیر نویشفسکی برای افراد نابینا، الکتروفتالم (ترکیب کلمات یونانی «الکتریسته» + «چشم») ساخت. یک مقاومت نوری روی پیشانی یک فرد نابینا قرار داده می‌شد، و هرچه نور بیشتری به آن می‌رسید، صدای بلندتری در گوش او ایجاد می‌شد. شخص نابینا براساس شدت صدا، می‌توانست مشخص کند که نواحی روشن و تیره کجا قرار دارد.

متأسفانه، این دستگاه بزرگ و سنگین بود، و تفکیک‌پذیری فقط در حد یک پیکسل داشت، بنابراین، چندان مورد توجه قرار نگرفت. ولی با رسیدن دهه‌ی ۱۹۶۰، همکاران لهستانی‌اش توپ را از او گرفتند و بازی را ادامه دادند.^[۱۵] آن‌ها با توجه به اینکه شنوایی برای فرد نابینا اهمیت زیادی دارد، به جای آن تصمیم گرفتند که اطلاعات را از طریق لمس انتقال دهند. سیستمی با موتورهای ارتعاشی ساختند که روی یک کلاه‌خود سوار می‌شد و تصاویر را روی سر «ترسیم» می‌کرد. شرکت‌کنندگان نابینا می‌توانستند در اتاق مخصوصی به اطراف

حرکت کنند. این اتاق به گونه ای رنگ آمیزی شده بود که کنتراست چارچوب درها و لبه های اثاثیه را تقویت می کرد. واقعاً هم این دستگاه مؤثر بود. ولی افسوس که این هم مانند اختراعات قبلی سنگین بود، و حین استفاده داغ می شد، بنابراین، دنیا هنوز هم باید انتظار می کشید. ولی اصل کار اثبات شده بود.



الکتروفتالم تصویر دوربین را به ارتعاشاتی بر روی سر ترجمه می کرد (۱۹۶۹).

چرا این رویکردهای عجیب مؤثر واقع می شود؟ زیرا ورودی هایی که به مغز می رسانند — فوتون ها از چشم، امواج تراکم هوا از گوش، فشار روی پوست — همگی به سیگنال های الکتریکی که وجه رایج مغز هستند، تبدیل می شوند. مادام که نيزه های ورودی حامل اطلاعاتی باشند که نشان دهنده ی چیز مهمی درباره ی جهان بیرون باشد، مغز تفسیر آن را یاد خواهد گرفت. جنگل های عصبی انبوه مغز اهمیتی نمی دهند که نيزه ها از چه مسیری وارد شده اند. باکی ریتا این موضوع را در مصاحبه ای در سال ۲۰۰۳ به این صورت توصیف کرد:

اگر من به شما نگاه کنم، تصویر شما از شبکیه ی من رد نمی شود... از آنجا تا خود مغز دیگر همه پالس است. پالس هایی که از اعصاب عبور می کنند. این پالس ها هیچ فرقی با پالس هایی که از شست پا می رسند، ندارند. آنچه مهم است، اطلاعاتی است که منتقل می کنند، و بسامد الگوی پالس ها. اگر بتوانید مغز را آموزش دهید که این نوع اطلاعات را استخراج کند، در آن صورت برای دیدن نیازی به چشم نخواهید داشت.

به عبارت دیگر، از آنجا که چشم‌ها دیگر کار نمی‌کنند، از پوست برای فرستادن داده‌ها به مغز استفاده شده است. ولی چطور چنین کاری ممکن است؟

اسبی که فقط یک کار بلد است

وقتی که به قشر مغز نگاه می‌کنید، در تمام تپه‌ها و دره‌هایش، همه جا یک جور به نظر می‌رسد. ولی وقتی که از آن تصویربرداری می‌کنیم یا الکترودهایی را به توده‌ی ژله‌مانند آن فرو می‌کنیم، درمی‌یابیم که در نواحی مختلف آن، انواع متفاوتی از اطلاعات واقع می‌شود. براساس این تفاوت‌ها، دانشمندان علوم اعصاب نامی را به هر ناحیه داده‌اند: یک ناحیه برای بینایی، یک ناحیه برای شنوایی، یک ناحیه برای لمس شست پای چپ، و الی آخر. ولی آیا ممکن نیست که هر ناحیه براساس ورودی‌هایی که دریافت می‌کند، به کاری اختصاص یافته است؟ مثلاً قشر «بینایی» به خاطر داده‌هایی که دریافت می‌کند، به بینایی اختصاص یافته است. آیا ممکن نیست که تخصص پیدا کردن نواحی مغزی حاصل جزئیات کابل‌های داده‌ای ورودی است، نه استعداد ژنتیکی از قبل تعیین شده‌ی آن نواحی؟ در این چارچوب، قشر مغز یک موتور همه‌منظوره‌ی پردازش داده‌ها است. کافی است داده‌ها را به آن بخورانید، تا آن‌ها را پردازش کند و نظم‌های آماری را از آن‌ها استخراج کند.^[۱۶] به عبارت دیگر، حاضر است هرگونه ورودی را که جا زده شود، بپذیرد، و الگوریتم‌های پایه‌ی یکسانی را روی آن اجرا کند. در این دیدگاه، هیچ بخشی از قشر از قبل به عنوان قشر بینایی، شنوایی، و امثال آن تعیین نشده است. بنابراین، یک ارگانیسم چه بخواهد امواج تراکم هوا را آشکارسازی کند و چه فوتون‌های نور را، تنها کاری که باید بکند این است که دسته‌ی الیاف سیگنال‌های ورودی را به قشر وصل کند، و ماشین‌آلات شش‌لایه یک الگوریتم بسیار عمومی را اجرا خواهد کرد تا اطلاعات صحیح را از آن استخراج کند. داده‌ها نوع ناحیه را مشخص می‌کند. و بدین خاطر است که نوقشر در همه جا یکسان به نظر می‌رسد: چون واقعاً یکسان است. هر بخش از قشر پرتوان (pluripotent) است — یعنی بسته به اینکه چه چیزی به آن جا زده شود، می‌تواند به سرنوشت‌های گوناگونی تبدیل شود. بنابراین، اگر یک ناحیه از مغز به شنوایی اختصاص یافته باشد، تنها بدین

خاطر است که دستگاه‌های محیطی (یعنی در این مورد، گوش‌ها) اطلاعات را از طریق کابل‌هایی که به آن ناحیه وصل شده است، ارسال می‌کنند. مجبور نیست حتماً قشر شنوایی باشد؛ فقط به این خاطر قشر شنوایی شده است که سیگنال‌های فرستاده شده از گوش، سرنوشت آن را این‌گونه رقم زده‌اند. تصور کنید که در جهانی دیگر، رشته‌های عصبی حامل اطلاعات بینایی به آن ناحیه وصل شده باشند؛ در آن صورت نام آنجا را در کتاب‌های مان قشر بینایی می‌گذاشتیم. به عبارت دیگر، قشر بر روی هرگونه ورودی که دریافت کند، عملیات استاندارد را انجام می‌دهد. شاید در نگاه اول به نظر برسد که نواحی حسی از قبل تعیین شده‌ای در مغز وجود دارند، ولی فقط به خاطر ورودی‌ها است که این‌طور به نظر می‌رسد.^[۱۷]

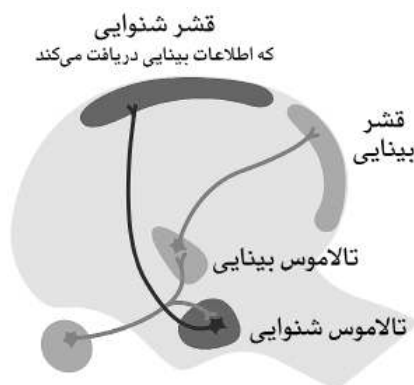
مثلاً بازارهای ماهی را در مناطق میانی ایالات متحده در نظر بگیرید: شهرهایی که ماهی‌خواری در آنجا رایج است، رستوران‌های سوشی فراوان‌اند، و دستورهای آشپزی جدید برای غذاهای دریایی در آنجا مرتب ایجاد می‌شود — فرض کنید به این شهرها نواحی اولیه‌ی ماهیگیری بگوییم.

چرا نقشه به این شکل درآمده و به شکل دیگری درنیامده است؟ بدان علت به این شکل درآمده که رودها در اینجا جریان دارند و لذا ماهی‌ها اینجا هستند. ماهی‌ها را مانند بیت‌های داده‌ها در نظر بگیرید، که در رودخانه‌ها که کابل‌های داده‌ای هستند، جریان می‌یابند، و توزیع رستوران‌ها براساس آن‌ها شکل می‌گیرد. هیچ نهاد قانون‌گذاری تصویب نکرده که بازارهای ماهی باید در آنجا قرار گیرند. آن‌ها به‌طور طبیعی در آنجا جمع شده‌اند.

تمام این‌ها منجر به این فرضیه می‌شود که قطعه‌ی بافتی که مثلاً در قشر شنوایی قرار دارد، هیچ ویژگی خاصی ندارد. بنابراین، اگر قطعه‌ای از قشر شنوایی یک رویان را درآوریم و آن را به قشر بینایی پیوند کنیم، درست کار خواهد کرد؟ در واقع، این دقیقاً کاری است که در آزمایش‌های جانوری از اوایل دهه‌ی ۱۹۹۰ انجام شد: خیلی زود مشخص شد که بافت پیوندی هم از نظر ظاهر و هم از نظر رفتار درست مانند بقیه‌ی قشر بینایی است.^[۱۸]

سپس این آزمایش را یک گام جلوتر بردند. در سال ۲۰۰۰، دانشمندان در مؤسسه‌ی فناوری ماساچوست، ورودی حاصل از چشم یک راسوی اهلی را

به قشر شنوایی هدایت کردند، یعنی حالا قشر شنوایی، ورودی بینایی دریافت می‌کرد. چه اتفاقی افتاد؟ قشر شنوایی مدارهایش را به گونه‌ای تغییر داد که مشابه اتصالات قشر اولیه بینایی باشد.^[۱۹] جانوران پس از این مدارسازی جدید، ورودی‌های رسیده به قشر شنوایی را مانند بینایی معمولی تفسیر می‌کردند. این به ما می‌گوید که الگوی ورودی‌ها، سرنوشت قشر را مشخص می‌کند. مغز به‌طور پویا خودش را مدارسازی می‌کند تا داده‌های ورودی را به بهترین وجه نمایش دهد (و نهایتاً بر مبنای آن عمل کند).^[۲۰]

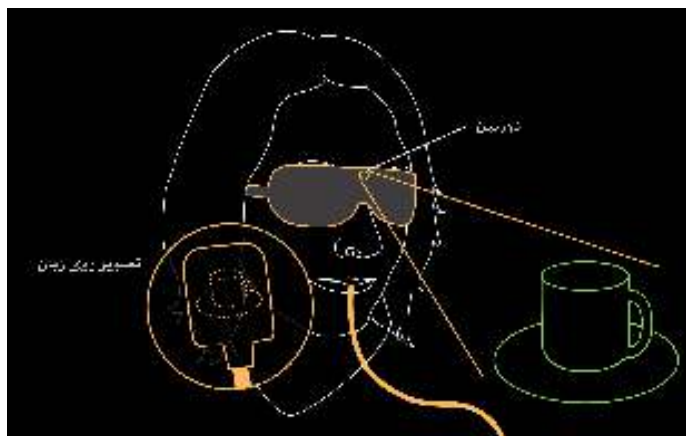


الیاف بینایی در مغز راسوی اهلی به قشر شنوایی تغییر مسیر داده شد - و در نتیجه، این قشر شروع به پردازش اطلاعات بینایی کرد.

صدها مطالعه بر روی پیوند بافت یا مدارسازی مجدد ورودی‌ها، از این مدل حمایت می‌کند که مغز یک دستگاه محاسباتی همه‌منظوره است - ماشینی که عملیاتی استاندارد را روی جریان داده‌های ورودی انجام می‌دهد - صرف نظر از اینکه این داده‌ها حاوی تصویر خرگوشی در حال دویدن باشد، یا صدای زنگ تلفن، یا مزه‌ی کره‌ی بادام‌زمینی، بوی سالامی، یا حس لمس حریر بر روی گونه. مغز ورودی را تحلیل می‌کند و آن را در سیاق مربوطه تفسیر می‌نماید (با این چکار می‌توانم بکنم؟)، صرف نظر از اینکه داده‌ها از کجا آمده باشد. بدین خاطر است که داده‌ها می‌تواند برای یک فرد نابینا مفید واقع شود، ولو آنکه از طریق پشت، یا گوش، یا پیشانی وارد شود.



در دهه‌ی ۱۹۹۰، باکی ریتا و همکارانش به دنبال روشی بودند که از صندلی دندان پزشکی کوچک‌تر باشد. آن‌ها دستگاه کوچکی به نام برین پورت درست کردند.^[۲۱] دوربینی به پیشانی فرد نابینا متصل می‌شود و شبکه‌ی کوچکی از الکترودها روی زبان قرار داده می‌شود. این «واحد نمایش زبانی»، از شبکه‌ای از تحریک کننده‌ها استفاده می‌کند که در مساحت سه سانتی متر مربع قرار گرفته‌اند. این الکترودها متناسب با موقعیت پیکسل‌ها، شوک‌های کوچکی را می‌فرستند، که احساس آن در دهان چیزی شبیه آب‌نبات‌های جرقه‌ای بچه‌ها است. پیکسل‌های روشن با تحریک شدید در نقاط متناظر بر روی زبان کدگذاری می‌شوند، پیکسل‌های خاکستری با تحریک متوسط، و نقاط تاریک بدون تحریک. ظرفیت تشخیص اشیای بصری در برین پورت معادل با بینایی ۲۰:۸۰۰ است.^[۲۲] گرچه کاربران در ابتدا تحریک زبان را به صورت لبه‌ها و شکل‌های غیرقابل تشخیص احساس می‌کنند، ولی نهایتاً یاد می‌گیرند که تحریک را در سطح عمیق‌تری بازشناسی کنند، به طوری که می‌توانند کیفیت‌هایی مانند فاصله، شکل، جهت حرکت، و اندازه را شناسایی کنند.^[۲۳]



دیدن با زبان.

ما به طور معمول زبان را به عنوان عضو چشایی می‌شناسیم، ولی زبان پر از گیرنده‌های لمس نیز هست (قوام و بافت غذا را با همین‌ها می‌فهمیم)، به طوری که می‌تواند واسطه‌ی خوبی برای ارتباط مغز و ماشین باشد.^[۲۴] همانند سایر

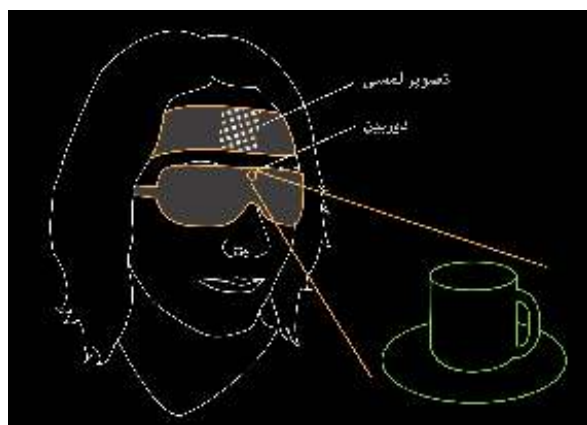
دستگاه‌های بصری-لمسی، شبکه‌ی زبانی نیز نشان می‌دهد که بینایی در چشم‌ها نیست، بلکه در مغز است. وقتی که از افراد آموزش دیده (نابینا یا بینا) تصویربرداری مغزی به عمل می‌آید، حرکت شوک‌های الکترونی بر روی زبان ناحیه‌ای از مغز را فعال می‌کند که به‌طور معمول در ارتباط با حرکت بصری است.^[۲۵]

همانند شبکه‌ی سیم‌لوله‌ها روی پشت افراد، در مورد برین‌پورت نیز افراد نابینا «باز بودن» و «عمق» صحنه‌ها را درک می‌کنند، و احساس می‌کنند که اشیا آن بیرون هستند. به عبارت دیگر، مسئله چیزی بیش از ترجمه‌ی شناختی چیزهایی است که از زبان حس می‌شود: در واقع، تبدیل به یک تجربه‌ی ادراکی مستقیم می‌شود. تجربه‌ی آن‌ها این نیست که «الگویی را روی زبانم حس می‌کنم که نشان می‌دهد که همسرم دارد عبور می‌کند»، بلکه فرد به‌طور مستقیم حس می‌کند که همسرش از وسط هال عبور می‌کند. اگر بینایی شما نرمال است، در نظر داشته باشید که چشمان شما هم همین‌طور کار می‌کنند: شما سیگنال‌های الکتروشیمیایی شبکه‌ی خود را به این صورت ادراک می‌کنید که مثلاً دوستی با دست به شما علامت می‌دهد، یک فراری با سرعت از جاده عبور می‌کند، یا اینکه یک بادکنک سرخ در آسمان لاجوردی شناور است. با آنکه تمام فعالیت در سطح آشکارسازهای حسی شما است، ولی احساس می‌کنید که همه چیز آن بیرون است. اصلاً مهم نیست که آشکارساز در چشم است یا در زبان. همان گونه که یکی از شرکت‌کنندگان نابینا به نام راجر بِم تجربه‌ی خود با برین‌پورت را به این صورت شرح داده است:

سال گذشته که برای اولین بار اینجا آمده بودم، داشتیم کارهایی را در آشپزخانه روی میز انجام می‌دادیم. و من یک جورهایی احساساتی شدم، چون از آخرین بار که می‌توانستم ببینم، سی و سه سال می‌گذرد. می‌توانستم دستم را دراز کنم و گوی‌های کوچک و بزرگ را ببینم. یعنی واقعاً آن‌ها را می‌دیدم. می‌توانستم دستم را دراز کنم و آن‌ها را بردارم — نه اینکه کورمال‌کورمال آن‌ها را پیدا کنم — می‌توانستم فنجان را ببینم، و دستم را بلند کنم و آن را درست توی فنجان بیندازم.^[۲۶]

لابد خودتان حدس زده‌اید که ورودی لمسی تقریباً هر جایی روی بدن می‌تواند باشد. پژوهشگران در ژاپن نوع دیگری از این شبکه‌ی لمسی را به نام

سیستم شبکه‌ی پیشانی ایجاد کرده‌اند که جریان ویدئویی را به نقاط ریز لمس روی پیشانی تبدیل می‌کند.^[۲۷] حالا چرا پیشانی؟ چرا که نه؟ تقریباً برای هیچ کار دیگری که استفاده نمی‌شود.



سیستم شبکه‌ی پیشانی.

نوعی دیگر دارای شبکه‌ای از عملگرهای ارتعاشی — لمسی روی شکم است، که فاصله تا نزدیک‌ترین سطوح را با استفاده از تغییرات شدت نشان می‌دهند.^[۲۸] آنچه در تمام این‌ها مشترک است، آن است که مغز می‌تواند ورودی‌های بینایی حاصل از کانال‌هایی که به‌طور معمول به لمس اختصاص دارد را تفسیر کند. ولی از قضا لمس تنها راهبردی نیست که برای این کار مؤثر واقع می‌شود.

آهنگ‌های چشم

در آزمایشگاه ما، چند سال قبل دان وان همان‌طور که راه می‌رفت، آیفون‌اش را جلوی خود در دست گرفته بود. چشمانش بسته بود، ولی به چیزی برخورد نمی‌کرد. جریان صوتی که از طریق گوشی‌های بی‌سیم به گوش او می‌رسید، دنیای بصری را به منظره‌ای صوتی تبدیل می‌کرد. داشت یاد می‌گرفت که اتاق را با گوش‌هایش ببیند. موبایل را با ملایمت مانند چشم سوم خود به اطراف تکان می‌داد، و آن را همچون عصایی به این طرف و آن طرف می‌چرخاند تا اطلاعات مورد نیازش را جمع‌آوری کند. داشتیم آزمایش می‌کردیم بینیم آیا

یک فرد نابینا می‌تواند از طریق گوش‌ها، اطلاعات بینایی را دریافت کند؟ گرچه شاید این راه‌حل نابینایی تا حالا به گوش‌تان نخورده باشد، ولی فکر جدیدی نیست: این فکر بیش از نیمه قرن قبل شروع شد.

در سال ۱۹۶۶، استادی به نام لسلای کی به موضوع جهت‌یابی پژواکی در خفاش‌ها بسیار علاقه‌مند شده بود. او می‌دانست که برخی از انسان‌ها می‌توانند جهت‌یابی پژواکی را یاد بگیرند، ولی کار آسانی نیست. از این رو، عینک بزرگی را طراحی کرد تا افراد نابینا بتوانند از این مزیت بهره‌مند شوند.^[۲۹]



شخص راست از عینک‌های صوتی پروفیسور کی استفاده می‌کند. (عینک‌های شخص دیگر فقط ضخیم است، ولی صوتی نیست.)

عینک‌ها صدایی فراصوتی را به محیط ساطع می‌کرد. فراصوت با طول‌موج کوتاهی که دارد، می‌تواند زمانی که برمی‌گردد، اطلاعاتی را درباره‌ی اشیای کوچک آشکار کند. تجهیزات الکترونیکی روی عینک بازتاب‌های برگشتی را می‌گیرد و آن‌ها را تبدیل به صداهایی می‌کند که برای انسان‌ها قابل شنیدن است. آهنگی که در گوش‌تان می‌شنوید، نشان‌دهنده‌ی میزان فاصله تا شیء است: صدای زیر به معنای دور بودن شیء و صدای بم به معنای نزدیک بودن

آن است. بلندی سیگنال نشان‌دهنده‌ی اندازه‌ی شیء است: صدای بلند یعنی شیء بزرگ است و صدای آهسته یعنی شیء کوچک است. وضوح سیگنال برای نشان دادن بافت شیء استفاده می‌شود: برای یک شیء صاف از یک آهنگ خالص استفاده می‌شود؛ برای بافت ناهموار از آهنگی استفاده می‌شود که با نویز خراب شده است. افراد با استفاده از این دستگاه به خوبی یاد می‌گرفتند که از موانع اجتناب کنند؛ با این حال، به خاطر تفکیک‌پذیری پایین، کی و همکارانش به این نتیجه رسیدند که این اختراع بیشتر می‌تواند به‌عنوان مکملی برای سگ راهنما یا عصا باشد، تا اینکه جایگزین آن‌ها شود.

گرچه برای بزرگسالان فقط تا حدودی سودمند بود، ولی همیشه این سؤال باقی بود که مغز یک بچه، با توجه به شکل‌پذیری بالاتری که دارد، تا چه حد می‌تواند یاد بگیرد که این سیگنال‌ها را تفسیر کند. در سال ۱۹۷۴، تی.جی. آر. بوور که یک روان‌شناس بود، در کالیفرنیا با استفاده از نمونه‌ی تغییر یافته‌ای از عینک‌های کی اقدام به آزمایش این ایده کرد. سوژه‌ی او شیرخواری شانزده هفته بود که از بدو تولد نابینا بود.^[۳۰] روز اول، بوور شیئی را در دست گرفت و آن را در جلوی بینی کودک، آهسته جلو و عقب برد. او گزارش می‌کند که بار چهارم که آن شیء را حرکت داد، چشم‌های کودک به هم نزدیک شد (هر دو چشم به طرف بینی کج شد)، که این حالتی است که وقتی چیزی به‌صورت نزدیک می‌شود، اتفاق می‌افتد. وقتی که بوور شیء را دور کرد، چشم‌ها از هم دور شد. پس از چند دور انجام این کار، بچه وقتی شیء به او نزدیک می‌شد، دستش را به طرف آن دراز می‌کرد. بوور می‌نویسد که وقتی چیزی در جلوی بچه به چپ و راست حرکت داده می‌شد، بچه با سرش حرکت آن را دنبال می‌کرد و سعی می‌کرد به آن دست بزند. بوور در گزارش خود از این نتایج، چندین رفتار دیگر را نیز شرح داده است:

کودک در حالی که دستگاه به او وصل شده بود، رو به مادرش بود که صحبت می‌کرد. کودک به آهستگی سرش را چرخاند تا او را از میدان صدا خارج کند، بعد دوباره به آهستگی رویش را برگرداند تا او را وارد کند. این رفتار چندین بار تکرار شد و با لبخندهای بزرگ بچه همراه بود. هر سه ناظر احساس کردند که او دارد با مادرش نوعی دالی موشه بازی می‌کند، و خیلی هم از آن لذت می‌برد.

او در ادامه نتایج قابل توجهی را طی چند ماه بعد گزارش کرده است:

رشد کودک به دنبال این ماجراجویی‌های اولیه کمابیش هم‌سطح با یک کودک بینا بود. با استفاده از راهنمای صوتی، ظاهراً بچه می‌توانست اسباب‌بازی محبوبش را بدون دست زدن به آن شناسایی کند. در حوالی سن شش‌ماهگی، هر دو دستش را به طرف اشیا دراز می‌کرد. در هشت‌ماهگی، به دنبال چیزی که پشت چیز دیگری پنهان شده بود، می‌گشت... هیچ‌کدام از این الگوهای رفتاری به‌طور طبیعی در بچه‌های نابینای مادرزادی مشاهده نمی‌شود.

شاید این پرسش برایتان مطرح شود که چرا قبل از این درباره‌ی استفاده از این دستگاه‌ها چیزی نشنیده‌اید. همان‌گونه که قبلاً دیدیم، این فناوری حجیم و سنگین بود — چیزی نبود که واقعاً برای یک بچه مناسب باشد — و تفکیک‌پذیری آن‌ها نیز نسبتاً پایین بود. به‌علاوه، نتایج استفاده از عینک فراصوتی در بزرگسالان عموماً با موفقیت کمتری نسبت به کودکان همراه بود^(۳۱) — مسئله‌ای که در فصل ۹ دوباره درباره‌ی آن بحث خواهیم کرد. بنابراین، گرچه مفهوم جایگزینی حسی ریشه گرفت، ولی برای رشد بیشتر آن لازم بود که ترکیبی از عوامل به وجود آید.



در اوایل دهه‌ی ۱۹۸۰، پزشکی هلندی به نام پیتر مایر سر رشته‌ی کار را جهت استفاده از گوش برای انتقال اطلاعات بصری به دست گرفت. او به جای اینکه از جهت‌یابی پژواکی استفاده کند، به این فکر افتاد که جریان داده‌های ویدئویی را تبدیل به صدا کند.

او کارهای باکی‌ریتا را برای تبدیل داده‌های ویدئویی به لمس دیده بود، ولی حدس می‌زد که گوش‌ها ممکن است ظرفیت بیشتری برای دریافت اطلاعات داشته باشد. ایراد استفاده از گوش این بود که تبدیل ویدئو به صدا احتمالاً کمتر ماهیت شهودی خواهد داشت. در صندلی دندان‌پزشکی باکی‌ریتا، شکل دایره، صورت، یا آدم را می‌شد مستقیماً روی پوست با فشار ایجاد کرد. ولی چگونه می‌توان صداها پیکسل ویدئو را به صدا تبدیل کرد؟

در سال ۱۹۹۱، مایر نمونه‌ای از این سیستم را با یک کامپیوتر رومیزی

ساخت، و تا سال ۱۹۹۹، موفق شد نوع قابل حمل آن را بسازد که به صورت عینک دوربین‌داری به چشم زده می‌شد و کامپیوتر آن هم روی کمر بند قرار می‌گرفت. او نام این سیستم را VOICE گذاشت (که در انگلیسی به صورت حروف جدا تلفظ می‌شود).^[۳۲] الگوریتم این دستگاه، صدا را در سه بُعد تنظیم می‌کند: بلندی یک شیء با بسامد صدا نمایش داده می‌شود، موقعیت افقی آن به صورت تغییرات زمانی ورودی استریو مشخص می‌شود (مثلاً مانند زمانی که صحنه‌ای را با چشمان خود نگاه می‌کنید، و صدا از گوش چپ به طرف گوش راست می‌رود)، و روشنی شیء با بلندی صدا مشخص می‌شود. اطلاعات صوتی را می‌توان برای یک تصویر مقیاس خاکستری با ابعاد حدود شصت در شصت پیکسل دریافت کرد.^[۳۳]

سعی کنید تجربه‌ی استفاده از این عینک را در ذهن‌تان مجسم کنید. ابتدا همه چیز مانند صداهایی ناهنجار حس می‌شود. وقتی در محیط به اطراف حرکت می‌کنید، صداهای زیر و بم به صورت غیرمعمول و بی‌فایده شنیده می‌شود. پس از مدتی، آدم متوجه می‌شود که چگونه از صداها برای پیدا کردن مسیر خود استفاده کند. در این مرحله، این کار یک تجربه‌ی شناختی است: آدم به زحمت تلاش می‌کند صداها را ترجمه کند تا بتواند از آنها استفاده کند. مرحله‌ی مهم‌تر مدتی بعد اتفاق می‌افتد. پس از چند هفته تا چند ماه، افراد نابینا به تدریج عملکرد بهتری پیدا می‌کنند.^[۳۴] ولی نه صرفاً بخاطر اینکه ترجمه را حفظ کرده‌اند. بلکه به یک معنا، می‌توانند ببینند. آنها به نحوی عجیب و با تفکیک‌پذیری پایین، بینایی را تجربه می‌کنند.^[۳۵] یکی از کاربران VOICE، که پس از بیست سال بینایی، نابینا شده است، درباره‌ی تجربه‌اش از استفاده‌ی این دستگاه می‌گوید:

ظرف دو تا سه هفته، نوعی حس منظره‌ی صوتی ایجاد می‌شود. پس از حدود سه ماه، به تدریج خواهید توانست تصویرهایی از محیط را ببینید، به طوری که می‌توانید با نگاه کردن به اشیاء، آنها را تشخیص دهید... واقعاً بینایی است. من می‌دانم بینایی چطوری است. آن را به یاد دارم.^[۳۶]

کلید موفقیت، آموزش زیاد است. در اینجا نیز مانند کاشت حلزون، ممکن است چندین ماه طول بکشد تا مغز بتواند از سیگنال‌ها سر در بیاورد. در آن زمان، تغییرات را می‌توان در تصویربرداری‌های مغزی مشاهده کرد. ناحیه‌ی خاصی از

مغز (به نام قشر پس سری جانبی) به طور معمول به اطلاعات مربوط به شکل پاسخ می‌دهد، صرف نظر از اینکه شکل از طریق بینایی تعیین شده باشد یا از طریق لمس. پس از آنکه افراد به مدت چندین روز از عینک استفاده کردند، این ناحیه‌ی مغز به وسیله‌ی منظره‌ی صوتی فعال می‌شود.^[۳۷] بهبود عملکرد فرد متناسب با میزان بازآرایی مغزی است.^[۳۸]

به عبارت دیگر، مغز متوجه می‌شود که چگونه اطلاعات شکل را از سیگنال‌های ورودی استخراج کند، صرف نظر از اینکه سیگنال‌ها از چه مسیری به خلوتگاه درونی مجسمه می‌رسند — چه از طریق بینایی، چه لمس، و چه صدا. جزئیات آشکارساز اهمیتی ندارد. تنها چیزی که مهم است، اطلاعاتی است که انتقال می‌دهد.

در سال‌های آغازین قرن بیست و یکم، چندین آزمایشگاه شروع به بهره‌گیری از تلفن‌های همراه کردند و اپلیکیشن‌هایی برای تبدیل ورودی دوربین به خروجی صوتی ایجاد کردند. افراد نابینا در حالی که از منظره‌ی پیش روی خود با دوربین تلفن همراه فیلم می‌گیرند، صدا را با استفاده از توگوشی بی‌سیم می‌شنوند. مثلاً اپلیکیشن voice را نیز اکنون می‌توان در سراسر جهان به صورت رایگان روی تلفن هوشمند دانلود کرد.

البته voice تنها رویکرد موجود برای جایگزینی بینایی با شنوایی نیست؛ در سال‌های اخیر، شاهد گسترش این گونه فناوری‌ها بوده‌ایم. به عنوان مثال، اپلیکیشن EyeMusic از نواهای موسیقی برای نشان دادن موقعیت بالا یا پایین پیکسل‌ها استفاده می‌کند: هرچه یک پیکسل بالاتر باشد، نت مربوط به آن نازک‌تر است. برای نشان دادن جایگاه قرار گرفتن پیکسل در چپ یا راست از زمان استفاده می‌شود: نت‌هایی که زودتر شنیده می‌شوند، مربوط به چیزی هستند که در طرف چپ قرار دارد؛ نت‌های دیرتر نشان‌دهنده‌ی چیزهای طرف راست هستند. رنگ با ابزارهای مختلف موسیقی نشان داده می‌شود: سفید (آواز)، آبی (ترومپت)، قرمز (آرگ)، سبز (نی)، زرد (ویولن).^[۳۹] گروه‌های دیگری نیز مشغول آزمایش با نمونه‌های دیگری هستند: مثلاً استفاده از بزرگ‌نمایی در مرکز صحنه، درست مانند چشم انسان، یا استفاده از شبیه‌سازی جهت‌یابی پژواکی یا مدولاسیون بلندی صدا براساس فاصله، و بسیاری ایده‌های دیگر.^[۴۰]

دسترسی گسترده به تلفن‌های هوشمند سبب شده است که مردم در تمام دنیا به جای کامپیوترهای حجیم از گوشی‌های موبایل که قدرت رایانشی عظیمی دارند و به راحتی در جیب جا می‌شوند، استفاده کنند. این نه تنها موجب افزایش سرعت و کارایی می‌شود، بلکه فرصت آن را پدید می‌آورد که دستگاه‌های جایگزینی حسی پوششی جهانی پیدا کنند، به‌خصوص که ۸۷ درصد افراد دچار نقص بینایی در کشورهای در حال توسعه زندگی می‌کنند. ^[۴۱] اپلیکیشن‌های ارزان‌قیمت جایگزینی حسی می‌توانند گسترشی جهانی داشته باشند، چرا که هیچ نیازی به هزینه‌های مداوم تولید، توزیع فیزیکی، یا انبارداری ندارند، و منجر به عوارض نامطلوب طبی نیز نمی‌شوند. به این طریق، رویکردی عصبی می‌تواند با هزینه‌ی پایین و به سرعت مورد استفاده قرار گیرد و برخی چالش‌های بهداشتی را در سطح جهانی حل کند.



اگر تعجب می‌کنید که یک فرد نابینا بتواند با استفاده از زبان یا به کمک توگوشی‌های تلفن همراه «ببیند»، کافی است خواندن خط بریل را در افراد نابینا در نظر بگیرید. در ابتدا، این تجربه به‌صورت برآمدگی‌های اسرارآمیز زیر نوک انگشتان است. ولی خیلی زود تبدیل به چیزی بیش از آن می‌شود: مغز از مرحله‌ی جزئیات رسانه (برآمدگی‌ها) عبور می‌کند و به‌طور مستقیم معنا را تجربه می‌کند. تجربه‌ی خواندن خط بریل در نابینایان مثل خود شما است که چشمان‌تان روی این متن حرکت می‌کند: با آنکه این حروف هر کدام شکل خاصی دارند، ولی شما از جزئیات رسانه (حروف) فراتر می‌روید و به تجربه‌ی مستقیم معنا می‌رسید. برای کسی که برای نخستین‌بار از شبکه‌ی زبانی یا هدفون صوتی استفاده می‌کند، داده‌هایی که وارد مغز می‌شوند، نیاز به ترجمه دارند: سیگنال‌های حاصل از یک صحنه‌ی بصری (مثلاً سگی که با استخوانی در دهان وارد اتاق نشیمن می‌شود) چندان مشخص نمی‌کند که چه چیزی در آنجا است. مثل آن است که عصب‌ها به زبان خارجی پیام می‌فرستند. ولی با تمرین کافی، مغز می‌تواند یاد بگیرد که آن را ترجمه کند. و وقتی که یاد گرفت، فهمیدن دنیای بصری به‌طور مستقیم امکان‌پذیر می‌شود.

ارتعاشات خوب

با توجه به اینکه ۵ درصد مردم دنیا دچار معلولیت کم‌شنوایی هستند، پژوهشگران چند سال قبل به فکر فهمیدن ریشه‌ی ژنتیکی آن افتادند.^[۴۲] متأسفانه، تاکنون بیش از ۲۲۰ ژن شناسایی شده‌اند که در ارتباط با ناشنوایی هستند. برای کسانی که امید یافتن راه‌حل ساده‌ای داشتند، این مأیوس‌کننده است، ولی تعجب‌آور نیست. به هر حال، دستگاه شنوایی حاصل هماوایی چندین قطعه‌ی ظریف در هماهنگی با یکدیگر است. مانند هر سیستم پیچیده‌ی دیگری، دستگاه شنوایی نیز به صدها طریق ممکن است دچار اختلال شود. به محض اینکه هر بخشی از سیستم دچار مشکل شود، تمام سیستم مختل می‌شود، و نتیجه‌ی آن تحت عنوان «کم‌شنوایی» و «ناشنوایی» واقع می‌شود.

پژوهشگران بسیاری در پی یافتن راهی برای اصلاح این قطعات و بخش‌های مختلف هستند. ولی اجازه بدهید که این پرسش را از دیدگاه مدارسازی پویا مطرح کنیم: اصول جایگزینی حسی چگونه می‌تواند در حل این مسئله به ما کمک کند؟

با در نظر گرفتن این سؤال، من و دانشجوی دکترای سابقم، اسکات نوویچ، شروع به ساخت جایگزین حسی برای افراد ناشنوا کردیم. می‌خواستیم چیزی بسازیم که به‌هیچ‌وجه برای فرد مزاحمت ایجاد نکند — تا حدی که آدم حتی متوجه کار آن نشود. برای این منظور، از پیشرفت‌های مختلف صورت گرفته در زمینه‌ی رایانش با عملکرد بالا برای ساخت یک دستگاه جایگزینی حسی صدا به لمس استفاده کردیم که زیر پیراهن پوشیده می‌شود. این دستگاه جلیقه‌ی نئوسنسوری، صداهای اطراف شما را می‌گیرد و آن را به حرکات ارتعاشی روی پوست تبدیل می‌کند. به این ترتیب، افراد می‌توانند دنیای صوتی اطراف خود را لمس کنند.

اگر برایتان تعجب‌آور است که این روش مؤثر باشد، کافی است توجه کنید که گوش درونی دقیقاً به همین صورت عمل می‌کند: صدا را به بسامدهای مختلف (از پایین به بالا) تجزیه می‌کند، و سپس آن داده‌ها برای تفسیر به مغز فرستاده می‌شود. در واقع، ما فقط گوش درونی را به پوست منتقل کرده‌ایم.



جلیقه‌ی نئوسنسوری. صدا به الگوهای ارتعاش روی پوست ترجمه می‌شود.

پوست یک ماده‌ی محاسباتی پیشرفته و محیرالعقول است، ولی ما در زندگی مدرن خود زیاد از آن استفاده نمی‌کنیم. در واقع، اگر چنین ماده‌ای در سیلیکون ولی ساخته می‌شد، حاضر بودیم پول زیادی برای آن بپردازیم، ولی در حال حاضر این ماده، تقریباً بلااستفاده زیر لباس شما پنهان شده است. با این حال، شاید این پرسش برایتان مطرح شود که آیا پوست، پهنای باند کافی برای انتقال تمام اطلاعات صدا را دارد؟ هرچه باشد، حلزون شنوایی سازه‌ی تخصصی بسیار پیشرفته‌ای است، شاهکاری برای گرفتن و کدگذاری کردن صدا. برعکس، پوست متمرکز بر معیارهای دیگری است، و تفکیک‌پذیری فضایی ضعیفی دارد. انتقال دادن حجمی از اطلاعات در حد گوش درونی به پوست مستلزم استفاده از صداها موتور ارتعاشی — لمسی است — که زیادتر از آن است که روی پوست یک نفر جا شود. ولی با فشرده کردن اطلاعات گفتار، می‌توانیم از کمتر از سی موتور استفاده کنیم. چگونه؟ هدف اصلی فشرده‌سازی این است که مهم‌ترین بخش‌های اطلاعات را با کوچک‌ترین شکل ممکن استخراج کنیم. مثلاً صحبت کردن با تلفن همراه را در نظر بگیرید: شما صحبت می‌کنید و مخاطب صدای شما را می‌شنود. ولی سیگنالی که نشان‌دهنده‌ی صدای شما است، مستقیماً انتقال داده نمی‌شود. بلکه تلفن به‌صورت دیجیتال از گفتار شما با سرعت هشت هزار بار در ثانیه نمونه‌گیری می‌کند (تصویری لحظه‌ای از آن می‌گیرد). سپس با

استفاده از الگوریتم‌هایی عناصر مهم آن هزاران اندازه‌گیری را خلاصه می‌کند و سیگنال فشرده شده را از طریق دکل تلفن همراه ارسال می‌کند. جلیقه‌ی ما با استفاده از این نوع تکنیک‌های فشرده‌سازی، صداها را می‌گیرد و نمایش فشرده‌ای از آن را با استفاده از چند موتور روی پوست «پخش» می‌کند.^[۴۳]

نخستین شرکت‌کننده‌ی ما فرد سی و هفت ساله‌ای به نام جاناتان بود که از بدو تولد شدیداً کم‌شنوا بود. او به مدت چهار روز، روزی دو ساعت، با جلیقه تمرین کرد و مجموعه‌ای متشکل از سی کلمه را یاد گرفت. روز پنجم، اسکات جلوی دهانش را گرفت (تا جاناتان نتواند لب‌خوانی کند) و کلمه‌ی «لمس» را گفت. جاناتان الگوی پیچیده‌ی ارتعاشات را روی سینه‌اش احساس کرد. بعد کلمه‌ی «لمس» را روی تخته سفید نوشت. بعد اسکات کلمه‌ی دیگری را گفت («کجا»)، و جاناتان آن را روی تخته نوشت. جاناتان توانست الگوی پیچیده‌ی ارتعاشات را ترجمه کند و کلمه‌ای را که ادا شده بود، بفهمد. او کار کدگشایی را به صورت خودآگاه انجام نمی‌دهد، زیرا این الگوها بیش از حد پیچیده‌اند؛ بلکه مغزش الگوها را باز می‌کند. وقتی که سراغ مجموعه‌ی جدیدی از کلمات رفتیم، عملکردش همچنان بالا بود، که نشان می‌داد که او صرفاً حفظ نکرده، بلکه یاد گرفته بشنود. به عبارت دیگر، شما اگر شنوایی طبیعی داشته باشید، من می‌توانم کلمه‌ی جدیدی به شما بگویم (مثلاً «اشمگگ») و شما آن را به خوبی می‌شنوید — نه به خاطر اینکه آن را حفظ کرده‌اید، بلکه از آن رو که بلدید بشنوید.

ما این فناوری را به اشکال مختلف توسعه داده‌ایم، مثلاً به صورت یک بند سینه‌ای برای کودکان. آن را بر روی گروهی از کودکان ناشنوا با سنین دو تا هشت سال آزمایش کرده‌ایم. اولیای آن‌ها مرتب وضعیت‌شان را به صورت ویدئویی برای من می‌فرستند. در ابتدا به نظر نمی‌رسید هیچ چیزی تغییر کرده باشد. ولی بعد متوجه شدیم که وقتی کسی تُتی را روی پیانو می‌زند، بچه‌ها می‌ایستند و توجه می‌کنند.

در ضمن، بچه‌ها به تدریج بیشتر صدا درمی‌آوردند، چون برای اولین بار حلقه تکمیل شده بود: وقتی که صدایی ایجاد می‌کردند، بلافاصله آن را به صورت ورودی حسی دریافت می‌کردند. شما هم با آنکه یادتان نمی‌آید، ولی وقتی بچه بودید، به همین صورت گوش‌هایتان را آموزش داده‌اید. شما

«بَب» و «دَد» می‌کردید، کف می‌زدید، دست‌هایتان را به میله‌های گهواره می‌زدید... و با حسگرهای عجیبی که در دو طرف سرتان هست، بازخورد دریافت می‌کردید. به این روش — با برقرار کردن ارتباط بین اعمال خودتان و پیامدهای آن — سیگنال‌های دریافتی را کشف رمز می‌کردید. پس تصور کنید که خودتان بند سینه‌ای را بسته‌اید. با صدای بلند بگویید: «روباه قهوه‌ای تیزپا»، و خواهید دید که هم‌زمان آن را لمس می‌کنید. مغز شما یاد می‌گیرد که این دو را در کنار هم قرار دهد، و زبان ارتعاشی عجیب آن را بفهمد.^[۴۴] به‌طوری که به زودی خواهیم دید، بهترین راه برای پیش‌بینی آینده، ایجاد کردن آن است.

ما یک مچ‌بند (به نام «باز») هم ساخته‌ایم که فقط چهار موتور دارد. تفکیک‌پذیری آن پایین‌تر است، ولی استفاده‌ی آن برای بسیاری از افراد عملی‌تر است. یکی از کاربران ما، به نام فیلیپ، برای ما تجربه‌اش از پوشیدن «باز» در سر کار را تعریف کرد که در آن اتفاقاً یادش رفته بود کمپرسور را خاموش کند:

من بعضی وقت‌ها فراموش می‌کنم آن را خاموش کنم و سراغ کار دیگری می‌روم، و بعد همکارانم می‌گویند: «هی، دوباره یادت رفت: کمپرسور را روشن گذاشته‌ای.» ولی حالا... با استفاده از «باز»، حس می‌کنم که چیزی روشن است و می‌بینم که کمپرسور هوا است. حالا من می‌توانم به آن‌ها تذکر بدهم که آن را روشن گذاشته‌اند. هر بار هم همکارم می‌گوید: «صبر کن ببینم، از کجا فهمیدی؟»

فیلیپ می‌گوید که وقتی سگش پارس می‌کند، یا شیر آب باز است، یا زنگ در به صدا درمی‌آید، و یا همسرش نام او را صدا می‌زند، او متوجه می‌شود (همسرش قبلاً هیچ وقت نام او را صدا نمی‌زد، ولی حالا مرتب این کار را می‌کند). وقتی که فیلیپ به مدت شش ماه از مچ‌بند استفاده کرده بود، با او مصاحبه کردم و با دقت درباره‌ی تجربه‌ی درونی‌اش از او پرسیدم: آیا آن را مانند ارتعاشی روی مچ دستش تجربه می‌کند که باید آن را ترجمه کند، یا اینکه نوعی ادراک مستقیم است؟ به عبارت دیگر، وقتی آژیری از خیابان به گوش می‌رسد، آیا مانند ارتعاشی روی پوستش حس می‌شود که به معنای آژیر است... یا اینکه احساس می‌کند که آمبولانسی در آن بیرون است؟ او به وضوح گفت که حالت دوم است: «صدا را توی سرم حس می‌کنم.» به همان صورتی که

وقتی یک بندباز را می‌بینید، بلافاصله آن تجربه را درک می‌کنید (به جای اینکه بخواهید فوتون‌هایی را که به چشمان‌تان می‌رسند، شمارش کنید)، یا وقتی بوی دارچین به مشام‌تان می‌رسد، آن را حس می‌کنید (به جای اینکه بخواهید آگاهانه ترکیبات مولکولی روی غشاهای مخاطی خود را ترجمه کنید)، فیلپ هم دنیا را می‌شنود.



دو کودک در حال استفاده از بند ارتعاشی سینه‌ای.



ایده‌ی تبدیل کردن لمس به صدا، فکر جدیدی نیست. در سال ۱۹۲۳، رابرت گالت، روان‌شناسی در دانشگاه نورث‌وسترن، شنید که دختر ده‌ساله‌ی نابینا و ناشنوایی ادعا می‌کند که می‌تواند صدا را، مثل هلن کلر، در نوک انگشتانش حس کند. گالت که به این ادعا بدگمان بود، آزمایش‌هایی انجام داد. او گوش‌های دختر را بست و یک پتوی پشمی را دور سرش پیچید (اول روی دانشجوی دکترایش امتحان کرد و مطمئن شد که این کار مانع از توانایی شنیدن می‌شود). دختر انگشت‌اش را روی دیافراگم یک «پورتوفون» (دستگاهی برای انتقال صدا) گذاشت، و گالت توی اتاقکی نشست و توی دستگاه شروع به حرف

زدن کرد. تنها توانایی دختر برای فهمیدن حرف‌های گالت از طریق ارتعاشات روی نوک انگشتانش بود. گالت می‌نویسد:

بعد از تکمیل هر جمله یا پرسش، پتو برداشته می‌شد و او جمله‌ای را که گفته شده بود، تنها با تغییراتی بی‌اهمیت، برای دستیار تکرار می‌کرد.... به نظر من، این به خوبی نشان می‌دهد که او صدای آدم را از طریق ارتعاشات روی انگشتانش تفسیر می‌کند.

گالت ذکر می‌کند که همکاری‌اش توانسته است کلمات را از طریق یک لوله‌ی شیشه‌ای به طول ۴ متر (۱۳ فوت) انتقال دهد. فرد شرکت‌کننده‌ی آموزش دیده که گوش‌هایش پوشانده شده است، کف دستش را روی انتهای لوله می‌گذارد و کلماتی را که در سر دیگر لوله گفته می‌شود، تشخیص می‌دهد. با این نوع مشاهدات، پژوهشگران تلاش کرده‌اند دستگاه‌های تبدیل صدا به لمس بسازند، ولی در دهه‌های گذشته، این دستگاه‌ها بیش از حد بزرگ بودند و قدرت محاسباتی آن‌ها ضعیف‌تر از آن بود که به صورت عملی قابل استفاده باشند.

در اوایل دهه‌ی ۱۹۳۰، مدرسی در یکی از آموزشگاه‌های ماساچوست تکنیکی را برای دو محصل ناشنوا و نابینا ایجاد کرد. آن‌ها از آنجا که ناشنوا بودند، نیاز داشتند لبخوانی کنند، ولی چون هر دو نابینا نیز بودند، امکان این کار نبود. از این رو، تکنیک آن‌ها به این صورت بود که دست خود را روی صورت و گردن فرد گوینده می‌گذاشتند. انگشت شست را به ملایمت روی لب‌ها قرار می‌دادند و بقیه‌ی انگشتان را به صورت بادبزی روی گردن و گونه پخش می‌کردند، تا بتوانند حرکت لب‌ها و ارتعاش تارهای صوتی، و حتی بیرون آمدن هوا از سوراخ‌های بینی را حس کنند. از آنجا که نام این دو شاگرد، تاد و اوما بود، این تکنیک به نام تادوما مشهور شد. هزاران کودک ناشنوا و نابینا با این روش آموزش دیده‌اند و در درک زبان، تقریباً تا حد افراد ناشنوا، مهارت پیدا کرده‌اند.^[۴۵] نکته‌ی کلیدی که در رابطه با موضوع مورد نظر ما باید در نظر داشت، این است که تمام اطلاعات از طریق لمس کسب می‌شود.

در دهه‌ی ۱۹۷۰، مخترع ناشنوا دمیتری کانفسکی یک دستگاه ارتعاشی — لمسی دوکاناله ساخت که یکی از کانال‌های آن بسامدهای پایین را دریافت می‌کرد و کانال دیگر بسامدهای بالا را. دو موتور ارتعاشی این دستگاه روی میچ

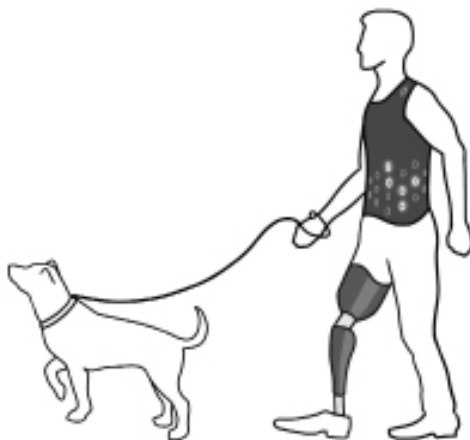
دست‌ها قرار می‌گیرد. تا دهه‌ی ۱۹۸۰، اختراعات زیادی در سوئد و ایالات متحده انجام شده بود که قدرت دیدگاه مدارسازی پویا را به خوبی نشان می‌داد. مشکل این بود که تمام این دستگاه‌ها خیلی بزرگ بودند و تعداد موتورهای آن‌ها خیلی کم بود (معمولاً فقط یک موتور داشتند)، و لذا تأثیر چندانی نداشتند.^[۴۶] تازه حالا به جایی رسیده‌ایم که می‌توانیم از پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه‌ی قدرت رایانشی و کاهش قیمت دستگاه‌های کوچک، پردازش سیگنال، ذخیره‌سازی انرژی، و ظهور کامپیوترهای پوشیدنی ارزان‌قیمت که توانایی اجرای پردازش سیگنال پیشرفته را به صورت زنده دارند، بهره‌گیری کنیم.

علاوه بر این، این رویکرد مزیت‌هایی نیز دارد. مثلاً آن را با کاشت حلزون مقایسه کنید (مانند مایکل کوروست که در ابتدای فصل به او اشاره کردیم)، که هزینه‌ی آن حدود ۱۰۰,۰۰۰ دلار است.^[۴۷] برعکس، فناوری‌های مدرن امکان حل مشکل ناشنوایی را با هزینه‌ای در حد چند صد دلار فراهم می‌کند، که سبب می‌شود این راه‌حل‌ها در سطح جهانی قابل استفاده باشد. به علاوه، درمان‌های کاشتنی نیازمند جراحی تهاجمی است، در حالی که مچ‌بند ارتعاشی به سادگی هر روز صبح مانند ساعت به دست بسته می‌شود.^[۴۸]



دلایل زیادی برای استفاده از دستگاه‌های لمسی وجود دارد. مثلاً یک واقعیت که خیلی‌ها از آن آگاه نیستند، این است که افرادی که پای مصنوعی دارند، باید زحمت زیادی بکشند تا راه رفتن با آن را یاد بگیرند. ولی با توجه به کیفیت بالایی که این پروتزها دارد، چرا راه رفتن با آن‌ها این قدر مشکل است؟ پاسخ ساده‌ی آن این است که آدم نمی‌داند که این پای مصنوعی کجا است. پای سالم جریان عظیمی از داده‌ها را برای مغز می‌فرستد، و به مغز اطلاع می‌دهد که پا در چه موقعیتی قرار دارد، زانو چقدر خم شده است، فشار در قوزک پا چقدر است، زاویه و چرخش پا چقدر است، و الی آخر. ولی از پای مصنوعی، هیچ خبری نمی‌رسد: مغز هیچ اطلاعی از موقعیت این اندام حرکتی ندارد. از این رو، ما حسگرهای فشار و زاویه را به پای مصنوعی متصل کردیم و این داده‌ها را به جلیقه‌ی نئوسنسوری فرستادیم. در نتیجه، شخص می‌تواند موقعیت پا را

درست مثل یک پای طبیعی احساس کند، و می تواند به سرعت راه رفتن را از نو یاد بگیرد.



ارسال داده ها از پای مصنوعی به پوست در ناحیه ی تنه.

همین تکنیک را می توان در کسانی که پای واقعی دارند، ولی حس لمس آن را از دست داده اند — مثلاً در بیماری پارکینسون و برخی وضعیت های دیگر — استفاده کرد. ما حسگرهایی را برای اندازه گیری حرکت و فشار داخل جوراب قرار می دهیم، و داده های حاصل از آن را به مچ بند «باز» می فرستیم. با این تکنیک، شخص می فهمد که پایش کجا است، وزنی که روی آن افتاده چقدر است، و اینکه سطحی که روی آن ایستاده، صاف است یا نه. از لمس برای حل مشکلات مربوط به تعادل نیز می توان استفاده کرد. واحد نمایش زبانی پل باکی ریتا را یادتان هست؟ از این دستگاه غیر از بینایی برای کارهای دیگری نیز می توان استفاده کرد. مثلاً یک نمونه ی آن، شریل شیلتز است، یک مشاور توان بخشی که به علت اثر سمی درمان آنتی بیوتیکی بر روی سیستم دهلیزی گوش درونی اش دچار از دست رفتن حس تعادل شد. زندگی او مختل شد و مرتب تعادلش را از دست می داد و می افتاد. بعد خبر یک پیشرفت جدید به گوشش رسید که در آن شخص کلاه خودی را به سر می کند مجهز به حسگرهایی که زاویه ی سر را نشان می دهند.^[۲۹] داده های مربوط به جهت

قرارگیری سر به شبکه‌ی زبانی ارسال می‌شود: وقتی که سر مستقیم قرار گرفته است، تحریک الکتریکی در میانه‌ی شبکه‌ی روی زبان حس می‌شود؛ وقتی به جلو خم شده است، سیگنال الکتریکی به طرف نوک زبان برده می‌شود؛ وقتی که سر به عقب خم شده است، تحریک به عقب برده می‌شود. انحراف سر به دو طرف به صورت جابه‌جایی سیگنال الکتریکی به طرف چپ و راست کدگذاری می‌شود. به این طریق، شخصی که هرگونه حس مربوط به جهت قرارگیری سر را از دست داده است، می‌تواند جواب آن را روی زبانش حس کند.

شریل با وجود بدگمانی شدیدی که داشت، تصمیم گرفت این دستگاه را امتحان کند. و بلافاصله هم تأثیر آن را مشاهده کرد: وقتی که کلاه را به سر گذاشت، مغزش می‌توانست این اطلاعات را که از مسیر عجیبی به آن می‌رسید، بفهمد، و او قادر بود سر و بدنش را در حالت تعادل نگه دارد. پس از چند جلسه، او و تیم پژوهشی متوجه شدند که این دستگاه تأثیر باقی‌مانده دارد: اگر او دستگاه را به مدت ده دقیقه به سر می‌کرد، بعد از برداشتن کلاه‌خود نیز به مدت ده دقیقه تعادل طبیعی داشت. شریل به قدری هیجان‌زده شد که بعد از این آزمایش‌های اولیه، محققان تیم را در آغوش گرفت.

ولی باز هم خبرهای بهتری رسید. از آنجا که مغز او براساس تمرین با شبکه‌ی زبانی، خود را مدارسازی می‌کرد، اثر باقی‌مانده پس از برداشتن کلاه‌خود مدت بیشتر و بیشتری دوام می‌آورد. مغز او فهمیده بود که چگونه نجوای سیگنال‌ها را بشنود — آن مواردی که آسیب ندیده بود — و آن‌ها را با هدایت کلاه‌خود تقویت کند. پس از چندین ماه استفاده از کلاه‌خود، شریل توانست استفاده‌اش را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. شبکه‌ی زبانی مانند چرخ کمکی عمل کرده بود، و به او کمک کرده بود که سیگنال‌های باقی‌مانده را بهتر تفسیر کند، و به این طریق، مهارت‌های لازم را برای حفظ تعادل بدون نیاز به دستگاه به دست آورد.



جایگزینی حسی فرصت‌های جدیدی را برای جبران فقدان حسی پدید می‌آورد. ^(۵۰) ولی این تنها مرحله‌ی اول کاری است که می‌توان انجام داد، و ما را به جهان

فراسوی جایگزینی حسی رهنمون می‌شود: تقویت حسی. فکرش را بکنید که می‌توانستید حس‌های موجود را بگیرید و آن‌ها را بهتر، گسترده‌تر، و سریع‌تر کنید! می‌توانستید نه تنها حواس آسیب‌دیده را ترمیم کنید، بلکه حواس موجود را نیز تقویت نمایید!

تقویت دستگاه‌های محیطی

هدف یک دستگاه طبی، بازگرداندن یک نقص به حالت طبیعی است. ولی چرا در اینجا توقف کنیم؟ وقتی که جراحی انجام شد، یا دستگاه به بدن بسته شد، چرا قدرت آن را زیاد نکنیم تا فرد قدرتی فراتر از گونه‌ی خود داشته باشد؟ این یک بحث نظری نیست: نمونه‌های زیادی از مغزهای ابرقدرت حسی در دور و بر ما هستند.



در سال ۲۰۰۴، یک هنرمند دچار کوررنگی به نام نیل هاربیسون، با الهام از قابلیت ترجمه‌ی بینایی به شنوایی، یک «آی‌بورگ» (چشم سایبورگی) را به سرش وصل کرد. آی‌بورگ دستگاه ساده‌ای است که یک جریان ویدئویی را تحلیل می‌کند و رنگ‌ها را به صدا تبدیل می‌کند. صداها از طریق هدایت استخوانی پشت گوش انتقال داده می‌شود.

به این ترتیب، نیل رنگ‌ها را می‌شنود. می‌تواند صورتش را جلوی هر قطعه‌ی رنگی قرار دهد و آن را تشخیص دهد.^[۵۱] مثلاً می‌گوید: «سبز است»، یا «ارغوانی است».

نکته‌ی جالب‌تر اینکه دوربین آی‌بورگ طول‌موج‌های نور را که فراتر از طیف نرمال هست نیز تشخیص می‌دهد: او از طریق ترجمه‌ی رنگ به صدا، می‌تواند فروسرخ و فرابنفش را هم کدگذاری کند و آن‌ها را ادراک کند، همان کاری که مارها و زنبورها می‌کنند.

وقتی که می‌بایست عکس گذرنامه‌اش را عوض کند، نیل با اصرار گفت که حاضر نیست آی‌بورگ را دریاورد. او گفت که آی‌بورگ بخشی ضروری از بدن او است، درست مثل اعضای بدنش. اداره‌ی گذرنامه به این درخواست توجهی

نکرد: سیاست آن‌ها اجازه نمی‌داد که لوازم الکترونیکی در عکس پرسنلی وجود داشته باشد. ولی بعد، پزشک و دوستان و همکاران او نامه‌هایی برای اداره‌ی گذرنامه نوشتند. یک ماه بعد، عکس او با آی‌بورگ روی گذرنامه‌اش جای گرفت، موفقیتی که بر پایه‌ی آن، نیل ادعا می‌کند که نخستین سایبورگ رسمی جهان است.^[۵۲]

رنگ	بسامد صدا
فراتشت	۷۱۷٫۶ هرتز
زنگش	۶۰۰٫۵۱۱ هرتز
آبی	۵۷۳٫۹۱۱ هرتز
سبز آبی	۵۵۱٫۲۱۱ هرتز
سبز	۴۷۸٫۳ هرتز
زرد	۴۶۲٫۰۱۱ هرتز
نارنجی	۴۱۰٫۲۱۱ هرتز
قرمز	۳۶۳٫۸۱۱ هرتز
قرمز سرخ	۳۶۳٫۸۱۱ هرتز

سمت چپ، هنرمند کوررنگ نیل هاریسون آی‌بورگ را روی سرش نصب کرده است. سمت راست، «مقیاس صوتی-رنگی» او رنگ‌هایی را که دوربین آشکار می‌کند، به بسامدهای صوتی تبدیل می‌کند. کران‌های بالا و پایین بسامد به‌گونه‌ای است که او از محدودیت‌های طبیعی دستگاه بینایی فراتر می‌رود.

و اما در حیوانات، پژوهشگران این ایده را یک قدم هم جلوتر برده‌اند: موش‌ها ذاتاً کوررنگی دارند... مگر اینکه گیرنده‌های نوری آن‌ها را مهندسی ژنتیک کنید تا قابلیت بینایی رنگی پیدا کنند.^[۵۳] به این ترتیب، موش‌ها با یک ژن اضافه می‌توانند رنگ‌های مختلف را آشکارسازی کنند و تشخیص دهند. همین کار را در خزیمون‌ها نیز می‌توان انجام داد، که به‌طور طبیعی فقط دو نوع گیرنده‌ی رنگ دارند، و بنابراین، کوررنگ قرمز-سبز هستند. ولی اگر آن‌ها را مهندسی کنید و یک گیرنده‌ی نوری دیگر را، مثل انسان‌ها، به آن‌ها اضافه کنید، میمون‌ها از تجربه‌ی رنگ مانند انسان‌ها برخوردار خواهند شد.^[۵۴]

و یا به بیان دقیق‌تر، تجربه‌ی رنگ در سطح معمول انسانی. در واقع، کسر کوچکی از زنان نه تنها سه نوع بلکه چهار نوع گیرنده‌ی نوری رنگ دارند،

بدان معنا که مغز آن‌ها این توانایی را دارد که با استفاده از تمام اطلاعات، نوع جدیدی از تجربه‌ی حسی را ایجاد کند. آن‌ها رنگ‌های خاص و ترکیبات بیشتری از آن‌ها را تجربه می‌کنند.^[۵۵] وقتی که دستگاه‌های محیطی جدیدی جا زده شدند، اطلاعات مفید جای خود را در کارکرد مغز پیدا می‌کند.



بعضی وقت‌ها تقویت به صورت تصادفی روی می‌دهد. خیلی از افراد که جراحی آب مروارید می‌کنند، به جای قرنیه‌ی خود یک جایگزین مصنوعی قرار می‌دهند. جالب اینکه قرنیه‌ی طبیعی جلوی نور فرابنفش را می‌گیرد، ولی قرنیه‌ی مصنوعی نه. از این رو، این بیماران با دامنه‌ای از طیف الکترومغناطیسی سر و کار پیدا می‌کنند که قبلاً امکان آن برای‌شان وجود نداشت. یکی از این‌گونه بیماران، به نام آلک کومارنیتسکی، مهندسی است که به علت آب مروارید تحت عمل تعویض قرنیه قرار گرفته است. او حالا در بسیاری از چیزها نوعی درخشش آبی—ارغوانی می‌بیند که برای افراد دیگر قابل مشاهده نیست.^[۵۶] او این موضوع را روز بعد از اولین جراحی آب مرواریدش هنگام نگاه کردن به شورت ورزشی پسرش متوجه شد. دیگران همه آن را سیاه می‌دیدند، ولی او در آن نوعی درخشش آبی—بنفش می‌دید. وقتی که یک فیلتر فرابنفش استفاده کرد، او هم آن را مثل همه می‌دید. وقتی که نور سیاه را روشن کنید و نگاه کنید، چیزی نخواهید دید؛ ولی آلک یک درخشش ارغوانی روشن می‌بیند. این قدرت خارق‌العاده‌ی جدید که توانایی دیدن خارج از طیف طبیعی رنگ‌ها را به او داده است، تجربه‌های جدیدی را هنگام نگاه کردن به غروب خورشید، اجاق گاز، و گل‌ها برای او ایجاد می‌کند.

در شرکت ما، نئوسنسوری، مهندس مایک پروتا یکی از دستگاه‌های مچ‌بند ما را به یک حسگر فروسرخ وصل کرد. اولین شبی که آن را به دستم کردم، داشتم در تاریکی وسط ساختمان‌ها راه می‌رفتم که ناگهان احساس کردم مچ‌بندم به ارتعاش درآمد. ولی چرا در آنجا سیگنال فروسرخ وجود داشت؟ گفتم شاید برنامه یا سخت‌افزار آن ایرادی دارد، ولی با این وجود، جهت سیگنال روی مچم را دنبال کردم، و ارتعاش شدیدتر شد. بالاخره به یک دوربین فروسرخ

رسیدم که چند چراغ LED فروسرخ در اطراف آن نصب شده بود. به طور معمول ما متوجه این دوربین‌های دید در شب که جاسوسی ما را می‌کنند، نمی‌شویم؛ وقتی که یک پنجره‌ی پوشیدنی به آن بخش از طیف داشته باشیم، فوراً معلوم می‌شود.

نوع مشابهی از تقویت بینایی نیز به جانوران داده شده است. در سال ۲۰۱۵، دو تن از محققان، اریک تامسون و میگل نیکولیس، یک آشکارساز نور فروسرخ را مستقیماً به مغز یک موش صحرایی وصل کردند. و این موش توانایی استفاده از آن را به دست آورد. موش توانست آزمایش‌هایی را انجام دهد که مستلزم آن بود که بتواند نور فروسرخ را ببیند و در انتخاب‌هایش از آن استفاده کند. وقتی که فقط یک آشکارساز به قشر حسی پیکری آن متصل شد، چهل روز طول کشید تا موش صحرایی کار مورد نظر را یاد بگیرد. در آزمایش روی یک موش دیگر، سه الکتروود دیگر را کاشتند. برای این موش، فقط چهار روز طول کشید که بر آن کار تسلط پیدا کند. دست آخر، آشکارساز فروسرخ را مستقیماً در قشر بینایی کاشتند، و این بار فقط یک روز طول کشید تا موش بر کار مسلط شود.

ورودی فروسرخ صرفاً یک نوع سیگنال دیگر است که مغز موش صحرایی می‌تواند از آن استفاده کند. مادام که اطلاعات به مغز برسد، فرقی نمی‌کند آن را به چه روشی به آنجا برسانید. نکته‌ی مهم این است که افزودن حسگر باعث جایگزینی یا تداخل در عملکرد طبیعی قشر حسی پیکری نشد؛ موش صحرایی هنوز هم می‌توانست از شارب‌ها و پنجه‌هایش برای حس کردن مسیر استفاده کند. بلکه حس جدید بدون مزاحمت با بقیه‌ی حواس تلفیق شد. اریک تامسون، دستیار فوق‌دکترایی که این مطالعات را هدایت می‌کرد، درباره‌ی معنای این یافته‌ها با اشتیاق نوشت:

هنوز واقعاً حیرت‌زده‌ام. بله، مغز همیشه تشنه‌ی منابع جدید اطلاعاتی است، ولی این واقعیت که این نوع منبع اطلاعاتی جدید و کاملاً بیگانه را با چنین سرعتی به‌طور کامل جذب کرد، نتیجه‌ی باشکوهی برای رشته‌ی پروتزهای عصبی است.



ما با توجه به مسیر خاصی که در تاریخ طولانی تکامل خود پیموده‌ایم، دو

چشم در جلوی سرمان داریم که زاویه‌ی دیدی در حد ۱۸۰ درجه به ما می‌دهد. برعکس، چشم‌های مرکب مگس‌های خانگی تقریباً دید ۳۶۰ درجه به آن‌ها می‌دهد. آیا در حال حاضر می‌توانیم از فناوری مدرن برای بهره‌مندی از میدان دیدی مانند مگس‌ها استفاده کنیم؟

گروهی از فرانسه با دستگاهی به نام FlyVIZ دقیقاً همین کار را انجام دادند، کلاه‌خودی که به استفاده‌کنندگان امکان دید ۳۶۰ درجه می‌دهد. سیستم آن‌ها متشکل از دوربینی است که روی کلاه‌خود نصب شده و تمام صحنه را پوشش می‌کند و آن را روی نمایشگری در جلوی چشمان کاربر فشرده می‌کند.^[۵۷] طراحان این دستگاه خاطرنشان می‌کنند که کاربران در ابتدای استفاده از دستگاه مدتی باید با آن خو بگیرند (و در این مدت نوعی احساس تهوع به آن‌ها دست می‌دهد). ولی این دوره به‌طور تعجب‌آوری کوتاه است: کاربر پانزده دقیقه پس از به سر گذاشتن دستگاه می‌تواند شیئی را که در هر طرف او قرار گرفته ببیند، می‌تواند در مقابل کسی که از عقب به او نزدیک می‌شود، جاخالی بدهد، و گاه می‌تواند تویی را بگیرد که از پشت سر به طرفش پرتاب شده است.



دید ۳۶۰ درجه.

حالا فکرش را بکنید که نه تنها دید ۳۶۰ درجه داشته باشید، بلکه بتوانید چیزهایی را هم که به‌طور معمول برای شما غیرقابل حس است احساس کنید، مثلاً محل افرادی که در تاریکی دور و بر شما هستند.

تصور کنید که تیمی از پیمانکاران نظامی خصوصی در یک منطقه پیاده شده‌اند تا آدم‌واره‌های متخاصم را شکار کنند. تا حدودی ماندی قسمتی از سریال دنیای غرب شبکه‌ی HBO به نظر می‌رسد، درست است؟ واقعاً هم من که مشاور علمی آن سریال بودم، فناوری خودمان را برای این منظور پیشنهاد

کردم. در پایان فصل اول، «میزبان‌ها» (آدم‌واره‌ها) شورشی به پا می‌کنند، از این رو، در فصل ۲، تیم نظامی نخبه‌ای تلاش می‌کند شورش را سرکوب کنند. سربازان پیکارجو که جلیقه‌های ما را پوشیده‌اند، می‌توانند موقعیت میزبان‌ها را — در تاریکی یا پشت موانع، جایی که اصلاً انتظار حضور آن‌ها نمی‌رود — حس کنند. مثلاً طرف چپ در فاصله‌ی دویست متری جلوی آن‌ها، یا درست پشت سرشان، و یا پشت یک دیوار. گرچه سریال دنیای غرب زمان سی سال آینده را نشان می‌داد، ولی تمام این‌ها را به آسانی با فناوری امروزی می‌توان به انجام رساند، و ادراک انسان را به فراتر از چشم زیبا ولی محدودی که در ابتدا به ما داده شده است، گسترش می‌دهد.



فکر ماجرای سریال دنیای غرب برای من چند ماه بعد از آن پیش آمد که با گوگل در یک آزمایش خیلی جالب در رابطه با نابینایی همکاری کردم. خیلی از ساختمان‌های اداری گوگل مجهز به لیدار (رادار نوری) است، که همان دستگاه چرخنده‌ای است که روی برخی خودروهای خودران می‌بینید. در فضای اداری، لیدار به آن‌ها امکان می‌دهد که موقعیت هر شیء جنبنده‌ای را رصد کنند — که در این مورد، منظور افرادی هستند که در ساختمان اداری حرکت می‌کنند. ما جریان داده‌های لیدار را گرفتیم و آن را به جلیقه وصل کردیم. بعد یک مرد جوان نابینا به نام آلکس را وارد ساختمان کردیم. جلیقه را به تن او کردیم و او حالا — درست مانند سربازان دنیای غرب — می‌توانست موقعیت افرادی را که در اطراف او حرکت می‌کردند، حس کند. می‌توانست ۳۶۰ درجه را ببیند، از نابینایی به ابرقهرمانی رسیده بود. نیازی به صرف وقت برای یادگیری هم نبود: می‌توانست بلافاصله از آن استفاده کند.

تجربه‌ی آلکس، علاوه بر نشان دادن سهولت توسعه‌ی حواس ما، مدل سر سبب‌زمینی را نیز تأیید می‌کند. کافی است جریان داده‌ای جدیدی را متصل کنید، و مغز خودش خواهد فهمید چگونه از آن استفاده کند. جلیقه‌ی آلکس، دوربین فلای‌ویز، و موش مجهز به آشکارساز فروسرخ، همگی نشان می‌دهد که وقتی بحث زیست‌شناسی در میان باشد، سُنّت اهمیت زیادی ندارد. می‌توانیم خودمان

را به فراتر از رسم و رسومات جاری ژنتیک وراثتی خودمان توسعه دهیم. امکان گسترش منحصر به بینایی نیست. مثلاً شنوایی را در نظر بگیرید. هم‌اکنون، دستگاه‌هایی از سمعک گرفته تا مچ‌بند «باز» می‌توانند به فراتر از از مقیاس معمولی شنوایی دست یابند. چرا آن را به دامنه‌ی فراصوتی گسترش ندهیم تا بتوانیم صداهایی را که فقط گربه‌ها و خفاش‌ها می‌شنوند، بشنویم؟ یا دامنه‌ی فروصوتی، به‌طوری که صداهایی را که فیل‌ها با آن با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند، بشنویم؟^[۵۸] با بهبود فناوری‌های شنوایی، هیچ دلیل معقولی ندارد که ورودی‌ها را محدود به حواسی کنیم که به‌طور اتفاقی در گونه‌ی ما قرار داده شده است.

یا مثلاً بویایی را در نظر بگیرید. می‌دانید که سگ‌های بلادهوند می‌توانند بوهایی را احساس کنند که برای ما حتی قابل تصور نیست؟ تصورش را بکنید که آرایه‌ای از آشکارسازهای مولکولی بسازیم و بتوانیم مواد مختلفی را حس کنیم. به جای اینکه نیاز به سگی با پوزه‌ی بزرگ داشته باشید، می‌توانید خودتان مستقیماً عمق آشکارسازی بو را تجربه کنید.



همه‌ی این پروژه‌ها، پنجره‌های ما را به دنیا می‌گشایند، و چیزی را که نامرئی بوده، قابل مشاهده می‌کنند. ولی فراتر از توسعه دادن حواس، برای اینکه بتوانند اطلاعاتی بیشتر از معمول را دریافت کنند، آیا می‌توانیم حس‌های کاملاً جدیدی را ایجاد کنیم؟ آیا می‌توانیم مستقیماً میدان‌های مغناطیسی را حس کنیم، یا داده‌های زنده را از توییتر دریافت کنیم؟ به خاطر انعطاف‌پذیری شگرف مغز، این امکان وجود دارد که این جریان‌های داده‌ای را مستقیماً وارد ادراک خود کنیم.^۱ اصولی که تا اینجا فراگرفته‌ایم، به ما امکان می‌دهد که از جایگزینی حسی و حتی تقویت حسی فراتر رویم، و به قلمرو افزودن حواس جدید قدم بگذاریم.^[۵۹]

۱. برای اطلاعات بیشتر، کتاب شیخ در ماشین: چگونه شبکه‌های پنهانی اطلاعات راز زندگی را آشکار می‌کنند، پل دیویس، ترجمه‌ی تورج حوری، انتشارات مازیار، ۱۳۹۹ را ببینید.

پدید آوردن حواس جدید

تاد هافمن یک هکر زیستی است. معمولاً موهایش را به رنگ‌های مختلفی رنگ می‌کند؛ قیافه‌اش هم بیشتر به یک کارگر چوب‌بری می‌خورد. چند سال پیش، تاد یک آهن‌ربای نئودیمیم کوچک را با پست سفارش داد. آهن‌ربا را استریل کرد، یک چاقوی جراحی را نیز استریل و دستش را ضدعفونی کرد، و آهن‌ربا را در انگشتانش کار گذاشت.

حالا تاد میدان‌های مغناطیسی را حس می‌کند. وقتی که در معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، آهن‌ربا کشیده می‌شود و اعصابش این کشش را ثبت می‌کند. به این ترتیب، اطلاعاتی که به‌طور معمول برای انسان‌ها قابل درک نیست، از طریق مسیرهای حسی انگشتان او برای مغزش ارسال می‌شود.

اولین بار که دستش را به طرف ماهی‌تابه‌ی روی فر برقی‌اش دراز کرد، متوجه توسعه‌ی دنیای حسی خود شد. فر برقی میدان الکتریکی بزرگی دارد (زیرا الکتریسیته در یک سیم‌پیچ جریان دارد). او قبلاً از این موضوع آگاه نبود، ولی حالا خودش می‌توانست آن را حس کند.

او با دراز کردن دستش می‌تواند میدان الکترومغناطیسی حاصل از یک آداپتور برق (مانند آداپتور شارژر لپ‌تاپ) را حس کند. مانند دست زدن به یک حباب نامرئی است، حبابی که می‌توان شکل آن را با حرکت دادن دست به اطراف مشخص کرد. شدت میدان الکترومغناطیسی براساس قدرت حرکت کردن آهن‌ربا در درون انگشت او سنجیده می‌شود. از آنجا که بسامدهای مختلف میدان مغناطیسی بر چگونگی ارتعاش آهن‌ربا تأثیر می‌گذارد، لذا او برای آداپتورهای مختلف، خصوصیات متفاوتی را توصیف می‌کند — از کلماتی مانند «بافت» یا «رنگ» استفاده می‌کند.

یک هکر زیستی دیگر به نام شانون لارات در مصاحبه‌ای توضیح داد که او می‌تواند برق را که در کابل‌ها جریان دارد، حس کند، از این رو، می‌تواند بدون استفاده از ولت‌سنج مشکلات سخت‌افزاری را تشخیص دهد. او می‌گوید که اگر کاشتینه‌هایش را خارج کند، احساس می‌کند کور شده است.^[۶۰] او دنیایی را حس می‌کند که قبلاً برایش قابل تشخیص نبود: در اطراف فر مایکروویو، فن کامپیوتر،

بلندگو، و ترانسفورماتورهای برق مترو، می‌تواند شکل‌های خاصی را لمس کند. آیا امکان دارد که نه فقط میدان مغناطیسی اطراف اشیاء، بلکه میدان مغناطیسی دور زمین را نیز حس کنیم؟ هرچه باشد، جانوران این کار را می‌کنند. لاک‌پشت‌ها به همان ساحلی که در آن از تخم درآمدند، برمی‌گردند تا در آنجا تخم بگذارند. پرنده‌گان مهاجر هر سال از گرینلند تا جنوبگان بال می‌زنند و بعد دوباره به همان جای اول خود بازمی‌گردند. کبوتران نامه‌بر که پیام‌های پادشاهان و لشکرها را حمل می‌کردند، راهشان را با دقتی بیشتر از پیک‌های انسانی پیدا می‌کردند.

دانشمند روسی الکساندر فُن میدندورف متعجب بود که این جانوران چگونه این کار جادویی را انجام می‌دهند، و در سال ۱۸۸۵ به درستی حدس زد که شاید از نوعی قطب‌نمای درونی استفاده می‌کنند، «مانند عقربه‌ی آهن‌ربایی قطب‌نمای کشتی‌ها، این ملوانان هوایی دارای نوعی حس مغناطیسی درونی هستند، که شاید با جریان‌های الکترومغناطیسی در ارتباط باشد.»^[۶۱] به عبارت دیگر، آن‌ها برای یافتن مسیرشان از میدان مغناطیسی زمین استفاده می‌کنند.

از سال ۲۰۰۵، دانشمندان در دانشگاه اوسنابروک (آلمان) در پی فهمیدن این مطلب بودند که آیا یک دستگاه پوشیدنی می‌تواند امکان آن را فراهم آورد که انسان‌ها آن سیگنال را درک کنند؟ آن‌ها کمربندی به نام فیل اسپیس (feelSpace) ساختند. این کمربند مجهز به موتورهای ارتعاشی است، و زمانی که در راستای شمال قرار می‌گیرد، موتور ارتعاش می‌کند. وقتی که دور خودتان می‌چرخید، همیشه در راستای شمال مغناطیسی، ارتعاشی حس می‌کنید.

در ابتدا، مانند وزوز مزاحمی احساس می‌شود — ولی با گذشت زمان، تبدیل به اطلاعات فضایی می‌شود: احساس اینکه شمال آنجا است.^[۶۲] طی چند هفته، این کمربند چگونگی مسیریابی افراد را تغییر می‌دهد: جهت‌یابی آن‌ها بهتر می‌شود، راهبردهای جدیدی ایجاد می‌کنند، و رابطه‌ی بین مکان‌های مختلف را بهتر درک می‌کنند. محیط منظم‌تر حس می‌شود. نقشه‌ی اماکن را بهتر می‌توان به یاد آورد.

یکی از شرکت‌کنندگان تجربه‌ی خود را به این صورت شرح داد: «جهت‌یابی در شهرها خیلی جالب بود. بعد از برگشتن، می‌توانستم جهت همه‌ی اماکن، اتاق‌ها، و ساختمان‌ها را به یاد آورم، ولو آنکه وقتی آنجا بودم، توجهی به

این موضوع نداشتم.»^[۶۳] به جای اینکه فضا را به صورت دنباله‌ای از نشانه‌ها در نظر بگیرند، مسیرها را به صورت سراسری به ذهن می‌سپردند. یکی دیگر از استفاده‌کنندگان گفت: «این فقط مثل یک تحریک لمسی نبود، بلکه کمر بند نوعی حس فضایی ایجاد می‌کرد.... من به‌طور شهودی جهت مسیر خانه یا محل کارم را می‌فهمیدم.» به عبارت دیگر، آنچه او تجربه می‌کرد، جایگزینی حسی (تأمین ورودی بینایی یا شنوایی از طریق یک کانال متفاوت) یا تقویت حسی (بهبود قدرت بینایی یا شنوایی) نبود. بلکه افزایش حسی بود. این نوع جدیدی از تجربه‌ی انسانی است. این کاربر ادامه می‌دهد:

طی دو هفته‌ی اول، می‌بایست روی آن تمرکز کنم، ولی بعد از آن شهودی بود. حتی می‌توانستم نقشه‌ی فضایی اماکن و اتاق‌هایی را که بعضی وقت‌ها در آنجا اقامت داشتم، در ذهنم تصور کنم. جالب اینکه وقتی شب‌ها کمر بند را درمی‌آوردم، باز هم ارتعاش را حس می‌کردم: وقتی که به پهلوی دیگر می‌غلتتم، ارتعاش هم جابه‌جا می‌شود — واقعاً احساس شگفت‌انگیزی است!^[۶۴]

نکته‌ی جالب این است که کاربران غالباً پس از درآوردن کمر بند نیز گزارش می‌کنند که تا مدتی حس جهت‌یابی بهتری دارند. تأثیر دستگاه پس از برداشتن آن نیز باقی می‌ماند. درست همان‌گونه که برای کلاه‌خود تعادلی گفتیم، نجوای درونی سیگنال‌ها گاه بر اثر تأیید دستگاه خارجی تقویت می‌شود.^[۶۵]

تجربه‌ای که این انسان‌ها داشتند، در موش‌های صحرایی با جزئیات بیشتری مطالعه شده است. در سال ۲۰۱۵، دانشمندان چشمان موش‌ها را پوشاندند و قطب‌نماهای دیجیتالی را به قشر بینایی آن‌ها وصل کردند. موش‌ها خیلی سریع فهمیدند که چطور خودشان را به غذای درون ماز برسانند، و برای این کار فقط از سیگنال‌های جهت‌یابی سرشان استفاده می‌کردند.^[۶۶]

مغز هرگونه داده‌هایی دریافت کند، از آن استفاده می‌کند.



در سال ۱۹۳۸، هوانوردی به نام داگلاس کوریگان هواپیمایی را تعمیر کرد که بعداً با نام «روح ۶۹/۹۰ دلاری» مشهور شد. سپس با این هواپیما از ایالات متحده تا شهر دوبلین در ایرلند پرواز کرد. در آن روزهای اولیه‌ی صنعت هواپیمایی،

هوایماها امکانات اندکی برای جهت‌یابی داشتند — عموماً فقط یک قطب‌نما بود و یک تکه ریسمن که جهت جریان هوا نسبت به هوایما را نشان می‌دهد. روزنامه‌ی ادواردزویل ایتلیجنسِر به نقل از یک مکانیک نوشت که کوریگان «با نشیمنگاه شلوارش پرواز می‌کند»، که اکثراً گفته می‌شود این اصطلاح از همان‌جا در زبان انگلیسی متداول شد. منظور از «پرواز کردن با نشیمنگاه شلوار» هدایت کردن هوایما براساس نحوه‌ی احساس آن بود. چرا که جایی از بدن که بیشترین تماس را با هوایما داشت، نشیمنگاه شلوار خلبان بود، یعنی اطلاعات از این مسیر به مغز او می‌رسید. خلبان حرکات هوایما را حس می‌کرد و براساس آن واکنش نشان می‌داد. اگر هوایما حین دور زدن به طرف بال پایین سُر می‌خورد، کپل‌های خلبان به طرف پایین می‌لغزید. و اگر هنگام چرخیدن، هوایما به بالا منحرف می‌شد، شتاب کوچکی سبب می‌شد که خلبان به بالا رانده شود. تازه در پایان جنگ جهانی اول بود که نشانگر لغزش و چرخش اختراع شد — از این رو، خلبان‌های اولیه مهارت زیادی در تخمین عوامل مختلف (کجی، سرعت باد، دمای بیرون، و عملکرد کلی هوایما) با توجه دقیق به احساسات لمسی داشتند، خصوصاً زمانی که از وسط ابر یا مه پرواز می‌کردند.

در این ارتباط، داده‌های لمسی سابقه‌ای طولانی دارد، و ما در نئوسنسوری داریم تلاش می‌کنیم که آن را به سطح بالاتری برسانیم. به‌طور خاص، در حال گسترش حواس خلبانان پهپاد هستیم. جلیقه پنج نوع اندازه‌گیری مختلف را از پهپاد به‌صورت جریان داده‌ها به خلبان منتقل می‌کند — شامل چرخش حول محور عرضی (pitch)، چرخش حول محور عمودی (yaw)، چرخش حول محور طولی (roll)، جهت، و مسیر — و این توانایی خلبان را برای هدایت پرواز بهبود می‌دهد. به یک معنا می‌توان گفت که پوست خلبان تا آن‌بالا در جایی که پهپاد هست، امتداد یافته است.

برای اینکه خیالتان را راحت کرده باشم، خلبان‌های هوایما وقتی که با نشیمنگاه شلوارشان، یعنی بدون استفاده از تجهیزات، هوایما را هدایت می‌کردند، کارشان بهتر نبود. وقتی که کابین خلبان مجهز به ابزارهای مختلف شد که به خلبان امکان اندازه‌گیری عناصری را می‌داد که در غیر این صورت به آن دسترسی نداشت، ایمنی پرواز بالاتر رفت. مثلاً خلبان همان‌طور که

نشسته نمی‌تواند بگوید که دارد راست پرواز می‌کند یا به پهلو کج شده است. [۶۷] داشتن ابزارهای متنوع بهتر از نداشتن آن‌ها است؛ مشکلی که وجود دارد، این است که چگونه داده‌های متنوع آن‌ها را به مغز وارد کنیم. وقتی که به کابین خلبان یک هواپیمای مدرن نگاه می‌کنید، می‌بینید که بد جوری پر از تجهیزات است. آدم با دستگاه بینایی‌اش مجبور است درجه‌ها را یکی‌یکی بررسی کند، که فرایند وقت‌گیری است. به این خاطر، خیلی جالب می‌شود که یک کابین پیشرفته را تغییر دهیم: به جای اینکه خلبان بخواهد همه چیز را با چشم‌هایش بخواند، آن‌ها را حس می‌کند. یک جریان داده‌ای چندبعدی وارد بدن می‌شود که یکباره به خلبان می‌گوید که هواپیما در چه وضعیتی است. حالا چرا این روش می‌تواند موفق‌تر باشد؟ چون که مغز استعداد بالایی برای خواندن داده‌های چندبعدی از بدن دارد. مثلاً بدین خاطر است که شما می‌توانید روی یک پا تعادل خود را حفظ کنید: گروه‌های ماهیچه‌ای مختلف از پاها، تنه، و بازوها همگی جریان داده‌ای خود را می‌فرستند و مغز وضعیت را خلاصه می‌کند و به سرعت تصحیح‌های لازم را ارسال می‌کند.

بنابراین، تفاوت بین پرواز با نشیمنگاه شلوار و پرواز با پوست تنه به مقدار داده‌های ورودی مربوط می‌شود. و از آنجا که ما اکنون در دنیایی مملو از اطلاعات زندگی می‌کنیم، احتمال دارد که مجبور شویم به جای دسترسی پیدا کردن به داده‌ها، به سراغ تجربه کردن آن به صورت مستقیم برویم.

به همین صورت، تصور کنید که به یک کارخانه که ده‌ها نوع ماشین‌آلات در آن هم‌زمان در حال کار هستند، وصل شده‌اید، و می‌توانید وضعیت آن را حس کنید. در واقع، شما خود کارخانه می‌شوید. هم‌زمان به ده‌ها ماشین دسترسی دارید، و نرخ تولید آن‌ها نسبت به یکدیگر را حس می‌کنید. وقتی که تعادل چیزی به هم می‌خورد و نیاز به اصلاح دارد، آن را حس می‌کنید. منظورم خراب شدن ماشین‌آلات نیست: این نوع مسایل را به سادگی می‌توان با وصل کردن یک آژیر یا آلارم حل کرد. بلکه منظور این است که بتوانید نحوه‌ی کار کردن دستگاه‌ها نسبت به یکدیگر را بفهمید. این نحوه‌ی استفاده از داده‌های کلان، الگوهای درک عمیق‌تری را ایجاد می‌کند.

در نظر بگیرید که گسترش حسی چه کاربردهای وسیعی دارد. تصور کنید

که داده‌های مربوط به بیمار به‌طور زنده به پشت جراحان انتقال داده شود، به‌طوری که مجبور نباشند حین عمل مدام به مانیتورها نگاه کنند. یا اینکه آدم بتواند وضعیت‌های نامرئی بدن خود — از قبیل فشار خون، ضربان قلب، و وضعیت میکروبیوم — را محاسبه کند، به‌طوری که سیگنال‌های ناخودآگاه وارد قلمرو خودآگاه شود. یا اینکه تصور کنید که یک فضانورد بتواند وضعیت سالم بودن ایستگاه فضایی بین‌المللی را حس کند. به جای اینکه مجبور باشد مدام به اطراف شناور شود و به مانیتورها خیره شود، الگوهای لمسی دریافت کند که شامل خلاصه‌ای از داده‌های بخش‌های مختلف ایستگاه فضایی باشد.

حالا این را یک گام جلوتر می‌بریم. ما در شرکت ئوسنسوری، در حال کاوش مفهوم ادراک مشترک هستیم. مثلاً یک زوج را در نظر بگیرید که داده‌های یکدیگر را حس می‌کنند: تعداد تنفس، دما، پاسخ الکتریکی پوست، و غیره. می‌توانیم این داده‌ها را در یک نفر اندازه‌گیری کنیم و آن را از طریق اینترنت به مچ‌بند «باز» نفر دیگر بفرستیم. این می‌تواند راه را به سوی نوع عمیق‌تری از درک متقابل بگشاید. تصور کنید که همسر شما از آن طرف مملکت به شما می‌گوید: «حالت خوب است؟ انگار استرس داری.» البته این امکان جدید می‌تواند برای رابطه‌ی دو نفر مفید یا مضر باشد، ولی به هر حال، افق‌های جدیدی را برای تجربه‌ی مشترک باز می‌کند.

تمام این‌ها از آن رو می‌تواند مؤثر باشد که جریان‌های داده‌ای ورودی ما در پس‌زمینه محو می‌شود؛ ما فقط زمانی از حواس خود آگاه می‌شویم که با انتظارات ما تفاوت داشته باشد. مثلاً حس کفش پای راست‌تان را در نظر بگیرید. می‌توانید به آن توجه کنید و حضور آن را حس کنید. ولی در حالت طبیعی، داده‌هایی که از پوست پای راست شما می‌رسد، زیر سطح آگاهی باقی می‌ماند. تنها وقتی که سنگ‌ریزه‌ای در کفش‌تان باشد، به این جریان اطلاعات توجه می‌کنید. در مورد داده‌های ورودی از ایستگاه فضایی یا از همسر شما نیز همین‌طور خواهد بود: از این حواس آگاه نخواهید بود، مگر زمانی که روی آن تمرکز کنید، یا اینکه نکته‌ای غیرعادی توجه شما را جلب کند.



تصور کنید که جریان‌های اطلاعاتی را مستقیماً از اینترنت به صورت الگوهای ارتعاش برای بدن خود بفرستید. مثلاً جلیقه‌ی نئوسنسوری را به تن می‌کنید و در حالی که راه می‌روید، جریان داده‌ای ایستگاه‌های هواشناسی مجاور را از محدوده‌ی دویست مایلی خود دریافت می‌کنید. پس از مدتی، خواهید توانست تجربه‌ی ادراکی مستقیمی از الگوهای آب‌وهوایی منطقه به دست آورید، در مقیاسی بسیار بزرگ‌تر از آنچه یک انسان به طور طبیعی احساس می‌کند. شاید خیلی دقیق‌تر از هواشناسان بتوانید به دوستان‌تان بگویید که باران خواهد آمد یا نه. این تجربه‌ی انسانی جدیدی خواهد بود، تجربه‌ای که با بدن انسانی استاندارد، ریز، و محدودی که الان دارید، به هیچ وجه نمی‌توانید داشته باشید.

یا اینکه تصور کنید که جلیقه داده‌های بازار سهام را به طور زنده برای شما می‌فرستد، به طوری که مغز شما بتواند از تغییرات پیچیده و چندوجهی بازارهای جهان، معنایی استخراج کند. مغز می‌تواند با استخراج الگوهای آماری، کارهای عظیمی انجام دهد، حتی زمانی که گمان می‌کنید توجهی به آن ندارید. بنابراین، اگر جلیقه را به تن کنید تا به طور کلی از آنچه در اطراف‌تان می‌گذرد (اخبار، مُدهای نوظهور جدید، وضعیت اقتصاد، و غیره) آگاه باشید، شاید توانایی شهودی نیرومندی — بهتر از مدل‌ها — درباره‌ی جهت حرکت بازار به دست آورید. این هم نوع کاملاً جدیدی از تجربه‌ی انسانی خواهد بود.

شاید پرسید که چرا از چشم یا گوش برای این منظور استفاده نکنیم؟ آیا یک تاجر سهام نمی‌تواند از عینک واقعیت مجازی (VR) استفاده کند تا نمودارهای ده‌ها سهام را به طور زنده تماشا کند؟ مسئله آن است که بینایی برای خیلی از کارهای روزانه‌ی ما ضرورت دارد. تاجر سهام برای اینکه به کافه‌تريا برود، متوجه آمدن رئیس‌اش شود، یا ایمیل‌هایش را بخواند، به چشم‌هایش نیاز دارد. برعکس، پوست او یک کانال اطلاعاتی استفاده نشده با پهنای باند بالا است.

تاجر سهام با حس کردن داده‌های چندبعدی شاید بتواند تصویر کلان داده‌ها را درک کند (نفت به زودی سقوط می‌کند) خیلی پیش از آنکه بتواند متغیرهای مربوطه را متوجه شود (اپل در حال افزایش است، اگزون در حال کاهش است، و والمارت ثابت است). چطور چنین چیزی ممکن است؟ به سیگنال‌های بصری‌ای که با نگاه کردن به سگ‌تان در حیاط دریافت می‌کنید، توجه کنید. شما نمی‌گویید:

«خب، من متوجه شدم که یک فوتون اینجا است، و یک فوتون کمی تیره‌تر اینجا، و یک ردیف فوتون‌های روشن هم این طرف.» بلکه تصویر کلی را می‌بینید. جریان‌های داده‌ای بی‌شماری هستند که می‌توانید از اینترنت دریافت کنید. درباره‌ی حس عنکبوتی که شنیده‌اید: نوعی حس گزگز و مورمور که پیتز پارکر با آن می‌فهمد که خطری در دور و بر او وجود دارد. حالا چرا حس توییستی نداشته باشیم؟ با این فرض شروع می‌کنیم که تویتر تبدیل به آگاهی جمعی زمین شده است. این خودآگاهی متکی بر نوعی دستگاه عصبی است که زمین را احاطه کرده است، و افکار مهم (و نیز برخی فکرهای بی‌اهمیت) روندی بالاتر از سطح نوفه پیدا می‌کنند و به قله می‌رسند. نه به خاطر شرکت‌هایی که می‌خواهند پیام‌هایشان را به شما برسانند، بلکه به خاطر اینکه وقوع زلزله در بنگلادش، یا مرگ یک فرد مشهور، و یا کشف جدیدی در فضا توجه مردم را در سرتاسر جهان به خود جلب کرده است. علایق مردم دنیا به سطح بالا راه می‌یابد، درست مانند دستگاه عصبی جانوران که مسائل مهم در آن بالا می‌آید (من گرسنه‌ام؛ کسی دارد می‌آید؛ باید آب پیدا کنم). در تویتر، ایده‌هایی که از سطح بالاتر می‌آیند، ممکن است مهم باشند یا نباشند، ولی نشان‌دهنده‌ی چیزی هستند که در آن لحظه در ذهن جمعیت دنیا وجود دارد.

من و اسکات نوویچ در همایش تد در سال ۲۰۱۵ تمام تویت‌های دارای هشتگ “TED” را به‌طور الگوریتمی رصد کردیم. مستقیماً صدها تویت را تجمیع کردیم و آن‌ها را به یک برنامه‌ی عقیده‌کاوی دادیم. به این طریق، توانستیم با استفاده از یک واژه‌نامه‌ی بزرگ طبقه‌بندی کنیم که کدام تویت‌ها مثبت‌اند («عالی»، «الهام‌بخش»، و غیره) و کدام‌ها منفی («خسته کننده»، «احمقانه»، و از این قبیل). خلاصه‌ی آمار به دست آمده را به‌طور زنده به جلیقه فرستادیم. من می‌توانستم عقیده‌ی افراد حاضر در سالن و چگونگی تغییر آن بر حسب زمان را حس کنم. این به من امکان داد که تجربه‌ای داشته باشم بزرگ‌تر از آنچه یک انسان به‌طور طبیعی می‌تواند تجربه کند: اینکه به وضعیت احساسی کلی صدها نفر به‌طور هم‌زمان وصل باشد. مثلاً یک سیاستمدار می‌تواند چنین دستگاهی هنگام سخنرانی برای ده‌ها هزار نفر به تن کند: به این ترتیب، خواهد توانست مستقیماً متوجه شود کدام‌یک از حرف‌هایش با استقبال خوبی روبه‌رو می‌شود

و کدام‌ها فاجعه به بار می‌آورد.

اصلاً اگر می‌خواهید خیلی بزرگ‌تر فکر کنید، هشتک‌ها را فراموش کنید و تصور کنید که تمام توئیت‌های دنیا را با استفاده از پردازش زبان طبیعی تحلیل کنیم: تصور کنید که یک میلیون توئیت در ثانیه را فشرده کنیم و خلاصه‌ی آن‌ها را به جلیقه بفرستیم. به این ترتیب، به خودآگاهی دنیا وصل می‌شوید. مثلاً دارید راه می‌روید و متوجه یک رسوایی سیاسی در واشنگتن می‌شوید، یا آتش‌سوزی جنگل‌ها در برزیل، و یا شیخون جدیدی در خاورمیانه. یعنی می‌توان گفت که از نظر حسی، دنیایی‌تر می‌شوید.

البته منظورم این نیست که افراد زیادی خواهان آن خواهند بود که خودشان را به خودآگاهی دنیا وصل کنند، ولی شکی نیست که از اثبات عملی بودن چنین ایده‌ای می‌توانیم چیزهای زیادی یاد بگیریم. این نشان می‌دهد که وقتی درباره‌ی افزایش حسی فکر می‌کنیم، می‌توانیم از قلمرو چیزهای طبیعی که قبلاً وجود داشته، فراتر رویم.

بعضی وقت‌ها از من می‌پرسند که اصلاً چرا می‌خواهیم این جریان‌های داده‌ای را به جای کامپیوتر به انسان وصل کنیم؟ آخر مگر یک شبکه‌ی عصبی مصنوعی خوب نمی‌تواند بازشناسی الگو را بهتر از انسان انجام دهد؟ لزوماً این‌طور نیست. کامپیوتر می‌تواند بازشناسی الگو را با موفقیت چشمگیری انجام دهد، ولی مهارت خاصی ندارد در فهمیدن اینکه چه چیزهایی برای انسان‌ها اهمیت دارد. در واقع، حتی خود انسان‌ها هم خیلی وقت‌ها از قبل نمی‌دانند چه چیزی برای آن‌ها اهمیت دارد. بدین خاطر است که وقتی انسان بازشناسی الگو را انجام می‌دهد، نسبت به یک شبکه‌ی عصبی مصنوعی دید وسیع‌تری دارد و انعطاف‌پذیرتر است. مثلاً جلیقه‌ی بازار سهام را در نظر بگیرید: وقتی که در خیابان‌های نیویورک یا شانگهای یا مسکو قدم می‌زنید، تا حدودی متوجه می‌شوید که افراد چه لباس‌هایی پوشیده‌اند، چه محصولات توجیه آن‌ها را جلب می‌کند، و چقدر احساس خوش‌بینی یا بدبینی دارند. شاید از قبل ندانید دنبال چه چیزی می‌گردید، ولی تمام چیزهایی که می‌بینید و می‌شنوید، نوعی مدل اقتصادی را در درون شما پدید می‌آورد. وقتی که از طریق جلیقه بتوانید افت‌وخیز قیمت انواع سهام را نیز حس کنید، این ترکیب

نوعی دید غنی به شما می‌دهد. از آنجا که یک شبکه‌ی عصبی مصنوعی صرفاً به دنبال الگوهایی در اعداد داده شده می‌گردد، لذا ذاتاً محدود به انتخاب‌های ایجاد شده از سوی برنامه‌نویسان است.

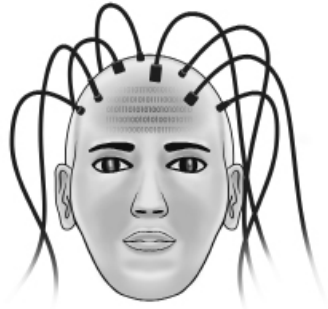


رنه دکارت مدت زیادی به این فکر می‌کرد که چگونه می‌تواند از واقعیت واقعی اطراف خود آگاه شود. هرچه باشد، او می‌دانست که حواس ما خیلی وقت‌ها ما را فریب می‌دهند، و می‌دانست که ما خیلی وقت‌ها رؤیاهای مان را با واقعیت‌های زمان بیداری اشتباه می‌گیریم. نکند یک اهریمن شرور او را فریب داده باشد و مرتباً دروغ‌هایی را درباره‌ی جهان اطراف به خورد او بدهد؟ از کجا می‌توانست بفهمد که این‌گونه نیست؟ در دهه‌ی ۱۹۸۰، فیلسوف هیلاری پاتنم این پرسش را به این صورت بازگویی کرد: «آیا من مغزی در یک خمره هستم؟»^[۶۸] شما از کجا می‌فهمید که دانشمندان مغز شما را از بدن‌تان جدا نکرده‌اند و صرفاً قشر مخ‌تان را به طرز صحیح تحریک می‌کنند تا تصور لمس کتاب، دمای خاص پوست، و دیدن دست‌تان را در شما ایجاد کنند؟ در دهه‌ی ۱۹۹۰، این پرسش را به این صورت مطرح می‌کردند که «آیا من در ماتریکس هستم؟» در دوران مدرن، پرسش این است: «آیا من در یک شبیه‌سازی کامپیوتری هستم؟»

این‌گونه پرسش‌ها معمولاً در کلاس فلسفه مطرح می‌شد، ولی امروزه به آزمایشگاه علوم اعصاب نیز کشیده شده است. همان‌طور که می‌دانید، تجربیات عادی ما چیزی جز ورودی حسی نیست. بنابراین، سیگنال‌هایی که مستقیماً به مغز وارد شود، می‌تواند دقیقاً همان هدف را تأمین نماید. به هر حال، تمام سیگنال‌هایی که روی حسگرهای ما عمل می‌کند، به یک محمل الکتروشیمیایی مشترک تبدیل می‌شود، یعنی می‌توانیم حسگرها (واسطه‌ها) را دور بزنیم و خودمان مستقیماً سیگنال‌های الکتروشیمیایی را ایجاد کنیم. می‌توانیم واسطه را دور بزنیم. **وقتی می‌توانیم** آن را مستقیماً به پردازنده تحویل دهیم، چه نیازی هست که داده‌های بصری را از طریق گوش یا زبان بفرستیم؟

ما هم‌اکنون این فناوری را داریم. معمولاً تعداد الکترودهایی که کاشته می‌شود، زیاد نیست (یک تا چند ده عدد)، و در نواحی عمیق زیرقشری انجام می‌شود

تا مشکلاتی مانند رعشه، افسردگی، یا اعتیاد را درمان کند. برای اینکه قشر را با پیام حسی معنی‌داری تحریک کنیم، تعداد خیلی بیشتری الکتروود (احتمالاً در حد چند صد هزار مورد) لازم است تا الگوهای فعالیت پرباری را ایجاد نماید.



می‌توان با وارد کردن مستقیم جریان‌های داده‌ای جدید به قشر مغز به نوع جدیدی از واقعیت افزوده دست یافت. در این شکل سیم‌ها به منظور نمایش نشان داده شده‌اند، ولی طبیعتاً آینده بی‌سیم خواهد بود: معلوم است که آدم دلش نمی‌خواهد سیم‌ها پشت سرش آویزان باشد، به‌طوری که مثل لباس بلند عروس، کسی اشتباهاً پایش را روی آن بگذارد.

گروه‌های متعددی تلاش می‌کنند این را به مرحله‌ی واقعیت برسانند. متخصصان علوم اعصاب در دانشگاه استنفورد در حال مطالعه بر روی وارد کردن ۱۰۰,۰۰۰ الکتروود به یک میمون هستند، که (اگر آسیب بافتی به حداقل رسانده شود) ممکن است مطالب جالب جدیدی را درباره‌ی مشخصات دقیق شبکه‌ها برای ما روشن کند. چندین شرکت نوظهور، که هنوز در مراحل نوپایی هستند، امیدوارند که از طریق خواندن و نوشتن داده‌ها به‌صورت سریع با استفاده از جازن‌های مستقیم، سرعت ارتباطات مغز با دنیای خارج را افزایش دهند.

این مسئله‌ای نظری نیست، بلکه جنبه‌ی عملی دارد. وقتی که الکتروودی در مغز گذاشته می‌شود، بافت مغز کم‌کم سعی می‌کند آن را بیرون براند، همان‌طور که وقتی خاری در پوست انگشت شما فرومی‌رود، پوست آن را بیرون می‌راند. این مشکل کوچک‌تر است. مشکل بزرگ‌تر آن است که جراحان اعصاب مایل به انجام این عمل‌ها نیستند، زیرا همیشه خطر عفونت یا مرگ روی تخت جراحی وجود دارد. و غیر از موارد بیماری (از قبیل بیماری پارکینسون یا افسردگی شدید)، مشخص نیست که مصرف‌کنندگان حاضر خواهند شد جراحی سر

انجام دهند تا مثلاً از لذت پیامک فرستادن سریع‌تر برای دوستان‌شان بهره‌مند شوند. یک راه دیگر می‌تواند این باشد که الکترودها را وارد درخت رگ‌های خونی کنند که در مغز انشعاب پیدا می‌کند؛ ولی در این مورد، خطر آسیب زدن یا مسدود کردن عروق وجود دارد.

با این وجود، روش‌های جدیدی نیز برای ورود و خروج اطلاعات به مغز در سطح سلولی مطرح شده است که نیازی به کاشتن الکترودها ندارد. ظرف یک یا دو دهه، وارد کردن مستقیم سیگنال‌ها به مغز با کوچک‌سازی شدید اساساً متحول خواهد شد. نمونه‌های نویدبخش آن دستگاه‌هایی مانند غبار عصبی هستند: دستگاه‌های الکتریکی بسیار ریزی که روی سطح مغز پخش می‌شوند، داده‌ها را ثبت می‌کنند، سیگنال‌ها را برای گیرنده می‌فرستند، و تکانه‌های الکتریکی کوچکی به مغز می‌دهند.^[۶۹]

از نانوروبات‌ها نیز می‌توان استفاده کرد. در این روش، می‌توان مولکول‌های پیچیده‌ای طراحی و تولید کرد که اساساً روبات‌هایی میکروسکوپی هستند. به لحاظ نظری، می‌توانیم صد میلیارد از این روبات‌ها را چاپ کنیم، آن‌ها را در قرص کوچکی جای دهیم، و بعد آن را بخوریم. طرح مورد نظر به این صورت است که این نانوروبات‌ها از سد خونی-مغزی عبور می‌کنند، به نورون‌ها نفوذ می‌کنند، هنگام شلیک کردن نورون‌ها، سیگنال‌های کوچکی می‌فرستند، و سیگنال‌هایی دریافت می‌کنند که نورون‌ها را وادار به فعالیت می‌سازند. به این طریق، خواهیم توانست خواندن و نوشتن اطلاعات را روی یکایک میلیاردها نورون انجام دهیم. از رویکردهای ژنتیکی نیز می‌توان استفاده کرد، و با کدگذاری در DNA، نانوروبات‌های زیستی از جنس پروتئین ساخت. رویکردهای زیادی برای رساندن اطلاعات به مغز وجود دارد، و طی چند دهه احتمالاً به مرحله‌ای خواهیم رسید که هر نورون را بتوانیم به‌طور انفرادی بخوانیم و کنترل کنیم. در آن زمان، مغز ما به‌طور مستقیم دستگاه تقویت حسی ما خواهد بود، و نیازی به پوشیدن جلیقه یا مچ‌بند نخواهیم داشت.



ما درباره‌ی روش‌های رساندن داده‌ها به مغز صحبت کردیم — چه به‌صورت

ارتعاشات روی پوست، شوک‌های روی زبان، یا فعال‌سازی مستقیم نورون‌ها — ولی هنوز پرسش مهمی باقی می‌ماند: ورودی جدید چه حسی خواهد داشت؟

تصور کردن یک رنگ جدید

درون گنبد جمجمه، مغز فقط به سیگنال‌های الکتریکی که میان سلول‌های تخصصی آن جریان می‌یابند، دسترسی دارد. مغز مستقیماً نمی‌تواند چیزی را ببیند، بشنود، یا لمس کند. ورودی‌ها چه نشان‌دهنده‌ی امواج تراکمی یک سمفونی باشند، یا الگوهای نوری مجسمه‌ای پوشیده از برف، یا ملکول‌هایی که از یک پای سیب تازه در هوا شناور می‌شوند، و یا درد ناشی از نیش زنبور — همگی در نورون‌ها به صورت نیزه‌های ولتاژ ظاهر می‌شوند.

اگر مثلاً در حال تماشای تکه‌ای از بافت مغزی باشیم که نیزه‌ها در آن در آمد و شد هستند، و من از شما بپرسم که این قشر بینایی است یا قشر شنوایی یا قشر حسی پیکری، شما نخواهید توانست جواب بدهید. خود من هم نمی‌توانم مشخص کنم کدام یک از آن‌ها است. همه‌ی آن‌ها یکسان به نظر می‌رسند.

پس این منجر به پرسش پاسخ داده نشده‌ای در علوم اعصاب می‌شود: چرا بینایی با بویایی این قدر متفاوت حس می‌شود؟ یا مثلاً مزه؟ چرا هرگز ممکن نیست زیبایی یک درخت کاج را که در نسیم تاب می‌خورد با مزه‌ی پنیر لیقوان اشتباه کنیم؟ یا احساس سمباده روی انگشتان را با بوی اسپرسوی تازه؟^[۷۰]

می‌توان تصور کرد که این در ارتباط با چگونگی ساخت این نواحی از نظر ژنتیکی است: بخش‌هایی که در شنوایی دخالت دارند، متفاوت از بخش‌هایی هستند که با لمس در ارتباط هستند. ولی با بررسی دقیق‌تر، این فرضیه درست به نظر نمی‌رسد. همان گونه که در این فصل دیدیم، اگر آدم نابینا شود، بخشی از مغز که قبلاً قشر بینایی نامیده می‌شد، به تصرف لمس و شنوایی درمی‌آید. وقتی که مدارسازی مجدد مغزی را در نظر می‌گیریم، به سختی می‌توان پذیرفت که قشر «بینایی» اساساً ماهیت بینایی داشته باشد.

لذا این منجر به فرضیه‌ی دیگری می‌شود، و آن اینکه تجربه‌ی ذهنی یک حس — که به آن کیفیات ذهنی نیز گفته می‌شود — براساس ساختار داده‌ها تعیین می‌شود.^[۷۱] به عبارت دیگر، اطلاعاتی که از ورقه‌ی دوبعدی شبکه‌ی می‌آید،

نسبت به داده‌هایی از سیگنال یک‌بعدی پرده‌ی گوش می‌آید، ساختار متفاوتی دارد، و با داده‌های چندبعدی حاصل از نوک انگشتان نیز متفاوت است. در نتیجه، این جریان‌های داده‌ای همگی متفاوت به نظر می‌رسند. باز یک فرضیه‌ی مرتبط دیگر آن است که کیفیات ذهنی براساس تغییراتی شکل می‌گیرد که خروجی حرکتی شما در ورودی‌های حسی می‌دهد.^[۷۲] مثلاً با فرمان‌هایی که شما به ماهیچه‌های دور چشم می‌دهید، داده‌های بینایی تغییر می‌کند. ورودی بصری به‌گونه‌ای قابل یادگیری تغییر می‌کند: به چپ که نگاه کنید، چیزهای محوی که در قسمت محیطی می‌بینید، تمرکز پیدا می‌کند و بهتر دیده می‌شود. وقتی چشمان‌تان را حرکت می‌دهید، دنیای بصری تغییر می‌کند، ولی در مورد صدا این اتفاق نمی‌افتد. برای این کار باید سرتان را بچرخانید. پس آن جریان داده‌ای شرایط متفاوتی دارد. و بازنمیس هم متفاوت است. ما نوک انگشتان‌مان را به طرف اشیا می‌بریم، به آن‌ها می‌ساییم، و آن‌ها را کاوش می‌کنیم. بویایی فرایندی غیرفعال است که با بو کشیدن تقویت می‌شود. چشایی زمانی صورت می‌گیرد که چیزی را به درون دهان‌تان ببرید.

این نشان می‌دهد که ما می‌توانیم جریان داده‌ای جدیدی را مستقیماً وارد مغز کنیم — مثلاً داده‌های حاصل از یک روبات سیار، یا پاسخ الکتریکی پوست، یا داده‌های دمایی فروسرخ با طول موج بلند — و مادام که داده‌ها ساختار مشخص و حلقه‌ی بازخوردی با اعمال شما داشته باشد، آن داده‌ها نهایتاً منجر به کیفیات ذهنی جدیدی خواهد شد. مانند بینایی یا شنوایی یا لمس یا بویایی یا مزه حس نخواهد شد — بلکه چیز کاملاً جدیدی خواهد بود.

واقعاً به سختی می‌توان تصور کرد که این حس جدید چگونه خواهد بود. واقعاً هم تصور کردن آن غیرممکن است. برای اینکه علتش را بفهمید، سعی کنید رنگ جدیدی را تصور کنید. شروع کنید. چشمان‌تان را باریک کنید و سخت فکر کنید. به نظر می‌رسد کار ساده‌ای باشد، ولی هیچ فایده‌ای ندارد. همان طور که یک رنگ جدید را نمی‌توانید به تصور درآورید، حس جدیدی را هم نمی‌توانید تصور کنید.

با این وجود، اگر مغز شما جریان داده‌ای زنده‌ی یک پهباد (شامل چرخش حول محور عرضی، چرخش حول محور عمودی، چرخش حول محور طولی،

جهت، و مسیر) را مصرف می‌کرد، آیا داده‌های ورودی مانند چیزی حس می‌شد — همان گونه که فوتون‌ها یا امواج تراکمی هوا حس می‌شوند؟ و آیا این سبب می‌شد که پهباد به‌عنوان امتداد مستقیمی از بدن شما احساس شود؟ در مورد ورودی‌های انتزاعی‌تر، مانند فعالیت کارخانه، چه می‌توان گفت؟ یا فیدهای توییتری؟ یا بازار سهام؟ پیش‌بینی این است که وقتی جریان داده‌های مناسب به طرف مغز سرازیر شود، مغز نهایتاً تجربه‌ی ادراکی مستقیمی درباره‌ی تولید کارخانه، یا هشتک‌های مختلف، و یا تغییرات هم‌زمان اقتصادی در سراسر جهان خواهند داشت. کیفیات ذهنی در طول زمان ایجاد خواهد شد؛ این روش طبیعی مغز برای خلاصه کردن مقادیر عظیم داده‌ها است.

آیا این پیش‌بینی صحیح است یا خیال‌پردازی خالص است؟ ما بالاخره از نظر علمی به نقطه‌ای رسیده‌ایم که خواهیم توانست این را آزمایش کنیم. اگر فکر یاد گرفتن یک حس جدید برایتان عجیب به نظر می‌رسد، توجه داشته باشید که شما خودتان این کار را کرده‌اید. مثلاً بچه‌ها با زدن دست‌های‌شان به یکدیگر و یا گفتن کلمات بی‌معنا و شنیدن بازخورد آن در گوش‌ها، نحوه‌ی استفاده از گوش‌های خود را یاد می‌گیرند. در ابتدا، امواج تراکمی هوا فقط تبدیل به فعالیت الکتریکی در مغز می‌شود؛ ولی نهایتاً به‌صورت صدا تجربه می‌شود. همین یادگیری در افرادی که ناشنوا به دنیا آمده‌اند و سرانجام در بزرگسالی عمل کاشت حلزون انجام می‌دهند، مشاهده می‌شود. یکی از دوستان که کاشت حلزون انجام داده است، می‌گفت که تأثیر آن در ابتدا به‌صورت شوک‌های الکتریکی بدون درد در درون سر است؛ به‌هیچ‌وجه حس نمی‌کرد که ارتباطی با صدا داشته باشد. ولی بعد از حدود یک ماه، تبدیل به «صدا» شد، البته صدای نامشخصی، مثل صدای خش‌خش‌دار و اعوجاج‌یافته‌ی رادیو. نهایتاً او توانست با این عمل جراحی شنوایی نسبتاً خوبی به دست آورد. این همان فرایندی است که برای هر کدام از ما هنگام یاد گرفتن نحوه‌ی استفاده از گوش‌های‌مان رخ داده است؛ فقط آن را به خاطر نداریم.

نمونه‌ی دیگر آن، لذت برقرار کردن تماس چشمی با نوزاد است. آن لحظه زیاد طول نمی‌کشد، ولی دل ما را پر غرق شادی می‌کند، از اینکه یکی از اولین چیزهایی هستیم که این عضو تازه‌وارد دنیا دیده است. ولی از کجا معلوم که

اصلاً شما را می‌بیند؟ به نظر من، بینایی مهارتی است که با گذشت زمان توسعه پیدا می‌کند. کوادریلیون‌ها نیزه از چشم‌ها به مغز می‌رسد، و نهایتاً یاد می‌گیرد که از آن‌ها الگوها را استخراج کند، و باز در آن الگوها، الگوهای دیگری می‌یابد، و در این‌ها الگوهایی دیگر... تا آنکه سرانجام خلاصه‌ی همه‌ی آن الگوها چیزی است که به آن تجربه‌ی بینایی می‌گوییم. مغز باید دیدن را یاد بگیرد، همان گونه که باید نحوه‌ی استفاده از دست‌ها و پاها را یاد بگیرد. بچه‌ها از اول رقصیدن بلد نیستند، و در مورد کیفیت ذهنی بینایی نیز همین طور است. ما می‌بایست اعضای حسی کنونی‌مان را یاد بگیریم. همین اصل می‌تواند به ما امکان دهد که اعضای حسی جدیدی را نیز یاد بگیریم.



این واقعیت که شما نمی‌توانید رنگ جدیدی را تصور کنید، به‌طور خارق‌العاده‌ای مسائل را روشن می‌کند. یعنی مرز کیفیات ذهنی ما را مشخص می‌کند، مرزی که به‌هیچ‌وجه نمی‌توانیم از آن جلوتر برویم. پس اگر معلوم شود که توانایی ایجاد حس‌های جدید امکان‌پذیر است، نتیجه‌ی جالب آن این خواهد بود که قادر نخواهیم بود حس جدید را برای شخص دیگری توضیح دهیم. مثلاً رنگ ارغوانی را شما باید تجربه کنید تا بدانید ارغوانی یعنی چه. هر چقدر هم توضیحات علمی بیشتری ارائه دهید، کسی که کوررنگ است نخواهد توانست بفهمد ارغوانی چه معنایی دارد. به همین ترتیب، سعی کنید بینایی را برای یک فرد نابینا توضیح دهید: هر چقدر هم تلاش کنید، شاید دوست نابینای شما به ظاهر وانمود کند که معنای حرف‌های شما را می‌فهمد، ولی در نهایت، بی‌فایده است. برای فهمیدن بینایی لازم است که بینایی را تجربه کنید.

به همین منوال، اگر حس جدیدی را جا بزنید — و کیفیات ذهنی جدیدی برای آن تشکیل دهید — نخواهید توانست آن را برای دیگران توصیف کنید. اصلاً کلمه‌ی مشترکی برای آن نخواهیم داشت. کسی نخواهد فهمید چه می‌گویید. زبان همه‌ی چیزها را ندارد؛ فقط روشی برای نام‌گذاری چیزهایی است که از قبل بین ما مشترک است. نوعی سیستم توافقی درباره‌ی تجارب جمعی است. نه اینکه نمی‌توانید تلاش کنید حس جدیدتان را بر زبان آورید

— مسئله این است که دیگران مبانی لازم برای فهمیدن آن را نخواهند داشت. پژوهشگران در گزارشی درباره‌ی شرکت کنندگانی که کمر بند فیل اسپیس را پوشیده بودند (دستگاهی که شمال مغناطیسی را نشان می‌دهد)، نوشتند که دو کاربر نوعی تغییر در ادراک خود را گزارش می‌کردند، و با این حال،

بیان کیفیت ادراکی آن‌ها و تجربه‌ی کیفی حاصل از این نوع متفاوت ادراک فضایی دشوار بود. این تصور در ناظران ایجاد می‌شد که آن‌ها مفاهیم لازم را برای توصیف آنچه رخ می‌دهد، ندارند، به گونه‌ای که فقط با تشبیه و مقایسه می‌توانستند تا حدودی آن را توضیح دهند.^[۷۳]

ولی آیا مشکل در توانایی بیان افراد مورد آزمایش بود، یا در توانایی ناظران برای به تصور درآوردن؟ خود مؤلفان بعداً می‌نویسند: «حرف زدن درباره‌ی تغییرات ادراکی بین سوژه‌های آزمایشی خیلی آسان‌تر بود تا انتقال دادن آن به افراد شاهد که از همه جا بی‌خبر بودند.»

در مورد ایجاد حس‌های جدید، وضعیت به این صورت خواهد بود. برای فهمیدن آن‌ها، لازم است که داده‌ها را وارد کنیم و تجربه‌ی آن را یاد بگیریم. بنابراین، طی چند دهه‌ی آینده، اگر یک وقت به خاطر حس جدیدتان احساس تنهایی و فهمیده نشدن داشته باشید، بهترین کاری که می‌توانید بکنید این خواهد بود که گروهی تشکیل دهید که افراد همان ورودی‌ها را دریافت کنند. بعد می‌توانید برای آن تجربه‌ی درونی واژه‌ی جدید ابداع کنید — مثلاً آن را «زِتِزِنفَلابی» بنامید. این کلمه برای افراد گروه شما معنی خواهد داشت، ولی برای افراد خارج از آن نه.



با داشتن روش‌های مناسب فشرده‌سازی داده‌ها، حد انواع داده‌هایی که می‌توانیم دریافت کنیم، تا کجا است؟ آیا می‌توانیم با مچ‌بند ارتعاشی نوعی حس ششم ایجاد کنیم و حس هفتم را هم از طریق ارسال مستقیم به مغز ایجاد نماییم؟ اصلاً چطور است حس هشتم را نیز با شبکه‌ی زبانی و حس نهم را با جلیقه ایجاد کنیم؟ در حال حاضر، غیرممکن است که مشخص کنیم حد آن تا کجا می‌تواند باشد. تنها چیزی که می‌دانیم، این است که مغز این قابلیت را دارد

که فضا را بین ورودی‌های مختلف به اشتراک بگذارد؛ قبلاً دیدیم که این کار چقدر راحت انجام می‌شود. این را هم دقت کنید که وقتی حسگرهای فروسرخ به قشر حسی پیکری موش‌های صحرایی متصل شد، آن‌ها توانایی دیدن با این باند بسامدی را به دست آوردند، بدون آنکه کارکردهای طبیعی حسی بدن را از دست بدهند. بنابراین، امکان دارد که نیازی به سیاست رقابتی در قشر نباشد، بلکه ما این توانایی را داشته باشیم که مجموعه‌ی حسی بزرگ‌تری را نسبت به آنچه انتظار می‌رود، برای خودمان بسازیم. از سوی دیگر، با توجه به محدود بودن فضای مغز، امکان دارد که با افزودن یک حس جدید، تفکیک‌پذیری حس‌های قبلی کاهش یابد، به‌طوری که قدرت‌های حسی جدید شما به خرج مقداری تار شدن دید، مقداری ضعیف شدن شنوایی، و مقداری کم شدن حس پوست به دست آید. کسی چه می‌داند؟ بحث درباره‌ی حد و حدود توانایی‌های ما فعلاً فقط حدس و گمان است، تا زمانی که بتوان در سال‌های آینده آن را مورد آزمایش قرار داد.

هر چقدر هم حس‌های جدیدی بتوانیم اضافه کنیم، باز یک پرسش جالب باقی می‌ماند: آیا این حواس جدید بار عاطفی خواهند داشت؟ مثلاً وقتی رایحه‌ی کیک لیموی تازه از فر درآمده را استشمام می‌کنید، تا بوی اسهال در کنار خیابان را واکنش متفاوتی دارید: مسئله فقط تعدادی صفر و یک روی صفحه‌ی نمایش نیست، بلکه یک پاسخ عاطفی کامل است.

برای فهمیدن این موضوع، از خودتان بپرسید که چرا کیک خوشبو است و مدفوع بدبو؟ به هر حال، این دو سیگنال خیلی هم تفاوت ندارند: در هر دو مورد، مولکول‌ها در هوا پخش می‌شوند و به گیرنده‌های بینی شما متصل می‌شوند. در مولکول کیک لیمویی یا مولکول مدفوع ذاتاً چیزی وجود ندارد که باعث خوشبو یا بدبو بودن آن شود: آن‌ها صرفاً مولکول‌هایی شیمیایی هستند، مثل مولکول‌هایی که از قهوه، گل اطلسی، خوکچه‌ی هندی خیس، دارچین، رنگ تازه، خزه‌های کنار رودخانه، یا شاه‌بلوط تَف‌داده بلند می‌شود. همه‌ی این اشکال مولکولی به گیرنده‌های بویایی بینی متصل می‌شوند.

ولی ما بدان علت از بوی کیک لیمویی خوشمان می‌آید که این مولکول‌ها پیش‌بینی‌کننده‌ی وجود یک منبع انرژی غنی هستند. در مورد اسهال احساس

بدی داریم، چون پر از عوامل بیماری‌زا است، و تکامل نخواست که شما تحت هیچ شرایطی آن را وارد دهان‌تان کنید. این مشابه دستگاه بینایی است که با ماتریسی از فوتون‌ها مواجه می‌شود و اگر آن فوتون‌ها نشان‌دهنده‌ی چمنزاری سرسبز باشد، موجی از خوشی در شما برمی‌انگیزد، ولی اگر منظره‌ی یک بدن مثله‌شده باشد، لرزشی همراه با نفرت را تجربه می‌کنید. یا مثلاً الگوی نیزه‌های گوش درونی که اگر آهنگی طربناک و متناسب با فرهنگ شما باشد، موجب شادمانی شما می‌شود، ولی اگر صدای جیغ کشیدن دردآلود بچه‌ای باشد، شما را متأثر می‌کند. عواطف صرفاً منعکس‌کننده‌ی معنای داده‌ها برای شما در چارچوب اهداف شما و فشارهای تکاملی است. بسیاری از نمونه‌های عاطفی در مقیاس زمانی تکاملی پدید آمده است، ولی برخی موارد هم حاصل تجارب زندگی شما است: مثلاً یک آهنگ رادیویی که دوست دارید، شما را به یاد شب خوبی در دوران دبیرستان می‌اندازد، یا یکی از لباس‌های‌تان که حس بدی را در شما ایجاد می‌کند، به علت آن است که خاطره‌ی جدایی از محبوب را در ذهن‌تان بیدار می‌کند.

اگر مدل سر سیب‌زمینی درست باشد، و مغز به‌عنوان یک کامپیوتر همه‌منظوره فعالیت کند، بدان معنا است که داده‌هایی که وارد آن می‌شود، سرانجام با یک تجربه‌ی عاطفی مرتبط خواهد شد. جریان داده‌ای هرچه باشد، و به هر طریقی به آنجا برسد، می‌تواند حامل عواطف باشد.

بنابراین، وقتی که جریان داده‌ای جدیدی را از اینترنت دریافت می‌کنیم، ممکن است ناگاه از خوشحالی به خنده بیفتیم، با تأثر گریان شویم، یا موهای‌مان سیخ شود — بسته به اینکه داده‌های جدید در ارتباط با اهداف و خواسته‌های ما چگونه باشد. مثلاً فرض کنید جریان داده‌ای جدیدی از داده‌های بازار سهام را دریافت می‌کنید. ناگهان مطلع می‌شوید که بخش فناوری در حال سقوط است، در حالی که شما سرمایه‌گذاری سنگینی در این بخش انجام داده‌اید. آیا احساس بدی خواهید داشت؟ نه اینکه فقط از نظر شناختی برایتان بد باشد، بلکه اینکه از نظر عاطفی منزجر شوید، مانند بوی گوشت گندیده یا سوزش نیش مورچه؟ از طرف دیگر، فرض کنید اطلاعات خبر بهتری به شما بدهد: سرمایه‌گذاری شما ناگهان ۶ درصد ترقی می‌کند. آیا حس خوبی خواهد داشت؟ نه فقط از

نظر شناختی، بلکه همراه با لذت عاطفی، مانند صدای خنده‌ی یک کودک یا مزه‌ی کلوچه‌ی شکلاتی گرم؟

اگر فکر می‌کنید بروز این واکنش‌های عاطفی در پاسخ به جریان‌های داده‌ای جدید عجیب است، بد نیست که در نظر داشته باشید که تمام معنای زندگی ما صرفاً حاصل جریان‌های داده‌ای است که در سیاق اهداف ما، حائز اهمیت هستند. و سرانجام، قبل از به پایان بردن این بحث، یک پرسش دیگر هم شایان توجه است: آیا داشتن یک حس جدید باعث خستگی یا استرس خواهد شد؟

فکر نمی‌کنم. فکرش را بکنید که یک دوست نابینا به شما بگوید که به نظر او، داشتن حس بینایی باید خیلی استرس‌زا باشد: فکرش را بکنید که یک جریان داده‌ای دیگر دارید! یعنی مدام سیلی از میلیاردها فوتون از دوردست‌ترین افق‌ها به سوی شما سرازیر می‌شود؟ یعنی اگر کسی پانصد متر آن طرف‌تر هم باشد، باز می‌توانید بفهمید که او چکار می‌کند؟ واقعاً دریافت کردن این همه اطلاعات به‌طور مداوم باید خیلی اعصاب‌خردکن باشد.

شما اگر بینا هستید، خودتان می‌دانید که بینایی چندان هم استرس‌آور نیست. جایی بین مطلوب و خسته کننده است. شما بی‌آنکه زحمتی بکشید، آن را با واقعیت خودتان ممزوج می‌کنید. چرا؟ چون که صرفاً یک جریان داده‌ای مثل جریان‌های دیگر است، و تلفیق داده‌ها کار همیشگی مغز است.

برای یک حس جدید آماده‌اید؟

در این فصل، به بررسی ایجاد حس‌های جدید پرداختیم. در مقیاس زمانی تکاملی، اگر جهش‌های ژنتیکی تصادفی بتوانند یک منبع اطلاعات را به سیگنال‌های الکتریکی ترجمه کنند، مغز آن را به‌عنوان یک دستگاه جازدنی در نظر می‌گیرد، و اطلاعاتی را که از آن وارد می‌شود، رمزگشایی می‌کند. اگر چشم‌ها را به قطعه‌ای از قشر وصل کنید، آن قطعه تبدیل به قشر بینایی خواهد شد، اگر گوش‌ها را به آن وصل کنید، قشر شنوایی خواهد شد، و اگر پوست را وصل کنید، تبدیل به قشر حسی‌پیکری خواهد گردید. این یکی از بزرگ‌ترین ترفندهای طبیعت را آشکار می‌کند: برای بهره‌گیری از منابع جدید انرژی در جهان، نیازی نیست که مغز دوباره از صفر طراحی شود. بلکه کافی است طبیعت

دستگاه‌های محیطی جدیدی را طراحی کند: حسگر نور، شتاب‌سنج، حسگر فشار، حفره‌ی حرارتی، گیرنده‌ی الکتریکی، مغناطیسی، پوزه‌ی انگشت‌مانند، یا هر چیز دیگری که در رؤیا داشته باشد.

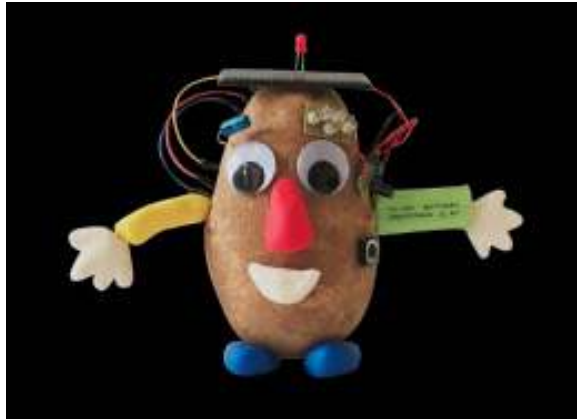
بعد این آفریده‌های طبیعت، هر چه که باشند، خودشان هم می‌توانند رؤیا ببینند. همان گونه که از کاشت حلزون مایکل کوروست یا کاشت شبکه‌ی تری بایلند معلوم می‌شود، می‌توان با جایگزین کردن دستگاه محیطی اصلی با یک دستگاه مصنوعی، از مزیت انعطاف‌پذیری مغز بهره گرفت. لازم نیست که دستگاه جایگزین به زبان بومی مغز سخن بگوید، کافی است لهجه‌اش به قدر کافی به آن نزدیک باشد. مغز خودش می‌فهمد چطور از داده‌ها استفاده کند.

سپس این فکر را یک قدم جلوتر بردیم و به بررسی جایگزینی حسی پرداختیم. توانایی مغز برای مدارسازی مجدد، قابلیت انعطاف‌پذیری خیلی بالایی به آن می‌دهد: مغز خود را به‌طور پویا بازآرایی می‌کند تا داده‌ها را جذب کند و با آن تعامل کند. از این رو، می‌توانیم با استفاده از شبکه‌های الکتریکی، اطلاعات بینایی را از طریق زبان وارد کنیم، با موتورهای ارتعاشی، اطلاعات شنوایی را از پوست وارد کنیم، و با تلفن موبایل، جریان داده‌ای ویدئویی را از طریق گوش‌ها وارد نماییم. با این دستگاه‌ها می‌توان ظرفیت‌های جدیدی را به مغز داد، که نمونه‌ی آن را در مورد تقویت حسی (گسترش دادن محدوده‌ی یک حس که از قبل هم دارید) و یا افزایش حسی (استفاده از جریان‌های داده‌ای کاملاً جدید) دیدیم. این دستگاه‌ها در ابتدا دستگاه‌هایی حجیم به همراه کامپیوتر و کابل بود، ولی خیلی زود تبدیل به دستگاه‌هایی پوشیدنی و ظریف شده است، و این پیشرفت، خیلی بیشتر از هرگونه تغییر در مبانی علمی آن، باعث افزایش استفاده و مطالعه‌ی آن‌ها خواهد شد.

همان طور که در فصل‌های آینده خواهیم دید، مغز مدارهای خود را بازآرایی می‌کند تا نحوه‌ی بازنمایی جهان را بهینه‌سازی کند. بنابراین، وقتی که فرصت‌های داده‌ای جدید و مفیدی را به آن وارد می‌کنیم، مغز آن‌ها را تفسیر می‌کند. این مطلب دو شرط دارد که بعداً درباره‌ی آن‌ها بیشتر بحث خواهیم کرد: داده‌های جدید زمانی بهتر یاد گرفته می‌شوند که در ارتباط با اهداف **کاربر** و در کنترل اعمال او باشند.

با توجه به دانش کنونی ما، هیچ مرزی برای تصور کردن توسعه‌های حسی که خواهیم ساخت، وجود ندارد: بینایی در سایر بخش‌های طیف الکترومغناطیسی، شنوایی فراصوتی، و وصل شدن به حالت‌های نامرئی فیزیولوژی بدن خودتان. آدم به این فکر می‌افتد که شاید این نوع فناوری موجب ایجاد جامعه‌ای دویا شود: داراها و ندارها. به نظر من، خطر ایجاد طبقات اقتصادی متفاوت پایین است، زیرا این دستگاه‌ها ارزان‌قیمت هستند. همانند انقلاب فناوری که منجر به گسترش تلفن‌های هوشمند شد (که در اکثر کشورها از انقلاب کامپیوتر شخصی فراتر رفته است)، فناوری حسی را می‌توان در سراسر جهان با هزینه‌ای حتی پایین‌تر از موبایل ارائه کرد. این فناوری منحصر به ثروتمندان نیست. بلکه من فکر می‌کنم که آینده خیلی عجیب‌تر از داراها و ندارها است: آینده به صورت انواع مختلف داشتن خواهد بود. برخلاف توسعه‌ی عالم‌گیر تلفن‌های هوشمند، در آینده ممکن است دسته‌های مختلفی از مردم داشته باشیم که دارای ابرحس‌های متفاوتی هستند. مثلاً تصور کنید که شما حس معاملات آتی نفت دارید، در حالی که همسایه‌ی شما در زمینه‌ی سلامت ایستگاه فضایی آموزش دیده است، و مادران از طریق ادراک نور فرابنفش، باغبانی می‌کند. شاید ما به یک معنا در آستانه‌ی یک رویداد گونه‌زایی هستیم، که در آن یک گونه به چند گونه تقسیم می‌شود! کسی چه می‌داند؟ در بهترین حالت، می‌توانیم سناریویی هالیوودوار را به تصور درآوریم که در آن تیمی از ابرقهرمان‌ها که هر کدام توانایی ویژه‌ای دارند، مانند قطعات یک جورچین کنار هم جمع می‌شوند تا بر یک موجود شرور پیروز شوند.

واقعیت این است که پیش‌بینی آینده کار دشواری است. در هر حال، تنها چیزی که شکی در آن نیست، این است که در آینده بیشتر خواهیم توانست دستگاه‌های محیطی جازدنی خودمان را انتخاب کنیم. ما دیگر گونه‌ای طبیعی نیستیم که مجبور است میلیون‌ها سال صبر کند تا مادر طبیعت موهبت حسی دیگری به آن بدهد. بلکه مادر طبیعت، مثل هر والد خوب دیگری، این ظرفیت شناختی را به ما داده است که برویم و خودمان تجربه‌مان را شکل بدهیم.



تمام مثال‌هایی که تا اینجا دیدیم، همگی شامل ورودی از حواس بدن هستند. و اما در مورد کار دیگر مغز، یعنی خروجی به اندام‌های حرکتی بدن، چه می‌توان گفت؟ آیا در اینجا هم انعطاف‌پذیری داریم؟ آیا می‌توانیم دست‌های بیشتری به بدنمان اضافه کنیم، یا پای مکانیکی داشته باشیم، یا روباتی را در آن طرف دنیا با افکارمان کنترل کنیم؟ پرسش خوبی است.

۵ | چگونه بدن بهتری داشته باشیم؟

لطفاً دکتر اختاپوس واقعی دستش را بلند کند!

در مجله‌ی مصور مرد عنکبوتی شگفت‌انگیز شماره‌ی ۳ (ژوئیه‌ی ۱۹۶۳)، دانشمندی به نام اوتو گانتر اکتاویوس دستگاهی را مستقیم به مغزش وصل می‌کند تا چهار بازوی روباتیک اضافه را کنترل نماید. این اندام‌های حرکتی فلزی، که به همان نرمی ضمایم طبیعی بدن او حرکت می‌کنند، به او امکان می‌دهند که از فاصله‌ی ایمن با مواد رادیواکتیو کار کند. هر کدام از اندام‌های حرکتی دکتر اکتاویوس قادر است به‌طور مستقل کار کند — همان‌طور که شما با یک دست فرمان خودرو را می‌گیرید و با دست دیگر ایستگاه رادیو را عوض می‌کنید و با پای‌تان پدال گاز را فشار می‌دهید.

از بخت بد دکتر اکتاویوس، انفجاری موجب آسیب دیدن مغز او می‌شود، و او محکوم به زندگی همراه با شرارت می‌شود. با حس جاودانگی جدیدی که به دست آورده، از بازوهای اضافه‌اش برای سرقت از گاوصندوق‌ها، بالا رفتن از ساختمان‌ها، و روش‌های جدید مبارزه‌ی تن‌به‌تن چنددستی استفاده می‌کند. او تحت افسون شخصیت تغییریافته‌ی جدید، به نام دکتر اختاپوس مشهور می‌شود.

وقتی که این کتاب مصور در سال ۱۹۶۳ عرضه شد، فقط در داستان‌های علمی-تخیلی می‌شد تصور کرد که بتوان مغز را مستقیماً به اندام‌های حرکتی روباتیک متصل کرد و مغز به راحتی بتواند آن‌ها را کنترل کند. ولی این فکر به طرز حیرت‌انگیزی از افسانه به واقعیت پیوسته است.



قبلاً دیدیم که وقتی کسی یک اندام حرکتی‌اش را از دست می‌دهد، مغز خودش را بازآرایی می‌کند — مانند زمانی که گلوله‌ای به دست هوریشیو نلسون اصابت کرد. ولی این تنها نیمه‌ی ورودی داستان است. در سمت خروجی، بخشی از قشر نیز که حرکت‌دهنده‌ی بدن است (نقشه‌ی حرکتی) خودش را تطبیق می‌دهد. وقتی که دستگاه عصبی متوجه می‌شود که یک اندام حرکتی دیگر وجود ندارد، منطقه‌ی حرکتی قشر که به آن اختصاص داشته است، کوچک می‌شود.^[۱] مغز خودش را بازآرایی می‌کند تا با نقشه‌ی جدید بدن هماهنگ شود.

نمونه‌ی آن زنی است که در اینجا او را لورا می‌نامیم.^[۲] لورا دستش را در یک حادثه از دست داد. قشر حرکتی اولیه‌ی او طی چند هفته شروع به تغییر کرد. مناطقی از مغز که ماهیچه‌های اطراف بازو (مانند ماهیچه‌ی دوسر و سه‌سر) را کنترل می‌کرد، به تدریج ناحیه‌ای از قشر را که مختص کنترل کردن دست بود، به خود منضم کردند. این مطلب را به گونه‌ی دیگری نیز می‌توانیم بیان کنیم: نورون‌هایی که قبلاً دست او را حرکت می‌دادند، حالا وظیفه‌ی جدیدی دریافت کردند و به تیم مربوط به ماهیچه‌های بازو ملحق شدند. با فرستادن پالس‌های مغناطیسی کوچک از روی جمجمه و تعیین ماهیچه‌هایی که در نتیجه‌ی آن تکان می‌خوردند، نقشه‌ی قشر حرکتی لورا اندازه‌گیری شد (تکنیکی که تحریک مغناطیسی تراجم‌جمه‌ای نامیده می‌شود). با استفاده از این تکنیک، پژوهشگران مشاهده کردند که منطقه‌ی مربوط به ماهیچه‌های بازو طی چند هفته گسترش یافت.

در فصل‌های بعد، خواهیم دید که مغز این ترفند را چگونه انجام می‌دهد، ولی فعلاً به این مسئله می‌پردازیم که چرا دستگاه حرکتی خودش را این گونه تطبیق می‌دهد. پاسخ این است: نواحی حرکتی خودشان را به گونه‌ای بهینه‌سازی می‌کنند که تجهیزات موجود را به حرکت وادارند. و این اصل، در را به روی نقشه‌های زیادی برای بدن باز می‌کند.

نقشه‌ی استاندارد در کار نیست

با یک نگاه به قلمرو جانوران معلوم می‌شود که حیوانات انواع و اقسام بدن‌های عجیب و غریب دارند، از مورچه‌خوار گرفته تا موش ستاره‌پوزه، از تنبل‌ها

گرفته تا اژدهامایان، و از هشت پا گرفته تا نوک اردکی.
ولی معما این است که ژنوم‌های همه‌ی جانوران در این قلمرو (از جمله خود ما) شباهت حیرت‌انگیزی با یکدیگر دارند.

پس چطور مخلوقات می‌توانند با چنین تجهیزات متنوعی — همچون دُم گیرنده، چنگال، حنجره، قلاب، شارب، تنه، و بال — کار کنند؟ بزهای کوهی چگونه در پریدن از روی سنگ‌ها مهارت دارند؟ چگونه جغدها این قدر خوب می‌توانند از هوا به طرف موش‌ها شیرجه برونند؟ چگونه قورباغه‌ها می‌توانند با زبان‌شان مگس‌ها را بگیرند؟

برای فهمیدن این مطلب، برمی‌گردیم به مدل سر سیب‌زمینی، که می‌توان دستگاه‌های ورودی مختلف را به آن وصل کرد. دقیقاً همین اصل برای خروجی هم صادق است. براساس این دیدگاه، مادر طبیعت آزادانه می‌تواند انواع و اقسام دستگاه‌های حرکتی جازدنی عجیب و غریب را مورد آزمایش قرار دهد. انگشت باشد، یا بالچه، یا باله؛ دو پا باشد، یا چهار پا، یا هشت پا؛ دست باشد، یا چنگال، یا بال — در هر حال، نیازی نیست که اصول بنیادین عملکرد مغز در هر مورد مجدداً طراحی شود. دستگاه حرکتی به سادگی متوجه می‌شود که تجهیزات موجود را چگونه به حرکت درآورد.

شاید بگویید: صبر کنید، ببینم. اگر بدن را به این راحتی می‌توان با تغییر دادن ژنوم دگرگون کرد، پس چرا ما انسان‌هایی نمی‌بینیم که دارای انواع عجیب و غریب طراحی بدن باشند؟

اتفاقاً، می‌بینیم. مثلاً بعضی وقت‌ها بچه‌ها با دُم به دنیا می‌آیند،^[۲] که نشان می‌دهد که خیلی راحت ممکن است دومینوهای ژنتیکی فروبریزد و سازه‌های بزرگ‌تری ایجاد کند.

غیر از دُم، بعضی وقت‌ها ممکن است انسان با اندام‌های حرکتی اضافه به دنیا بیاید. مثلاً در شانگهای، اخیراً پسری به نام جیه-جیه متولد شد که یک دست اضافه‌ی کامل داشت.^[۳] او دارای دو دست چپ کامل بود که یکی از آن‌ها بالای دیگری قرار گرفته بود.



بعضی وقت‌ها بچه‌ها با دم به دنیا می‌آیند، که نشان می‌دهد که تغییرات کوچک ژنتیکی می‌تواند تغییرات بزرگی را در معماری بدن ایجاد کند.



جیه-جیه با یک دست اضافه به دنیا آمد.

این جور چیزها گاهی از اوقات به علت وجود یک قُل انگل در رحم ایجاد می‌شود: یکی از قل‌ها به آخر نمی‌رسد و جذب بدن قل سالم‌تر می‌شود. ولی در مورد جیه-جیه این‌طور نبود. صرفاً ژنتیک او باعث ایجاد دست سوم شده بود. تیمی از جراحان در چین چندین ساعت را صرف جدا کردن دست چپ درونی

کردند، چون هر دو دست چپ به خوبی تکوین یافته بود. اغلب اوقات، اندام حرکتی اضافه کوچک است، و انتخاب اینکه کدام یک از آن‌ها برداشته شود، به آسانی امکان‌پذیر است. در مورد جیه-جیه، هر دو دست چپ دارای استخوان کتف جداگانه بود، به‌طوری که انجام عمل جراحی دشوار بود.

وجود دُم و دست اضافه نشان می‌دهد که با تغییرات کوچک ژنتیکی، نقشه‌ی بدن می‌تواند آشکارا تغییر کند. نیازی به گفتن نیست که این نوع لغزش‌های ژنتیکی مرتب در دور و بر ما بروز می‌کند: بعضی آدم‌ها بازویی بلندتر، انگشتان کلفت‌تر، شست پای کوتاه‌تر از انگشت مجاور، لگن پهن‌تر، و شانه‌های عریض‌تری دارند.

و با آنکه نزدیک‌ترین خویشاوندان ما، یعنی شمپانزه‌ها، از نظر ژنتیکی تقریباً با ما یکسان هستند، ولی تفاوت‌های زیادی در نقشه‌ی بدن‌شان دارند؛ مثلاً ماهیچه‌ی دوسر بازویی آن‌ها به نقطه‌ی بالاتری متصل می‌شود، لگن آن‌ها بیشتر به طرف بیرون چرخیده است، و انگشتان پای آن‌ها بلندتر است. مغز شمپانزه که در اتاق فرماندهی تاریکش قرار گرفته است، خیلی راحت می‌فهمد که چگونه بدن شمپانزه را به حرکت درآورد که بالای درخت‌ها تاب بخورد و روی مُشت‌هایش راه برود، و مغز انسان هم به راحتی می‌فهمد که چگونه پینگ‌پونگ بازی کند و سالسا برقصد. در هر دو مورد، مغز به راحتی متوجه می‌شود که چگونه تجهیزاتی را که در اختیارش قرار گرفته است، به کار بیندازد. برای اینکه قدرت نهفته در این اصل را بفهمید، مَت استاتزمن را در نظر بگیرید که بدون دست متولد شد. او بعداً به تیراندازی با کمان علاقه‌مند شد، و یاد گرفت که با پاهایش با تیر و کمان کار کند.

او با حرکاتی نرم، تیر را با انگشتان پایش روی زه می‌گذارد، سپس کمان را با پای راستش بلند می‌کند. دستگاه با بندی به شانه‌ی او بسته شده است، که به او امکان می‌دهد که کمان را در سطح چشم قرار دهد. کمان را با پایش به جلو می‌کشد و در آن فشار ایجاد می‌کند و زمانی که هدف‌گیری کرد، تیر را پرتاب می‌کند. مت صرفاً آدم با استعدادی در تیراندازی نیست، بلکه بهترین نفر در جهان است: در زمان نوشتن این کتاب، رکورد جهانی طولانی‌ترین پرتاب دقیق تیر و کمان را در اختیار دارد. احتمالاً این چیزی نیست که دکترها با دیدن

بچه‌ای که بدون دست از رحم خارج شد، برای او پیش‌بینی می‌کردند. ولی شاید آن‌ها متوجه نبودند که مغز او با چه راحتی می‌تواند منابع خود را تطبیق دهد تا مشکلات را در دنیای بیرون حل کند.



مت استاتزمن، «کمانگیر بی‌دست».

این نوع انعطاف‌پذیری در سرتاسر قلمرو جانوران دیده می‌شود. نمونه‌ی آن سگی است که فیث نام دارد. فیث بدون پاهای جلویی به دنیا آمد و از دوران تولدگی یاد گرفت که مانند یک آدم، روی دو پای عقب راه برود. گرچه شاید ما فکر می‌کردیم که مغز سگ‌ها طوری برنامه‌ریزی شده که با بدن استاندارد سگ کار کند، ولی فیث نشان می‌دهد که مغز با هرگونه تجهیزاتی که در اختیارش قرار بگیرد، به راحتی امکان حرکت کردن را فراهم می‌کند.

کمانگیران بی‌دست و سگ‌های دوپا این واقعیت را روشن می‌کنند که مغز از قبل برای بدن خاصی برنامه‌ریزی نشده است، بلکه خود را برای حرکت کردن، تعامل کردن، و موفق شدن تطبیق می‌دهد. و این فقط درباره‌ی بدنی که با آن متولد می‌شوید نیست، بلکه به هرگونه فرصتی که در پیش روی شما قرار می‌گیرد، مربوط می‌شود. نمونه‌ی آن سگ بولداگی در کالیفرنیا به نام سر بلیک است، که در اسکیت‌بوردسواری مهارت پیدا کرده است. سر بلیک روی اسکیت‌بورد می‌پرد، و پنجه‌ی جلویی‌اش را روی زمین می‌کشد تا شتاب بگیرد. در لحظه‌ی مناسب، پنجه‌ی جلو را نیز روی تخته می‌گذارد و در حال حرکت به

۵ | چگونه بدن بهتری داشته باشیم؟ ۱۳۷

جلو خم می‌شود. وقتی به مانعی می‌رسد، درست مثل آدم‌ها، وزنش را جابه‌جا می‌کند تا از کنار آن عبور کند. وقتی کارش تمام شد، سرعت حرکت تخته را کم می‌کند، و سپس از آن پیاده می‌شود. با توجه به اینکه اصولاً چرخ در تاریخ تکاملی سگ‌ها هیچ جایی ندارد، این نشان‌دهنده‌ی قابلیت سازگاری مغز برای بهره‌گیری از امکانات جدید است.



مغز خود را با فرصت‌های بدن سازگار می‌کند. فیث به علت فقدان پاهای جلو، مجبور است روی دو پا راه برود. دستگاه‌های حرکتی او با نقشه‌ی بدنش سازگار شده، به‌طوری که توانسته زندگی نرمالی داشته باشد (گرچه خبرنگاران و عکاس‌ها مرتب مزاحمش می‌شوند).



بولداگ‌ها در تکامل خود پا دارند نه چرخ، ولی سر بلیک به راحتی با این روش جدید جاپیمایی سازگار شده است.

نمونه‌ی دیگر آن سگی به نام شوگر است که تخته‌موج‌سواری یاد گرفته و حالا وارد تالار افتخار بین‌المللی موج‌سواری سگ‌ها شده است. اصلاً شوگر را ول کنید — همین که چیزی به نام تالار افتخار بین‌المللی موج‌سواری سگ‌ها داریم، خودش حیرت‌آور است. معمولاً در دنیای علم کسی مغز سگ‌ها را از نظر اینکه بتوانند روی تخته‌موج بلند تعادل خود را حفظ کنند، مطالعه نمی‌کند. ولی این کار امکان‌پذیر است. تنها چیزی که لازم است فرصت است، و فرصت که فراهم شد، دستگاه حرکتی سگ‌ها خودش راه آن را یاد می‌گیرد.



شوگر در سال ۲۰۱۷ در ماراتون موج‌سواری سگ‌ها در هانتینگتون بیچ کالیفرنیا رتبه‌ی اول را به دست آورد. او مکرراً در مسابقات موج‌سواری شرکت می‌کند، و رقبای او نژادهای مختلف سگ از گلدن رتریور تا پامرانین هستند.

سر بلیک، شوگر، و رقبای دیگر آن‌ها مهارت حیرت‌آوری برای حرکت در خیابان یا روی امواج دارند، و حتی در برخی از موارد بهتر از گونه‌ی خلاق هستند که این ورزش‌ها را اختراع کرده است. این سگ‌ها چطور توانسته‌اند تا این حد مهارت پیدا کنند؟

یاد گرفتن حرکت

یک بچه‌ی کوچک یاد می‌گیرد که چگونه با استفاده از دهان و نفس‌اش تکلم کند — این کار را براساس ژنتیک یا مراجعه به ویکی‌پدیا انجام نمی‌دهد، بلکه با گفتن کلماتی مانند بابا و دادا یاد می‌گیرد. صداها از دهانش خارج می‌شود، و به گوشش می‌رسد. سپس مغز او می‌تواند مقایسه کند که صداها و چقدر به

حرف‌هایی که از مادر یا پدرش شنیده، نزدیک است. در ادامه یکی از چیزهایی که به پیشرفت او کمک می‌کند، این است که برای بعضی صداها تشویق می‌شود و برای بعضی دیگر نه. به این طریق، بازخورد مداوم به او امکان می‌دهد که گفتارش را بهبود بخشد، تا زمانی که زبان انگلیسی، چینی، بنگالی، جاوه‌ای، امهری، پُمون، چوکچی، یا هر زبان دیگری را از میان هفت هزار زبانی که در نقاط مختلف جهان تکلم می‌شود، به‌طور روان یاد بگیرد.

به همین طریق، مغز حرکت دادن بدن را نیز از طریق تاتی‌تاتی کردن یاد می‌گیرد.

مثلاً همان بچه را در گهواره در نظر بگیرید. او شست پایش را گاز می‌گیرد، با دست به پیشانی‌اش می‌زند، موهای خودش را می‌کشد، انگشتانش را خم می‌کند، و الی آخر، و با این کارها می‌فهمد که خروجی حرکتی او متناظر با بازخورد حسی است که دریافت می‌کند. به این طریق، زبان بدنش را یاد می‌گیرد، و درمی‌یابد که خروجی‌های او با ورودی‌های بعدی انطباق دارد. با این تکنیک، ما سرانجام یاد می‌گیریم که راه برویم، توت‌فرنگی را توی دهانمان بگذاریم، در استخر شناور بمانیم، از میله‌های بارفیکس آویزان شویم، و حرکت پروانه انجام دهیم.

تازه جالب‌تر اینکه از همان روش یادگیری برای وصل کردن زوایدی به بدن‌مان استفاده می‌کنیم. مثلاً دوچرخه‌سواری را در نظر بگیرید، وسیله‌ای که مسلماً ژنوم ما از آن خبر نداشته است. مغز ما در ابتدا در شرایط بالا رفتن از درخت، حمل کردن غذا، ساختن ابزارها، و راه رفتن در مسافت‌های طولانی شکل گرفته است. ولی سوار شدن موفقیت‌آمیز به دوچرخه چالش‌های متفاوتی دارد، مانند حفظ تعادل دقیق تنه، تغییر دادن جهت حرکت با استفاده از دست‌ها، و توقف کردن ناگهانی با فشردن دست. با وجود پیچیدگی‌ها، هر کودک هفت‌ساله‌ای می‌تواند نشان دهد که این نقشه‌ی گسترش‌یافته‌ی بدن به آسانی به مجموعه‌ی کارهای قشر حرکتی اضافه می‌شود.

و تازه این منحصر به دوچرخه‌های معمولی نیست. نمونه‌ی آن دستین سندلین است، مهندسی که یکی از دوستانش دوچرخه‌ی خیلی عجیبی را به او داد: این دوچرخه سیستم **چرخ‌دنده‌ای** عجیبی داشت که اگر دستین فرمان آن را

به چپ می چرخانند، دوچرخه به سمت راست می چرخید، و برعکس. دستین با خودش فکر کرد که یاد گرفتن آن نباید کار مشکلی باشد، چون مفهوم آن ساده بود: هر طرف می خواهید بروید، فرمان را به طرف مقابل بچرخانید. ولی از قضای روزگار، سوار شدن به این دوچرخه به طور تحمل ناپذیری مشکل بود، زیرا لازم بود که اول عملکرد طبیعی فرمان دوچرخه را از ذهن تان پاک کنید. یاد گرفتن کار با این دوچرخه برای قشر حرکتی او به آسانی درک مفهومی آن نبود؛ به هر حال، طرز کار آن را که فهمیده بود. ولی این بدان معنا نبود که می توانست با آن کار کند.



دوچرخه با عملکرد معکوس فرمان.

ولی کم کم قلق آن دستش آمد. هر بار دستین حرکتی را انجام می داد، از محیط اطراف بازخورد دریافت می کرد (داری می افتی به طرف چپ؛ داری می خوری به صندوق پست؛ داری می پیچی جلوی یک کامیون)، و با استفاده از این بازخورد، حرکات بعدی اش را اصلاح می کرد. پس از چند هفته تمرین روزانه، کاملاً در آن مهارت پیدا کرد. سوار شدن به این دوچرخه ی عجیب را همان طور یاد گرفت که در بچگی دوچرخه سواری معمولی را یاد گرفته بود: از طریق تاتی تاتی حرکتی.

اگر تا حالا در کشوری که فرمان ماشین در طرف دیگر است، رانندگی کرده باشید، با این نوع چالش یادگیری آشنا هستید. مثلاً اگر راننده ای آمریکایی در انگلستان باشید، یا برعکس، تا وقتی قلق کار دست تان بیاید، بارها اتفاق می افتد که به جهت خلاف بیپیچید. ولی بالاخره رانندگی تان بهتر می شود، چون دستگاه بینایی شما به پیامد هر عمل نگاه می کند و براساس آن همه چیز را اصلاح

می‌کند. اگر همه چیز به خوبی پیش برود، دستگاه اعصاب شما قبل از آنکه بی‌گدار به آب بزنید، اصلاحات لازم را انجام می‌دهد.



عجیب است که می‌توانیم بدنمان را به اشکال مختلف به کار بگیریم، در حالی که تنها یک قشر حرکتی داریم. خوشبختانه، مغز با زیرکی زیادی می‌تواند با استفاده از شرایط محیطی برنامه‌ی لازم را به اجرا درآورد. مغز از طرح‌واره استفاده می‌کند (الگوهای برای سازمان‌دهی دسته‌های مختلف اطلاعات)، به‌گونه‌ای که وقتی سوار دوچرخه هستید، با حرکت دورانی ران‌ها حرکت می‌کنید، در حالی که وقتی دارید می‌دوید، دست‌های‌تان را حرکت می‌دهید و پای‌تان را بلند می‌کنید تا در جاده از روی چیزی عبور کنید.

یک مثال ارائه می‌کنم از اینکه چطور من توانستم طرح‌واره‌ی خودم را به‌طور آگاهانه تجربه کنم. چند روز پیش آینه‌ی عقب وانتم شکست. قصد داشتم تعمیرش کنم، ولی گرفتار نوشتن این کتاب بودم، و لذا چند هفته بدون آن رانندگی کردم. علت اینکه بالاخره تعمیرش کردم، مسئله‌ای بود که داشت دیوانه‌ام می‌کرد: هر وقت در صندلی ماشین نشسته بودم، چشم‌هایم حرکتی پرتابی به طرف بالا و راست انجام می‌داد، به‌طوری که ناخودآگاه از خودم می‌پرسیدم که چرا دارم به بالای درخت‌های کنار جاده نگاه می‌کنم. بدیهی است که چشم‌هایم به جایی که قبلاً آینه بوده نگاه می‌کرد و قصد داشت که پشت سرم را ببیند. در حالی که وقتی در آشپزخانه، دفتر کار، یا باشگاه ورزشی هستم، هیچ وقت چشم‌هایم به بالا و پایین منحرف نمی‌شود تا پشت سرم را ببیند؛ این کار را فقط وقتی می‌کنم که در صندلی راننده داخل ماشینم هستم. نکته‌ی جالب این است که این طرح‌واره همیشه کاملاً ناخودآگاه بوده است — وضعیت محیط اطراف را می‌سنجیده و کارکردهای حرکتی مرا متناسب با آن تغییر می‌داده است. به همان طریق، وقتی که مشغول دویدن هستم، هیچ وقت برای توقف کردن دستم را فشار نمی‌دهم، و وقتی که سوار دوچرخه هستم، برای رد شدن از روی سیخی که روی زمین افتاده، پایم را بلند نمی‌کنم. به همین ترتیب، مغز دستین نیز طرح‌واره‌ی جدیدی را یاد گرفت. وقتی که

بالاخره سوار شدن به دوچرخه‌ی عجیب را یاد گرفت، متوجه شد که دیگر به راحتی نمی‌تواند به دوچرخه‌ی معمولی سوار شود. ولی این کوتاه‌مدت بود، و با کمی تمرین توانست بر هر دو نوع مسلط شود. حالا می‌تواند سوار هر کدام از دو نوع دوچرخه، عجیب یا معمولی، شود، و مغزش به راحتی بسته به شرایط ماهیچه‌هایش را به کار می‌اندازد.



برمی‌گردیم به تاتی‌تاتی حرکتی. فقط بچه‌ها و دوچرخه‌سوارها نیستند که حرکت کردن به این روش را یاد می‌گیرند؛ در رباتیک هم این روش جدیداً به‌عنوان رویکردی قوی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمونه‌ی آن رباتی به نام استارفیش (ستاره‌ی دریایی) است. این ربات تصویری از بدن خود می‌سازد، و بنابراین، یاد می‌گیرد که چه کارهایی می‌تواند انجام دهد. لازم نیست از قبل برنامه‌نویسی شود؛ خودش طرح فیزیکی خود را یاد می‌گیرد.^[۵]



ربات استارفیش که مجهز به اندام‌ها و مفاصل و عملگرهای مختلفی است، شکل بدن خودش و نحوه‌ی به کار انداختن آن را یاد می‌گیرد.

استارفیش حرکتی را به‌طور آزمایشی انجام می‌دهد، مثل بچه‌ای که دست یا پایش را تکان می‌دهد، و عواقب آن را می‌سنجد — برای این کار، از چرخش‌نماهای خود استفاده می‌کند تا ببیند که حرکت انجام شده بدنه‌ی مرکزی را چقدر کج کرده است. صرفاً با یک حرکت اندام نمی‌تواند بفهمد بدنش چه شکلی است و چه تعاملی با دنیا خواهد داشت، ولی بازخورد حاصله، فضای امکان‌ها را محدودتر می‌کند. حالا فضای کوچک‌تری از فرضیه‌ها درباره‌ی شکل احتمالی خود دارد. حالا وقت آن است که حرکت بعدی را انجام دهد. به جای اینکه حرکتی تصادفی را انجام دهد، حرکتی را انتخاب می‌کند که به بهترین وجه بتواند از میان فرضیه‌های باقی‌مانده، فرضیه‌ی صحیح‌تر را انتخاب کند. با انتخاب حرکت پیاپی بعدی به‌گونه‌ای که فضای گزینه‌ها را به درستی تقسیم کند، تصویر هر چه واضح‌تری را از بدنش به دست می‌آورد.^[۶]

این روبات به روش تاتی‌تاتی حرکتی یاد می‌گیرد که عملگرهای مکانیکی‌اش را به کار بیندازد، و بدین خاطر است که اگر حتی یکی از پاهای این روبات را از آن جدا کنید، باز هم دوباره راه رفتن را یاد خواهد گرفت. مانند فیلم نابودگر است، که در آن، سارا کانر نابودگر را آتش زد و پاهایش را سوزاند؛ او همچنان به کارش ادامه داد، و با آنکه طرح بدنش تغییر کرده بود، ولی اهدافش را همچنان دنبال می‌کرد.

ساختن روباتی که قابلیت تاتی‌تاتی و خودکاوی داشته باشد، خیلی مؤثرتر و انعطاف‌پذیرتر از روباتی است که از قبل به روش معینی برنامه‌نویسی شده باشد. و در قلمرو جانوران، طبیعت فقط چند ده هزار ژن برای ساختن یک موجود در اختیار دارد، بنابراین، به‌هیچ‌وجه نمی‌تواند تمام عمل‌هایی را که فرد در جهان انجام می‌دهد، از قبل برنامه‌نویسی کند. تنها چاره‌ای که دارد، چیست؟ اینکه سیستمی بسازد که خودش از خودش سر در بیاورد.

و این ترفند است که به سگ‌ها امکان می‌دهد که اسکیت‌بوردسواری و تخته‌موج‌سواری یاد بگیرند. آن‌ها با تاتی‌تاتی کردن بدنشان، حرکات، وضعیت‌ها، موقعیت‌ها، و تعادل‌های مختلف را امتحان می‌کنند، و نتایج آن را می‌سنجند. آیا خم شدن به طرف چپ مرا با موج جلو می‌برد، یا توی آب‌های سرد می‌اندازد؟ آیا اگر در حالی که خم شده‌ام، پای عقبی‌ام را فشار

بدهم، موجب حرکت اسکیت‌بورد و فریاد خوشحالی صاحبم می‌شود، یا سبب می‌شود که به طرز دردناکی با شیر آتش‌نشانی برخورد کنم؟ بازخورد این امکان را به سیستم حرکتی می‌دهد که میلیون‌ها پارامتر را تنظیم کند و دفعه‌ی بعد عملکرد بهتری داشته باشد. به این طریق، ارگانیسم مورد نظر مدلی از تعامل بدن خود با جهان اطراف می‌سازد. ظرفیت‌های خود و پیامد حرکات خود را متوجه می‌شود. می‌فهمد که محیط اجازه‌ی چه کارهایی را می‌دهد. با این حلقه‌ی بازخورد دایمی، کودک، سگ ورزشکار، یا روبات استارفیش یاد می‌گیرد که از طرح بدن خود چگونه برای حرکت کردن بهره بگیرد. بین جهان درونی و بیرونی، یک حلقه‌ی بازخورد برقرار می‌کند.

حلقه‌ی متشکل از انجام دادن یک عمل و ارزیابی کردن بازخورد آن فقط در زمینه‌ی یاد گرفتن حرکت نیست، بلکه به درک تاتی‌تاتی اجتماعی نیز کمک می‌کند. مثلاً ببینید که ارتباط با دیگران را چگونه یاد گرفتید (و همچنان یاد می‌گیرید). شما مدام عمل‌هایی احتمال را انجام می‌دهید، بازخورد آن را ارزیابی می‌کنید، و آن را تعدیل می‌کنید. ما وقتی جوان هستیم، فضای حالت‌های ممکن را درمی‌نورسیم و شخصیت‌های متعددی را امتحان می‌کنیم: در این وضعیت، بهتر است شوخ‌طبع باشید، یا به علامت مخالفت دست به سینه شوید، یا اینکه به گریه بیفتید و طلب هم‌دردی داشته باشید؟ ما در موقعیت‌های خاصی از برخی هویت‌ها خوشمان می‌آید و معمولاً همان‌ها را حفظ می‌کنیم، تا آنکه به دلایلی نیاز به روزآمدسازی پیدا کند. و درست مثل آدمی که در مواقع مختلف از دوچرخه‌ی کوهستان، اسکیت روی یخ، و کایت استفاده می‌کند، ما برای موقعیت‌های اجتماعی مختلف نیز طرح‌واره‌های متفاوتی را استفاده می‌کنیم. در اینجا نیز مانند بازخورد حرکتی، متکی به استفاده از بازخوردهای اجتماعی هستیم. آیا رهبری قدرتمندانه در این موقعیت مؤثر است؟ آیا در اینجا با برخورد ملاطفت‌آمیز به آنچه می‌خواهم، می‌توانم برسم؟ آیا تعریف کردن یک جوک بی‌ادبانه در سر شام می‌تواند بجا باشد، در حالی که در جلسه‌ی کاری می‌تواند باعث آبروریزی **برایم** شود؟

نحوه‌ی فکر کردن ما نیز شاید به‌صورت همین آزمودن مداوم جهان باشد. از دیدگاه مغز شما، فکر کردن تا حد زیادی مانند کارهای حرکتی است. توفان

عصبی فعالیتی که باعث بالا رفتن دست شما می‌شود، مانند همان توفانی است که سبب می‌شود فکر کنید به دوست‌تان که افسرده است، چه بگویید، یا جوراب‌تان کجا گم شده است، یا برای ناهار می‌خواهید چه غذایی سفارش دهید. فکر کردن مانند حرکت دادن دست یا پا است؛ به همان طریقی که مغز ما عمل لگد زدن، پرتاب کردن، یا گرفتن را هدایت می‌کند، **فکر کردن هم احتمالاً مانند حرکت دادن مفاهیم در فضای فکری است.** به عبارت دیگر، در فکر کردن به جای فنجان قهوه یا دستمال، مفاهیم را به اطراف جابه‌جا می‌کنید. این کار به همان طریق با تاتی‌تاتی کردن شروع می‌شود: ایجاد کردن یک فکر و سنجیدن پیامدهای آن. بعضی فکرها به خوبی با دنیا جور درمی‌آیند (اگر این سیم را بکشم، دستگاه چمن‌زن روشن می‌شود)، در حالی که برخی دیگر به چیزی منتهی نمی‌شوند (اگر این پنکیک را روی میز بیندازم، چه اتفاقی می‌افتد؟). درست مانند حرکت و تکلم، فکرها هم باید یاد بگیرند که چگونه در دنیا بهتر عمل کنند.

پس برمی‌گردیم به سر بلیک، شوگر، و سگ‌های همراه آن‌ها. این‌ها غیر از آنکه تماشای‌شان برای ما لذت‌بخش است، بر اهمیت یک اصل بنیادین تأکید می‌کنند: اگر ژنتیک سگ به جای چهار پا به آن دو پا می‌داد، یا به جای پنجه به آن چرخ می‌داد، یا اسکلتی شبیه تخته‌موج به آن می‌داد، نیازی نبود مغز سگ که در درون سر او است، دوباره طراحی شود. مغز به سادگی خودش را با آن تطبیق می‌داد. فکرش را بکنید که این راهبرد چه کارایی بالایی در ایجاد تنوع زیستی دارد. مغز پویا لازم نیست برای هر تغییر ژنتیکی در طرح بدن، تعویض شود. چنین مغزی خودش را هماهنگ می‌کند. به این گونه است که فرگشت می‌تواند شکل بدن جانوران را به‌طور کارآمدی متناسب با زیستگاه آن‌ها کند. صرف نظر از اینکه برای محیط سُم مناسب‌تر باشد یا انگشت پا، باله یا دست، تنه یا دم یا چنگال، در هر حال، نیازی نیست که مادر طبیعت کار اضافه‌ای انجام دهد تا جانور بتواند عملکرد درستی داشته باشد. واقعاً هم برای تکامل هیچ راه دیگری وجود نداشته است: امکان نداشت تکامل بتواند با سرعت کافی عمل کند، مگر آنکه تغییرات طرح بدن به آسانی قابل اجرا می‌بود و تغییرات مغز به دنبال آن بدون مشکل صورت می‌گرفت.



به خاطر همین انعطاف‌پذیری بالا است که ما به آسانی می‌توانیم در بدن‌های جدیدی ساکن شویم. مثلاً الن ریپلی، شخصیت اصلی فیلم اول بیگانه‌ها را در نظر بگیرید. در نقطه‌ی اوج فیلم، در مبارزه‌ی مرگبار او با موجود لزج بیگانه، ریپلی به درون جامه‌ی روباتیک عظیمی می‌رود که امکان آن را فراهم می‌کند که حرکات او با دست‌ها و پاها‌ی فلزی عظیمی تقویت شود. در ابتدا ضربات او ناشیانه است، وی پس از کمی تمرین موفق می‌شود مشت‌های محکمی به آرواره‌های خلط‌آلود بیگانه بزند. ریپلی یاد می‌گیرد که چگونه آن بدن غول‌آسا را کنترل کند، و این کار را با استفاده از ظرفیت مغزش برای تنظیم رابطی او با خروجی‌ها (پرتاب کردن دست) و ورودی‌ها (آن دست راست غول‌آسا الان کجا است؟ آیا زیادی به طرف چپ خم شده‌ام؟) انجام می‌دهد. یاد گرفتن این ارتباطات جدید زیاد دشوار نیست، که نمونه‌ی آن رانندگان لیفتراک، جرثقیل، و جراحان لاپاروسکوپیک هستند که همگی یک روز یاد می‌گیرند که با بدن‌های جدید عجیبی کار کنند. اگر مغز الن ریپلی دستگاهی تک‌منظوره می‌بود که فقط می‌توانست همان بدن معمولی دومتری خودش را به کار بیندازد، او خیلی راحت لقمه‌ی چربی برای بیگانه می‌شد.

با آنکه این مثال مربوط به یک ماجرای داستانی است، ولی اصلی که در آن نهفته است، برای رولربلید، یک‌چرخه، صندلی چرخدار، تخته‌موج، رانک (Segway)، اسکیت‌برد، و صدها دستگاه دیگری که به طرق مختلف به بدن طبیعی خودمان متصل یا مرتبط می‌کنیم، نیز صادق است. وضعیت خاص وزن، اتصالات، حرکات، و کنترلگرهای دستگاه — یعنی هرگونه کاری که با آن می‌کنید — به مدارهای مغزی شما راه می‌یابد.

در روزهای اولیه‌ی هوانوردی، خلبان‌ها با استفاده از طناب‌ها و اهرم‌های مختلف، دستگاه پرنده را جزئی از بدن‌شان می‌کردند،^[۷] و کار خلبان‌های مدرن هم البته تفاوت زیادی با آن ندارد: مغز خلبان نوعی بازنمایی از هواپیما را به‌عنوان بخشی از خود او می‌سازد. همین اتفاق برای نوازندگان پیانو، کارگران الواربری که از اهرم‌های استفاده می‌کنند، و خلبان‌های پهپاد نیز می‌افتد: مغز آن‌ها ابزارهایشان را به‌عنوان استتاله‌هایی طبیعی از بدن که باید کنترل شوند، در نظر می‌گیرند. به این طریق، عصای یک فرد نابینا صرفاً از بدن او امتداد نمی‌یابد،

بلکه به مدارهای مغزی نیز کشیده می‌شود. حالا ببینیم که این برای آینده‌ی نزدیک ما انسان‌ها چه معنایی دارد. تصور کنید که بتوانید از فاصله‌ی دور، تنها با فعالیت مغزی‌تان، روباتی را کنترل کنید. برخلاف ال‌ریپلی، حتی لازم نیست حرکت کنید: کافی است به حرکت فکر کنید. وقتی که بخواهید که روبات دستش را بلند کند، فوراً این کار را می‌کند. اگر بخواهید که روبات بنشیند، بچرخد، یا بپرد، دستور ذهنی شما را بدون تأخیر یا اشتباه اجرا خواهد کرد. با آنکه این شبیه داستان‌های علمی-تخیلی به نظر می‌رسد، ولی هم‌اکنون در دست تهیه است.

قشر حرکتی، آب‌نبات، و ماه

در اوایل دسامبر ۱۹۹۵، ژان-دومینیک بوبی در اوج زندگی حرفه‌ای خود بود: او سردبیر مجله‌ی *Elle* در پاریس بود و با محافل اجتماعی سطح بالای فرانسه در ارتباط بود.

یک روز بعد از ظهر، بدون هرگونه هشدار، دچار سکته‌ی مغزی وسیعی شد، و فوراً به کمای عمیقی فرو رفت.

بیست روز بعد از کما خارج شد. از نظر ذهنی بیدار بود، می‌توانست محیط اطرافش را ببیند، و هر حرفی را که کسی می‌گفت، می‌فهمید. ولی نمی‌توانست دستش یا انگشتش یا صورتش یا انگشتان پایش را حرکت دهد؛ نمی‌توانست حرف بزند، نمی‌توانست فریاد بزند. متوجه شد که تنها عملی که می‌تواند انجام دهد، چشمک زدن با چشم چپش است. جدای از این، در سیاه‌چاله‌ی سرد بدنش محبوس شده بود.

نهایتاً به کمک دو درمانگر سختکوش، موفق شد خیلی کند ارتباط برقرار کند. نه با حرف زدن، بلکه با چشمک زدن تنها پلک چشمش که در اراده‌ی او بود. درمانگر به آهستگی حروف الفبا را به ترتیب فراوانی می‌خواند و وقتی به حرف مورد نظر می‌رسید، او چشمک می‌زد. درمانگر آن حرف را می‌نوشت و دوباره از حرف اول شروع می‌کرد. به این طریق، البته با سرعت خسته‌کننده‌ی هر کلمه دو دقیقه، می‌توانست ارتباط برقرار کند. او با صبوری طاقت‌فرسا، کتاب کاملی درباره‌ی تجربه‌ی زندگی کردن با سندروم قفل‌شدگی نوشت.

برخلاف وضعیت بدنش، کتابی فاخر و شیوا بود. او در این کتاب، درد جانکاه ناتوانی در ارتباط برقرار کردن با دنیای بیرون را بازگو کرده است. مثلاً بیان کرده است که دیدن کیف دستیارش که نیمه‌باز روی میز قرار گرفته بود و حاوی کلید اتاق هتل، بلیت مترو، و یک اسکناس صد فرانکی بود، چقدر برایش دردناک بود. این اقلام یادآور نوعی از زندگی بود که برای او همیشه از دست رفته بود. در مارس ۱۹۹۷، کتاب او منتشر شد. این کتاب، با عنوان *لباس غواصی و پروانه*، در هفته‌ی اول ۱۵۰,۰۰۰ نسخه فروش کرد، و در سراسر اروپا رتبه‌ی اول فروش را به خود اختصاص داد. بوبی دو روز پس از انتشار کتابش درگذشت. در طول سال‌ها، میلیون‌ها خواننده بر روی صفحات این کتاب اشک ریخته‌اند. شاید آن‌ها برای نخستین‌بار متوجه شده‌اند که چه نعمت لذت‌بخشی است داشتن یک مرکز کنترل، که روایات گوستی ما را به خوبی به حرکت درمی‌آورد و این کار را با چنان مهارتی انجام می‌دهد که ما خوشبختانه از عملیات عظیم پشت پرده‌ی آن بی‌خبر هستیم.

چرا بوبی نمی‌توانست حرکت کند؟ در شرایط طبیعی، وقتی که مغز تصمیم می‌گیرد که اندامی را حرکت دهد، الگویی از فعالیت عصبی فرمان را از طریق کابل‌های داده‌ای نخاع به اعصاب محیطی می‌فرستد، و در آنجا سیگنال‌های الکتریکی منجر به آزادسازی برخی مواد شیمیایی (میانجی‌های عصبی) می‌شود، که موجب انقباض ماهیچه می‌شوند. ولی در مورد بوبی، سیگنال‌ها اصلاً از مغز خارج نمی‌شدند تا در این مسیر طولانی به طرف بدن رهسپار شوند. هیچ‌گونه پیامی به ماهیچه‌های او نمی‌رسید.

شاید در آینده بتوانیم نخاع آسیب‌دیده را ترمیم کنیم، ولی فعلاً این کار امکان‌پذیر نیست. پس فقط یک راه باقی می‌ماند: چه می‌شد اگر به جای چشمک زدن بوبی، نيزه‌های مغزی او را ثبت می‌کردیم؟ چه می‌شد اگر می‌توانستیم روی مدارهای عصبی‌اش استراق سمع کنیم، تا ببینیم سعی دارد به ماهیچه‌هایش چه دستوری بدهد — و بعد ناحیه‌ی آسیب را دور می‌زدیم تا بتواند عمل مورد نظر خود را در دنیا انجام دهد؟

یک سال پس از مرگ بوبی، پژوهشگران در دانشگاه اموری، یک واسط مغز و کامپیوتر را در بدن بیماری به نام جان ری که دچار سندروم قفل‌شدگی

۵ | چگونه بدن بهتری داشته باشیم؟ ۱۴۹

بود، کاشتند و او آنقدر زنده ماند که توانست اشاره‌گر کامپیوتر را صرفاً با به تصور درآوردن حرکت، کنترل کند.^[۸] قشر حرکتی او نمی‌توانست سیگنال‌ها را از ناحیه‌ی آسیب نخاعی عبور دهد، ولی کاشتینه سیگنال‌ها را می‌گرفت و پیام را به کامپیوتر می‌فرستاد.

در سال ۲۰۰۶، یک بازیکن سابق فوتبال به نام مت نیگل که فلج شده بود، می‌توانست یک دست مصنوعی را با حرکاتی نه چندان ظریف باز و بسته کند، چراغ‌ها را روشن و خاموش کند، ایمیل‌هایش را باز کند، بازی ویدئویی پونگ را بازی کند، و روی صفحه‌ی نمایش یک دایره بکشد.^[۹] این توانایی‌های مت حاصل یک قطعه‌ی مشبک چهار در چهار میلی‌متری مشتمل بر یکصد الکتروود بود که مستقیماً روی قشر حرکتی او کاشته شده بود. او در ذهنش به مقبض کردن ماهیچه‌ها فکر می‌کرد، و این باعث فعالیت در قشر حرکتی می‌شد، و در نتیجه، پژوهشگران می‌توانستند فعالیت را شناسایی کنند و حرکت مورد نظر او را به‌طور تقریبی تعیین کنند.



کنترل کردن یک بازوی روباتیک با تصور کردن حرکات.

فناوری استفاده شده برای جانی و مت سردستی و غیردقیق بود، ولی امکان‌پذیر بودن این راه‌حل را نشان می‌داد. تا سال ۲۰۱۱، اندرو شوارتز دانشمند علوم اعصاب و همکارانش در دانشگاه پیتسبورگ یک بازوی مصنوعی ساختند که تقریباً به اندازه‌ی یک دست واقعی پیشرفته و نرم بود. زنی به نام جن

شویرمان بر اثر اختلالی به نام استحالهی نخاعی-مخچه‌ای فلج شده بود و خودش را برای عمل جراحی اعصاب داوطلب کرد تا بتواند این بازو را کنترل کند.^[۱۰] اکنون جن با سیگنال‌هایی که از قشر حرکتی او ثبت می‌شود، می‌تواند حرکت دادن بازویش را به تصور درآورد، و در نتیجه‌ی آن بازوی روباتیک حرکت می‌کند. بازوی روباتیک در آن طرف اتاق است، ولی فرقی نمی‌کند: با استفاده از یک دسته سیم که مغز او را به ماشین وصل می‌کند، او می‌تواند دست مصنوعی را بچرخاند و چیزی را بگیرد، تقریباً به همان خوبی که سال‌ها قبل با دست سالمش این کار را می‌کرد. در حالت طبیعی، وقتی که به حرکت دادن دست‌تان فکر می‌کنید، سیگنال‌ها از قشر حرکتی شما به طرف نخاع می‌رود، و از آنجا از طریق اعصاب محیطی به الیاف ماهیچه‌ای شما می‌رسد. در مورد جن، سیگنال‌های ثبت شده از مغز صرفاً مسیر دیگری را دنبال می‌کند، به جای اینکه از طریق اعصاب محیطی به ماهیچه‌ها برسد، از طریق سیم‌ها به موتورهای حرکتی می‌رسد. با گذشت زمان، جن در استفاده از بازوی مصنوعی مهارت پیدا می‌کند، که بخشی از آن به خاطر پیشرفت فناوری است، و بخشی دیگر هم به خاطر اینکه مغز او مدارسازی مجدد می‌کند تا ببیند چگونه می‌تواند اندام جدید را بهتر کنترل کند — درست همان کاری را انجام می‌داد اگر می‌خواست از دوچرخه‌ی وارونه، تخته‌موج، یا پوشش مکانیکی الن ریپلی استفاده کند.

خود جن می‌گوید: «خیلی ترجیح می‌دهم مغزم را داشته باشم تا پاهایم را.»^[۱۱] مغز را که داشته باشید، می‌توانید بدن جدید بسازید، ولی برعکس نه.

در حال حاضر، تحقیقات فعالی بر روی واسطه‌های مغز و ماشین در دست انجام است تا بتوان حرکت کامل بدن را به افراد فلج برگرداند.^[۱۲] پروژه‌ی «راه رفتن دوباره» یک همکاری بین‌المللی است که هدف آن کمک به افراد فلج برای بازیافتن امکان حرکت با استفاده از یک پوشش سر تا پا است که براساس فرمان‌های مغز حرکت می‌کند. درست مانند جن، شخص فلج تنها با فکر کردن به حرکت، می‌تواند حرکت کند. این ایده مشتمل بر انجام عمل جراحی و کاشتن آرایه‌ی متراکمی از میکروالکترودها در ده منطقه‌ی مختلف مغز فرد داوطلب است، به‌طوری که بیمار بتواند با استفاده از فعالیت مغزی خود، کنترل روبات‌های پیشرفته را به دست گیرد.^[۱۳]



یک پوشش روباتیک کنترل شده با فکر برای افرادی که فلج هستند. این گونه دستگاه‌های مصنوعی عصبی هنوز در مراحل ابتدایی هستند، ولی به سرعت به طرف پیشرفت‌های ممکن در حرکت‌اند.

در سال ۲۰۱۶، پژوهشگران در مؤسسه‌ی فاینستاین در نیویورک رویکرد نسبتاً متفاوتی را در پیش گرفتند. آن‌ها در سیستم حرکتی استراق سمع کردند تا ببینند چه زمانی می‌خواهد ماهیچه‌ها را حرکت دهد، ولی به جای اینکه اطلاعات را به به بازو یا پوشش روباتیک بفرستند، فعال‌سازی را از طریق یک سیستم تحریک الکتریکی روی ساعد، مستقیماً در ماهیچه‌های خود شخص انجام می‌دهند.^[۱۴] شرکت کننده به حرکت دادن بازویش فکر می‌کند، و سیگنال‌ها (با عبور از الگوریتم‌های یادگیری ماشین که تفسیر مناسب را برای توفان فعالیت نورونی مشخص می‌کند) از ناحیه‌ی آسیب نخاعی عبور داده شده و به تحریک‌کننده‌ی عضلانی فرستاده می‌شود. بازو حرکت می‌کند. شرکت‌کنندگان فلج قادرند حرکات مختلف دست و مچ — از قبیل گرفتن اشیاء، کار کردن با آن‌ها، و رها کردن آن‌ها — را انجام دهند. حتی می‌توانند هر یک از انگشتان خود را حرکت دهند، به‌طوری که می‌توانند با تلفن شماره بگیرند، از صفحه‌کلید استفاده کنند، و یا به سوی آینده اشاره کنند.



اگر شما سیگنال‌های خروجی مغز را برای کنترل کردن یک بازوی روباتیک تغییر مسیر بدهید، ایرادی وجود خواهد داشت: مغز هیچ‌گونه بازخورد حسی از

نوک انگشتان دریافت نخواهد کرد. تنها با نگاه کردن خواهید توانست بفهمید که تخم مرغ را شل یا محکم نگرفته باشید، و معمولاً وقتی که متوجه شوید کار را درست انجام نداده‌اید، دیگر دیر شده است. مثل آن است که بچه‌ای بابا و دادا بگوید، ولی گوشگیر در گوش داشته باشد.

راه حل آن این است که حلقه را ببندیم، و این کار با فرستادن الگوهای فعالیت به قشر حسی پیکری امکان پذیر است. وقتی که بازوی روباتیک هدف را لمس کرد، یک الگوی فعالیت خاص به نواحی حسی پیکری فرستاده می شود — الگویی که معادل با حس لمس نوک انگشتان است — و سپس شخص احساس می کند که گویی دستش جسمی را با بافت خاصی لمس کرده است. وقتی که به هدف دیگری دست می زند، بافت متفاوتی را «حس» می کند. به این طریق، به هر چیزی دست می زند، احساس کاملی از کار کردن با آن دارد. مغز او نهایتاً با انعطاف پذیری بالایی که دارد، این را به ادراک کاملی ترجمه می کند که گویی آن دست، دست خودش است. مغز حرکت دادن بدن را وقتی بهتر یاد می گیرد که حلقه‌ی بسته‌ی بازخورد وجود داشته باشد: نه فقط خروجی، بلکه ورودی هم باشد تا تعامل با جهان را درست آزمایی کند. مثلاً وقتی که بچه دستش را به میله‌های گهواره می زند، آن را حس می کند، می بیند، و می شنود.



قبل از استفاده از ابزار



بعد از استفاده از ابزار

وقتی که میمون برای برداشتن اشیای دور از یک شن کش استفاده می کند، بازنمایی مغزی بدن به گونه‌ای تغییر می کند که کل این شن کش را نیز دربر می گیرد. بیضی نشان دهنده‌ی ناحیه‌ای است که وقتی یک میله‌ی قابل مشاهده وارد آن شود، موجب تحریک شدن یک نورون حسی می شود.

۵ | چگونه بدن بهتری داشته باشیم؟ ۱۵۳

از آنجا که اکثر یادگیری مغز در این حلقه اتفاق می‌افتد، جای تعجب نیست که نقشه‌های حرکتی و حسی معمولاً به موازات هم تغییر می‌کنند. مثلاً وقتی که میمون‌ها را مجبور می‌کنند که غذای‌شان را با یک شن‌کش بردارند، نقشه‌های حرکتی و حسی آن‌ها هر دو بازآرایی می‌شوند و طول این وسیله در آن‌ها منعکس می‌شود. شن‌کش عملاً بخشی از بدن آن‌ها می‌شود.^(۱۵) سیستم‌های حرکتی و حسی اساساً مستقل از هم نیستند، بلکه با یک چرخه‌ی بازخورد پیوسته، به یکدیگر متصل هستند.

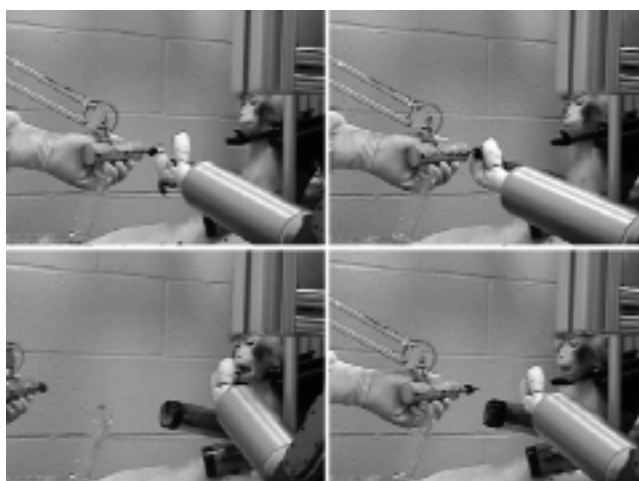


می‌بینیم که واسطه‌های مغز و ماشین می‌توانند امکان بازیابی یا جایگزینی اندام‌های آسیب‌دیده را فراهم کنند. ولی آیا با همان فناوری می‌توان یک اندام حرکتی جدید نیز به بدن اضافه کرد؟

در سال ۲۰۰۸، میمونی که دو دست سالم داشت، با افکار خودش بازوی سومی را که از فلز ساخته شده بود، کنترل کرد. او با استفاده از آرایه‌ی کوچکی از الکترودها که در مغزش کاشته شده بود، بازوی روباتیک را کنترل کرد تا بتواند آب‌نبات بردارد و آن را در دهانش بگذارد.^(۱۶) میمون در ابتدا با حرکت دادن اشاره‌گر روی صفحه‌ی نمایش به طرف هدف، برای این کار آموزش دید، و هر وقت کار را درست انجام می‌داد، پاداش دریافت می‌کرد. در ابتدا میمون هنگام انجام کار دست‌های خودش را هم حرکت می‌داد. ولی بعد اتفاق خارق‌العاده‌ای افتاد: او سرانجام دیگر دست‌هایش را حرکت نمی‌داد، ولی اشاره‌گر همچنان حرکت می‌کرد. مغزش مدارسازی مجدد کرده بود تا این کارها را از هم جدا کند: بعضی از نورون‌ها مربوط به دست واقعی بود، و بعضی دیگر مربوط به اشاره‌گر روی صفحه‌ی نمایش. نهایتاً سیگنال‌ها توانستند بازوی روباتیک را برای برداشتن آب‌نبات بدون هرگونه حرکت دادن دست واقعی کنترل کنند. در واقع، تبدیل به یک اندام حرکتی جدید شده بود.

تعجب می‌کنید که آدم‌ها و میمون‌ها می‌توانند یاد بگیرند که بازوی روباتیک را با فکرشان کنترل کنند؟ تعجبی ندارد: این همان فرایندی است که مغز شما با آن یاد می‌گیرد که از اندام‌های گوشتی طبیعی شما استفاده کند. همان گونه

که دیدیم، روش کار در بچگی شما به این صورت بود که اندام‌های خود را به اطراف حرکت می‌دادید، انگشتان پای خود را به دهان می‌بردید، میله‌های گهواره را می‌گرفتید، با انگشت به چشمان‌تان می‌زدید، و می‌غلتیدید — این کارها را تا چندین سال تکرار می‌کردید — تا بتوانید کنترل ماشین‌آلات خود را دقیق‌تر کنید. مغزتان فرمان‌ها را می‌فرستاد، آن‌ها را با بازخورد حاصل از محیط مقایسه می‌کرد، تا سرانجام توانست قابلیت‌های اندام‌های حرکتی‌تان را یاد بگیرد. بازوی شما که با پوست پوشیده شده است، فرقی با بازوی رباتیک فلزی زمخت میمون ندارد. فقط به خاطر اینکه تجهیزات عملیاتی استاندارد است که به آن عادت دارید، خیلی از وقت‌ها عظمت آن را فراموش می‌کنید.



میمون با فعالیت مغزی خود بازوی رباتیک را کنترل می‌کند تا آب‌نبات را به دهانش ببرد.

بنابراین، گرچه ساختن یک بازوی رباتیک خوب برای پژوهشگران کار پرزحمتی است، ولی قسمت زیادی از کار عملیاتی بر عهده‌ی مغز کاربر قرار می‌گیرد. از آنجا که ما با اندام‌های فلزی بزرگ نشده‌ایم، لذا حرکات اندام مصنوعی فلزی برایمان شهودی نیست. مغزمان باید یاد بگیرد این اندام را چگونه کنترل کند، همان‌طور که جن این کار را می‌کند. نیمی از کار مربوط به مهندسان است، و نیمه‌ی دیگر در جنگل نورونی مغز کاربر اتفاق می‌افتد.

دیدن میمونی که یاد گرفت بازوی روباتیک خود را مستقل از بازوهای واقعی‌اش به کار بگیرد، دکتر اختاپوس را به ذهن می‌آورد، که بازوهای روباتیکش را می‌توانست کنترل کند، حتی در حالی که با اندام‌های گوشتی‌اش کارهای معمولی‌تری را انجام می‌داد، مانند ریختن مواد شیمیایی در ظروف آزمایشگاهی، یا راندن ماشین در حین فرار. میمون‌ها پس از مدتی بخشی از فضای مغزشان را به بازوهای روباتیک، جدا از اندام‌های طبیعی‌شان، اختصاص دادند. آن‌ها توانستند منابع را تقسیم کنند و به زواید متفاوتی — اعم از گوشتی یا فلزی — اختصاص دهند.



هم در مورد جن و هم در مورد میمون‌ها، بازوهای روباتیک مستقیماً به بدن آن‌ها متصل نشده بود، بلکه فقط با یک دسته سیم به آن‌ها وصل بود. ولی اگر بتوان آن را بی‌سیم کرد، دیگر از نظر فنی لازم نیست که بازو در داخل اتاق باشد. آیا می‌توان روباتی را در آن طرف دنیا کنترل کرد؟ در واقع، این کار قبلاً انجام شده است.

چند سال قبل، میگل نیکوللیس دانشمند علوم اعصاب و تیم همکارانش در دانشگاه دوک الکترودهایی را به یک میمون وصل کردند، و آن میمون به‌طور مستقیم الگوی راه رفتن روباتی را در آن طرف دنیا کنترل کرد. در حالی که میمون روی تردمیل راه می‌رفت، سیگنال‌های قشر حرکتی او ثبت شد، به رشته‌ای از صفرها و یک‌ها تبدیل شد، و از طریق اینترنت به آزمایشگاهی در ژاپن فرستاده شد، و در آنجا به یک روبات خورنده شد. آن روبات که یک و نیم متر قد و نود کیلوگرم وزن داشت، مانند بدلی فلزی با راه رفتن میمون، راه می‌رفت.

آن‌ها چگونه به این مرحله رسیدند؟ قسمت زیادی از کارهای لازم، قبل از این نمایش انجام شده بود. ابتدا، در آزمایشگاه نیکوللیس، میمون را آموزش دادند که روی تردمیل راه برود. پژوهشگران با استفاده از حسگرهای روی پای میمون، چگونگی حرکت ماهیچه‌های آن را ثبت کردند، و با ثبت فعالیت صدها سلول مغزی، سعی کردند بفهمند که فعالیت نرونی چگونه به انقباضات عضلانی ترجمه می‌شود. سرعت تردمیل را کم و زیاد کردند تا ببینند فعالیت

مغزی چه رابطه‌ای با سرعت و طول قدم‌ها دارد. با آنکه از یک نورون واحد چیز زیادی نمی‌شد فهمید، ولی مشخص شد که نورون‌های نواحی مختلف مغز روابط زمانی خاصی با یکدیگر دارند، و بر این اساس، محققان به تدریج توانستند کد چندعضله‌ای عمل راه رفتن را، با وجود پیچیدگی فریبده‌ی آن، آشکار کنند.^(۱۷)

با در دست داشتن تحقیقات قبلی، آن‌ها توانستند سیگنال‌ها را در کارولینای شمالی از میمون ثبت کنند، و فرمان‌های حرکتی رمزگشایی شده را برای روباتی در کیوتو بفرستند. به استثنای تأخیرهای کوچک پردازش و انتقال، میمون و روبات همگام با هم راه می‌رفتند.

محققان دانشگاه دوک پس از نشان دادن امکان‌پذیر بودن کار، تردمیل را متوقف کردند. ولی میمون که داشت به آواتارش روی صفحه‌ی نمایش نگاه می‌کرد، هنوز در ذهنش به راه رفتن فکر می‌کرد. و بنابراین، روبات در ژاپن به راه رفتن خود ادامه داد. به همان روشی که جن حرکات را تصور می‌کرد و بازوی روباتیک آن را اجرا می‌کرد، قشر حرکتی میمون همچنان به فکر کردن درباره‌ی راه رفتن ادامه می‌داد.

تقریباً شکی نیست که در آینده‌ی نه چندان دور، روبات‌ها را در کارخانه‌ها، زیر آب، یا روی سطح ماه با ذهن‌مان کنترل خواهیم کرد، در حالی که خودمان در خانه راحت روی کاناپه نشسته‌ایم.^(۱۸) پس از آموزش‌های وسیع، عملگرهای مکانیکی و آشکارسازهای روبات وارد نقشه‌های قشر مغز ما خواهد شد: در واقع، آن‌ها دور-اندام‌ها و دور-حس‌های ما خواهند بود. بدن گوشتی ما برای محیط اکسیژن‌دار این سیاره‌ی خاص و عجیب تکامل یافته است. ولی بدون تردید بهره‌گیری از شکل‌پذیری مغز و ساختن بدن‌هایی که از راه دور کنترل خواهند شد، راهبرد ما برای کاوش فضا را در آینده تغییر خواهد داد.

کنترل خود

گسترش بدن شما — مثلاً داشتن یک بازوی روباتیک یا یک آواتار فلزی در آن سوی شهر — چه پیامدی برای تجربه‌ی خودآگاه شما خواهد داشت؟ پاسخ آن است که روبات را بخشی از خودتان احساس خواهید کرد. مانند یک اندام

حرکتی دیگر خواهد بود. البته اندام غیر معمولی خواهد بود — چرا که بین شما و آن شکافی فیزیکی وجود دارد — ولی به هر حال، به عنوان یک اندام حرکتی جدید به شمار خواهد آمد. تنها دلیل اینکه ما به اندام‌های متصل به بدنمان عادت داریم، این است که مادر طبیعت در کار با ماهیچه و رگ و پی، خیاطی ماهر است — ولی هرگز کنترل کردن اندام‌های دوردست از طریق بلوتوث را یاد نگرفته است.^[۱۹]

اگر فکر می‌کنید اندام‌های اضافه یا دور-اندام‌ها خیلی عجیب هستند، به این نکته توجه کنید که ما هر روز با آن‌ها سر و کار داریم. کافی است به آینه نگاه کنید و دستتان را حرکت دهید. شیئی را در دوردست خواهید دید که کاملاً با فرمان‌های حرکتی شما همگام است. گرچه کودکان شیرخوار در ابتدا با دیدن تصویر آینه سردرگم می‌شوند، ولی پس از مدتی می‌فهمند که انعکاس خودشان است. با آنکه هیچ‌گونه حس مستقیمی را از آن اندام دوردست حس نمی‌کنند، ولی می‌بینند که روی آن کنترل دارند. همین کافی است که آن اندام به خویشتن آن‌ها منضم شود.

این مفهوم خویشتن مشابه بورگ‌ها در *پیش‌تازان فضا* است، که هر چیزی را که سر راه‌شان قرار گیرد، جذب هویت واحد خودشان می‌کنند — غیر از چیزهایی که نمی‌توانند کنترل کنند، مانند کاپیتان پیکارد که بسیار غیرقابل پیش‌بینی است.

رابطه‌ی بین خودیت و پیش‌بینی‌پذیری به ما امکان می‌دهد که اختلالاتی مانند آسوماتوگنوزی، یعنی «شناختن بدن خود»، را درک کنیم. در این اختلال، آسیب به لوب آهیانه‌ی راست مغز (مثلاً بر اثر سکته‌ی مغزی یا تومور) سبب می‌شود که فرد نتواند اندام حرکتی‌اش را کنترل کند. نتیجه‌ی بهت‌آور آن این است که بیمار اصلاً قبول ندارد که آن اندام متعلق به او است، و حتی بعضی وقت‌ها اصرار می‌کند که اندام به شخص دیگری تعلق دارد.^[۲۰] مثلاً آن دست را متعلق به یک دوست درگذشته، یکی از اقوام، یک شبح، یا شیطان، یا یکی از پرسنل پزشکی که از او مراقبت می‌کنند، می‌داند. در توضیح می‌گویند که دست واقعی او دزدیده شده یا به هر دلیل وجود ندارد. در نمونه‌ی دیگری از این بیماری، تصور می‌شود که آن اندام حرکتی یک جانور — مثلاً یک مار — است

که برای خود زندگی و اهداف مستقلی دارد.

تظاهرات بیماری متغیر و گاه عجیب و غریب است: بیمار ممکن است نسبت به آن اندام که دیگر خودی شمرده نمی‌شود، بی‌تفاوت باشد، و یا درباره‌ی آن باورهای هذیانی داشته باشد، و توضیحات ساختگی عجیبی درباره‌ی سرگذشت آن بیان کند، مثلاً اینکه «کسی آن را به بدن من دوخته است». برخی دیگر از بیماران بدون هرگونه حس هم‌دردی، از آن اندام حرکتی ابراز انزجار می‌کنند: «پایم مثل یک لاشه‌ی سنگین است». در نوع شدیدتر اضمحلال خودیت، بیمار ممکن است از اندام بیگانه‌اش متنفر باشد، و آن را نفرین کند و بزند.^[۲۱]

توضیح استاندارد برای این اختلال وجود ندارد. اما از عینک این کتاب، به راحتی می‌توانید تفسیر مرا حدس بزنید: مغز دیگر آن اندام را کنترل نمی‌کند، لذا از حلقه‌ی خودی‌ها خارج می‌شود.

بعضی وقت‌ها این بیماران مدت کوتاهی ذهن‌شان شفاف می‌شود و دوباره متوجه می‌شوند که اندام مال خودشان است. فرضیه‌ی من این است که این امر ناشی از آن است که دست اتفاقاً همان‌طور که انتظار می‌رود، رفتار می‌کند: پیش‌بینی‌پذیری اتفاقی. مثلاً فرد احساس می‌کند که دلش می‌خواهد دستش را به طرف شکلات روی میز ببرد... و بعد دست اتفاقاً به آن طرف حرکت می‌کند، به‌طوری که صاحب دست آن عمل را از خودش می‌داند. با توجه به اینکه تمام عمر تجربه‌ی کنترل کردن آن دست را داشته است، جای تعجب نیست که حتی تصور موقتی در اختیار داشتن کنترل دوباره آن را، ولو برای یک لحظه، خودی می‌کند.

در اوایل دهه‌ی ۱۹۷۰، نوع متفاوتی از فقدان خودیت برای اولیور ساکس، نویسنده و عصب‌شناس، اتفاق افتاد.^[۲۲] او حین پیاده‌روی در نروژ با کمال تعجب، گاوی را وسط جاده دید. از یک مسیر کوهستانی به پایین دوید و از عجله‌ای که داشت، پایش به صخره‌ی کوچکی گیر کرد و افتاد و ماهیچه‌ی چهارسر ران پایش پاره شد. با عصایش آتلی موقتی برای پایش درست کرد، و با همان پا که «کاملاً بی‌مصرف» شده بود، تلوتلو از کوه پایین آمد، تا آنکه گروهی از شکارچیان گوزن پیدایش کردند. پس از آن، ساکس مدتی در بیمارستان

بستری بود، در حالی که گیج و منگ بود و هذیان می‌گفت. به خاطر پارگی ماهیچه‌ی چهارسر ران نمی‌توانست پایش را تکان دهد — و ۱۰۰ درصد مطمئن بود که آن پا مال او نیست. یک زمان فکر می‌کرد پایش درست در جلوی او است، ولی وقتی نگاه کرد، دید از تخت آویزان است. کاملاً متعجب شد:

پایم را تشخیص نمی‌دادم. کاملاً غریبه بود، مال من نبود و ناآشنا به نظر می‌رسید. با حس بیگانگی مطلق به آن خیره شده بودم... هرچه بیشتر به آن استوانه‌ی گچی نگاه می‌کردم، برایم بیگانه‌تر و نامفهوم‌تر می‌نمود. دیگر حس نمی‌کردم که «مال من» و بخشی از بدن من است. گویا هیچ ارتباطی با من نداشت. مطلقاً از آن من نبود — و در عین حال، با کمال تعجب به من چسبیده بود — و حیرت‌آورتر اینکه با من «پیوسته» بود.... مطلقاً هیچ حسی نداشت... به طرز اسرارآمیزی بیگانه به نظر می‌رسید — بدل بیجان‌ی که به بدن من متصل شده بود.

تجربه‌ی ساکس در ارتباط با پایش را چگونه می‌توان فهمید؟ درست مانند بورگ‌ها و کاپیتان پیکارد، چیزی که می‌توانید کنترل کنید، جزئی از شما می‌شود، و چیزی که کنترلش دست شما نیست، ربطی به شما ندارد. ساکس به علت اینکه نمی‌توانست پا را کنترل کند، آن را جزء خودش حس نمی‌کرد. بلکه صرفاً مجموعه‌ی بیگانه‌ای از میلیاردها سلول بود: استخوان و پوست و موهای عجیبی که از آن بیرون زده بود. هر کدام از ما اگر نمی‌توانستیم بدنمان را حرکت دهیم و آن را حس نمی‌کردیم، همین احساس را درباره‌ی آن داشتیم. در ضمن، من فکر می‌کنم به خاطر همین حس پیش‌بینی‌پذیری است که شخصی که او را عمیقاً می‌شناسید — مثلاً یک عضو خانواده — مانند جزئی از شما می‌شود. البته انسان‌ها پیچیده‌تر از آن هستند که بتوان آن‌ها را به‌طور کامل پیش‌بینی کرد، و همسر شما به همان حدی که رفتارش غافلگیرکننده باشد، مستقل از شما باقی می‌ماند.

اسباب بازی‌ها خود ما هستند

برای امتحان کردن بدن جدید، نیازی به اعضای مصنوعی یا جراحی مغز ندارید. رشته‌ی در حال گسترش رباتیک آواتاری به کاربر امکان می‌دهد که روباتی را از

دور کنترل کند، و هر آنچه را روبات می بیند، ببیند و هر چه را حس می کند، حس کند. نمونه‌ی آن «دست سایه» است، که یکی از ظریف ترین دست های مصنوعی موجود است. نوک هر یک از انگشتان مجهز به حسگرهایی است که داده های خود را برای دستکش های بساوایی که کاربر پوشیده است، می فرستند. با ارسال داده ها از طریق اینترنت، کاربری در سیلیکون ولی می تواند دست روباتیکی را که در لندن قرار گرفته است، کنترل کند.^[۳۳] گروه های دیگری مشغول کار بر روی آواتارهای امدادی برای بلاپای طبیعی هستند: روبات هایی که پس از زمین لرزه، حملات تروریستی، یا آتش سوزی به محل حادثه فرستاده می شوند و افراد از راه دور از محل امنی آن ها را هدایت می کنند. تا حالا ندیده ام کسی از آواتارهای دارای بدن عجیب استفاده کنند، ولی مطمئناً می توانند این کار را بکنند: مغز همان گونه که انجام اسکی یا ترامپولین یا چوب پرشی پوگو را یاد می گیرد، می تواند ارتباط با بدن آواتاری عجیب و غریب و شگفت انگیز را نیز یاد بگیرد.

گرچه روباتیک آواتاری برای گروه اندکی از افراد، امکان آن را فراهم خواهد آورد که بدن های توسعه یافته یا عجیب را تجربه کنند، ولی کار شدیداً پرهزینه ای است. خوشبختانه، راه بهتری برای امتحان کردن طرح های متفاوت بدن هست: در درون واقعیت مجازی. در درون یک فضای شبیه سازی شده، شما می توانید به طور لحظه ای و با کمترین هزینه، تغییرات وسیعی را در طرح بدن خود اعمال کنید.

تصور کنید که در دنیای واقعیت مجازی، به آینه نگاه می کنید. دست تان را بلند می کنید، و در آینه می بینید که آواتار مجازی شما هم دستش را بلند می کند. گردن تان را کج می کنید، و آواتار هم گردنش را کج می کند. حالا تصور کنید که آواتار شما قیافه اش مثل شما نیست، بلکه به صورت یک زن اتیوپیایی، یک مرد نروژی، یک پسر پاکستانی، یا یک مادر بزرگ کره ای است. براساس آنچه درباره ی نحوه ی تعیین خودی بودن از سوی مغز دیدیم (هر چیزی که بتوانم کنترل کنم، جزء من است)، تنها با چند دقیقه حرکت کردن در مقابل آینه متقاعد خواهید شد که حالا ساکن بدن متفاوتی هستید. می توانید در دنیای مجازی به عنوان شخص دیگری راه بروید، و زندگی را با هویتی تغییر یافته تجربه کنید. هویت خودی در حد تعجب آوری انعطاف پذیر است. پژوهشگران در سال های اخیر به بررسی این موضوع پرداخته اند که به خود گرفتن چهره ی یک شخص

دیگر می‌تواند موجب تقویت همدلی شود.^[۲۴]

ولی به خود گرفتن یک چهره‌ی جدید، تنها شروع کار است. در اواخر دهه‌ی ۱۹۸۰، به علت یک حادثه‌ی کدنویسی، مطالعه‌ی بدن‌های غیرمعمول در واقعیت مجازی (VR) آغاز شد. یکی از محققان در آواتار کارگر بندر بود، که یکی از برنامه‌نویسان اشتباهاً با نوشتن چند صفر اضافه در ضریب مقیاس، دست او را شدیداً بزرگ کرد (به‌طوری که تقریباً به اندازه‌ی یک جرثقیل ساختمانی شد). آنچه همه را غافلگیر کرد، این بود که با وجود این مسئله، آن محقق توانست کار با این دست بزرگ را نیز به‌طور دقیق و مؤثر یاد بگیرد.^[۲۵]

به این ترتیب، این سؤال برای محققان مطرح شد که از چه نوع بدن‌هایی می‌توان برای این کار استفاده کرد. جرون لنیر و آن لاسکو از پیشگامان واقعیت مجازی آزمایشی را انجام دادند که در آن افراد ساکن بدنی به شکل خرچنگ هشت‌پا شدند. دو دست اول خرچنگ با دست‌های فرد کنترل می‌شدند و برنامه‌نویسان برای کنترل اندام‌های دیگر خرچنگ، الگوریتم‌های (پیچیده‌ای) را به کار می‌گرفتند. کنترل کردن هشت پای خرچنگ کار سختی بود، ولی ظاهراً بعضی از افراد توانستند بر این کار مسلط شوند. لنیر اصطلاح «انعطاف‌پذیری آدمکی» را وضع کرد که اشاره به کشسانی حیرت‌انگیز مغز برای بازنمایی بدن دارد.

چند سال بعد، پژوهشگر دانشگاه استنفورد جرمی بیلنسون و همکارانش تصمیم گرفتند که انعطاف‌پذیری آدمکی را به روش علمی‌تری مورد مطالعه قرار دهند. پرسش آن‌ها این بود که آیا افراد می‌توانند یاد بگیرند که دست سومی را در واقعیت مجازی به درستی کنترل کنند.^[۲۶] وقتی که شما عینک واقعیت مجازی را به چشم می‌گذارید و دو کنترل‌گر را به دست می‌گیرید، می‌توانید دست‌هایتان را در فضای مجازی ببینید، و اضافه بر آن دست دیگری را نیز می‌بینید، که از وسط سینه‌ی شما بیرون زده است. کاری که باید انجام بدهید، کار ساده‌ای است: به محض اینکه رنگ یک جعبه تغییر می‌کند، به آن دست بزنید. ولی جعبه‌های زیادی هست، و برای اینکه کار را خوب انجام دهید، باید هر سه دست را به کار بگیرید.

دو دست مجازی اول به سادگی با دست‌های خودتان کنترل می‌شوند؛ دست سوم با چرخاندن می‌ج‌هایتان کنترل می‌شود. ظرف سه دقیقه، کاربران راه

آن را یاد می‌گرفتند: براساس اندازه‌گیری عملکرد انجام کار معلوم می‌شد که توانسته‌اند با طرح جدید بدن سازگار شوند.

می‌توان بدون محدودیت، شکل‌های فیزیکی و قالب‌های مختلف را بررسی کرد: تصور کنید که یک دم مجازی از استخوان دنبالچه‌ی شما بیرون زده که می‌توانید با حرکات لگن آن را به دقت کنترل کنید.^[۲۷] یا اینکه به اندازه‌ی یک توپ گلف هستید، یا به اندازه‌ی یک ساختمان هستید، یا شش انگشت دارید، یا اینکه یک مگس خانگی بال‌دار شده‌اید. و یا اینکه مانند دکتر اختاپوس، هشت پا شده‌اید.

با پیوند زدن انعطاف‌پذیری مغز با خلاقیت روزافزون طراحی واقعیت مجازی، در حال ورود به عصری هستیم که هویت مجازی ما در آن دیگر محدود به بدنی که اتفاقاً در آن تکامل یافته‌ایم، نیست. بلکه اکنون می‌توانیم تکامل را تسریع کنیم — دوران‌های طولانی را به چند ساعت تبدیل کنیم. می‌توانیم بدن‌هایی را که مادر طبیعت به خواب هم نمی‌دیده، کاوش کنیم، و آواتارهای مجازی را طبیعی و واقعی نماییم.

باز یک نتیجه‌ی احتمالی جالب دیگر آن است که تغییر بدن شاید موجب تغییر ذهن شما شود. در مطالعه‌ای به این نتیجه **رسیدند** که دانشجویان کالج که از آواتار شهروندان سالمند استفاده می‌کنند، احتمال بیشتری دارد که پول‌شان را به حساب پس‌انداز واریز کنند، مردانی که از آواتار زن استفاده می‌کنند، بیشتر رفتار حمایت‌کننده دارند، و افرادی که شاهد ورزش کردن آواتار خود هستند، بعداً احتمال بیشتری برای ورزش کردن دارند.^[۲۸] (در دنیای داستان، همین نوع تغییر بدن موجب شرور شدن دکتر اختاپوس شد: منظور اینکه تغییر مدارسازی لازم برای استفاده از چهار اندام اضافه، منجر به تغییر طرز فکر او شده است.^[۲۹]) به عبارت دیگر، اینکه ما کی هستیم، بستگی به نحوه‌ی مدارکشی کل مغز دارد. بدن را که تغییر دهید، ممکن است شخصیت فرد نیز تغییر کند.

به عنوان نمونه‌ای از دنیای واقعی، نایجل آکلند، کارگر ذوب فلزات، را در نظر بگیرید که در حادثه‌ای صنعتی، دستش را از ساعد از دست داد. او از نظر جسمی و عاطفی بسیار در هم شکسته شده بود، ولی بعد یک دست بیونیک زیبا برایش نصب کردند.^[۳۰] مغز او فرمان‌هایی را به اعصاب و ماهیچه‌های

باقی مانده‌اش می‌فرستد، و آن سیگنال‌ها تفسیر می‌شود و براساس آن دست مصنوعی به‌صورت نرم حرکت داده می‌شود که شامل بیش از یک دوجین حرکت است. ولی نکته‌ی جالب اینجا است: اگر از نایجل بخواهید که مچش را بچرخاند، دستش را بلند می‌کند و آن را می‌چرخاند... و دست مصنوعی او مرتب روی محورش می‌چرخد و می‌چرخد. تا هر موقع بخواهد، دستش مانند یک فرفره‌ی کُند به چرخش خود ادامه می‌دهد. پس نایجل بدنی بهتر از شما دارد، منظور اینکه محدودیت کمتری دارد. وقتی که مهندسان زیستی این دست را ساختند، متوجه شدند که فایده‌ی خاصی ندارد که رباط‌ها و وترهایی در آن قرار دهند تا حرکت آن را محدود سازند. شاید نایجل می‌تواند فکری داشته باشد که ما نمی‌توانیم. مثلاً اینکه «دستم را در حال چرخش نگه می‌دارم» یا اینکه «حباب لامپ را با یک حرکت نصب می‌کنم».

یک مغز و بی‌نهایت طرح بدن

همان گونه که در مورد مَت تیرانداز یا فیث سگ دیدیم، مغز خود را سازگار می‌کند تا بتواند هر بدنی را که در اختیارش قرار گرفته، به کار بیندازد. و مانند دست روباتیک جَن و بازوی آب‌نبات‌گیر میمون، مغز می‌تواند نحوه‌ی کار با اضافات سخت‌افزاری جدید را هم یاد بگیرد. شبکه‌های درون مجموعه این کار را با صادر کردن فرمان‌های حرکتی (به طرف چپ خم شو)، ارزیابی کردن بازخورد (اسکیت‌بورد کج می‌شود و تکان می‌خورد)، و سپس تعدیل کردن پارامترها برای بالا رفتن از کوه مهارت انجام می‌دهند.

آیا مغز می‌تواند با هر دنیایی یا هر طرح بدنی سازگار شود؟ تا چند صد سال بعد، شاید شاهد متولد شدن بچه‌های انسان بر روی کره‌ی ماه یا مریخ باشیم. آن‌ها با شرایط جاذبه‌ی متفاوتی بزرگ خواهند شد. در نتیجه، بدن آن‌ها احتمالاً به‌صورت متفاوتی رشد و نمو پیدا خواهد کرد، و برای حرکت کردن از انواع متفاوتی از زوایا بدنی استفاده خواهند کرد. متخصصان علوم اعصاب در آینده‌ی دور پرسش‌هایی را درباره‌ی بدن آن‌ها و تکوین مغز آن‌ها مطالعه خواهند کرد، و پرسش دیگرشان این خواهد بود که آیا آن کودکان در نتیجه‌ی این تفاوت‌ها، از جهات دیگر هم متفاوت خواهند بود، مثلاً از نظر حافظه،

شناخت، یا تجربه‌ی خودآگاه؟

مثلاً ببینید که وقتی اصول مدراسازی پویا را یاد بگیریم، چه تأثیری بر صنایع ما خواهد داشت. فکر کنید چه مزیت‌هایی خواهد داشت اگر یک خودروساز نوعی موتور طراحی کند و آن را برای مدل‌های مختلف وسیله‌ی نقلیه به کار گیرد (ماشین چمن‌زنی، سه‌چرخ، وانت، سفینه‌ی فضایی)، با این فرض که موتور خودش را هماهنگ خواهد کرد تا هر کدام از این دستگاه‌ها را به‌طور بهینه به کار بپردازد. و تصور کنید که بازار قطعات یدکی بتواند قطعات جدیدی — مانند پره‌ها یا پایه‌های جمع‌شدنی — به خودرو اضافه نماید و خود خودرو بفهمد که چگونه از آن‌ها استفاده کند.

اکنون در حال ورود به دوران بیونیک هستیم، که در آن افراد می‌توانند از تجهیزات بهتر و بادوام‌تری نسبت به روبات‌های گوشتی اولیه‌ی ما بهره‌مند شوند. وقتی که یک میلیون سال بعد، نوادگان ما که برای ما قابل تشخیص نیستند، ما را مطالعه کنند، شاید این لحظه از تاریخ ما را نخستین زمانی بدانند که ما از سیر آهسته‌ی تکوین خود بیرون آمدیم و شروع به هدایت آینده‌ی بدن خود کردیم. بیونیک روز به روز بیشتر متداول خواهد شد. در زمان نوه‌های نوه‌های ما، وقتی که پای کسی از کار بیفتد، او خانه‌نشین نمی‌شود؛ وقتی که دستش قطع می‌شود، از کار افتاده نمی‌شود. بلکه اندامی مصنوعی را روی بدن نصب خواهند کرد تا مغز خودش طرز کنترل آن را یاد بگیرد. افرادی که دچار فلج چهار اندام هستند، خواهند توانست با پوشش اگزواسکلتی که با فکر کنترل می‌شود، برقصند.^[۳۱]

و جدای از بازیابی عملکرد از دست رفته، قابلیت‌های حرکتی خود را به فراتر از محدودیت‌های زیستی سستی خود بسط خواهند داد. در قرن‌های آینده، داستان دکتر اختاپوس هشت‌پا به همان اندازه برای خوانندگان معمولی به نظر خواهد رسید که داستان علمی-تخیلی ژول ورن مبنی بر اینکه انسان بتواند اقیانوس اطلس را در یک روز درنوردد. نوادگان ما مجبور نخواهند بود خودشان را محدود به مرزهای بدن‌شان کنند؛ بلکه خواهند توانست با هر چیزی که تحت کنترل آن‌ها باشد، گیتی را درنوردند.

۶ | چرا تمرین اهمیت دارد؟

لاشلو پولگار سه دختر دارد. او به شطرنج علاقه‌مند است و دخترانش را هم خیلی دوست دارد، از این رو، دست به آزمایش کوچکی زد: او و همسرش در خانه موضوعات مختلف و همچنین شطرنج را با جدیت تمام به دخترانشان آموزش دادند. هر روز، مهره‌های مختلف را در شصت و چهار خانه‌ی شطرنج جابه‌جا می‌کردند.

وقتی که سوزان، دختر بزرگ‌تر، پانزده‌ساله شد، برترین بازیکن شطرنج جهان شد. در سال ۱۹۸۶، واجد شرایط شرکت در مسابقات قهرمانی جهان برای مردان شد — که نخستین‌بار بود که یک زن به این موفقیت دست می‌یافت — و ظرف پنج سال عنوان استاد بزرگ مردان را به دست آورد.

در سال ۱۹۸۹، در میانه‌ی موفقیت‌های خیره‌کننده‌ی سوزان، خواهر وسطی‌اش سوفیا که چهارده‌ساله بود، به خاطر پیروزی چشمگیرش در تورنمنت ایتالیا که «گارت رم» نام گرفت و یکی از قوی‌ترین بازی‌ها از سوی فردی چهارده‌ساله بود، به شهرت رسید. سوفیا در ادامه استاد بین‌المللی و استاد بزرگ زنان شد. و بعد نوبت به جودیت، خواهر کوچک‌تر، رسید که عموماً بهترین بازیکن شطرنج زن در تاریخ شناخته می‌شود. او در سن پانزده سال و چهار ماهگی به عنوان استاد بزرگ دست یافت، و همچنان تنها زن در لیست ۱۰۰ بازیکن برتر فدراسیون جهانی شطرنج است. او تا مدتی در میان ده نفر اول این لیست بود. چه چیزی عامل موفقیت آن‌ها بود؟

والدین آن‌ها معتقد به این بودند که نابغه‌ها ساخته می‌شوند، نه اینکه با نبوغ متولد شوند.^[۱] آن‌ها دخترها را هر روز آموزش می‌دادند. نه تنها شطرنج یادشان می‌دادند؛ بلکه آن‌ها را با شطرنج تغذیه می‌کردند. نوازش، تشویق، تأیید، و توجهی که به دخترها می‌کردند، بر پایه‌ی عملکرد آن‌ها در شطرنج بود. در

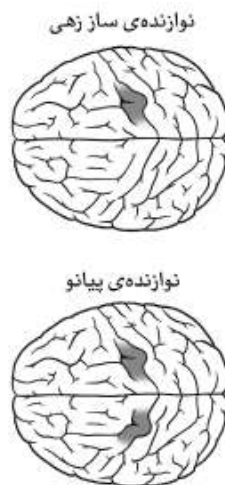
نتیجه، مدارهای زیادی در مغز آن‌ها به شطرنج اختصاص پیدا کرد. دیدیم که مغز چگونه در پاسخ به ورودی‌ها بازآرایی می‌شود، ولی واقعیت آن است که همه‌ی اطلاعاتی که وارد می‌شود، به یک اندازه اهمیت ندارد. چگونگی سازگار شدن مغز تا حد زیادی بستگی به این دارد که وقت‌تان را صرف چه کاری می‌کنید.^[۲] اگر تصمیم بگیرید شغل‌تان را به پرنده‌شناسی تغییر دهید، مقدار بیشتری از منابع عصبی شما به یاد گرفتن تفاوت‌های ظریف بین پرندگان (شکل بال، رنگ سینه، اندازه‌ی متقار) اختصاص خواهد یافت، در حالی که شاید تا قبل از آن بازنمایی پرندگان در مغز شما چندان دقیق نبوده است (آن یک پرنده است یا یک هواپیما؟).

قشر حرکتی پرلمان در مقایسه با اشکنازی

داستانی درباره‌ی اسحاق پرلمان نوازنده‌ی ویولن نقل کرده‌اند. یک بار پس از کنسرت، یکی از هواداران به او گفت: «حاضرم عمرم را بدهم تا این‌طوری ویولن بزنم.»

پرلمان در پاسخ به او گفت: «من هم عمرم را داده‌ام».^[۳] پرلمان هر روز صبح ساعت ۵:۱۵ از رختخواب بلند می‌شود. پس از دوش و صبحانه، تمرین صبحگاهی چهار و نیم ساعته‌اش را شروع می‌کند. مدتی برای ناهار و ورزش تعطیل می‌کند، و سپس بعدازظهر چهار و نیم ساعت دیگر تمرین می‌کند. این کار را تمام روزهای سال انجام می‌دهد، مگر روزهای کنسرت، که فقط جلسه‌ی تمرین صبح را انجام می‌دهد.

مدارهای مغزی منعکس‌کننده‌ی کاری است که انجام می‌دهید، و لذا قشر مغزی موسیقیدانی که تمرین زیادی می‌کند، به شکلی مشخصاً متفاوت درمی‌آید — چیزی که در تصویربرداری مغز، حتی برای افراد آموزش‌ندیده، قابل تشخیص است. اگر به دقت به ناحیه‌ای از قشر که در حرکت دست دخالت دارد، توجه کنید، شاهد چیز حیرت‌انگیزی خواهید بود: موسیقیدانان در قشر مغزشان شکنجی دارند که در افراد دیگر وجود ندارد، و به شکل حرف یونانی امگا (Ω) است.^[۴] هزاران ساعت تمرین با آلت موسیقی، مغز موسیقیدان‌ها را شکل می‌دهد.



تفاوت بین نوازندگان ویولن و پیانو را می‌توان تنها با نگاه کردن به قشر حرکتی آنها مشاهده کرد. و تازه‌یافته‌ها به همین جا ختم نمی‌شود. پرلمان، نوازنده‌ی ویولن، و ولادیمیر اشکنازی، نوازنده‌ی پیانو، هر دو شیفتگی عمیقی به کار خود دارند، ساعت‌های بی‌شمار تمرین کرده‌اند، و برنامه‌ی سفر بسیار سنگینی دارند — و با این حال، مغزشان به قدری متفاوت است که راحت می‌توانید بفهمید هر مغز مال کدام‌یک از آنها است. نوازندگان سازهای زهی مانند پرلمان معمولاً فقط در یک نیمکره علامت امگا را نشان می‌دهند، زیرا بیشتر کارهای ظریف را انگشتان چپ دست انجام می‌دهند، و دست راست فقط آرشه را روی زه‌ها می‌کشد. برعکس، یک نوازنده‌ی پیانو مانند اشکنازی علامت امگا را در هر دو نیمکره نشان می‌دهد، زیرا هر دو دست الگوهای بسیار دقیقی را روی کلیدهای عاجی پیانو اجرا می‌کنند. صرفاً با نگاه کردن به قشر حرکتی، می‌توانید بگویید که چه نوع موسیقیدانی درون دستگاه تصویربرداری شما است. از بازآرایی مغز نیز چیزهای بیشتری را می‌توان فهمید: نه تنها نشان می‌دهد که یک دست کمتر یا بیشتر کار می‌کند، بلکه بعضی وقت‌ها این را نیز مشخص می‌کند که چه کاری انجام می‌دهد. فرض کنید در خط مونتاژ کار می‌کنید و یکی از دو کار به‌طور تصادفی به شما اختصاص داده می‌شود: یا تیله‌های کوچکی را درون شیشه می‌ریزید، و یا اینکه درپوش شیشه را می‌بندید. هر دو کار با دست

راست انجام می‌شود، ولی در کار اول باید با ظرافت از نوک انگشتان استفاده کنید، در حالی که در کار دوم از مچ و ساعد استفاده می‌شود. اگر کار شما پر کردن شیشه باشد، بازنمایی قشری انگشتان شما به خرج مچ و ساعد افزایش خواهد یافت. اگر کارتان بستن درپوش باشد، عکس این حالت اتفاق می‌افتد.^[۵] به این طریق، کاری که مکرر انجام می‌دهید، در ساختار مغز منعکس می‌شود. و این تغییرات شامل چیزی بسیار بیشتر از قشر حرکتی است. مثلاً اگر چند ماه را صرف یاد گرفتن خط بریل کنید، قطعه‌ای از قشر که نشان‌دهنده لمس انگشت اشاره است، بزرگ‌تر خواهد شد.^[۶] اگر در بزرگسالی کار ژانگولربازی را در پیش بگیرید، نواحی بصری مغزتان افزایش خواهد یافت.^[۷] مغز صرفاً نشان‌دهنده دنیای بیرون نیست، بلکه به‌طور خاص نشان‌دهنده دنیای بیرونی شما است.

در واقع، همین است که باعث مهارت پیدا کردن در یک کار می‌شوند. بازیکنان حرفه‌ای تنیس از قبیل سرینا و ونوس ویلیامز سال‌ها صرف آموزش می‌کنند تا اینکه بتوانند در اثنای بازی به‌طور خودکار حرکت درست را انجام دهند: قدم برداشتن، چرخیدن، ضربه با پشت راکت، جلو رفتن، عقب رفتن، هدف گرفتن، و ضربه‌ی بالای سر.^[۸] آن‌ها هزاران ساعت تمرین می‌کنند تا حرکات وارد مدارهای ناخودآگاه مغزشان شود؛ اگر می‌خواستند تنها با شناخت سطح بالا بازی کنند، شانس خیلی کمی برای بُردن داشتند. پیروزی آن‌ها در گرو آن است که مدارهای زیادی در مغزشان تشکیل دهند.

شاید قانون ده هزار ساعت به گوش‌تان خورده باشد، که بیان می‌کند که یک مهارت را باید ده هزار ساعت تمرین کنید تا خبره شوید — اعم از تخته‌موج‌سواری، غارنوردی، یا نواختن ساکسوفون. گرچه تعداد دقیق ساعت‌ها را نمی‌توان تعیین کرد، ولی ایده‌ی کلی آن صحیح است: باید مقدار زیادی تکرار کنید تا نقشه‌ی لازم را در مغزتان ایجاد کنید. دستین سندلین را با دوچرخه‌اش که فرمان معکوس داشت، به خاطر دارید؟ گرچه از نظر شناختی می‌دانست که این دوچرخه چگونه کار می‌کند، ولی نمی‌توانست به آن سوار شود. می‌بایست چندین هفته تمرین می‌کرد. میمون‌هایی را هم که مجبور بودند غذای‌شان را با شن کش بردارند، به خاطر آورید. گفتم که نقشه‌ی بدن

آن‌ها بازآرایی شد تا شامل طول آن ابزار باشد: شن‌کش جزئی از طرح بدن آن‌ها شد.^[۹] چیزی که در آنجا به شما نگفتم، این است که این بازآرایی تنها زمانی صورت می‌گیرد که میمون فعالانه از شن‌کش استفاده کند. اگر به صورت غیرفعال آن را در دست داشته باشد، هیچ‌گونه بازآرایی در مغز اتفاق نمی‌افتد. مغز باید مکرراً با آن ابزار تمرین کند، نه اینکه فقط آن را در دست بگیرد. این مبنای قانون ده هزار ساعت است.

اثرات عصبی تمرینات فشرده فقط در ارتباط با خروجی‌های حرکتی، از قبیل نواختن ویولن، حرکت دادن راکت تنیس، یا کار کردن با شن‌کش نیست. برای ورودی‌ها هم صادق است. وقتی که دانشجویان پزشکی در طول سه ماه برای امتحانات نهایی خود مطالعه می‌کنند، حجم ماده‌ی خاکستری مغزشان به قدری تغییر می‌کند که با چشم غیرمسلح نیز در اسکن مغزی قابل مشاهده است.^[۱۰] وقتی هم افراد بزرگسال یاد می‌گیرند که در آینه وارونه بخوانند، تغییرات مشابهی بروز می‌کند.^[۱۱] به همین ترتیب، مناطقی از مغز که در مسیریابی فضایی دخالت دارد، در رانندگان تاکسی لندن به‌طور مشهودی با بقیه‌ی افراد متفاوت است. در هر نیمکره، ناحیه‌ی هیپوکامپ در رانندگان تاکسی بزرگ می‌شود، که این ناحیه در نقشه‌های درونی دنیای بیرون دخالت دارد.^[۱۲] کاری که وقت‌تان را صرف آن می‌کنید، مغزتان را تغییر می‌دهد. شما فقط آن چیزی نیستید که می‌خورید؛ بلکه اطلاعاتی هم که وارد ذهن‌تان می‌کنید، شما را شکل می‌دهد. به این طریق بود که خواهران پولگار توانستند در بازی شطرنج، قهرمان جهان شوند. علت آن داشتن ژنی برای مهارت در شطرنج نبود؛ علتش آن بود که مرتب تمرین می‌کردند، و مسیرهایی را در مغزشان می‌ساختند که قدرت و الگوی حرکت اسب، رخ، فیل، پیاده، شاه، و وزیر در آن کدگذاری می‌شد. پس مغز منعکس‌کننده‌ی دنیای بیرون است. ولی چگونه؟

آراستن منظره

اخیراً کاریکاتوری را در اینترنت دیدم: تصویری از مغز آدم که بالای آن نوشته شده بود: «هی، فکر می‌کنم گوشی موبایل در جیب لرنش کرد.» و زیر آن نوشته شده بود: «شوخی می‌کنم، گوشی که اصلاً در جیب نیست، ابله.»

توهم ارتعاش گوشی موبایل تهدیدی است که مختص قرن بیست و یکم است. این وضعیت بر اثر وقوع لحظه‌ای اسپاسم، لرزش، تکان خوردن، یا لمس روی پای شما بروز می‌کند. مادام که بسامد و مدت احساس به‌طور مبهمی مشابه با احساس ناشی از موبایل شما باشد، مغزتان از طرف شما تصمیم خواهد گرفت که فرد مهمی قصد برقراری تماس با شما را دارد. سی سال قبل، اگر متوجه لرزش پایتان می‌شدید، آن را تفسیر می‌کردید که مگسی روی پایتان نشسته، یا لباس‌تان تکان خورده، یا کسی از کنارتان رد شده است.

چرا تفسیر از نسلی به نسل بعدی متفاوت است؟ زیرا هم‌اکنون گوشی موبایل به‌عنوان توضیح بهینه برای دامنه‌ای از احساسات لرزشی تلقی می‌شود. برای اینکه ببینید در مغز چه اتفاقی می‌افتد، منظره‌ای پر از تپه را در نظر بگیرید. برای اینکه یک قطره‌ی باران به دریاچه راه پیدا کند، لازم نیست مستقیماً در آب بیفتد؛ بلکه کافی است روی تپه‌های اطراف بیفتد. صرف نظر از اینکه روی سرازیری شمال دریاچه بیفتد یا جنوب آن، روی شیب شرقی واقع شود یا غربی، سرانجام به دریاچه راه پیدا خواهد کرد. به‌طور مشابه، احساسی هم که شما روی ران پایتان احساس می‌کنید، لازم نیست حتماً مربوط به ارتعاش گوشی موبایل باشد. شاید مربوط به جابه‌جا شدن شلوار جین شما باشد، یا تکان خوردن ماهیچه‌ی ران، یا خارش پوست، و یا برخورد خفیف با کاناپه. مادام که احساس نزدیک باشد، سیگنال‌ها در شیب به طرف نتیجه‌گیری سرازیر می‌شوند: پیام مهمی است که باید فوراً چک کنید. منظره بر پایه‌ی چیزی که برای شما اهمیت دارد، شکل می‌گیرد.

مثلاً چگونگی تفسیر صداهای زبان را در نظر بگیرید. طبیعی به نظر می‌رسد که شما صداهای زبان مادری خود را می‌فهمید، ولی از زبان‌های خارجی، صداهای مشابهی می‌شنوید که نمی‌توانید دقیقاً تفاوت آن‌ها را تشخیص دهید. ولی چرا؟ معلوم می‌شود که مغز افرادی که به آن زبان‌ها تکلم می‌کنند، تا حدودی متفاوت است.

ولی از بدو تولد آن‌گونه نبوده و مغز شما هم این‌گونه نبوده است. اگر دامنه‌ی تمام صداهایی را که ما انسان‌ها می‌توانیم با دهان‌مان ادا کنیم، در نظر بگیرید، می‌بینید که پیوستار نسبتاً همواری را تشکیل می‌دهد. با این وجود،

براساس تجربه یاد می‌گیرید که صداهای خاص معنای یکسانی دارند، صرف نظر از اینکه پدر شما یا پرستار بچه و یا معلم‌تان آن را بر زبان آورد: مغز شما متوجه می‌شود که صدای *eeeeee* کشیده و صدای *e* کوتاه هر دو به دسته‌ی *E* تعلق دارند. همین مطلب در مورد صدای *aeae* دوست‌تان با لهجی تگزاسی و صدای *oy* از دوست استرالیایی‌تان صادق است. تجربه به شما می‌آموزد که این گویندگان، علی‌رغم تلفظ متفاوتی که دارند، صدای یکسانی را در نظر دارند، و لذا شبکه‌های عصبی شما منظره‌ای را ترسیم می‌کنند که در آن همه‌ی این صداها از شیب تپه به پایین می‌غلطند و به تفسیر یکسانی منجر می‌شوند.

در دره‌های مجاور، صداهایی جمع می‌شوند که معادل با *A*، *I*، یا *O*، و غیره هستند. با گذشت زمان، منظره‌ی شما با کسی که در زبان دیگری بزرگ شده است، متفاوت می‌شود، زیرا او باید پیوستار هموار صداها را به گونه‌ی دیگری تشخیص بدهد.

مثلاً کودکی را که در ژاپن متولد شده (فی‌المثل به نام هایاتو) و کودکی را که در آمریکا متولد شده (به نام ویلیام) در نظر بگیرید. از نظر مغزی تفاوتی بین آن‌ها وجود ندارد. ولی هایاتو در اوساکا از همان روز اول کلمات ژاپنی را از دور و بر خود می‌شنود. ویلیام در پالو آلتو اصوات انگلیسی را می‌شنود، که صداهای آن هر کدام معنای خاصی دارند. نمونه‌ای از چیزهایی که این دو کودک به صورت متفاوت می‌شنوند، تشخیص صداهای *R* و *L* است. در انگلیسی این دو صدا معنی کلمه را تغییر می‌دهند (مثلاً *right* یا *right*، *light* یا *law*)، ولی در ژاپنی چنین تمایزی بین این دو صدا وجود ندارد. در نتیجه، منظره‌ی درونی ویلیام بین تفسیر *R* و *L* یک رشته‌کوه می‌سازد، به گونه‌ای که تفاوت بین این دو صدا از نظر ادراکی واضح است. در مغز هایاتو، منظره به صورت یک دره است، به طوری که صداهای *R* و *L* هر دو به تفسیر یکسانی منتهی می‌شوند: در نتیجه، هایاتو نمی‌تواند تفاوت بین این دو صدا را تشخیص دهد.^[۱۳]

بدیهی است که مغز بچه‌ها از بدو تولد به این صورت نیست: اگر مادر ویلیام در زمان بارداری به اوساکا نقل مکان می‌کرد، و مادر بارداری هایاتو به پالو آلتو می‌رفت، این پسرها بدون هرگونه مشکلی یاد می‌گرفتند که زبان جدید را روان صحبت کنند و بفهمند. برخلاف مسائل ژنتیکی، چشم‌انداز عصبی آن‌ها

به گونه‌ی شکل می‌گیرد که وابسته به محیط پیرامون آن‌ها است. این شکل‌گیری در سنن بسیار پایین اتفاق می‌افتد، خیلی قبل از آنکه هایاتو یا ویلیام حتی حرف زدن را یاد بگیرند. این را می‌توان با تماشای رفتار مکیدن شیرخوار در زمانی که تغییر ناگهانی صدا اتفاق می‌افتد، نمایش داد. مثلاً صدای R را به‌طور مداوم ایجاد کنید و بعد ناگهان آن را به صدای L تغییر دهید: $RRRRLLLL$. معلوم شده است که وقتی شیرخواران تغییری در صدا احساس می‌کنند، با سرعت بیشتری به پستان مک می‌زنند — از این رو، در سن شش ماهگی، هایاتو و ویلیام هر دو هنگام تغییر صدای R به L سریع‌تر مک خواهند زد. ولی در سن دوازده ماهگی، هایاتو دیگر این تغییر را حس نمی‌کند. صداهای R به L برای او یکسان است، و هر دو به طرف دره‌ی یکسانی سرازیر می‌شود. مغز هایاتو توانایی خود برای تشخیص این دو صدا را از دست داده است، در حالی که مغز ویلیام که به‌طور غیرفعال صدای پدر و مادرش را شنیده که ده‌ها هزار کلمه‌ی انگلیسی را بر زبان آورده‌اند، یاد گرفته است که اختلاف بین این دو صدا حامل اطلاعات است. برعکس، مغز هایاتو بین صداهایی تمایز قایل می‌شود که برای ویلیام غیرقابل تشخیص است. پس دستگاه شنوایی در همه به‌صورت یکسانی شروع می‌شود و سپس بسته به اینکه در چه نقطه‌ای از این سیاره‌ی خاکی چشم به دنیا گشوده باشید، مدارسازی خود را به گونه‌ای انجام می‌دهد که تمایزهای خاص مربوط به زبان را به حداکثر برساند.

به همین ترتیب، ارتعاش گوشی هم چیزی نیست که شما از ابتدای تولد قادر به آشکارسازی آن باشید؛ بلکه به علت اهمیت بالایی که دارد، منظره‌ی عصبی شما را چنان شکل می‌دهد که شما مجموعه‌ای از حس‌های مشابه را نیز به‌عنوان آن تفسیر می‌کنید. شما هم مانند صداهای R و L برای هایاتو، تکان‌ها، ارتعاشات، و لرزش‌ها را به‌صورت تفسیر یکسانی از رخداد با هم ترکیب می‌کنید.

براساس آنچه تاکنون دیدیم، شاید فکر کنیم که تمرین یا تماس مکرر، کلید قالب‌ریزی مدارهای مغز شما است. ولی در واقع، اصل عمیق‌تری در این کار دخالت دارد.

عزم راسخ

– برای عوض کردن یک لامپ، چند روان‌پزشک لازم است؟
– فقط یکی. ولی لامپ باید دلش بخواهد که عوض شود.

برگردیم به فیث، سگ دوپایی که در فصل قبل با او ملاقات کردیم. تا اینجا، داستان او را طوری تعریف کردم که انگار مغزش به‌طور جادویی متوجه طرح غیرطبیعی بدن او شده است. ولی حالا می‌توانیم کمی عمیق‌تر فکر کنیم تا وجوه پنهان ماجرا را دریابیم. آیا فیث ویژگی خاصی داشته است؟ آیا هر سگی می‌توانسته این کار را بکند؟ و اگر می‌توانست، پس چرا تمام سگ‌ها روی دو پا راه نمی‌روند؟

بازنویسی نقشه‌های مغزی فیث کلاً در ارتباط با چیزهایی بود که برای زندگی او اهمیت دارد. اهداف او مغزش را شکل می‌داد. فیث می‌بایست دنبال غذا می‌رفت. و این مشکلی بود که نیاز به راه‌حل داشت. نمی‌توانست از همان روشی که هم‌قطاران چهارپایش استفاده می‌کردند استفاده کند و قرار هم نبود با پهباد یا بیرون‌بر برایش غذا بیاورند. باید راه‌حل جدیدی پیدا می‌کرد. مغز او راهبردهای مختلفی را امتحان کرد تا اینکه به راهی رسید که مؤثر بود: ایستادن روی دو پای عقب و قدم برداشتن به طرف جلو. از این طریق، به آنچه نیاز داشت، دست یافت، و پس از مدتی به این روش راه رفتن کاملاً مسلط شد. اگر راهی برای حل مشکل‌اش پیدا نمی‌شد، از گرسنگی می‌مرد. با توجه به انگیزه‌ای که برای زنده ماندن داشت، به کمک انعطاف‌پذیری مدارهای مغزی خود فرضیه‌های مختلف را آزمایش کرد تا مشکل را حل کند، و بتواند غذا و سرپناه خود را تأمین کند و از عزیزان خود مراقبت نماید.

اهداف مغز نقش مهمی در چگونگی و زمان تغییر کردن آن دارد. در مورد خواهران پولگار، اسحاق پرلمان، یا ولادیمیر اشکنازی، مهارت پیدا کردن آن‌ها بستگی به خواست آن‌ها برای کسب آن مهارت داشت. تصور کنید که سرینا و ونوس ویلیامز برادری عاطل و باطل به نام فرد می‌داشتند، و پدر و مادرشان راکتی در دست او می‌گذاشتند و مجبورش می‌کردند که سال‌ها تنیس تمرین کند. فرض کنید که او از تنیس بیزار بوده باشد. او نه از هم‌کلاسی‌هایش درباره‌ی عملکرد

خود بازخوردی دریافت کرده، نه در مسابقه‌ای برنده شده، و نه بزرگ‌ترها از او تمجید و ستایش کرده‌اند. نتیجه‌ی آن همه تمرین چه بوده است؟ هیچ. در مغز فرد بازآرایی چندانی دیده نخواهد شد. گرچه بدنش حرکات را انجام داده، ولی آن حرکات با انگیزه‌های درونی‌اش هم‌راستا نبوده است.

این را می‌توان به آسانی در آزمایشگاه نشان داد. آزمایشی را تصور کنید که در آن کسی روی پای شما کد مورس می‌زند، و جدای از او، کس دیگری یک سری صدا را پخش می‌کند. اگر برای رمزگشایی پیام‌های روی پا به شما جایزه‌ی نقدی داده شود، نواحی مغزی مربوط به لمس آن بخش از بدن (در قشر حسی پیکری) توسعه پیدا کرده و تفکیک‌پذیری بالاتری به دست می‌آورد. اما نواحی مربوط به شنوایی (قشر شنوایی) تغییر نخواهد کرد، ولو آنکه آن ناحیه از مغز نیز مرتب تحریک می‌شود. حالا عکس این کار را در نظر بگیرید: یعنی فرض کنید با پاسخ دادن به پرسش‌های مربوط به تفاوت‌های ظریف بین صداها به شما جایزه داده می‌شود، ولی توجه به ضربه‌های روی پا هیچ جایزه‌ای در بر ندارد. این بار قشر شنوایی شما تغییر خواهد کرد، ولی سیستم حسی پیکری تغییر نخواهد کرد.^[۱۴] ورودی‌ها در هر دو مورد دقیقاً یکسان است، ولی تغییراتی که انجام می‌شود بستگی به این دارد که به کدام کار پاداش داده می‌شود.

بدین خاطر است که فرد ویلیامز در بازی مهارت پیدا نمی‌کند: چون پاداشی از آن نصیب‌اش نمی‌شود. در مغز او هم مثل شما، نقشه‌های موجود فضای عصبی منعکس‌کننده‌ی راهبردهایی است که بازخورد مثبت کسب کرده‌اند.

درک این مسئله، مسیرهای جدیدی را برای بازیابی پس از آسیب مغزی می‌گشاید. تصور کنید که یکی از دوستان شما دچار سکته‌ی مغزی می‌شود و بخشی از قشر حرکتی او آسیب می‌بیند، و در نتیجه‌ی آن، یکی از دست‌هایش عمده‌تاً فلج می‌شود. او چند بار تلاش می‌کند از دست ضعیف‌اش استفاده کند، ولی بالاخره دلسرد می‌شود و برای انجام کارهای ضروری روزمره از دست سالم‌اش استفاده می‌کند. معمولاً وضعیت به همین صورت است، و دست ضعیف مرتب ضعیف‌تر می‌شود.

درس‌هایی که از مدارسازی پویا می‌گیریم، راه‌حلی غیرشهودی را پیشنهاد می‌کند که محدودیت‌درمانی نامیده می‌شود: دست سالم او را ببندید تا نتواند

از آن استفاده کند. با این کار، مجبور می‌شود دست ضعیف را به کار بگیرد. این روش ساده، با اجبار به استفاده از دست معیوب، قشر آسیب‌دیده را دوباره آموزش می‌دهد — و با زرنگی از سازوکارهای عصبی زیربنایی اراده و پاداش نیز بهره می‌گیرد. به هر حال، او انگیزه‌ی ذاتی دارد که ساندویچ را به دهانش ببرد، کلید را در داخل قفل در بچرخاند، موبایل را تا کنار گوشش بالا ببرد، و اعمال دیگری را که زیربنای یک زندگی خودکفا و همراه با کرامت است، انجام دهد. گرچه محدودیت‌درمانی در ابتدا دلسرد کننده است، ولی این رویکرد در عمل بهترین درمان است: مغز را وادار می‌کند که راهبردهای جدیدی را امتحان کند، و پاداش نصیب روش‌هایی می‌شود که اتفاقاً مؤثر هستند.

میمون‌های سیلور اسپرینگ را که طرح بدن‌شان تغییر کرده بود، به خاطر دارید؟ اتفاقاً، ایده‌ی محدودیت‌درمانی از همان پژوهش‌ها به وجود آمد. در آن آزمایش، اعصاب دست را در میمون‌ها مختل کرده بودند، و پژوهشگر، ادوارد تاوب، این پرسش را از خودش پرسید که آیا میمون‌ها صرفاً به خاطر اینکه دست سالم‌شان بهتر کار را انجام می‌دهد، دیگر از دست معیوب‌شان استفاده نمی‌کردند؟ لذا تاوب برای آزمایش کردن این فکر، دست سالم میمون را با طنابی بست، تا اصلاً نتواند از آن استفاده کنند. حالا میمون یک مشکل داشت. عصب یک دستش قطع شده بود، و دست دیگرش بسته شده بود. میمون اگر غذا می‌خواست، واقعاً یک راه بیشتر نداشت: می‌بایست شروع به استفاده از دست ضعیف می‌کرد. بنابراین، همان کار را هم کرد. متناقض به نظر می‌رسید که راه‌حل **مريضی** میمون در بدتر کردن آن باشد، ولی این دقیقاً چیزی است که به حل مشکل کمک کرد.^{۱۵۱}

پس برمی‌گردیم به سراغ سگ‌مان، فیث. آیا همه‌ی سگ‌ها می‌توانند روی پاهای عقبی خود راه بروند؟ مطمئناً. ولی اکثر سگ‌ها هرگز دلیل یا انگیزه‌ای برای انجام این کار ندارند، و قطعاً آن‌قدر انجام نمی‌دهند که بر آن مسلط شوند. بدین خاطر است که فیث مشهور شد: نه به خاطر اینکه او تنها سگی است که توانسته این کار را انجام دهد، بلکه بدان خاطر که تنها سگی است که عملاً این کار را کرده است. به همین ترتیب، استفاده‌ی افراد نابینا از جهت‌یابی پژوهشی را نیز به خاطر آورید. در اینجا نیز معلوم شده که افراد با بینایی سالم

هم می‌توانند جهت‌یابی پژوهشی را یاد بگیرند.^(۱۶) ولی اکثر افراد بینا اصولاً انگیزه‌ی کافی ندارند که ساعت‌ها وقت خود را صرف تمرین برای تربیت دقیق این ناحیه‌ی عصبی کنند.



پاداش روش قدرتمندی برای مدراسازی مجدد مغز است، ولی خوشبختانه، مغز شما برای هر تغییری نیاز به کلوچه یا پول ندارد. در حالت عمومی‌تر، تغییرات در ارتباط با چیزهایی است که با اهداف شما مرتبط است. اگر در مناطق شمالی باشید و نیاز داشته باشید که درباره‌ی ماهی‌گیری زیر یخ و انواع مختلف یخ چیزهایی یاد بگیرید، مغز شما در نهایت آن را کدگذاری خواهد کرد. ولی اگر در مناطق استوایی باشید و لازم باشد بدانید که چگونه از مارها دوری کنید و چه نوع قارچ‌هایی را بخورید، مغز شما منابع خود را به این موضوعات اختصاص خواهد داد. مغز مرتبط بودن موضوع را ستاره‌ی راهنمای خود می‌داند، و با انعطاف‌پذیری، جزئیات مهم را یاد می‌گیرد. میلیاردها نورون مغز مانند بوم نقاشی عظیمی هستند که مغز دنیایی را که اتفاقاً در آن قرار گرفته‌ایم، روی آن ترسیم می‌کند، و با این کار، در چیزهایی که برایمان اهمیت دارد، مهارت پیدا می‌کنیم، اعم از بسکتبال، تئاتر، بدمیتون، ادبیات کلاسیک یونان، پرش از صخره، بازی‌های ویدئویی، رقص سنتی، یا شراب‌سازی. وقتی که کاری کمابیش در راستای اهداف کلان ما باشد، در مدارهای مغزمان هم منعکس می‌شود.

به‌عنوان یک تشبیه، بازطراحی پیوسته‌ی دولت‌ها را در نظر بگیرید. دولت ایالات متحده در پاسخ به حملات ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱، ساختار خود را تغییر داد. این کشور وزارت امنیت میهن را تأسیس کرد، که بیست و دو آژانس امنیتی قبلی زیر چتر آن قرار گرفتند. مشابه با آن، شعله‌ور شدن جنگ سرد نیز تغییر بزرگی را در سال ۱۹۴۷ آغاز کرد، و منجر به تشکیل سازمان سیا شد.^(۱۷) دولت از جهات متعدد دیگر نیز منعکس‌کننده‌ی اهداف کنونی کشور و رویدادهای جهان بیرونی است. بودجه‌ی کشور بسته به اولویت‌ها کم یا زیاد می‌شود. وقتی که تهدیدهای خارجی پدیدار می‌شود، سهم بودجه‌ی نظامی بیشتر می‌شود؛

در مواقعی که صلح مستقر می‌شود، طرح‌های اجتماعی سهم بیشتری می‌گیرد. کشورها هم مانند مغزها در مقابل تغییر موقعیت، منابع را جابه‌جا می‌کنند و نمودار سازمانی خود را به گونه‌ای ترسیم مجدد می‌کنند که منطبق با چالش‌های پیش رو باشد.

تغییر دادن فضا

مغز از کجا می‌فهمد که اتفاق مهمی افتاده و باید مدارکشی خود را براساس آن تغییر دهد؟

یک راهبرد این است که زمانی که رویدادهای جهان با یکدیگر همبستگی دارند، شکل‌پذیری فعال شود. یعنی فقط چیزهایی که با هم پیشامد می‌کنند، کدگذاری شوند، مثلاً دیدن یک گاو و شنیدن صدای مُو. به این طریق، رویدادهای مرتبط در بافت مغز به هم وابسته می‌شوند. تغییر آهسته در اینجا اهمیت دارد، زیرا گاه ممکن است همراهی‌ها کاذب باشد. مثلاً ممکن است گاوی را ببینید، ولی صدای پارس سگی را بشنوید که ربطی به آن ندارد. اشتباه خواهد بود که مغز هرگونه همراهی اتفاقی را ثبت و ذخیره کند، لذا راه‌حل آن است که این تغییرات خیلی کند انجام شود و هر زمان فقط مقدار کمی تغییر کند. به این طریق، می‌تواند فقط چیزهایی را کدگذاری کند که عموماً با هم رخ می‌دهند. انطباق‌های واقعی مکرراً با هم اتفاق می‌افتند و لذا از نويز متمایز می‌شوند.

ولی با وجود عقلانی بودن تغییر آهسته و پیوسته، متوسط‌گیری همیشه تمام داستان را بازگو نمی‌کند. مثلاً یادگیری یکباره را در نظر بگیرید، به این صورت که دست به اجاق داغ می‌زنید و یاد می‌گیرید که دوباره چنین کاری نکنید. سازوکارهایی اضطراری در کار است تا رویدادهای تهدیدکننده‌ی جان یا بدن به‌طور دایمی حفظ شوند. ولی ماجرای یادگیری یکباره از این هم عمیق‌تر است. فکر کنید به موقعی که بچه بودید و مثلاً خاله‌تان کلمه‌ی جدیدی به شما یاد داد (این اسمش اناز است). نیازی نبود که این را به‌عنوان یک موقعیت اضطراری یاد بگیرید، و لازم هم نبود که خاله‌ی شما صد بار این ارتباط را تکرار کند. او با آرامش یک بار به شما گفت و شما یاد گرفتید. چرا؟ چون برای شما برجسته است. شما خاله‌تان را خیلی دوست داشتید، و دانستن کلمه‌ی

جدید و اینکه بتوانید آن میوه را درخواست کنید، برایتان منافع اجتماعی داشت. این نوع یادگیری یکباره به خاطر تهدید نیست، بلکه به خاطر مرتبط بودن و اهمیت است.

در درون مغز، این مرتبط بودن از طریق سیستم‌های گسترده‌ای بیان می‌شود که موادی شیمیایی به نام تعدیل‌کننده‌ی عصبی آزاد می‌کنند.^[۱۸] این مواد شیمیایی به صورت بسیار اختصاصی آزاد می‌شوند، و لذا تغییرات فقط در مکان‌ها و زمان‌های خاصی صورت می‌گیرد و نه در هر جا و هر زمانی.^[۱۹] یکی از پیام‌رسان‌های شیمیایی مهم، استیل‌کلین نام دارد. نورون‌هایی که استیل‌کلین آزاد می‌کند، هم تحت تأثیر پاداش‌اند و هم تنبیه. این‌ها زمانی که جانوری در حال یادگیری کاری است و باید تغییراتی را ایجاد کند، فعال هستند، ولی وقتی که کاری کاملاً تثبیت شده است، فعال نیستند.^[۲۰]

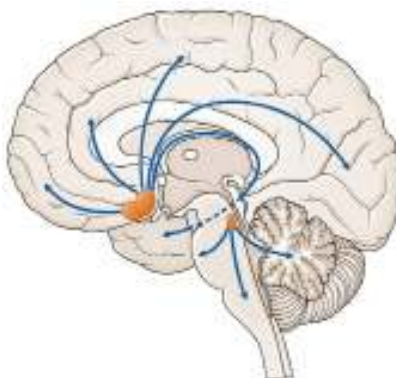
حضور استیل‌کلین در ناحیه‌ی خاصی از مغز که به آن ناحیه می‌گویند تغییر کند، ولی نمی‌گویند چگونه تغییر کند. به عبارت دیگر، وقتی که نورون‌های کلینرژیک (نورون‌هایی که استیل‌کلین آزاد می‌کنند) فعال هستند، صرفاً شکل‌پذیری نواحی هدف را افزایش می‌دهند. وقتی که غیرفعال هستند، شکل‌پذیری خیلی کم است یا اصلاً وجود ندارد.^[۲۱]

مثالی ارائه می‌کنم. فرض کنید که من نِت خاصی — مثلاً نِت «فا دیز» — را روی پیانو می‌زنم. این نِت موجب فعالیت در قشر شنوایی شما می‌شود، ولی هیچ تغییری را در ناحیه‌ی اختصاص یافته به این نِت ایجاد نمی‌کند. چرا؟ چون که این نِت معنای خاصی برای شما ندارد. حالا فرض کنید هر بار که این نِت را اجرا می‌کنم، یک کلوچه‌ی شکلاتی گرم به شما می‌دهم. در این حالت، نِت معنا پیدا می‌کند — و ناحیه‌ی اختصاص یافته به این نِت گسترش می‌یابد. مغز شما زمین بیشتری را به این بسامد اختصاص می‌دهد، زیرا وجود پاداش نشان می‌دهد که این نِت دارای اهمیت است.

حالا فرض کنید که دیگر هیچ کلوچه‌ای برایم نمانده است. حالا به جای اینکه به شما خوراکی بدهم، هم‌زمان با نواختن نِت «فا دیز»، نورون‌های آزادکننده‌ی استیل‌کلین را در مغزتان تحریک می‌کنم. این بار هم، درست مانند زمانی که کلوچه داده می‌شد، نمایش قشری مربوط به آن آهنگ گسترش پیدا

۶ | چرا تمرین اهمیت دارد؟ ۱۷۹

می‌کند.^[۲۲] مغز شما زمین بیشتری را به آن بسامد اختصاص می‌دهد، زیرا حضور استیل‌کلین نشان می‌دهد که این حائز اهمیت است.



استیل‌کلین بر نواحی وسیعی تأثیر می‌گذارد، ولی عموماً در نقاط بسیار خاصی آزاد می‌شود. از این رو، امکان آن را فراهم می‌کند که در بعضی از نقاط مدارسازی مجدد انجام شود، و در بعضی از نقاط نه.

استیل‌کلین در مغز انتشار وسیعی دارد، و در نتیجه، می‌تواند تغییراتی را در پاسخ به هر نوع محرک مرتبطی ایجاد کند، چه یک آهنگ موسیقایی باشد، چه بافت لمسی خاصی، و چه تشویق لفظی. این سازوکاری است عمومی برای گفتن اینکه این مهم است، یاد بگیر که آن را درست تشخیص دهی.^[۲۳] در این سازوکار، مهم و مرتبط بودن از طریق افزایش دادن منطقه‌ی اختصاص یافته نشان داده می‌شود.

در ضمن، تغییراتی که در تخصیص قلمرو عصبی رخ می‌دهد، در عملکرد شما نیز منعکس می‌شود. این مطلب نخستین بار در مطالعات که بر روی موش‌های صحرایی نشان داده شد. دو گروه برای کار دشوار بیرون آوردن حبه‌های قند از یک شکاف کوچک و قرار گرفته در بالا آموزش داده شدند. در یک گروه، با استفاده از داروهایی از آزاد شدن استیل‌کلین ممانعت شد. در موش‌های طبیعی، دو هفته تمرین منجر به افزایش سرعت و مهارت و متناظر با آن، افزایش وسیع مناطق اختصاص یافته به حرکت پای جلو در مغز شد. اما در موش‌های فاقد آزادسازی استیل‌کلین، ناحیه‌ی قشری بزرگ‌تر نشد،

و دقت آن‌ها برای برداشتن حبه‌ی قند هرگز بهبود نیافت.^[۲۴] بنابراین، مبنای بهبود رفتاری صرفاً انجام مکرر یک کار نیست؛ بلکه لازم است سیستم‌های تعدیل‌کننده‌ی عصبی نیز اهمیت آن کار را کدگذاری کنند. بدون استیل‌کلین، ده هزار ساعت صرف شده برای تمرین تلف خواهد شد.

فرد ویلیامز را به خاطر آورد که (برخلاف سرینا و ونوس) از تنیس متنفر است. چرا مغز او تغییری نمی‌کند، ولو آنکه او هم مثل آن‌ها ساعت‌ها صرف تمرین کرده است؟ زیرا این سیستم‌های تعدیل‌کننده‌ی عصبی با آن کار همراه نیستند. او ساعت‌ها صرف تمرین ضربه با پشت راکت می‌کند، ولی مثل آن موش‌های صحرایی است که حبه‌ی قند را برمی‌دارند، ولی در مغزشان استیل‌کلین آزاد نمی‌شود.

نورون‌های کلینرژیک به مناطق مختلف مغز کشیده می‌شوند، پس چرا وقتی که فعال می‌شوند، موجب نمی‌شود که شکل‌پذیری در همه جا اتفاق بیفتد و تغییرات عصبی وسیعی ایجاد شود؟ پاسخ آن است که آزادسازی استیل‌کلین (و تأثیر آن) به‌وسیله‌ی تعدیل‌کننده‌های عصبی دیگری تعدیل می‌شود. گرچه استیل‌کلین شکل‌پذیری را فعال می‌کند، ولی برخی دیگر از تعدیل‌کننده‌های عصبی (از قبیل دوپامین) در هدایت این تغییر دخیل هستند، و تنبیه شدن یا پاداش داده شدن کارها را کدگذاری می‌کنند. پژوهشگران در سرتاسر دنیا هنوز در تلاش برای رمزگشایی رقص پیچیده‌ی سیستم تعدیل‌کننده‌ی عصبی هستند — ولی این را می‌دانیم که این پیام‌رسان‌های عصبی بر روی هم امکان بازآرایی برخی نواحی را فراهم می‌کنند و در همان اثنا، سایر مناطق را بدون تغییر نگه می‌دارند.



رانندگان تاکسی لندن به علت حفظ کردن نقشه‌ی تمام خیابان‌های لندن شهرت دارند. آن‌ها ماه‌ها برای این کار تمرین می‌کنند، و همان طور که قبلاً گفتم، این کار موجب برخی تغییرات فیزیکی در ساختار مغز می‌شود. رانندگان تاکسی از آن جهت موفق به این کار سترگ می‌شوند که نقشه‌ها برای آن‌ها مهم است: آن‌ها این شغل را دوست دارند و با درآمد آن خواهند توانست قسط وام مسکن و

شهریه‌ی فرزند خود را بدهند یا خرج ازدواج یا طلاق آینده‌ی خود را در بیاورند. ولی جالب است که از زمان انتشار مطالعه‌ی رانندگان تاکسی در سال ۲۰۰۰، نیاز به این حفظ کردن کاهش یافته است. حالا دیگر به راحتی می‌توانید برای شناخت خیابان‌های لندن یا اصلاً تمام خیابان‌های روی زمین از گوگل استفاده کنید.

از قضای روزگار، الگوریتم‌های کنونی هوش مصنوعی اهمیتی به مرتبط بودن اطلاعات نمی‌دهند: آن‌ها هر چیزی را که از آن‌ها بخواهید، حفظ می‌کنند. البته این از ویژگی‌های مفید هوش مصنوعی است، ولی به همین هم خاطر هست که هوش مصنوعی اصولاً مانند انسان به نظر نمی‌رسد. هوش مصنوعی اصولاً اهمیتی نمی‌دهد که چه مسائلی جالب یا مرتبط هستند؛ بلکه هر چیزی را که به آن بخورانیم، حفظ می‌کند. چه در زمینه‌ی تشخیص دادن اسب از گورخر باشد و چه در ردیابی پروازهای تمام فرودگاه‌های روی کره‌ی زمین، هوش مصنوعی هیچ درکی از اهمیت مسائل جز از نظر آماری ندارد. هوش مصنوعی امروزی به‌خودی‌خود هرگز نخواهد گفت که شیفته‌ی یک مجسمه‌ی میکل آنژ شده است، یا از مزه‌ی چای تلخ متنفر است، یا اینکه نشانه‌های باروری باعث تحریک آن می‌شود. هوش مصنوعی می‌تواند ده هزار ساعت تمرین فشرده را در ده هزار ثانیه به انجام برساند، ولی هیچ کدام از صفرها و یک‌ها را بر دیگری ترجیح نمی‌دهد. در نتیجه، هوش مصنوعی می‌تواند موفقیت‌های بزرگی کسب کند، ولی هرگز نمی‌تواند به جایی برسد که شبیه انسان باشد.

مغز بومیان دیجیتال

تغییرپذیری مغز — و رابطه‌ی آن با مرتبط بودن مسائل — چه اهمیتی از نظر آموزش کودکان ما دارد؟ در نظام سنتی آموزش، معلم بی‌وقفه درس می‌دهد و حتی ممکن است مطالب را به‌صورت نکات فهرست شده بر روی اسلاید آموزش دهد. این برای تغییرات مغزی بهینه نیست، زیرا دانش‌آموزان همراه نیستند، و بدون التزام، شکل‌پذیری مغز بسیار کم است یا اصلاً اتفاق نمی‌افتد. اطلاعات بر جا نمی‌ماند.

ما نخستین نسلی نیستیم که این مشاهده را به عمل آورده‌ایم. یونانیان

باستان آن را متوجه شده بودند. آن‌ها که ابزارهای مدرن علوم اعصاب را در اختیار نداشتند ولی چشم تیزبینی داشتند، چندین سطح متفاوت برای یادگیری تعریف کردند. بالاترین سطح — که بهترین یادگیری در آنجا اتفاق می‌افتد — زمانی حاصل می‌شود که آموزنده متعهد، کنجکاو، و علاقه‌مند باشد. ما از دیدگاه امروزی خودمان می‌گوییم که فرمول خاصی از میانجی‌های عصبی برای اتفاق افتادن تغییرات عصبی لازم است، و آن فرمول با تعهد، کنجکاوی، و علاقه همبستگی دارد.

ترفند برانگیختن کنجکاوی در بافت چندین مورد از شکل‌های سنتی آموزش قرار گرفته است. مثلاً طلاب مذهبی یهودی برای مطالعه‌ی تلمود، دو به دو می‌نشینند و پرسش‌های جالبی از یکدیگر می‌پرسند. (چرا نویسنده از این کلمه‌ی خاص استفاده کرده است؟ چرا این دو عالم شرح متفاوتی ارائه کرده‌اند؟) همه چیز به صورت پرسش مطرح می‌شود، و نفر دیگر را بر آن می‌دارد که به جای حفظ کردن، در بحث مشارکت کند. با آنکه این ساختار مطالعه قدیمی باستانی دارد، ولی من اخیراً وب‌سایتی را دیدم که «پرسش‌های طلبه‌ای» درباره‌ی زیست‌شناسی میکروبی مطرح می‌کرد: «با توجه به اینکه هاگ‌ها نقش مؤثری در تضمین بقای باکتری‌ها دارند، پس چرا همه‌ی گونه‌ها هاگ نمی‌سازند؟» «آیا مطمئن هستیم که حیات فقط شامل سه حوزه (باکتری‌ها، آرکئون‌ها، و ئوکاریوت‌ها) است؟» «چگونه است که پتیدهایی که با آنزیم ساخته می‌شوند، ظاهراً به درستی دور هم پیچیده نمی‌شوند تا پروتئینی با اندازه‌ی مشابه را ایجاد کنند؟» این سایت صدها پرسش از این نوع دارد، که موجب مشارکت فعال خوانندگان می‌شود، به جای اینکه صرفاً پاسخ‌ها را به آن‌ها ارائه کند. به طور کلی، به همین خاطر است که پیوستن به گروه‌های مطالعه مفید است: این روش، از حسابان گرفته تا تاریخ، موجب فعال شدن سازوکارهای اجتماعی مغز برای برانگیختن مشارکت می‌شود.

در دهه‌ی ۱۹۸۰، آیزاک آسیموف نویسنده‌ی مشهور مصاحبه‌ای با مجری تلویزیونی بیل مویرز انجام داد. آسیموف محدودیت‌های نظام آموزشی سنتی را به روشنی می‌دید:

امروزه چیزی که مردم به آن تحصیل می‌گویند، به اجبار به شما تحمیل

می‌شود. همه را مجبور می‌کنند که چیزهای یکسانی را در زمان یکسانی با سرعت یکسانی در کلاس یاد بگیرند. ولی افراد با هم متفاوت‌اند. برای بعضی‌ها سرعت کلاس زیادی تند است، برای بعضی‌ها زیادی کند، و برای بعضی‌ها راستای حرکت آن اشتباه است.^[۲۵]

آسیموف ایده‌ای برای فردی‌سازی آموزش داشت. با آنکه جزئیات آن را بررسی نکرده بود، ولی نگاهی دورنگر به آینده داشت و اینترنت را هم پیشگویی می‌کرد:

به همه باید شانس داده شود... تا از همان ابتدا علایق خود را دنبال کنند، و همه‌ی چیزهایی را که به آن علاقه‌مند هستند، از همان خانه‌ی خودشان دریافت کنند، با سرعتی که برای‌شان مناسب است، و در زمانی که خودشان می‌خواهند — به این ترتیب، همگان از تحصیل لذت خواهند برد.

از این عینک برانگیختن علاقه است که بیل گیتس و همسرش ملیندا که فعالیت‌های بشردوستانه انجام می‌دهند، قصد دارند یک سیستم یادگیری انطباقی ایجاد کنند. ایده‌ی آن‌ها ساختن نرم‌افزاری است که به سرعت سطح اطلاعات هر دانش‌آموز را مشخص می‌کند و بعد دقیقاً چیزهایی را که لازم دارد، به او آموزش می‌دهد. این رویکرد مانند آن است که نسبت معلم به دانش‌آموز یک به یک باشد، و سرعت تدریس را مطابق نیاز هر دانش‌آموز تنظیم می‌کند، و مطالب را از همان جایی که او نیاز دارد، به نحو جالبی به او آموزش می‌دهد. من هم مانند آسیموف و بیل گیتس و خیلی‌های دیگر، در زمینه‌ی آموزش به آینده‌ی اینترنت خوش بین هستم. شاید معلوم شود که فرورفتن به حفره‌ها و گودال‌های ویکی‌پدیا، بدون هرگونه نقشه‌ی از پیش تعیین شده، تقریباً بهترین راه برای یاد گرفتن است. اینترنت به دانش‌پژوهان امکان می‌دهد همین که پرسشی به ذهن‌شان وارد شد، پاسخ آن را پیدا کنند، یعنی جواب را در همان زمان کنجکاوی به ایشان می‌دهد. این تفاوت مهمی است که جمع کردن اطلاعات محض اطمینان (یاد گرفتن مجموعه‌ای از دانستنی‌ها محض اینکه شاید نیاز به دانستن آن‌ها داشته باشید) و به دست آوردن اطلاعات سر موقع (دریافت کردن اطلاعات در همان لحظه‌ای که به دنبال پاسخ هستید) وجود دارد. به بیان کلی، تنها در حالت اخیر است که آمیزه‌ی صحیحی از تعدیل‌کننده‌های عصبی در

مغز یافت می‌شود. چینی‌ها ضرب‌المثلی دارند: «یک ساعت با شخصی خرده‌مند گذراندن بیش از هزار کتاب می‌ارزد». این دیدگاه معادل باستانی ارزشی است که اینترنت برای ما دارد: وقتی که فراگیرنده می‌تواند یادگیری خود را فعالانه هدایت کند (به این صورت که دقیقاً همان پرسش‌هایی را که نیاز به پاسخ آن‌ها دارد، از شخص خرده‌مند می‌پرسد)، در آنجا مولکول‌های اهمیت و پاداش حضور دارند. این‌ها امکان آن را فراهم می‌کنند که مغز بازآرایی شود. ارائه کردن دانستنی‌های مختلف به دانش‌آموزی که دل به درس نسپرده است، مانند پرتاب کردن سنگ‌ریزه‌ها برای سوراخ کردن یک دیوار سنگی است. مثل آن است که بخواهید که فرد ویلیامز تنیس یاد بگیرد.

در این راستا، بازی‌وارسازی آموزش فرصت‌هایی عالی را پدید می‌آورد. نرم‌افزارهای انطباقی سبب می‌شود که دانش‌آموزان در همان نقطه‌ای که مشکل دارند و یافتن پاسخ برای‌شان دشوار ولی قابل‌انجام است، کار کنند. اگر دانش‌پذیر نتواند پاسخ را به دست آورد، پرسش در همان سطح باقی می‌ماند؛ وقتی که پاسخ صحیح را به دست آورد، پرسش‌ها سخت‌تر می‌شود. البته برای معلم هم هنوز جایی هست: یاد دادن مفاهیم پایه و هدایت کردن مسیر یادگیری. ولی اساساً از آنجا که مغز قابلیت سازگار شدن و بازنویسی مدارهای خود را دارد، کلاس درس منطبق با علوم اعصاب کلاسی است که در آن دانش‌پذیران با دنبال کردن مسیری مطابق با علایق فردی خود به سپهر پهناور دانش بشری راه می‌یابند.



پس آینده‌ی آموزش مطلوب به نظر می‌رسد، ولی یک پرسش همچنان باقی است: با توجه به اینکه مدارهای مغزی براساس تجربه ایجاد می‌شود، در آن صورت پیامد عصبی کودکانی که با خیره شدن به صفحه‌های نمایش بزرگ می‌شوند، چه خواهد بود؟ آیا مغز بومیان دیجیتال با مغز نسل‌های قبل متفاوت است؟ خیلی‌ها تعجب می‌کنند که در این زمینه در علوم اعصاب مطالعات زیادی انجام نشده است. یعنی آیا جامعه‌ی ما نمی‌خواهد بفهمد که بین مغز رشد یافته در دوران دیجیتال و دوران آنالوگ چه تفاوتی وجود دارد؟ در واقع، خیلی هم دوست داریم بفهمیم، ولی علت آن است که انجام

مطالعات علمی مفید در این زمینه بسیار دشوار است. چرا؟ چون گروه شاهد خوبی نداریم که مغز بومیان دیجیتال را با آن‌ها مقایسه کنیم. به آسانی نمی‌توانید گروهی از افراد هجده‌ساله را پیدا کنید که با نِت بزرگ نشده باشند. می‌توانید از میان برخی از نوجوانان آمیش در پنسیلوانیا گروهی را انتخاب کنید، ولی چنین گروهی ده‌ها تفاوت دیگر نیز دارد، از جمله از لحاظ باورهای مذهبی، فرهنگی، و آموزشی. دیگر در کجا می‌توان افراد هم‌سنی پیدا کرد که دسترسی به اینترنت نداشته باشند؟ می‌توانید به سراغ برخی از کودکان فقیر در مناطق روستایی چین، یا روستاهای آمریکای مرکزی، و یا بیابان‌های آفریقای شمالی بروید. ولی آن کودکان هم با بومیان دیجیتال که قصد شناخت آن‌ها را دارید، تفاوت‌های عمده‌ای، مثلاً از حیث ثروت، تحصیلات، و رژیم غذایی، خواهند داشت. شاید بتوان نسل هزاره را با نسل قبل از آن‌ها مقایسه کرد، مانند پدر و مادرهایشان که با اینترنت بزرگ نشده‌اند — بلکه به جای آن، در خیابان گل‌کوچک بازی می‌کردند و در حالی که پفک‌نمکی می‌خوردند، سریال‌های تلویزیونی نگاه می‌کردند. ولی این روش هم مشکل‌زا است: بین دو نسل، تفاوت‌های بی‌شماری از لحاظ مسائل سیاسی، تغذیه، آلودگی هوا، نوآوری فرهنگی، وجود دارد، به گونه‌ای که هرگز نمی‌توان مطمئن شد که تفاوت‌های مغز را به چه عاملی باید نسبت داد.

بنابراین، انجام یک مطالعه‌ی کنترل‌شده‌ی خوب درباره‌ی تأثیر اینترنت بر بزرگ شدن بچه‌ها، مسئله‌ای بغرنج است. با این وجود، من می‌توانم ریشه‌ی خوش‌بینی‌ام را به شما بگویم. در هیچ زمانی در گذشته این‌طور نبوده که ما تمام دانش بشری را در جیب خودمان داشته باشیم، و همواره بتوانیم فوراً به آن دسترسی پیدا کنیم. شاید بعضی از خوانندگان رفتن به کتابخانه را به یاد داشته باشند: می‌رفتیم و یکی از مجلدات *دایرةالمعارف بریتانیکا* (مثلاً حرف H) را برمی‌داشتیم و آن را ورق می‌زدیم تا اطلاعاتی را که می‌خواستیم، به دست می‌آوردیم. آن مقاله حدوداً یک یا دو دهه‌ی قبل نوشته شده بود. امیدوار بودیم که اطلاعات به دست آمده بسنده باشد، وگرنه می‌بایست وسط کارت‌های فهرست کتابخانه جست‌وجو می‌کردیم و دعا می‌کردیم که مطالب دیگری در آن کتابخانه پیدا شود. بعد هم پدر و مادر ما را به خانه می‌بردند، چون وقت شام بود.

در مدت زمانی کوتاه، همه چیز به طور حیرت‌انگیزی تغییر کرده است. در نتیجه، همگی شاهد تغییری تدریجی در بحث‌های سر شام بوده‌ایم: در گذشته کسی برنده می‌شد که سر و زبان دارتر یا چرب‌زبان‌تر باشد، ولی حالا کسی موفق می‌شود که سریع‌تر بتواند گوشی‌اش را در بیاورد و مطلب مورد نظر را در گوگل جست‌وجو کند. حالا بحث‌ها به سرعت جلو می‌رود، و با پاسخ‌گویی یک پرسش، به سراغ پرسش بعدی می‌رود. و حتی وقتی که خودمان تنها هستیم، یادگیری ما انتهایی ندارد، به‌طوری که وقتی صفحه‌ای را در ویکی‌پدیا نگاه می‌کنیم، زنجیروار از آنجا به سراغ لینک بعدی و باز بعدی می‌رویم، چنان که شش صفحه آن‌طرف‌تر، داریم چیزهایی یاد می‌گیریم که خودمان هم نمی‌دانستیم که نمی‌دانیم.

مزیت بزرگ این روش، برآمده از یک واقعیت ساده است: تمام ایده‌های جدید در مغز شما از اختلاط ورودی‌های یاد گرفته شده‌ی قبلی حاصل می‌شود، و امروزه ما بیشتر از هر زمانی در گذشته، ورودی دریافت می‌کنیم.^[۲۶] کودکان حالا در دورانی زندگی می‌کنند که از نظر غنا با هیچ زمانی در گذشته قابل مقایسه نیست: وسعت سپهر دانش به‌طور انفجاری افزایش یافته است، و هر چه بزرگ‌تر می‌شود، درهای **بیشتری** برای ورود در اختیار ما قرار می‌گیرد. ذهن‌های جوان این امکان را دارند که دانستنی‌هایی را از حوزه‌های کاملاً متفاوت با یکدیگر پیوند دهند و ایده‌هایی را پدید آورند که در اعصار گذشته حتی تصورش را هم نمی‌کردند. و این تا حدودی توضیح‌دهنده‌ی افزایش نمایی در فرهیختگی انسان‌ها است: چون ارتباطاتی سریع‌تر و اختلاط‌هایی بیشتر از هر زمانی در گذشته داریم. هنوز تمام پیامدهای اجتماعی و سیاسی اینترنت روشن نیست، ولی از دیدگاه علوم اعصاب، اینترنت سطح بسیار پربارتی از آموزش را امکان‌پذیر خواهد ساخت.



در فصل‌های قبل، تغییرات مغز را که ناشی از تغییر طرح بدن، از لحاظ حسگرها یا اندام‌های حرکتی، است، مطالعه کردیم. در این فصل، به بررسی تغییراتی پرداختیم که ناشی از اعمال حرکتی تمرین شده یا ورودی‌های حسی

پاداش داده شده است. اصل بزرگ‌تری که همه‌ی این سناریوها را به هم می‌پیوندد، مرتبط بودن و اهمیت است. مغز شما براساس آنچه وقتتان را با آن می‌گذرانید، خود را تعدیل می‌کند، به شرط اینکه آن کارها در راستای پاداش‌ها یا اهداف باشد. در مورد کسی که نابینا می‌شود، گسترش دادن حواس دیگر اهمیت بالاتری پیدا می‌کند، و این سرچشمه‌ی عمیق‌تر تغییراتی است که سبب می‌شود قشر بینایی به تصرف حواس دیگر درآید. اگر شخصی نابینا انگشت خود را مکرراً روی برآمدگی‌های خط بریل حرکت دهد، ولی انگیزه‌ای برای یاد گرفتن آن نداشته باشد، هیچ‌گونه مدارسازی مجدد اتفاق نخواهد افتاد، زیرا تعدیل‌کننده‌های عصبی مناسبی وجود نخواهد داشت. به همین ترتیب، اگر افزودن یک دوراندام جدید به بدن شما برایتان اهمیت داشته باشد، بدن‌تان آن را یاد خواهد گرفت — درست همان گونه که فیث سگ توانست بر طرح بدنی ویژه‌ی خود فایق آید.

در مجموع، اصل تعدیل براساس اهمیت به ما امکان می‌دهد که بفهمیم چرا جانوران حتی اگر صدمه ببینند، باز هم به تلاش ادامه می‌دهند، و تعدیل‌های لازم را در مغز اعمال می‌کنند تا همواره در حال پیشرفت به طرف اهداف خود باشند. بعداً خواهیم دید که چگونه می‌توانیم این اصول را برای ساخت روبات‌های جدید به کار گیریم، روبات‌هایی که وقتی یک محور بشکند یا بخشی از مادربرد بسوزد یا یکی از پیچ‌ها شل شود، از کار نمی‌افتند. ولی قبل از اینکه به آنجا برسیم، باید بفهمیم که چه وجه اشتراکی بین قطع مصرف داروی اعتیادآور و دل‌شکستگی وجود دارد، و چرا مفهوم غافلگیری از نظر جادوی مغز حائز اهمیت است.

۷ | چرا عشق تا لحظه‌ی جدایی از ژرفای خود خبر ندارد؟

در دهه‌ی ۱۹۸۰، ده‌ها هزار نفر متوجه موضوع عجیبی شدند. آن‌ها وقتی که به جلد یک فلاپی دیسک نگاه می‌کردند که لوگوی سیاه و سفید IBM روی آن حک شده بود، حروف آن را به رنگ متمایل به قرمز می‌دیدند. وقتی هم به صفحات کتاب نگاه می‌کردند، همین اتفاق می‌افتاد: صفحه‌ی کتاب با ته‌رنگ قرمز دیده می‌شد. این پدیده فقط در دهه‌ی ۱۹۸۰ اتفاق می‌افتاد؛ قبل یا بعد از آن این ته‌رنگ قرمز دیده نمی‌شد. چه چیزی در آن برهه‌ی زمانی باعث تغییر مغز افراد شده بود؟ برای فهمیدن این موضوع، ابتدا باید دو هزار و چهارصد سال به عقب برگردیم.

اسبی در رودخانه

نخستین مورد خطای باصره را ارسطو که همواره قوه‌ی مشاهده‌ی دقیقی داشت، متوجه شد. او اسبی را دید که در رودخانه‌ای خروشان گیر کرده بود و با نگاهی ثابت به کسانی که در صدد نجات آن بودند، خیره شد. وقتی که سرانجام روی برگرداند، چنان به نظرش رسید که همه‌ی چیزهای دیگر — صخره‌ها، درخت‌ها، و زمین — در جهت مخالف جریان رودخانه در حرکت‌اند. آسان‌ترین راه برای تجربه کردن معما و حیرت ارسطو این است که به یک آبشار خیره شوید. پس از آنکه مدتی چشمان‌تان را به آن دوختید، به صخره‌های کنار آبشار نگاه کنید. به نظر می‌رسد صخره‌ها به طرف بالا حرکت می‌کند. این نوع توهم بینایی را پس‌پیامد حرکت نامیده‌اند. چرا این حالت اتفاق

می‌افتد؟ فعالیت نورون‌های خاصی در قشر بینایی شما نشان‌دهنده‌ی حرکت به طرف پایین است، و فعالیت برخی دیگر از نورون‌ها، حرکت به طرف بالا را نشان می‌دهد. این‌ها همیشه با هم در نبرد هستند. اکثر اوقات، رقابت یکنواخت است، و آن‌ها به‌طور مساوی همدیگر را خنثی می‌کنند. در نتیجه، هیچ چیز در حال حرکت به طرف بالا یا پایین نیست.

بر این اساس، یک توضیح متداول برای پس‌پیامد حرکت، خستگی است: با خیره شدن به حرکت به طرف پایین، مقدار زیادی از انرژی نورون‌های کدکننده‌ی حرکت پایین مصرف می‌شود، و حالا به‌طور موقتی نیروی آن‌ها تخلیه شده است. بنابراین، نبرد به نفع نورون‌های کدکننده‌ی حرکت به طرف بالا قرار می‌گیرد. به علت این فعالیت نامتوازن، برآیند حرکت را به طرف بالا احساس می‌کنید.

فرضیه‌ی خستگی با توجه به سادگی آن جذابیت دارد. ولی نادرست است. هرچه باشد، این فرضیه نمی‌تواند برخی از واقعیت‌های مهم را درباره‌ی این توهم توضیح دهد. تصور کنید که مدتی حرکت آبشاری را به طرف پایین نگاه می‌کنید، و بعد چشم‌های‌تان را محکم می‌بندید — مثلاً به مدت سه ساعت. وقتی که چشمان‌تان را دوباره باز می‌کنید، خواهید دید که صخره‌ها به بالا می‌خزند. پس می‌فهمیم که مسئله، تخلیه‌ی موقتی انرژی نورون‌ها نیست. علت عمیق‌تری در این امر دخالت دارد.

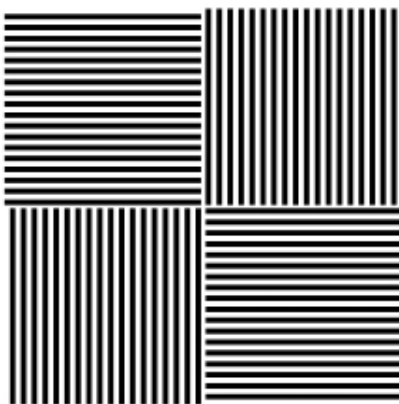
این توهم نه بر اثر خستگی غیرفعال، بلکه بر اثر بازتنظیم فعالانه ایجاد می‌شود. سیستم شما با حرکت پیوسته به طرف پایین مواجه شده است، و پس از مدتی، فرض می‌کند که حالت طبیعی این است. در ابتدا، حرکت به طرف پایین، برای مغز اطلاعات قابل‌توجهی به شمار می‌رود. پس از مدتی خیره شدن، دیگر از آن اطلاعات جدیدی حاصل نمی‌شود. تا جایی که به مغز شما مربوط می‌شود، این واقعیت جدید است: دنیایی که بیشتر به طرف پایین حرکت می‌کند تا به طرف بالا. بنابراین، دستگاه بینایی با دقت انتظارات خود را مطابق با وضعیت دنیا بازتنظیم می‌کند، بدان‌گونه که بیشتر انتظار حرکت به طرف پایین را دارد تا به طرف بالا. حالا وقتی که نگاه خود را از آبشار برمی‌دارید و به صخره‌های کنار آن نگاه می‌کنید، نقطه‌ی تنظیم مجدد پدیدار می‌شود، زیرا حالا

صخره‌ها و درخت‌ها به طرف آسمان در حرکت‌اند. نقطه‌ی تنظیم (یعنی اینکه چه چیزی ساکن به شمار می‌آید) جابه‌جا شده است.^[۱]

چرا؟ سیستم همیشه می‌خواهد یک حقیقت پایه را مشخص کند، تا بهتر بتواند تغییر را شناسایی کند. در این حالت، وقتی که دستگاه بینایی شما با منظره‌ی آبشار پر می‌شود، مغز شما تلاش می‌کند حرکت به طرف پایین را از آن حذف کند. حرکت نزولی دیگر ارزش اطلاعاتی ندارد، بنابراین، مدارهای مغز خودش را تعدیل می‌کند تا نسبت به اطلاعات جدید بیشترین حساسیت را داشته باشد. شما این نوع بازتنظیم فعالانه را همیشه تجربه می‌کنید. وقتی که از قایق کوچکی پیاده می‌شوید، تا مدتی به نظر می‌رسد زمین حرکت می‌کند: مثل آن است که گویی هنوز روی آب هستید. آنچه احساس می‌کنید، نوعی پس‌پیامد منفی است — «تصویر نگاتیف» حرکت آب.

از طرف دیگر، اگر دونه‌ها باشید، باز این نوع توهم را دیده‌اید. بدن شما عادت دارد که فرمان‌های حرکتی را به پاهایتان بفراستد (بدو)، و ورودی بینایی در نتیجه‌ی آن حاصل می‌شود. ولی وقتی که در باشگاه ورزشی روی تردمیل می‌دوید، مغز شما ورودی بینایی سیال حاصل از آن را دریافت نمی‌کند. بلکه تمام مدت به دیواری که روبه‌روی شما است، نگاه می‌کنید. وقتی که پایین می‌آیید، توهم تردمیل را تجربه می‌کنید: با هر قدمی که به طرف اتاق رختکن برمی‌دارید، به نظر می‌رسد که صحنه با سرعت تندتری حرکت می‌کند. گویی که با سرعتی بیش از سرعت واقعی‌تان دارید به جلو می‌روید.^[۲] درست مانند اسب ارسطو یا آبشار یا تلوتلو خوردن بعد از پیاده شدن از قایق، مغز شما انتظارات خود از دنیای پیرامون را بازتعدیل می‌کند — در این حالت، انتظارات درباره‌ی این است که عمل حرکت دادن پاهای شما چگونه باید به جریان یافتن صحنه‌ی بصری مقابل چشمان‌تان ترجمه شود.

به‌عنوان مثالی دیگر، نگاهی به خطوط سیاه و سفید در صفحه بعد بیندازید. چیز خاصی ندارد، درست است؟



حالا چند ثانیه به خطوط قرمز [سمت چپ] در شکل زیر خیره شوید، بعد به خطوط سبز [سمت راست]، بعد دوباره به خطوط قرمز، و بعد خطوط سبز. این کار را به مدت حدود سه دقیقه انجام دهید.



حالا دوباره به خطوط سیاه و سفید بالا نگاه کنید. خواهید دید که فضاهای بین خطوط افقی متمایل به قرمز به نظر می‌رسند. و فضاهای بین خطوط عمودی متمایل به سبز دیده می‌شود.^[۳]

چرا؟ چون وقتی که به تصویر رنگی خیره می‌شوید، مغزتان متوجه می‌شود که سبز بودن در ارتباط با خطوط افقی است و قرمز بودن در ارتباط با خطوط عمودی، و لذا به گونه‌ای تنظیم می‌شود که این ویژگی عجیب جهان را حذف کند. وقتی که دوباره به خطوط سیاه و سفید نگاه می‌کنید، پس‌پیامد را مشاهده می‌کنید: خطوط افقی به‌طور درونی به رنگ متضاد — قرمز — تبدیل شده‌اند، و خطوط عمودی به سبز. (باز در اینجا هم این ربطی به خستگی ندارد. در سال ۱۹۷۵، دو پژوهشگر نشان دادند که اگر به مدت پانزده دقیقه به خطوط قرمز

و سبز خیره شوید، پس پیامد آن ممکن است تا سه ماه و نیم طول بکشد.^(۱۴) به خاطر همین بازتنظیم فعالانه‌ی جهان است که در دهه‌ی ۱۹۸۰، بسیاری از افراد صفحات کتاب‌ها را با نوعی تهرنگ قرمز می‌دیدند. در آن زمان، افراد برای واژه‌پردازی شروع به استفاده از مانیتورهای کامپیوتری کرده بودند. برخلاف مانیتورهای امروزی، آن دستگاه‌های اولیه فقط قادر به نمایش یک رنگ بودند، و لذا متن آن‌ها به صورت خطوط سبزرنگ روی زمینه‌ی سیاه ظاهر می‌شد. افراد ساعت‌ها به آن سطرهای افقی سبزرنگ خیره می‌شدند، و لذا وقتی که کتابی را برمی‌داشتند، خطوط متن با تهرنگی به رنگ مکمل آن، یعنی قرمز، دیده می‌شد. در واقع، مغز افراد داشت با دنیایی با خطوط افقی سبزرنگ سازگار می‌شد، و واقعیت آن‌ها نیز متناسب با آن تغییر کرده بود. کاربران کامپیوتر این توهم را هنگام نگاه کردن به لوگوی IBM که روی جلد فلاپی دیسک حک شده بود، نیز تجربه می‌کردند: این لوگو آغشته به رنگ قرمز به نظر می‌رسید. طراحان IBM از این موضوع مبهوت شده بودند؛ آن‌ها به هیچ وجه در لوگوی سیاه و سفید خود از رنگ قرمز استفاده نکرده بودند، ولی مشتریان اصرار می‌کردند که قرمز است.

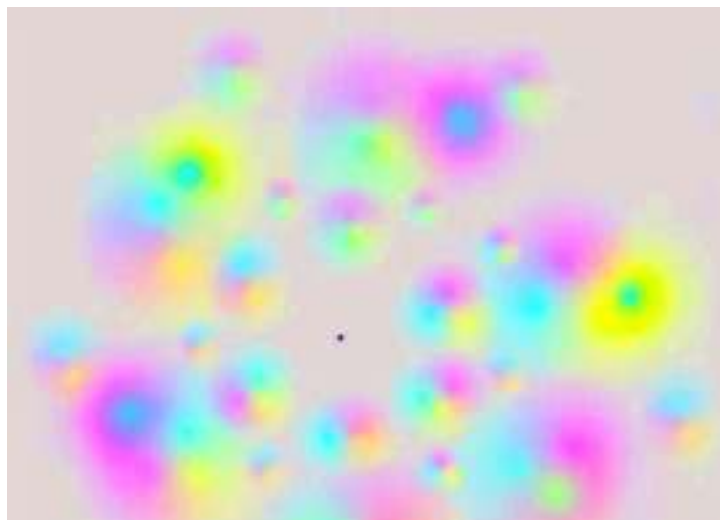


اینکه در دنیا چقدر حرکت وجود دارد، زمین چقدر پایدار است، اینکه موقع راه رفتن منظره از مقابل چشمانمان رد می‌شود، اینکه خطوط آغشته به رنگ هستند — هیچ کدام از این‌ها در ژنتیک ما مشخص نشده است، بلکه بر اثر تجربه‌ی ما تنظیم می‌شود.

نامرئی کردن چیزهای مورد انتظار

اگر به صحنه‌ای بدون ویژگی خاص که تماماً به یک رنگ است (مثلاً به رنگ زرد) نگاه کنید، رنگ خیلی زود محو می‌شود و به رنگی خنثی بدل می‌شود. امتحان کنید: یک توپ پینگ‌پونگ زرد بردارید و آن را دقیقاً به دو نصف کنید.

یک نیمکره را روی هر چشم قرار دهید. با این کار، همه جا را یکنواخت به صورت پوششی زردرنگ می بینید. ولی پس از چند لحظه دیگر رنگی در کار نیست. انگار که کور شده اید. دستگاه بینایی شما فرض می کند که دنیا زردتر شده است، و با آن سازگار می شود، تا بتوانید نسبت به تغییرات دیگر حساس باشید. برای اینکه صحنه به این صورت محو شود، حتماً لازم نیست که بدون هرگونه ویژگی باشد. در سال ۱۸۰۴، پزشک سوئیسی ایگناتس تروکسلر متوجه نکته ی حیرت انگیزی شد: اگر در وسط لکه های قلمبه به یک نقطه ی مرکزی خیره شوید، تمام شلوغی های محیط نهایتاً ناپدید می شود. حدوداً به مدت ده ثانیه نگاهتان را به نقطه ی سیاه وسط بدوزید. بدون آنکه به لکه های اطراف نگاه کنید، خواهید دید که آن ها در زمینه محو می شوند. پس از مدتی، در حال نگاه کردن به یک مربع خاکستری خالی خواهید بود.



اثر تروکسلر. نگاهتان را روی نقطه ی مرکزی ثابت نگه دارید. پس از مدتی تمام لکه های اطراف ناپدید می شوند.

این خطای باصره، که اثر تروکسلر نامیده می شود، نشان می دهد که یک محرک بدون تغییر در حاشیه ی میدان دید شما، خیلی زود ناپدید می شود. اما چرا این اتفاق می افتد؟ زیرا دستگاه بینایی شما همیشه به دنبال شناسایی حرکت

و تغییر است. چیزهای ثابت به سرعت نامرئی می‌شود. فرض بر این است که اطلاعات خوب مرتب به روزرسانی می‌شود؛ چیزهایی که تغییر نمی‌کنند، از سوی سیستم مورد چشم‌پوشی قرار می‌گیرند.

پس چرا مثلاً آشپزخانه یا محل کار شما تروکسلری نمی‌شود و تمام اجزای بی‌حرکت آن ناپدید نمی‌گردد؟ اولاً اکثر محیط پیرامون ما از لبه‌های سخت تشکیل شده، نه لکه‌های قلمبه، و دستگاه بینایی شما این لبه‌ها را بهتر حفظ می‌کند. ولی دلیل مهم‌تری نیز هست. گرچه شما خودتان معمولاً متوجه نمی‌شوید، ولی چشم‌های شما همواره در حال لرزش و جست‌وخیز است. به چشمان دوست‌تان نگاه کنید: خواهید دید که چشم‌های او در تمام اوقات بیداری تقریباً هر ثانیه سه بار پرش می‌کند. و اگر دقیق‌تر نگاه کنید، خواهید دید که بین پرش‌های بزرگ نیز چشم‌ها مدام ریزلرزه‌هایی دارند.^[۵] فکر می‌کنید چشم او مشکلی دارد؟ خیر. این حرکات سریع — پرش‌های بزرگ و کوچک — تصویر شبکه‌ی را تازه نگه می‌دارند. چشمان او به‌طور کاملاً ناخودآگاه تلاش می‌کنند که تصویر را مدام در حال تغییر نگه دارند. حالا چرا این زحمت را به خودشان می‌دهند؟ چون هر تصویری که روی شبکه کاملاً در یک جا ثابت باشد، نامرئی می‌شود.

به این صورت می‌توانید این امر را برای خودتان ثابت کنید. اگر از لنز تماسی استفاده می‌کنید، یک مازیک بردارید و شکل کوچکی را روی جلوی لنز خود، درست در وسط آن، بکشید. وقتی که کنتاکت لنز را دوباره روی چشم قرار دهید، چیزی را در آنجا خواهید دید — ولی زیاد دوام نخواهد داشت. آن تصویر خیلی زود محو و ناپدید می‌شود.^[۶] این پدیده نشان‌دهنده‌ی این واقعیت بنیادی است که مغز به تغییر اهمیت می‌دهد. درست مانند اثر تروکسلر، ویژگی‌هایی که تغییر نمی‌کنند، اطلاعات چندانی را درباره‌ی جهان پیرامون به ما نمی‌دهند. تمام اطلاعات مهم از چیزهایی می‌آید که در سیلان هستند.

اگر لنز تماسی هم ندارید، نگران نباشید: همین الان هم بدون آنکه خودتان بدانید، دارید تجربه‌ی مشابهی را انجام می‌دهید. در قسمت پشتی چشم، روی شبکه‌ی شما تعدادی عروق خونی قرار دارند. تصویر عروق تار عنکبوتی شبکه قاعداً باید روی هر چیزی بیفتد که می‌بینید، چون این رگ‌ها درست در

جلوی گیرنده‌های نوری شما است. ولی برای ادراک شما کاملاً نامرئی است. درست مانند شکلی که روی لنز تماسی کشیده شده باشد، موقعیت این عروق نیز نسبت به شبکه ثابت است. چشم شما هر چقدر هم حرکت کند، تصویر این عروق خونی هرگز «تازه‌سازی» نمی‌شود. ولو آنکه این رگ‌ها بین شما و دنیا حایل هستند، ولی از نظر ادراکی گویی با ترفندی جادویی ناپدید می‌شوند.



روی شبکه را شبکه‌ای از عروق خونی پوشانده است. از آنجا که این رگ‌ها بین گیرنده‌های نوری ما و محیط اطراف قرار گرفته‌اند، لذا تصویر آن‌ها روی منظره‌ی بصری ما می‌افتد. ولی الگوی این رگ‌ها ثابت است، از این رو، حاوی هیچ‌گونه اطلاعات جدیدی نیست - و بنابراین، دستگاه بینایی ما یاد می‌گیرد که کاملاً از آن‌ها چشم‌پوشی کند.

شاید هنگامی که متخصص چشم با چراغ قوه توی چشم شما نور می‌اندازد، یک لحظه متوجه این عروق شده باشید.^[vi] در این موقعیت، ممکن است به علت باریک‌هی نور، سایه‌ی عروق خونی زاویه‌ای غیرعادی داشته باشد، و دستگاه بینایی شما ناگهان متوجه آن‌ها شود. در این وضعیت، اتفاقی غیرمنتظره در شبکه افتاده است، و این تنها زمانی است که شما این شبکه‌ی وسیع عروقی را که جلوی شما قرار گرفته است، مشاهده می‌کنید. (اگر این را قبلاً ندیده‌اید، کتاب را زمین بگذارید، به یک اتاق تاریک بروید، و نوری را از زاویه‌ی اریب به درون چشمان‌تان بیندازید. خواهید دید که رگ‌های خونی مقابل چشمان‌تان ظاهر می‌شوند. البته دستگاه بینایی شما به سرعت خودش را سازگار می‌کند، بنابراین، ترفند آن این است که مرتب زاویه‌ی تابش نور را تغییر دهید تا تصویر حفظ شود.)

راهبرد چشم‌پوشی از چیزهایی که تغییر نمی‌کنند، این توانایی را به سیستم می‌دهد که چیزهایی را که حرکت می‌کنند، یا جابه‌جا می‌شوند، و یا تبدیل

می‌شوند، شناسایی کند. دستگاه بینایی خزندگان نیز حالت شدیدی از همین طرز کار را دارد: آن‌ها شما را اگر بی‌حرکت باشید، نمی‌بینند، چرا که فقط تغییر را ثبت می‌کنند. اهمیتی به موقعیت نمی‌دهند. و چنین سیستمی کاملاً برای آن‌ها کافی است: خزندگان ده‌ها میلیون سال زنده مانده‌اند و به رشد خود ادامه داده‌اند. پس برمی‌گردیم به توهم آبشار. چرا دستگاه بینایی شما آن‌قدر جابه‌جا نمی‌شود که آبشار به‌عنوان ساکن ادراک شود؟ اولاً ممکن است بازتنظیم هم حد و حدودی داشته باشد.^[۸] نمی‌تواند آن‌قدر بازتنظیم کند که حرکت عظیم آبشار را تفریق نماید. ولی امکان دیگری هم هست: شما به مدت کافی به آبشار نگاه نکرده‌اید، و اگر به مدت کافی نگاه می‌کردید، نهایتاً به‌طور کامل بازتنظیم می‌شد. این چه مدت ممکن است طول بکشد؟ خیره شدن به مدت دو ماه؟ دو سال؟ از لحاظ نظری، اگر به مدت کافی نگاه می‌کردید، آنگاه تغییرات کوتاه‌مدت دستگاه بینایی شما نهایتاً منجر به اثراتی بلندمدت‌تر می‌شد، و در نهایت موجب تغییراتی در عمیق‌ترین سطوح سیستم می‌گردید (در فصل ۱۰ درباره‌ی این آبشار تغییرات بیشتر صحبت خواهیم کرد). به این ترتیب، حرکت پیوسته‌ی زمینه‌ای برای ما نامرئی خواهد شد.

بدین‌گونه است که به حدسی عجیب — ولی منطقی — می‌رسیم: آیا بخش‌هایی از جهان هست که برای ما نامرئی باشد، در حالی که می‌بایست قابل مشاهده می‌بود؟ تصور کنید که نوعی بارش کیهانی هست که تمام عمر شما وجود داشته است. چنین بارشی کاملاً برای شما نامرئی می‌بود. با توجه به اینکه هرگز چیز دیگری نمی‌دیدید، دستگاه بینایی شما این حرکت به طرف پایین را به‌عنوان نقطه‌ی صفر در نظر می‌گرفت. اگر این بارش کیهانی ناگهان متوقف می‌شد، مثل آن بود که تمام دنیا ناگهان به طرف بالا حرکت می‌کند. فکر می‌کردیم چیز جدیدی ظاهر شده — نوعی بارش صعودی — ولو آنکه بارش واقعی متوقف شده بود. و این وضعیت در هر کانال حسی می‌توانست اتفاق بیفتد: تصور کنید یک ساعت زنگ‌دار کیهانی داریم که مرتب بوق-بوق-بوق می‌کند و دکمه‌ای برای خاموش کردن ندارد. تمام اوقات، در سرتاسر عالم، این صدا شنیده می‌شود: بوق-بوق-بوق. اگر کاملاً منظم می‌بود، شما اصلاً آن را نمی‌شنیدید، چون مغزتان با آن سازگار می‌شد. اگر ساعت زنگ‌دار کیهانی

ناگهان متوقف می‌شد، همگان ناگهان صدای بوق-بوق بلند می‌شنیدند، ولی نمی‌دانستند که دارند پس‌پیامد را تجربه می‌کنند، یعنی آن صدای «بیرونی» کلاً درون سر آن‌ها است.^[۹] سازگاری موفق موجب می‌شود که چیزهای منظم نامرئی شوند.

تفاوت بین آنچه فکر می‌کردید اتفاق بیفتد و آنچه واقعاً اتفاق افتاد

ما این توهم‌ها را نتیجه‌ی سازگاری دانستیم، ولی جور دیگری هم می‌توان به این موضوع نگاه کرد: به‌عنوان پیش‌بینی. اگر حرکت آبشار به طرف پایین، یا تکان خوردن قایق، یا نقاشی روی لنز تماسی را از تصویر حذف کنید، معادل پیش‌بینی کردن تداوم وجود آن است. وقتی که مدارهای مغز سازگار می‌شود، در واقع، حدس می‌زند که یک لحظه‌ی بعد، دنیا چگونه خواهد بود. دیگر درباره‌ی چیزهایی که انتظار می‌رود تداوم یابد، چیزی نمی‌گوید. مثلاً عروق خونی شبکه‌ی را در نظر بگیرید. آن‌ها بدان جهت از نظر ادراکی نامرئی هستند که دستگاه بینایی با پیش‌بینی آن‌ها را حذف می‌کند: می‌داند که آن‌ها آنجا خواهند بود، پس از آن‌ها صرف‌نظر می‌کند. تنها در صورتی که آن انتظارات نقض شود (مثلاً وقتی که نور از زاویه‌ای غیرعادی بتابد)، مغز شما برای بازنمایی آن داده‌ها انرژی صرف می‌کند. مغز شما نمی‌خواهد هزینه‌ی انرژی به کار انداختن نورون‌ها را متحمل شود، از این رو، هدف آن است که شبکه را چنان پیکربندی کند که حتی‌الامکان توان کمتری تلف شود. اگر در جریان ورودی، الگویی وجود داشته باشد که قابل پیش‌بینی باشد — یا حتی تا حدودی قابل حدس زدن باشد — سیستم چنان ساختاری حول آن ورودی تشکیل می‌دهد که از ورود آن تعجب نکند و در انرژی صرفه‌جویی کند. هرچه دستگاه عصبی آرام‌تر باشد، موارد کمتری نقض انتظارات صورت خواهد گرفت: مسائل در دنیای بیرون تقریباً مطابق پیش‌بینی در جریان خواهد بود. به عبارت دیگر، مغز به علت اهمیتی که به مصرف انرژی می‌دهد، خواهان آن است که حتی‌الامکان همه چیز را پیش‌بینی کند، تا بتواند فقط چیزهای غیرمنتظره را بازنمایی کند و از این طریق در مصرف انرژی صرفه‌جویی کند. سکوت طلا است. گرچه بسیاری از دانشمندان علوم اعصاب فعالیت نورون‌ها را به‌عنوان بازنمایی چیزهایی که در جهان اطراف هستند، در

نظر می‌گیرند، ولی شاید معلوم شود که دقیقاً عکس این مطلب صحیح است: نیزه‌ها بخش پیش‌بینی نشده هستند که هزینه‌ی بالایی از نظر انرژی در بر دارند. بازنمایی چیزی که کاملاً مورد انتظار است، همچون سکوتی است که بر روی جنگل نرونی می‌نشیند.

سیستم فقط زمانی که غافلگیر شود، تعدیل‌هایی انجام می‌دهد. اگر مغز شما بر این باور باشد که همه‌ی آجرها وزن یکسانی دارند، و بعد شما آجری را که از سرب ساخته شده است، وزن کنید، نقض انتظارات سبب می‌شود که آشناری از تغییرات در مواجهه با این پیشامد جدید اتفاق بیفتد. برعکس، وقتی که همه چیز با پیش‌بینی حذف می‌شود، دیگر لازم نیست چیزی تغییر کند. به این دلایل، وقتی که نخستین بار به تصویر تروکسلر نگاه می‌کنید، متوجه لکه‌ها می‌شوید، و وقتی که لنز تماسی را روی چشم می‌گذارید، در ابتدا شکلی را که روی آن ترسیم شده است، می‌بینید. ولی پس از مدت کوتاهی، مغز شما خودش را سازگار می‌کند. دیگر غافلگیر نمی‌شود.

به‌عنوان مثالی دیگر از پیش‌بینی کردن مغز، این را در نظر بگیرید. وقتی که افراد برای بار اول می‌چوبند نئوسنسوری را به دست می‌بندند (که صدا را به الگوهای ارتعاش روی پوست تبدیل می‌کند)، معمولاً با تعجب می‌گویند: «وای، صدای خودم را هم می‌گیرد!» همیشه از این امر غافلگیر می‌شوند: انگار که آن‌ها نباید حرف زدن خودشان را بشنوند. البته شکی نیست که گوش‌های شما همیشه صدای خودتان را نیز دریافت می‌کند. معمولاً صدای شما از صدای همه بلندتر است، چون دهان شما نزدیک گوش‌تان است. ولی از آنجا که کاملاً می‌توانید حرف زدن خودتان را پیش‌بینی کنید، معمولاً صدای خودتان را «نمی‌شنوید». کسانی که می‌چوبند می‌بندند، از بلندی بعضی صداها قابل انتظار دیگر نیز که در حالت عادی به آن‌ها توجه نمی‌کنند (چون خودشان آن صداها را ایجاد می‌کنند)، متعجب می‌شوند: صدای کشیدن سیفون توالت، بستن در پس از بیرون رفتن، و صداها‌ی قدم‌های خودشان. این طور نیست که دستگاه شنوایی شما این صداها را ثبت نمی‌کند، بلکه مسئله این است که شما خودتان آن‌ها را به‌طور فعال پیش‌بینی و حذف می‌کنید. این موضوع هنگام بستن می‌چوبند آشکار می‌شود: باورتان نمی‌شود که صدای این رویدادها این قدر بلند باشد، چون مغز شما هنوز

یاد نگرفته است که آمدن آن سیگنال‌ها از دست‌تان را پیش‌بینی کند.



مغز شما فعالانه خود را بازتنظیم می‌کند، چون با این کار می‌تواند انرژی کمتری بسوزاند. ولی در اینجا اصل عمیق‌تری نیز دخالت دارد. در تاریکی جمجمه، مغز شما تلاش می‌کند مدلی درونی از جهان بیرون بسازد.

وقتی که در خانه راه می‌روید، زیاد به محیط اطراف‌تان توجه نمی‌کنید، چون از قبل مدل خوبی از آن در ذهن دارید. برعکس، وقتی در شهر ناشناسی رانندگی می‌کنید و سعی دارید راه رستوران خاصی را پیدا کنید، مجبورید به همه چیز با دقت نگاه کنید — تابلوهای خیابان، نام مغازه‌ها، شماره‌ی ساختمان‌ها — زیرا که مدل خوبی از آن ندارید که بدانید انتظار چه چیزی را باید داشته باشید. حالا یک مدل درونی خوب را چگونه می‌توان ساخت؟ چه فناوری خاصی در نوروها هست که به شما امکان می‌دهد که روی این نقاط داده‌ای که با انتظارات شما هماهنگ نیست، تمرکز کنید، و از همه‌ی چیزهای دیگر که مطابق با انتظارات قبلی است، چشم‌پوشی نمایید؟

ما به این کار، توجه می‌گوییم. شما وقتی صدایی غیرمنتظره می‌شنوید، چیز غیرمنتظره‌ای با پوست‌تان تماس برقرار می‌کند، یا حرکتی غیرعادی در اطراف خود می‌بینید، به آن توجه می‌کنید. توجه کردن سبب می‌شود که حسگرهای با تفکیک‌پذیری بالا را روی آن مسئله متمرکز کنید و ببینید که چگونه می‌توانید آن را در مدل خود بگنجانید. اه، اینکه صدای ماشین چمن‌زنی است، گربه است، یک مگس است. حالا مدل روزآمد شده است. برعکس، به حس کفش پای چپ‌تان توجه نمی‌کنید، چون از قبل مدل درونی آن را دارید، و آن مدل به درستی آنچه را دریافت می‌کنید، پیش‌بینی می‌کند. لاف‌ل تا زمانی که سنگ‌ریزه‌ای وارد کفش‌تان شود. آنگاه سنگ‌ریزه توجه‌تان را جلب خواهد کرد، زیرا حالا دیگر مدل نیاز به روزآمدسازی دارد.

کلید درک یکی از خاصیت‌های عجیب یادگیری، تفاوت بین پیش‌بینی‌ها و پیامدها است: اگر درست پیش‌بینی کنید، نیازی نیست که مغزتان بیشتر تغییر کند. فرض کنید یاد گرفته‌اید که صدای دینگ گوشی به معنای آن است

که برایتان پیامک رسیده است. مغز شما به سرعت رابطه‌ی بین این دو را یاد می‌گیرد، که تا حد زیادی به خاطر آن است که پیامک در زندگی اجتماعی شما اهمیت زیادی دارد. حالا فرض کنید که گوشی شما به‌روزرسانی می‌شود، و در نتیجه‌ی آن، حالا آمدن پیامک با صدای دینگ به همراه ارتعاش گوشی مشخص می‌شود. جالب است بدانید که مغز شما برای ارتعاش آموزش نخواهد دید؛ به این اثر مسدودسازی می‌گویند. مغز شما از قبل می‌داند که صدای دینگ پیش‌بینی‌کننده‌ی رسیدن پیامک است، از این رو نیازی ندارد که چیز جدیدی را یاد بگیرد. اگر گوشی شما بدون صدای دینگ، فقط ارتعاش کند، مغز شما معنای این نشانه را نخواهد دانست؛ چون چیزی درباره‌ی آن نیاموخته است.^(۱۰) برای درک پدیده‌ی مسدودسازی، باید دانست که تغییرات در مغز تنها زمانی اتفاق می‌افتد که بین آنچه انتظار می‌رود و آنچه واقعاً روی می‌دهد، تفاوت وجود داشته باشد.

مدل درونی ما از جهان به ما امکان می‌دهد که پیش‌بینی کنیم و سریعاً مشکلات را شناسایی کنیم — و این به ما می‌گوید که به کجا توجه کنیم و کجا را به‌روزرسانی کنیم. و این نوع سیستم برای مهندسان هم که درباره‌ی آینده‌ی ماشین‌آلات فکر می‌کنند، جالب توجه شده است: چندین شرکت متمرکزند روی دستگاه‌هایی که به این روش کار می‌کنند، از تراکتور گرفته تا هواپیما. داشتن یک مدل درونی از جهان به ماشین امکان می‌دهد که درباره‌ی رویدادهایی که قرار است اتفاق بیفتد، بهترین حدس خود را به عمل آورد. وقتی که رویدادها با پیش‌بینی‌های الگوریتم‌های ماشین هماهنگ است، هیچ چیزی لازم نیست تغییر کند. تنها وقتی که ورودی‌ها از سناریوی قبلی فاصله می‌گیرند، لازم است که نرم‌افزار توجه کند و مدل ماشین را به‌روزرسانی کند.



با دانستن این مطالب زمینه‌ای، به آسانی می‌توان فهمید که **داروها** چگونه دستگاه عصبی را تغییر می‌دهند. مصرف یک دارو تعداد گیرنده‌های آن دارو را در مغز تغییر می‌دهد — تا بدان حد که وقتی کسی می‌میرد، می‌توانید با نگاه کردن به مغز او و اندازه‌گیری تغییرات مولکولی آن، اعتیادات دارویی او

را مشخص کنید. به همین خاطر است که افراد حساسیت خود نسبت به یک دارو را از دست می‌دهند (یعنی نسبت به آن تحمل پیدا می‌کنند): مغز وجود دارو را پیش‌بینی می‌کند، و بیان گیرنده‌های خود را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که هنگام دریافت دوز بعدی بتواند حالت تعادل را حفظ کند. **به طور فیزیکی و واقعی**، می‌توان گفت که مغز انتظار دارد که دارو در آنجا خواهد بود: جزئیات زیست‌شناختی مغز نیز خود را با آن تطبیق می‌دهد. از آنجا که سیستم حالا پیش‌بینی حضور مقدار مشخصی از دارو را دارد، لذا برای رسیدن به نشئه‌ی اولیه، مقدار بیشتری از دارو مورد نیاز است.

نشانه‌های ناخوشایند ناشی از قطع مصرف داروی اعتیادآور نیز ناشی از همین تنظیم است. هر چه مغز بیشتر با دارو سازگار شود، قطع دارو علائم شدیدتری خواهد داشت. علائم قطع مصرف بسته به نوع ماده‌ی اعتیادآور متغیر است — از جمله تعریق، لرز، و افسردگی — ولی وجه مشترک همه‌ی آن‌ها، قطع شدن چیزی است که انتظار حضور آن می‌رفته است.

براساس این توضیحات درباره‌ی پیش‌بینی‌های عصبی، پدیده‌ی دل‌شکستگی را نیز می‌توان فهمید. وقتی کسی را دوست دارید، او جزئی از شما می‌شود — نه فقط به‌طور استعاری، بلکه به‌طور فیزیکی. شما افراد را به درون مدل درونی‌تان از جهان می‌برید. مغز شما خودش را براساس انتظار حضور آن‌ها تغییر شکل می‌دهد. پس از قطع رابطه با فرد محبوب، مرگ یک دوست، و یا از دست دادن پدر یا مادر، فقدان ناگهانی آن فرد به معنای انحراف عمده‌ای از حالت تعادل است. همان گونه که جبران خلیل جبران در کتاب پیامبر می‌نویسد: «و همواره چنان بوده که عشق تا لحظه‌ی جدایی از ژرفای خود خبر ندارد».

به این طریق، مغز شما مانند تصویر نگاتیف همه‌ی کسانی است که با آن‌ها در تماس بوده‌اید. افراد محبوب، دوستان، و والدین شکیلی مورد انتظار را در فضای مغز اشغال می‌کنند. درست مانند حس کردن موج‌ها پس از پیاده شدن از قایق، یا احساس نیاز به دارو پس از قطع مصرف آن، مغز شما خواستار آن است که افراد مهم زندگی‌تان در آنجا وجود داشته باشند. وقتی که کسی دور می‌شود، از شما جدا می‌شود، یا می‌میرد، مغز شما به علت برآورده نشدن انتظاراتش دچار مشکل می‌شود. به آهستگی با گذشت زمان، مجبور است بدون

آن شخص خود را دوباره با دنیا سازگار کند.

رفتن به سوی نور. یا قند. یا داده‌ها.

پدیده‌ی نورگرایی در گیاهان را در نظر بگیرید: گیاهان با تغییر دادن نحوه‌ی قرارگیری خود، تلاش می‌کنند که حداکثر نور را جذب کنند. اگر رشد گیاه را با حرکت سریع تماشا کنید، خواهید دید که مستقیم به طرف منبع نور حرکت نمی‌کند؛ بلکه مسیر آن یک بار کمی جلوتر از جهت نور است، یک بار کمی عقب‌تر، و الی آخر. این کار مأموریتی از پیش برنامه‌ریزی شده نیست، بلکه رقصی تکانه‌ای با اصلاح مداوم است.

در حرکت باکتری‌ها نیز راهبرد مشابهی دیده می‌شود. وقتی که باکتری‌ها در جست‌وجوی مرکز یک منبع غذایی هستند — مثلاً یک تکه قند که روی پیشخوان آشپزخانه افتاده است — با پیروی از سه قاعده‌ی ساده و زیبا، راه خود را به سوی قند پیدا می‌کنند:

۱. یک راستا را به‌صورت تصادفی انتخاب کن و در مسیر مستقیم حرکت کن.
۲. اگر اوضاع رو به بهتر شدن است، به حرکت ادامه بده.
۳. اگر اوضاع در حال بدتر شدن است، راستای حرکت را با چرخشی تصادفی تغییر بده.

به عبارت دیگر، راهبرد به این صورت است که وقتی شرایط رو به بهبود است، مسیر حرکت قفل می‌شود، و وقتی که مؤثر نیست، آن مسیر کنار گذاشته می‌شود. با این سیاست ساده، یک باکتری می‌تواند به‌طور سریع و مؤثر راه خود را به سوی متراکم‌ترین نقطه‌ی منبع غذایی پیدا کند.^[۱۱]

پیشنهاد من این است که در مغز نیز از اصل مشابهی استفاده می‌شود. مغز به جای اینکه تلاش کند مسیر خود را به طرف آفتاب یا غذا بیشینه‌سازی کند، در جهت بیشینه‌سازی اطلاعات عمل می‌کند. من به این راهبرد، اطلاعات‌گرایی (infotropism) می‌گویم. این فرضیه بیان می‌کند که مدارهای عصبی مدام تغییر می‌کند به گونه‌ای که مقدار اطلاعاتی را که می‌تواند از محیط استخراج کند، به حداکثر برساند.

آنچه را در فصل‌های قبل دیدیم، در نظر بگیرید. دیدیم که مغز چگونه

اعضای حسی را به کار می‌گیرد، اعم از اعضای که فوتون‌ها را می‌گیرند، یا میدان‌های الکتریکی را، و یا مولکول‌های بو را. دیدیم که مغز چگونه بدن را به حرکت درمی‌آورد، صرف نظر از اینکه بدن دارای باله باشد، یا پا، یا دست روباتیک. در هر حال، مغز مدارهای خود را تنظیم می‌کند تا داده‌هایی را که از جهان دریافت می‌کند، بیشینه‌سازی کند. پاداش نیز به این تنظیم کمک می‌کند، و موجب ارسال‌هایی در مدارهای مغزی می‌شود که اعلام می‌کند که کار انجام شده مؤثر بوده است. به این طریق، با کمترین برنامه‌نویسی قبلی، سیستم خودش می‌فهمد که چگونه تعامل خود با جهان را بهینه‌سازی کند.

مثلاً دیدیم که چگونه منظره‌ی عصبی در مغز هایاتو کوچولو در اوساکا و ویلیام کوچولو در پالو آلتو نقش می‌بندد، تا بتوانند صداهای مختلف را از هم تشخیص دهند. این را به‌عنوان نمونه‌ای از تغییرات مبتنی بر پاداش در نظر گرفتیم، ولی حالا می‌توانیم آن را از سطح بالاتری به‌عنوان اطلاعات‌گرایی ببینیم: مغز این کودکان به‌گونه‌ای سازگار می‌شود که داده‌هایی را که در دور و بر آن‌ها اهمیت دارد، به حداکثر برساند.

در مقیاس زمانی طولانی‌تر، دیدیم که وقتی کسی نابینا می‌شود، حواس دیگر قشر بینایی را تصرف می‌کنند. در فصل بعد، خواهیم دید که نوروها این کار را چگونه انجام می‌دهند، ولی فعلاً در نظر داشته باشید که این تصرف را می‌توانیم به‌عنوان اطلاعات‌گرایی تفسیر کنیم: مغز منابع خود را بیشینه‌سازی می‌کند تا هرگونه داده‌هایی را که وارد می‌شود، تفسیر کند.

در مورد توهم مربوط به خطوط رنگی افقی و عمودی نیز به همین صورت است. دستگاه بینایی شما ابعاد رنگ و جهت را جدا می‌کند، زیرا تلاش می‌کند که اطلاعات به دست آمده از جهان اطراف را به حداکثر برساند. بر این اساس، اجازه نمی‌دهد که این اندازه‌ها که قابل جداسازی هستند، با هم مخلوط باشند. گرچه این تأثیر معمولاً فقط به‌عنوان یک توهم بصری سرگرم کننده دیده می‌شود، ولی کار اصلی در پشت پرده برای دلیل مهم‌تری صورت می‌پذیرد: اگر چیزی باعث رنگی شدن خطوط شده بود (مثلاً نورپردازی غیرعادی یا اینکه مشکلی در سیستم اپتیکی شما وجود می‌داشت)، مغز شما خود را به‌گونه‌ای بازآرایی می‌کرد که این موضوع را حل و فصل کند و تأثیر را خنثی نماید. مغز با

این کار، ظرفیت شما برای استخراج اطلاعات درباره‌ی رنگ و جهت به صورت جداگانه را به حداکثر می‌رساند. مغز شما با جدا کردن دو بُعد که باید (از نظر آماری) از هم جدا باشند، بهتر می‌تواند اطلاعات را درباره‌ی جهان اطراف جمع‌آوری کند.

یک مثال از اطلاعات‌گرایی در سطح نوروها ذکر می‌کنیم: شبکیه‌ی شما (که در قسمت پشت چشم واقع است) محیط پیرامون را در طول روز و شب به صورت متفاوتی می‌خواند. در روشنایی روز فوتون‌های زیادی وجود دارند، لذا هر گیرنده‌ی نوری فقط نقطه‌ی ریزی از صحنه را دریافت می‌کند و منجر به تفکیک‌پذیری بالایی می‌شود. شب‌ها وضع فرق می‌کند. فوتون‌های کمتری به چشم می‌رسند، بنابراین حالا کار اصلی این است که وجود چیزی مشخص شود، ولو آنکه با تفکیک‌پذیری بالایی همراه نباشد. بنابراین، گیرنده‌های نوری کار خود را شب‌ها به روش بسیار متفاوتی انجام می‌دهند، به طوری که جزئیات آبشارهای مولکولی درونی آن‌ها تغییر می‌کند و نیروی خود را با یکدیگر متحد می‌کنند. تحت این شرایط، ثبت اینکه چیزی در بیرون وجود دارد، مدت بیشتری طول می‌کشد، ولی به طور جمعی می‌توانند با مقدار بسیار کمتری این کار را انجام دهند.^(۱۲) این راهبرد پیشرفته به شبکیه امکان می‌دهد که با بالا یا پایین رفتن سطح نور، عملکرد متفاوتی را از خود نشان دهد. وقتی که بیرون روشن است، دستگاه بینایی تفکیک‌پذیری فضایی بالایی دارد؛ وقتی تاریک است، گیرنده‌های نوری توان‌شان را روی هم می‌ریزند تا شانس بهتری برای گرفتن فوتون‌ها داشته باشند، که منجر به آن می‌شود که بینایی به نور تاریک حساس‌تر باشد، ولی تفکیک‌پذیری تاریکی داشته باشد. دستگاه بینایی زحمت زیادی برای تغییر دادن خود می‌کشد تا بتواند اطلاعات کسب شده را به حداکثر برساند. صرف نظر از اینکه فوتون‌ها زیاد باشند یا کم، شبکیه خودش را بهینه‌سازی می‌کند تا داده‌ها را بگیرد. در روز بیشترین جزئیات را می‌گیرد تا بتواند خرگوشی را از دور ببیند؛ در تاریکی خود را تغییر می‌دهد تا حساسیت بالاتری داشته باشد، تا هر چیزی را که در بیرون هست، با جزئیات پایین‌تر تشخیص دهد، تا بتواند تصویر سایه‌وار یوزپلنگی را که در تیرگی شب کمین کرده است، تشخیص دهد. مادر طبیعت نه تنها فهمیده است که چگونه چشم

را بسازد، بلکه این را نیز یاد گرفته است که چگونه مدارهای آن را مستقیماً تغییر دهد تا بتواند در شرایط مختلف به صورت متفاوتی کار کند — همه‌ی این‌ها برای اینکه بهترین استفاده را از آنچه موجود است، به عمل آورد. این اطلاعات گرایبی است.

سازگاری برای انتظار داشتن چیزهای غیرمنتظره

درست همان طور که گیاهان در پی آفتاب و باکتری‌ها در پی قند هستند، مغز در پی اطلاعات است. مغز تلاش می‌کند مدارهای خود را مدام تغییر دهد تا داده‌هایی را که می‌تواند از جهان استخراج کند، به حداکثر برساند. برای این منظور، مغز مدلی درونی از بیرون می‌سازد، که با پیش‌بینی‌های آن هماهنگ است. اگر دنیا مطابق انتظار پیش برود، مغز در مصرف انرژی صرفه‌جویی می‌کند. بازیکنان فوتبال را که قبلاً در همین کتاب به آن‌ها اشاره کردیم، به خاطر دارید: آن‌هایی که آماتور هستند، فعالیت مغزی بالایی دارند، در حالی که بازیکن حرفه‌ای فعالیت مغزی اندکی دارد. علت این امر آن است که بازیکن حرفه‌ای پیش‌بینی‌هایی را که درباره‌ی جهان دارد، مستقیماً درون مدارهای مغزی‌اش کار گذاشته است؛ بازیکن آماتور هنوز دارد تقلا می‌کند که پیشگویی معقولی انجام دهد.

مغز اساساً یک ماشین پیش‌بینی است، و این موتور محرکه‌ای است که موجب خودبازآرایی مداوم آن می‌شود. مغز با مدل‌سازی حالت جهان، خودش را به گونه‌ای تغییر شکل می‌دهد که انتظارات خوبی داشته باشد، و بنابراین، بیشترین حساسیت را در مقابل چیزهای غیرمنتظره داشته باشد.

و حالا برای پرسش بعدی آماده‌ایم: با توجه به مطالبی که تا اینجا در این کتاب گفته شد، تمام این‌ها در سطح سلول‌های مغز چگونه پیاده‌سازی می‌شود؟

۸ | تعادل بر لبه ی تغییر

تصور کنید که شما بیگانه‌ای فضایی هستید که اتفاقاً در اکتبر ۱۹۶۲ گذارتان به سیاره‌ی زمین می‌افتد. شما درست در زمانی رسیده‌اید که شاهد منازعه‌ی وخیم بحران موشکی کوبا هستید.

اگر فکر کنید که هیچ اتفاق خاصی در جریان نیست، نمی‌توان بر شما خرده گرفت. برای چشمان پلاستیکی شما، نه ایالات متحده کاری انجام می‌دهد، و نه کوبایی‌ها و نه شوروی‌ها. در حالی که خمیازه می‌کشید و دست سبزان را روی دهان‌تان گذاشته‌اید، احتمالاً به این نتیجه می‌رسید که دارید به یک سیستم سیاسی بی‌انگیزه، خواب‌آلود، یا فسیل شده نگاه می‌کنید.

شاید به فکرتان نرسد که تنها دلیل اینکه هیچ اتفاقی نمی‌افتد، این است که تمام نیروهای مخالف در توازن و تقابل کامل با یکدیگر هستند. تمام فنرها محکم پیچیده شده‌اند، موشک‌های دو طرف به سمت یکدیگر نشانه رفته‌اند، و ارتش‌ها آماده‌باش هستند.

شاید دیدن آن همیشه راحت نباشد، ولی این وضعیتی است که در مغز وجود دارد. ممکن است تصور شود که نقشه‌های آن صرفاً بدان جهت پایدار هستند که نیروهای متقابل آن‌ها کاملاً در حالت تعادل قرار دارند. مغز به ظاهر توهم بی‌حرکتی را پدید می‌آورد، ولی اصل رقابت سبب می‌شود که همواره در لبه‌ی باریک تغییر قرار داشته باشد. نباید گول آرامش آن را بخورید: شبکه‌های عصبی تنها از آن رو به نظر می‌رسد که در آرامش هستند که هر ناحیه‌ی آن‌ها درگیر جنگی سرد و کاملاً آماده و مسلح است که برای مرزهای آینده‌ی جهان درونی رقابت کند.



وقتی هائیتی ناپدید می شود

جزیره‌ی هیسپانیولا در دریای کارائیب بین دو کشور هائیتی و جمهوری دومینیکن مشترک است. فکرش را بکنید که اگر در جمهوری دومینیکن سونامی بیاید و آن را غیرقابل سکونت کند، چه اتفاقی می افتد؟ یک احتمال این است که مردم دومینیکن از صحنه‌ی روزگار حذف خواهند شد، ولی کشور هائیتی همچنان به موجودیت خود ادامه خواهد داد. ولی یک احتمال دیگر نیز وجود دارد: آیا احتمال ندارد که مردم هائیتی مرز کشورشان را چند صد مایل به طرف غرب منتقل کنند، و اهالی دومینیکن را با مهربانی در سرزمین خود جای دهند و قسمتی از مناطق باقی مانده را به آن‌ها بدهند؟ در این حالت، به لطف سخاوتمندی کشور همسایه، دو ملت هم‌نوا با یکدیگر در بخش کوچک‌تر باقی مانده از سرزمین خود ساکن می شوند.



برمی گردیم به مغز: در صورتی که بیماری، جراحی، یا آسیب مغزی موجب کاهش فضای موجود شود، چه اتفاقی می افتد؟ درست مثل دو کشور همسایه، در اینجا نیز دو حالت وجود دارد. یا ممکن است بخش‌هایی از نقشه که متناظر با بافت آسیب دیده است، از مغز حذف شود، و یا ممکن است مغز نقشه‌ی اولیه را در قطعه‌ی کوچک‌تری از فضا جای دهد.

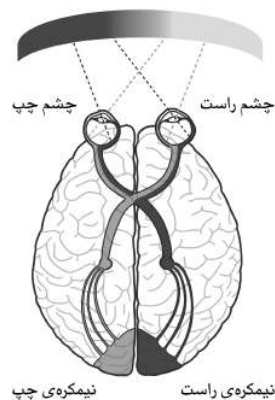
برای اینکه ببینیم چه اتفاقی می افتد، به سراغ دختر جوانی می رویم که نام او را آلیس می گذاریم. او وقتی سه و نیم ساله بود، دچار تشنج‌های کوچکی شد، لذا پدر و مادرش او را برای اسکن مغزی به بیمارستان بردند. نتیجه‌ی اسکن جامعه‌ی پزشکی را حیرت زده کرد، زیرا معلوم شد که او فقط با نیمی از

مغزش متولد شده است. کلاً نیمه‌ی راست مغز او وجود نداشت، که ناهنجاری نادری محسوب می‌شود.^[۱]

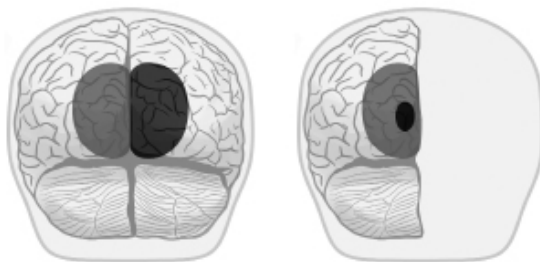
ولی عجیب این است که دوران کودکی او به صورت طبیعی سپری شد. یعنی با وجود اختلال تکوینی عجیب مغز او، توانایی‌هایی مانند هماهنگی چشم و دست تحت تأثیر قرار نگرفته بود. البته دچار تشنج می‌شد، ولی تشنجه‌ها با دارو قابل کنترل بود، و پس از مدتی تنها علامت ظاهری فقدان نیمکره‌ی مغزی آلیس این بود که در انجام کارهای حرکتی ظریف با دست چپ مشکل داشت. وضعیت آلیس این فرصت را به ما می‌دهد که پرسشی بنیادی را مطرح کنیم: زمانی که فقط یک نیمکره وجود دارد، برای آن دسته از مدارهای مغزی که در حالت طبیعی از یک نیمکره به نیمکره‌ی دیگر کشیده شده‌اند، چه اتفاقی می‌افتد؟ برای فهمیدن پاسخ این پرسش، ابتدا باید ببینیم که اطلاعات در حالت عادی چگونه از چشم چپ یک شخص به مغز او منتقل می‌شود. الیاف نیمه‌ی چپ شبکه‌ی، اطلاعات خود را در پشت مغز به طرف چپ قشر بینایی انتقال می‌دهند. تا اینجا که مشکلی نیست، زیرا آلیس طرف چپ مغزش را دارد. ولی اطلاعات نیمه‌ی راست شبکه به طور معمول از خط وسط عبور می‌کند و به پشت نیمکره‌ی راست منتقل می‌شود. از آنجا که آلیس آن نیمه از مغزش را ندارد، این الیاف کجا خواهد رفت؟

این نمونه‌ای شگفت‌انگیز از مدارسازی پویا است که در دهه‌های گذشته حتی به مخیله‌ی کسی خطور نمی‌کرد: الیاف هر دو میدان بینایی به نیمکره‌ی چپ انتقال یافته بود. تمام میدان بینایی در همان فضای موجود جای داده شده بود. به عبارت دیگر، هابیتی زمین باقی‌مانده را با کشور مجاور شریک شده بود. این واقعیت که آلیس از نظر بینایی و هماهنگی چشم و دست عملکرد طبیعی دارد، نکته‌ی شگفت‌انگیز دیگری را نیز برای ما روشن می‌کند: با آنکه مراحل اولیه‌ی دستگاه بینایی او با سازمان‌دهی نرمال سیم‌کشی نشده بود، ولی نواحی مجاور مغزی مشکلی در استفاده از این نقشه‌ی غیرمعمول نداشتند. به عبارت دیگر، برای اینکه بقیه‌ی سیستم کارکرد درستی داشته باشد، نیازی نبود که قشر بینایی او دستورالعمل ژنتیکی را رعایت کند. هماهنگ با مطالبی که در سرتاسر این کتاب گفته شد، ژنتیک آلیس سیستم شکننده‌ای را پدید نیاورده بود که بر اثر

انحراف قابل توجه از برنامه، با شکست مواجه شود. بلکه ژنتیک او سیستمی مبتنی بر مدارسازی پویا را پدید آورد که می‌توانست کار را به درستی به انجام برساند.



در حالت عادی، نیمه‌ی چپ محیط اطراف در سمت راست مغز نمایش داده می‌شود. از آنجا که آلیس نیمکره‌ی راست مغز را نداشت، این الیاف به کجا می‌رفت؟

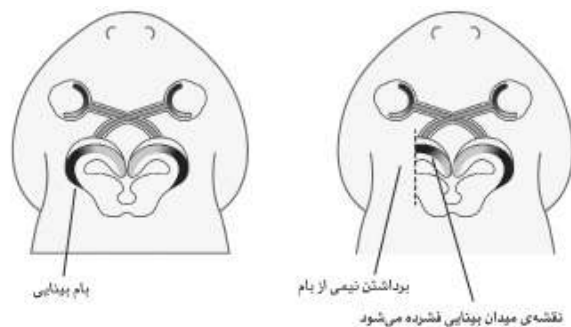


قشر بینایی در پشت مغز. چپ: مغز طبیعی. مناطق خاکستری نماینده‌ی میدان بینایی راست (طرف راست محیط بصری) است، و رنگ سیاه نماینده‌ی طرف چپ میدان بینایی. راست: دستگاه بینایی آلیس به گونه‌ای مدارسازی مجدد شده که هر دو میدان بینایی چپ و راست در تنها نیمکره‌ی باقیمانده جای گرفته‌اند.

آلیس بدون یکی از نیمکره‌های مغزی به دنیا آمد، ولی داستان ماتیو را هم که قبلاً در این کتاب بازگو کردیم، به خاطر آورید: در او، یکی از نیمکره‌های مغز به روش جراحی برداشته شد. ماتیو کمی لنگش دارد، ولی در غیر این صورت زندگی مستقلی دارد، و هیچ‌کس بو نمی‌برد. درست مانند نیمکره‌ی باقیمانده‌ی آلیس، در مورد ماتیو هم نیمکره‌ی باقی‌مانده‌اش توانست بفهمد که چگونه

وظایف ضروری را به انجام برساند: بافت مغزی مدارهای خود را بازآرایی کرد تا کارها را طبق معمول انجام دهد، ولو آنکه فضای موجود از اساس تغییر کرده بود. هم در مورد آلیس و هم در مورد ماتیو، نقشه‌های مغزی ضمن حفظ روابط، وظایف، و کارکردهای قبلی، در نیمی از فضای قبلی بازآرایی شد.

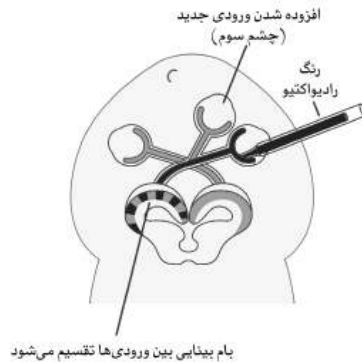
چگونه چنین مدارسازی مجدد وسیعی اتفاق می‌افتد؟ اولین نشانه‌ها در قورباغه‌ها مشاهده شد، که دستگاه بینایی ساده‌تری دارند. اعصاب از چشم قورباغه به ناحیه‌ای به نام بام بینایی می‌رود (تقریباً مشابه با قشر اولیه‌ی بینایی در پستانداران) — چشم راست به بام طرف چپ می‌رود و برعکس. در آنجا اعصاب به‌طور منظم متصل می‌شوند: الیاف حاصل از بالای چشم به بالای بام وصل می‌شوند، طرف چپ چشم به طرف چپ بام، و الی آخر. به نظر می‌رسد که هر عصبی که از چشم می‌آید، آدرس از قبل تعیین شده‌ای دارد که در آنجا به هدف وصل می‌شود. پس در این صورت، اگر نیمی از بام بینایی را در حین تکوین، قبل از رسیدن اعصاب، بردارید، چه اتفاقی می‌افتد؟ پاسخ آن — مشابه با مغز آلیس — این است که نقشه‌ی کاملی از میدان بینایی در ناحیه‌ی هدف کوچک‌تر تشکیل می‌شود.^[۲] نقشه نرمال به نظر می‌رسد، فقط فشرده شده است. درست مانند نقشه‌ی هائیتی پس از ناپدید شدن نیمه‌ی شرقی جزیره و اقدام محبت‌آمیز اهالی آن.



فشرده‌سازی برای جا شدن در یک ناحیه‌ی کوچک‌تر. چپ: نگاشت طبیعی شبکه بام بینایی. راست: به علت از بین رفتن نیمی از بام بینایی، نقشه فشرده می‌شود تا جا شود.

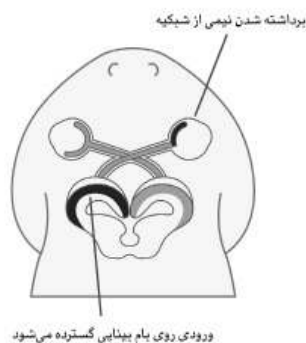
حالا به سطح بعدی آزمایش می‌رسیم: چه اتفاقی می‌افتد اگر یک چشم اضافی را به یک طرف بچه‌قورباغه پیوند کنید؟ در این موقعیت، عصب بینایی

غیرمنتظره‌ای نیز باید در ناحیه‌ی هدف بام بینایی شریک شود. چه اتفاقی می‌افتد؟ چشم‌ها ناحیه را در نوارهای یک در میان بین خودشان تقسیم می‌کنند، به‌طوری که هر دسته از نوارها حاوی نقشه‌ی کاملی از چشم است.^[۳] این بار هم الیاف ورودی از هر فضایی که در دسترس‌شان قرار گرفته، استفاده می‌کنند. مثل آن است که انگار کشور جدیدی به جزیره‌ی هیسپانیولا راه پیدا کرده و مردم کشور هائیتی رأی داده‌اند که سرزمین خود را با پادشاهی جدید به اشتراک بگذارند، و جزیره به‌صورت نوارهای یک در میان بین آن‌ها تقسیم شود.^[۴]



اگر چشم سومی به جانور پیوند شود، بام بینایی این ورودی جدید را به نوارهایی اختصاص می‌دهد. این‌گونه آزمایش‌ها نشان می‌دهند که وقتی لازم باشد، نقشه‌ها فشرده می‌شوند و فضا را بین خودشان تقسیم می‌کنند. حالا اگر فضای بیشتری موجود باشد، آیا نقشه منبسط هم می‌تواند بشود؟ برای فهمیدن این موضوع، پژوهشگران نیمی از شبکه‌ی را برداشتند. حالا رشته‌های عصب بینایی که به مغز می‌رسید، نصف حالت نرمال بود، در حالی که فضای بام بینایی همان اندازه‌ی طبیعی بود. در چنین حالتی، چه اتفاقی می‌افتد؟ نقشه (که حالا فقط نیمی از میدان بینایی را کد می‌کند) پخش می‌شود تا از تمام بام بینایی استفاده کند.^[۵] درسی که از آلیس، ماتئو، و قورباغه‌ها می‌گیریم، این است که نقشه‌های عصبی از قبل از سوی نوعی کمیسیون شهرسازی ژنتیکی تعریف نشده‌اند. بلکه هر چقدر فضا موجود باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد و پر می‌شود. این خاصیتِ مدارسازی مجدد پویا بهترین امید مغز برای بهبود پس از

آسیب ناشی از سکته‌ی مغزی است. پس از فروکش کردن تورم مغز، کار واقعی مغز آغاز می‌شود. در طول چند ماه تا چند سال، بازآرایی عمده‌ای در قشر مغز رخ می‌دهد، و کارکردهایی که از دست رفته، بعضاً دوباره ایجاد می‌شود. نمونه‌ای از آن غالباً در افرادی دیده می‌شود که توانایی تکلم را از دست داده‌اند. در اکثر افراد، زبان منحصر به نیمکره‌ی چپ است، و پس از سکته‌ی مغزی در طرف چپ مغز، فرد قادر به حرف زدن یا فهمیدن حرف‌های دیگران نیست. با این حال، غالباً پس از مدتی، توانایی زبانی بازیابی می‌شود — نه به خاطر اینکه بافت مرده‌ی نیمکره‌ی چپ التیام پیدا کرده است، بلکه از آن رو که کارکرد زبانی به نیمکره‌ی راست منتقل می‌شود. در یک گزارش، دو بیمار که دچار سکته‌ی مغزی در طرف چپ شده بودند، اختلال زبانی داشتند و نهایتاً توانایی تکلم را (به‌طور نسبی) بازیافتند. ولی هر دوی آن‌ها آن‌قدر بدشانس بودند که بعداً دچار سکته‌ی مغزی وسیع در طرف راست شدند، و توانایی بازیابی شده‌ی تکلم آن‌ها دچار اختلال شد، که نشان می‌داد که این قابلیت به نیمکره‌ی راست منتقل شده بود.^[۶]



وقتی که فقط نیمی از الیاف عصبی شبکه به بام بینایی می‌رسند، نقشه منبسط می‌شود.

پس می‌بینیم که نقشه‌های مغزی گاه کش می‌آیند، فشرده می‌شوند، و به جای دیگری منتقل می‌شوند. ولی از کجا می‌فهمند که این کار را بکنند؟ برای پاسخ به این پرسش، باید به اعماق جنگل‌های نورونی دقیق‌تر نگاه کنیم.

چگونه قاچاقچیان مواد مخدر را به طور یکنواخت توزیع کنیم؟

من در آلبوکرکی در ایالت نیومکزیکو بزرگ شدم. این شهر غیر از اینکه تعداد زیادی پزشک و وکیل و معلم و مهندس دارد، همان طور که همه از سریال تلویزیونی بریکینگ بد می دانند، تعدادی قاچاقچی مواد مخدر هم دارد. من وقتی که بزرگ تر شدم، به این فکر افتادم که هر قاچاقچی منطقه‌ی خودش را چگونه مشخص می کند. چرا که قاچاقچی ها فقط منحصر به محله های فقیرنشین نیستند (گرچه اکثر سیاست گذاری ها برای این ها است)؛ بلکه در تمام مناطق شهر پخش شده اند، و هر کدام چند بلوک از شهر را در اختیار دارند. پس این ها چگونه مشخص می کنند که هر کسی در چه منطقه ای عمل کند؟ دو راه وجود دارد.

راه اول این است که برنامه ریزان شهری آلبوکرکی شورایی تشکیل دهند و تمام قاچاقچیان را گرد هم آورند که هر کدام در سالن اجتماعات شهر روی یک صندلی تاشو بنشینند و مناطق شهر به طور منصفانه و مساوی بین آن ها تقسیم شود. این را رویکرد بالا به پایین می نامیم. رویکرد دیگر، روش پایین به بالا است. فرض کنید قاچاقچی ها هر کدام با یکدیگر رقابت می کنند و منافع بالایی در این کار دارند. با توجه به رقابت، هر کدام از آن ها متوجه می شود که فقط مناطق خاصی را می تواند در کنترل خود داشته باشد. هر کدام از قاچاقچی ها کار خودش را انجام می دهد، ولی رقبا در مناطق مجاور او را محصور کرده اند، به طوری که در نهایت، قاچاقچیان در سرتاسر شهر توزیع می شوند.

رویکرد پایین به بالا منجر به چه ویژگی هایی می شود؟ فرض کنید که بخشی از آلبوکرکی بر اثر گردبادی عظیم نابود می شود. آن وقت، چه اتفاقی می افتد؟ پس از آنکه شهر به حالت طبیعی برگشت، قاچاقچی ها سعی می کنند که فضای خود را فشرده تر کنند، و جای هر کدام کمی تنگ تر می شود. نیازی نیست که کسی به آن ها دستور بدهد: فضای کمتری در دسترس است، و همه مجبورند آن را بین خودشان تقسیم کنند.

برعکس، اگر فضای شهر آلبوکرکی ناگهان دو برابر شود، شاهد آن خواهیم بود

که قاچاقچی‌ها پخش می‌شوند، فضای خالی را پر می‌کنند، و از فرصت افزایش فضا و کاهش رقابت استفاده می‌کنند. نیازی نیست کسی به آن‌ها بگوید که چکار کنند. الگوهای سطح بالای شهر از رقابت افراد حاصل می‌شود. هر قاچاقچی دنبال درآمد است. هر کدام از آن‌ها باید خرج خانواده‌اش را دریاورد، کرایه‌ی خانه‌اش را بدهد، و شاید حتی ماشین بخرد — پس طبیعی است که هر کدام از آن‌ها سعی می‌کند منطقه‌ی خود را حفظ کند. انعطاف‌پذیری نقشه‌ی قاچاقچیان شهر پیامد ناخودآگاه رفتار افراد است، نه طرح هوشمندانه‌ای که برنامه‌ریزان شهری ریخته باشند.

حالا برمی‌گردیم به مغز. اگر به هر درس‌نامه‌ای در زمینه‌ی علوم اعصاب مراجعه کنید، مطالبی درباره‌ی انتقال عصبی، یعنی آزاد شدن مقدار کمی پیام‌رسان شیمیایی از نورون، خواهید خواند. این ماده‌ی شیمیایی به گیرنده‌های سلول دیگر متصل می‌شود، و باعث موج کوچکی از فعالیت الکتریکی یا شیمیایی می‌شود. به این طریق، نورون‌ها پیام‌هایی را برای یکدیگر می‌فرستند. ولی این تعامل سلولی را از زاویه‌ی دیگری در نظر بگیرید. در سرتاسر قلمرو سلولی دور و بر ما، موجودات تک‌سلولی مواد شیمیایی آزاد می‌کنند. ولی آن مواد شیمیایی، پیام‌هایی دوستانه نیستند؛ بلکه سازوکارهایی دفاعی و پیام‌هایی تهدیدآمیز هستند. حالا میلیاردها سلول مغز را نیز مانند میلیاردها ارگانیسم تک‌سلولی در نظر بگیرید. گرچه ما معمولاً تصور می‌کنیم که نورون‌ها با کمال خوشحالی با یکدیگر همکاری می‌کنند، ولی می‌توانیم تصور کنیم که درگیر نبردی مزمن با یکدیگر هستند. به جای اینکه برای یکدیگر پیام بفرستند، به روی یکدیگر تف می‌کنند. از این زاویه، آنچه در بافت فعال مغز می‌بینیم، رقابت میان میلیاردها عامل جداگانه است، که هر کدام بر سر منابع با یکدیگر رقابت می‌کنند و سعی دارند زنده بمانند. آن‌ها هم مانند قاچاقچیان آلبوکرکی، هر کدام دنبال منافع خود هستند.

با این دیدگاه، درک برخی یافته‌های تجربی بسیار آسان می‌شود. مثلاً در اوایل دهه‌ی ۱۹۶۰، دو عصب‌شناس دیوید هوپل و تورستن ویزل نشان دادند که نوارهای یک در میان در قشر بینایی پستانداران حامل سیگنال‌هایی از چشم چپ یا چشم راست هستند. در شرایط نرمال، بخشی مساوی از فضا به هر یک

از چشم‌ها می‌رسد. ولی اگر یکی از چشم‌ها در اوایل زندگی پوشانده شود، ورودی قوی‌تر از چشم دیگر، ناحیه‌ی بیشتری را به تصرف خود درمی‌آورد. به عبارت دیگر، نقشه‌ی قشر بینایی بر اثر تجربه به‌طور قابل توجهی تغییر می‌کند: ورودی‌های چشم قوی حفظ و تقویت می‌شوند، در حالی که ورودی‌های چشم بسته شده ضعیف شده و نهایتاً مضمحل می‌شوند.^[۷] این یافته دو چیز را نشان می‌دهد: اول اینکه این نقشه‌ها کاملاً ذاتی نیستند. دوم اینکه حفظ ناحیه در مغز وابسته به فعالیت است: نگه داشتن زمین نیازمند قدرت مداوم است. به تدریج که ورودی‌ها کاهش می‌یابد، نورون‌ها اتصالات خود را تغییر می‌دهند تا سرانجام جایی را که فعالیت بیشتری دارد، پیدا کنند.

این کشف (که هوبل و ویزل به خاطر آن در سال ۱۹۸۱ برنده‌ی جایزه‌ی نوبل شدند) مشخص می‌کند که برای بچه‌هایی که چشم‌هایشان هم‌راستا نیستند، چکار باید بکنیم. کودکی که انحراف چشم به داخل یا خارج دارد، نهایتاً در چشمی که کمتر استفاده می‌شود، دچار نابینایی خواهد شد. ولی مسئله در خود چشم نیست؛ در قشر بینایی است. از آنجا که یک چشم غالب است، لذا در رقابت با چشمی که انحراف دارد، پیروز می‌شود و منطقه‌ی بیشتری را در قسمت پشت مغز به تصرف خود درمی‌آورد. و اما راه‌حل چیست؟ راه درمان آن این است که با عمل جراحی، انحراف چشم ضعیف را اصلاح کنید، و سپس چشم سالم کودک را با چشم‌بند ببندید. این کار به چشم ضعیف‌تر فرصت می‌دهد که ناحیه‌ی قشری از دست رفته را دوباره به دست آورد.^[۸] زمانی که تعادل دوباره برقرار شد، چشم‌بند برداشته می‌شود، و هر دو چشم درست کار خواهد کرد.

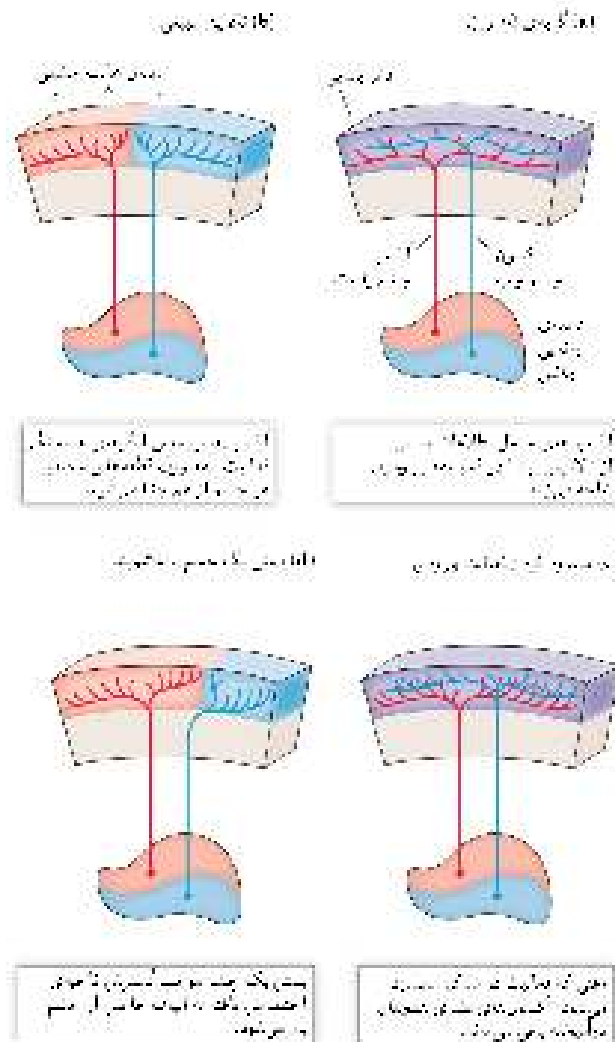
این ترفند مفید به‌طور طبیعی از درک رقابت ذاتی در سطح نورون‌ها حاصل می‌شود. در ضمن، نقشه‌ی بدن، یا همان آدامک، را هم به یاد آورید. معمایی که در فصل ۳ با آن برخورد کردیم، این است که مغز (که در تاریکی جمجمه گیر افتاده است) از کجا می‌فهمد که بدن چه شکلی است. درسی که از تغییرات نقشه‌ی بدن می‌گیریم، این است که مغز براساس قواعد ساده‌ای، نقشه‌ی بدن را استنباط می‌کند. به عبارت دیگر، نقشه به‌طور طبیعی از تعامل با دنیا حاصل می‌شود، بدین‌گونه که نواحی مجاور بدن در مغز به‌صورت قسمت‌هایی مجاور یکدیگر بازنمایی می‌شوند.^[۹] درست مانند قاچاقچیان مواد

مخدر و کودکان دچار انحراف چشم، این فرایند هم وابسته به رقابت است. و به همین خاطر است که به محض اینکه یک اندام حرکتی از دست می‌رود (مانند دست دریادار نلسون)، منطقه‌ی قشری مجاور ناحیه‌ی مربوط به آن را اشغال می‌کند. حفظ ناحیه نیازمند رسیدن مداوم ورودی به هر کدام از نورون‌ها است: وقتی که تلاش‌گند می‌شود، معمولاً ناحیه نصیب تیمی می‌شود که ورودی فعال دارد.

در ضمن، به همین خاطر است که آدمک مغزی منظره‌ی خیلی عجیبی دارد. انگشتان و لب‌ها و اعضای تناسلی خیلی بزرگ هستند، در حالی که تنه و پاها کوچک‌اند. این ناشی از همان نوع رقابت است: تراکم گیرنده‌ها در انگشتان، لب‌ها، و اعضای تناسلی خیلی بالاتر، و مثلاً در تنه و ران‌ها پایین‌تر است. مناطقی که اطلاعات بیشتری می‌فرستند، ناحیه‌ی بازنمایی بزرگ‌تری دریافت می‌کنند. (تصویر صفحه ۲۱۹ را ببینید.)

بنابراین، روش درست برای فکر کردن درباره‌ی این سیستم آن است که در سطوح کوچک رقابت وجود دارد، و در سطوح بالاتر، خاصیت‌های ظهوریافته (کش آمدن، کوچک شدن، تقسیم شدن) بروز می‌کند. با ادامه یافتن جنگ‌های محلی در طول عمر فرد، نقشه‌های مغزی دوباره ترسیم می‌شوند. و علت این امر آن است که هر کدام از نورون‌ها با همان چالش‌هایی روبه‌رو می‌شود که در مورد قاچاقچی‌ها دیدیم، و آن این است که نورون تلاش می‌کند جای خالی ویژه‌ای برای خود پیدا کند، و آنگاه تمام مدت وقت خود را صرف دفاع از آن می‌کند. نزاع مداومی که در مغز بر سر قلمرو در جریان است، جنگ بر سر زندگی یا مرگ است: هر نورون تمام عمر خود را صرف مبارزه برای به دست آوردن منابع می‌کند تا بتواند زنده بماند. ولی این‌ها بر سر چه جنگ می‌کنند؟ برای قاچاقچیان مواد مخدر، مهم‌ترین چیز پول است. معادل آن برای نورون‌ها چیست؟

در سال ۱۹۴۱، زن ایتالیایی جوانی به نام ریتا لوی-مونتالچینی از شهر زادگاهش تورین به کلبه‌ی کوچکی در مناطق روستایی گریخت و در آنجا برای فرار از آلمانی‌ها و ایتالیایی‌ها در اختفا به زندگی پرداخت: جانش در خطر بود، چون او یهودی بود و کشورش ایتالیا با نازی‌ها متحد شده بود. او در مدتی که



(a) در یک جانور جوان، ورودی‌های چشم چپ و چشم راست در لایه‌ی ورودی قشر اولیه‌ی بینایی به‌صورت یکنواخت پخش شده است. (b) با بزرگ‌تر شدن جانور، ورودی حاصل از دو چشم به‌صورت نواحی متناوب درمی‌آید. (c) اگر هر دو چشم از نور محروم شوند، الیاف حامل اطلاعات چشم چپ و چشم راست از هم جدا نمی‌شوند. (d) اگر فقط یک چشم از نور محروم شود، ورودی مربوط به آن به‌تدریج کوچک‌تر می‌شود، در حالی که ورودی حاصل از چشم فعال فضای بیشتری به دست می‌آورد.

در اختفا بود، آزمایشگاه کوچکی در کلبه‌اش بر پا کرد و روزها و شب‌هایش را صرف مطالعه‌ی چگونگی تکوین اندام‌های حرکتی در رویان‌های جوجه می‌کرد. کار او در آنجا منجر به کشف فاکتور رشد عصبی شد، که به خاطر این کار در سال ۱۹۸۶ برنده‌ی جایزه‌ی نوبل شد.



آنچه او کشف کرده بود، نخستین مورد از یک دسته مواد شیمیایی مهم بدن به نام نوروتروفین‌ها بود.^[۱۰] این پروتئین‌ها، که به‌وسیله‌ی نورون‌های هدف ترشح می‌شوند، وجه رایجی هستند که نورون‌ها و سیناپس‌ها بر سر آن رقابت می‌کنند. این مواد سبب می‌شود که نورون‌ها اتصالات بیشتری ایجاد کنند و آن‌ها را تثبیت نمایند. نورون‌هایی که موفق به کسب این مواد شیمیایی حفظ‌کننده‌ی حیات می‌شوند، رشد می‌کنند. نورون‌های ناموفق به دنبال شاخه زدن در محل‌های دیگر می‌روند. اگر در هیچ جایی موفق نشوند، نهایتاً می‌میرند. نورون‌ها غیر از تلاش برای دستیابی به پاداش این مواد شیمیایی، سعی می‌کنند از مواد سمی نیز اجتناب کنند. مثلاً سیناپتوتوکسین‌ها سیناپس‌های موجود را نابود می‌کنند،^[۱۱] و آکسون‌ها سعی می‌کنند با فعال ماندن، از این اثرات تنبیهی در امان بمانند: به محض اینکه فعالیت آن‌ها به زیر سطح آستانه‌ی معینی برسد، حذف می‌شوند.^[۱۲]

به این طریق، مولکول‌های جذبی و دفعی با ایجاد نوعی زبان چندلایه، بازخوردی را فراهم می‌کند که نورون‌ها براساس آن می‌فهمند که باید سر

جای‌شان بمانند، اتصالات خود را بیشتر یا کمتر کنند، به جای دیگری بروند، و یا اینکه خودشان را فدای مصلحت بزرگ‌تر نمایند.



به موازات عواملی که در سطح نوروهای انفرادی هستند، مسئله‌ای بزرگ‌مقیاس‌تر مشخص می‌کند که آیا کل سیستم انعطاف‌پذیر است یا اینکه قفل شده است. دو نوع نورو داریم: آن‌هایی که پیام‌هایی را برای تحریک همسایگان خود انتقال می‌دهند (نوروهای تحریکی)، و آن‌هایی که مانع از عمل همسایگان خود می‌شوند (نوروهای مهار). این دو نوع سلول در شبکه‌ها به صورت درهم‌تنیده وجود دارند، و بر روی هم میزان انعطاف‌پذیری سیستم را تعیین می‌کنند. اگر مهار خیلی زیاد باشد، نوروها نمی‌توانند به قدر کافی با هم رقابت کنند، و **دیگر** تغییری اتفاق نخواهد افتاد. اگر مهار خیلی کم باشد، رقابت به قدری بالا خواهد بود که امکان برآمدن یک برنده وجود نخواهد داشت. یک سیستم انعطاف‌پذیر و تنظیم‌شده باید دارای توازن صحیح و دقیقی از مهار و تحریک باشد؛ به این طریق، نوروها می‌توانند با حد مناسبی از رقابت به موفقیت برسند، ناحیه‌ی بهینه‌ای که رقابت نه خیلی کم است و نه خیلی زیاد. به تدریج که رقابت کاهش می‌یابد، سیستم در جای خود مستقر می‌شود. اگر رقابت بیش از حد شدید باشد، برندگان نمی‌توانند به جایگاه بالا برسند.

به عنوان یک تشبیه، کشورهایمانند کره‌ی شمالی و ونزوئلا را در نظر بگیرید. کره‌ی شمالی کشوری است که در آن مهار به قدری سخت‌گیرانه است که افراد هیچ کاری را که قبلاً به تأیید حکومت نرسیده باشد، نمی‌توانند انجام دهند. در ونزوئلا، تسلط دولت به قدری ضعیف است که کارتل‌های مواد مخدر، گروه‌های مافیایی، و مجرمان هر کاری بخواهند، می‌کنند. در هر دو مورد، این کشورها به شکوفایی نمی‌رسند — در مورد اول به خاطر مهار بیش از حد، و در مورد دوم به خاطر کم بودن آن. در سرتاسر جهان، کشورهای موفق توازن خودشان را در نقطه‌ی مناسبی که نه زیاد انعطاف‌پذیر باشد و نه زیاد سخت‌گیر، حفظ می‌کنند. سیستم‌های دوحزبی برای این منظور بسیار مناسب‌اند، و برای مقصود بحث حاضر، می‌توانید محافظه‌کاران و لیبرال‌ها را مشابه با دو حالت انتقال عصبی، یعنی

مهار و تحریک، در نظر بگیرید. معمولاً یکی از دو حزب غلبه دارد، ولی نه خیلی زیاد. غالباً رئیس‌جمهور متعلق به یک حزب است، ولی کنگره اکثراً در سیطره‌ی حزب مخالف است. گرچه خیلی‌ها از مجادلات همیشگی نظام دوحزبی شکوه می‌کنند، ولی چنین نظامی برای ایجاد تغییرات سودمند ایده‌آل است. برعکس، غلبه‌ی کامل یک حزب منجر به تصرف کامل نظام می‌شود که به‌طور تاریخی همیشه مشکلاتی را برای ملت در پی دارد.^[۱۳] جادوی مفیدی که در حکومت‌ها و در مغزها یافت می‌شود، حاصل از توازن نیروهای مخالف است: به این طریق است که می‌توانید یک سیستم را پایدار، در فرمان، و آماده‌ی انجام تغییر نگه دارید.

چگونه نوروها شبکه‌ی اجتماعی خود را گسترش می‌دهند

قبلاً دیدیم که تغییرات در مغز می‌تواند به سرعت بروز کند — حتی در عرض یک ساعت. چطور ممکن است چنین تغییرات بزرگی با چنان سرعتی انجام شود؟ یادتان هست گفتیم که در افرادی که چشم‌پند بسته‌اند، قشر بینایی ظرف یک ساعت شروع به پاسخ دادن به لمس می‌کند (فصل ۳)؟ این فاصله‌ی زمانی کوتاه‌تر از آن است که سیناپس‌های جدیدی از نواحی مربوط به لمس و شنوایی به قشر اولیه‌ی بینایی ایجاد شود، و این مشاهده نشان می‌دهد که این اتصالات از قبل وجود دارند.^[۱۴] به هر حال، بسیاری از اتصالات نورونی از قبل وجود دارند، ولی به قدری مهار شده‌اند که حضور آن‌ها هیچ کارکردی ندارد. برداشتن مهار اقدامی است که فرصت شنیده شدن صدای آن‌ها را فراهم می‌آورد.^[۱۵]

به‌عنوان یک تشبیه، فرض کنید بحران عمده‌ای در حلقه‌ی دوستان شما بروز می‌کند. به این معنا که به علت سوءتفاهمی تأسف‌آور در یک مهمانی (که بقیه هم مثل شما کارهای دیوانه‌وار می‌کردند)، تمام دوستان نزدیک‌تان را از دست می‌دهید. ناگهان ورودی اجتماعی شما کمتر می‌شود، و حالا به سیگنال‌هایی گوش می‌کنید که از آشنایان دورتر به شما می‌رسد — افرادی که در گذشته هرگز در مرکز توجه شما واقع نمی‌شدند. به علت روابطی قوی که با دوستان نزدیک‌ترتان داشتید، صدای آن‌ها خاموش می‌شود. حالا که کم‌کم صدای این دوستان دور به گوش‌تان می‌رسد، به تدریج با هدایت و تقویت این ارتباطات ضعیف، شروع به پُر کردن زندگی اجتماعی خود می‌کنید.

همان گونه که از این تشبیه می‌توانید حدس بزنید، سازوکار آشکار شدن، برداشته شدن مهارتی است که قبلاً از سوی اتصالات قوی اعمال می‌شد. به بیان عصبی، اتصالات قبلی مهار جانبی ایجاد می‌کرد، یعنی فعالیت همسایه‌های مجاور خود را خفه می‌کرد.^[۱۶] وقتی که ورودی‌های اولیه خاموش می‌شود (ولو بر اثر تغییری کوتاه‌مدت، مثلاً بی‌حس کردن دست یا بستن چشم‌بند)، تغییراتی سریع رخ می‌دهد. این گاه بر اثر تغییراتی در قشر است؛ در برخی موارد دیگر، ناشی از برداشته شدن مهار اتصالات موجود قبلی است که از تالاموس به قشر می‌رسد.^[۱۷] به عبارت دیگر، در نتیجه‌ی برداشته شدن مهار، ارتباطات گسترده‌ای که تاکنون خاموش بوده، فعال و کارکردی می‌شود.

نقاب‌زدایی این اتصالات تنها از آن رو امکان‌پذیر می‌شود که مغز مدارهای بینابینی و اتصالات اضافی فراوانی دارد. این زیادگی در ابتدا قوی است و با گذشت زمان کاهش می‌یابد. مثلاً بوق بلندی را برای کسی پخش کنید، و الکترودهایی را برای اندازه‌گیری پاسخ مغز روی پوست سر قرار دهید (نوار مغزی). در بزرگسالان سالم، این بوق موجب پاسخی الکتریکی می‌شود که به روشنی روی قشر شنوایی قابل اندازه‌گیری است، ولی روی قشر بینایی وجود ندارد یا ضعیف‌تر است. حالا این آزمایش را در کودکی شش ماهه انجام دهید: پاسخ روی هر دو ناحیه‌ی بینایی و شنوایی تقریباً یکسان است. چرا؟ زیرا زیادگی اتصالات در مغز شیرخوار به صورتی است که نواحی شنوایی و بینایی نسبت به یکدیگر تفاوت چندانی ندارند.^[۱۸] بین سن شش ماه تا سه سال، اندازه‌ی پاسخ اندازه‌گیری شده روی نواحی بینایی در مقابل صدای بوق به تدریج کاهش می‌یابد. مغز در ابتدا اتصالات زیادی دارد و با گذشت زمان موارد اضافی را هرس می‌کند. اما آن اتصالات بینابینی اولیه به‌طور کامل از بین نمی‌رود. حتی در مغز بزرگسالان هم برخی از الیاف اولیه‌ی شنوایی مستقیماً به قشر اولیه‌ی بینایی می‌رسند، و برعکس.^[۱۹] همین اتصالات بینابینی است که امکان به‌کارگیری مجدد سریع را در مواقع ضروری فراهم می‌سازد.

نقاب‌برداری اتصالات خاموش تنها راه برای رخ دادن تغییر نیست. در یک مقیاس زمانی آهسته‌تر، مغز از ترفند متفاوتی استفاده می‌کند: رشد آکسون‌ها به نواحی جدید و جوانه زدن اتصالات.^[۲۰] اگر باز هم تشبیه دوستان شما را در نظر بگیریم، تصور کنید که شما شروع به ردوبدل کردن پیامک با آشنایانی

می‌کنید که قبلاً توجه زیادی به آن‌ها نمی‌کردید. با گذشت زمان، با توجه به اینکه تقویم اجتماعی شما به‌طور غیرمنتظره خلوت‌تر شده است، این دوستان دور کم‌کم شما را به صرف شام در منزلشان دعوت می‌کنند، و شما ممکن است دوستان جدیدی پیدا کنید که قبلاً جایی برای آن‌ها نداشتید. شروع به پیدا کردن و برقرار کردن ارتباطات جدیدی می‌کنید که از حلقه‌های اجتماعی دورتر سرچشمه می‌گیرند. در مورد مغز هم همین‌طور است: با گذشت زمان، مناطقی که ارتباطات آن‌ها قطع شده، اتصالات جدیدی برقرار می‌کنند.^[۲۱]

پس به‌طور خلاصه تا اینجا فهمیدیم: یک اصل کلی بازآرایی آن است که مغز تعداد زیادی اتصالات خاموش دارد که آن‌ها را پنهان کرده است. این‌ها به‌طور معمول مهار شده‌اند و نقشی در هیچ کاری ندارند. ولی در آینده اگر لازم باشد، می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. با بهره‌گیری از این‌ها، مغز می‌تواند به سرعت به تغییرات ورودی پاسخ دهد. با این حال، این اتصالات خاموش از نظر تعداد محدودند، و برای تغییرات طولانی‌تر و گسترده‌تر، از رویکرد دیگری استفاده می‌شود: اگر تغییرات کوتاه‌مدت برای جانور مفید واقع شود، آنگاه تغییرات بلندمدت (مانند جوانه زدن سیناپس‌های جدید و رشد آکسون‌های جدید) نهایتاً در پی آن صورت می‌پذیرد. فراتر از این رویکردها، یک چیز دیگر هم هست که به سیستم امکان می‌دهد که خودش را شکل بدهد، و آن مرگ است.

فواید یک مرگ خوب

وقتی که به میکل آنژ و ساختن هر کدام از مجسمه‌هایش فکر می‌کنیم، شاید تصور کنیم که او آن شاهکار مرمری را ذره‌ذره ساخته است — هر کدام از انگشتان، بینی، پیشانی، و ردای بلند مجسمه را یکایک به آن اضافه کرده است. ولی در نظر داشته باشید که او کار را با یک بلوک خیلی بزرگ سنگ مرمر شروع کرده است. پس آفرینش او با جدا کردن تکه‌های سنگ ایجاد شده، نه با افزودن چیزی به آن. شاهکارهای او در گرو کشف کردن چیزی بود که از قبل در درون سنگ موجود بود.

مغز هم در مقیاس زمانی بلندتر از همین اصل بهره می‌گیرد. در واقع، نورون‌ها هم تمام عمر مدام در پی یافتن جای مناسب برای خود هستند. اول استمراج

می‌کنند. اگر پاسخ خوبی دریافت کردند، با قدرت ادامه می‌دهند. اگر بی‌محلی دیدند، شانس‌شان را با نورون‌های دیگر امتحان می‌کنند. سرانجام اگر هیچ بازخورد مثبتی دریافت نکردند، حالی‌شان می‌شود که اینجا جای آن‌ها نیست. سلول‌ها به دو طریق می‌میرند. اگر مواد مغذی کافی به آن‌ها نرسد (مثلاً) مسدود شدن شریان که موجب می‌شود بافت از خون‌رسانی محروم شود)، سلول‌ها به طرز شلخته‌ای می‌میرند، به این معنا که مواد شیمیایی التهابی به بیرون نشت می‌کند و موجب آسیب در ناحیه‌ی اطراف می‌شود. به این حالت نکروز می‌گویند. ولی راه دوم مرگ سلول‌ها از طریق آپوپتوز است، که در آن سلول به‌طور تمیزی خودکشی می‌کند. سلول به اختیار خود کارش را تعطیل می‌کند، به اموراتش رسیدگی می‌کند، و خودش را سربه‌نیست می‌کند. مرگ سلولی از طریق آپوپتوز چیز بدی نیست. در واقع، موتوری است که دستگاه عصبی را شکل می‌دهد. در فرایند تکوین رویانی، مسیری که دست پرده‌دار را به انگشتان جدا از هم تبدیل می‌کند، شامل حذف کردن سلول‌ها است، نه اضافه کردن آن‌ها. همین اصل برای شکل‌دهی مغز نیز استفاده می‌شود. در طول تکوین، ۵۰ درصد بیش از حد نیاز نورون تولید می‌شود. مرگ گسترده‌ی سلولی یکی از مراحل استاندارد کار به شمار می‌رود.

آیا سرطان حاصل یاغی شدن فرایند شکل‌پذیری است؟

من فکر می‌کنم مطالعاتی که در زمینه‌ی سرطان انجام می‌شود، در نهایت، با مطالعات ما در زمینه‌ی شکل‌پذیری هم‌پوشانی خواهد کرد. یک تصویر کاریکاتوری از سرطان به‌صورت زیر است: یک سلول دچار جهشی می‌شود که موجب می‌شود پشت سر هم تقسیم شود. از آنجا که تکثیر سلول از کنترل خارج شده، تومور ایجاد می‌شود و سلامت بقیه‌ی سیستم را مختل می‌کند. ولی سرطان واقعی از این پیچیده‌تر است. در یک تومور، میلیاردها سلول برای بقا با هم رقابت می‌کنند، و سلول‌های تومور ممکن است با یکدیگر کاملاً متفاوت باشند. درست مانند مغز، این سلول‌ها هم همیشه برای بقا در حال رقابت‌اند. مقدار مواد مغذی محدود است، و هر سلول مجبور است برای زنده ماندن خود بجنگد. معمولاً سرطان ناشی از جهشی است که به یک سلول

مزیت کوچکی در این امتحان رقابتی مرگ یا زندگی می‌بخشد.^[۲۲] این مزیت ممکن است کوچک باشد، به‌طوری که به سلول امکان می‌دهد که نسبت به همسایه‌های مجاور اندکی بهتر عمل کند. ولی وقتی که این سلول جهش‌یافته‌ی جدید تکثیر شد، سلول‌های خود آن نیز با یکدیگر می‌جنگند. بنابراین، ممکن است جهش‌های دیگری نیز صورت پذیرد، و مزیت ایجاد کند، به‌طوری که برخی از سلول‌های نسل بعدی نسبت به رقبا عملکرد بهتری داشته باشند. این‌ها همچنان به جنگیدن و تکامل یافتن ادامه می‌دهند، و تبدیل به جنگنده‌های بهتری می‌شوند، و نهایتاً تومور میزبان را از پا درمی‌آورد.

حالا برگردیم به مغز و بدن. ما موجوداتی با قابلیت مدارسازی پویا هستیم. نورون‌های مغز (و به‌طور کلی، تمام سلول‌های بدن) همواره درگیر نبرد برای بقا هستند، و گاه این تب رقابت ماهیتی مرضی به خود می‌گیرد. برخی جهش‌ها ممکن است مزیت کوچکی در این محیط به یک سلول بدهند — ولی مزیتی که به قیمت فرستادن تمام سیستم به گرداب مرگ تمام می‌شود.

پیشنهاد من این است که ارگانیسم‌های چندسلولی کانون تکاملی خود را در لبه‌ی پرتگاه آشوب پیدا کرده‌اند، و تلاش می‌کنند بین رقابتی که نتیجه‌ی مفیدی ایجاد می‌کند و رقابتی که به قدری شدید است که منجر به مرگ سیستم می‌شود، تعادل برقرار کنند. از دیدگاه من، این یک راه برای تفسیر میزان بروز بسیار بالای سرطان در جانوران است. مثلاً اکثر پستانداران تا پایان عمر ۳۰ درصد شانس گرفتار شدن به سرطان دارند. به نظر می‌رسد که سیستم بدن این موجودات به آسانی گرفتار این وضعیت می‌شود.

در سیستمی که تار و پود آن با رقابت عجین شده است، یک مزیت اندک می‌تواند نتایج فاجعه‌باری در بر داشته باشد. می‌تواند رقابت را برای جهش تشدید کند. سیستمی که تمام قطعات آن با هم کنار می‌آیند، قاعدتاً گرفتار سرطان‌های مبتنی بر جهش‌های متعدد نخواهد شد؛ زیرا نیازی به آن نخواهد داشت.

نجات جنگل مغزی

در این فصل دیدیم که قواعد ساده‌ی رقابت بر سر قلمرو به مغز امکان می‌دهد که نقشه‌هایی را کدگذاری کند که می‌توانند کش بیابند یا فشرده شوند. آلیس

را دیدیم که بدون یک نیمکره‌ی مغز به دنیا آمده بود، و ماتیو را نیز به خاطر آوردیم که یکی از نیمکره‌های مغزش برداشته شده بود. مغز هر دوی آن‌ها سیم‌کشی مجدد شده بود، به‌طوری که اطلاعات هر دو میدان بینایی به تنها نیمکره‌ی مغزی باقی‌مانده انتقال داده می‌شد. این کار از طریق رقابت در سطح سیناپس‌ها و نورون‌ها امکان‌پذیر می‌شود، به این صورت که اتصالات موجود به سرعت نقاب‌برداری می‌شود و با گذشت زمان، آکسون‌های جدیدی رشد کرده و سیناپس‌های جدیدی جوانه می‌زنند. در تمام مدت، تمایل آلیس و ماتیو برای راه رفتن، گرگم به هوا بازی کردن، و دوچرخه سوار شدن موجب ایجاد سیگنال‌های اهمیت می‌شد که مغز می‌توانست خود را براساس آن بازآرایی کند. پیچیدگی چیزهایی که در یک جنگل بارانی یافت می‌شود، من را به یاد پیچیدگی اجزای تشکیل‌دهنده‌ی جنگل مغزی می‌اندازد. ما معمولاً تصور می‌کنیم که هشتاد و شش میلیارد نورون ما مانند درخت‌ها و بوته‌هایی هستند که خوب با هم کنار می‌آیند. ولی نکند نورون‌های ما هم مانند اعضای **جنگلی** هستند که مدام برای زنده ماندن با هم در رقابت‌اند؟ درخت‌ها و بوته‌ها راهبردهای بی‌شماری را به کار می‌گیرند تا بلندتر یا پهن‌تر شوند و یا به هر طریقی از دیگران جلو بزنند، چرا که همگی آن‌ها در پی برخورداری بیشتر از نور آفتاب هستند. آن‌ها بدون نور می‌میرند. فاکتورهای نوروتروفیک که دیدیم، مانند نور آفتاب برای نورون‌ها هستند، شاید روزی بتوانیم راهبردهای نورون‌ها و ترفندهای آن‌ها برای رقابت با یکدیگر را بفهمیم.

همان گونه که قبلاً تأکید شد، تمام آنچه در این فصل دیدیم، اساساً با نحوه‌ی ساخت فناوری‌های کنونی ما متفاوت است. مهندسان به کارایی، نیاز حداقلی، و تمیز بودن اختراعات خود می‌بالند. این تعهد آن‌ها به پاکیزگی موجب سیم‌کشی هرچه کمتر می‌شود. ولی از طرف دیگر سبب می‌شود که نتوانند به تعادل بر لبه‌ی آشوب دست یابند، آماده‌ی رخداد‌های غیرمنتظره باشند، و تغییرات را به سرعت در سیستم اعمال کنند.

حالا که این عناصر سر جای خود قرار گرفت، آماده‌ایم که به سراغ پرسشی برویم که همواره در ذهن‌مان مطرح بوده است: چرا مغز بچه‌ها شکل‌پذیری بسیار بیشتری نسبت به مغز بزرگسالان دارد؟

چرا یاد دادن ترفند جدید به سگ‌های پیر سخت‌تر است؟

متولد شده به عنوان بسیار

در دهه‌ی ۱۹۷۰، هانس-لوکاس تویبر از روان‌شناسان مؤسسه‌ی فناوری ماساچوست کنجکاو شد بداند که بر سر سربازان جنگ جهانی دوم که تقریباً سی سال قبل دچار ضربه‌ی مغزی شده بودند، چه آمده است. او ۵۲۰ نفر را که در اثنای نبرد دچار آسیب مغزی شده بودند، پیدا کرد. برخی از آن‌ها به خوبی بهبود یافته بودند؛ برخی دیگر نتایج ضعیف‌تری را تجربه کرده بودند. تویبر با بررسی مدارک فهمید که چه متغیری بیشترین اهمیت را دارد: هرچه سرباز در زمان آسیب دیدن جوان‌تر بود، حالا وضعیت بهتری داشت؛ هرچه سرباز مسن‌تر بود، آسیب دائمی‌تر بود.^[۱]

مغز جوان مانند کره‌ی زمین در پنج هزار سال قبل است: رویدادهای مختلف می‌تواند مرزها را در جهات گوناگون جابه‌جا کند. ولی امروزه، پس از تاریخی چند هزارساله، نقشه‌ی کشورها در جهان تثبیت شده است. اکنون که انسان‌ها چندین قرن با شمشیر و تفنگ از سرزمین‌های خود دفاع کرده‌اند، مرزهای کشورها به سختی تغییر می‌کنند. به جای مهاجمان غارتگر و فاتحان اسب‌سوار، سازمان ملل و قوانین درگیری بین‌المللی قرار گرفته است. اقتصاد کشورها بیش از پیش به جای گنجینه‌هایی که امکان غارت آن‌ها وجود دارد، به اطلاعات و تخصص وابسته شده است. به علاوه، سلاح‌های هسته‌ای، به راه انداختن جنگ را خطرناک‌تر کرده‌اند. بنابراین، حتی در صورت مشاجرات تجاری و بحث‌های

مهاجرتی، بعید است مرز بین کشورها تغییر کند. کشورها در جای خود مستقر شده‌اند. در ابتدا، امکان جابه‌جایی زیادی در مرز بین سرزمین‌ها در خشکی‌های روی زمین وجود داشت، ولی با گذشت زمان این امکان کمتر شده است.

مغز هم مانند زمین به بلوغ می‌رسد. نقشه‌های عصبی پس از چندین سال منازعات مرزی بیش از پیش تثبیت می‌شود. در نتیجه، آسیب مغزی برای سالمندان بسیار خطرناک است، در حالی که برای جوانان خطر کمتری دارد. مغز مسن‌تر به آسانی نمی‌تواند قلمروهای تخصیص یافته را به کار دیگری اختصاص دهد، در حالی که مغزی که در ابتدای جنگ‌های خود است، هنوز می‌تواند نقشه‌ها را تغییر دهد.

دوباره برمی‌گردیم به سراغ هایاتوی کوچولو و ویلیام کوچولو. آن‌ها وقتی که متولد می‌شوند، می‌توانند تمام صداها و زبان‌های انسانی را بفهمند. تازه بیشتر از آن هم از دست‌شان ساخته است: می‌توانند جزئیات ظریف فرهنگ خود را بفهمند، باورهای مذهبی را جذب کنند، و قواعد تعامل اجتماعی را یاد بگیرند. یاد می‌گیرند که چگونه مقادیر عظیم اطلاعات جمع‌آوری کنند، و بسته به نسلی که در آن هستند، این کار را با باز کردن طومار، ورق زدن کتاب، و یا لمس کردن نمایشگر یک دستگاه مستطیلی کوچک انجام می‌دهند.

ولی وقتی که بزرگ می‌شوند، داستان تا حدودی تغییر می‌کند. هایاتو به حزب سیاسی خاصی تعلق دارد، و بعید است تغییر کند. ویلیام پیانو را خیلی خوب می‌نوازد، ولی علاقه‌ی خاصی به مطالعه‌ی ویولن یا آلات موسیقی دیگر ندارد. هایاتو به آشپزی علاقه‌مند است و تمام غذاهایی که **می‌پزد**، شامل ترکیبات مختلفی از چهارده افزودنی است که به آن‌ها عادت دارد. ویلیام وقت خود را در اینترنت با چند وب‌سایت محدود از میان میلیاردها وب‌سایت موجود می‌گذراند. هایاتو خیلی خوب گلف بازی می‌کند، ولی علاقه‌ای به ورزش‌های دیگر ندارد. ویلیام در شهری با هشت میلیون نفر جمعیت زندگی می‌کند، ولی فقط سه دوست نزدیک دارد. هایاتو غیر از آنچه در مدرسه یاد گرفته، علاقه‌ی خاصی به علم ندارد. در فروشگاه، ویلیام از مقابل قفسه‌های لباس عبور می‌کند، تا آنکه به همان نوع پیراهنی که می‌پوشد، می‌رسد، و دو تا پیراهن با رنگ‌های استاندارد انتخاب می‌کند. نحوه‌ی آرایش موهای هایاتو از زمانی که هشت ساله

بوده، تغییری نکرده است.

از این مسیرهای زندگی، یک نکته‌ی عمومی آشکار می‌شود: بچه‌های انسان با مهارت‌های ذاتی اندک و شکل‌پذیری زیادی متولد می‌شوند، در حالی که بزرگسالان مهارت‌های خاصی را به دست آورده‌اند، و در عوض، انعطاف‌پذیری آن‌ها کاهش یافته است. بین سازگارپذیری و کارایی بده‌بستان وجود دارد: هرچه مغز در کارهای خاصی بهتر شود، کمتر می‌تواند به کارهای دیگری بپردازد.

در فصل ۶ داستان نوازنده‌ی ویولن اسحاق پرلمان را نقل کردیم، که یکی از هواداران به او گفت حاضر است عمرش را بدهد تا مثل او بنوازد، و پرلمان پاسخ داد: «من هم عمرم را داده‌ام.» منظور پرلمان یکی از واقعیت‌های زندگی بود: برای اینکه در یک کار مهارت پیدا کنید، باید در را به روی کارهای دیگر ببندید. از آنجا که شما یک عمر بیشتر ندارید، کاری که عمرتان را به آن اختصاص می‌دهید، شما را به راه خاصی می‌کشاند، و مسیرهای دیگر برای همیشه پیموده نشده باقی می‌ماند. از این رو است که من این کتاب را با نقل‌قولی از مارتین هایدگر فیلسوف آغاز کردم: «هر کسی به‌عنوان چند آدم به دنیا می‌آید و یک آدم از دنیا می‌رود.»

از دیدگاه شبکه‌های عصبی شما، فرو رفتن به الگو و عادت چه معنایی دارد؟ دو شهر را در نظر بگیرید که به فاصله‌ی چند کیلومتر از یکدیگر قرار گرفته‌اند. افرادی که به مسافرت تفریحی از یک شهر به شهر دیگر علاقه‌مندند، هر مسیر ممکن را دنبال می‌کنند: برخی از مسافران از مسیر خوش‌منظره‌ای در امتداد ستیغ کوه‌ها سفر می‌کنند، برخی دیگر سایه‌ی صخره‌ها را ترجیح می‌دهند، گروهی از روی سنگ‌های لغزنده‌ی کنار رودخانه سفر می‌کنند، و گروهی هم مسیر وسط جنگل را برمی‌گزینند که پرخطرتر ولی سریع‌تر است. با گذشت زمان و کسب تجربه‌ی بیشتر، یکی از مسیرها طرفداران بیشتری پیدا می‌کند. نهایتاً آن مسیر به علت راه رفتن زیاد مردم، هموارتر می‌شود و به‌تدریج تبدیل به مسیر استاندارد می‌شود. پس از چند سال، دولت محلی جاده‌ای در آنجا احداث می‌کند. پس از چند دهه، آن جاده تبدیل به بزرگراه می‌شود. جایی که زمانی یکی از گزینه‌های متعدد بود، به استاندارد بدل می‌شود.

مغز هم به همین صورت با مسیرهای ممکن متعدد از میان شبکه‌های عصبی

شروع می‌کند؛ با گذشت زمان، شرایط به‌گونه‌ای می‌شود که خارج شدن از مسیرهای تمرین‌شده دشوار می‌شود. مسیرهای استفاده‌نشده باریک‌تر می‌شود. نورون‌هایی که در کار خود موفق نمی‌شوند، نهایتاً کارشان را تعطیل می‌کنند و دست به خودکشی می‌زنند. مغز پس از ده‌ها سال تجربه، به‌طور فیزیکی نمایانگر محیط خود است، و تصمیمات شما تابع مسیرهای پیموده‌شده‌ی باقی‌مانده است. فایده‌ی این کار آن است که نهایتاً می‌توانید مسائل را با سرعت برق حل کنید. عیبش آن است که حمله کردن به مسائل با زیرکیِ خودسر و بی‌ساختار، مشکل است.

غیر از کاهش یافتن گزینه‌های انتخاب مسیر، پایین بودن انعطاف‌پذیری مغزهای مسن دلیل دیگری هم دارد: این مغزها وقتی تغییر می‌کنند، فقط در نقطه‌های کوچکی تغییر می‌کنند. برعکس، مغز بچه‌ها در نواحی وسیعی تغییر می‌کند. شیرخواران با استفاده از سیستم‌های انتشار از قبیل استیل‌کلین، اعلام‌های خود را به سرتاسر مغز انتقال می‌دهند، و امکان تغییر یافتن مسیرها و اتصالات را فراهم می‌کنند. مغز آن‌ها همه‌جا تغییرپذیر است، و کم‌کم مانند یک عکس فوری فوکوس می‌شود. مغز بزرگسالان هر بار فقط مقدار کمی تغییر می‌کند. مغز آن‌ها اکثر اتصالات خود را ثابت نگه می‌دارد، تا بتواند آنچه را یاد گرفته، حفظ کند، و فقط نواحی کوچکی از طریق میانجی‌های عصبی مناسب که مانند یک قفل رمزی عمل می‌کنند، انعطاف‌پذیر می‌شود.^[۲] مغز بزرگسال مانند یک هنرمند سبک نقطه‌چینی است که در تابلویی که تقریباً به اتمام رسیده، تنها رنگ تعداد کمی از نقاط را تغییر می‌دهد.

در ضمن، شاید این سؤال برایتان مطرح شود که یک بچه با آن مغز شدیداً انعطاف‌پذیر چه احساسی دارد. البته همه‌ی ما زمانی بچه بوده‌ایم، ولی چیزی یادمان نمی‌آید. پس شکل‌پذیر و بی‌مهار بودن و یاد گرفتن انواع و اقسام رویدادهای جدید چه حسی دارد؟ شاید بتوان گفت که با در نظر گرفتن برخی موقعیت‌های دیگر که در آن آگاهی و شکل‌پذیری شما با تمام قوا در کار است، می‌توان تا حدودی آن احساس را درک کرد. وقتی که به سرزمین جدیدی سفر می‌کنید و حواستان جمع است، منظره‌ی کشور بیگانه را به دقت سیر می‌کنید، چیزهای جدید بیشتری را تجربه می‌کنید، بیشتر یاد می‌گیرید، و

به محدوده‌ی وسیع‌تری توجه می‌کنید. در واقع، در کشور خودتان توجه زیادی به چیزی نمی‌کردید؛ همه چیز بسیار قابل پیش‌بینی بود. وقتی که سفر می‌کنید، هوشیاری‌تان لبریز می‌شود. با این دیدگاه، وقتی دقت و توجه زیادی می‌کنیم، دوباره مثل دوران بچگی هستیم.^[۲]

تفاوت‌های بین یک بچه و بزرگسال را به آسانی می‌توان دید، ولی گذار عصبی از کودکی به بزرگسالی به صورت خط همواری اتفاق نمی‌افتد. بلکه مانند دری است که بسته می‌شود. وقتی که بسته شد، دیگر دوران تغییرات بزرگ به سر رسیده است.

دوره‌ی حساس

ماتیو را در نظر بگیرید، کودکی که در ابتدای کتاب داستان‌ش را بازگو کردیم که نیمی از مغزش را با عمل جراحی برداشتند. این نوع جراحی رادیکال، که به آن نیمکره‌برداری می‌گویند، عموماً فقط در صورتی توصیه می‌شود که بیمار کمتر از هشت سال سن داشته باشد. ماتیو زمانی که زیر تیغ جراحی رفت، شش ساله بود — یعنی داشت به حد سنی نهایی این عمل نزدیک می‌شد. اگر یک کودک مسن‌تر باشد (مثلاً نوجوان باشد)، مجبور است که کارهای زندگی‌اش را با مغزش هماهنگ سازد، به جای اینکه انتظار داشته باشد که مغزش با آن وظایف سازگار شود.^[۳]

بسته شدن در را با تغییرات ظریف‌تری نیز می‌توان در مغز مشاهده کرد. نمونه‌ی آن دانیل است، همان دختر مورد غفلت قرار گرفته‌ای که در خانه‌ای در فلوریدا پیدا شد. او را در تمام دوران کودکی‌اش در اتاق کوچکی محبوس کرده بودند — بدون آنکه با کسی حرف بزند یا از کسی محبت ببیند — و کارش به جایی رسیده بود که قادر به حرف زدن، دید دور، و تعامل عادی با انسان‌ها نبود. آینده‌ی دانیل از نظر بهبودی چندان خوب نیست، و علت آن هم عمدتاً یک چیز است، و آن اینکه او را دیر پیدا کردند. زمانی که پلیس او را پیدا کرد، نقشه‌های عصبی او عمدتاً تثبیت شده بود.

ماتیو و دانیل هر دو داستان یکسانی را بازگو می‌کنند: مغز در ابتدای زندگی، در دوره‌ای که به آن دوره‌ی حساس می‌گویند، بیشترین انعطاف‌پذیری را دارد.

^[۵] وقتی که این دوره سپری شد، تغییر دادن جغرافیای عصبی دشوارتر می‌شود. همان طور که در مورد دانیل دیدیم، مغز بچه باید در طول دوره‌ی حساس، مطالب گفتاری زیادی را بشنود. بدون این ورودی، نوروها هرگز به گونه‌ای آرایش پیدا نمی‌کنند که مفاهیم بنیادی زبان را درک کنند. شاید پرسید که تکلیف یک بچه‌ی ناشنوا که اصلاً ورودی شنوایی ندارد، چه می‌شود؟ پاسخ این است که اگر والدین زبان اشاره را به بچه آموزش دهند، مغز او مدارهای لازم برای ارتباط را تشکیل خواهد داد. به علاوه، بچه‌ی ناشنوا به جای بابا و دادا کردن، دست‌هایش را تکان می‌دهد، که چیزی شبیه زبان اشاره است — به همان طریق که بچه‌ی شنوا که در معرض گفتار قرار می‌گیرد، با تارهای صوتی‌اش صدا درمی‌آورد.^[۶] اگر ورودی وجود داشته باشد، بچه این کار را خواهد کرد، به شرط اینکه ورودی در دوره‌ی حساس به او برسد. پس از آن دوره، در بسته می‌شود، و دیگر برای یاد گرفتن مبانی ارتباط دیر شده است.

بنابراین، برای یاد گرفتن ارتباط، و نیز برای جنبه‌های ظریف‌تر زبان مانند لهجه، پنجره‌ی زمانی خاصی وجود دارد.^[۷] بازیگر معروف میلا کونیس انگلیسی آمریکایی را بدون لهجه‌ی خارجی صحبت می‌کند، به طوری که اکثر افراد نمی‌دانند که او در اوکراین متولد شده و تا سن هفت‌سالگی در همان جا زندگی کرده، بدون آنکه یک کلمه انگلیسی بلد باشد. برعکس، آرنولد شوارتزنگر که از اوایل دهه‌ی بیست‌سالگی عمر خود با هالیوود و فیلم‌سازی آمریکایی در ارتباط بوده، انگلیسی را با لهجه‌ای اتریشی صحبت می‌کند که هرگز نتوانسته آن را درست کند. از نظر مغزی، او انگلیسی حرف زدن را خیلی دیر شروع کرده است. به طور کلی، اگر شما در هفت سال اول عمر به کشور جدیدی بروید، تسلط شما بر زبان جدید مانند یک فرد بومی خواهد بود، زیرا پنجره‌ی حساسیت شما برای کسب صداهای زبان هنوز باز است. اگر در هشت تا ده‌سالگی مهاجرت کنید، یاد گرفتن زبان در حد افراد بومی برایتان مشکل‌تر خواهد بود، ولی تقریباً نزدیک خواهید بود. اگر مانند آرنولد بعد از سال‌های نوجوانی نقل مکان کنید، احتمالاً تسلط شما بر زبان جدید همچنان پایین خواهد بود، و همیشه لهجه‌ای خواهید داشت که سابقه‌ی شما را برملا خواهد کرد. توانایی شما برای ممزوج شدن صوتی با فرهنگ جدید، دری است که فقط به

مدت حدود یک دهه باز می‌ماند.

قبلاً دیدیم که چگونه می‌توانیم اصول رقابت را برای کمک به کودکی که با انحراف چشم به دنیا آمده است، به خدمت بگیریم: چشم سالم را مدتی ببندید، تا چشم ضعیف فرصت پیدا کند که بجنگد و قلمرو از دست رفته‌اش را بازپس گیرد. ولی دقت کنید که چشم سالم باید در طول دوره‌ی حساس — یعنی حدوداً شش سال اول عمر — بسته شود، در غیر این صورت، دیگر دیر شده است: بینایی دیگر هرگز قابل بازیابی نخواهد بود.^[۹] پس از شش سال، جاده‌های خاکی مغز دیگر آسفالت شده و به بزرگراه تبدیل شده است، به‌طوری که دیگر نمی‌توان آن را تغییر داد.

همین نکات درباره‌ی نابینایی هم مصداق دارد. همان گونه که پیش‌تر دیدیم، میزان تصرف قشر بینایی در افرادی که نابینا به دنیا می‌آیند، بیشترین میزان را دارد، و در کسانی که در اوایل کودکی نابینا می‌شوند، کمتر از آن است، و در کسانی که در مراحل بعدی زندگی کور می‌شوند، از همه کمتر است. مغز با تغییرات ورودی که در مراحل اولیه بروز می‌کند، راحت‌تر مواجه می‌شود تا با تغییرات در مراحل بعدی. این اصل را از دیدگاه عملکرد نیز می‌توان درک کرد. هرچه میزان بیشتری از قشر بینایی تصرف شود، فرد بهتر می‌تواند لیست کلمات را به خاطر بسپارد، چون بخشی از جایی که قبلاً قشر بینایی بود، حالا برای وظایف حافظه به کار گرفته شده است.^[۱۰] همان طور که انتظار می‌رود، این منفعت حافظه در کسانی که کور به دنیا می‌آیند، بیشترین میزان را دارد. دومین سطح عملکرد مربوط به کسی است که در سنین پایین نابینا می‌شوند، و در کسانی که در مراحل بعدی عمر نابینا می‌شوند، میزان بهبود از نظر حفظ کردن کمتر است یا اصلاً دیده نمی‌شود.^[۱۰-۱] پس زمان خیلی مهم است.

این نوع آگاهی برای جراحان در انتخاب نوع عمل اهمیت زیادی دارد. جراحی برای اصلاح انسداد چشم‌ها بسته به سن بیمار می‌تواند پیامدهای بسیار متفاوتی داشته باشد: یک شخص جوان ممکن است به سرعت تجربه‌ی بینایی را دوباره به دست آورد؛ اما در مورد یک شخص مسن معمولاً این گونه نیست. در واقع، در افرادی که مدت زیادی نابینا بوده‌اند، متصل کردن مجدد داده‌های بصری به قشر پس‌سری ممکن است حتی سیستم پایدار مربوط به لمس و

شنوایی را هم مختل سازد.^[۱۱]

حالا برگردیم به آزمایشی که در آن اعصاب بینایی یک راسوی اهلی تغییر مسیر داده شد تا به قشر شنوایی متصل شود. گرچه اطلاعات بینایی وارد ناحیه‌ی نامعمولی می‌شد، ولی قشر توانست بفهمد که داده‌ها را چگونه باید تحلیل کند. با این حال، دقت کنید که تحول قشر شنوایی کامل نبود: در نهایت، مدارهای آن نسبت به قشر بینایی نامنظم‌تر بود، به این معنا که شاید قشر شنوایی ذاتاً برای ورودی نسبتاً متفاوتی بهینه‌سازی شده است.^[۱۲] این شاید بدان معنا باشد که در مقابل ظرفیت قشر برای تغییر، لااقل تا حدودی هم برنامه‌ریزی قبلی ژنتیکی وجود دارد. ولی البته به این معنا هم می‌تواند باشد که در زمانی که دستکاری آزمایشی صورت گرفته است، قشر شنوایی از قبل فرصت آن را داشته که آماری از صداهای اطراف خود بگیرد. اگر الیاف بینایی از نخستین لحظات تکوین متصل می‌شد (مثلاً در داخل رحم، که البته در حال حاضر از نظر تجربی امکان آن وجود ندارد)، امکان داشت که تبدیل به صورت کامل انجام می‌شد.

تأثیر زمان‌بندی تکوین در تمام حواس دیده می‌شود. اگر یادتان باشد، وقتی انگشتی از بین می‌رود یا فرد یک آلت موسیقی جدید را یاد می‌گیرد، نقشه‌های بدن با آن هماهنگ می‌شود. ولی در مجموع، این تغییر در مغز افراد جوان بیشتر اتفاق می‌افتد تا در مغز افراد مسن‌تر. درست مانند میلا کونیس که بدون لهجه صحبت می‌کند، اسحاق پرلمان هم فراگیری ویولن را از سن پایینی آغاز کرد. اگر شما مثلاً یادگیری ویولن را از سنین نوجوانی آغاز کنید، امکان ندارد که زمانی به پای پرلمان برسید. حتی اگر هم خیلی تلاش کنید و از نظر ساعت صرف شده، همان قدر تمرین کنید، باز هم به هر حال، مغزتان از قبل عقب افتاده است: در زمانی که اولین زخمه را در نوجوانی می‌نوازید، مغزتان دیگر زیادی سفت شده است.

یاد گرفتن بینایی و زبان و مهارت نواختن ویولن وابسته به دریافت ورودی از جهان است، و اگر کودکی مانند دانیل این ورودی‌ها را دریافت نکند، بعداً دیگر نمی‌تواند یاد بگیرد. توانایی یاد گرفتن زبان، به دست آوردن بینایی، تعامل اجتماعی، راه رفتن طبیعی، و داشتن **رشد** عصبی نرمال محدود به سال‌های اوایل کودکی است. پس از زمان معینی، این قابلیت‌ها از دست می‌رود. مغز

باید در دوره‌ی زمانی مناسب، ورودی‌های مناسب را تجربه کند تا مفیدترین اتصالات در آن ایجاد شود.

یکی از نتایج این کاهش انعطاف‌پذیری آن است که رویدادهای دوران کودکی تأثیر بسیار زیادی بر ما دارد. به عنوان نمونه‌ای جالب، همبستگی بلندی قد یک مرد و حقوق او را در نظر بگیرید. در آمریکا، هر یک اینچ قد اضافه با ۱/۸ درصد افزایش حقوق همراه است. علت آن چیست؟ تصور عمومی بر آن است که این از تبعیض در روش‌های استخدامی سرچشمه می‌گیرد: همه دوست دارند مردان قدبلند را که ابهت بیشتری دارند، استخدام کنند. ولی از قضا این مسئله علت عمیق‌تری دارد. بهترین نشانگر درآمد آینده‌ی یک مرد، قد او در سن شانزده سالگی است.^[۱۳] از این چه برداشتی می‌کنیم؟ آیا ممکن است به تفاوت‌های تغذیه‌ای بین افراد مربوط باشد؟ خیر: وقتی که پژوهشگران همبستگی با قد را در سنین هفت و یازده سالگی بررسی کردند، تأثیر آن چندان قوی نبود. بلکه سال‌های نوجوانی زمانی است که موقعیت اجتماعی فرد شکل می‌گیرد، و در نتیجه، اینکه یک فرد در آینده چکاره می‌شود، تا حد زیادی بستگی به وضعیت او در این سنین دارد. در واقع، مطالعاتی که هزاران کودک را تا دوران بزرگسالی پیگیری کرده‌اند، نشان داده‌اند که مشاغل که جنبه‌ی اجتماعی دارد، از قبیل فروشنده‌گی یا مدیریت کارکنان، قوی‌ترین همبستگی را با قد دوران نوجوانی دارد. برخی دیگر از مشاغل، مانند کارگری یا پیشه‌های هنری، کمتر تحت تأثیر آن قرار دارد. اینکه افراد طی سنین شکل‌گیری چه رفتاری با شما دارند، تأثیر بسیار زیادی بر وضعیت بعدی شما در زندگی از نظر عزت نفس، اعتماد به نفس، و قدرت رهبری دارد.

مثلاً اپرا وینفری که یک ستاره‌ی مشهور تلویزیونی است، ۲/۷ میلیارد دلار پول دارد — پس شاید کمی عجیب باشد که بدانید که طبق گزارش‌ها، او ترس عمیقی از بی‌خانمان شدن و بی‌پول شدن دارد. ولی این به خاطر مسیری است که او در زندگی پیموده است. او قبل از آنکه امپراتور رسانه‌ای شود، کودک فقیری در منطقه‌ی می‌سی‌سی‌پی بود که از مادر ازدواج‌نکرده‌ی نوجوانی متولد شده بود. به قول ارسطو که دو هزار و چهارصد سال پیش گفته است: «عادت‌هایی که در کودکی کسب می‌کنیم، تأثیر کمی ندارد، بلکه تأثیر **کاملی دارد**.»



برای بیان مفهوم دوره‌ی حساس، من از تشبیه بسته شدن در استفاده کردم. ولی حالا آماده‌ایم که این تشبیه را به سطح بالاتری ببریم. در واقع، فقط یک در نیست، بلکه درهای زیادی در کار است.

هر دری با سرعت متفاوتی بسته می‌شود

مغز در روزهای اول به قدری تأثیرپذیر است که بعضی وقت‌ها حتی ممکن است به درِ درِ بیفتد. مثلاً جوجه‌ی غاز سر از تخم درمی‌آورد و با اولین موجود زنده‌ای که می‌بیند، علاقه‌ی مادری برقرار می‌کند. این راهبرد در اکثر موارد مناسب است — چون معمولاً اولین چیزی که می‌بیند، مادرش است — ولی بعضی وقت‌ها هم شرایط به گونه‌ای است که گول می‌خورد. در دهه‌ی ۱۹۳۰، کُنراد لورنِز جانورشناس، برای اینکه غازها را به خودش علاقه‌مند کند، مجبور نبود زحمت زیادی بکشد؛ بلکه کافی بود در دوره‌ی شکل‌پذیری خاصی پس از آنکه سر از تخم درآوردند، در کنار آن‌ها ظاهر شود، و آن‌ها به او علاقه‌مند می‌شدند و دنبال او راه می‌افتادند.

علاقه‌مند شدن غاز به مادر دری است که زود بسته می‌شود. ولی در عین حال، غازها در مراحل بعدی زندگی نیز می‌توانند چیزهای دیگری یاد بگیرند، مثلاً محل قرار گرفتن رودخانه، محلی که می‌توانند غذا پیدا کنند، و هویت غازهای دیگری که در بزرگسالی با آن‌ها مواجه می‌شوند.

دوره‌ی حساس برای هر کدام از وظایف مختلف مغز متفاوت است. شکل‌پذیری تمام نواحی مغز از حیث اینکه در ابتدا چقدر انعطاف‌پذیر هستند و این قابلیت سازگاری را تا چه مدت حفظ می‌کنند، متغیر است.

آیا الگویی وجود دارد که مشخص کند کدام نواحی اول تثبیت می‌شوند؟ یکی از مطالعات محققان این بود که ببینند پس از آسیب به شبکه‌ی، چه تغییراتی در قشر بینایی بزرگسالان ایجاد می‌شود. آیا نواحی مجاور قشر بینایی بافت بلااستفاده را تصرف می‌کنند، و اگر پاسخ مثبت است، این کار با چه سرعتی انجام می‌شود؟ آن‌ها با کمال تعجب مشاهده کردند که هیچ‌گونه تغییر قابل اندازه‌گیری در قشر بینایی اتفاق نیفتاده است. بخشی از قشر که غیرفعال بود،

همچنان غیرفعال باقی مانده بود: نواحی مجاور به آن دست اندازی نکردند.^[۱۴] با توجه به مطالعاتی که قبلاً در زمینه‌ی شکل‌پذیری انجام شده بود، این جواب کمی غیرمنتظره بود. هرچه باشد، انعطاف‌پذیری زیادی در نواحی حسی‌پیکری و حرکتی بزرگسالان وجود دارد، به‌طوری که حتی در سال‌های بعدی زندگی هم می‌توانید کایت‌سواری و اسنوبوردسواری را یاد بگیرید.^[۱۵]



کنراد لورنز و غازهای تأثیرپذیرش.

پس چه تفاوتی بین مطالعات بینایی با مطالعات مربوط به بدن وجود دارد؟ چرا الگوهای قشر اولیه‌ی بینایی پس از مدت زمان کوتاهی در حد چند سال تثبیت می‌شود، ولی قشر حسی‌پیکری و حرکتی همچنان به یادگیری ادامه می‌دهد؟ چرا یک کودک هشت‌ساله که انحراف چشم دارد، یکی از چشم‌هایش به‌طور غیرقابل اصلاح نابینا می‌شود، در حالی که یک فرد پنجاه‌ساله‌ی فلج می‌تواند کنترل کردن یک بازوی روباتیک را یاد بگیرد؟

برنامه‌ی زمانی شکل‌پذیری در نواحی مختلف مغز متفاوت است. برخی شبکه‌های عصبی انعطاف‌پذیری کمتری دارند، در حالی که برخی دیگر بسیار انعطاف‌پذیرند؛ در برخی جاها دوره‌ی حساسیت کوتاه است، و در برخی جاها طولانی.

آیا این تنوع از یک اصل کلی پیروی می‌کند؟ یک احتمال آن است که

متفاوت بودن دوره‌ی حساسیت بستگی به راهبردهای مختلف یادگیری در نواحی مختلف دارد.^[۱۶] در این دیدگاه، برخی نواحی به گونه‌ای هستند که در تمام عمر امکان یادگیری دارند، در حالی که برخی دیگر جزئیات قابل تغییر جهان را کدگذاری می‌کنند. مثلاً حفظ کردن کلمات فرهنگ لغت، یاد گرفتن مسیرهای جدید، یا بازشناسی بصری چهره‌ی افراد را در نظر بگیرید: این‌ها کارهایی هستند که لازم است که فرد انعطاف‌پذیری خود را در آن‌ها حفظ کند. برعکس، برخی نواحی دیگر مغز در روابط پایدار دخالت دارند — از قبیل اجزای تشکیل‌دهنده‌ی بینایی، چگونگی جویدن غذا، یا اصول کلی دستور زبان — و این نواحی باید زودتر بسته شوند.

ولی مغز چگونه از قبل می‌داند که هر چیزی را در چه زمانی تثبیت کند؟ آیا این به صورت ژنتیکی کد شده است؟ احتمالاً برخی از جنبه‌های آن به صورت ژنتیکی کد شده است، ولی من فرضیه‌ی جدیدی را پیشنهاد می‌کنم: میزان شکل‌پذیری یک ناحیه‌ی مغز بستگی به این دارد که داده‌های آن در جهان بیرون چقدر تغییر می‌کند (یا احتمال دارد که تغییر کند). اگر داده‌های ورودی بدون تغییر باشد، سیستم حول آن داده‌ها تثبیت می‌شود. اگر داده‌ها مرتب در حال تغییر باشد، سیستم همچنان انعطاف‌پذیر باقی می‌ماند. در نتیجه، داده‌های پایدار زودتر تثبیت می‌شود.

مثلاً اطلاعات گوش را در مقابل اطلاعات حاصل از بدن در نظر بگیرید. مناطقی که صداهای اساسی محیط را کد می‌کنند — از قبیل قشر اولیه‌ی شنوایی — نسبت به تغییر مقاوم می‌شوند. این نواحی خیلی زود سفت می‌شوند. این همان اتفاقی است که برای ویلیام کوچولو و هایاتو کوچولو افتاد و موجب شد که چشم‌انداز صداهای ممکن در ذهن آن‌ها تثبیت شود. برعکس، نواحی حرکتی و حسی‌پیکری دخیل در حرکت بدن شکل‌پذیری بیشتری را حفظ می‌کنند، زیرا طرح بدن در طول زندگی مرتب تغییر می‌کند: آدم چاق می‌شود، لاغر می‌شود، از پوتین یا دمپایی یا عصای زیر بغل استفاده می‌کند؛ و یا سوار دوچرخه یا اسکوتر یا ترامپولین می‌شود. بدین خاطر است که ویلیام و هایاتو در دوران بزرگسالی می‌توانند در تعطیلات با هم ملاقات کنند و بادسواری یاد بگیرند. گرچه آمار صدا زیاد تغییر نمی‌کند، ولی بازخورد بدن شما از محیط

مرتب در حال تغییر است. در نتیجه، قشر اولیه‌ی شنوایی تثبیت می‌شود، ولی نقشه‌ی بدن زیاد تثبیت نمی‌شود.

اجازه بدهید که روی یکی از حواس، بینایی، تمرکز کنیم. در نواحی بینایی سطح پایین — مانند قشر اولیه‌ی بینایی — نوروها خاصیت‌های پایه‌ی جهان اطراف — از قبیل لبه‌ها، رنگ‌ها، و زاویه‌ها — را کدگذاری می‌کنند. برعکس، نواحی بالاتر قشر بینایی در موارد اختصاصی‌تری دخالت دارند، مانند چیدمان خیابان شما، یا منظره‌ی براق خودرو اسپورت امسال، یا آرایش اپلیکیشن‌ها روی گوشی شما. اطلاعات نواحی سطح پایین زودتر تثبیت می‌شود، و لایه‌های بعدی بر مبنای آن بنیادها مدارسازی می‌شوند. بنابراین، زاویه‌های ممکن قرارگیری خطوط نسبت به یکدیگر در ذهن شما تثبیت شده است، ولی هنوز می‌توانید چهره‌ی یک ستاره‌ی جدید سینما را یاد بگیرید. در این سلسله‌مراتب انعطاف‌پذیری، بازنمایی‌های لایه‌ی پایین اول یاد گرفته می‌شوند؛ این‌ها منعکس‌کننده‌ی آمارهای پایه‌ای جهان بصری هستند، که بعید است تغییر کنند. این بازنمایی‌های سطح پایین همواره پایدار هستند، تا آنکه امکان یادگیری مجموعه‌های مرتبه‌ی بالاتر (که سریع‌تر تغییر می‌کنند) فراهم شود.

به‌طور مشابه، اگر مشغول ساختن یک کتابخانه باشید، اول باید مسائل پایه‌ای را مشخص کنید — محل قرارگیری قفسه‌ها، سیستم دهدهی دیوئی برای طبقه‌بندی کتاب‌ها، و گردش کار برای امانت گرفتن کتاب‌ها. وقتی که این مسائل روشن شد، بعداً به آسانی می‌توانید فهرست کتاب‌های انبار را به‌صورت انعطاف‌پذیری مدیریت کنید، کتاب‌های مهیج‌تر را اضافه کنید، کتاب‌های قدیمی را کم کنید، و مرتب عناوین جدیدی را آزمایش کنید.

بنابراین، در مورد اینکه آیا با افزایش سن مغز شکل‌پذیری خود را حفظ می‌کند یا نه، جواب معینی وجود ندارد. بستگی به این دارد که کدام ناحیه‌ی مغز مورد نظر ما باشد. با افزایش سن شکل‌پذیری کاهش می‌یابد، ولی در هر جای مغز به‌صورت متفاوتی کم می‌شود، و سرعت آن بسته به کارکرد آن ناحیه، ممکن است کمتر یا بیشتر باشد.

این فرضیه که شکل‌پذیری منعکس‌کننده‌ی تغییرپذیری است، در ژنتیک نیز نمونه‌ی مشابهی دارد. گرچه روش آن هنوز به‌طور کامل فهمیده نشده است،

ولی به نظر می‌رسد که ژنوم بخش‌هایی از توالی نوکلئوتیدی خود را محکم‌تر از بخش‌های دیگر قفل می‌کند، و آن را مقابل جهش محافظت می‌کند. برعکس، برخی دیگر از نواحی کروموزوم‌ها تغییرپذیرترند. به‌طور تقریبی می‌توان گفت که تغییرپذیری یک توالی نوکلئوتیدی منعکس‌کننده‌ی تغییرپذیری خصوصیات در جهان بیرون است.^(۱۷) مثلاً ژن‌های رنگ‌دانه‌های پوستی تغییرپذیرند، زیرا انسان‌ها در عرض‌های جغرافیایی مختلفی زندگی می‌کنند، و برای جذب ویتامین D کافی لازم است که رنگ پوست آن‌ها تغییر کند. برعکس، ژن‌های کدکننده‌ی پروتئین‌هایی که قند را تجزیه می‌کنند، پایدار هستند، زیرا قندها یک منبع انرژی مهم و بدون تغییر هستند. به‌طور مشابه، شاید با تحقیقات آینده بتوان «تغییرپذیری» کارکردهای ذهنی، اجتماعی، و رفتاری را در زندگی انسان‌ها اندازه‌گیری کرد، و این فرضیه را آزمایش کرد که انعطاف‌پذیرترین مدارهای مغز منعکس‌کننده‌ی تغییرپذیرترین بخش‌های محیط است.

تداوم تغییر بعد از سالیان دراز

آدم‌های بزرگسال به بچه‌ها غبطه می‌خورند. بچه‌ها توانایی آن را دارند که زبان را با سرعت خارق‌العاده‌ای یاد بگیرند، برای حل مسئله، روش‌های جادویی عجیبی به ذهن‌شان می‌رسد، و از تجربه‌های نو لذت می‌برند — نگاه کردن از پنجره‌ی هواپیما یا نوازش کردن یک خرگوش برای اولین بار. مغزهای پیر درهای بسته‌ی بیشتری دارند، بدین خاطر است که در میان کهنه‌سربازان جنگ جهانی دوم در مطالعه‌ی توپیر، آن‌هایی که مسن‌تر بودند، بهبود کمتری (بعد از ضربه‌ی مغزی) داشتند، و به همین خاطر است که آرنولد شوارتزنگر همچنان لهجه‌ی غلیظش را دارد. به همین ترتیب، یک شهر هم هرچه قدیمی‌تر باشد، زیرساخت آن نسبت به تغییر مقاومت بیشتری نشان می‌دهد. مثلاً شهر رُم نمی‌تواند خیابان‌های پیچ در پیچ خود را درست کند تا شبیه شبکه‌ی شهری منتهن شود؛ تاریخ طولانی این شهر، خیابان‌های پر پیچ و خم آن را در محل خود تثبیت کرده است. در شهرها هم مانند انسان‌های در حال تکوین، با گذشت زمان ردپاهای بیشتری در امتداد راه‌های اولیه به جا می‌ماند.

در سال ۱۹۸۴، فیزیکدانی به نام آلن لایتمن در سن سی و پنج سالگی

مقاله‌ی کوتاهی با عنوان «آرزوهای بر باد رفته» در روزنامه‌ی نیویورک تایمز نوشت و در آن از اینکه حس می‌کرد ذهنش سفت شده است، شکوه کرد:

سال‌های شکوفایی دانشمندان هم، مانند ورزشکاران، عموماً در سنین جوانی است. آیزاک نیوتون زمانی که قانون جاذبه را کشف کرد، در دهه‌ی بیست سالگی خود بود، آلبرت اینشتین زمانی که فرمول نسبیت عام را ارائه کرد، ۲۶ سال سن داشت، و جیمز کلرک مکسول وقتی ۳۵ ساله بود، نظریه‌ی الکترومغناطیس‌اش را منتشر کرده و در روستا بازنشسته شده بود. من خودم حدوداً چند ماه پیش وارد ۳۵ سالگی شدم، و تصمیم گرفتم زندگی حرفه‌ای‌ام در رشته‌ی فیزیک را جمع‌بندی کنم، کاری که از یک سو ناخوشایند، ولی از سوی دیگر مقاومت‌ناپذیر بود. تا این سن یا چند سال بعد از این، خلافتانه‌ترین دستاوردهای افراد معمولاً تکمیل شده و قابل مشاهده است. آدم یا به چیزی رسیده و از آن بهره برده، و یا هم نرسیده است.

فیزیکدان دیگری، جیمز گیتس، نیز همین احساس را در یک مصاحبه‌ی تلویزیونی بیان کرد:

می‌گویند فیزیکدانان پیر ایده‌های جدید را وقتی می‌میرند، قبول می‌کنند. نسل بعدی است که ایده‌های جدید را به نتیجه می‌رساند. وقتی مثل من یک فیزیکدان پیر باشید، مطالب زیادی بلدید، و آن مطالب مثل ماسه در کف کشتی عمل می‌کند؛ شما را به پایین می‌کشد. یک عالم چیزهای دیگر می‌دانید که وزنش را باید تحمل کنید. و بعضی وقت‌ها یک فکر جدید مثل یک پری کوچک یا شیخ از کنار شما عبور می‌کند، و می‌گویید: «هی، نمی‌دانم این چیست، ولی نباید چیز مهمی باشد.» ولی خوب، بعضی وقت‌ها مهم است.

این‌گونه ناله و زاری‌ها از مشخصات پیری است. ولی خوشبختانه، با آنکه شکل‌پذیری مغز در گذر سال‌ها کاهش می‌یابد، ولی هنوز وجود دارد. مدراسازی پویا امتیازی نیست که فقط مخصوص جوان‌ها باشد. بازآرایی عصبی فرایند مداومی است که تمام عمر ما دوام می‌یابد: ایده‌های جدیدی تشکیل می‌دهیم، اطلاعات جدیدی به دست می‌آوریم، و افراد و رویدادها را به خاطر می‌آوریم. علی‌رغم کاهش انعطاف‌پذیری، رُم همچنان تکامل پیدا می‌کند. این شهر الان همان شهر بیست سال پیش نیست. امروزه دور و بر مجسمه‌های آن پر

از برج‌های مخابراتی و کافی‌نت‌ها است. با آنکه مبانی اولیه را به سختی می‌توان تغییر داد، ولی با این وجود، این شهر ویژگی‌های ظریف خود را براساس شرایط جدید پیشرفت می‌دهد — درست مثل کتابخانه که موجودی انبارش را تغییر می‌دهد، در حالی که معماری آن عمدتاً بدون تغییر باقی می‌ماند.

این مطلب را در سرتاسر این کتاب در مطالعات مختلف دیدیم — مثلاً درباره‌ی ژانگولربازی، آلات موسیقی جدید، نقشه‌های لندن، و غیره — که همه‌ی این‌ها با شکل‌پذیری مغز در بزرگسالی در ارتباط است. نمونه‌ی خیره‌کننده‌ی آن اخیراً از مطالعات راهبه‌ها به دست آمد، مطالعاتی که در عرض چند دهه بر روی صدها راهبه‌ی کاتولیک که در صومعه‌ها زندگی می‌کردند، انجام شد.^[۱۸] همه‌ی این خواهران روحانی موافقت کردند که کارکرد شناختی‌شان به‌طور منظم آزمایش شود، پرونده‌ی پزشکی آن‌ها در اختیار محققان قرار گیرد، و مغز آن‌ها نیز پس از مرگ برای تحقیق اهدا شود. جالب است که برخی از این راهبه‌ها هرگز هیچ علامتی از زوال شناختی نشان ندادند — حواس‌شان کاملاً سر جایش بود — ولی با این حال، مغزشان در اتوپسی علایم گسترده‌ی آسیب ناشی از بیماری آلزایمر را نشان می‌داد. به عبارت دیگر، شبکه‌های عصبی آن‌ها از نظر فیزیکی در حال اضمحلال بود، ولی عملکردشان نه. چگونه می‌توان این را توضیح داد؟ نکته‌ی کلیدی آن است که این راهبه‌ها در صومعه تا آخرین روزها باید مرتب از نیروی ذهنی‌شان استفاده می‌کردند. مسئولیت‌ها و وظایفی بر عهده‌ی آن‌ها بود و زندگی اجتماعی، بحث و جدل، بازی شبانه، گروه‌های مباحثه، و امثال آن داشتند. برخلاف معمرین معمولی، بازنشسته نشده بودند که تمام مدت روی کاناپه جلوی تلویزیون بنشینند. به خاطر اینکه زندگی ذهنی فعالی داشتند، مغزشان مجبور بود مدام پل‌های جدیدی بسازد، ولو آنکه برخی از جاده‌های عصبی آن از نظر فیزیکی در حال از هم پاشیدن بود. در واقع، نکته‌ی شگفت آن است که یک سوم راهبه‌ها آسیب‌شناسی مولکولی آلزایمر را داشتند، بدون آنکه به نشانه‌های شناختی معمول آن مبتلا شده باشند. زندگی ذهنی فعال، ولو در افراد بسیار سالمند، موجب ایجاد اتصالات جدید می‌شود.^[۱۹]

پس یادگیری در هر سنی می‌تواند اتفاق بیفتد. ولی چرا با بالغ‌تر شدن

مغز سرعت آن کمتر می‌شود؟ یک دلیل آن است که بسیاری از درها بسته شده است. ولی جور دیگری هم می‌توان به این مسئله نگاه کرد. اگر یادتان باشد، گفتیم که تغییرات مغز برخاسته از تفاوت بین مدل درونی و اتفاقات دنیای بیرون است. بنابراین، مغز فقط وقتی تغییر می‌کند که چیزی خلاف پیش‌بینی باشد. به تدریج که شما پیر می‌شوید و قواعد دنیا را می‌فهمید — از انتظارات مربوط به زندگی‌تان در خانه گرفته تا رفتارشان در محافل اجتماعی و غذاهایی که دوست دارید — مغزتان دیگر کمتر در معرض چالش تحریک‌های جدید قرار می‌گیرد، و بنابراین، بیشتر در محل تثبیت می‌شود. مثلاً وقتی بچه هستید، مدل درونی شما به این صورت است که فکر می‌کنید همه‌ی مردم همان چیزهایی را باور دارند که شما باور دارید. به تدریج که تفاوت بین پیش‌بینی‌ها و تجربه‌های خود را مشاهده می‌کنید، شبکه‌های شما متناسب با این شکاف فزاینده، دگرگون می‌شود.

یا مثلاً ببینید که وقتی کار جدیدی را شروع می‌کنید، چه اتفاقی می‌افتد. در ابتدا همه چیز جدید است — از همکارانتان گرفته تا مسئولیت‌ها و رویکردهایی که دارید. طی چند روز تا چند هفته‌ی اول سعی می‌کنید این شغل جدید را وارد مدل درونی خود کنید، و شکل‌پذیری زیادی در مغزتان رخ می‌دهد. پس از مدتی، در کار جدید مهارت پیدا می‌کنید. مهارت جایگزین انعطاف‌پذیری می‌شود.

همین الگو را در چگونگی تثبیت شدن کشورها نیز می‌بینیم. مثلاً اصلاحات قانون اساسی را در کشورهای مختلف در نظر بگیرید: تقریباً تمام تغییرات در اوایل اتفاق می‌افتد، یعنی در مدتی که کشور راه و روش اداره کردن خود را یاد می‌گیرد؛ در سال‌های بعد، قانون اساسی تثبیت می‌شود و اصلاحات دیر به دیر رخ می‌دهد. مثلاً در قانون اساسی ایالات متحده، دوازده مورد از اصلاحات قانون اساسی در طول سیزده سال اول صورت گرفت. پس از آن، در هر دوره‌ی بیست‌ساله حداکثر چهار مورد اصلاح رخ داده است، و در اکثر دوره‌ها هیچ اصلاحی صورت نگرفته است. آخرین تغییر، که مشتمل بر تصویب اصلاحیه‌ی بیست و هفتم قانون اساسی بود، در سال ۱۹۹۲ انجام شد. از آن زمان تاکنون قانون اساسی کاملاً در حال سکون بوده است. به این طریق، قابلیت سازگاری کشورها با جهان به‌طور مداوم کاهش می‌یابد: کشورها در ابتدا مکرراً تغییر

می‌کنند، و با گذشت زمان یک مدل کاری ایجاد می‌کنند که آنچه را برای امور اجرایی کشور لازم است، در خود دارد.

به همین طریق، تثبیت شدن مغز هم منعکس‌کننده‌ی موفقیت آن در فهمیدن جهان است. شبکه‌های عصبی به خاطر نزول کارکرد نیست که خودشان را به صورت عمیقی در محل قفل می‌کنند، بلکه بدان خاطر است که در درک مسائل موفق بوده‌اند. بنابراین، آیا شما واقعاً دلتان می‌خواهد که دوباره مثل یک بچه مغز شکل‌پذیری داشته باشید؟ گرچه داشتن مغزی که مانند اسفنج همه چیز را جذب می‌کند، خیلی جذاب است، ولی در بازی زندگی عموماً مهم‌ترین چیز فهمیدن قواعد است. گرچه تغییرپذیری ما کمتر می‌شود، ولی مهارت ما بیشتر می‌شود. شبکه‌های تداعی ما که به سختی به دست آمده‌اند، شاید کاملاً صحیح نباشند و حتی سازگاری درونی کامل هم نداشته باشند، ولی تجربه‌ی زندگی، دانش فنی، و رویکرد ما به جهان را افزون‌تر می‌کنند. یک بچه اصلاً توانایی مدیریت کردن یک شرکت، لذت بردن از افکار عمیق، و یا رهبری یک ملت را ندارد. اگر شکل‌پذیری کاهش نمی‌یافت، شما نمی‌توانستید قراردادهای جهان را در ذهن‌تان قفل کنید. هرگز قابلیت بازشناسی الگوها یا توانایی انجام زندگی اجتماعی را به دست نمی‌آوردید. نمی‌توانستید کتاب بخوانید، گفتگویی بامعنا با دیگران داشته باشید، تنها راه بروید، یا برای خودتان غذا پیدا کنید. حفظ انعطاف‌پذیری کامل موجب حفظ درماندگی دوران کودکی می‌شود.

و اما در مورد خاطره‌های زندگی چه می‌توان گفت؟ تصور کنید که می‌توانستید کپسولی را بخورید تا شکل‌پذیری مغزتان تجدید شود: با این کار، امکان آن را پیدا می‌کردید که شبکه‌های عصبی خود را برنامه‌نویسی مجدد کنید تا زبان‌های جدید را به سرعت یاد بگیرید و لهجه‌ی جدیدی پیدا کنید، و یا دیدگاه‌های جدیدی از فیزیک به دست آورید. هزینه‌اش این خواهد بود که آنچه را قبلاً از آن آمده، از یاد خواهید برد. خاطرات کودکی شما پاک شده و جایگزین می‌شود. اولین محبوب‌تان، اولین گردش‌تان در دیسنی‌لند، تعاملاتی که با پدر و مادرتان داشته‌اید — همه‌ی این‌ها مانند رؤیایی قبل از بیداری پاک می‌شود. آیا این برایتان ارزش‌اش را خواهد داشت؟

یک سناریوی وحشتناک درباره‌ی آینده‌ی جنگ‌افزارها این است که نوعی

سلاح بیولوژیک را تصور کنید که موجب برگشت شکل‌پذیری می‌شود: کسی به‌طور **فیزیکی** صدمه نمی‌بیند، ولی سربازها دوباره به دوره‌ی کودکی برمی‌گردند. توانایی خود برای راه رفتن و حرف زدن را فراموش می‌کنند. تمام خاطراتشان محو می‌شود. وقتی که فرماندهان آن‌ها را به خانه بازمی‌گردانند، هیچ چیزی از خانواده، دوستان، همسر، یا فرزندان خود به یاد ندارند. از نظر فنی، مشکلی ندارند: می‌توانند دوباره یاد بگیرند، چیزی آسیب ندیده است. فقط زندگی ذهنی آن‌ها — چیزی که به آسانی قابل دیدن نیست — دوباره به حالت اولیه‌ی کارخانه برگردانده شده است.

این صحنه از آن رو وحشت‌آور است که اساساً اینکه شما کی هستید، جمع کل خاطرات شما است. حالا به بررسی این موضوع می‌پردازیم.

۱۰ | یادآوری و زمان

آن روز آخر، درد و رنج مداوم بود. خیلی وقت‌ها گویی او را از تخت بلند می‌کرد، آن‌چنان که مجبور بودند به زور پایین نگهش دارند. پدر بزرگ نتوانست تحمل کند و از اتاق بیرون رفت؛ طوری می‌گریست انگار اشک‌هایش هرگز کافی نخواهد بود.

جینی آمد که او را آرام کند. با صدایی آهسته گفت: بابابزرگ، بابابزرگ گریه نکن. او آنجا نیست، خودش به من قول داد. روز آخر، گفت برمی‌گردد به زمانی که اولین بار موسیقی به گوشش رسید، دختر کوچولویی توی جاده‌ی روستای محل تولدش. به من قول داد. یک عروسی است و دارند می‌رقصند، و صدای شاد و دلنواز نی‌ل‌بک‌ها در هوا طنین‌انداز است. بگذار همان جا بماند، بابابزرگ، اشکالی ندارد. او به من قول داده. بیا برویم تو، و به بدن بیچاره‌اش کمک کن بمیرد.

— تیلی اولسن، «یک چیستان به من بگو»

تصویری که تیلی اولسن از یک مادر بزرگ در حال مرگ ترسیم کرده است، قصه‌ی زنی است که خاطرات اخیر او ناپدید شده، در حالی که خاطرات کودکی‌اش با غنای کامل حفظ شده و در دسترس است. اگر کسی را که دچار دمانس شده، دیده باشید، شاهد چنین وضعیتی بوده‌اید.

این یکی از قدیمی‌ترین الگوهایی است که در عصب‌شناسی مشاهده شده است. در سال ۱۸۸۲، عصب‌شناس فرانسوی، تئودول ریو، این مشاهده را به ثبت رساند، و برایش جالب بود که خاطرات قدیمی پایدارتر از خاطرات جدید است.^[۱] امروزه این را قانون ریو می‌نامند، و این پدیده را توضیح می‌دهد که برخی از افراد در پایان زندگی دوباره به زبان دوران کودکی برگشت می‌کنند.

در سال ۱۹۵۵، زمانی که آلبرت اینشتین در بیمارستانی در پریستون، نیوجرسی، درگذشت، آخرین افکارش را بر زبان راند. همه می‌خواستند بدانند آخرین گفته‌های این فیزیکدان بزرگ چه بود، ولی هرگز کسی نخواهد دانست. نه اینکه پرستاری نبود که آخرین کلمات او را بشنود، بلکه از آن رو که این کلمات را به زبان **مادری‌اش**، آلمانی، ادا کرد. پرستار شب فقط انگلیسی بلد بود، بنابراین، آخرین گفته‌های او از دست رفت.

جای تعجب نیست که غرابت این الگو، ریو را متحیر کرد: دیگر سیستم‌های ذخیره‌سازی به این صورت عمل نمی‌کنند. خاطره‌ی سازمانی دوره‌های قدیمی رهبری را فراموش می‌کند، مؤسسات آموزشی بر روی روندهای جدید تمرکز می‌کنند، دولت‌های شهری بیشتر به دستاوردهای جدید خود می‌بالند و کمتر به موفقیت‌های قرن گذشته می‌پردازند.

پس چرا مغز برعکس عمل می‌کند؟ چرا خاطرات قدیمی‌تر، ایمن‌تر می‌شوند؟ این سرنخ مهمی برای فهمیدن اصولی است که در پس پرده جریان دارد. و بدین خاطر ما حالا به سراغ یکی از مهم‌ترین جنبه‌های مدارس‌سازی پویا می‌رویم: پدیده‌ی حافظه.

گفت‌وگو کردن با خویش‌ن آینه‌تان

پیش از آنکه ساعت جدایی فرارسد،
زود باش، لوح‌هایت را بیاور، حافظه!

— ماتیو آرنولد

در فیلم سینمایی یادگاری، لئونارد شلبی دچار مشکلی است که نمی‌تواند حافظه‌ی کوتاه‌مدت را به حافظه‌ی بلندمدت تبدیل کند — وضعیتی که به آن فراموشی پیش‌گستر گفته می‌شود. تا یک فاصله‌ی پنج‌دقیقه‌ای وقایعی را که رخ می‌دهد، به خاطر دارد، ولی وقایع پیش از آن از حافظه‌اش محو می‌شود. در نتیجه، اطلاعات حیاتی را مستقیماً روی پوستش خال‌کوبی می‌کند تا مأموریتی را که برای خودش تعیین کرده، فراموش نکند. یعنی به این طریق انگار از فراسوی زمان با خودش سخن می‌گوید.

ما همه مثل لئونارد شلبی هستیم، ولی اطلاعات حیاتی مربوط به گذشته‌ی خود را نه روی پوستمان، که در مدارهای عصبی‌مان حک می‌کنیم. بدین‌گونه است که خویشتن آینده‌ی ما می‌داند چه بر سرمان آمده، و از این رو، چه باید بکند.



تقریباً **دو هزار و چهارصد سال قبل**، ارسطو در رساله‌اش با عنوان *De memoria et reminiscencia* (در باب حافظه و یادآوری)، نخستین تلاش را برای تشریح این فرایند انجام داد. او برای این منظور از تمثیل نقش زدن بر مهر مومی استفاده کرد. بدبختانه ارسطو در آن زمان به هیچ‌گونه داده‌هایی دسترسی نداشت، از این رو، جادوی عصبی که از طریق آن یک رویداد در سر به خاطره تبدیل می‌شود، تا هزاران سال در هاله‌ای از رمز و راز باقی ماند.

علوم اعصاب تازه حالا دارد این معما را می‌گشاید. می‌دانیم که وقتی مطلب جدیدی — مثلاً اسم همسایه‌ی جدیدتان — را یاد می‌گیرید، تغییراتی فیزیکی در ساختار مغزتان اتفاق می‌افتد. چندین دهه است که متخصصان علوم اعصاب روی میزهای آزمایشگاه زحمت کشیده‌اند تا بفهمند این تغییرات چیست، هماهنگی آن در اقیانوس پهناور نوروها چگونه انجام می‌شود، آگاهی چگونه در آن ذخیره می‌شود، و چند دهه‌ی بعد چگونه خوانده می‌شود. در نتیجه، با آنکه بسیاری از قطعات این پازل هنوز به دست نیامده است، ولی شکل کلی تا

حدودی معلوم شده است.

شکل ساده‌ی حافظه در سطح سلول و شبکه در موجودات نسبتاً ساده از قبیل لیسه‌ی دریایی به‌طور وسیعی مطالعه شده است. حالا چرا لیسه‌ی دریایی؟ زیرا نورون‌های آن کم و بزرگ هستند، به‌طوری که مطالعه‌ی آن خیلی آسان‌تر از انسان است. نمونه‌ای از این آزمایش‌ها به این صورت است: دانشمندان با ملایمت سیخی را به لیسه‌ی دریایی می‌زنند. جانور خود را عقب می‌کشد. ولی اگر دانشمندان این کار را هر نود ثانیه تکرار کنند، لیسه‌ی دریایی نهایتاً دست از عقب کشیدن برمی‌دارد. یعنی «به یاد می‌سپارد» که این تحریک ضرری ندارد. حالا دانشمندان ضربه‌ی سیخ را با شوک الکتریکی به دم همراه می‌کنند، و از آن پس، رفلکس عقب کشیدن در مقابل صرفِ تماس سیخ بزرگ می‌شود: لیسه‌ی دریایی «به یاد می‌سپارد» که سیخ با یک تحریک خطرناک همراه شده است.^[۲] چنین آزمایش‌هایی نکات زیادی را درباره‌ی تغییراتی که در سطح مولکولی اتفاق می‌افتد، روشن کرده‌اند؛ با این حال، جانورانی که خیلی بعدها وارد ضیافت تکامل شده‌اند (از قبیل پستانداران)، ظرفیت حافظه‌ای بسیار قوی‌تر و گسترده‌تر از بی‌مهرگان دارند. ما انسان‌ها می‌توانیم جزئیات زندگی خودمان را به خاطر آوریم. می‌توانیم رؤیاها و تصوراتمان را به یاد آوریم. می‌توانیم مهارت‌های پیچیده‌ای را یاد بگیریم که به ما امکان مواجهه با شرایط مختلف تجاری، اجتماعی، و آب‌وهوایی را می‌دهد. خوشبختانه، توانایی فراموش کردن جزئیات نامربوط را نیز داریم، مثلاً اینکه دو هفته پیش در فرودگاه کجا پارک کردیم یا اینکه کلمات دقیق مکالمه‌ای که با کسی داشتیم، چه بود.

نخستین مطالعه‌ی نظام‌مند در خصوص مبنای فیزیکی حافظه در پستانداران در دهه‌ی ۱۹۲۰ به‌وسیله‌ی عصب‌شناس دانشگاه هاروارد، کارل لَشلی، انجام شد. استدلال او این بود که اگر بتواند چیز جدیدی (مثلاً مسیر درون یک ماز) را به یک موش صحرایی یاد بدهد، در آن صورت شاید بتواند با برداشتن قطعه‌ی کوچکی از مغز موش صحرایی در محل درست، خاطره‌ی جدید را پاک کند. تنها کاری که باید می‌کرد، این بود که آن محل جادویی را پیدا کند، آن قطعه را بردارد، و بعد نشان دهد که موش دیگر توانایی به یاد آوردن مسیر را ندارد. از این رو، بیست موش صحرایی را آموزش داد که راه خود را در ماز پیدا

کنند. بعد در هر جانور با تیغ جراحی، ناحیه‌ی متفاوتی از قشر مغز را برداشت. مدتی به جانورها فرصت داد تا بهبودی پیدا کنند، و سپس دوباره هر موش را آزمایش کرد تا ببیند آسیب به کدام نواحی موجب از دست رفتن آگاهی از مسیر ماز می‌شود.

این آزمایش با شکست مواجه شد: تمام موش‌ها توانایی کامل خود را برای به یاد آوردن مسیر ماز حفظ کردند. هیچ‌کدام مسیر را فراموش نکردند. شکست این آزمایش، موفقیت نهایی آن را رقم زد. لشلی متوجه شد که شاید خاطره‌ی موش از ماز در نقطه‌ی واحدی واقع نشده است. حافظه محدود به ناحیه‌ی خاصی نیست، بلکه به‌طور وسیعی پخش شده است. این آزمایش نشان داد که چیزی به‌عنوان سازه‌ی ویژه‌ی حافظه در مغز وجود ندارد. ذخیره‌سازی حافظه مانند یک فایل کشویی نیست، بلکه مانند رایانش ابری توزیعی است — مانند صندوق ورودی ایمیل شما که در سرورهای مختلفی در سراسر جهان پخش شده است، و غالباً نسخه‌های متعددی از آن در چندین محل ذخیره شده است.

ولی چگونه یک خاطره — مانند یک نام، یک سفر تفریحی اسکی، و یا یک آهنگ موسیقی — در مجموعه‌ی توزیعی میلیاردها سلول نوشته می‌شود؟ برای ترجمه از قلمرو تجربه به قلمرو فیزیکی، از چه زبان برنامه‌نویسی استفاده می‌شود؟ در قرن نوزدهم، تا پیش از ظهور میکروسکوپ‌های با تفکیک‌پذیری بالا، تصور بر این بود که دستگاه عصبی، با هزاران شاهراه عصبی آن که در تمام بدن جریان دارد، مانند عروق خونی یک شبکه‌ی پیوسته است. این دیدگاه تا یک قرن قبل برقرار بود، تا اینکه دانشمند علوم اعصاب اسپانیایی سانتیاگو رامون یی کاخال متوجه شد که چنین نیست، بلکه مغز ائتلافی از میلیاردها سلول جداگانه است. دستگاه عصبی نه یک شاهراه، که بیشتر شبیه مجموعه‌ای از پروژه‌های جاده‌ای محلی است که با یکدیگر در ارتباط هستند. او این دیدگاه را «آموزه‌ی نورونی» نامید، و به خاطر همین کشف بود که یکی از نخستین جایزه‌های نوبل به او اهدا شد. آموزه‌ی نورونی پرسش جدید مهمی را مطرح کرد: اگر سلول‌های مغز از هم جدا هستند، چگونه با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند؟ و پاسخ آن خیلی زود معلوم شد: آن‌ها در نقاط خاصی که امروزه به آن سیناپس (یا همایه)

می‌گوییم، به یکدیگر متصل شده‌اند. رامون ئی کاخال پیشنهاد کرد که شاید یادگیری و حافظه از طریق تغییر در قدرت اتصالات سیناپسی صورت می‌پذیرد. دونالد هب، متخصص علوم اعصاب، تا سال ۱۹۴۹ مشغول بررسی این ایده بود و توانست آن را بیشتر مشخص کند. او پیشنهاد کرد که اگر سلول A همواره در به کار انداختن سلول B دخالت داشته باشد، اتصال بین آن‌ها تقویت می‌شود.^[۳] به عبارت دیگر، نورون‌هایی که با هم شلیک می‌کنند، با هم مدار می‌سازند.

در زمانی که هب فرضیه‌ی خود را ارائه کرد، هیچ‌گونه شواهد تجربی وجود نداشت که بتواند مؤید آن باشد. بعد در سال ۱۹۷۳، دو پژوهشگر چیزی را کشف کردند که نشان می‌داد شاید هب درست حدس زده است. آن‌ها مشاهده کردند که با تحریک الیاف عصبی ورودی در ناحیه‌ای به نام هیپوکامپ، پاسخ الکتریکی سلول گیرنده (پس‌سیناپسی) افزایش می‌یابد. و این سیگنال بزرگ‌تر تا ده ساعت دوام پیدا می‌کرد. آن‌ها این را تقویت درازمدت نامیدند، و نخستین نمایش این امر بود که قدرت اتصالات می‌تواند در نتیجه‌ی سابقه‌ی اخیر تغییر کند.^[۴]

مرحله‌ی بعدی به راحتی برای همه قابل حدس بود: هر چیزی که بالا می‌رود، باید قابلیت پایین آمدن هم داشته باشد. اگر یک اتصال را می‌توان تقویت کرد، باید امکان سرکوب کردن آن هم وجود داشته باشد. در غیر این صورت، شبکه اشباع خواهد شد، به طوری که نخواهد توانست هیچ چیز جدیدی را ذخیره کند. تا دهه‌ی ۱۹۹۰، نشان داده شد که دستکاری‌های مختلف می‌تواند منجر به سرکوب بلندمدت شود (مثلاً شلیک شدن A بدون ایجاد پاسخ در B)؛ یعنی قدرت اتصال بین دو سلول تضعیف می‌شود.

دانشمندان نتیجه‌گیری کردند که موفق به یافتن مبنای فیزیکی حافظه شده‌اند.^[۵] هرچه باشد، تغییر ظریفی در قدرت اتصالات می‌تواند رفتار خروجی شبکه را به طور ریشه‌ای تغییر دهد. فعالیت در سیستم براساس آنچه قبلاً اتفاق افتاده، جریان پیدا می‌کند. شبکه می‌تواند با تنظیم صحیح پارامترهای خود، بین چیزهایی که هم‌زمان بروز کرده، پیوند برقرار کند. منظور آن است که چنین سازوکار ساده‌ای می‌تواند زیربنای تمام خاطرات زندگی شما باشد.

برای نمونه، به بهترین دوست خود و خانه‌ی او فکر کنید. منظره‌ی رفیق شما مجموعه‌ی خاصی از نورون‌ها را تحریک می‌کند، و خانه مجموعه‌ی دیگری را تحریک می‌نماید. از آنجا که هنگام رفتن به آنجا، هر دو گروه نورون‌ها هم‌زمان فعال هستند، این دو مفهوم با هم مرتبط می‌شوند؛ از این رو، به آن یادگیری ارتباطی می‌گویند. وقتی هر کدام از این مفاهیم تحریک شود، دیگری را نیز به جریان می‌اندازد. و تازه هر کدام از این‌ها می‌تواند انواع تداعی‌های دیگر را نیز، از قبیل خاطره‌ی گفتگوها، غذاها، و خنده‌هایی که با هم داشته‌اید، فعال کند.

به این ترتیب، در اوایل دهه‌ی ۱۹۸۰، فیزیکدان جان هاپفیلد تلاش کرد ببیند که آیا یک شبکه‌ی عصبی مصنوعی ساده می‌تواند مجموعه‌ی کوچکی از «خاطرات» را ذخیره کند.^[۶] او مشاهده کرد که اگر الگوهایی (از قبیل حروف الفبا) را به یک شبکه عرضه کند و سیناپس‌های بین نورون‌هایی که هم‌زمان تحریک می‌شوند، را تقویت کند، شبکه الگوها را به یاد خواهد سپرد. هر حرف (مثلاً حرف E) مجموعه‌ی خاصی از نورون‌ها را تحریک می‌کرد، و این نورون‌ها اتصالات خود با یکدیگر را تقویت می‌کردند. برعکس، حرف S با الگوی متفاوتی نشان داده می‌شد. اکنون هاپفیلد می‌توانست شکل خراب شده‌ای از یکی از الگوها را نمایش دهد (مثلاً حرف E که قسمتی از بالای آن قطع شده است)، و آبشار فعالیتی که در شبکه جریان می‌یافت، به طرف الگوی E کامل پیشرفت می‌کرد. به عبارت دیگر، شبکه الگو را تکمیل می‌کرد تا براساس تمام تجربیات قبلی، با مفهومی که از شکل E دارد، هماهنگ شود. به علاوه، این شبکه‌ها در مقابل خراب شدن بسیار مقاوم بودند: اگر چند تا از گره‌ها را حذف می‌کردید، حافظه‌ی توزیعی شبکه باز هم قابل دستیابی بود. به این ترتیب، هاپفیلد توانست نمایشی قوی از حافظه در یک شبکه‌ی عصبی مصنوعی ساده ارائه کند، و این در را به سوی مطالعات گسترده‌ای بر روی «شبکه‌های هاپفیلد» گشود.^[۷]

در طول دهه‌های بعد، و خصوصاً در سال‌های اخیر، رشته‌ی شبکه‌های عصبی مصنوعی رونق گرفته است. پیشرفت این رشته تا حد زیادی نه به خاطر پیشرفت‌های نظری جدید بلکه به علت قدرت عظیم رایانشی است که امکان

شبیه‌سازی شبکه‌های عصبی غول‌آسا را که حاوی میلیون‌ها یا میلیارد‌ها واحد هستند، فراهم کرده است.^[۸] این گونه شبکه‌ها توانسته‌اند به موفقیت‌های بزرگی دست یابند، از جمله شکست دادن بهترین شطرنج‌بازان و بازیکنانِ گو در جهان. ولی علی‌رغم همه‌ی جار و جنجال‌ها، شبکه‌های عصبی مصنوعی هنوز فاصله‌ی زیادی با عملکرد به روش مغز دارند. گرچه عملکرد آن‌ها حیرت‌انگیز و جذاب است، ولی اگر از آن‌ها بخواهید که کار دیگری انجام دهند — مثلاً به جای تشخیص دادن گربه‌ها از سگ‌ها، پرندگان را از ماهی‌ها تشخیص دهند — به‌طور فاجعه‌باری با شکست مواجه می‌شوند. شبکه‌های عصبی مصنوعی با الهام از مغز ساخته شده‌اند، ولی همان مسیر ساده‌ی خود را ادامه داده‌اند. برای فهمیدن جادوی مغز (یعنی کاری که می‌تواند انجام دهد، در حالی که شبکه‌های عصبی مصنوعی تاکنون قادر به انجام آن نبوده‌اند)، باید با ذهنی باز به چالش‌ها و ترفندهای حافظه‌ی واقعی بیولوژیک نگاه کنیم.

دشمن خاطرات زمان نیست؛ خاطرات دیگر است

اولین مشکلی که مغز با آن مواجه است، عمر طولانی آن است. جانوران در زندگی خود با محیطی متغیر و پرچالش روبه‌رو هستند، و از این رو، نیاز دارند که در طول چندین سال یا چندین دهه، مدام اطلاعات جدیدی کسب کنند. ولی یادگیری در طول عمر باید با در نظر گرفتن تعادل بین دو کفه انجام شود: از یک سو محافظت از داده‌های قدیمی، و از سوی دیگر، کسب داده‌های جدید. در شبکه‌های عصبی مصنوعی، یادگیری (معمولاً با بهره‌گیری از میلیون‌ها مثال) در «فاز آموزش» صورت می‌گیرد، و سپس در فاز «یادآوری» مورد آزمایش قرار می‌گیرد. جانوران از چنین مزیتی برخوردار نیستند. مجبورند در تمام طول عمر مستقیماً یاد بگیرند و به یاد آورند.

متأسفانه، مدل‌های حافظه که بر مبنای اصول تغییر سیناپسی ذکر شده در کتاب‌های درسی ساخته می‌شوند، بلافاصله با مشکلی مواجه می‌شوند: گرچه یادگیری هیپی برای کدگذاری حافظه عالی است، ولی در مراحل بعدی هم همین کارایی را حفظ می‌کند و لذا چیزهایی که جدیداً یاد گرفته می‌شود، به سرعت جایگزین چیزهای یاد گرفته شده‌ی قبلی می‌شود.^[۹] شبکه‌های مصنوعی پر از

حافظه تبدیل به حافظه‌ای گِل‌آلود می‌شود. پس از فعالیت جدید در سیستم، خاطرات قبلی محو می‌شود، به‌طوری که در انتهای پرده‌ی اول یک نمایش‌نامه، یادتان نخواهد آمد که نمایش چطور شروع شد. این مسئله را دوراهی پایداری/ شکل‌پذیری می‌نامند: مغز چگونه آنچه را یاد گرفته حفظ می‌کند، ضمن اینکه چیزهای جدید نیز اضافه می‌کند؟ باید به طریقی از خاطرات محافظت کند. نه در مقابل چپاول زمان، بلکه در مقابل هجوم خاطرات دیگر.

در حالی که شبکه‌های عصبی مصنوعی دچار مشکل حافظه‌ی گِل‌آلود می‌شوند، ولی مغز واقعی چنین مشکلی ندارد. کتاب جدیدی که می‌خوانید، جایگزین نام همسرتان در حافظه‌ی شما نمی‌شود، و یاد گرفتن یک واژه‌ی جدید سبب نمی‌شود که واژگان قبلی بعضاً یادتان برود.

این واقعیت که مغز به طریقی از این دوراهی عبور می‌کند و به طریقی خاطرات قدیمی را قفل می‌کند، به ما می‌گوید که صرف تقویت کردن و تضعیف کردن سیناپس‌ها در شبکه، تصویر کاملی از طرز کار حافظه نیست. مسئله چیزی بیش از این‌ها است.

نخستین راه‌حل برای دوراهی پایداری/آسیب‌پذیری، این است که اطمینان حاصل کنیم که تمام سیستم با هم تغییر نکند. بلکه باید انعطاف‌پذیری فقط در نقاط کوچکی فعال یا غیرفعال شود، که ملاک آن مرتبط بودن است. همان‌طور که قبلاً دیدیم، تعدیل‌کننده‌های عصبی می‌توانند شکل‌پذیری سیناپس‌ها را با دقت کنترل کنند — و به این طریق، یادگیری فقط در مکان‌ها و زمان‌های مناسبی می‌تواند اتفاق بیفتد، به جای اینکه هر بار که فعالیت از شبکه عبور می‌کند، رخ بدهد.^[۱۰] این **خصوصیت** انحطاط شبکه به حالت حافظه‌ی گِل‌آلود را کندتر می‌کند، زیرا قدرت سیناپس‌ها را فقط زمانی که چیز مهمی اتفاق می‌افتد، تغییر می‌دهد: مثلاً وقتی که نام همکار جدیدی را می‌شنوید، خبری درباره‌ی پدر یا مادرتان به شما می‌رسد، یا متوجه می‌شوید که سریال تلویزیونی محبوب‌تان در حال پخش است. ولی مثلاً وقتی که به یک تابلوی بی‌اهمیت خیابان نگاه می‌کنید، یا رنگ پیراهن یک رهگذر را می‌بینید، و یا الگوی ترک‌های پیاده‌رو را مشاهده می‌کنید، نیازی نیست که شبکه تغییر کند. این ویژگی که تغییر فقط زمانی انجام می‌شود که موضوع اهمیت داشته

باشد، به ما خاطرنشان می‌کند که مغز صرفاً لوحی خالی نیست که جهان قصه‌هایش را روی آن ثبت می‌کند. بلکه مغز از قبل برای برخی انواع یادگیری در انواع خاصی از موقعیت‌ها آمادگی دارد. تجارب فقط زمانی که ذی‌ربط با زندگی فرد باشد، تبدیل به خاطره می‌شود، خصوصاً زمانی که با حالت عاطفی شدیدی مانند ترس یا لذت در ارتباط باشد. این موجب کاهش احتمال لبریز شدن شبکه می‌شود، زیرا همه چیز نوشته نمی‌شود.

ولی این مشکل پایداری/شکل‌پذیری را حل نمی‌کند، زیرا هنوز هم خاطرات برجسته‌ی زیادی هستند که می‌توانند مشکل ایجاد کنند.

بنابراین، مغز راه‌حل دیگری را به اجرا می‌گذارد. مغز همیشه خاطرات را در یک محل نگهداری نمی‌کند. بلکه آنچه را یاد گرفته، برای ذخیره‌سازی دایمی‌تر به محل دیگری انتقال می‌دهد.

بخش‌هایی از مغز به بخش‌های دیگر یاد می‌دهد

یک انبار کالا را در نظر بگیرید. اگر قرار بود مدام محموله‌های اجناس جدیدی برسد، انبار پر می‌شد. ولی اگر همچنان که جعبه‌ها از راه می‌رسند، آن‌ها را به محل دیگری ارسال کنید، می‌توانید فضا را حفظ کنید. به این طریق، خاطرات در محلی که تشکیل می‌شوند، باقی نمی‌مانند، بلکه به جای دیگری انتقال داده می‌شوند.

برخی از چیزهایی که درباره‌ی حافظه می‌دانیم، حاصل از داده‌های مربوط به هیپوکامپ و نواحی اطراف آن است که محلی مرکزی برای تشکیل حافظه به شمار می‌آید. در سال ۱۹۵۳، بیماری بیست و هفت ساله به نام هنری مولهسون برای درمان بیماری صرع تحت عمل جراحی قرار گرفت — و برای این منظور، هیپوکامپ در هر دو طرف مغز او برداشته شد. بعد از عمل، مشخص شد که مولهسون دچار فراموشی عمیق شده است: او توانایی تشکیل دادن خاطرات جدید و یاد گرفتن مطالب جدید را از دست داده بود. جالب اینکه برخی مهارت‌های جدید را هنوز هم می‌توانست یاد بگیرد (مثلاً اینکه یاد بگیرد در آینه بخواند)، با آنکه یادش نمی‌آمد که آن مهارت را یاد گرفته است. همان گونه که مطالعات مفصل برندا میلنر و همکارانش نشان داد، خاطرات او از

وقایع قبل از جراحی تقریباً در حد طبیعی بود. ماجرایی او موجب جلب توجه به هیپوکامپ شد، خصوصاً اینکه مشخص شد که هیپوکامپ برای یاد گرفتن حقایق اهمیت زیادی دارد، ولی برای به یاد آوردن حقایقی که قبلاً یاد گرفته شده است، زیاد مهم نیست.^[۱۱]

و اما پاسخ آن چیست؟ نقش هیپوکامپ در یادگیری، موقتی است. هیپوکامپ محل ذخیره‌سازی دایمی نیست: مولیسون می‌توانست وقایع زندگی خودش را از زمان قبل از جراحی با جزئیات به خاطر آورد.^[۱۲] تشکیل خاطرات جدید به هیپوکامپ نیاز دارد، ولی خاطرات به‌طور دایمی در آنجا ذخیره نمی‌شوند. بلکه یادگیری را به بخش‌هایی از قشر واگذار می‌کند، و این بخش‌ها خاطرات را به‌صورت دایمی‌تری نگهداری می‌کنند.

حالا این خاطرات چگونه از ایستگاه موقتی هیپوکامپ به جایگاه دایمی‌تر خود در قشر منتقل می‌شوند؟ یک پیشنهاد آن است که در بار نخست که الگوی فعالیت از قشر عبور می‌کند، امکان ذخیره‌سازی پایدار وجود ندارد؛ بلکه ناحیه‌ای مانند هیپوکامپ باید خاطره‌ی ثبت شده را چندین بار بازفعال کند، تا حافظه در قشر جای گیرد. براساس این چارچوب، مشخص می‌شود که چرا هیپوکامپ برای تحکیم حافظه مورد نیاز است: هیپوکامپ باید الگوها را به‌طور مکرر برای قشر دوباره پخش کند.^[۱۳] وقتی که خاطرات در قشر جای گرفت، به مرور زمان پایدارتر می‌شود. در مورد مولیسون، به علت اینکه تکرار وجود ندارد، حافظه‌ی بلندمدت ایجاد نمی‌شود. سیستم به همان صورتی که از قبل بوده، باقی می‌ماند.

این جابه‌جایی خاطرات را در بخش‌های زیادی از مغز می‌بینیم. تصور کنید که ارتباط جدیدی را یاد می‌گیرید: مثلاً مربع قرمز یعنی باید دست چپ‌تان را بلند کنید، و مربع آبی یعنی باید دست‌های‌تان را به هم بزنید. هرچه این کار را تمرین کنید، سرعت‌تان بیشتر می‌شود. طی این دوره‌ی فراگیری مهارت، تغییراتی به سرعت در برخی نواحی مغز (مانند هسته‌ی دمدار) که مسئول ثبت ارتباطات پاداش داده شده هستند، قابل تشخیص می‌شود. اما اگر همچنان به انجام آن کار ادامه دهید، نهایتاً فعالیت در نواحی دیگر (در قشر جلویی‌شانی) نیز ظاهر می‌شود. این نوروها با سرعت کمتری تغییر می‌کنند، بدان معنا که

ناحیه‌ی اول آنچه را یاد گرفته است، به ناحیه‌ی دوم یاد می‌دهد.^[۱۴] به عنوان یک مثال دیگر، وقتی که برای اولین بار سوار شدن به رولربلید را یاد می‌گیرید، باید به دقت به دست‌ها و پاهای‌تان توجه کنید و تلاش شناختی زیادی به عمل آورید. ولی پس از چندین روز تمرین، دیگر مجبور نیستید به آن فکر کنید: اتوماتیک می‌شود. علت آن است که مناطقی از مغز که در یادگیری حرکتی دخالت دارند (عقدده‌های قاعده‌ای)، یادگیری را به بخش‌هایی از قبیل مخچه انتقال می‌دهند.

ایده‌ی فرستادن مرسولات به حل دوراهی پایداری/شکل‌پذیری کمک می‌کند، ولی هنوز هم مشکل محدودیت فضا وجود دارد. در صورتی که بخواهید جعبه‌های خود را به تمام نقاط دنیا بفرستید، مشکلی نخواهد بود. ولی اگر بخواهید آن‌ها را صرفاً به چند انبار دیگر بفرستید، تنها به معنای آن است که مشکل را به جای دیگری منتقل کرده‌اید: انبار دوم هم خیلی زود پر خواهد شد. اینجا است که به سرآغاز راه‌حل سوم می‌رسیم که راه‌حل عمیق‌تری هم هست.

فرا‌تر از سیناپس‌ها

مطالعاتی که نشان‌دهنده‌ی تغییرات سیناپسی بود، هزاران پژوهشگر را بر آن داشته است که حوزه‌ی این مسئله را به دقت کاوش کنند و ماشین‌آلات مولکولی مربوط به آن را آشکار نمایند. اما تقویت و تضعیف سیناپسی تنها سازوکار دخیل در حافظه و یا حتی مهم‌ترین سازوکار آن نیست.^[۱۵] پس از چندین دهه مطالعه‌ی تغییرات سیناپسی، اکنون می‌دانیم که شکل‌پذیری سیناپسی برای یادگیری و حافظه ضروری است، ولی هیچ شواهدی نداریم که همین کافی باشد. شاید تغییرات قدرت سیناپسی صرفاً نشان‌دهنده‌ی نحوه‌ی توازن دقیق تحریک و مهار در سلول‌های در هم تنیده است که با هدف جلوگیری از صرع (تحریک بیش از حد) یا خاموش شدن (مهار بیش از حد) انجام می‌شود، بدان معنا که تغییرات سیناپسی نتیجه‌ی ذخیره‌سازی حافظه است، نه سازوکار ریشه‌ای آن. گرچه بیشتر توجه، هم از لحاظ نظری و هم از لحاظ تجربی، معطوف به تغییرات در سطح هر کدام از سیناپس‌ها بوده است،

ولی روش‌های زیادی دیگری نیز برای ذخیره‌سازی تغییرات وابسته به فعالیت قابل تصور است. شاید رشته‌ی علوم اعصاب با تمرکز بیش از حد بر روی تغییرات سیناپسی، از بخشی از این معما غافل شده است. چرا که به هر جایی از دستگاه عصبی که نگاه می‌کنیم، پارامترهای قابل تنظیم می‌بینیم. طبیعت هزاران ترفند برای انباشتن تغییرات کوچک دارد، که همه‌ی آن‌ها می‌توانند رفتار شبکه را تغییر دهند.

تصور کنید که یک بیگانه‌ی برون‌زمینی هستید که برای نخستین بار انسان‌ها را کشف کرده‌اید. شاید متعجب شوید از آن همه اجزا و قطعات متحرکی که تشکیل‌دهنده‌ی سیستم سیالی هستند که مغز نامیده می‌شود. شما با چشمان پر قدرتی که دارید، تعامل انسان‌ها با یکدیگر را در طول روز زیر نظر می‌گیرید، و مشاهده می‌کنید که براساس تجربه، تغییراتی در شکل نوروها رخ می‌دهد، مثلاً دندریت‌ها بزرگ‌تر یا کوچک‌تر می‌شوند. وقتی که دقیق‌تر به سیستم نگاه کنید، شاهد تغییراتی در مقدار پیام‌رسان شیمیایی آزاد شده از یک سلول برای ارتباط با سلول دیگر خواهید بود. خواهید دید که تعداد گیرنده‌ها برای دریافت پیام شیمیایی افزایش می‌یابد. تغییراتی در تریئات شیمیایی که برای تغییر کارکرد به گیرنده‌ها متصل می‌شود، بروز می‌کند. آبشارهای پیشرفته‌ی مولکول‌ها و یون‌ها در درون نوروها، که محاسباتی را انجام می‌دهند و با هر ورودی جدید، خودشان را تنظیم می‌کنند، موجب حیرت شما خواهد شد. در هسته‌ی نورو، در سطح ژنوم، خواهید دید که سازه‌های شیمیایی پیشرفته‌ای به رشته‌های مارپیچی DNA متصل می‌شوند، و سبب می‌شوند که برخی از ژن‌ها بیشتر ظاهر شوند، و برخی دیگر سرکوب گردند.

چنین سیستمی احتمالاً شما را مبهوت خواهد ساخت، زیرا شکل‌پذیری در درون هر کدام از این سازوکارها رخ می‌دهد. همه‌ی آن‌ها انعطاف‌پذیر هستند. پارامترها در تمام مقیاس‌ها تغییر می‌کنند، از رشد و ورود نوروهای جدید گرفته تا تغییرات بیان ژن‌ها. با این همه درجه‌ی آزادی که در سیستم‌های بیولوژیک وجود دارد، راهبردهای بسیار گسترده‌ای برای ذخیره‌سازی حافظه امکان‌پذیر است.

در واقع، دلایل متقن زیادی می‌توان ذکر کرد که نشان می‌دهد که سیناپس‌ها

تنها چیزهایی نیستند که تغییر می‌کنند. اولاً اگر یادگیری فقط کارایی سیناپس‌های موجود را تنظیم می‌کرد، نمی‌توانستیم انتظار تغییرات وسیعی را در ساختار مغز داشته باشیم. ولی وقتی افراد داوطلب ژانگولربازی یاد می‌گیرند، یا دانشجویان پزشکی برای امتحانات می‌خوانند، یا رانندگان تاکسی نقشه‌ی خیابان‌های لندن را حفظ می‌کنند، تغییرات قابل‌توجهی در تصاویر مغز مشاهده می‌شود.^[۱۶] تغییرات قشری چیزی بیش از دگرگونی سیناپس‌ها است، بلکه ظاهراً شامل افزوده شدن مواد سلولی جدید نیز هست.^[۱۷]

ثانیاً، اگر حافظه صرفاً در قالب وزن‌های سیناپسی ذخیره می‌شد، نمی‌توانستیم انتظار عصب‌زایی، یعنی رشد و افزوده شدن نورون‌های جدید، داشته باشیم.^[۱۸] در حقیقت، تصور بر این بود که وارد شدن نورون‌های جدید به درون شبکه، موجب به هم ریختن الگوی ظریف سیناپسی خواهد شد. و با این حال، این موضوع اتفاق می‌افتد: **مرتباً** نورون‌های جدیدی در هیپوکامپ فرد بزرگسال متولد می‌شوند و به قشر مغز راه پیدا می‌کنند. این‌ها اتفاقی نیستند؛ می‌توان دید که در ارتباط با تشکیل حافظه هستند. به عنوان مثال، اگر به یک موش صحرایی کاری یاد بدهید که نیاز به هیپوکامپ دارد، تعداد نورون‌های جدید ساخته‌شده در موش بالغ نسبت به حالت پایه دو برابر می‌شود. برعکس، اگر کاری را که نیازمند هیپوکامپ نیست، به موش‌های صحرایی آموزش دهید، تعداد سلول‌های تولیدی جدید تغییری نمی‌کند.^[۱۹]

سوم اینکه تغییر در قندها و پروتئین‌های اطراف DNA، الگوی بیان ژنی را تغییر می‌دهد.^[۲۰] در این رشته‌ی نسبتاً جدید که اپی‌ژنتیک نامیده می‌شود، مشاهده می‌کنیم که تجارب حاصل از جهان پیرامون تعیین می‌کند که چه ژن‌هایی سرکوب شوند و چه ژن‌هایی تقویت گردند. برای نمونه، در بچه‌موش‌هایی که خوب مراقبت می‌شوند (یعنی مادر مرتب آن‌ها را لیس می‌زند و تمیز می‌کند)، تغییراتی در تمام طول عمر در الگوی مولکول‌هایی که به رشته‌های DNA می‌چسبند، ایجاد می‌شود، و به نظر می‌رسد که این موجب کاهش اضطراب و افزایش رشد بچه‌موش‌ها در طول زندگی آن‌ها می‌شود.^[۲۱] به این روش، تجارب شما در محیط زندگی با شما عجین می‌شود — به طوری که به سطح بیان ژن‌های شما می‌رسد و در یک مقیاس زمانی طولانی می‌تواند در آنجا

جای‌گذاری شود.

وقتی که متخصصان علوم اعصاب و مهندسان هوش مصنوعی درباره‌ی تغییرات در شبکه صحبت می‌کنند، عموماً تغییرات قدرت اتصالات بین سلول‌ها را در نظر می‌گیرند. ولی شمای برون‌زمینی که با دید تازه‌ای نگاه می‌کنید، به روشنی می‌بینید که سیناپس‌ها برای این منظور کافی نیستند: شکل‌پذیری در سرتاسر مغز در هر سطحی وجود دارد. چگونگی جریان یافتن فعالیت در یک شبکه بستگی به تمام تنظیمات شبکه دارد، از بزرگ تا کوچک. هر جا بررسی می‌کنیم، شکل‌پذیری می‌بینیم. پس چرا این رشته تقریباً فقط بر روی سیناپس‌ها تمرکز می‌کند؟ زیرا اندازه‌گیری آن آسان‌تر است. بقیه‌ی کار در جریان پویایی پرسرعت مغز زنده، عموماً چنان ریز است که با فناوری کنونی ما قابل بررسی نیست. پس مانند آدم مستی که زیر چراغ خیابان دنبال کلیدهایش می‌گردد، ما هم تقریباً فقط روی چیزهایی که می‌توانیم ببینیم، تمرکز می‌کنیم.



پس مغز عقربه‌های زیادی دارد که می‌تواند تنظیم کند، و لذا می‌رسیم به بخش دوم داستان: با داشتن این همه پارامتر ممکن، مغز چگونه چیزی را تغییر می‌دهد، بدون آنکه کارکرد را در جای دیگری دچار اختلال کند؟ چگونه می‌توانیم تعامل تمام این قطعات و بخش‌ها را بفهمیم؟ براساس چه اصولی، این همه درجه‌ی آزادی از کنترل خارج نمی‌شود، بلکه یکدیگر را در حالت کنترل و توازن حفظ می‌کند؟

پیشنهاد من این است که مهم‌ترین نکته این نیست که این بخش‌های بیولوژیک چه هستند، بلکه این است که براساس چه مقیاس زمانی کار می‌کنند. داستان را باید نه براساس جزئیات سازوکارها، که براساس ریتم آن‌ها بازگو کرد.

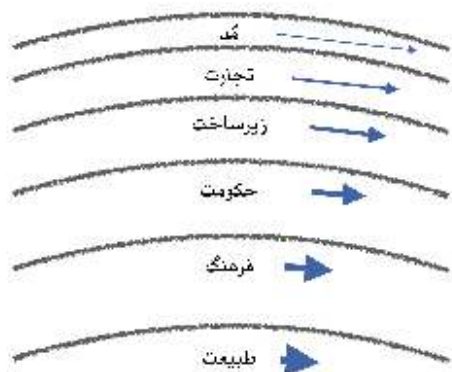
زنجره‌ای از مقیاس‌های زمانی

چند سال پیش، استوارت برند نویسنده‌ی آمریکایی پیشنهاد کرد که برای فهمیدن تمدن، لازم است که چندین لایه را که هم‌زمان با سرعت‌های متفاوت کار می‌کنند، درک کنید.^[۲۲] مُد با سرعت تغییر می‌کند، در حالی که

کسب و کارهای تجاری یک منطقه با آهنگ کندتری تغییر می‌نماید. زیرساخت — از قبیل راه‌ها و ساختمان‌ها — با سرعت آهسته‌تری تکامل می‌یابد. مقررات و قوانین یک جامعه — یعنی حکومت — بسیار آهسته سازگاری پیدا می‌کند، و تلاش می‌کند که همه چیز را در مقابل بادهای تغییر مستحکم سازد. فرهنگ نیز بدون عجله با جدول زمانی مختص خود به پیش می‌رود، و مبتنی بر بنیادهای ژرف داستان و سنت است. در کندترین مقیاس، طبیعت با آهنگی در حد قرن‌ها و هزاره‌ها به پیش می‌رود.

گرچه شاید توجه نداشته باشیم، ولی تمام مقیاس‌ها با یکدیگر در تعامل هستند. لایه‌های سریع‌تر نوآوری‌های جدید خود را به اطلاع لایه‌های کندتر می‌رسانند. لایه‌های کندتر امکان کنترل و ساختار را برای لایه‌های سریع‌تر فراهم می‌کنند. قدرت و کشسانی یک فرهنگ تنها برخاسته از یک لایه سیستم نیست، بلکه حاصل **برهمکنش** آن‌ها است.

اصل لایه‌بندی سرعت برای فکر کردن درباره‌ی مغز نیز مفید است. لایه‌های سرعت در مغز، به جای دامنه‌ی مد تا حکومت و طبیعت، به‌صورت دامنه‌ای از آبشارهای بیوشیمیایی سریع تا تغییر در بیان ژن است. نه تنها سیناپس‌ها تغییر می‌کنند، بلکه بسیاری از پارامترهای دیگر نیز تغییر می‌کنند (محض اطلاع افراد کنجکاو، این‌ها شامل انواع کانال، توزیع کانال‌ها، حالت‌های فسفریلاسیون، شکل زواید نورونی، نرخ انتقال یون، نرخ تولید اکسید نیتریک، آبشارهای بیوشیمیایی، آرایش فضایی آنزیم‌ها، و بیان ژن هستند). اگر این‌گونه جریان‌ها به درستی به هم متصل شوند، یک رویداد گذرا ممکن است ردی به جا بگذارد، زیرا آبشارهای سریع‌تر، آبشارهای کندتر را به جریان می‌اندازند، که آن‌ها هم در نهایت ممکن است فرایندهای کندتر را به حرکت درآورند، و باز آن‌ها تغییراتی تدریجی و ژرف را دامن می‌زنند. به این طریق، تغییرات ناشی از شکل‌پذیری در امتداد یک طیف زمانی پخش می‌شوند، نه اینکه صرفاً به‌صورت تغییرات همه یا هیچ ذخیره شوند. تمام صور شکل‌پذیری با یکدیگر تعامل می‌کنند، و قدرت سیستم از عملکرد هماهنگ لایه‌ها پدیدار می‌شود.^[۳۳]



لایه‌های سرعت.

می‌توانیم نتایج این سیستم چندسرعتی را به طرق مختلف ببینیم. فرض کنید عاشق کسی می‌شوید که ناشنوا است. سعی می‌کنید زبان اشاره یاد بگیرید. هر بار که برای چیزی علامت درست را به کار می‌برید، محبوب‌تان با لبخندی اغواگر به شما پاداش می‌دهد. کاملاً در زبان اشاره مهارت پیدا می‌کنید و تقریباً به حد تسلط کامل می‌رسید، و بعد ناگهان محبوب ناشنوای شما به خارج از کشور سفر می‌کند. دیگر پاداشی برای نشانه‌هایی که در تنهایی با انگشتانتان نشان می‌دهید، دریافت نمی‌کنید. از آنجا که تلاش‌هایتان بازدهی ندارد، سرانجام صحبت کردن به زبان اشاره را از یاد می‌برید. به نظر می‌رسد که داستان در اینجا تمام شده است. ولی سه سال بعد، فرد ناشنوای دیگری به شهر می‌آید. شاید به خاطر حس اندوه و غربتی که دارید، این شخص هم به همان اندازه برایتان جذاب به نظر می‌رسد، از این رو، دوباره تلاش برای استفاده از زبان اشاره را از سر می‌گیرید. افسوس که زبان اشاره را به‌طور کامل از یاد برده‌اید: انگشتان اصلاً یادشان نمی‌آید چکار باید بکنند. غمتان می‌گیرد، چون دفعه‌ی قبل دو ماه طول کشید که زبان اشاره را یاد بگیرید، و مطمئن هستید که دلداری جدیدتان **چندان صبور نیست**. ولی متوجه می‌شوید که این بار خیلی سریع‌تر یاد می‌گیرید. در واقع، ظرف سه روز به راحتی احساسات‌تان را با زبان اشاره بیان می‌کنید. با آنکه شک نداشتید که یادتان رفته، باز هم به همین راحتی در حد پیشرفته یاد گرفتید.

صرفه‌جویی وقت در بار دوم نسبت به بار اول بدان معنا است که جایی از مغز شما آن اطلاعات را حفظ کرده، حتی در طول آن سال‌های تنهایی که هیچ تمرینی نداشتید.^[۲۴] این صرفه‌جویی حاصل از تغییرات کند در بخش‌های عمیق‌تر سیستم است. در بار اول عاشق شدن شما، بخش‌هایی که سرعت بالایی دارند، کار مورد نظر را یاد گرفتند، و با تمرین‌های بیشتر، این تغییرات را به لایه‌های عمیق‌تر انتقال دادند. وقتی که محبوب شما با هواپیما از کشور خارج شد، لایه‌های سریع‌تر خیلی زود رفتارشان را تطبیق دادند. ولی بخش‌های عمیق‌تر در این کار مردد بودند — مایل نبودند که سرمایه‌گذاری طولانی و آهسته‌ای را که برای یادگیری کرده‌اند، دور بیندازند. از این رو، وقتی که ماهروی ناشنوی بعدی از راه می‌رسد، لایه‌های عمیق‌تر از قبل برای زبان اشاره آمادگی دارند، و این موجب صرفه‌جویی در وقت یادگیری می‌شود. مهارتی که فکر می‌کردید یادتان رفته، هنوز هست و در اعماق مدارها جای گرفته است. صرفه‌جویی‌های پنهان در مغز در موقعیت‌های مختلفی رخ می‌دهند، از جمله در فضا. وقتی که یک فضانورد از سفری طولانی در مدار زمین بازمی‌گردد، به همین راحتی نمی‌تواند پس از خارج شدن از کپسول، راهش را بکشد و به کافه‌ی استارباکس برود؛ بلکه باید دوباره یادش بیاید که چگونه در جاذبه‌ی زمین راه برود؛ انگار که دارد از نو یاد می‌گیرد. ولی این یادگیری مجدد به سرعت انجام می‌شود؛ مجبور نیست دوران بچگی را دوباره تکرار کند. در واقع، عملکرد او بلافاصله پس از پرواز نشان‌دهنده‌ی عمق صرفه‌جویی‌های مغز است، و بنابراین، به خوبی می‌توان پیش‌بینی کرد که با چه سرعتی راه رفتن دوباره را یاد خواهد گرفت.^[۲۵]

شناخت لایه‌های سرعت در مغز، مفهوم طرح‌واره را نیز که قبلاً با آن آشنا شدیم، روشن‌تر می‌کند. دوچرخه‌ی عجیبِ دِستین را به خاطر دارید؟ گفتم که بعد از چند ماه صرف وقت برای یاد گرفتن دوچرخه‌سواری با فرمان معکوس، او متوجه شد که دیگر نمی‌تواند دوچرخه‌ی معمولی سوار شود. ولی این مشکل زیاد طول نکشید، و خیلی زود به وضعی رسید که به راحتی می‌توانست از هر کدام از دوچرخه‌ها استفاده کند. اکنون می‌توانیم طرح‌واره را در سطح عمیق‌تری درک کنیم. مسئله این نیست که یادگیری‌های کوتاه‌مدت

جایگزین یکدیگر می‌شوند (من یاد گرفتم که دوچرخه‌ی معکوس را سوار شوم، و حالات برنامه‌ی مربوط به دوچرخه‌ی عادی از بین رفته است). بلکه هر دو برنامه در لایه‌های عمقی وجود دارند. دستین پس از فراگیری، هر دو برنامه را در مدارهای بلندمدت خود ذخیره کرده است، و شرایط محیطی (الان سوار کدام دوچرخه هستم؟) مسیر صحیح را در درون شبکه مشخص می‌کند.

در پایان، برنامه‌هایی که بسیار سودمند هستند، در سطح خود DNA ثبت می‌شوند. نمونه‌ی آن غریزه‌ها هستند — رفتارهای مادرزادی که نیازی به یادگیری آن‌ها نداریم.^[۲۶] این‌ها در مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر از طریق شکل‌پذیری پدید می‌آیند: شکل‌پذیری داروینی گونه‌ها. بنا به انتخاب طبیعی در طول هزاران سال، عموماً آن‌هایی که غرایز آن‌ها به نفع بقا و تولید مثل است، تکثیر پیدا می‌کنند.



یک قرن پیش، یکی از چالش‌ها در راه شناخت حافظه، فقدان فناوری بود. اکنون یکی از چالش‌ها حضور فناوری است — خصوصاً کامپیوترها. انقلاب دیجیتال تمام جنبه‌های زندگی ما را به حدی تغییر داده است که گاه تشبیه‌ها را به سختی می‌توان کنار گذاشت، ولو آنکه انطباق ضعیفی داشته باشد. یکی از واضح‌ترین نمونه‌های این موضوع، کلمه‌ی «حافظه» است. مغز انسان حافظه را مانند کامپیوتر ذخیره نمی‌کند. بلکه مغز حافظه‌ی یک فیلم را بدون کد کردن آن به صورت پیکسل به پیکسل حفظ می‌کند، و ما داستان‌های مورد علاقه‌ی خود را به یاد می‌سپاریم، بدون اینکه آن را کلمه به کلمه کدگذاری کنیم. مثلاً وقتی که کسی لطیفه‌ای را برایتان تعریف می‌کند، تک‌تک کلمات و صرفِ دستوری آن را در فایل‌ی عصبی ثبت نمی‌کنید. بلکه بُبِ مطلب آن را می‌فهمید. اگر دو زبان بلد باشید، ممکن است جوک را به یک زبان بشنوید و آن را به زبان دیگر برای کسی بازگو کنید. جوک به کلمات دقیق آن بستگی ندارد، بلکه وابسته به مفاهیمی است که به‌طور درونی تداعی می‌کند.

ما به جای اینکه پیکسل‌ها یا کلمات را کدگذاری کنیم، محرک‌های جدید را در ارتباط با چیزهای دیگری که یاد گرفته‌ایم، از جمله مفاهیم فیزیکی و

اجتماعی، کدگذاری می‌کنیم. آنچه یاد می‌گیریم، براساس آنچه از قبل می‌دانیم، نمایش داده می‌شود. اگر لیستی از روزهای مهم تاریخ مغولستان را به دو نفر نشان دهیم، در صورتی که یکی از آن‌ها مدل کامل‌تری از مغولستان در ذهن داشته باشد، بهتر خواهد توانست دانستنی‌های جدید را وارد شبکه‌ی دانش کنونی خود کند. نفر دیگر که چیز زیادی درباره‌ی این کشور نمی‌داند و هرگز به آنجا سفر نکرده، داربست چندانی نخواهد داشت که این حقایق جدید را به آن متصل کند.

همان‌طور که گفتیم، در مدل لایه‌های سرعت، لایه‌های آهسته چارچوبی برای لایه‌های سریع فراهم می‌کنند. در نتیجه، تجربه در سنین پایین اهمیت بالایی پیدا می‌کند. این تجربیات بنیانی می‌شود که بعداً همه چیز بر روی آن ساخته می‌شود. اکنون همه چیز از فیلتر چیزهای قدیمی‌تر فهمیده می‌شود. این خواه‌ناخواه سبب می‌شود که برخی از رؤیاهایی که درباره‌ی آینده ابراز شده، غیرممکن باشد. در فیلم ماتریکس، نئو و ترینیتی در پشت بام یک ساختمان به یک بالگرد B-۲۱۲ برخورد می‌کنند. نئو می‌پرسد: «می‌توانی با این بالگرد پرواز کنی؟» ترینیتی پاسخ می‌دهد: «هنوز نه.» بعد به همکاری زنگ می‌زند و درخواست «برنامه‌ی خلبان برای بالگرد B-۲۱۲» می‌کند. همکاری پشت سر هم کلیدهایی را روی مجموعه‌ای از کامپیوترها می‌زند، و ظرف چند ثانیه برنامه به مغز ترینیتی آپلود می‌شود. نئو و ترینیتی سوار بالگرد می‌شوند، و او با مهارت هرچه تمام‌تر بالگرد را در میان ساختمان‌ها هدایت می‌کند.

همه‌مان چنین آینده‌ای را دوست داریم، ولی اتفاق نخواهد افتاد. چرا؟ چون حافظه تابعی است از تمام چیزهایی که قبل از آن آمده است. دانش یک فرد درباره‌ی هدایت بالگرد B-۲۱۲ ممکن است براساس شباهت آن به سوار شدن موتورسیکلت کدگذاری شده باشد. یک فرد دیگر ممکن است با اسب‌سواری بزرگ شده باشد، از این رو، دانش خلبانی او بر پایه‌ی خاطرات حرکتی‌اش از هدایت اسب بنا می‌شود. و باز یک نفر دیگر این دانش را در سیاق یک بازی ویدئویی دوران کودکی ذخیره می‌کند. هر شخص به‌صورت متفاوتی این کار را یاد می‌گیرد، به‌طوری که نمی‌توان مجموعه‌ی استاندارد از دستورالعمل‌ها را استخراج کرد که بتوان به هر مغزی آپلود کرد. به عبارت دیگر، برخلاف

کامپیوتر، «دستورالعمل‌ها» برای هدایت یک ماشین به صورت یک فایل نیست؛ بلکه مرتبط با تمام چیزهایی است که قبلاً در زندگی شما رخ داده است. تجارب قبلی یک شهر درونی حافظه می‌سازد، که شهروند جدید باید انطباق منحصر به فرد خود را در آن بیابد.^[۲۷]



نکته‌ی کلیدی درباره‌ی لایه‌های سرعت، تعامل بین آن‌ها است. به تدریج که رشته‌ی علوم اعصاب به پیش می‌رود، تصور من این است که بسیاری از مسائل بالینی براساس این گونه تعاملات فهمیده خواهد شد. مثلاً جناب دریادار نلسون را به خاطر آورید: پس از آنکه گلوله‌ای به او اصابت کرد، دستش قطع شد، ولی او تا آخر عمر حس می‌کرد که گویی آن دست هنوز هست. گرچه بخشی از قشر مغز که به لمس دست او پاسخ می‌داد، حالا نسبت به لمس صورتش واکنش نشان می‌داد، ولی نواحی پایین دست مغزی هنوز انتظار داشتند که آن قسمت از قشر معرف دست او باشد. به عبارت دیگر، برای لایه‌های کُند عمقی، فعالیت در آن قسمت هنوز به عنوان حس دست تفسیر می‌شد. مانند خیلی از افراد دیگری که قطع عضو دارند، این موجب سردرگمی به صورت حس اندام خیالی می‌شد: او مطمئن بود که دستش هنوز وجود دارد، زیرا لایه‌های عمقی این طور می‌گفتند. سیستم لایه‌ی سرعت برای چیزهایی که با سرعت نرمال تغییر می‌کنند، بهتر عمل می‌کند — ولی تغییر ناگهانی طرح بدن می‌تواند سیستم را به حالت عجیبی ببرد، خصوصاً زمانی که این تغییر با سرعت گلوله‌ی توپ از راه می‌رسد.

نمونه‌ی دیگر آن وضعیت غیر معمولی به نام بیش یادآوری (هیپرتیمزی) است که در آن شخص حافظه‌ی تقریباً کاملی از گذشته‌ی خود دارد: تقریباً هیچ چیزی را فراموش نمی‌کند. هر روزی از گذشته را که ذکر کنید، می‌تواند بگوید هوا چطور بوده، در آن روز چه کاری انجام داده، چه لباسی پوشیده، و چه کسی را دیده است. وقتی که رشته‌ی علوم اعصاب فناوری لازم برای درک کامل این وضعیت (در سطح نورونی و مولکولی) را به دست آورد، تقریباً با اطمینان می‌توان گفت که این وضعیت به عنوان تعاملی بین لایه‌ها تشریح خواهد

شد، مثلاً اینکه لایه‌ها با سرعتی غیرمعمول با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند. از نظر اجتماع، مثل آن است که مثلاً طرفداران مد قدرت بیش از حدی به دست آورند و جدیدترین مدها و طرح‌های خود را مستقیماً از طریق حکومت به خورد مردم بدهند. (در ضمن، گرچه شاید فکر کنید که خیلی عالی است که آدم همه چیز را به یاد بیاورد، ولی افراد دچار بیش‌یادآوری از اینکه نمی‌توانند چیزهای پیش‌پاافتاده را از یاد ببرند، رنج می‌برند. به قول اونوره دو بالزاک: «خاطرات زندگی را زیبا می‌کند، ولی تنها فراموش کردن است که آن را قابل تحمل می‌سازد.»)

و سرانجام، حس‌آمیزی (synesthesia) نیز قابل ذکر است، وضعیتی که در آن تحریک یک حس، به‌طور خودکار موجب تجربیاتی غیرارادی در مسیری دیگر می‌شود. مثلاً یک حرف الفبا، نوعی تجربه‌ی درونی رنگ را برمی‌انگیزد — برای نمونه، حرف *J* حس درونی رنگ ارغوانی را برمی‌انگیزد و یا اینکه حرف *W* رنگ سبز را تداعی می‌کند.

شایع‌ترین فرضیه آن است که حس‌آمیزی ناشی از افزایش ارتباط بین مناطقی از مغز است که در حالت نرمال از هم جدا هستند. ولی من پیش از این فرضیه‌ی دیگری را برای آن پیشنهاد کرده‌ام: اینکه حس‌آمیزی نشان‌دهنده‌ی «شکل‌پذیری ماندگار» است.^[۲۸] فرض کنید که کودک خردسالی یک حرف *J* را به رنگ ارغوانی می‌بیند — مثلاً تابلویی روی دیوار مهد کودک، یا گلدوزی شده روی لحاف، و یا اینکه خودش آن را با مدادش ممی‌نویسد. همان‌طور که دیدیم، وقتی نوروها هم‌زمان فعال هستند — مثلاً کد مربوط به حرف *J* و رنگ ارغوانی — ممکن است قدرت سیناپس تغییر کند. آن‌ها با هم فعال می‌شوند، و لذا با هم مدارسازی می‌کنند. اما در اکثر افراد، ارتباط بین حرف *J* و رنگ‌ها هر بار که آن را با رنگ دیگری می‌بینند، تغییر می‌کند. مثلاً وقتی که این حرف را به رنگ زرد می‌بینند، پیوند بین این حرف و رنگ زرد تقویت می‌شود، و پیوند بین آن و رنگ ارغوانی تضعیف می‌شود. وقتی که حرف *J* را به قدر کافی به رنگ‌های مختلف ببینند، پیوند بین حرف و رنگ متوسط‌گیری می‌شود، به‌طوری که رابطه‌ی خاصی بین حروف و رنگ‌ها باقی نمی‌ماند. پیشنهاد من این است که افراد دچار حس‌آمیزی دارای شکل‌پذیری غیرعادی

هستند؛ به‌طور خاص، وقتی که شکل‌پذیری انجام شد، توانایی کمتری برای تغییر دادن آن دارند. وقتی که یک پیوند اولیه بین یک حرف و یک رنگ برقرار شد، برای همیشه می‌ماند.

چطور می‌توان این را آزمایش کرد؟ چرا که وقتی به رنگ‌های الفبا در یک فرد دچار حس‌آمیزی نگاه می‌کنید، با فرد دیگر کاملاً متفاوت است. پس از کجا می‌توان فهمید که آیا چیزی که در دوران کودکی دیده‌اند، در ذهن آن‌ها جای گرفته است؟

به‌منظور آزمودن این فرضیه، من مجموعه‌ای آزمون‌های حس‌آمیزی را ساخته‌ام،^[۲۹] که یک سنجش آنلاین برای تأیید و اندازه‌گیری حس‌آمیزی است. من داده‌ها را از هزاران شرکت‌کننده جمع‌آوری و اعتبارسنجی کردم، و به‌همراه دو تن از همکارانم در دانشگاه استنفورد، الفباهای رنگی را از ۶,۵۸۸ فرد دچار حس‌آمیزی تحلیل کردم. نتیجه‌ی این تحلیل، ما را بسیار متعجب کرد. گرچه نگاشت حروف به رنگ‌ها در میان اکثر شرکت‌کنندگان کمابیش تصادفی بود، ولی صدها نفر از آن‌ها الگوی تقریباً یکسانی داشتند: *A* قرمز بود، *B* نارنجی، *C* زرد، *D* سبز، *E* آبی، *F* ارغوانی، و بعد این چرخه دوباره با رنگ قرمز برای *G* تا آخر تکرار می‌شد.^[۳۰] و باز عجیب‌تر آنکه تمام افراد حس‌آمیز که واجد این الگوی خاص بودند، بین سال‌های اواخر دهه‌ی ۱۹۶۰ و اواخر دهه‌ی ۱۹۸۰ به دنیا آمده بودند. در این پنجره‌ی زمانی، بالغ بر ۱۵ درصد حس‌آمیزان رابطه‌ی یکسانی بین حروف و رنگ‌ها داشتند. هیچ‌کدام از افرادی که قبل از سال ۱۹۶۷ متولد شده بودند، این الگو را نداشتند، و متولدان دهه‌ی ۱۹۹۰ به بعد هم تقریباً هیچ‌کدام واجد این الگو نبودند.

از قضای روزگار، معلوم شد که این رنگ‌ها همان رنگ‌های مجموعه‌ی آهن‌رباهای فیشِر-پرایس است که بین سال‌های ۱۹۷۱ و ۱۹۹۰ تولید می‌شد و مردم در سراسر آمریکا آن‌ها را به یخچال‌های خود می‌چسبانند. خود این آهن‌رباها موجب حس‌آمیزی نشده **بود**؛ بلکه در افرادی که استعداد حس‌آمیزی داشتند، ارتباط بین حروف و رنگ‌ها براساس این آهن‌رباها شکل گرفته بود.^[۳۱] حس‌آمیزی نیز مانند بیش‌یادآوری منعکس‌کننده‌ی نوعی ماندگاری در لایه‌های سرعت است: لایه‌های سریع دستور کار خود را با سرعتی بیشتر از

معمول به لایه‌های عمقی منتقل می‌کنند. گرچه بیش‌یادآوری و حس‌آمیزی بیماری محسوب نمی‌شوند، ولی از نظر آماری غیرمعمول هستند — بدان معنا که سرعت تعامل بین لایه‌های سرعت عصبی در اکثریت جمعیت طی تکامل بهینه‌سازی شده است.



A	قرمز	N	نارنجی
B	نارنجی	O	زرد
C	زرد	P	سبز
D	سبز	Q	آبی
F	آبی	R	ارغوانی
F	ارغوانی	S	قرمز
G	قرمز	I	نارنجی
H	نارنجی	U	زرد
I	زرد	V	سبز
J	سبز	W	آبی
K	آبی	X	ارغوانی
L	ارغوانی	Y	قرمز
M	قرمز	/	نارنجی

بسیاری از افراد دچار حس‌آمیزی متولد شده بین اواخر دهه‌ی ۱۹۶۰ و اواخر دهه‌ی ۱۹۸۰، حروف الفبا را با رنگ‌هایی حس می‌کنند که منطبق بر رنگ‌های مجموعه‌ی آهن‌رباهای یخچالی فیشر-پرایس است. یکی از شرکت‌کنندگان عکس‌هایی داشت که نشان می‌داد او در دوران کودکی یک بسته از این آهن‌رباها را دریافت کرده است.

انواع متعدد حافظه

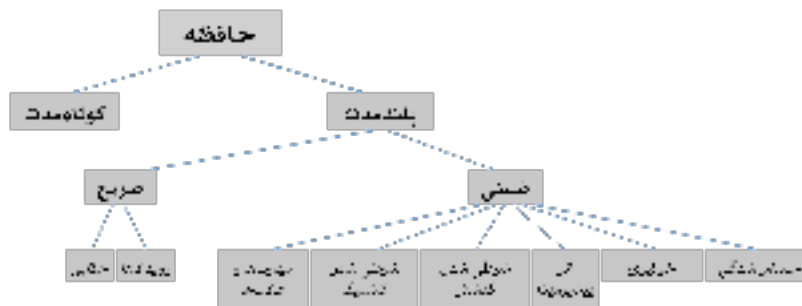
در این فصل، درباره‌ی حافظه به گونه‌ای صحبت کردیم که انگار فقط یک نوع حافظه داریم. ولی حافظه چهره‌های متعدد دارد.

محض نمونه، جودی رابرتس را در نظر بگیرید که تا سال ۱۹۸۵ به عنوان ژورنالیست در ایالت واشنگتن کار می‌کرد. یک روز، او ناپدید شد. بستگانش با جدیت دنبالش گشتند، و پس از چندین سال، با تأسف فراوان به این نتیجه رسیدند که او مرده است.

ولی این‌طور نبود. او پنج روز پس از ناپدید شدنش در فاصله‌ی هزار مایلی آنجا در اورورا در ایالت کلرادو پیدا شد، در حالی که در مرکز خریدی سرگردان بود. هیچ‌گونه مدارک شناسایی با خود نداشت، فقط سوئیچ ماشینی را داشت که معلوم نشد کجا است. پلیس او را به بیمارستان برد. جودی نمی‌توانست هویت خود را به یاد آورد، از این رو، نام جین دی را برای خود برگزید، و در یک رستوران فست‌فود مشغول کار شد، و در دانشگاه دنور ثبت‌نام کرد. سرانجام به آلاسکا نقل‌مکان کرد، و در آنجا با یک ماهی‌گیر ازدواج کرد، به‌عنوان طراح وب مشغول کار شد، و دو بار فرزندان دوقلو به دنیا آورد.

دوازده سال بعد، یکی از آشنایان عکس جودی را در یک گزارش خبری دید و او را شناخت. جودی دوباره در مقابل چشمان اشک‌بار و سپاسگزار خانواده‌اش به آن‌ها ملحق شد. ولی آن‌ها را به یاد نمی‌آورد. رفتارش مؤدبانه بود، ولی گرم نمی‌گرفت. پدرش به خبرنگارها گفت: «او اساساً همان شخص سابق است. ما به یک معنا دوباره او را به دست آوردیم.»^[۳۲]

نکته‌ی کلیدی که درباره‌ی داستان‌ها افرادی مانند جودی باید به آن توجه کنیم، این است که او هنوز هم به یاد داشت که چگونه انگلیسی صحبت کند، رانندگی کند، چطور معاشرت کند، کار پیدا کند، پیشخدمت رستوران شود، نامه‌ی عاشقانه بنویسد، و چگونه از فرزندانش محافظت کند. فقط زندگی‌نامه‌ی خودش یادش نمی‌آمد. چنین مواردی (که تعدادشان هم کم نیست) ما را به این برداشت می‌رسانند که حافظه انواع متعددی دارد. برخلاف نگاه اول، حافظه فقط یک نوع نیست، بلکه متشکل از زیرنوع‌های مختلفی است. در وسیع‌ترین سطح، حافظه‌ی کوتاه‌مدت را داریم (مثلاً به یاد آوردن شماره‌ی تلفن تنها تا مدتی که آن را شماره‌گیری کنید)، و حافظه‌ی بلندمدت (مثلاً دو سال قبل در تعطیلات چه کارهایی انجام دادید). در دسته‌ی حافظه‌ی بلندمدت، می‌توانیم حافظه را به دو نوع حافظه‌ی اخباری (مثلاً اسامی و حقایق) و حافظه‌ی غیراخباری (نحوه‌ی سوار شدن به دوچرخه، چیزی که می‌دانید چطور انجام دهید، ولی نمی‌توانید بیان کنید) تقسیم کنیم. در دسته‌ی غیراخباری، چندین زیرنوع وجود دارند، از قبیل به یاد آوردن نحوه‌ی تایپ کردن سریع، یا اینکه چرا وقتی کسی روکش آب‌نباتی را باز می‌کند، دهانتان آب می‌افتد.



انواع مختلف حافظه.

نخستین گام در فهمیدن وضعیت جودی این است که توجه کنیم که انواع مختلف ساختارهای مغز، انواع متفاوتی از یادگیری و حافظه را امکان‌پذیر می‌سازند. آسیب به هیپوکامپ و ساختارهای مجاور آن بر تشکیل خاطرات اخباری جدید تأثیر می‌گذارد (امروز صبح صبحانه چی خوردیم؟)، ولی تأثیری بر خاطرات غیراخباری ندارد (مثلاً نحوه‌ی حرف زدن، آواز خواندن، راه رفتن). بدین خاطر است که هنری مولیسون که دچار فراموشی شده بود، می‌توانست کارهای روزمره را به خوبی انجام دهد، و مشکلی در مسواک زدن دندان‌ها، رانندگی ماشین، و یا حرف زدن با دیگران نداشت. برای یاد گرفتن مهارت‌های حرکتی، خصوصاً مواردی که مستلزم تعادل و هماهنگی است، نواحی دیگری از مغز مورد نیاز است. برای مرتبط کردن اعمال حرکتی با پاداش‌های بعدی، نواحی دیگری اهمیت دارد. و باز برای تغییرات حافظه در ارتباط با شرطی‌شدگی ناشی از ترس نواحی دیگری حائز اهمیت است، و ساختارهای پاداش مختلفی موجب یادگیری راهبردهای موفق برای آذوقه‌یابی می‌شوند. لیست ساختارهای مغزی و ارتباط آن‌ها با یادگیری و حافظه بسیار طولانی است و مرتب هم در حال افزایش است، و از شرح حال جودی و هنری می‌فهمیم که سلامت یک زیرسیستم خاص لزوماً برای کارکرد زیرسیستم‌های دیگر ضروری نیست. شاید شرح زندگی خودتان یا دتان برود، ولی این ارتباطی با توانایی شما برای یاد گرفتن و به یاد سپردن مهارت‌های حرکتی جدید ندارد.



مثال زیر را در نظر بگیرید: شما از زمان کودکی پرندگان زیادی دیده‌اید، از این رو، مغز شما تعمیم داده که جانورانی که پر دارند، می‌توانند پرواز کنند. ولی از طرف دیگر، شترمرغ‌ها را در باغ وحش دیده‌اید، و لذا این استثنا را برای قاعده‌ی مذکور به خاطر سپرده‌اید. به همین ترتیب، شاید ببینید که نام شترمرغ باغ وحش دورا است، ولی این برای شترمرغ‌های دیگری که شاید ببینید، مصداق نخواهد داشت.

چند سال پیش، افرادی که شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌ساختند، با مشکلاتی در ارتباط با این تمایز بین تعمیم‌ها و نمونه‌های خاص برخورد کردند. آن‌ها می‌توانستند شبکه‌ای بسازند که تعمیم‌ها را یاد می‌گرفت (چیزهایی که پر دارند، پرواز می‌کنند)، یا اینکه می‌توانستند شبکه‌ای بسازند که مجموعه‌ای از مثال‌های خاص را حفظ می‌کرد (پرنده‌ای که دورا نام دارد، پرواز نمی‌کند، ولی پرنده‌ای که پُل نام دارد، پرواز می‌کند). ولی نمی‌توانستند هر دو کار را بکنند. شبکه یا با برخورد با هزاران مثال، پارامترهای خود را به کُندی تغییر می‌داد، یا اینکه همه چیز را بر اثر مشاهده‌ی مثال‌های خاص، به سرعت تغییر می‌داد.

چگونه یک مغز واحد می‌تواند هم‌زمان در هر دو مقیاس زمانی یاد بگیرد؟ هرچه باشد، هر کدام از مقیاس‌های زمانی مختلف باید انواع حقایق متفاوتی را درباره‌ی جهان به خاطر بسپارد. بعضی وقت‌ها باید تعمیم انجام شود (لیمو زرد است)، در حالی که بعضی وقت‌ها باید چیزهای خاصی به یاد سپرده شود (لیموی توی کشوی یخچال من پوسیده است).

این ناسازگاری ظاهری اهداف، سرنخ مهمی را به دست می‌دهد.^[۳۳] مغز برای اینکه هر دو کار را خوب انجام دهد، باید سیستم‌های متفاوتی با سرعت‌های متفاوت برای یادگیری داشته باشد: یکی برای استخراج قواعد عمومی درباره‌ی محیط (یادگیری کند)، و یکی برای حافظه‌ی رویدادی (یادگیری سریع). پیشنهاد ما این است که این دو سیستم هیپوکامپ و قشر هستند: هیپوکامپ سریع تغییر می‌کند (بنابراین، از روی مثال‌ها سریع یاد می‌گیرد)، ولی قشر مدت بیشتری وقت صرف می‌کند تا عمومیت‌ها را به آهستگی استخراج کند. اولی به سرعت تغییر می‌کند و موارد خاص را به یاد می‌سپارد، در حالی که دومی به آهستگی تغییر می‌کند، و نیاز به مثال‌های فراوان دارد. با این ترفند، مغز می‌تواند

از رویدادهای خاص یادگیری سریع داشته باشد (این دکمه ماشین کرایه‌ای را روشن می‌کند)، و در عین حال، به آهستگی آمارها را نیز از تجربیات استخراج می‌کند (اکثر گل‌ها در بهار شکوفامی‌شوند).^[۳۴]

تغییر بر اثر سابقه

زمانی که فعالیت از درون مغز عبور می‌کند، ساختار را تغییر می‌دهد. از دیدگاه جنگل نورونی عظیم درون جمجمه‌ی شما، مشکل سازمانی بسیار بزرگ است: دستگاه عصبی باید خودش را به‌طور فیزیکی تغییر دهد تا به‌طور بهینه منعکس‌کننده‌ی جهانی باشد که در آن جای گرفته است. هر کدام از تغییرات باید سهم مناسبی در جای گرفتن دانش در شبکه داشته باشد، و تغییرات باید به‌صورتی باشد که زمانی که لحظه‌ی مناسب در آینده فرارسد، تفاوتی در رفتار ایجاد کند. یک خطای ساده‌انگارانه درباره‌ی حافظه این است که تصور می‌شود که حافظه تنها متکی بر یک نوع سازوکار تغییر است. داستان کلاسیک تقویت و تضعیف سیناپس ما را خیلی جلو برده است، و شبکه‌های عصبی مصنوعی که از این اصل استفاده می‌کنند، به موفقیت‌های مهندسی درخشانی دست یافته‌اند. ولی حافظه چیزی بیش از تنظیم کردن درجه‌ی سیناپس‌ها در یک نمودار اتصالی بزرگ است. همان‌طور که دیدیم، مدل‌های سیناپسی ساده با ورود داده‌های جدید، خیلی زود ظرفیت بازنمایی داده‌های قدیمی را از دست می‌دهند. چگونگی زوال حافظه — یعنی اینکه خاطرات قدیمی‌تر ثبات بیشتری دارند — راز مقیاس‌های زمانی مختلف برای تغییر را برملا می‌کند.

مدل سیناپسی می‌توانست مدل راحتی برای متخصصان علوم اعصاب و مهندسان هوش مصنوعی باشد، ولی تقریباً تردیدی نیست که طبیعت به این صورت عمل نمی‌کند. بلکه تغییرات زیربنای حافظه به‌طور گسترده‌ای در شمار پهناور نورون‌ها، سیناپس‌ها، مولکول‌ها، و ژن‌ها بروز می‌کند. به‌طور مشابه، فقط تصور کنید که بیابان چگونه باد را به یاد می‌سپارد: در شیب ریگزارها، در شکل صخره‌ها، و در فشارهای تکاملی که بال حشرات و برگ گیاهان آن را شکل می‌دهد.

برای پیشرفت در شناخت حافظه، لازم است که دیدگاهی کاملاً واقع‌گرایانه درباره‌ی پدیده‌ی مورد مطالعه داشته باشیم. گرچه شبکه‌های عصبی مصنوعی

کنونی موفقیت‌های خیره‌کننده‌ای به دست آورده‌اند (مثلاً می‌توانند عکس‌ها را با مهارتی فراتر از انسان‌ها از هم تمییز دهند)، ولی مشخصه‌ی اساسی حافظه‌ی انسانی را دارا نیستند. به نظر من، غنای حافظه‌ی ما حاصل یک آبشار بیولوژیک از مقیاس‌های زمانی است. اطلاعات جدید بر روی اطلاعات قبلی بنا می‌شود، و در چارچوب محدودیت‌های تجربه‌ی قبلی جای می‌گیرد. من خیلی از دانشجویان پزشکی را می‌شناسم که می‌ترسند که اگر یک مطلب جدید یاد بگیرند، مطلب دیگری از حافظه‌شان پاک خواهد شد. خوش‌بختانه، این مدل حجم ثابت صحیح نیست. بلکه با هر چیز جدیدی که یاد می‌گیرید، مطلب مرتبط بعدی را بهتر خواهید توانست فراگیرید.

۱۱ | گرگ و مریخ نورد

اخیراً جایی خواندم که مدرسه‌ای در کالیفرنیا تمام برنامه‌های هنر، موسیقی، و تربیت بدنی خود را تعطیل کرده است. حالا چرا بودجه‌ها را این قدر کاهش داده‌اند؟ زیرا چند سال قبل تصمیم گرفته‌اند که تمام پول‌ها را صرف یک مرکز کامپیوتر پیشرفته برای دانش‌آموزان کنند. آن‌ها معادل ۳۳۰ میلیون دلار کامپیوتر، سرور، مانیتور، و لوازم جانبی خریدند. با جار و جنجال فراوان، این مرکز آموزشی خود را مفتخرانه افتتاح کردند.

چند سال بعد، تمام آن تجهیزات کامپیوتری قدیمی شده بود. تراشه‌های سریع‌تری به بازار آمده بود، ذخیره‌سازی از دیسک هارد به فضای ابری منتقل شده بود، و نرم‌افزارهای جدید دیگر با سخت‌افزارهای قدیمی سازگار نبود. کمتر از یک دهه پس از خرید اولیه، مجبور شدند تمام آن تجهیزات را دور بریزند. نور چشمی مدرسه — که هنرهای آفرینشی و آمادگی جسمانی را قربانی تأمین مخارج آن کرده بودند — عمر کوتاهی داشت و حالا فقط خاطره‌ی پرهزینه‌ای بود که به زباله‌دانی افکنده شده بود.

این ماجرا مرا به فکر فروبرد. چرا ما هنوز هم دستگاه‌های سخت‌افزاری می‌سازیم که در نهایت باید دور انداخته شوند؟ همین که مدار را در دستگاه لحیم کردیم، بلافاصله تاریخ انقضای آن را برای تعیین می‌کنیم.

اگر دانش‌پژوهان نکته‌بینی برای سیستم‌های بیولوژیک اطراف خود باشیم، می‌توانیم از اصول مدارسازی پویا استفاده کنیم. فکرش را بکنید که وقتی پای گرگی در تله گیر می‌کند، پایش را با دندان می‌کند و لنگ‌لنگان فرار می‌کند. برعکس آن، مریخ‌نورد اسپیریت را در نظر بگیرید. این مریخ‌نورد در تاریخ ۴ ژانویه ۲۰۰۴ روی سطح سیاره‌ی سرخ فرود آمد، و سال‌ها با موفقیت در

آن گردش کرد. ولی بعد در اواخر سال ۲۰۰۹، این وسیله‌ی نقلیه‌ی روباتیک چهارصد پوندی (۱۸۰ کیلوگرم) در خاک گیر کرد. نمی‌توانست از آن بیرون بیاید، که یک دلیلش هم این بود که چرخ راست جلوی آن از کار افتاده بود. به علت گیر کردن در خاک مریخ، نمی‌توانست پانل‌های خورشیدی را به طرف خورشید بچرخاند. در نتیجه، مریخ‌نورد توان الکتریکی خود را از دست داد، و طی زمستان دچار آسیب برگشت‌ناپذیر شد. در روز ۲۲ مارس ۲۰۱۰، غزل خداحفاظی‌اش را برای زمین خواند و نابود شد.



اسپیریت که مریخ‌نوردی عالی بود، اکنون زباله‌ای ۴۰۰ میلیون دلاری در فضای برون‌زمینی است.

اسپیریت با کوششی قهرمانانه از مدت برنامه‌ریزی شده‌اش هم بیشتر عمر کرد. ولی اگر کلنی‌های انسانی را به مریخ می‌فرستادیم و چند سال بعد تنها تلی از استخوان از آن‌ها به جا می‌ماند، خیلی ناراحت می‌شدیم. منظور، انتقاد کردن از کارهای مهندسی خارق‌العاده‌ی ناسا نیست. مشکل آن است که ما هنوز هم روبات‌های مان را با مدارسازی ایستا می‌سازیم. در حال حاضر، اگر روباتی یک چرخ یا محور یا بخشی از مادربرد خود را از دست بدهد، کار تمام است. ولی در سرتاسر قلمرو جانوران، معمولاً وقتی که موجودی آسیب می‌بیند، باز هم به زندگی خود ادامه می‌دهد. جانور می‌لنگد، پایش را روی زمین می‌کشد، لی‌لی می‌کند، **وزنش را روی پای دیگر می‌اندازد**،

هر کاری لازم باشد می‌کند تا بتواند همچنان در جهت اهداف خود به جلو برود.

گرگی که به تله افتاده، پایش را با دندان قطع می‌کند، و مغزش به این طرح بدنی نامعمول عادت می‌کند — زیرا بازگشت به محل امن برای سیستم پاداش آن حائز اهمیت است. جانور نیاز به غذا، پناهگاه، و حمایت سایر اعضای گروه دارد. پس مغز آن، راه‌حلی برای رفتن به آنجا پیدا می‌کند.

فرق بین مریخ‌نورد و گرگ، فرق بین اطلاعات و اطلاعات هدفمند است. برخلاف مریخ‌نورد، گرگ به دام افتاده براساس جاه‌طلبی‌هایی عمل می‌کند: فرار کردن از خطر و رسیدن به محل امن. زیربنای اعمال و مقاصد گرگ، تهدید صیادان و نیازهای شکم او است. گرگ در راستای اهداف خود حرکت می‌کند. در نتیجه، مغز گرگ اطلاعات مربوط به محیط و توانایی اندام‌های حرکتی خود را دریافت می‌کند، و این قابلیت‌ها را به مفیدترین اعمال ترجمه می‌کند.

گرگ لنگ‌لنگان به مسیر خود ادامه می‌دهد، زیرا جانوران با آسیب متوسط از کار نمی‌افتند. ماشین‌های ما هم نباید این‌طور باشند.

مادر طبیعت می‌داند که مدارسازی ایستا برای مغز گرگ فایده‌ای ندارد. طرح بدن تغییر می‌کند. محیط تغییر می‌کند. رابطه‌ی پیچیده‌ی بین قابلیت‌ها و اعمال تغییر می‌کند. به جای مدارهای از پیش تعیین شده، نقشه‌ی بهتر این است که سیستمی اطلاعات‌گرا بسازیم که همه چیز را در جا بهینه‌سازی می‌کند، و خود را تعدیل می‌کند تا در رسیدن به اهدافش کارا باشد. برخی از اهداف بلندمدت هستند (مانند بقا)، و بعضی‌ها کوتاه‌مدت (انجام حرکات گازانبری برای گرفتن گوزن فراری)؛ در تمام موارد، مغز خودش را در جهت آن هدف تعدیل می‌کند.

روبات‌های ما چگونه باید باشند تا بعد از آسیب دیدن همچنان به حرکت ادامه دهند؟ باید بتوانند بدنی با طرح تغییر یافته را به حرکت درآورند، و انگیزه‌ای برای خوردن، ارتباط برقرار کردن، و زنده ماندن داشته باشند. وقتی که این خصوصیات را داشته باشند، حتی اگر چرخشی را از دست بدهند یا قطعاتی از آن‌ها آسیب ببینند، مدارهای باقی‌مانده‌ی خود را تغییر می‌دهند تا کاری را که شروع کرده‌اند، تمام کنند. تصور کنید که مریخ‌نورد چرخشی را که در زمین گیر

کرده، با اره جدا می‌کند، و راهی پیدا می‌کند تا با همان سه چرخ باقی‌مانده به حرکت ادامه دهد. بر پایه‌ی چنین اصولی، می‌توان ماشین‌هایی خودتنظیم‌شونده ساخت که براساس ورودی و اهدافی که دارند، مدارهایشان را سازگار می‌کنند. وقتی که چرخ‌های خراب شد، یا محوری شکست، و یا برخی از مدارها پاره شد، مدارهای باقی‌مانده ترمیم‌های لازم را انجام می‌دهد تا کاری را که شروع کرده، به پایان برساند.

درست همان گونه که مدارسازی ایستا برای گرگ فایده‌ای ندارد، در مورد خواهران پولگار یا اسحاق پرلمان یا سرینا ویلیامز هم همین طور است. جهان پیچیده‌تر از آن است که امکان پیش‌بینی آن وجود داشته باشد، و امکان ندارد بتوان زن‌ها را به گونه‌ای برنامه‌نویسی کرد که با تمام جزئیات ظریف جهان جور دربیاید. چرا که همه چیز همیشه در جریان است: بدن، منابع غذا، و نگاشت بین ورودی‌ها، قابلیت‌ها، و خروجی‌ها. به جای مدارهای از قبل تعیین شده، رویکرد بهتر ساختن سیستمی است که فعالانه خود را بهبود می‌بخشد و تعدیل می‌کند تا به اهداف خود برسد.



چندین دهه است که علوم اعصاب از خدمات رشته‌های مهندسی بهره گرفته است، از اسیلوسکوپ و الکتروود گرفته تا دستگاه‌های تصویربرداری تشدید مغناطیسی. شاید سرانجام وقت آن رسیده باشد که جهت این تأثیرگذاری معکوس شود، تا مهندسی هم بتواند از زیست‌شناسی بهره بگیرد.

ما با مهندسی امروزی در اتاق‌های بسیار تمیز در شرکت‌های بسیار ثروتمند، هرگز نمی‌توانیم به گرد آنچه در دور و برمان می‌بینیم، برسیم: موجودات متحرک از سگ تا دلفین، از انسان تا مگس مرغ، از پاندا تا پانگولین. این موجودات نیازی ندارند که آن‌ها را به پریش وصل کنید: خودشان منبع انرژی خود را پیدا می‌کنند. از بلندی‌ها بالا می‌روند، می‌دوند، فراز و نشیب‌ها را می‌پیمایند، پرش می‌کنند، شنا می‌کنند، می‌خزند، و با کمی تلاش سوار شدن به اسکیت‌بورد، تخته‌موج، و اسنوبورد را هم یاد می‌گیرند. همه‌ی این‌ها از آن روی امکان‌پذیر است که مادر طبیعت همواره با زن‌ها بازی می‌کند تا حسگرها و ماهیچه‌های جدیدی بسازد،

و مغز راهی پیدا می‌کند تا از آن‌ها بهره بگیرد. و این موجودات حتی در صورتی که آسیب ببینند — از شکستگی پا گرفته تا برداشتن یک نیمکره‌ی مغز — باز هم به کار خود ادامه می‌دهند. دستگاه‌های ما نه انعطاف‌پذیری موجودات زنده را دارند، نه استحکام آن‌ها را.

پس چرا ما تا حالا دستگاه‌های مبتنی بر مدارسازی پویا نساخته‌ایم؟ نباید خیلی به خودمان سخت بگیریم: مادر طبیعت میلیاردها سال وقت داشته تا تریلیون‌ها آزمایش را به‌طور موازی انجام دهد. ما به سختی می‌توانیم چنین مقیاس زمانی بزرگی را به تصور درآوریم، یا در ذهن‌مان مجسم کنیم که چه موجودات بی‌شماری با مغزهای خود سازگاری یافته‌اند و روی زمین راه رفته‌اند، یا در آب‌های آن شنا کرده‌اند، یا در آسمان‌های آن پرواز کرده‌اند.

پس مدتی طول خواهد کشید تا بتوانیم به آن حد برسیم. خبر خوب این است که کم‌کم داریم رمزهای اطراف‌مان را می‌گشاییم.

حالا چگونه می‌توانیم اصول مدارسازی پویا را به‌صورت ژرف‌تری در چیزهایی که می‌سازیم، به کار بگیریم؟ پاسخ اول این است که باید از چیزهایی که مادر طبیعت ساخته، تقلید کنیم. نمونه‌ی آن حسگرهایی است که بدن نوعی از ماهیان نابینای غارزی به نام ماهی کور را می‌پوشاند: این ماهی با شناسایی فشار و جریان آب، می‌تواند ساختارها را در ظلمات آب‌های اطراف خود تشخیص دهد. مهندسان در سنگاپور با الهام از این جانور، نمونه‌ی مصنوعی این حسگرها را برای زیردریایی‌ها ساخته‌اند.^[۱] چرا که استفاده از چراغ در زیردریایی انرژی بالایی می‌برد و اکوسیستم را نیز به هم می‌زند. هدف آن است که زیردریایی با استفاده از مجموعه‌ای از حسگرهای کوچک کم‌مصرف با الهام از ماهی کور، بتواند در تاریکی با استفاده از جریان‌های آب «بیند».

گرچه تقلید حسگرهای زیستی شروع خیلی خوبی است، ولی هنوز اول کار است. چالش بزرگ‌تر، طراحی یک دستگاه عصبی است که امکان استفاده از دستگاه‌های جازدنی جدید را داشته باشد. این چه فایده‌ای خواهد داشت؟ برای نمونه، مشکلاتی را که ناسا مرتباً در ایستگاه فضایی بین‌المللی (ISS) با آن‌ها روبه‌رو می‌شود، در نظر بگیرید. همکاری بین کشورها از اصول این کار است، ولی در ضمن، ریشه‌ی یکی از مشکلات مهندسی نیز هست. روس‌ها

یک مدول را می‌سازند، آمریکایی‌ها مدول دیگری را به آن وصل می‌کنند، و چینی‌ها هم در مدول دیگری مشارکت می‌کنند. ISS همواره در هماهنگ‌سازی حسگرهای این مدول‌ها که از کشورهای مختلف اهدا شده‌اند، مشکل دارد. حسگرهای حرارتی آمریکایی بعضی وقت‌ها با حسگرهای ارتعاشی روسی جور در نمی‌آیند، و حسگرهای گاز چینی برای ارتباط برقرار کردن با بقیه‌ی قسمت‌های ایستگاه مشکل دارند. ISS همواره مجبور است مهندسان را بفرستد تا این مشکلات را مکرراً حل کنند.

راه درست حل این مسئله، یک بار برای همیشه، تقلید کردن از مادر طبیعت است. چرا که طبیعت هزاران حسگر جدید را به راه انداخته است، از چشم و گوش گرفته تا بینی و حسگرهای فشار و حفره‌های حرارتی و گیرنده‌های الکتریکی و مغناطیسی و امثال آن‌ها. در رهگذر تکامل، طبیعت تلاش خود را مصروف طراحی یک دستگاه عصبی کرده که می‌تواند اطلاعات را از این حسگرها استخراج کند، بدون آنکه لازم باشد که چیزی درباره‌ی آن‌ها به آن گفته شود (فصل ۴). طراحی این حسگرها ممکن است کاملاً متفاوت باشد، ولی هیچ مشکلی در کار کردن مستقیم با یکدیگر ندارند. چرا؟ زیرا مغز در جهان حرکت می‌کند، به دنبال همبستگی بین جریان‌های داده‌ای ورودی مختلف می‌گردد، و می‌فهمد که چگونه از اطلاعات ورودی استفاده کند.

ما چگونه می‌توانیم از این رویکرد بهره بگیریم؟ یکی از قوی‌ترین تکنیک‌های مغز این است که یک عمل حرکتی را فعال می‌کند و بازخورد آن را می‌سنجد. نظر من این است که ISS باید نه تنها با اجزای حسی خود، بلکه با اجزای حرکتی — یعنی چگونگی استفاده از بدنش — نیز آزمایش کند. چرا که این ایستگاه مبتنی بر اصل طراحی مدولار است، بدان معنا که طرح بدن آن همواره در حال تغییر خواهد بود. همان گونه که در فصل ۵ دیدیم، مغز در هر بدنی که قرار گرفته باشد، یاد می‌گیرد که آن را به حرکت درآورد. هیچ‌گونه برنامه‌نویسی قبلی مورد نیاز نیست، فقط تاتی‌تاتی حرکتی: یعنی حرکات مختلف را آزمایش می‌کند و نتایج آن‌ها را تماشا می‌کند. به این طریق، مغز خودش طرز کار بدن را می‌فهمد. با همین تکنیک، ISS نیز می‌تواند حرکات انفرادی مختلفی را انجام دهد تا وضعیت اتصالات جدید و قابلیت‌های مربوط به آن‌ها را بفهمد.

آینده‌ی خودتنظیمی بدن معنا است که ما ماشین‌هایی را طراحی خواهیم کرد که تمام‌شده و کامل نیستند، بلکه براساس تعامل با جهان، الگوی مدارهای خود را کامل خواهند کرد.

وقتی که سیگنال‌های ورودی و خروجی هماهنگ باشند، هر نوع جادویی می‌تواند اتفاق بیفتد. به‌عنوان مثال، یک ریزتراشه‌ی پرتفردار به نام آرایه‌ی دروازه‌ی برنامه‌پذیر در محل (یا FPGA) را که در بسیاری از محصولات مورد استفاده قرار می‌گیرد، در نظر بگیرید. تراشه‌ی بسیار جالبی است، ولی یکی از مشکلات اصلی در این تراشه‌ها هماهنگ کردن زمان‌بندی تمام سیگنال‌هایی است که در درون آن ردوبدل می‌شود. صفرها و یک‌ها با سرعتی نزدیک به سرعت نور در تراشه جابه‌جا می‌شود، و اگر یک بیت از یک قسمت تراشه به‌طور اتفاقی قبل از یک بیت از قسمت دیگر برسد، مصیبت به بار خواهد آمد: کل کارکرد منطقی تراشه مختل می‌شود. زمان‌بندی در ریزتراشه‌ها خودش رشته‌ی علمی کاملی است؛ کتاب‌های قطوری در این زمینه نوشته شده است.^[۲] از نگاه یک زیست‌شناس، راه‌حل ساده‌ای برای این مشکل وجود دارد: مغز هم با همان چالشی مواجه است که در تراشه وجود دارد: مغز با جریان ثابتی از سیگنال‌های ورودی (از دستگاه‌های حسی و اعضای داخلی) و جریانی از سیگنال‌های خروجی (حرکات اندام‌ها) سر و کار دارد. در اینجا هم زمان‌بندی خیلی اهمیت دارد. اگر درست قبل از آنکه پای‌تان را به زمین بگذارید، صدای شکستن شاخه‌ای را بشنوید، بهتر است دور و بر خود را از نظر وجود شکارچیان واریسی کنید. ولی اگر صدای شکستن شاخه درست بعد از زمین گذاشتن پای‌تان باشد، این یک پیامد حسی طبیعی برای اعمال خود شما است، و نیازی نیست وحشت‌زده شوید. چالش مغز آن است که به هیچ طریقی نمی‌توان زمان‌بندی مورد انتظار هر کدام از حواس را از قبل برنامه‌نویسی کرد، چرا که زمان‌بندی آن‌ها ممکن است تغییر کند. وقتی که از یک محل روشن وارد یک محل تاریک می‌شوید، سرعت ارتباط چشمان شما با مغزتان تقریباً به اندازه‌ی یک دهم ثانیه کندتر می‌شود. وقتی که هوا گرم است، در مقایسه با هوای سرد، سیگنال‌ها در دست‌ها و پاها با سرعت بیشتری انتقال داده می‌شوند. وقتی که از کودکی به بزرگسالی می‌رسید، طول اندام‌های حرکتی شما

تغییر می‌کند، و لذا مدت زمانی که طول می‌کشد که سیگنال‌ها در اندام‌ها ارسال یا دریافت شوند، طولانی‌تر می‌شود.

حالا مغز چگونه این مشکل زمان‌بندی را حل می‌کند؟ از طریق خواندن کتاب قطوری در زمینه‌ی تأیید زمان‌بندی نیست. بلکه کاوشگرهایی را برای محیط اطراف گسیل می‌کند: با لگد زدن به اشیاء، لمس کردن اشیاء و دست زدن به آن‌ها. فرض مغز این است که اگر خود شما ایجادکننده‌ی عمل باشید (از طریق دست زدن به محیط پیرامون)، آنگاه اطلاعاتی که از کانال‌های حسی می‌رسد و از نظر زمانی پراکنده است، باید همگام تلقی شود. یعنی ضمیر خودآگاه شما باید به‌گونه‌ای سازگار شود که تمام پیام‌ها را در یک زمان ببیند، بشنود، و لمس کند.^[۷] هرچه باشد، بهترین راه برای پیش‌بینی کردن آینده، ایجاد کردن آن است. هر بار که مغز شما با جهان تعامل می‌کند، پیام روشنی را برای حواس مختلف می‌فرستد: ساعت‌های تان را همگام کنید.

بنابراین، روش الهام گرفته از مغز برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی ریزتراشه به این صورت است که ریزتراشه باید به‌طور منظم **کاوه‌هایی (= کاوشگرهایی)** را برای خودش بفرستد (درست همان طور که یک نفر مثلاً توپی را زمین می‌زند، بشقاب‌ها را به هم می‌زند، یا بعد از گذاشتن عینک، به جلو و عقب نگاه می‌کند). وقتی که تراشه خودش **کاوشگر** را «ایجاد» کرده باشد، می‌تواند انتظار مشخصی داشته باشد که چه اتفاقی باید بیفتد. بعد می‌تواند خودش را براساس آن تنظیم کند، تا ما هم بالاخره بتوانیم کتاب‌های قطور را به کناری بیفکنیم.



وقتی که اصول مدارسازی پویا را وارد ماشین‌های مان‌کنیم، هر نوع دستگاهی در حوزه‌ی قدرت ما قرار خواهد گرفت. مثلاً خودروهای خودران را در نظر بگیرید. احتمالاً می‌توانیم امیدوار باشیم که در آینده تلفات جاده‌ای کمتری خواهیم داشت — نه فقط به خاطر اینکه خودروها اطلاعات مشترکی داشته و با خودروهای اطراف در ارتباط خواهند بود، بلکه نیز از آن رو که سیستم قابلیت یادگیری خواهد داشت: خودروها با گذشت زمان بهتر رانندگی خواهند کرد. نه اینکه عمداً به‌گونه‌ای برنامه‌نویسی خواهند شد که در اوایل اشتباهات بیشتری

مرتکب شوند؛ بلکه مسئله آن است که جهان بسیار پیچیده است. نمی‌توان تمام موقعیت‌ها را برنامه‌نویسی کرد. بنابراین، مانند نوجوانانی که از اشتباهات‌شان درس می‌گیرند و این درس‌ها را به یکدیگر هم اطلاع می‌دهند، خودروها هم با گذشت زمان هوشمندتر خواهند شد.

هم‌چنین، می‌توانیم از اصول مدارسازی پویا برای توزیع برق با کارایی **بسیار** بهتر از **امروز** استفاده کنیم. به تدریج که اینترنت اشیا (اتصال دستگاه‌های روزمره به شبکه) را می‌سازیم، می‌توانیم منابع را از مجموعه‌ی عظیم چراغ‌ها، کولرها، و کامپیوترها بگیریم — یعنی از اینترنت به‌عنوان دستگاه عصبی عظیمی استفاده کنیم که الکتریسیته را به مکان و زمانی که مورد نیاز است، توزیع می‌کند.^[۴] منجمله، یک چنین گرید هوشمندی در را به روی تولید برق خصوصی نیز می‌گشاید: فکرش را بکنید که توربین‌های بادی و مزرعه‌های خورشیدی را به همان روشی اضافه کنیم که مادر طبیعت دستگاه‌های محیطی جدید را به یک موجود اضافه می‌کند، و اجازه می‌دهد که مغز جانور تصمیم بگیرد که چگونه از آن استفاده کند. علاوه بر افزایش کارایی، گرید هوشمند از طریق ترمیم خود توانایی مقاومت در مقابل حملات را نیز خواهد داشت. اکثر کشورهای دنیا مدعی تلاش برای پیاده‌سازی نوعی گرید هوشمند هستند، ولی واقعیت آن است که کلمه‌ی «هوشمند» می‌تواند سطوح معنایی متفاوتی داشته باشد. بچه‌ی کلاس سومی شما باهوش است و آلبرت اینشتین هم باهوش است. وقتی که اصول مدارسازی پویا را که مادر طبیعت در طول میلیاردها سال ابداع کرده است، بفهمیم و پیاده‌سازی کنیم، به تدریج از گرید هوشمند به گرید نابغه خواهیم رسید.

ورای مزیت‌های مدارسازی پویا برای مریخ‌نوردها، خودروها، ترانه‌ها، و گریدها، امیدوارم زیست‌شناسی در بازتعریف رشته‌ی معماری نیز نقش داشته باشد. در حال حاضر، باشکوه‌ترین سازه‌های ما در مقابل آفرینش‌های طبیعت رنگ می‌بازد — از ساختار زیبای نوروں گرفته تا طراحی ظریف مخچه و رقص چابک اندام‌های حرکتی. چه می‌شد که معماران هم از زیست‌شناسی الهام می‌گرفتند؟

ساختمانی را تصور کنید که میزان رفت‌وآمد به دست‌شویی‌ها را حس

می‌کند و سیگنال‌های جاذب یا دافع می‌فرستد تا درخواست افزایش سریع تعداد شیرها، کاسه‌های توالی، و لوله‌های فاضلاب بنماید. یا خانه‌ای را تصور کنید که معماری خودش را تشخیص می‌دهد و می‌تواند دستگاه عصبی خود را مطابق با تغییرات آن، تغییر دهد: وقتی که اتاق جدیدی اضافه می‌شود، کانال‌های کولر و سیم‌های برق به‌طور طبیعی برای آن کشیده می‌شود. مغز خانه دوباره خودش را تنظیم می‌کند، و حس جدیدی از شکل خانه به دست می‌آورد. به‌طور مشابه، وقتی که بخشی از خانه بر اثر حادثه‌ای تخریب می‌شود، توزیع منابع مجدداً به‌طور پویا تنظیم می‌شود: در صورت آسیب دیدن آشپزخانه، فضای این و لوازم الکترونیکی به‌گونه‌ای تخصیص داده می‌شود که همان کارکردهای آشپزخانه‌ی بزرگ‌تر در یک فضای کوچک‌تر به انجام برسد. ممکن است در آینده دچار درد یخچال خیالی شویم، ولی لاقلاً مشکلات خانه‌های قدیمی را نخواهیم داشت که با افتادن یک دیوار، دیگر به دردی نمی‌خورند. اصلاً چطور است آجرهایی را مهندسی کنیم که از یکدیگر سیگنال می‌گیرند و خودشان را به‌صورت سازه‌ی مورد نظر درمی‌آورند — همان گونه که نوروها به‌صورت هسته‌هایی بزرگ‌تر دور هم گرد می‌آیند؟ یا اینکه ساختمان‌ها بتوانند به اطراف حرکت کنند، و نورگیری، سایه، دسترسی به آب، و میزان باد دریافتی را تنظیم کنند؟ یا اصلاً سیار باشند، بتوانند بلند شوند و وقتی که حریق رخ می‌دهد یا در مقیاس زمانی طولانی‌تر، زمانی که خط ساحلی تغییر می‌کند، به جای دیگری بروند؟ وقتی که مدارسازی پویا را بفهمیم، پیشرفت‌هایی در مهندسی ایجاد خواهد کرد که پایانی برای آن قابل تصور نیست.

و سرانجام، در نظر داشته باشید که در مورد دستگاه‌های خودتنظیم‌شونده‌ی آینده، موضوع تعمیر کردن آن‌ها هم معنای متفاوتی پیدا می‌کند. کارگران ساختمانی یا میکانیک‌های خودرو به‌ندرت غافلگیر می‌شوند: خراب شدن یک بخش از ساختمان یا موتور منجر به مجموعه‌ای از پیامدهای قابل پیش‌بینی می‌شود. برعکس، عصب‌شناسان جوان غالباً نامطمئن و فاقد اعتماد هستند. گرچه قادرند مشکلات مغز را با دقت معقولی شناسایی کنند و تشخیص دهند، ولی چیزی که باعث سرخوردگی آن‌ها می‌شود، این است که غالباً بیماران با نمونه‌های کتاب‌های درسی جور در نمی‌آیند. چرا درس‌نامه‌ها در اینجا کم

می‌آورند؟ چون مغز هر فرد از نظر شرح حال، اهداف، و روش کار، مسیر مخصوص خود را دنبال کرده است. در آینده‌ی دور، کارگران ساختمانی و میکانیک‌های خودرو باید بیشتر شبیه عصب‌شناسان باشند، و به جای اینکه به دنبال سیم یا پیچ و مهره‌ی خاصی بگردند، باید بیشتر به اصول کلی تکیه کنند.



به تدریج که اصول کارکرد مغز بیشتر روشن شود، این اصول در رشته‌های مختلف، از هوش مصنوعی تا معماری، از ریزتراشه‌ها تا مریخ‌نوردها، به کار گرفته خواهد شد. دیگر لازم نخواهد بود که زباله‌دانی‌ها را پر از دستگاه‌های شکننده‌ی اسقاطی کنیم. بلکه دستگاه‌های خودتنظیم‌شونده علاوه بر دنیای بیولوژیک، دنیای تولیدی ما را نیز پر خواهند کرد.

من فکر می‌کنم که اعقاب دور ما وقتی که به انقلاب صنعتی نگاه کنند، از خودشان خواهند پرسید که چرا این قدر طول کشید که به سطح بالاتر برسیم، در حالی که فقط کافی بود که از اصول انقلاب بیولوژیک چند میلیارد ساله‌ی طبیعت تقلید کنیم که همواره در دور و بر ما حضور دارد.

پس وقتی که جوانی از شما می‌پرسد که فناوری پنجاه سال بعد چه شکلی خواهد بود، می‌توانید پاسخ دهید: «جوابش درست پشت چشم‌های تو است.»

۱۲ | پیدا کردن عشق گم شده‌ی اوتزی

در سپتامبر سال ۱۹۹۱، یک زوج آلمانی مشغول پیاده‌روی در کوهستان آلپ در منطقه‌ی تیرول بودند که به یک جسد برخوردند. نود درصد پایینی جسد یخ زده بود و محکم درون یک یخچال طبیعی قرار گرفته بود؛ فقط سر و شانه‌هایش بیرون بود. جسد مرد یخ‌زده کاملاً دست‌نخورده بود و به‌طور لحظه‌ای منجمد شده بود. در سال‌های گذشته جسد چندین کوه‌نورد گم‌شده در این کوه‌ها پیدا شده بود، ولی این کشف متفاوت بود.

این مرد پنج هزار سال قبل یخ زده بود.

این جسد منجمد به‌عنوان مرد یخی تیرول مشهور شد و نام اوتزی بر او نهادند. طی چند نوبت تلاش او را از یخ درآوردند، و باز بر اثر هوای بسیار سرد دوباره منجمد شد، و سرانجام با اسکی او را از آنجا انتقال دادند. پس از چند هفته که مشاجرات زیادی بر سر مالکیت جسد بین حوزه‌های مختلف در جریان بود، سرانجام **دانشمندان** وارد ماجرا شدند و مشخص کردند که این مرد به دوره نوسنگی پسین تعلق دارد — به‌طور خاص، به عصر مس.^(۱)

بلافاصله پرسش‌هایی مطرح شد. این مرد که بود؟ چه جور آدمی بوده؟ به کجاها سفر می‌کرده؟ من که اخبار علمی مربوط به آن را می‌خواندم، متحیر بودم که صرفاً از یک جسد چه اطلاعات زیادی می‌توان به دست آورد. محتویات روده‌ی او آخرین دو **نوع** غذایی را که خورده بود، مشخص کرد (گوشت بز کوهی اروپایی و گوشت آهو، که هر دو با سبوس گندم تک‌دانه، ریشه‌های گیاهی، و میوه‌جات خورده شده بود). گرده‌های موجود در غذای آخرش کاملاً تازه بود، که نشان می‌داد که در فصل بهار مرده است. بررسی موهایش، وضعیت کلی رژیم غذایی او را در چند ماه قبل مشخص کرد، و ذرات مس در

رشته‌های موی او نشان می‌داد که او احتمالاً در کار ذوب فلز بوده است. ترکیب مینای دندان او، نشان می‌داد که دوران کودکی‌اش را در چه منطقه‌ای گذرانده است. ریه‌های سیاهش خبر از دود آتش اردوگاه می‌داد. نسبت استخوان‌های پای او نشان می‌داد که دوران جوانی‌اش را به پیمودن مسافت‌های طولانی در مناطق کوهستانی گذرانده است. به خاطر استهلاک زانو تحت روش‌های بدوی طب سوزنی قرار گرفته بود، که علامت آن وضعیت استخوان‌ها و نشانه‌های صلیبی‌شکل روی پوست او بود. ناخن‌هایش سوابق بیماری او را نشان می‌داد: سه خط روی ناخن‌ها داشت که نشان‌دهنده‌ی آن بود که سه بار در نیم سال قبل از مردنش دچار بیماری سیستمیک شده است.

از یک جسد می‌توان اطلاعات بسیار زیادی را جمع‌آوری کرد، زیرا بدن بر اثر تجربه شکل می‌گیرد.

همان طور که دیدیم، نوع بسیار اختصاصی‌تری از شکل گرفتن نیز در مغز اتفاق می‌افتد.

شاید در آینده بتوانیم جزئیات تقریبی زندگی فرد را از چگونگی قالب‌ریزی دقیق منابع عصبی او بخوانیم — اینکه چه کارهایی کرده و چه چیزهایی برایش اهمیت داشته است. این کار اگر عملی شود، منجر به پیدایش نوع جدیدی از علم خواهد شد. آیا با نگاه کردن به نحوه‌ی شکل‌گیری مغز، خواهیم توانست بفهمیم فرد با چه چیزهایی در تماس بوده، و یا برای چه چیزهایی اهمیت قایل بوده است؟ این شخص برای مهارت‌های ظریف حرکتی از کدام دست استفاده می‌کرده است؟ چه سیگنال‌های مهمی در محیط او وجود داشته است؟ ساختار زبان او چگونه بوده است؟ و انواع پرسش‌های دیگری که صرفاً با نگاه کردن به روده‌ها و مو و زانو‌ها و ناخن‌ها نمی‌توانیم پاسخ دهیم.

بالاخره این همان منطقی است که برای مهندسی معکوس هواپیماهای جنگی ساقط شده‌ی دشمن از آن استفاده می‌کنیم. فرض می‌کنیم که کارکرد در ارتباط با ساختار است: اگر سیم‌های کابین خلبان آرایش خاصی داشته باشند، حتماً دلیلی پشت آن بوده است. همین فرصت‌ها ممکن است برای کدگشایی گذشته‌نگر مغز نیز وجود داشته باشد.

اگر همه چیز خوب پیش برود، پنجاه سال دیگر دوباره به سراغ مرد یخی

تیروول در بولتسانوی ایتالیا خواهیم رفت. او را از زندان شفافی که مانند یخچال او است، بیرون خواهیم آورد. و جزئیات قصه‌ی او را که مستقیماً در بافت مغزش حک شده است، خواهیم خواند. زندگی‌اش را نه از بیرون که از نظرگاه خودش خواهیم فهمید. چه چیزی برایش مهم بوده؟ و قتش را صرف چه کاری می‌کرده؟ عاشق چه کسی بوده است؟ در حال حاضر، این‌ها مانند داستان علمی-تخیلی است، ولی چند دهه‌ی دیگر ممکن است علم واقعی باشد.

این را می‌دانیم که تکامل در مقیاس‌های زمانی طولانی، موجودات زنده را به‌گونه‌ای تراشکاری می‌کند که با محیط خود انطباق داشته باشند. مثلاً به این واقعیت توجه کنید که گیرنده‌های نوری شبکیه‌ی ما کاملاً منطبق با طیف نوری گسیل شده از سوی خورشید هستند، و یا اینکه ژنوم ما سوابق عفونت‌های باستانی را در خود دارد. ولی در مقیاس زمانی کوتاه‌ عمر، مدارهای مغزی می‌تواند چیزهای خیلی بیشتری را نیز به ما بگوید. ساختار مغز مجموعه‌ی نگرانی‌ها، سرمایه‌گذاری‌های زمانی، و کانون‌های اطلاعاتی محیط محلی یک فرد را روشن می‌کند. به این ترتیب، نه تنها خواهیم توانست مرد یخی تیروول را به‌عنوان نماینده‌ای از دوران خودش بشناسیم، بلکه قادر خواهیم بود دفترچه‌ی خاطرات میکروسکوپی نهفته در سلول‌های مغز او را نیز بخوانیم. خواهیم توانست شاهد چهره‌ی برادر-خواهرها، فرزندان، بزرگ‌ترها، دوستان، و رقبای او باشیم؛ خواهیم توانست بوی شب‌های بارانی و آتش اردوگاه او را حس کنیم؛ زبان او و صداهایی را که می‌شناخته، بشنویم؛ شادی‌ها، بیم‌ها، دل‌شکستگی‌ها، و امیدهای او را تجربه کنیم.

اوتزی آن‌قدر شانس نداشت که در دورانی زندگی کند که بتواند به راحتی با استفاده از دوربین ویدئویی از دنیای خود فیلم بگیرد. ولی نیازی به این کار نیست. او خودش دوربین ویدئویی بوده است.

موجودات مبدل را پیدا کردیم: آن‌ها خود ما هستند

بعضی وقت‌ها اتفاق می‌افتد که کسی به من می‌گوید: «دکترها به ما گفتند که خواهرزاده‌ام هرگز قادر به راه رفتن نخواهد بود. حالا بین چطور دارد می‌دود!» اولاً، من برای بیمار و خانواده‌اش خوشحال می‌شوم که حال بیمار خوب شده

است. در ثانی، کمی شک دارم که پزشک‌شان واقعاً گفته باشد «هرگز». لابد قبلش گفته که «بیشترین احتمال این است». یا شاید هم پزشک می‌خواسته خطر شکایت از خودش را کمتر کند، به این صورت که سطح توقع آن‌ها را چنان پایین بیاورد که هرگونه پیشرفتی مایه‌ی خوشحالی باشد. علت هرچه باشد، یک پزشک خوب بعید است چنین حرفی را با قاطعیت بزند، زیرا توانایی مغز برای بازآرایی به‌گونه‌ای است که خصوصاً در افراد جوان، پیامدهای مختلفی را امکان‌پذیر می‌سازد.

از دید من، شاید بتوان گفت که مدارسازی پویا قشنگ‌ترین پدیده در زیست‌شناسی است. در این کتاب، کوشش کردم ویژگی‌های عمده‌ی مدارسازی پویا را در قالب هفت اصل بیان کنم:

۱. **منعکس کردن جهان.** مغز خودش را با ورودی منطبق می‌کند.
۲. **سر درآوردن از ورودی‌ها.** مغز هر اطلاعاتی را که وارد شود، مورد استفاده قرار می‌دهد.
۳. **به حرکت درآوردن تجهیزات.** مغز درون هر نوع بدنی با هر طرحی قرار گرفته باشد، یاد می‌گیرد که آن را کنترل کند.
۴. **حفظ چیزهایی که اهمیت دارد.** مغز منابع خود را براساس اهمیت و مرتبط بودن موضوع توزیع می‌کند.
۵. **تثبیت اطلاعات پایدار.** بعضی از بخش‌های مغز، بسته به ورودی‌هایی که دریافت می‌کنند، از بخش‌های دیگر انعطاف‌پذیری بیشتری دارند.
۶. **یا رقابت یا مرگ.** شکل‌پذیری از تقلای بخش‌های مختلف سیستم برای بقا حاصل می‌شود.
۷. **حرکت به سمت داده‌ها.** مغز یک مدل داخلی از جهان می‌سازد، و هر گاه پیش‌بینی‌ها نادرست باشد، آن را تعدیل می‌کند.

مدارسازی پویا صرفاً نوعی کنجکاوی حیرت‌انگیز طبیعت نیست؛ بلکه ترفندی بنیادی است که امکان پیدایش حافظه، هوش انعطاف‌پذیر، و تمدن را پدید آورده است. منظور این است که در شرایطی باشیم که ابزارهای لازم برای یک کار را نداشته باشیم و مغز را چنان تنظیم کنیم که آن ابزارها را ایجاد کند. مدارسازی پویا سازوکاری است که از طریق آن تکامل بر پایه‌ی انتخاب

طبیعی از برخی فشارهای غیرممکن رهایی می‌یابد: به جای اینکه لازم باشد که تمام پیامدهای ممکن را در نظر بگیرد، مغز می‌تواند میلیاردها پارامتر را مستقیماً تنظیم کند تا به نتیجه‌ای پیش‌بینی نشده برسد.

شکل‌پذیری در تمام سطوح یافت می‌شود، از سیناپس گرفته تا نواحی کامل مغز. نزاع مداوم بر سر فضا در مغز از نوع رقابت برای بقای اصلح است: هر سیناپس، هر نورون، و هر جمعیت بر سر منابع در حال نزاع است. در حالی که این جنگ‌های مرزی جریان دارد، نقشه‌ها به گونه‌ای تغییر می‌کند که ساختار مغز همواره منعکس‌کننده‌ی اهدافی است که برای ارگانیسم بیشترین اهمیت را دارد. مدارسازی پویا تبدیل به بخش استاندارد از تفکر ما خواهد شد: در حالی که جهان دور و بر خود را مطالعه می‌کنیم، نقش مغز را با وضوح هر چه بیشتری در آن شاهد خواهیم بود.

مثلاً کاهش شدید جرم و جنایت را در آمریکا در اواسط دهه‌ی ۱۹۹۰ در نظر بگیرید. یک فرضیه آن است که این کاهش ناشی از تصویب یک قانون بوده است، قانون هوای پاک، که اتومبیل‌ها را ملزم ساخت که به جای بنزین دارای سرب از بنزین بدون سرب استفاده کنند. با کاهش سرب هوا، بیست و سه سال بعد کاهش قابل‌توجهی در میزان جرم و جنایت بروز کرد. مطالعات نشان داد که سطح بالای سرب در هوا تکامل مغز کودکان را مختل می‌کند و منجر به رفتار تکانه‌ای بیشتر و تفکر بلندمدت کمتر می‌شود. آیا همبستگی بین سطح سرب و میزان جنایت یک امر اتفاقی است؟ احتمالاً نه. کشورهای مختلف در زمان‌های متفاوتی شروع به استفاده از بنزین بدون سرب کردند، و در همه‌ی این کشورها نرخ جرایم تقریباً بیست و سه سال بعد از این تغییر کاهش یافت — درست زمانی که کودکانی که در هوای با سرب کمتر رشد کرده بودند، به دوران بزرگسالی می‌رسیدند.^[۲] اگر این فرضیه درست باشد، بدان معنا است که قانون هوای پاک بیشتر از هر سیاست دیگری در تاریخ آمریکا در مبارزه با جرایم نقش داشته است. گرچه این فرضیه نیاز به تحقیقات بیشتری دارد، ولی اهمیت این فکر را برجسته می‌کند که فرایند مدارسازی پویای ما ممکن است تأثیر بی‌سروصدایی بر مولکول‌ها، هورمون‌ها، و توکسین‌ها داشته باشد. اگر تاکنون شکی در اهمیت شکل‌پذیری مغز داشتید، مطمئن باشید که تأثیرات آن

از فرد تا جامعه را در بر می‌گیرد.



به خاطر مدارسازی پویا، هر کدام از ما ظرفی از فضا و زمان هستیم. در نقطه‌ی خاصی از جهان متولد می‌شویم و جزئیات مربوط به آن محل را جذب می‌کنیم. اساساً می‌توان گفت که در مدت زمان حضورمان در جهان، مانند یک دستگاه ضبط هستیم.

وقتی که با فرد سالمندی گفتگو می‌کنید و از عقاید یا جهان‌بینی او حیرت‌زده می‌شوید، می‌توانید برای همدلی بیشتر او را مثل دستگاه ضبطی در نظر بگیرید که در آن پنجره‌ی زمانی و روی آن مجموعه از تجارب عمل کرده است. روزی مغز شما هم مثل عکسی از زمان گذشته خواهد بود که حوصله‌ی نسل آینده را سر خواهد برد.

نمونه‌ای از ظرف من این است: آهنگی یادم می‌آید از سال ۱۹۸۵ که عنوان آن این بود: «ما جهان هستیم». ده‌ها ستاره‌ی موسیقی این آهنگ را اجرا کردند تا برای کودکان فقیر در آفریقا پول جمع کنند. مضمون آن این بود که هر کدام از ما مسئول سلامت و رفاه دیگران هستیم.

حالا که متخصص علوم اعصاب شده‌ام، وقتی به آن آهنگ فکر می‌کنم، ناگزیر تفسیر دیگری هم به ذهنم می‌آید. ما عموماً در زندگی طرز فکرمان این است که من یک طرف هستم و دنیا طرف دیگر. ولی همان طور که در این کتاب دیدیم، اینکه شما چه کسی هستید، برخاسته از همه‌ی چیزهایی است که با آن تعامل داشته‌اید: محیط شما، همه‌ی تجربیات شما، دوستان‌تان، دشمنان‌تان، فرهنگ‌تان، نظام اعتقادی شما، روزگار شما — همه‌ی این‌ها. گرچه از حرف‌هایی از این قبیل که «او آدم مستقلی است» یا «فلانی فکر مستقلی دارد» خوشمان می‌آید، ولی در حقیقت، به هیچ طریقی نمی‌توانید خودتان را از محیط جامعی که در آن جای گرفته‌اید، جدا کنید. بدون محیط بیرون، شُمایی هم در کار نیست. محیط بیرون باورها، عقاید، و آرزوهای شما را سراسر شکل می‌دهد، مانند مجسمه‌ای که از یک قطعه سنگ مرمر ساخته می‌شود. به لطف مدارسازی پویا، هر کدام از ما، جهان هستیم.

سپاسگزاری

کار من در رشته‌ی علوم اعصاب به یاری افراد زیادی میسر شده است که آن‌ها هم همچون من شیفته‌ی جعبه‌ابزار بی‌اندازه خلاقانه‌ی طبیعت هستند، و هیجان دنبال کردن پاسخ‌ها را از آن‌ها آموختم. از آن زمره‌اند والدینم، سیرل و آرتور، که مغز مرا در حساس‌ترین دوران‌هایش شکل دادند؛ رید مونتگیو، تری سینوفسکی، و فرانسیس کریک، که در دوره‌ی دکتری و پس‌ادکتری، باز بیشتر آن را فرم دادند؛ و ده‌ها نفر از دوستان، دانشجویان، و همکارانم. از همکارانم در استنفورد سپاسگزارم که قصری از جشن‌های فکری را برایم فراهم کردند. دوستان زیادی هستند که برای الهام گرفتن و بحث‌های مفید به آن‌ها روی می‌آوردم — بیشتر از آنکه امکان درج نام همه‌ی آن‌ها در اینجا وجود داشته باشد — ولی از آن زمره‌اند دان وان، جان‌اتان دونار، برت منش، و همه‌ی دانشجویانی که در گذر سال‌ها در آزمایشگاه من کار کرده‌اند. از ترستان رنز و اسکات فریمن متشکرم که در زمانی که هنوز هیچ‌کس دیگری حاضر به انجام این کار نبود، از کارهای ما در زمینه‌ی جایگزینی حسی حمایت مالی کردند. از دانشجوی دکتری سابق و شریک تجاری کنونی‌ام اسکات نوویچ سپاسگزارم که با من همکاری کرد تا فناوری نئوسنسوری را به واقعیت برسانیم. از تمام اعضای تیم کارکنان نئوسنسوری هم که تعداد آن‌ها مرتب رو به افزایش است، همواره متشکرم.

از دن فرانک و جیمی بینگ متشکرم که در کار نشر بی‌نظیر و همواره پشتیبان من هستند. از کارگزاری وایلی — به‌خصوص اندرو، سارا، جیمز، و کریستینا — به خاطر حمایت قوی و همیشگی آن‌ها سپاسگزارم. افراد زیادی لطف کردند و این کتاب را با دقت زیاد خواندند، از جمله

مایک پروتا، شاهد مالک، شان جاج، و همه‌ی دانشجویان خوبی که در کلاس من در زمینه‌ی شکل‌پذیری مغز در استنفورد شرکت داشتند.

این کتاب را به دو فرزند جوانم تقدیم می‌کنم، اریستوتل و اویوا، که در کله‌های بانمک کوچک‌شان، اصول شکل‌پذیری مغز ثانیه به ثانیه در حال اجرا است. و عمیق‌ترین عشق و امتنانم را نثار همسرم سارا می‌کنم، که پشتیبان و مایه‌ی اطمینان و دلگرمی من است. گرچه ستایش عاشقانه معمولاً در قلمرو شعر و غزل جای می‌گیرد، ولی بدون مدارسازی پویا نمی‌توانست وجود داشته باشد: عشق مشترک ما مغزهای هر کدام مان را بازنویسی کرده است.

و سرانجام، باید اعتراف کنم که دانشجویان و خوانندگان از سراسر جهان تا چه حد برای من منبع الهام بوده‌اند. شاید آن‌ها خبر نداشته باشند که این کار برای من چقدر لذت‌بخش است، خصوصاً وقتی که کار رشک‌برانگیزم آشکار کردن ایده‌ای است که آن‌ها هرگز به آن فکر نکرده‌اند. بازتاب حقیقتی زیبا، چهره‌ی همه‌مان را روشن می‌کند.

یادداشت‌ها

برای اینکه مطالب کتاب برای همگان قابل فهم باشد، سعی کرده‌ام آن‌ها را به جای الفاظ متداول در این رشته، به زبان ساده ارائه کنم. این کار فوایدی دارد و مضاری. برای آنکه مضرات آن به حداقل برسد، یادداشت‌های زیر به خوانندگان علاقه‌مند امکان می‌دهد که در کنار مفاهیم ارائه‌شده، به مقالات اصیل، جزئیات عمیق‌تر، و واژگان علمی مربوطه دسترسی پیدا کنند.

۱. مغستان صورتی ظریف

۱. مصاحبه‌ی شخصی با خانواده‌ی ماتئو.
۲. عجیب ولی واقعی: جراح ماتئو، دکتر بن کارسون بود، که بعداً کاندیدای ریاست‌جمهوری آمریکا از حزب جمهوری‌خواه شد، و به دونالد ترامپ باخت.
۳. آنچه موضوع را پیچیده‌تر می‌کند، این است که به همان تعداد نورون‌ها، سلول‌های گلیال نیز وجود دارند که از آن‌ها حمایت می‌کنند. گرچه سلول‌های گلیال برای کارکرد بلندمدت اهمیت زیادی دارند، ولی نورون‌ها هستند که اطلاعات را با سرعت زیاد به اطراف انتقال می‌دهند. در گذشته تصور می‌شد که تعداد سلول‌های گلیال ده برابر نورون‌ها است؛ اکنون براساس روش‌های جدید (مثلاً جداکننده‌ی ایزوتروپیک) می‌دانیم که نسبت آن‌ها تقریباً یک به یک است. رجوع کنید به:
Von Bartheld CS, Bahney J, Herculano-Houzel S (2016), The search for true numbers of neurons and glial cells in the human brain: A review of 150 years of cell counting, J Comp Neurol 524(18): 3865–95.

برای بحث کلی درباره‌ی تعداد سلول‌ها، به منبع زیر نیز مراجعه کنید:
Gordons, *The Synaptic Organization of the Brain* (New York: Oxford University Press, 2004).

۴. مثلاً چند مورد از تجربیات احتمالی یک بچه‌ی دوساله طی یک روز که همه‌ی آن‌ها به طریق نامعلومی در مسیر آینده‌ی او نقش خواهد داشت، از این قرار است: او به قصه‌ای گوش می‌کند درباره‌ی پسری با دم بلند که مگس‌ها را می‌کشد. دوست مادرش ژوزت با یک ظرف داغ کوفته‌قلقلی به خانه‌ی آن‌ها می‌آید. سه پسر بزرگ‌تر با دوچرخه از جلوی خانه عبور می‌کنند. گریه‌ی سفیدی را می‌بیند که روی کاپوت داغ یک وانت خوابیده است. مادرش به پدرش می‌گوید: «مثل آن موقع که در نیومکزیکو بودیم»، و هر دو به خنده می‌افتند. پدرش به طرف ظرف‌شویی می‌رود و از یک ظرف دردار، کلم غنچه‌ای می‌خورد و با دهان پر حرف می‌زند. پسرک گونه‌اش را روی پارکت‌های خنک می‌گذارد. مرد چاقی را با لباس خرسی

می‌بیند که به دیگران بادم زمینی می‌دهد. و الی آخر. هر کدام از این تجربیات، او را به‌نحو ظریفی شکل می‌دهد، و اگر این تجربیات اندکی متفاوت می‌بود، او نیز به آدمی تبدیل می‌شد که اندکی متفاوت بود. طبیعی است که چنین ملاحظات می‌تواند تأثیر انتخاب یک کتاب یا یک تصمیم یا تماس خاص را پیش‌بینی کند. مسیر زندگی – حتی طی یک روز – پیچیده‌تر از آن است که بتوان آن را پیش‌بینی کرد. گرچه این چیزی از وظایف یا نگرانی‌های والدین کم نمی‌کند، ولی در نهایت، این واقعیت که امکان پیش‌بینی وجود ندارد، تا حدودی باعث راحتی خیال می‌شود.

5. Nishiyama T (2005), Swords into plowshares: Civilian application of wartime military technology in modern Japan, 1945–1964 (PhD diss., Ohio State University).

۶. مطلب اصلی ارائه شده در این قسمت در منبع زیر نیز به‌صورت مختصر بیان شده است: Eagleman DM (2011), *Incognito: The Secret Lives of the Brain* (New York: Pantheon).

۷. درباره‌ی مرز دقیق تعریف اصطلاح «پلاستیسیته» بحث‌هایی وجود دارد. تغییر چه مدت باید دوام داشته باشد، تا بتوان برچسب پلاستیک بر آن نهاد؟ آیا می‌توان پلاستیسیته را از مفاهیمی مانند پختگی، سرشت، انعطاف‌پذیری، و کشسانی تمیز داد؟ این بحث‌های معناشناسانه ارتباط زیادی با مقصود کتاب حاضر ندارد؛ لیکن محض خاطر خوانندگان علاقه‌مند، در اینجا کمی درباره‌ی آن‌ها بحث می‌کنیم.

بخشی از بحث در ارتباط با این است که چه زمانی از اصطلاح پلاستیسیته استفاده کنیم. آیا مسائل پلاستیسیته‌ی تکوینی، پلاستیسیته‌ی فنوتیپی، و پلاستیسیته‌ی سیناپسی همگی بیان‌هایی از یک موضوع واحد هستند، یا اینکه اصطلاح «پلاستیسیته» با مسامحه در سیاق‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است؟ تا جایی که من اطلاع دارم، نخستین کسی که صراحتاً به این پرسش پرداخته، ژاک پایار بود در مقاله‌ای که در سال ۱۹۷۶ با عنوان زیر منتشر کرد:

“Réflexions sur l’usage du concept de plasticité en neurobiologie.”

[«تأملاتی درباره‌ی به‌کارگیری مفهوم پلاستیسیته در زیست‌شناسی عصبی»]

که این مقاله را پرونو ویل و همکارانش در سال ۲۰۰۸ ترجمه کردند و درباره‌ی آن توضیحاتی نوشتند. به پیروی از نوشته‌ی پایار، مقاله‌ی سال ۲۰۰۸ بیان می‌کند که یک نمونه‌ی صحیح «پلاستیسیته»، باید هم شامل تغییرات ساختاری و هم شامل تغییرات کارکردی باشد (نه فقط یکی از آن‌ها)، و باید بین آن و انعطاف‌پذیری (مانند سازگاری از قبل برنامه‌ریزی شده)، پختگی (مثلاً نمو طبیعی یک ارگانسیم)، و کشسانی (تغییرات کوتاه‌مدتی که نهایتاً به حالت قبلی خود بازمی‌گردند) تفاوت قائل شد. به‌طوری که بعداً در این کتاب خواهیم دید، همیشه نمی‌توان این مضامین را از هم تشخیص داد. مثلاً در این کتاب، فصل کاملی را به تغییرات مغز در مقیاس‌های زمانی مختلف و چگونگی انتقال آن تغییرات به بخش‌های مختلف سیستم (مثلاً از سطح مولکولی به سطح معماری سلول) اختصاص داده‌ایم. از این نظر، اگر فناوری ما تغییری را اندازه‌گیری کند که نهایتاً به حالت اولیه‌ی خود بازمی‌گردد – ولی فقط به این خاطر که ما نتوانسته‌ایم هم‌زمان اثرات آشکاری آن را اندازه‌گیری کنیم – آیا باید نتیجه‌گیری کنیم که کل سیستم صرفاً الاستیک است و پلاستیک نیست؟ به نظر من، عاقلانه نیست که تعاریف معنایی ما وابسته به سطح فناوری کنونی مان باشد.

مناقشه‌ها درباره‌ی کلمه‌ی «پلاستیسیته» غالباً مصداق مته به خشخاش گذاشتن است. در سیاق این کتاب، هدف ما فهمیدن خودتغییری یک و نیم کیلو فناوری پیشرفته‌ی درون سر ما است. اگر در آخر این کتاب، فهم عمیقی از این مطلب داشته باشید، می‌توان گفت که من در کارم موفق شده‌ام.

۸. لنگیدن ماتئو در سمت مقابل نیم‌کره‌ی برداشته‌شده است، زیرا هر نیم‌کره طرف مقابل بدن را کنترل

می‌کند. لنگش باقی‌مانده بدین خاطر است که نیم‌کره‌ی باقی‌مانده تا حدودی توانسته عملکرد نیم‌کره‌ی برداشته شده را بر عهده گیرد، ولی نه به‌طور کامل.

۲. فقط دنیا را اضافه کنید

1. Gopnik A, Schulz L (2004), Mechanisms of theory formation in young children, Trends Cogn Sci 8:371–77.
2. Spurzheim J (1815), *The Physiognomical System of Drs. Gall and Spurzheim*, 2nd ed. (London: Baldwin, Cradock and Joy).
3. Darwin C (1874), *The Descent of Man* (Chicago: Rand, McNally).
4. Bennett EL et al. (1964), Chemical and anatomical plasticity of brain, Science 164:610–19.
5. Diamond M (1988), *Enriching Heredity* (New York: Free Press).
6. Rosenzweig MR, Bennett EL (1996), Psychobiology of plasticity: Effects of training and experience on brain and behavior, Behav Brain Res 78:57–65; Diamond M (2001), Response of the brain to enrichment, An Acad Bras Ciênc 73:211–20.
7. Jacobs B, Schall M, Scheibel AB (1993), A quantitative dendritic analysis of Wernicke's area in humans. II. Gender, hemispheric, and environmental factors, J Comp Neurol 327:97–111.

اکنون شاید با نکته‌سنجی بپرسید که پیکان علیت در اینجا به کدام طرف است: شاید افراد به علت داشتن دندریت‌های بهتر توانسته‌اند وارد دانشگاه شوند، نه اینکه دانشگاه موجب رشد مغز شده باشد؟ سؤال خوبی است. هنوز آزمایشی نداریم که این احتمال را رد کند. ولی به‌طوری که در فصل‌های بعدی خواهیم دید، اکنون می‌توان تغییرات مغزی را به‌طور زنده در همان زمانی که افراد چیز جدیدی یاد می‌گیرند، مانند دویدن، موسیقی، مسیریابی، و غیره، اندازه‌گیری کرد.

۸. پروژه‌ی ژنوم انسان ابتدا تعداد ژن‌ها را حدود بیست و چهار هزار عدد تخمین زد؛ از آن زمان تاکنون، این برآورد کمتر شده و حتی تا حدود نوزده هزار عدد رسیده است. مراجعه کنید به:

Ezkurdia I et al. (2014), Multiple evidence strands suggest that there may be as few as 19,000 human protein-coding genes, Hum Mol Genet 23(22): 5866–78.

۹. در این مورد، در فصل‌های بعدی بحث بسیار بیشتری ارائه خواهد شد. گرچه وابسته به تجربه و مستقل از تجربه مانند داستان‌های متضادی به نظر می‌رسد، ولی همیشه بین آن‌ها مرز مشخصی وجود ندارد؛ مراجعه کنید به:

Cline H (2003), Sperry and Hebb: Oil and vinegar?, Trends Neurosci 26(12): 655–61.

گاه سازوکارهای مدارسازی شده‌ی ایستا مشابه تجربیات زندگی به نظر می‌رسد، و برخی اوقات تجربیات زندگی منجر به بیان ژن‌ها می‌شود که آن هم منجر به مدارسازی ایستای جدید می‌شود. مثلاً به یک نمونه‌ی روشن فعالیت وابسته به تجربه دقت کنید: در قشر بینایی اولیه، نوارهای بافتی یافت می‌شود که اطلاعات را از چشم چپ و چشم راست منتقل می‌کند (در فصل‌های بعدی در این مورد بیشتر صحبت خواهیم کرد). آکسون‌هایی که این اطلاعات بینایی مختص چشم را انتقال می‌دهند، در ابتدا در قشر انشعابات زیادی ایجاد می‌کنند و سپس به‌صورت لکه‌های مختص چشم از هم جدا می‌شوند. از کجا می‌دانند که چگونه از هم جدا شوند؟ ترفند آن این است که جداسازی براساس الگوهای فعالیت همبسته بروز می‌کند: نورون‌های چشم چپ با خودشان همبستگی بیشتری دارند تا با نورون‌های چشم راست.

در دهه‌ی ۱۹۶۰، دیوید هوپل و تورستن ویزل، زیست‌شناسان عصبی از دانشگاه هاروارد، نشان دادند که نقشه‌ی نوارها را که به‌طور یکنواخت یک در میان هستند، می‌توان با تجربه کاملاً تغییر داد: بستن یک چشم جانور موجب گسترش ناحیه‌ی فیبرهای مربوط به چشم باز می‌شود، که نشان می‌دهد که برای

رقابت سیناپسی تشکیل دهنده‌ی این نقشه‌ها، فعالیت عصبی مورد نیاز است:

Hubel DH, Wiesel TN (1965), Binocular interaction in striate cortex of kittens reared with artificial squint, *J Neurophysiol* 28:1041–59.

با این حال، در اینجا معمایی نهفته بود، زیرا هوبل و ویزل قبلاً مشاهده کرده بودند که برقراری نواحی یک در میان چپ و راست بستگی به فعالیت ندارد: حتی جانورانی که در تاریکی مطلق پرورش می‌یافتند، این الگوها را ایجاد می‌کردند:

Horton JC, Hocking DR (1996). An adult-like pattern of ocular dominance columns in striate cortex of newborn monkeys prior to visual experience, *J Neurosci* 16(5):1791–807

چگونه این یافته‌ها با هم جور درمی‌آیند؟

سال‌ها طول کشید تا این تناقض حل شود. معلوم شد که زمانی که جانور در حال تکوین در رحم شناور است، شبکه‌ی او امواج فعالیت خودبه‌خود ایجاد می‌کند. این امواج تقریباً شبیه بینایی است. این امواج فعالیت غیردقیق است — مرزهای مشخص تجربه‌ی بینایی دقیق و واقعی را ندارد — ولی آن قدر هست که موجب همبستگی در میان الیاف مجاور هر چشم شود، به‌طوری که امکان جداسازی مختص چشم در نواحی مغزی بعدی (مثلاً هسته‌ی زانویی جانبی تالاموس و قشر مخ) فراهم می‌شود. به عبارت دیگر، مغز در اوایل تکوین، خودش برای خود فعالیت ایجاد می‌کند تا فرایند جداسازی چشم‌ها را تسهیل کند؛ بعداً ورودی بینایی از جهان بیرون جای آن را می‌گیرد:

Meister M et al. (1991), Synchronous bursts of action potentials in ganglion cells of the developing mammalian retina, *Science* 252(5008): 939–43

به این ترتیب، مرز نامشخصی بین تجربه‌ی زندگی و فعالیت نورونی از پیش تعیین شده وجود دارد. تعامل بین تجربه‌ی زندگی و دستورالعمل ژنتیکی گاه بسیار پیچیده است. اصل کلی آن است که سازوکارهای مولکولی مستقل از تجربه منجر به مدارکشی غیردقیق اولیه‌ی مغز می‌شود. بعداً، فعالیت حاصل از تعامل با جهان این اتصالات را دقیق‌تر می‌کند. دیگر نمی‌توانیم درباره‌ی مغز صرفاً به عنوان نتیجه‌ی ژن‌ها یا تجربه‌ی زندگی فکر کنیم، زیرا گاهی ژن‌ها نقش تجربه‌ی زندگی را بر عهده می‌گیرند. سازوکارهای وابسته به تجربه و مستقل از تجربه به‌طور تنگاتنگ درهم‌تنیده‌اند.

10. Leonhard K (1970), Kaspar Hauser und die moderne Kenntnis des Hospitalismus, *Confin Psychiatri* 13:213–29.

11. DeGregory L (2008), The girl in the window, *St. Petersburg Times*.

باید در نظر داشت که در سال‌های اخیر، دانیل تا حدودی بهبود یافته است. یاد گرفته که از توالی استفاده کند، می‌تواند برخی از حرف‌های افراد را بفهمد، و می‌تواند پاسخ‌های گفتاری محدودی نیز ادا کند. اخیراً به پیش‌کودکستان رفته و یاد گرفته که حروف را رونویسی کند. این‌ها نشانه‌های رضایت‌بخش و خوشحال‌کننده‌ای است؛ متأسفانه هم‌چنان بعید به نظر می‌رسد که او بتواند مقدار زیادی از آنچه را در سال‌های غم‌بار نخست زندگی خود از دست داده، دوباره به دست آورد.

نکته‌ی دیگری هم که شایان توجه است، کودکانی مانند دانیل، که در شرایط استرس و محرومیت بزرگ می‌شوند، از نظر بدنی هم خوب رشد نمی‌کنند؛ به این حالت، کوتولگی روانی-اجتماعی می‌گویند. طنزآمیز اینکه یکی از مؤلفان پزشکی در دهه‌ی ۱۹۹۰ سعی کرد اصطلاحی برای این حالت وضع کند: «سندروم کاسپار هاوزر»

Money J (1992). *The Kaspar Hauser syndrome of “psychosocial dwarfism”: Deficient statural, intellectual, and social growth induced by child abuse*. Prometheus Books.

که انتخاب درستی نبود، چرا که تقریباً با اطمینان می‌توان گفت که هاوزر درباره‌ی رمیدگی گذشته‌ی خود دروغ می‌گفت.

۱۲. خوشبختانه، امروزه برخی پروتکل‌های حقوق حیوانات مانع انجام این‌گونه پژوهش‌ها می‌شود. حتی در آن زمان هم، بسیاری از همکاران هارلو از آزمایش‌های او وحشت‌زده شده بودند، و این موجب تقویت جنبش نوپای آزادی جانوران در ایالات متحده شد. یکی از منتقدان هارلو، وین بوث، نوشت که آزمایش‌های هارلو فقط «آنچه را از پیش هم می‌دانستیم، ثابت کرد — اینکه موجودات اجتماعی را می‌توان با ویران کردن روابط اجتماعی آن‌ها، نابود کرد».

۳. درون آینده بیرون است

۱. رجوع کنید به:

Penfield W (1952), Memory mechanisms, *AMA Arch Neurol Psychiatry* 67(2): 178–98; Penfield W (1961), Activation of the record of human experience, *Ann R Coll Surg Engl* 29(2): 77–84.

۲. قشر، لایه‌ی بیرونی مغز است که معمولاً حدود سه میلی‌متر ضخامت دارد. به آن ماده‌ی خاکستری می‌گویند، از آن رو که سلول‌های آن نسبت به ماده‌ی سفید زیر قشر، تیره‌تر به نظر می‌رسند. در جانوران بزرگ‌تر، قشر مغز معمولاً دارای چین و شکنج است. اولین نواری که پنفیلد اندازه‌گیری کرد، قشر حسی‌پیکری نامیده می‌شود، که اشاره به دریافت حس از بدن دارد.

3. Ettlin D (1981), Taub denies allegations of cruelty, *Baltimore Sun*, Nov. , 1981.

4. Pons TP et al. (1991), Massive cortical reorganization after sensory deafferentation in adult macaques, *Science* 252:1857–60; Merzenich M (1998), Long-term change of mind, *Science* 282(5391): 1062–63; Jones EG, Pons TP (1998), Thalamic and brainstem contributions to large-scale plasticity of primate somatosensory cortex, *Science* 282(5391): 1121–5; Merzenich M et al. (1984), Somatosensory cortical map changes following digit amputation in adult monkeys, *J Comp Neurol* 224:591–605.

۵. غیر از قشر مغز، در نواحی دیگر مغز نیز، مانند تالاموس و ساقه‌ی مغز، تغییرات تشکیلاتی وسیع مشاهده شد؛ بعداً به این موضوع خواهیم پرداخت.

6. Knight R (2005), *The Pursuit of Victory: The Life and Achievement of Horatio Nelson* (New York: Basic Books).

7. Mitchell SW (1872), *Injuries of Nerves and Their Consequences* (Philadelphia: Lippincott).

۸. این تکنیک‌ها ابتدا با مغناطوآنسفالوگرافی (MEG) آغاز شد و خیلی زود به تصویربرداری تشدید مغناطیسی کارکرد، یا fMRI، رسید. برای آشنایی با تکنیک‌های تصویربرداری مغز، مراجعه کنید به: Eagleman DM, Downar J (2015), *Brain and Behavior* (New York: Oxford University Press).

۹. درد خیالی به ما می‌آموزد که با آنکه مغز خودش را بازنویسی می‌کند، ولی تغییرات کامل نیست: گرچه نورون‌هایی که قبلاً بازو را کدگذاری می‌کردند، اکنون صورت را کدگذاری می‌کنند، ولی نورون‌های پایین‌دستی دیگر هنوز فکر می‌کنند که دارند اطلاعات بازو را دریافت می‌کنند. به علت این سردرگمی پایین‌دستی، افراد دارای اندام حرکتی قطع شده معمولاً در اندام خیالی خود احساس درد می‌کنند. عموماً هرچه تغییرات قشری وسیع‌تر باشد، درد بیشتری حس می‌شود. رجوع کنید به:

Flor et al. (1995), Phantom-limb pain as a perceptual correlate of cortical reorganization following arm amputation, *Nature* 375(6531): 482–84; Karl A et al. (2001), Reorganization of motor and somatosensory cortex in upper extremity amputees with phantom limb pain, *J Neurosci* 21:3609–18.

بعداً خواهیم دید که نواحی مختلف مغز با سرعت‌های متفاوتی تغییر می‌کنند و چیزهای بیشتری درباره‌ی درد خیالی خواهیم فهمید.

10. Singh AK et al. (2018), Why does the cortex reorganize after sensory loss?, Trends Cogn Sci 22(7): 569–82; Ramachandran VS et al. (1992), Perceptual correlates of massive cortical reorganization, Science 258:1159–60; Barinaga M (1992), The brain remaps its own contours, Science 258:216–18; Borsook D et al. (1998), Acute plasticity in the human somatosensory cortex following amputation, Neuroreport 9:1013–17.
11. Weiss T et al. (2004), Rapid functional plasticity in the primary somatomotor cortex and perceptual changes after nerve block, Eur J Neurosci 20:3413–23.
12. Clark SA et al. (1988), Receptive-fields in the body-surface map in adult cortex defined by temporally correlated inputs, Nature 332:444–45.

۱۳. این قانون که قانون هب نامیده می‌شود، نخستین بار در سال ۱۹۴۹ پیشنهاد شد. Hebb DO (1949), The Organization of Behavior (New York: Wiley & Sons).

خیلی از اوقات، مسئله کمی پیچیده‌تر از این است: اگر نورون A درست قبل از نورون B شلیک کند، آنگاه پیوند بین آن‌ها تقویت می‌شود؛ اگر نورون A درست بعد از نورون B شلیک کند، پیوند بین آن‌ها تضعیف می‌شود. به این پدیده، شکل‌پذیری وابسته به زمان اسپایک گفته می‌شود.

۱۴. برخی استعدادهای ژنتیکی نیز بر چگونگی تشکیل شدن نقشه تأثیر می‌گذارد؛ مثلاً علت اینکه سر در یک انتهای نقشه است و پاها در انتهای دیگر آن، به نحوه‌ی متصل شدن الیاف عصبی بدن مربوط می‌شود. ولی در این کتاب، تأکید ما بر روی روش‌های شگفت‌آوری است که تجربه موجب تغییر مدارهای مغزی می‌شود.

۱۵. محض دقیق بودن مطالب تاریخی: سرزمین لوئیزیانا ابتدا به اسپانیایی‌ها تعلق گرفت. بعد در سال ۱۸۰۲، اسپانیا لوئیزیانا را به فرانسه برگرداند. ولی ناپلئون آن را در سال ۱۸۰۳ به ایالات متحده فروخت، زیرا دیگر رؤیای ینگه دنیا را به فراموشی سپرده بود.

16. Elbert T, Rockstroh B (2004), Reorganization of human cerebral cortex: The range of changes following use and injury, Neuroscientist 10:129–41; Pascual-Leone A et al. (2005), The plastic human brain cortex, Annu Rev Neurosci 28:377–401; D'Angiulli A and Waraich P (2002), Enhanced tactile encoding and memory recognition in congenital blindness, Int J Rehabil Res 25(2): 143–45; Collignon O et al. (2006), Improved selective and divided spatial attention in early blind subjects, Brain Res 1075(1): 175–82; Collignon O et al. (2009), Cross-modal plasticity for the spatial processing of sounds in visually deprived subjects, Exp Brain Res 192(3): 343–58; Bubic A, Striem-Amit E, Amedi A (2010), Large-scale brain plasticity following blindness and the use of sensory substitution devices, in Multisensory Object Perception in the Primate Brain, ed. MJ Naumer and J Kaiser (New York: Springer), 351–80.

17. Amedi A et al. (2010), Cortical activity during tactile exploration of objects in blind and sighted humans, Restor Neurol Neurosci 28(2): 143–56; Sathian K, Stilla R (2010), Cross-modal plasticity of tactile perception in blindness, Restor Neurol Neurosci 28(2): 271–81.

این را نیز در نظر داشته باشید که این تغییرات را به روش‌هایی دیگری نیز می‌توان تفسیر کرد: مثلاً در یک شخص نابینا که خط بریل را می‌خواند، ایجاد یک پالس تحریک الکتریکی روی قشر پس‌سری باعث القای حس لمس در انگشتان خواهد شد (در حالی که این پالس در افراد شاهد بینا چنان تأثیری ندارد). رجوع کنید به:

Ptito M et al. (2008), TMS of the occipital cortex induces tactile sensations in the fingers of blind Braille readers, Exp Brain Res 184(2): 193–200.

18. Hamilton R et al. (2000), Alexia for Braille following bilateral occipital stroke in an early blind woman, Neuroreport 11(2): 237–40.

19. Voss P et al. (2006), A positron emission tomography study during auditory localization by late-onset blind individuals, Neuroreport 17(4): 383–88; Voss P et al. (2008), Differential occ

capital responses in early- and late-blind individuals during a sound-source discrimination task, *Neuroimage* 40(2): 746–58.

در آزمایش دوم در همان مقاله، شرکت‌کنندگان محل صدا را حدس می‌زدند، و همان تأثیر — فعال‌سازی قشر بینایی — مشاهده شد.

20. Renier L, De Volder AG, Rauschecker JP (2014), Cortical plasticity and preserved function in early blindness, *Neurosci Biobehav Rev* 41:53–63; Raz N, Amedi A, Zohary E (2005), V1 activation in congenitally blind humans is associated with episodic retrieval, *Cereb Cortex* 15:1459–68; Merabet LB, Pascual-Leone A (2010), Neural reorganization following sensory loss: The opportunity of change, *Nat Rev Neurosci* 11(1): 44–52.

شایان توجه است که این ارتباط را در جهت دیگر نیز می‌توان نشان داد: وقتی که فعالیت در لوب پس‌سری افراد نابینا به‌طور موقت (از طریق تحریک با یک پالس مغناطیسی) مختل می‌شود، توانایی آن‌ها برای خواندن خط بریل، و حتی پردازش گفتاری آن‌ها، بر اثر این کار دچار مشکل می‌شود. رجوع کنید به:

Amedi A et al. (2004), Transcranial magnetic stimulation of the occipital pole interferes with verbal processing in blind subjects, *Nat Neurosci* 7:1266.

۲۱. این ناحیه VWFA (حوزه‌ی صورت‌واژگان دیداری) نامیده می‌شود.

Reich L et al. (2011), A ventral visual stream reading center independent of visual experience, *Curr Biol* 21:363–68; Striem-Amit E et al. (2012), Reading with sounds: Sensory substitution selectively activates the visual word form area in the blind, *Neuron* 76:640–52.

۲۲. این ناحیه MT (گیجگاهی میانی) یا ۷۵ نامیده می‌شود.

Ptito M et al. (2009), Recruitment of the middle temporal area by tactile motion in congenital blindness, *Neuroreport* 20:543–47. Matteau I et al. (2010), Beyond visual, aural, and haptic movement perception: hMT+ is activated by electrotactile motion stimulation of the tongue in sighted and in congenitally blind individuals, *Brain Res Bull* 82:264–70.

۲۳. این ناحیه LOC (قشر پس‌سری جانبی) نامیده می‌شود.

Amedi et al. (2010).

۲۴. این مطلب را به این صورت نیز می‌توان بیان کرد: مغز یک اپراتور «فراحالتی» («metamodal») است. فراحالتی یعنی عملیات مستقل از حالت‌ها (یا حواس) خاصی است که اطلاعات را به آنجا می‌رساند. رجوع کنید به:

Pascual-Leone A, Hamilton R (2001), The metamodal organization of the brain, *Prog Brain Res* 134:427–45; Reich L, Maidenbaum S, Amedi A (2011), The brain as a flexible task machine: Implications for visual rehabilitation using noninvasive vs. invasive approaches, *Curr Opin Neurol* 25:86–95.

منابع زیر را نیز ببینید:

Maidenbaum S et al. (2014), Sensory substitution: Closing the gap between basic research and widespread practical visual rehabilitation, *Neurosci Biobehav Rev* 41:3–15; Reich L et al. (2011), A ventral visual stream reading center independent of visual experience, *Curr Biol* 21(5): 363–8; Striem-Amit E et al. (2012), The large-scale organization of “visual” streams emerges without visual experience, *Cereb Cortex* 22(7): 1698–709; Meredith MA et al. (2011), Crossmodal reorganization in the early deaf switches sensory, but not behavioral roles of auditory cortex, *Proc Natl Acad Sci USA* 108(21): 8856–61; Bola L et al. (2017), Task-specific reorganization of the auditory cortex in deaf humans, *Proc Natl Acad Sci USA* 114(4): E600–E609.

برای مقالات مروری، مراجعه کنید به:

Bavelier and Hirshorn (2010) and Dormal, Collignon (2011).

25. Finney EM, Fine I, Dobkins KR (2001), Visual stimuli activate auditory cortex in the deaf, *Nat Neurosci* 4(12): 1171–73; Meredith MA et al. (2011).
26. Elbert, Rockstroh (2004); Pascual-Leone et al. (2005).

۲۷. رجوع کنید به:

Hamilton RH, Pascual-Leone A, Schlaug G (2004), Absolute pitch in blind musicians, *Neuroreport* 15:803–6; Gougoux F et al. (2004), *Neuropsychology: Pitch discrimination in the early blind*, *Nature* 430(6997): 309.

۲۸. Voss et al. (۲۰۰۸).

۲۹. بن در سال ۲۰۱۶، در سن شانزده سالگی، به علت بازگشت سرطانی که هر دو چشمش را گرفته بود، از دنیا رفت.

30. *Extraordinary People*, “The Boy Who Sees Without Eyes” Season 1, episode 43, aired on Jan. 9, 2007.

31. Teng S, Puri A, Whitney D (2012), Ultrafine spatial acuity of blind expert human echolocators, *Exp Brain Res* 216(4): 483–88; Schenkman BN, Nilsson ME (2010), Human echolocation: Blind and sighted persons’ ability to detect sounds recorded in the presence of a reflecting object, *Perception* 39(4): 483; Arnott SR et al. (2013), Shape-specific activation of occipital cortex in an early blind echolocation expert, *Neuropsychologia* 51(5): 938–49; Thaler L et al. (2014), Neural correlates of motion processing through echolocation, source hearing, and vision in blind echolocation experts and sighted echolocation novices, *J Neurophysiol* 111(1): 112–27.

به علاوه، در افراد نابینایی که قابلیت جهت یابی با پژواک دارند، پژواک های صوتی قشر بینایی را فعالیت می کند، نه شنوایی:

Thaler L et al. (2011), Neural correlates of natural human echolocation in early and late blind echolocation experts, *PLoS One* 6(5): e20162.

قابلیت جهت یابی با پژواک را می توان با فناوری بهبود بخشید: چندین پروژه ی جدید هستند که در آن ها یک حسگر فراصوتی روی عینکی نصب می شود و فاصله را تا نزدیک ترین اشیاء اندازه گیری می کند و آن را به صورت یک سیگنال شنوایی واضح تقویت می کند، به طوری که فواصل مختلف با آهنگ های متفاوتی مشخص می شود.

32. Griffin DR (1944), Echolocation by blind men, bats, and radar, *Science* 100(2609): 589–90.

33. Amedi A et al. (2003), Early “visual” cortex activation correlates with superior verbal-memory performance in the blind, *Nat Neurosci* 6:758–66.

۳۴. به عبارت دیگر، وظیفه ی تشخیص مقیاس خاکستری قطعه ای از قشر را که به طور معمول اختصاص به تشخیص بین خاکستری و رنگ های دیگر دارد، در اختیار می گیرد.

35. Kok MA et al. (2014), Cross-modal reorganization of cortical afferents to dorsal auditory cortex following early- and late-onset deafness, *J Comp Neurol* 522(3): 654–75; Finney EM et al. (2001), Visual stimuli activate auditory cortex in the deaf, *Nat Neurosci* 4(12): 1171.

۳۶. در اوتیسم، نواحی مغز با سرعت های متفاوتی رشد می کنند، که ظاهراً سبب می شود که نواحی مختلف اتصالات غیرطبیعی برقرار کنند – نتیجه ی نهایی آن این است که اتصالات دوربرد در مغز اوتیستی اندکی متفاوت است، و منجر به نقایصی در زمینه ی زبان و رفتار اجتماعی می شود.

Redcay E, Courchesne E (2005), When is the brain enlarged in autism? A meta-analysis of all brain size reports, *Biol Psychiatry* 58:1–9.

به عبارت دیگر، یک سیستم مبتنی بر مدارسازی پویا می تواند خود را از یک سلول واحد متبلور کند، ولی نحوه ی گسترده شدن آن – ریتم و ترتیب دقیق آن – منجر به پیامدهای متفاوتی می شود. باید دانست که در زمینه ی اوتیسم، نظریه های متنوعی ارائه شده است، از نقص در سیستم نورون آینه ای گرفته تا

تأثیر واکسن‌ها، کم بودن اتصالات، اختلالات انسجام مرکزی، و امثال این‌ها. لذا این نظریه که مشکل صرفاً در چگونگی توزیع قشر است، احتمالاً تنها بخشی از داستان خواهد بود. با این وجود، به نمونه‌هایی مانند منابع زیر مراجعه کنید:

Boddaert N et al. (2005), Autism: Functional brain mapping of exceptional calendar capacity, *Br J Psychiatry* 187:83–86; LeBlanc J, Fagioli M (2011), Autism: A “critical period” disorder?, *Neural plasticity*. 011:921680.

37. Voss et al. (2008).

38. Pascual-Leone A, Hamilton R (2001), The metamodal organization of the brain, in *Vision: From Neurons to Cognition*, ed. C Casanova and M Ptito (New York: Elsevier Science), 427–45.

39. Merabet LB et al. (2008), Rapid and reversible recruitment of early visual cortex for touch, *PLoS One* 3(8): e3046. Also note that an early version of these results was published in Pascual-Leone and Hamilton (2001).

40. Merabet LB et al. (2007), Combined activation and deactivation of visual cortex during tactile sensory processing, *J Neurophysiol* 97:1633–41.

۴۱. گرچه برخی از شکل‌های رؤیا ممکن است در خواب غیر-REM بروز کند:

Kleitman N (1963), *Sleep and Wakefulness*. (Chicago: U Chicago Press),

ولی این‌گونه رؤیاها با رؤیاهای REM که بسیار شایع‌تر هستند، تفاوت دارند: این‌ها معمولاً در ارتباط با برنامه‌های یا افکار پیچیده هستند، و فاقد طراوت بصری و اجزای توهمی و هذیانی رؤیاهای REM هستند. از آنجا که پیشنهاد ما مبتنی بر فعال‌سازی شدید دستگاه بینایی است، لذا بیشتر به خواب REM مربوط می‌شود تا خواب غیر-REM.

۴۲. این فعالیت امواج پلی-زانویی-پس‌سری (PGO) نامیده می‌شود، چرا که از ناحیه‌ای از مغز به نام پل مغز شروع می‌شود، بعد به هسته‌ی زانویی جانبی می‌رود، و در پایان رهسپار قشر پس‌سری (بینایی) می‌شود. شایان توجه است که درباره‌ی اینکه آیا امواج PGO، خواب REM، و رؤیا دیدن واقعاً معادل یکدیگر هستند یا اینکه هر کدام چیز جدایی هستند، مقداری (البته نه زیاد) بحث و جدل وجود دارد. محض کامل بودن مطلب، در اینجا اشاره می‌کنم که کودکان و افراد شی‌زوفرنیکی که تحت لوبوتومی جلوپیشانی قرار گرفته‌اند، می‌توانند خواب REM تقریباً بدون رؤیا دیدن داشته باشند. به منبع زیر مراجعه کنید (خصوصاً بحث جالب همکاران که در کنار مقاله ذکر شده است):

Solms M (2000), Dreaming and REM sleep are controlled by different brain mechanisms, *Bee hav Brain Sci* 23(6): 843–50;

هم‌چنین، به منبع زیر نیز مراجعه نمایید:

Jus et al. (1973), Studies on dream recall in chronic schizophrenic patients after prefrontal lobotomy, *Biol Psychiatry* 6(3): 275–93.

علاوه بر این، معلوم نیست که آیا فعالیت ساقه‌ی مغز تصادفی است، یا منعکس‌کننده‌ی فعالیت‌های روز است، و یا اینکه برنامه‌های عصبی را تمرین می‌کند — ولی در اینجا نکته‌ی مهم آن است که زمانی که امواج به نواحی بصری انتشار یافت، این فعالیت به‌صورت بصری تجربه می‌شود. رجوع کنید به:

Nir Y, Tononi G (2010), Dreaming and the brain: From phenomenology to neurophysiology, *Trends Cogn Sci* 14(2): 88–100.

43. Eagleman DM, Vaughn DA (2020, under review).

مانند هر نظریه‌ی بیولوژیکی، این نظریه را نیز باید در سیاق چشم‌اندازهای زمانی تکامل فهمید. برنامه‌های ساخت این مدارها در اعماق ژنتیک قرار دارند، و بنابراین، بستگی به تجربیات رخ داده در

طول عمر یک فرد ندارند. از آنجا که این مدارها در طول صدها میلیون سال تکامل پیدا کرده‌اند، لذا تحت تأثیر توانایی امروز ما برای رفع تاریکی با نور الکتریکی قرار نمی‌گیرند.

فرضیه‌ی ما پرسش‌های زیادی را بی‌پاسخ می‌گذارد: مثلاً اینکه چرا ما پیوسته رؤیا نمی‌بینیم، بلکه به‌صورت حمله‌ای می‌بینیم؟ به‌علاوه، معمای محتوای رؤیا را نیز حل نمی‌کند. برای مرور مسئله‌ی محتوای به منبع زیر مراجعه کنید:

Flanagan O (2000), *Dreaming Souls: Sleep, Dreams, and the Evolution of the Conscious Mind* (New York: Oxford University Press).

بعداً فرضیه‌مان را بیشتر بررسی خواهیم کرد و به مطالعه‌ی تغییرات بصری در بیماری‌هایی که منجر به از بین رفتن یا مختل شدن رؤیاها می‌شود، خواهیم پرداخت. در اینجا با توجه به فرصتی که برای درک رؤیا از دیدگاهی جدید فراهم شده است، چیزهای زیادی برای شناختن وجود دارد. هم‌چنین، با استفاده از مهارکننده‌های منوآمین اکسیداز و نیز در برخی ضایعات مغزی، خواب REM سرکوب می‌شود، و در عین حال، در افرادی که مشکلات خواب REM دارند، به سختی می‌توان هرگونه مشکل (شناختی یا فیزیولوژیک) یا مشاهده کرد.

Siegel JM (2001), The REM sleep-memory consolidation hypothesis, *Science* 294:1058–63.

با این حال، فرضیه‌ی ما برخی مشکلات بصری را پیش‌بینی می‌کند، و در واقع، این دقیقاً همان چیزی است که در افرادی که تحت درمان با مهارکننده‌های منوآمین اکسیداز یا ضدافسردگی‌های سه‌حلقه‌ای قرار می‌گیرند، مشاهده می‌شود. برخی از پزشکان پیشنهاد می‌کنند که تاری دید ناشی از خشکی چشم‌ها است؛ ولی ما فکر می‌کنیم که این ممکن است ریشه‌ی واقعی مشکل نباشد.

یک نکته‌ی فنی جالب دیگر: در گذشته، فرضیه‌های مختلفی پیشنهاد کرده‌اند که مدت خواب REM بستگی به مدت بیداری قبلی دارد. ولی اگر این‌طور می‌بود، انتظار داشتیم که مدت خواب REM در ابتدای شب طولانی‌تر و در انتهای آن کوتاه‌تر می‌بود. در حالی که در واقع، درست برعکس این حالت است. نخستین دوره‌ی خواب REM شما ممکن است فقط پنج تا ده دقیقه طول بکشد، در حالی که آخرین دوره‌ی آن ممکن است بیش از بیست و پنج دقیقه باشد. به منبع زیر مراجعه کنید:

See Siegel JM (2005), Clues to the functions of mammalian sleep, *Nature* 437(7063):1264–71.

این وضعیت با این تفسیر سازگارتر است که دستگاه بینایی هرچه مدت بیشتری بدون ورودی بصری باشد، مجبور است شدیدتر مبارزه کند.

و یک نکته‌ی دیگر: در یک جانور کم‌سن، اگر نوری را که وارد یک چشم می‌شود، کاهش دهید (ولی در چشم دیگر نه)، می‌توانید اشغال قلمرو از سوی چشم خوب را اندازه‌گیری کنید. اگر جانور را در حین دوره‌ی حساس آسیب‌پذیری از خواب REM محروم کنید، عدم توازن تشدید می‌شود. به عبارت دیگر، خواب REM (که به یک میزان برای هر دو کانال بینایی مفید است) به کُندتر کردن اشغال کمک می‌کند — که در این مورد، اشغال قلمرو یک چشم از سوی چشم دیگر است. بدون خواب REM، اشغال سریع‌تر صورت می‌گیرد.

۴۴. کریگ هوروویتز (Craig Hurovitz) و همکارانش در مقاله‌ای در سال ۱۹۹۹ با عنوان «رؤیای مردان و زنان نابینا» جزئیات ۳۷۲ رؤیای مربوط به پانزده فرد بزرگسال نابینا را با دقت ثبت و تحلیل کردند.

۴۵. افرادی که پس از سن هفت‌سالگی نابینا می‌شوند، بیش از کسانی که در سنین پایین‌تر نابینا می‌شوند، محتوای بصری در رؤیاهای خود دارند:

Amadeo M, Gomez E (1966), Eye movements, attention and dreaming in the congenitally blind, *Can Psychiat Assoc J*: 501–7; Berger RJ et al. (1962), The eec, eye-movements and dreams of the blind, *Quart J Exp Psychol* 14(3): 183–6; Kerr NH et al. (1982), The structure of laboratory dream reports in blind and sighted subjects, *J Nerv Mental Dis* 170(5): 286–94;

Hurovitz C et al. (1999), The dreams of blind men and women: A replication and extension of previous findings, *Dreaming* 9:183–93; Kirtley DD (1975), *The Psychology of Blindness*. (Chicago: Nelson-Hall).

لوب پس‌سری در کسانی که به‌طور دیررس نابینا می‌شوند، کمتر از سوی حواس دیگر اشغال می‌شود: برای نمونه، به منبع زیر مراجعه کنید:

Voss et al. (2006, 2008).

46. Zepelin H, Siegel JM, Tobler I (2005), in *Principles and Practice of Sleep Medicine*, vol. , ed. MH Kryger, T Roth, and WC Dement (Philadelphia: Elsevier Saunders), 91–100. Jouvett-Mounier D, Astic L, Lacote D (1970), Ontogenesis of the states of sleep in rat, cat, and guinea pig during the first postnatal month, *Dev Psychobiol* 2:216–39.

47. Siegel JM (2005).

48. Angerhausen D et al. (2012), An astrobiological experiment to explore the habitability of tidally locked m-dwarf planets, *Proc Int Astron Union* 8(S293): 192–96.

دقت کنید که این شبیه ماه ما است که همیشه یک طرف آن به سمت زمین است. اما باید دانست که در مورد ماه، زمان چرخش آن دقیقاً همان زمان گردش مداری آن است، و بدین خاطر است که همیشه یک طرف آن را می‌بینیم، ولی ماه شب و روز دارد، زیرا به سمت خورشید به‌گونه‌ی متفاوتی قرار گرفته است. سیاره‌ای که به یک ستاره قفل کشندی شده است، شب و روز ندارد.

۴. سر درآوردن از ورودی‌ها

۱. رجوع کنید به:

Chorost M (2005), *Rebuilt: How Becoming Part Computer Made Me More Human* (Boston: Houghton Mifflin); Chorost M (2011), *World Wide Mind: The Coming Integration of Humanity, Machines, and the Internet* (New York: Free Press).

هم‌چنین، مراجعه کنید به:

Chorost M (2005), *My bionic quest for Bolero*, *Wired*.

2. Fleming N (2007), How one man “saw” his son after 13 years, *Telegraph*.

3. Ahuja AK et al. (2011), Blind subjects implanted with the Argus II retinal prosthesis are able to improve performance in a spatial-motor task, *Br J Ophthalmol* 95(4): 539–43.

۴. البته این تشبیهی که من ارائه کرده‌ام، کمی می‌لنگد، چون دستگاه‌های جازدنی در دنیای کامپیوتر بر پایه‌ی مقرراتی از قبل توافق شده ایجاد می‌شوند: دستگاه محیطی اطلاعاتی را درباره‌ی خودش دارد که آن را به کامپیوتر می‌دهد تا پردازنده‌ی مرکزی بداند باید چکار کند. برعکس، مغز از پروتکل نسبتاً متفاوتی استفاده می‌کند. تصور بر این است که دستگاه‌های محیطی مانند چشم هیچ چیزی درباره‌ی خودشان نمی‌دانند. آن‌ها صرفاً کار خودشان را انجام می‌دهند. ولی مغز توانایی آن را دارد که اطلاعات سودمندی را از آن‌ها استخراج کند — به عبارت دیگر، می‌داند که چگونه از آن‌ها استفاده کند.

5. Photograph by Sharon Steinmann, AL.com. Alabama baby born without a nose, mom says he's perfect, ABC News, www.abcnews.go.com.

6. Lourgos AL (2015), Family of Peoria baby born without eyes prepares for treatment in Chicago, *Chicago Tribune*, www.chicagotribune.com.

۷. به این وضعیت، سندروم LAMM می‌گویند، که مخفف آپلازی لابیرنت، میکروشیا، و میکرودونتیا است. این وضعیت بر تکوین گوش‌ها و دندان‌ها تأثیر می‌گذارد. از مشخصات این سندروم، کوچک بودن بخش بیرونی گوش و کوچک بودن و شکاف‌دار بودن دندان‌ها است — زیرا ژنی که دچار جهش شده است (FGF۳) مسئول راه‌اندازی آبشاری از فعل و انفعالات سلولی است که منجر به تشکیل ساختارهای گوش

درونی، گوش بیرونی، و دندان‌ها می‌شود. زمانی که ژن FGF۳ جهش پیدا می‌کند، سیگنال صحیح شروع را ارسال نمی‌کند، و منجر به اختلالات گوش‌ها و دندان‌ها در سندروم LAMM می‌شود.

8. Wetzel F (2013), Woman born without tongue has op so she can speak, eat, and breathe more easily, *Sun*, Jan. 8, 2013.

۹. به این وضعیت معمولاً عدم حساسیت مادرزادی به درد یا بی‌دردی مادرزادی می‌گویند. رجوع کنید به: Eagleman DM, Downar J (2015), *Brain and Behavior* (New York: Oxford University Press).

10. Abrams M, Winters D (2003), Can you see with your tongue?, *Discover*.

11. Macpherson F, ed. (2018), *Sensory Substitution and Augmentation* (Oxford: Oxford University Press); Lenay C et al. (2003), Sensory substitution: Limits and perspectives, in *Touching for Knowing: Cognitive Psychology of Haptic Manual Perception*, ed. Y Hatwell, A Streri, and E Gentaz (Philadelphia: John Benjamins), 275–92; Poirier C, De Volder AG, Scheiber C (2007), What neuroimaging tells us about sensory substitution, *Neurosci Biobehav Rev* 31:1064–70; Bubic A, Striem-Amit E, Amedi A (2010), Large-scale brain plasticity following blindness and the use of sensory substitution devices, in *Multisensory Object Perception in the Primate Brain*, ed. MJ Naumer and J Kaiser (New York: Springer), 351–80; Novich SD, Eagleman DM (2015), Using space and time to encode vibrotactile information: Toward an estimate of the skin's achievable throughput, *Exp Brain Res* 233(10): 2777–88; Chebat DR et al. (2018), Sensory substitution and the neural correlates of navigation in blindness, in *Mobility of Visually Impaired People* (Cham: Springer), 167–200.

12. Bach-y-Rita P (1972), *Brain Mechanisms in Sensory Substitution* (New York: Academic Press); Brain mechanisms in sensory substitution. Bach-y-Rita P (2004), Tactile sensory substitution studies, *Ann NY Acad Sci* 1013:83–91.

13. Hurley S, Noë A (2003), Neural plasticity and consciousness, *Biology and Philosophy* 18(1): 131–68; Noë A (2004), *Action in Perception* (Cambridge, Mass: MIT Press).

14. Bach-y-Rita P et al. (2003), Seeing with the brain, *Int J Human-Computer Interaction*, 15(2): 285–95; Nagel SK et al. (2005), Beyond sensory substitution – learning the sixth sense, *J Neural Eng* 2(4): R13–R26.

15. Starkiewicz W, Kuliszewski T (1963), The 80-channel elektroftalm, in *Proceedings of the International Congress on Technology and Blindness* (New York: American Foundation for the Blind).

۱۶. این ایده که قشر در همه جا اساساً یکسان است – ولی ورودی آن را شکل می‌دهند – نخستین بار از سوی فیزیولوژیست عصبی ورنون مونت کاسل مورد کاوش قرار گرفت، و بعداً جف هاکینز که یک دانشمند و مخترع بود، آن را بیشتر تقویت کرد. رجوع کنید به:

Hawkins J, Blakeslee S (2005), *On Intelligence* (New York: Times Books).

17. Pascual-Leone A, Hamilton R (2001), The metamodal organization of the brain, in *Vision: From Neurons to Cognition*, ed. C Casanova and M Ptito (New York: Elsevier Science), 427–45.

18. Sur M (2001), Cortical development: Transplantation and rewiring studies, in *International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences*, ed. N Smelser and P Baltes (New York: Elsevier).

19. Sharma J, Angelucci A, Sur M (2000), Induction of visual orientation modules in auditory cortex, *Nature* 404:841–47. The cells in the new auditory cortex now responded, for example, to different orientations of lines.

۲۰. اینجا نکته‌ای هست که در فصل‌های بعدی بیشتر به آن خواهیم پرداخت: مغز در ابتدا مانند یک لوح کاملاً خالی نیست. و بدین خاطر است که قشر شنوایی در راسوی اهلی که اطلاعات بینایی دریافت می‌کرد، از نظر کدگذاری به دقت قشر بینایی اصلی نبود. خصوصیات ژنتیکی محلی سبب می‌شود که

برخی نواحی برای دریافت برخی انواع ورودی‌ها، اندکی مستعدتر باشند. نوعی پیوستار بین نقشه‌های ساختمانی ثابت (ژنتیک) و انعطاف‌پذیری براساس فعالیت (مدارسازی پویا) وجود دارد. چرا؟ زیرا در مقیاس زمانی تکاملی، ورودی‌های پایدار به تدریج از چیزی که در طول عمر آموخته می‌شود، تبدیل به چیزی می‌شود که به صورت ژنتیکی از قبل برنامه‌نویسی شده است. هدف ما در اینجا تمرکز بر روی انعطاف‌پذیری فوق‌العاده‌ای است که در طول عمر مشاهده می‌شود.

21. Bach-y-Rita P et al. (2005), Late human brain plasticity: Vestibular substitution with a tongue BrainPort human-machine interface, *Intellectica* 1(40): 115–22; Nau AC et al. (2015), Acquisition of visual perception in blind adults using the BrainPort artificial vision device, *Am J Occup Ther* 69(1): 1–8; Stronks HC et al. (2016), Visual task performance in the blind with the BrainPort V100 Vision Aid, *Expert Rev Med Devices* 13(10): 919–31.

22. Sampaio E, Maris S, Bach-y-Rita P (2001), Brain plasticity: “Visual” acuity of blind persons via the tongue, *Brain Res* 908(2): 204–7.

23. Levy B (2008), The blind climber who “sees” with his tongue, *Discover*, June 22, 2008.

24. Bach-y-Rita P et al. (1969), Vision substitution by tactile image projection, *Nature* 221:963–64; Bach-y-Rita P (2004), Tactile sensory substitution studies, *Ann NY Acad Sci* 1013:83–91.

۲۵. این ناحیه‌ای است که MT+ نامیده می‌شود.

Matteau I et al. (2010), Beyond visual, aural, and haptic movement perception: hMT+ is acp tivated by electrotactile motion stimulation of the tongue in sighted and in congenitally blind individuals, *Brain Res Bull* 82(5–6): 264–70.

به منابع زیر نیز مراجعه کنید:

Amedi A et al. (2010), Cortical activity during tactile exploration of objects in blind and sighted humans, *Restor Neurol Neurosci* 28(2): 143–56; and Merabet L et al. (2009), Functional recruitment of visual cortex for sound encoded object identification in the blind, *Neuroreport* 20(2): 132.

در افراد نابینا، خیلی از نواحی دیگر قشر پس‌سری نیز فعال می‌شوند، که البته با توجه به تصرف نواحی قشری که در فصل قبل دیدیم، همین انتظار نیز می‌رود.

26. WIRED Science video: “Mixed Feelings.”

۲۷. سیستم شبکه‌ای پیشانی به وسیله‌ی شرکت آی‌پلاس‌پلاس در ژاپن و آزمایشگاه تاجی در دانشگاه توکیو طراحی شده است. این سیستم با استفاده از تقویت لبه‌ها و فیلتر گذر باند زمانی، شبکه را شبیه‌سازی می‌کند.

۲۸. این راه خوبی برای استفاده از شکم است.

Lobo L et al. (2018), Sensory substitution: Using a vibrotactile device to orient and walk to targets, *J Exp Psychol Appl* 24(1): 108.

هم‌چنین، مراجعه کنید به:

Lobo L et al. (2017), Sensory substitution and walking toward targets: An experiment with blind participants.

پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که مسیر راه رفتن شرکت‌کنندگان نابینا از قبل برنامه‌ریزی نشده است، بلکه به صورت پویا با دریافت اطلاعات جدید، تعیین می‌شود.

۲۹. رجوع کنید به:

Kay L (2000), Auditory perception of objects by blind persons, using a bioacoustic high resolution air sonar, *J Acoust Soc Am* 107(6): 3266–76.

عینک‌های صوتی در دهه‌ی ۱۹۷۰ ارائه شد و از آن زمان بهبودهای زیادی در آن‌ها انجام شده است

(نمونه‌های آن دستگاه کمکی حسی دوگوشی کی و بعداً سیستم KASPA هستند، که بافت سطحی اشیا را با استفاده از طنین صوت نشان می‌دهند). تفکیک‌پذیری تکنیک‌های فراصوتی خیلی بالا نیست، خصوصاً در راستای بالا-پایین – به‌طوری که عینک‌های صوتی عمدتاً برای آشکارسازی اشیا در یک شکاف باریک افقی سودمند هستند.

30. Bower TGR (1978), Perceptual development: Object and space, in *Handbook of Perception*, vol. , *Perceptual Coding*, ed. EC Carterette and MP Friedman (New York: Academic Press).

هم‌چنین، مراجعه کنید به:

Aitken S, Bower TGR (1982), Intersensory substitution in the blind, *J Exp Child Psychol* 33:309–23.

۳۱. به خاطر این کاهش شکل‌پذیری با افزایش سن، لازم است که جایگزینی حسی در هر فرد جداگانه برنامه‌ریزی شود – هم براساس سن کنونی و هم براساس سنی که نابینایی ایجاد شده است.

Bubic, Striem-Amit, Amedi (2010).

32. Meijer PB (1992), An experimental system for auditory image representations, *IEEE Trans Biomed Eng* 39(2): 112–21.

۳۳. برای جزئیات فنی و شنیدن نمونه‌هایی از الگوریتم vOICE، به نشانی اینترنتی www.seeingwith-sound.com مراجعه کنید.

34. Arno P et al. (1999), Auditory coding of visual patterns for the blind, *Perception* 28(8): 1013–29; Arno P et al. (2001), Occipital activation by pattern recognition in the early blind using auditory substitution for vision, *Neuroimage* 13(4): 632–45; Auvray M, Hanneton S, O'Regan JK (2007), Learning to perceive with a visuo-auditory substitution system: Localisation and object recognition with “the vOICE,” *Perception* 36:416–30; Proulx MJ et al. (2008), Seeing “where” through the ears: Effects of learning-by-doing and long-term sensory deprivation on localization based on image-to-sound substitution, *PLoS One* 3(3): e1840.

35. Cronly-Dillon J, Persaud K, Gregory RP (1999), The perception of visual images encoded in musical form: A study in cross-modality information transfer, *Proc Biol Sci* 266(1436): 2427–33; Cronly-Dillon J, Persaud KC, Blore R (2000), Blind subjects construct conscious mental images of visual scenes encoded in musical form, *Proc Biol Sci* 267(1458): 2231–38.

36. Quotation from Pat Fletcher in an article in ACB's Braille forum, as cited in Maidenbaum S et al. (2014), Sensory substitution: Closing the gap between basic research and widespread practical visual rehabilitation, *Neurosci Biobehav Rev* 41:3–15.

۳۷. به‌طور خاص، عمیدی و همکاران (۲۰۰۷) فعال شدن ناحیه‌ای از مغز به نام ناحیه‌ی لمسی-بینایی جانبی-پس‌سری (LOtv) را نشان دادند. به نظر می‌رسد که این ناحیه اطلاعات مربوط به شکل را کدگذاری می‌کند – صرف نظر از اینکه به‌وسیله‌ی بینایی فعال شود، یا لمس، و یا یادگیری منظره‌ی صوتی بینایی به‌شعوبایی.

Amedi A et al. (2007), Shape conveyed by visual-to-auditory sensory substitution activates the lateral occipital complex, *Nat Neurosci* 10:687–89.

خلاصه‌ای از تجربیات یک استفاده‌کننده را می‌توانید در منبع زیر ببینید:

Piore A (2017), *The Body Builders: Inside the Science of the Engineered Human* (New York: Ecco).

38. Collignon O et al. (2007), Functional cerebral reorganization for auditory spatial processing and auditory substitution of vision in early blind subjects, *Cereb Cortex* 17(2): 457–65.

39. Abboud S et al. (2014), EyeMusic: Introducing a “visual” colorful experience for the blind using auditory sensory substitution, *Restor Neurol Neurosci* 32(2): 247–57.

اپلیکیشن EyeMusic مبتنی بر فناوری قدیمی‌تری به نام SmartSight است:

Cronly-Dillon et al. (1999, 2000).

40. Massiceti D, Hicks SL, van Rheede JJ (2018), Stereosonic vision: Exploring visual-to-auditory sensory substitution mappings in an immersive virtual reality navigation paradigm, *PLoS One* 13(7): e0199389. Tapu R, Mocanu B, Zaharia T (2018), Wearable assistive devices for visually impaired: A state of the art survey, *Pattern Recognit Lett*; Kubanek M, Bobulski J (2018), Device for acoustic support of orientation in the surroundings for blind people, *Sensors* 18(12): 4309. See also Hoffmann R et al. (2018), Evaluation of an audio-haptic sensory substitution device for enhancing spatial awareness for the visually impaired, *Optom Vis Sci* 95(9): 757.

۴۱. تراخم که شایع‌ترین علت کوری در جهان در حال توسعه است، منجر به نابینایی تقریباً دو میلیون نفر شده است. دومین علت شایع کوری، انکوسرکیازیس [کوری رودخانه]، در سی کشور آفریقایی وضعیت بومی دارد. پژوهشگران بسیاری درصدد استفاده از نرم‌افزار جایگزینی حسی به‌عنوان پلی به سوی یادگیری مجدد بینایی در تلفیق با درمان‌های دیگر (مثلاً جراحی قرنیه) هستند.

42. Koffler T et al. (2015), Genetics of hearing loss, *Otolaryngol Clin North Am* 48(6): 1041–61.

43. Novich SD, Eagleman DM (2015), Using space and time to encode vibrotactile information: Toward an estimate of the skin's achievable throughput, *Exp Brain Res* 233(10): 2777–88. Perrotta M, Asgeirsdottir T, Eagleman DM (2020). Deciphering sounds through patterns of vibration on the skin. (Under review). See also Neosensory.com.

آیا می‌توانستیم چیزی غیر از ارتعاش را انتخاب کنیم؟ به هر حال، پوست انواع گیرنده دارد که می‌توان از آن‌ها برای انتقال اطلاعات استفاده کرد، از قبیل ارتعاش، دما، خارش، درد، و کشش. ولی ما روی ارتعاش تمرکز کردیم، چرا که سرعت بالایی دارد. دما در زمینه‌ی تعیین محل ضعیف است و دیر احساس می‌شود. گیرنده‌های کشش با آنکه خصوصیات فضایی و زمانی نویدبخشی دارند، ولی کشش پوست به‌صورت بلندمدت موجب ناراحتی فرد می‌شود. در مورد درد هم که طبیعتاً نیازی به گفتن نیست.

۴۴. در ضمن، به «لهجه»ی خاص یک فرد ناشنوا در هنگام صحبت کردن توجه کنید. آیا این نوعی اختلال تکلم است؟ خیر. بلکه شخصی که کاملاً ناشنوا است، از طریق تماشای کردن و تقلید کردن حرکات دهان افراد، حرف زدن را یاد می‌گیرد. با آنکه تقلید حرکات لب روش کمابیش مؤثری است، ولی مشکل آن است که تماشاکننده‌ی ناشنوا نمی‌تواند ببیند که زبان گوینده چه کاری انجام می‌دهد. سعی کنید یک جمله‌ی معمولی را بگویید، ولی در همان حال، زبانتان را در ته دهان بی‌حرکت نگه دارید. حرف زدن‌تان درست مثل یک فرد ناشنوا خواهد بود. فرصت جالبی که ایجاد شده، این است که افرادی که از دستگاه‌های ما استفاده می‌کنند، می‌توانند بر این محدودیت پنهان زبان غلبه کنند. آن‌ها از طریق مقایسه‌ی حرف زدن افراد دیگر با تکلم خودشان، می‌توانند تفاوت را احساس کنند — و به این طریق، امکان‌های مختلف را کاوش کنند تا آنکه صدای کلمات یکسان شود.

۴۵. مراجعه کنید به:

Alcorn S (1932), The Tadoma method, *Volta Rev* 34:195–98; Reed CM et al. (1985), Research on the Tadoma method of speech communication, *J Acoust Soc Am* 77:247–57.

۴۶. به علت محدودیت‌های محاسباتی در سال‌های گذشته، تلاش‌های قبلی برای جایگزینی صدا به لمس متکی بر فیلتر گذر باند صوت و پخش کردن خروجی آن بر روی پوست با استفاده از سیم‌لوله‌های ارتعاشی بود. این سیم‌لوله‌ها با بسامد ثابتی در حد کمتر از نصف پهنای باند کانال گذر باند عمل می‌کردند، به‌طوری که منجر به نویز دگرنامی می‌شد. به‌علاوه، نمونه‌های چندکاناله‌ی این دستگاه‌ها به علت محدودیت اندازه و ظرفیت باتری، از نظر تعداد رابط‌های ارتعاشی ممکن محدودیت داشتند. حالا قدرت محاسباتی کامپیوترها، سریع‌تر و ارزان‌تر شده است. تبدیل‌های ریاضی مورد نظر را می‌توان

تقریباً بدون هرگونه هزینه‌ای به‌طور زنده انجام داد، بدون آنکه نیازی به مدارهای مجتمع سفارشی باشد. باتری‌های امروزی یون لیتیم امکان پشتیبانی از رابط‌های ارتعاشی بیشتری دارند که چنین چیزی در دستگاه‌های قدیمی امکان‌پذیر نبود. در رابطه با تلاش‌های قبلی برای ساخت دستگاه‌های شنوایی صدا به لمس، مراجعه کنید به:

Summers and Gratton (1995); Traunmuller (1980); Weisenberger et al. (1991); Reed and Delt horne (2003); Galvin et al. (2001). See also Cholewiak RW, Sherrick CE (1986), Tracking skill of a deaf person with long-term tactile aid experience: A case study, *J Rehabil Res Dev* 23(2): 20-26.

47. Turchetti et al. (2011), Systematic review of the scientific literature on the economic evaluation of cochlear implants in paediatric patients, *Acta Otorhinolaryngol* 31(5): 311.

۴۸. در افرادی هم که حلزون کاشته‌اند، استفاده از دستگاه ارتعاشی_لمسی به‌طور متوسط در حد ۲۰ درصد باعث بهبود توانایی آن‌ها برای تشخیص صداها می‌شود (داده‌ها از مطالعات داخلی در شرکت نتوسنسوری).

49. Danilov YP et al. (2007), Efficacy of electrotactile vestibular substitution in patients with peripheral and central vestibular loss, *J Vestib Res* 17(2-3): 119-30.

۵۰. یک نکته‌ی دیگر درباره‌ی جایگزینی حسی: اینکه برای یک فرد کدام رویکرد مناسب‌تر است - مثلاً تراشه‌ی شبکیه یا جایگزینی حسی - بستگی به منشأ کوری دارد. تراشه‌ی شبکیه برای افرادی که دچار بیماری‌های استحال‌ی گیرنده‌های نوری هستند (از قبیل رتینیت پیگمنتوزا یا استحال‌ی وابسته به سن لکه‌ی زرد)، ایده‌آل است زیرا در این بیماری‌ها، بخش پایین‌دستی دستگاه بینایی سالم است و می‌تواند سیگنال‌ها را از الکترودهای کاشته شده دریافت کند. در شکل‌های دیگر نابینایی نمی‌توان از تراشه‌ی شبکیه استفاده کرد: اگر مشکل در بخش‌های دیگر چشم باشد (مثلاً کنده شدن شبکیه)، یا ناشی از مشکلی بعد از دستگاه بینایی باشد (مثلاً تومور یا آسیب بافتی ناشی از سکته‌ی مغزی)، در آن صورت تراشه‌ی شبکیه فایده‌ای نخواهد داشت. در این موارد، جایگزینی حسی یا جازدن مستقیم در مغز بعد از نقطه‌ی آسیب، ابزار مناسبی برای این کار خواهد بود. این را هم در نظر داشته باشید که بعضی از محققان مشغول بررسی ترکیب دستگاه‌های جایگزینی حسی با جازدنی‌ها (در شبکیه یا مغز) هستند؛ فکرشان آن است که جایگزینی حسی در تفسیر اطلاعات ورودی حاصل از پروتز، به قشر بینایی کمک می‌کند. به عبارت دیگر، به عنوان راهنمایی برای کدگذاری اطلاعات عمل می‌کند.

۵۱. برای شرح دست‌اول این تجربه به سخنرانی نیل هاریسون در همایش تد مراجعه کنید. یکی از نوآوری‌های جدید انجام شده در آی‌بورگ، این است که اشباع رنگ را به صورت بلندی صدا نشان می‌دهد. دستگاه آی‌بورگ را به یک تراشه تبدیل کرده‌اند که از لحاظ نظری می‌تواند در بدن کاشته شود. برای تحولات اخیر در این زمینه از سوی گروه‌های دیگر، به عنوان نمونه به «کلروفون» مراجعه کنید:

Osinski D, Hjelme DR (2018), A sensory substitution device inspired by the human visual system, in 2018 11th International Conference on Human System Interaction. (HSI) (pp. 86-192). IEEE.

۵۲. با توجه به موفقیت آی‌بورگ و پروژه‌های دیگر، هاریسون و شریکش «بنیاد سایبورگ» را تأسیس کرده‌اند که یک سازمان غیرانتفاعی برای پیوند دادن فناوری‌ها با بدن انسان است.

۵۳. به‌طور خاص، آن‌ها ژن یک رنگبزه‌ی نوری را به آن اضافه کردند.

Jacobs GH et al. (2007), Emergence of novel color vision in mice engineered to express a human cone photopigment, *Science* 315(5819): 1723-25.

54. Mancuso K et al. (2009), Gene therapy for red-green colour blindness in adult primates, *Nature* 461:784-88.

تیم پژوهشی ویروسی حاوی ژن اپسین تشخیص‌دهنده‌ی رنگ قرمز را پشت شبکیه تزریق کردند. پس از بیست هفته تمرین، میمون‌ها توانستند با استفاده از بینایی رنگی، رنگ‌هایی را که قبلاً برای‌شان قابل تشخیص نبودند، از هم تمییز دهند. نام این میمون‌ها را دالتون گذاشتند، به یاد جان دالتون، یک شیمیدان بریتانیایی که نخستین کسی بود که در سال ۱۷۹۴، کوررنگی خودش را تشریح کرد.

55. Jameson KA (2009), Tetrachromatic color vision, in *The Oxford Companion to Consciousness*, ed. P Wilken, T Bayne, and A Cleeremans (Oxford: Oxford University Press).

۵۶. لنز تطابقی کریستالینز از شرکت Bausch & Lomb.

Cornell PJ (2011), Blue-violet subjective color changes after Crystalens implantation, *Cataract and Refractive Surgery Today*.

برای اطلاعات بیشتر درباره‌ی چگونگی احساس بخش کوچکی از دامنه‌ی فرابنفش، به مطلب وبلاگ زیر مراجعه کنید:

Alek Komarnitsky, www.komar.org/faq/colorado-cataract-surgery-crystalens-ultra-violet-color-glow.

در ضمن، توجه داشته باشید که اکثر محصولاتی که در بازار به نام «نور سیاه» عرضه می‌شوند، در حقیقت از طیف فرابنفش استفاده می‌کنند. بنابراین احتمالاً به این خاطر است که نور متمایل به ارغوانی را مشاهده می‌کنید، مگر اینکه لنز مصنوعی کاشته باشید.

57. Ardouin J et al. (2012), FlyVIZ: A novel display device to provide humans with 360° vision by coupling catadioptric camera with HMD, in *Proceedings of the 18th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology* (pp. 1-44); Guillermo AB et al. (2016), Enjoy 360° vision with the FlyVIZ, in *ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies* (New York: ACM), 6.

58. Wolbring G (2013), Hearing beyond the normal enabled by therapeutic devices: The role of the recipient and the hearing profession, *Neuroethics* 6:607.

59. Eagleman DM, Can we create new senses for humans?, TED talk, March 2015, ted.com. See also Hawkins, Blakeslee (2004).

60. Huffman, personal interview; Larratt, interview from Dvorsky G (2012), What does the future have in store for radical body modification?, io9.

لازم به ذکر است که لارات مجبور شد آهن‌رباهایش را به علت جدا شدن پوشش آن‌ها، از بدن خارج کند.

61. Nordmann GC, Hochstoeger T, Keays DA (2017), Magnetoreception – a sense without a receptor, *PLoS Biol* 15(10): e2003234.

62. Kaspar K et al. (2014), The experience of new sensorimotor contingencies by sensory augmentation, *Conscious Cogn* 28:47–63; Kärcher SM et al. (2012), Sensory augmentation for the blind, *Front Hum Neurosci* 6:37.

63. Nagel SK et al. (2005), Beyond sensory substitution – learning the sixth sense, *J Neural Eng* 2(4): R13.

64. Ibid.

۶۵. همان‌جا را ببینید. در ضمن، این موضوع رابطه‌ی جالبی نیز با افراد نابینا دارد که نسبت به افراد بینا، توانایی بهتری برای تعیین محل صدا با استفاده از لاله‌ی گوش خود دارند. به عبارت دیگر، افراد بینا نیز همین فرصت را دارند، ولی این سیگنال ضعیفی است که زیر سطح خودآگاهی قرار دارد. اما وقتی که فرد به آن نیاز پیدا می‌کند، می‌تواند همین سیگنال ضعیف را با تمرین تقویت کند و از آن به نحو احسن استفاده کند.

در ضمن، باید دانست که نیاز به استفاده از این کمربند مدت زیادی طول نخواهد کشید. در پایان سال ۲۰۱۸، دانشمندان یک پوست الکترونیکی ظریف تولید کردند – یعنی اساساً یک برچسب کوچک روی

دست — که شمال را نشان می‌دهد.

Cañón Bermúdez GS et al. (2018), Electronic-skin compasses for geomagnetic field-driven artificial magnetoreception and interactive electronics, *Nat Electron* 1:589–95.

66. Norimoto H, Ikegaya Y (2015), Visual cortical prosthesis with a geomagnetic compass restores spatial navigation in blind rats, *Curr Biol* 25(8): 1091–95.

۶۷. پرواز کردن بدون دیدن افق بسیار خطرناک بود، و این مشکل تنها با اختراع افق مصنوعی چرخش‌نما (ژیروسکوپ) حل شد. در یکی از بمب‌افکن‌های جنگ جهانی دوم، صندلی کمک‌خلبان دقیقاً مسطح نبود و همین ممکن بود سبب خارج شدن هواپیما از مسیر شود. برنامه‌های آموزشی خاصی برای خنثی کردن «اثر نشیمنگاه» برگزار می‌شد.

۶۸. در ضمن، دکارت به این نتیجه رسید که هرگز نمی‌تواند بفهمد که تمام این‌ها توهم است یا نه. ولی برخلاف این نتیجه‌گیری، یکی از مهم‌ترین گام‌ها را در فلسفه برداشت: او متوجه شد که کسی دارد این پرسش را می‌پرسد، بنابراین، حتی اگر آن کس تحت تأثیر یک اهریمن شرور باشد، در هر حال، آن کس وجود دارد. *Cogito ergo sum*: می‌اندیشم، پس هستم. شاید هرگز نتوانید بفهمید که قربانی یک اهریمن یا مغزی در خمره هستید یا نه، ولی لاف‌ل شما وجود دارید تا درباره‌ی آن فکر کنید. برای بحث مغز در خمره، نگاه کنید به:

Putnam H (1981), *Reason, Truth, and History* (New York: Cambridge University Press).

69. Neely RM et al. (2018), Recent advances in neural dust: Towards a neural interface platform form, *Curr Opin Neurobiol* 50:64–71.

۷۰. این نوع پرسش‌ها را نباید با حس‌آمیزی (synesthesia) اشتباه گرفت، که در آن تحریک یک حس می‌تواند موجب احساس در یک حس دیگر شود — مثلاً صدا موجب تحریک تجربه‌ی رنگ می‌شود. در حس‌آمیزی، فرد کاملاً از تحریک اصلی آگاه است، ولی به‌طور درونی چیز دیگری را نیز حس می‌کند. ولی بحث من در این بخش از کتاب درباره‌ی اشتباه گرفتن واقعی یک حس به جای حس دیگر است. برای اطلاعات بیشتر درباره‌ی حس‌آمیزی، رجوع کنید به:

Cytowic RE, Eagleman DM (2009), *Wednesday Is Indigo Blue: Discovering the Brain of Synesthesia* (Cambridge, Mass.: MIT Press).

71. Eagleman DM (2018), We will leverage technology to create new senses, *Wired*.

72. O'Regan JK, Noë A (2001), A sensorimotor account of vision and visual consciousness, *Behav Brain Sci* 24(5): 939–73.

آزمایش‌های باکی‌ریتا را که با صندلی دندان‌پزشکی روی افراد نابینا انجام می‌داد، به خاطر دارید؟ وقتی که شرکت‌کنندگان توانستند بین اعمال خود و بازخورد حاصله ارتباط برقرار کنند، بهبود قابل‌توجهی در آن صورت گرفت: وقتی که آن‌ها دوربین را به اطراف می‌چرخاندند، منظره به‌صورت قابل پیش‌بینی تغییر می‌کرد. حواس — چه زیستی باشند و چه ساخته‌ی دست بشر — روشی برای کاوش فعالانه‌ی محیط فراهم می‌کنند، به‌گونه‌ای که بین عمل خاص و تغییر خاصی در ورودی ارتباط برقرار می‌شود. Bach-y-Rita (1972, 2004); Hurley, Noë (2003); Noë (2004).

73. Nagel et al. (2005).

۵. چگونه بدن بهتری داشته باشیم

1. Fuhr P et al. (1992), Physiological analysis of motor reorganization following lower limb amputation, *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 85(1): 53–60; Pascual-Leone A et al. (1996), Reorganization of human cortical motor output maps following traumatic forearm amputation, *Neuroreport* 7:2068–70; Hallett M (1999), Plasticity in the human motor system, *Neuroscientist*

- 5:324–32; Karl A et al. (2001), Reorganization of motor and somatosensory cortex in upper extremity amputees with phantom limb pain, *J Neurosci* 21:3609–18.
2. Vargas CD et al. (2009), Re-emergence of hand-muscle representations in human motor cortex after hand allograft, *Proc Natl Acad Sci USA* 106(17): 7197–202.
۳. ژن‌های هومئوباکس تکوین ساختارهای بزرگ‌تر بدن را کنترل می‌کنند. به‌عنوان نمونه، یکی از نخستین کشفیات ژن هومئوباکس در مورد جهشی در مگس سرکه بود که باعث می‌شود که جایی که شاخک‌ها قرار دارد، پا ایجاد شود، یا برعکس، جایی که باید پا قرار داشته باشد، شاخک ایجاد شود. علت این امر آن است که برخی ژن‌ها به‌عنوان سوئیچ عمل می‌کنند و آشنایی از ژن‌ها را فعال می‌کنند، و بدین خاطر است که بسیاری از جهش‌ها به‌طور تعجب‌آوری موجب ظاهر شدن یا ناپدید شدن یک «بخش» کامل بدن می‌شود — مثلاً اینکه بعضی از بچه‌ها با دم به دنیا می‌آیند.
- Mukhopadhyay B et al. (2012), Spectrum of human tails: A report of six cases, *J Indian Assoc Pediatr Surg* 17(1): 23–25.
4. Sommerville Q (2006), Three-armed boy “recovering well,” *BBC News*, July 6, 2006.
5. Bongard J, Zykov V, Lipson H (2006), Resilient machines through continuous self-modeling, *Science* 314:1118–21; Pfeifer R, Lungarella M, Iida F (2007), Self-organization, embodiment, and biologically inspired robotics, *Science* 318(5853): 1088–93.
۶. شایان توجه است که وقتی روبات مدلی از خودش داشته باشد، این امکان پدید می‌آید که روبات‌های دیگری مثل خودش بسازد. برای این منظور، از روش آزمایش و خطا استفاده می‌کند تا فاصله‌ی بین خودش و چیزی که ساخته را بسنجد.
7. Nicoletis M (2011), *Beyond Boundaries: The New Neuroscience of Connecting Brains with Machines ... and How It Will Change Our Lives* (New York: St. Martin’s Griffin).
8. Kennedy PR, Bakay RA (1998), Restoration of neural output from a paralyzed patient by a direct brain connection, *Neuroreport* 9:1707–11.
9. Hochberg LR et al. (2006), Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia, *Nature* 442:164–71.
۱۰. استحاله‌ی نخاعی-مخچه‌ای جن اختلالی نادر است که ارتباط بین مغز و ماهیچه‌ها را نابود می‌کند. برای مسائل علمی مربوط به جن، رجوع کنید به:
- Collinger JL et al. (2013), High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia, *Lancet* 381(9866): 557–64.
- برای مرور مسائل مربوط به این روش درمانی و نویدهای آن، رجوع کنید به:
- Eagleman DM (2016), *The Brain* (Edinburgh: Canongate Books), and Khatchadourian R (2018), Degrees of freedom, *New Yorker*.
11. Upton S (2014), What is it like to control a robotic arm with a brain implant?, *Scientific American*.
۱۲. موفق‌ترین تکنیک‌ها روش‌هایی است که مستلزم کاشتن مستقیم الکترودها در قشر مغز با عمل جراحی مغز است، ولی تحقیقات بر روی تکنیک‌های غیرتهاجمی‌تر (مثلاً استفاده از الکترودها روی سطح سر) نیز در دست انجام است.
۱۳. در هر نیمکره، الکترودها در پنج ناحیه کاشته می‌شود: قسمت‌های پشتی و شکمی قشر پیش‌حرکتی، قشر حرکتی اولیه، قشر حسی-پیکری اولیه، و قشر آهیانه‌ی خلفی. برای اطلاعات جدید به نشانی www.WalkAgainProject.org مراجعه کنید.
14. Bouton CE et al. (2016), Restoring cortical control of functional movement in a human with quadriplegia, *Nature* 533(7602): 247.

شرکت کننده دچار آسیب نخاع گردنی شده بود. محققان با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، یاد گرفتند که چگونه توفان فعالیت عصبی را تفسیر کنند، و بعد سیگنال‌های خلاصه را به سیستم پیشرفته‌ی تحریک الکتریکی ماهیچه‌ها بفرستند.

15. Iriki A, Tanaka M, Iwamura Y (1996), Attention-induced neuronal activity in the monkey somatosensory cortex revealed by pupillometrics, *Neurosci Res* 25(2): 173–81; Maravita A, Iriki A (2004), Tools for the body (schema), *Trends Cogn Sci* 8:79–86.

16. Velliste M et al. (2008), Cortical control of a prosthetic arm for self-feeding, *Nature* 453:1098–101.

شایان ذکر است که ما غالباً تصور می‌کنیم که بازوی رباتیک همیشه از فلز ساخته می‌شود. ولی وضعیت همیشه به این صورت نخواهد بود. «روبات‌های نرم» از لاستیک‌های کشسان و پلاستیک‌های قابل انعطاف ساخته می‌شوند. در پژوهش‌های کنونی از موادی مانند پارچه برای ساخت انگشتان مصنوعی، زواید هشت‌پا، کرم، و امثال آن استفاده می‌شود. شکل این عضو با تغییر دادن فشار هوا و یا با استفاده از سیگنال‌های الکتریکی یا شیمیایی تغییر می‌کند.

17. Fitzsimmons N et al. (2009), Extracting kinematic parameters for monkey bipedal walking from cortical neuronal ensemble activity, *Front Integr Neurosci* 3:3; Nicoletis M (2011), Limbs that move by thought control, *New Scientist* 210(2813): 26–27. See also Nicoletis's 2012 TEDMED talk: "A monkey that controls a robot with its thoughts. No, really."

18. See Nicoletis's book, *Beyond Boundaries*.

۱۹. مادر طبیعت این مسئله را لاقلاً به‌طور مستقیم هرگز حل نکرده است. البته می‌توان گفت که انسان‌ها را به تکامل رسانده تا این کار را برایش انجام دهند.

۲۰. این احساس که بخشی از بدن بیگانه یا غیرعادی است، معمولاً به‌عنوان آسوماتوگنوزی طبقه‌بندی می‌شود، در حالی که انکار تعلق داشتن یک اندام حرکتی به خود زیرمجموعه‌ای از آن اختلال است که سوماتوپارافرنی نامیده می‌شود. رجوع کنید به:

Feinberg T et al. (2010), The neuroanatomy of asomatognosia and somatoparaphrenia, *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 81:276–81. See also Dieguez S, Annoni J-M (2013), Asomatognosia, in *The Behavioral and Cognitive Neurology of Stroke*, ed. O Goderfroy and J Bogousslavsky (Cambridge, U.K.: Cambridge University Press), 170. See also Feinberg TE (2001), *Altered Egos: How the Brain Creates the Self* (New York: Oxford University Press), and Arzy S et al. (2006), Neural mechanisms of embodiment: Asomatognosia due to premotor cortex damage, *Arch Neurol* 63:1022–25.

در نظر داشته باشید که هنوز مشخص نشده است که آیا همه‌ی اشکال آسوماتوگنوزی گونه‌های متفاوتی از یک اختلال یکسان هستند یا اینکه اختلالات اساساً متفاوتی هستند که یک نام بر آن‌ها اطلاق شده است.

۲۱. این اختلال اخیر، که بسیار نادر است، می‌زوپلژی نامیده می‌شود؛ رجوع کنید به:

Pearce J (2007), Misoplegia, *Eur Neurol* 57:62–64.

22. Sacks OW (1984), *A Leg to Stand On* (New York: Harper & Row); Sacks OW (1982), *The leg*, *London Review of Books*, June 17, 1982. See also Stone J, Perthen J, Carson AJ (2012), "A Leg to Stand On" by Oliver Sacks: A unique autobiographical account of functional paralysis, *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 83(9): 864–67.

23. Simon M (2019), How I became a robot in London _ from 5,000 miles away, *Wired*.

24. Herrera F et al. (2018), Building long-term empathy: A large-scale comparison of traditional and virtual reality perspective-taking, *PloS One* 13(10): e0204494; van Loon A et al. (2018), Virtual reality perspective-taking increases cognitive empathy for specific others, *PloS*

- One 13(8): e0202442. See also Bailenson J (2018), *Experience on Demand* (New York: W. W. Norton).
25. Won AS, Bailenson JN, Lanier J (2015), Homuncular flexibility: The human ability to inhabit nonhuman avatars, in *Emerging Trends in the Social and Behavioral Sciences*, ed. R Scott and M Buchmann (John Wiley & Sons), 1–6.
26. Won, Bailenson, Lanier (2015). See also Laha B et al. (2016), Evaluating control schemes for the third arm of an avatar, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 25(2): 129–47.
27. Steptoe W, Steed A, Slater M (2013), Human tails: Ownership and control of extended humanoid avatars, *IEEE Trans Vis Comput Graph* 19:583–90.
28. Hershfield HE et al. (2011), Increasing saving behavior through age-progressed renderings of the future self, *JMR* 48(SPL): S23–37; Yee And et al. (2011), The expression of personality in virtual worlds, *Soc Psycho Pers Sci* 2(1): 5–12; Fox J et al (2009), Virtual experiences, physical behaviors: The effect of presence on imitation of an eating avatar, *Presence* 18(4): 294–303.
29. DeCandido K (1997), “Arms and the man,” in *Untold Tales of Spider-Man*, ed. S Lee and K Busiek (New York: Boulevard Books).
30. Wetzel F (2012), Dad who lost arm gets new lease of life with most hi-tech bionic hand ever, *Sun*.
31. Eagleman DM (2011), in “20 predictions for the next 25 years,” *Observer*, Jan. , 2011.

۶. چرا تمرین اهمیت دارد؟

۱. شاید نوعی مزیت ژنتیکی نیز وجود داشته باشد؛ به سختی می‌توان مطمئن شد. ولی هیچ ژنی نیست که مستقیماً مربوط به شطرنج باشد، بنابراین، مطمئناً چندین سال آموزش ضرورت داشته است.
2. Schweighofer N, Arbib MA (1998), A model of cerebellar metaplasticity, *Learn Mem* 4(5): 421–28.
۳. عجیب اینکه من این داستان را ابتدا درباره‌ی پرلمان شنیده بودم، ولی بعد دیدم که در اینترنت آن را به موسیقیدانان مختلفی از جمله پرلمان، فریتز، کرایسلر، آیزاک استرن، و چندین نفر دیگر نسبت داده‌اند. هر کس آن را گفته، همه می‌خواهند که این جمله‌ی خوب مال آن‌ها باشد.
4. Elbert T et al. (1995), Increased finger representation of the fingers of the left hand in string players, *Science* 270:305–6; Bangert M, Schlaug G (2006), Specialization of the specialized in features of external human brain morphology, *Eur J Neurosci* 24:1832–34.
- اگر در افراد غیرموسیقیدان به شکنج (لبه‌ی برآمده روی سطح مغز) نگاه کنید، خواهید دید که عموماً راست امتداد می‌یابد؛ همین شکنج در موسیقیدان‌ها انحرافی عجیب و چروکیده دارد. دقت کنید که گرچه در یک نوازنده‌ی ویولن، تمام کارهای ظریف با دست چپ انجام می‌شود، ولی علامت امگا در نیمکره‌ی راست او قرار دارد؛ علت آن است که بازنمایی دست چپ در طرف راست مغز است.
۵. این امر نخستین‌بار در میمون‌ها نشان داده شد که یکی از دو کار به آن‌ها اختصاص یافته بود: درآوردن شیء کوچکی از درون یک حفره، و یا چرخاندن یک کلید بزرگ. کار اول نیاز به مهارت و استفاده‌ی ظریف از انگشتان داشت، در حالی که کار دوم متکی بر استفاده از مچ و ساعد بود. پس از آنکه میمون‌ها در کار اول آموزش دیدند، بازنمایی قشری انگشتان مرتب مناطق بیشتری را غصب می‌کرد، در حالی که بازنمایی مچ و ساعد کوچک‌تر می‌شد. برعکس، وقتی که میمون‌ها برای کار چرخاندن کلید آموزش داده می‌شدند، میزان فضای عصبی اختصاص داده شده به مچ و ساعد گسترش پیدا می‌کرد.
- Nudo RJ et al. (1996), Use-dependent alterations of movement representations in primary motor cortex of adult squirrel monkeys, *J Neurosci* 16(2): 785–807.
6. Karni A et al. (1995), Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during motor

skill learning, *Nature* 377:155–58.

7. Draganski B et al. (2004), Neuroplasticity: Changes in grey matter induced by training, *Nature* 427(6972): 311–12; Driemeyer J et al. (2008), Changes in gray matter induced by learning – revisited, *PLoS One* 3(7): e2669; Boyke J et al. (2008), Training-induced brain structure changes in the elderly, *J Neurosci* 28(28): 7031–35; Scholz J et al. (2009), Training induces changes in white-matter architecture, *Nat Neurosci* 12(11): 1370–71.

فرضیه آن است که افزایش تراکم مشاهده شده در ماده‌ی خاکستری ظرف یک هفته از آموزش احتمالاً ناشی از افزایش اندازه‌ی سیناپس‌ها یا اجسام سلولی است، در حالی که افزایش حجم بلندمدت (در عرض چند ماه) ممکن است منعکس‌کننده‌ی تولد نورون‌های جدید، خصوصاً در هیپوکامپ، باشد.

8. Eagleman DM (2011), *Incognito: The Secret Lives of the Brain* (New York: Pantheon).

9. Iriki A, Tanaka M, Iwamura Y (1996), Attention-induced neuronal activity in the monkey somatosensory cortex revealed by pupillometrics, *Neurosci Res* 25(2): 173–81; Maravita A, Iriki A (2004), Tools for the body (schema), *Trends Cogn Sci* 8:79–86.

10. Draganski B et al. (2006), Temporal and spatial dynamics of brain structure changes during extensive learning, *J Neurosci* 26(23): 6314–17.

11. Ilg R et al. (2008), Gray matter increase induced by practice correlates with task-specific activation: A combined functional and morphometric magnetic resonance imaging study, *J Neurosci* 28(16): 4210–15.

12. Maguire EA et al (2000), Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers, *Proc Natl Acad Sci USA* 97(8): 4398–403. See also Maguire EA, Frackowiak RS, Frith CD (1997), Recalling routes around London: Activation of the right hippocampus in taxi drivers, *J Neurosci* 17(18): 7103–10.

13. Kuhl PK (2004), Early language acquisition: Cracking the speech code, *Nat Rev Neurosci* 5:431–43.

۱۴. این مطالعات در ابتدا روی میمون‌ها انجام شد. در یک مطالعه، میمونی را هم‌زمان در معرض تحریک شنوایی و لمسی قرار دادند. در صورتی که برای کار مورد نظر لازم بود که به لمس توجه کند، تغییرات شکل‌پذیری در قشر حسی‌پیکری او مشاهده می‌شد، در حالی که قشر شنوایی او چنین تغییراتی را نشان نمی‌داد. برعکس، اگر توجه او به سوی تحریک شنوایی هدایت می‌شد، نتیجه‌ی عکس اتفاق می‌افتاد. رجوع کنید به:

Recanzone GH et al. (1993), Plasticity in the frequency representation of primary auditory cortex following discrimination training in adult owl monkeys, *J Neurosci* 13(1): 87–103; Jenkins WM et al. (1990), Functional reorganization of primary somatosensory cortex in adult owl monkeys after behaviorally controlled tactile stimulation, *J Neurophysiol* 63(1): 82–104; Bavelier D, Neville HJ (2002), Cross-modal plasticity: Where and how?, *Nat Rev Neurosci* 3(6): 443.

15. Taub E, Uswatte G, Pidikiti R (1999), Constraint-induced movement therapy: A new family of techniques with broad application to physical rehabilitation, *J Rehabil Res Dev* 36(3): 1–21; Page SJ, Boe S, Levine P (2013), What are the “ingredients” of modified constraint induced therapy? An evidence-based review, recipe, and recommendations, *Restor Neurol Neurosci* 31:299–309.

16. Teng S, Whitney D (2011), The acuity of echolocation: Spatial resolution in the sighted compared to expert performance, *J Vis Impair Blind* 105(1): 20.

۱۷. علاوه بر این، طرح بدنی کشورها هم خیلی انعطاف‌پذیر است. هر زمان سرزمین‌های جدیدی به کشور ملحق شود، جزئی از اندام‌ها و خودآگاهی کشور می‌شود. مقامات سیاسی در آنجا منصوب می‌شوند و پایگاه‌های نظامی بر پا می‌شوند. آن محل مانند دور-اندامی برای کشور می‌شود، و درست مانند هر

اندازی که بدن می‌تواند کنترل کند، آن مناطق دوردست هم بخشی از خویشتن کشور می‌شود. و نیز ببینید که کشورها چقدر راحت ورودی‌های جدیدی را دریافت می‌کنند: با پیشرفت فناوری، نهادها و قوانین خود را با شکل جدید آن سازگار می‌کنند.

۱۸. دانشمندان علوم اعصاب از اصطلاح «میانجی عصبی» برای اشاره به پیام‌رسان شیمیایی آزاد شده از نورون در یک اتصال تخصصی استفاده می‌کنند، که این ماده به‌طور بسیار اختصاصی با سلول دیگری ارتباط برقرار می‌کند. برعکس، تعدیل‌کننده‌ی عصبی یک پیام‌رسان شیمیایی است که بر جمعیت بزرگ‌تری از نورون‌ها (یا انواع دیگر سلول) تأثیر می‌گذارد و عموماً اثرات وسیع‌تر دارد. دقت کنید که یک ماده‌ی شیمیایی خاص می‌تواند در شرایط مختلف به‌عنوان میانجی عصبی یا تعدیل‌کننده‌ی عمل کند: استیل‌کلین در اعصاب محیطی (هنگام ارتباط با سلول‌های ماهیچه‌ای) به‌عنوان میانجی عمل می‌کند، در حالی که در دستگاه اعصاب مرکزی به‌عنوان تعدیل‌کننده عمل می‌نماید.

19. Bakin JS, Weinberger NM (1996), Induction of a physiological memory in the cerebral cortex by stimulation of the nucleus basalis, *Proc Natl Acad Sci USA* 93:11219–24.

۲۰. نورون‌هایی که استیل‌کلین آزاد می‌کنند، کلینرژیک نامیده می‌شوند، و تقریباً به‌طور کامل در ناحیه‌ی پیشامغز قاعده‌ای قرار دارند، که مجموعه‌ای از ساختارها در زیر قشر است که به طرف قشر کشیده می‌شوند. این ماده اثرات زیادی در دستگاه اعصاب مرکزی دارد، از جمله تغییر دادن تحریک‌پذیری نورون‌ها، تعدیل میزان آزادسازی پیش‌سیناپسی میانجی‌های عصبی، و هماهنگ‌سازی شلیک جمعیت‌های کوچک نورون‌ها. رجوع کنید به:

Picciotto MR, Higley MJ, Mineur YS (2012), Acetylcholine as a neuromodulator: Cholinergic signaling shapes nervous system function and behavior, *Neuron* 76(1): 116–29; Gu Q (2003), Contribution of acetylcholine to visual cortex plasticity, *Neurobiol Learn Mem* 80:291–301; Richardson RT, DeLong MR (1991), Electrophysiological studies of the functions of the nucleus basalis in primates, *Adv Exp Med Biol* 295:233–52; Orsetti M, Casamenti F, Pepeu G (1996), Enhanced acetylcholine release in the hippocampus and cortex during acquisition of an operant behavior, *Brain Res* 724:89–96.

دقت کنید که بسیاری از تعدیل‌کننده‌های عصبی به‌طور گذرا تعادل تحریک و مهار را تغییر می‌دهند؛ بر این اساس، فرضیه‌ای مطرح شده است دایر بر اینکه عدم مهار، یکی از سازوکارهایی است که تعدیل عصبی از طریق آن تغییرات بلندمدت سیناپسی را امکان‌پذیر می‌سازد.

21. Hasselmo ME (1995), Neuromodulation and cortical function: Modeling the physiological basis of behavior, *Behav Brain Res* 67:1–27.

۲۲. این موضوع نخستین‌بار یک دهه قبل در موش‌های صحرایی بالغ نشان داده شد. اگر موش‌ها در معرض یک آهنگ سمعی خاص قرار گیرند، آهنگ به‌تنهایی منجر به هیچ‌گونه تغییر خاصی در نمایش قشری آن‌ها نمی‌شود. ولی اگر یک آهنگ خاص با تحریک نورون‌های کلینرژیک هسته‌ی قاعده‌ای همراه باشد، نمایش قشری مربوط به آن آهنگ گسترش پیدا می‌کند.

Kilgard MP, Merzenich MM (1998), Cortical map reorganization enabled by nucleus basalis activity, *Science* 279:1714–18.

برای مرور جنبه‌های علمی در موش صحرایی و نیز انسان، مراجعه کنید به:

Weinberger NM (2015), New perspectives on the auditory cortex: Learning and memory, *Handb Clin Neurol* 129:117–47.

23. Bear MF, Singer W (1986), Modulation of visual cortical plasticity by acetylcholine and noradrenaline, *Nature* 320:172–76; Sachdev RNS et al. (1998), Role of the basal forebrain cholinergic projection in somatosensory cortical plasticity, *J Neurophysiol* 79:3216–28.

24. Conner JM et al. (2003), Lesions of the basal forebrain cholinergic system impair task ac

- quisition and abolish cortical plasticity associated with motor skill learning, *Neuron* 38:819–29.
۲۵. برای مشاهده‌ی مصاحبه‌ی کامل، که ضمناً آسیموف در آن اینترنت را سال‌ها قبل از شکوفایی آن پیشگویی کرده است، ویدئو را در یوتیوب جست‌وجو کنید.
26. Brandt A, Eagleman DM (2017), *The Runaway Species* (New York: Catapult).

۷. چرا عشق تا لحظه‌ی جدایی از ژرفای خود خبر ندارد؟

1. Eagleman DM (2001), Visual illusions and neurobiology, *Nat Rev Neurosci* 2(12): 920–26.
2. Pelah A, Barlow HB (1996), Visual illusion from running, *Nature* 381(6580): 283; Zadra JR, Proffitt DR (2016), Optic flow is calibrated to walking effort, *Psychon Bull Rev* 23(5): 1491–96.
۳. به این توهم اثر مک‌کالو می‌گویند، به نام سلیست مک‌کالو که آن را در سال ۱۹۶۵ کشف کرد. McCollough C (1965), Color adaptation of edge-detectors in the human visual system, *Science* 149:1115–16.
- دقت کنید که این توهم برای کسانی که کوررنگ هستند، امکان‌پذیر نخواهد بود. این پس‌پایام مشروط فقط در رابطه با خطوط جهت‌دار و رنگ نیست، بلکه بین حرکت و رنگ، بسامد فضایی و رنگ، و موارد دیگر نیز مشاهده می‌شود.
- Jones PD, Holding DH (1975), Extremely long-term persistence of the McCollough effect, *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1(4): 323–27.
۵. حرکات بزرگ چشم ساکاد نامیده می‌شود، و لرزش‌های ریزتر بین آن‌ها میکروساکاد نام دارد.
۶. به این پدیده، دید درون چشمی (entoptic) می‌گویند، به معنای اثری که از درون خود چشم سرچشمه می‌گیرد، برخلاف خطاهای باصره که بر اثر تفسیر مغز بروز می‌کند. برای اطلاعات بیشتر درباره‌ی توهم‌هایی که از درون چشم سرچشمه می‌گیرد، رجوع کنید به: Tyler CW (1978), Some new entoptic phenomena, *Vision Res* 18(12): 1633–39.
۷. این را نخستین‌بار یان پورکینیه در سال ۱۸۲۳ متوجه شد و از این رو، تصویر عروق خونی در چشم را درخت پورکینیه می‌نامند. رجوع کنید به: Purkyně J (1823), *Beiträge zur Kenntniss des Sehens in subjectiver Hinsicht, in Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne* (Prague: In Commission der J. G. Calve'schen Buchhandlung).
8. Stetson C et al. (2006), Motor-sensory recalibration leads to an illusory reversal of action and sensation, *Neuron* 51(5): 651–59.
۹. به نظر من، این مطلب جالبی است که می‌توانیم در زمینه‌ی علم در نظر داشته باشیم: آیا چیزهایی هستند که به نظر می‌رسد پدیدار می‌شوند، ولی در واقع، نشان‌دهنده‌ی چیزی هستند که ناپدید می‌شود؟
10. Kamin LJ (1969), Predictability, surprise, attention, and conditioning, in *Punishment and Aversive Behavior*, ed. BA Campbell and RM Church (New York: Appleton-Century-Crofts), 279–96; Bouton ME (2007), *Learning and Behavior: A Contemporary Synthesis* (Sunderland, Mass.: Sinauer).

۱۱. این روش صعود گرادیان، کلینوکینزیس (klinokinesis) نامیده می‌شود.

۱۲. استوانه‌ها و مخروط‌ها در تاریکی فقط چهار مرتبه‌ی بزرگی از شدت روشنایی را پوشش می‌دهند، ولی در نور پیوسته‌ی روز می‌توانند دامنه‌ی بسیار بیشتری را پوشش دهند. به علت سازوکارهای مختلف و پیچیده‌ای، گیرنده‌های نوری از اشباع شدن جلوگیری می‌کنند و در پاسخ به افزایش شار فوتون‌ها،

ضرب تقویت (و نرخ بازیابی) آشکارهای مولکولی خود را تغییر می‌دهند. چند نمونه‌ی آن عبارت‌اند از تغییر دادن طول عمر مولکول‌ها در حالت فعالیت بیوشیمیایی آن‌ها، تغییر دادن فراهمی پروتئین‌های اتصال در اطراف، استفاده از مولکول‌های دیگر برای افزایش طول عمر کمپلکس‌های فعال شده، و تغییر دادن میل ترکیبی کانال‌ها برای لیگاندهایی که به آن‌ها متصل می‌شوند. در مقیاس بزرگ‌تر، گیرنده‌های نوری می‌توانند با بهره‌گیری از سلول‌های افقی که اتصالات (موسوم به اتصال شکافی) را تغییر می‌دهند، به یکدیگر متصل شوند، تا نحوه‌ی تعامل گیرنده‌های نوری را تنظیم نمایند. رجوع کنید به:

Arshavsky VY, Burns ME (2012), Photoreceptor signaling: Supporting vision across a wide range of light intensities, *J Biol Chem* 287(3): 1620–26; Chen J et al. (2010), Channel modulation and the mechanism of light adaptation in mouse rods, *J Neurosci* 30(48): 16232–40; Diamond JS (2017), Inhibitory interneurons in the retina: Types, circuitry, and function, *Annu Rev Vis Sci* 3:1–24; O'Brien J, Bloomfield SA (2018), Plasticity of retinal gap junctions: Roles in synaptic physiology and disease, *Annu Rev Vis Sci* 4:79–100; Demb JB, Singer JH (2015), Functional circuitry of the retina, *Annu Rev Vis Sci* 1:263–89.

۸. تعادل بر لبه‌ی تغییر

1. Muckli L, Naumer MJ, Singer W (2009), Bilateral visual field maps in a patient with only one hemisphere, *Proc Natl Acad Sci* 106(31): 13034–39.

در نظر داشته باشید که چشم راست آلیس به‌طور غیرمعمولی کوچک بود و عمدتاً نابینا بود. برای اطلاعات بیشتر درباره‌ی سوابق او، به مطالب تکمیلی مقاله‌ی مذکور مراجعه کنید.

2. Udin SH (1977), Rearrangements of the retinotectal projection in *Rana pipiens* after unilateral caudal half-tectum ablation, *J Comp Neurol* 173:561–82.

3. Constantine-Paton M, Law MI (1978), Eye-specific termination bands in tecta of three-eyed frogs, *Science* 202:639–41; Law MI, Constantine-Paton M (1981), Anatomy and physiology of experimentally produced striped tecta, *J Neurosci* 1:741–59.

۴. چرا این دو منطقه به جای اینکه به‌طور یکنواخت با هم مخلوط شوند، به‌صورت نواری تقسیم می‌شوند؟ مدل‌های کامپیوتری نشان می‌دهد که این وضعیت به‌طور طبیعی براساس نظریه‌ی هب بر اثر رقابت بین آکسون‌های ورودی از دو چشم بروز می‌کند. یک مدل مرکزی برای تشکیل نوارها در ستون‌های غالب چشمی در دهه‌ی ۱۹۸۰ پیشنهاد شد:

Miller KD, Keller JB, Stryker MP (1989), Ocular dominance column development: Analysis and simulation, *Science* 245(4918): 605–15.

از آن زمان تاکنون، ویژگی‌های مختلف دیگری که از نظر فیزیولوژیک با واقعیت انطباق دارد، به این مدل افزوده شده است.

5. Attardi DG, Sperry RW (1963), Preferential selection of central pathways by regenerating optic fibers, *Exp Neurol* 7(1): 46–64.

6. Basso A et al. (1989), The role of the right hemisphere in recovery from aphasia: Two case studies, *Cortex* 25:555–66.

در دهه‌های اخیر، پژوهشگران توانسته‌اند این انتقال را با تصویربرداری عصبی عملاً مشاهده کنند.

See Heiss WD, Thiel A (2006), A proposed regional hierarchy in recovery of post-stroke aphasia, *Brain Lang* 98:118–23; Pani E et al. (2016), Right hemisphere structures predict poststroke speech fluency, *Neurology* 86:1574–81; Xing S et al. (2016), Right hemisphere grey matter structure and language outcome in chronic left-hemisphere stroke, *Brain* 139:227–41.

میزان «انتقال به راست» که از نظر بالینی مشاهده می‌شود، در بیماران مختلف متفاوت است، که دلایل

آن هنوز در دست بررسی است.

7. Wiesel TN, Hubel DH (1963), Single-cell responses in striate cortex of kittens deprived of vision in one eye, *J Neurophysiol* 26:1003–17; Gu Q (2003), Contribution of acetylcholine to visual cortex plasticity, *Neurobiol Learn Mem* 80:291–301; Hubel DH, Wiesel TN (1965), Binocular interaction in striate cortex of kittens reared with artificial squint, *J Neurophysiol* 28:1041–59.

این گونه آزمایش‌ها در ابتدا بر روی بچه‌گره‌ها و میمون‌ها انجام می‌شد؛ بعداً با پیشرفت‌های فناوری (همان طور که انتظار می‌رفت) مشخص شد که در رابطه با قشر بینایی انسان هم دقیقاً همین مطالب صحت دارد.

۸. دقت کنید که این تا حدودی شبیه راهبرد محدودیت‌درمانی در بیماران سکته‌ی مغزی است، که در آن دست سالم را آتل می‌بندند.

۹. به این نقشه، نقشه‌ی رابطه‌ای می‌گویند: دست نزدیک آرنج نشان داده می‌شود، و آرنج نزدیک شانه، صرف نظر از اینکه ناحیه‌ی موجود چقدر بزرگ یا کوچک باشد.

۱۰. در طول سالیانی که از زمان کشف اولیه‌ی لوی-مونتالچینی گذشته، خانواده‌ی کاملی از فاکتورهای نوروتروفیک دیگر کشف شده‌اند؛ همگی آن‌ها در این خاصیت مشترک هستند که محرک بقا و تکامل نوروها هستند. به صورت عمومی‌تر، نوروتروفین‌ها متعلق به دسته‌ای از پروتئین‌های ترشحی به نام فاکتورهای رشد هستند. رجوع کنید به:

Spedding M, Gressens P (2008), Neurotrophins and cytokines in neuronal plasticity, *Novartis Found Symp* 289:222–33.

11. Zoubine MN et al. (1996), A molecular mechanism for synapse elimination: Novel inhibition of locally generated thrombin delays synapse loss in neonatal mouse muscle, *Dev Biol* 179:447–57.

12. Sanes JR, Lichtman JW (1999), Development of the vertebrate neuromuscular junction, *Annu Rev Neurosci* 22:389–442.

۱۳. به عنوان یک نمونه، آلمان را در سال ۱۹۳۳ در نظر بگیرید که تقریباً تمام نمایندگان منتخب برای پارلمان یا از احزاب چپ افراطی بودند (مانند کمونیست‌ها) و یا از احزاب راست افراطی (از قبیل نازی‌ها). با آنکه این حزب‌ها تندرو بودند، ولی به هر حال تعادل برقرار بود. ولی در اوت ۱۹۳۴، به دنبال مرگ رئیس‌جمهور پاول فن هیندنبورگ، آدولف هیتلر خودش را پیشوا و صدراعظم رایش اعلام کرد و قوانین را به صورت دستوری به تصویب می‌رساند. جای تعجب نیست که نخستین قوانین او این بود که کمونیست‌های مخالف را در اردوگاه‌های اجباری جمع کرد، و عدم توازن شدید موجب بروز فاجعه برای میلیون‌ها نفر شد.

14. Yamahachi H et al. (2009), Rapid axonal sprouting and pruning accompany functional reorganization in primary visual cortex, *Neuron* 64(5): 719–29; Buonomano DV, Merzenich MM (1998), Cortical plasticity: From synapses to maps, *Annu Rev Neurosci* 21:149–86; Pascual-Leone A, Hamilton R (2001), The metamodal organization of the brain, in *Vision: From Neurons to Cognition*, ed. C Casanova and M Ptito (New York: Elsevier Science), 427–45; Pascual-Leone A et al. (2005), The plastic human brain cortex, *Annu Rev Neurosci* 28:377–401; Merzenich MM et al. (1984), Somatosensory cortical map changes following digit amputation in adult monkeys, *J Comp Neurol* 224:591–605; Pons TP et al. (1991), Massive cortical reorganization after sensory deafferentation in adult macaques, *Science* 252:1857–60; Sanes JN, Donoghue JP (2000), Plasticity and primary motor cortex, *Annu Rev Neurosci* 23(1): 393–415.

15. Jacobs KM, Donoghue JP (1991), Reshaping the cortical motor map by unmasking latent intracortical connections, *Science* 251(4996): 944–7; Tremere L et al. (2001), Expansion of

receptive fields in raccoon somatosensory cortex in vivo by GABA-A receptor antagonism: Implications for cortical reorganization, *Exp Brain Res* 136(4): 447–55.

۱۶. این سازوکار مرز بین نواحی را مشخص‌تر می‌کند. برای نمونه، رجوع کنید به:

Tremere et al. (2001).

17. Weiss T et al. (2004), Rapid functional plasticity in the primary somatomotor cortex and perceptual changes after nerve block, *Eur J Neurosci* 20:3413–23.

18. Bavelier D, Neville HJ (2002), Cross-modal plasticity: Where and how?, *Nat Rev Neurosci* 3:443–52.

19. Eckert MA et al. (2008), A cross-modal system linking primary auditory and visual cortices: Evidence from intrinsic fMRI connectivity analysis, *Hum Brain Mapp* 29(7):848–57; Petro LS, Paton AT, Muckli L (2017), Contextual modulation of primary visual cortex by auditory signals, *Philos Trans R Soc B Biol Sci* 372(1714): 20160104.

20. Pascual-Leone et al. (2005).

21. Darian-Smith C, Gilbert CD (1994), Axonal sprouting accompanies functional reorganization in adult cat striate cortex, *Nature* 368:737–40; Florence SL, Taub HB, Kaas JH (1998), Large-scale sprouting of cortical connections after peripheral injury in adult macaque monkeys, *Science* 282:1117–21.

عمدتاً به تغییرات درون قشر توجه زیادی شده است، گرچه باز تغییرات بلندمدت در تالاموس نیز ممکن است در تغییرات بزرگ‌تر و آهسته‌تر ساختار قشر نقش داشته باشد. رجوع کنید به:

Jones EG (2000), Cortical and subcortical contributions to activity-dependent plasticity in primate somatosensory cortex, *Annu Rev Neurosci* 23:1–37; Buonomano, Merzenich (1998).

برای دانشجویان نسل آینده: یکی از پرسش‌هایی که همچنان باقی است، این است که چگونه می‌توان این تغییرات سریع (نقاب‌برداری) را با تغییرات بلندمدت‌تر (رشد آکسون‌های جدید) پیوند داد.

22. Merlo LM et al. (2006), Cancer as an evolutionary and ecological process, *Nat Rev Cancer* 6(12): 924–35; Sprouffske K et al. (2012), Cancer in light of experimental evolution, *Curr Biol* 22(17): R762–R771; Aktipis CA et al. (2015), Cancer across the tree of life: Cooperation and cheating in multicellularity, *Philos Trans R Soc B Biol Sci* 370(1673).

۹. چرا یاد دادن ترند جدید به سگ‌های پیر سخت‌تر است؟

1. Teuber HL (1975), Recovery of function after brain injury in man, in *Outcome of Severe Damage to the Central Nervous System*, ed. R Porter and DW Fitzsimmons (Amsterdam: Elsevier), 159–90.

۲. مغزهای جوان مقدار زیادی میانجی‌های کلینرژیک دارند، ولی میانجی‌های مهاري آن‌ها زیاد نیستند و بعداً در دسترس قرار می‌گیرند؛ بر این اساس، شکل‌پذیری کلی زیادی دارند. برعکس، مغزهای بزرگسال تغییر را در جایی که نباید اتفاق بیفتد، فعالانه مهار می‌کنند. یعنی اثرات کلینرژیک در مغز بزرگسال با میانجی‌های مهاري تغییر داده می‌شود — در نتیجه، اکثر نواحی شکل‌پذیری کمی داشته یا اصلاً شکل‌پذیر نیست، به‌طوری که مغز فقط در صورت لزوم تغییر می‌کند. رجوع کنید به:

Gopnik A, Schulz L (2004), Mechanisms of theory formation in young children, *Trends Cogn Sci* 8:371–77; Schulz LE, Gopnik A (2004), Causal learning across domains, *Dev Psychol* 40:162–76.

از آنجا که مغزهای جوان امکان تغییر سراسری دارند، آلیسون گوپنیک که از محققان در این زمینه است، بچه‌ها را واحد «تحقیق و توسعه» گونه‌ی انسان می‌نامد.

3. Gopnik A (2009), *The Philosophical Baby: What Children's Minds Tell Us About Truth*,

Love, and the Meaning of Life (New York: Farrar, Straus & Giroux).

۴. این توصیه از منبع زیر گرفته شده است:

Coch D, Fischer KW, Dawson G (2007), Dynamic development of the hemispheric biases in three cases: Cognitive/hemispheric cycles, music, and hemispherectomy, in *Human Behavior, Learning, and the Developing Brain* (New York: Guilford), 94–97.

جالب است که این جراحی در بزرگسالان نیز با موفقیت انجام شده است، ولی موارد آن نادر است و عموماً به پیامدهای بدتری منجر می‌شود. رجوع کنید به:

Schramm J et al. (2012), Seizure outcome, functional outcome, and quality of life after hemispherectomy in adults, *Acta Neurochir* 154(9): 1603–12.

۵. دوره‌ی حساس را گاه دوره‌ی بحرانی می‌نامند.

6. Petitto LA, Marentette PF (1991), Babbling in the manual mode: Evidence for the ontogeny of language, *Science* 251:1493–96.

7. Lenneberg E (1967), *Biological Foundations of Language* (New York: Wiley); Johnson JS, Newport EL (1989), Critical period effects in second language learning: The influence of maturational state on the acquisition of English as a second language, *Cogn Psychol* 21:60–99.

دقت کنید که در مورد اینکه آیا همه چیز را درباره‌ی یاد گرفتن زبان دوم می‌توان بر پایه‌ی شکل‌پذیری توضیح داد یا نه، بحث و جدل وجود دارد؛ به هر حال، بعضی وقت‌ها بزرگسالان به علت بلوغ شناختی بالاتر، تجربه‌ی یادگیری، و دیگر عوامل روانی و اجتماعی، زودتر از بچه‌ها زبان دوم را یاد می‌گیرند؛ رجوع کنید به:

Newport (1990) and Snow, Hoefnagel-Hoehle (1978).

با این حال، صرف‌نظر از سطح مهارت در یاد گرفتن زبان دوم، تلفظ زبان بیگانه در حد افراد بومی (یعنی همان لهجه) برای یاد گیرندگان بزرگسال دشوارتر قابل حصول است.

Asher J, Garcia R (1969), The optimal age to learn a foreign language, *Mod Lang J* 53(5): 334–341.

۸. رجوع کنید به:

Berman N, Murphy EH (1981), The critical period for alteration in cortical binocularity resulting from divergent and convergent strabismus, *Dev Brain Res* 2(2): 181–202.

در اصطلاح عامیانه به انحراف چشم، لوچی یا چپ‌چشمی گفته می‌شود، و اصطلاح فنی آن استرابیسم است.

9. Amedi A et al. (2003), Early “visual” cortex activation correlates with superior verbal-memory performance in the blind, *Nat Neurosci* 6:758–66.

10. Voss P et al. (2006), A positron emission tomography study during auditory localization by late-onset blind individuals, *Neuroreport* 17(4): 383–88; Voss P et al. (2008), Differential occipital responses in early- and late-blind individuals during a sound-source discrimination task, *Neuroimage* 40(2): 746–58.

11. Merabet LB et al. (2005), What blindness can tell us about seeing again: Merging neuroplasticity and neuroprostheses, *Nat Rev Neurosci* 6(1): 71.

۱۲. به عبارت دیگر، مطالعات نشان داد که گرچه قشر شنوایی شبیه قشر بینایی شده بود، ولی اتصالات جدید برخی از ویژگی‌های معمول قشر شنوایی را حفظ کرده بود. مثلاً میدان بینایی جدید به جای محور بالا-پایین، در امتداد محور چپ-راست دقت بالاتری داشت، و تصور می‌شود که علت این امر آن است که قشر شنوایی به‌طور معمول بسامدها را در امتداد محور چپ-راست مرتب می‌کند.

13. Persico N, Postlewaite A, Silverman D (2004), The effect of adolescent experience on labor

market outcomes: The case of height, *J Polit Econ* 112(5): 1019–53.

هم‌چنین، نگاه کنید به:

Judge TA, Cable DM (2004), The effect of physical height on workplace success and income: Preliminary test of a theoretical model, *J Appl Psychol* 89(3): 428–41.

14. Smirnakis et al. (2005), Lack of long-term cortical reorganization after macaque retinal lesions, *Nature* 435(7040): 300.

این مطالعه بر روی میمون‌های ماکاک بالغ (از سن چهار سال به بالا) انجام شد؛ تصور بر این است که همین مطلب در مورد انسان‌ها هم صدق می‌کند.

۱۵. صدها مثال‌ها در این زمینه وجود دارد، از جمله اینکه اگر یادتان باشد، گفتیم که اگر برای برداشتن غذا از شن‌کش استفاده کنید، قشر حسی و حرکتی شما، حتی در دوره‌ی بزرگسالی، به سرعت تنظیم می‌شود، به‌طوری که شن‌کش را هم جزئی از طرح بدن شما به شمار می‌آورد. رجوع کنید به:

Iriki A, Tanaka M, Iwamura Y (1996), Attention-induced neuronal activity in the monkey somatosensory cortex revealed by pupillometrics, *Neurosci Res* 25(2): 173–81; Maravita A, Iriki A (2004), Tools for the body (schema), *Trends Cogn Sci* 8:79–86.

16. Chalupa LM, Dreher B (1991), High precision systems require high precision “blueprints”: A new view regarding the formation of connections in the mammalian visual system, *J Cogn Neurosci* 3(3): 209–19; Neville H, Bavelier D (2002), Human brain plasticity: Evidence from sensory deprivation and altered language experience, *Prog Brain Res* 138:177–88.

17. Haldane JBS (1932), *The Causes of Evolution* (New York: Longmans, Green). Via S, Lande R (1985), Genotype-environment interaction and the evolution of phenotypic plasticity, *Evolution* 39:505–22; Via S, Lande R (1987), Evolution of genetic variability in a spatially heterogeneous environment: Effects of genotype-environment interaction, *Genet Res* 49:147–56.

18. Snowdon DA (2003), Healthy aging and dementia: Findings from the Nun Study, *Ann Intern Med* 139(5, pt. 1): 450–54.

۱۹. در پیری، مهم‌ترین چیز پیدا کردن راهی برای جلوگیری از خانه‌نشینی شدن است. همان گونه که بدترین چیزی که ممکن است برای یک دانشمند اتفاق بیفتد، گیر کردن در یک طرز فکر خاص در قبال یک مسئله یا در یک رشته است. شاید به همین خاطر باشد که افراد همه‌چیزدان از مزیت حیرت‌انگیزی برخوردار هستند: یعنی افرادی مثل بنجامین فرانکلین که در رشته‌های مختلف تبحر داشتند. از آنجا که آن‌ها دایم به حوزه‌های جدیدی وارد می‌شوند، مانع از آن می‌شود که در دام یک طرز فکر ثابت بیفتند.

۱۰. یادآوری و زمان

1. Ribot T (1882), *Diseases of the Memory: An Essay in the Positive Psychology* (New York: D. Appleton).

2. Hawkins RD, Clark GA, Kandel ER (2006), Operant conditioning of gill withdrawal in aplysia, *J Neurosci* 26:2443–48.

3. Hebb DO (1949), *The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory* (New York: Wiley).

به نوشته‌ی هب: «وقتی که آکسون سلول A به قدر کافی به تحریک کردن سلول B نزدیک باشد یا اینکه مکرراً یا به‌طور مداوم در به کار انداختن آن مشارکت داشته باشد، نوعی فرایند رشد یا تغییر متابولیکی در یکی یا هر دوی سلول‌ها رخ می‌دهد، که سبب می‌شود کارایی A، به‌عنوان یکی از سلول‌های تحریک‌کننده‌ی B، افزایش یابد.» گرچه دانشمندان علوم اعصاب غالباً به سیناپس بین A و B اشاره می‌کنند، ولی در نظر داشته باشید که A از طریق Z به C نیز متصل است و حدوداً با ده هزار نورون دیگر

نیز ارتباط دارد. نکته‌ی مهم آن است که قدرت هر کدام از این سیناپس‌ها می‌تواند به‌صورت جداگانه تقویت شود، که موجب تقویت برخی مکالمات و تضعیف برخی دیگر می‌شود.

4. Bliss TV, Lomo T (1973), Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of the perforant path, *J Physiol (London)* 232(2): 331-56.

در سطح تحت‌میکروسکوپی، کانال‌های ریز موجود در غشای حساس به یک سیگنال شیمیایی خاص (موسوم به گیرنده‌های NMDA) به‌عنوان آشکارسازهای هم‌رخدادی عمل می‌کنند، و زمانی پاسخ می‌دهند که دو نورون متصل به هم، در پنجره‌ی زمانی کوچکی شلیک کنند. بسیاری از غشاهای پس‌سیناپسی حاوی گیرنده‌های گلوتاماتی NMDA و نیز گیرنده‌های گلوتاماتی غیر-NMDA هستند. در حین تحریک کم‌بسامد نرمال، فقط کانال‌های غیر-NMDA باز می‌شوند، زیرا یون‌های منیزیم که به‌صورت طبیعی حضور دارند، کانال‌های NMDA را مسدود می‌کنند. ولی ورودی پیش‌سیناپسی پرمسامد که منجر به دپلاریزاسیون غشای پس‌سیناپسی می‌شود، این یون‌های منیزیم را جابه‌جا می‌کند و گیرنده‌های NMDA را نسبت به آزادسازی بعدی گلوتامات حساس می‌کند. به این طریق، NMDA-R می‌تواند به‌عنوان یک آشکارساز هم‌رخدادی عمل کند، و هم‌رخدادی فعالیت پیش و پس‌سیناپسی را آشکار کند. به این ترتیب، به نظر می‌رسد که سیناپس‌های NMDA، سیناپس‌های هیپوآل هستند، و آن‌ها را در ذخیره‌سازی ارتباطات حاوی اهمیت کلیدی دانسته‌اند. به‌علاوه، این واقعیت که گیرنده‌های NMDA-R نفوذپذیری بسیار بالایی برای کلسیم دارند، به آن‌ها امکان می‌دهد که سیستم پیام‌رسان دیگری را تحریک کنند که می‌تواند در نهایت بر ژنوم تأثیر بگذارد، و منجر به تغییرات ساختاری بلندمدت در سلول پس‌سیناپسی شود. در اکثر انواع نورون‌ها، NMDA-R نقش مهمی در القای تقویت درازمدت (LTP) دارد. یک کار رفتاری را می‌توان به یک جانور آموزش داد، ولی با تزریق مواد شیمیایی خاصی که مانند NMDA عمل می‌کنند، به نظر می‌رسد که توانایی به یاد سپردن جزئیات کار از بین می‌رود. با این حال، در نظر داشته باشید که NMDA-R فقط برای شروع ضرورت دارد، در حالی که حفظ تغییرات تحت تأثیر سازوکارهای دیگری است؛ در حالت کلی، ساخت پروتئین‌های جدیدی در هسته‌ی سلول برای این کار لازم است. یک جانور را می‌توان آموزش داد که بین دو محرک ارتباط برقرار کند (مثلاً ارتباط دادن شوک الکتریکی با یک چراغ)، ولی اگر از ساخت پروتئین جلوگیری به عمل آید، جانور فقط توانایی ایجاد حافظه‌ی کوتاه‌مدت خواهد داشت و قادر به ایجاد حافظه‌ی بلندمدت نخواهد بود. در اکثر موارد، LTP فقط زمانی القا می‌شود که فعالیت در سلول پس‌سیناپسی (دپلاریزاسیون) با فعالیت در سلول پیش‌سیناپسی همراه باشد. اگر فعالیت فقط در سلول پس‌سیناپسی یا پیش‌سیناپسی باشد، مؤثر نخواهد بود. به‌علاوه، LTP مختص همان سیناپس تحریک شده است، بدان معنا که هر کدام از سیناپس‌های سلول اساساً می‌تواند براساس سابقه‌ی شخصی خودش تقویت یا تضعیف شود.

۵. درباره‌ی نقش سیناپس در حافظه، رجوع کنید به:

Nabavi S et al. (2014), Engineering a memory with LTD and LTP, *Nature* 511:348-52; Bailey CH, Kandel RR (1993), Structural changes accompanying memory storage, *Annu Rev Physiol* 55:397-426.

6. Hopfield J (1982), Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities, *Proc Natl Acad Sci USA* 9:2554.

از آنجا که هر واحد اتصالات یا سیناپس‌های زیادی با همسایه‌های خود دارد، لذا یک واحد ممکن است در زمان‌های متفاوت در تداعی‌های مختلفی دخالت داشته باشد.

۷. گرچه قانون هب برای ایجاد تداعی‌ها مفید است، ولی یکی از نقایص نظری این قانون آن است که نسبت به ترتیب رویدادها حساس نیست. آزمایش‌ها از دیرباز نشان داده است که جانوران نسبت به

ترتیب ورودی‌های حسی اکیداً حساس هستند؛ مثلاً سگ‌های پاولوف در صورتی که گوشت قبل از زدن زنگ به آن‌ها داده شود، ارتباط این دو رویداد را یاد نمی‌گیرند. به همین ترتیب، جانوران نسبت به یک غذای خوشمزه پس از یک بار تجربه کردن تهوع به دنبال خوردن آن، بی‌زاری شدیدی پیدا می‌کنند، ولی معکوس کردن این ترتیب (اول تهوع و بعد غذا) منجر به بی‌زاری نمی‌شود. شاید بتوان گفت که در سطح بیوفیزیکی نیز چیزی موازی این وجود دارد: تغییرات قدرت سیناپس بستگی به ترتیب فعالیت پیش و پس‌سیناپسی دارد. اگر ورودی حاصل از A متقدم بر فعالیت شدن نورون B باشد، آن‌ها سیناپس تقویت می‌شود. اگر ورودی حاصل از A بعد از فعال شدن سلول B باشد، سیناپس تضعیف می‌شود. به این قاعده‌ی یادگیری عموماً شکل‌پذیری وابسته به زمان نیزه، یا قانون هب با عدم تقارن زمانی می‌گویند، و نشان می‌دهد که زمان نیزه اهمیت دارد. به‌طور خاص، قانون عدم تقارن زمانی اتصالاتی را که توان پیش‌بینی‌کننده دارند، تقویت می‌کند: اگر A همواره قبل از B فعال شود، می‌توان آن را یک پیش‌بینی موفق دانست و بنابراین، تقویت خواهد شد. رجوع کنید به:

Rao RP, Sejnowski TJ (2003), Self-organizing neural systems based on predictive learning, *Philos Transact A Math Phys Eng Sci* 361(1807): 1149–75.

۸. مفاهیم اصلی زیربنای یادگیری عمیق بیش از سی سال قدمت دارند. رجوع کنید به:

Rumelhart DE, Hinton GE, Williams RJ (1988), Learning representations by back-propagating errors, *Cognitive Modeling* 5(3): 1.

برای تحولات کلیدی در همان دوره‌ی زمانی، به اثر یان لکن، یوشوا بنجیو، و یورگن اشمیدهور نیز مراجعه نمایید.

(Yann LeCun, Yoshua Bengio, and Jürgen Schmidhuber.)

9. Carpenter GA, Grossberg S (1987), Discovering order in chaos: Stable self-organization of neural recognition codes, *Ann NY Acad Sci* 504:33–51.

10. Bakin JS, Weinberger NM (1996), Induction of a physiological memory in the cerebral cortex by stimulation of the nucleus basalis, *Proc Natl Acad Sci USA* 93:11219–24; Kilgard MP, Merzenich MM (1998), Cortical map reorganization enabled by nucleus basalis activity, *Science* 279:1714–18.

۱۱. دقت کنید که نقایص مشاهده شده در مولیسون کاملاً غیرمنتظره بود، زیرا از مدتی قبل معلوم شده بود که برداشتن لوب گیجگاهی داخلی (هیپوکامپ و نواحی اطراف) در یک طرف، عملی بی‌خطر است. برای خلاصه‌ای از زندگی و شرح حال بالینی او، رجوع کنید به:

Corkin S (2013), *Permanent Present Tense: The Unforgettable Life of the Amnesic Patient, HM* (New York: Basic Books).

12. Zola-Morgan SM, Squire LR (1990), The primate hippocampal formation: Evidence for a time-limited role in memory storage, *Science* 250(4978): 288–90.

13. Eichenbaum H (2004), Hippocampus: Cognitive processes and neural representations that underlie declarative memory, *Neuron* 44(1): 109–20. See also Frankland PW et al. (2004), The involvement of the anterior cingulate cortex in remote contextual fear memory, *Science* 304(5672): 881–83.

14. Pasupathy A, Miller EK (2005), Different time courses of learning-related activity in the prefrontal cortex and striatum, *Nature* 433(7028): 873–76. See also Ravel S, Richmond BJ (2005), Where did the time go?, *Nat Neurosci* 8(6): 705–7.

15. Lisman J et al. (2018), Memory formation depends on both synapse-specific modifications of synaptic strength and cell-specific increases in excitability, *Nat Neurosci* 12:1; Martin SJ, Grimwood PD, Morris RG (2000), Synaptic plasticity and memory: An evaluation of the hypothesis, *Annu Rev Neurosci* 23:649–711; Shors TJ, Matzel LD (1997), Long-term potentia

tion: What's learning got to do with it?, Behav Brain Sci 20(4): 597-655.

در رابطه با LTP و LTD، هنوز مطالب زیادی ناشناخته است و مشخص نیست که چگونه محیط داخل سلولی نورون‌ها نحوه‌ی تغییر سیناپس را تعیین می‌کند: همه‌ی سیناپس‌ها یک جور رفتار نمی‌کنند. در ابتدا محققان امیدوار بودند که جزئیات پروتکل تحریک، پیامد را مشخص کند: مثلاً نرخ بالای شلیک، سیناپس را تقویت می‌کند، و نرخ پایین آن را تضعیف می‌کند. ولی وقتی که مطالعات تجربی به راه افتاد، برخی از محققان که مشاهده می‌کردند که سلول با دریافت محرک «صحیح» سرکوب نمی‌شود، عموماً با این تصور که سلول مورد نظر «مریض» است، این داده‌ها را کنار می‌گذاشتند. نگاه دقیق‌تر به این داده‌ها نشان می‌دهد که قواعد تغییرات سیناپسی وابسته به عوامل دیگری در درون سلول است، که اکثر آن‌ها هنوز شناسایی نشده‌اند. رجوع کنید به:

Perrett SP et al. (2001), LTD induction in adult visual cortex: Role of stimulus timing and inhibition, J Neurosci 21(7): 2308-19.

16. Draganski B et al. (2004), Neuroplasticity: Changes in grey matter induced by training, Nature 427(6972): 311-12.

۱۷. به‌عنوان مثال، انشعابات جدید آکسون‌ها و دندریت‌ها، یا تولد سلول‌های گلیال یا نورون‌های جدید.

18. Boldrini M et al. (2018), Human hippocampal neurogenesis persists throughout aging, Cell Stem Cell 22(4): 589-99; Gould et al. (1999), Neurogenesis in the neocortex of adult primates, Science 286(5439): 548-52; Eriksson et al. (1998), Neurogenesis in the adult human hippocampus, Nat Med 4(11): 1313.

اعتقاد رایج از دهه‌ی ۱۹۶۰ بر این منوال بود که پستانداران با تعداد ثابتی نورون به دنیا می‌آیند: این تعداد حتی ممکن است با افزایش سن کاهش پیدا کند، ولی هرگز افزایش پیدا نمی‌کند. ولی با افزایش تفکیک‌پذیری تکنیک‌ها، اکنون می‌دانیم که هیپوکامپ در جانورانی از موش گرفته تا انسان، هر روز هزاران نورون جدید می‌سازد. تنها به علت یک اشتباه تاریخی است که این یافته‌ی عصب‌زایی باعث تعجب ما می‌شود؛ چرا که رشد سلول‌های جدید از خصوصیات تمام بخش‌های دیگر بدن است، و از مدت‌ها پیش می‌دانستیم که در مغز پرندگان نیز این اتفاق می‌افتد — در واقع، هر زمان که می‌بایست آواز جدیدی یاد بگیرند:

Nottebohm F (2002), Neuronal replacement in adult brain, Brain Res Bull 57(6): 737-49.

به‌عنوان یک نکته‌ی جالب تاریخی، ظن به عصب‌زایی در مغز پستانداران از مدت‌ها پیش وجود داشت، ولی از نظرها دور مانده بود؛ رجوع کنید به:

Altman J (1962), Are new neurons formed in the brains of adult mammals?, Science 135(3509): 1127-28.

19. Gould E et al. (1999), Learning enhances adult neurogenesis in the adult hippocampal formation, Nat Neurosci 2:260-65.

پس چرا با ورود این تازه‌واردها، خاطرات موجود دچار اختلال نمی‌شود؟ اگر سلول‌های جدید می‌توانند بدون به هم ریختن خاطرات ذخیره شده‌ی قدیمی، خودشان را وارد بافتار قشر کنند، پس آموزه‌ی کانکتوم از جهاتی نیاز به نوسازی دارد. یک حدس آن است که سیناپس‌ها، شاید به خاطر گردش مولکول‌های تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها، مخزن قابل اعتمادی برای اطلاعات یاد گرفته شده‌ی بلندمدت نیستند (Nottebohm [2002]؛ Bailey؛ Kandel [1993]). بلکه تغییر بیوفیزیکی نهایی نیاز به نورون کاملاً جدیدی دارد. در این چارچوب حدسی، ذخیره‌سازی حافظه نیاز به مجموعه‌ای از ژن‌ها دارد که منجر به تمایز سلولی می‌شود. برگشت‌ناپذیری تقسیم سلولی دقیقاً همان چیزی است که برای ذخیره‌سازی بلندمدت حافظه در مقیاس زمانی طولانی‌تر مورد نیاز است. البته من این دیدگاه را حدسی می‌دانم، مخصوصاً از آن رو که هنوز چیزهای زیادی درباره‌ی عصب‌زایی نامشخص است. کدام نورون‌ها نابود

می‌شوند (مواردی تصادفی یا ناسازهای اطلاعاتی)، دقیقاً در کجای مدارها قرار دارند، و چه کارکردی انجام می‌دهند؟ به بیان کلی‌تر، باید آزمایش‌هایی انجام شود که مشخص کند که آیا یادگیری سبب می‌شود که بعضی از نورون‌ها به‌عنوان مخزنی برای حافظه‌ی بلندمدت عمل کنند — که در این صورت قادر به دریافت اطلاعات جدید نخواهند بود. در ضمن، خیلی مهم است که تمام این آزمایش‌ها در جانورانی با سبک زندگی طبیعی انجام شود: این حدس مطرح شده است که علت اینکه برخی از مطالعات اولیه بر روی نخستیان نتوانستند عصب‌زایی را نشان دهند، آن بود که میمون‌های آزمایشگاهی زندگی خود را در قفس می‌گذرانند و از محرک‌های طبیعی محروم هستند:

Rakic P (1985), Limits of neurogenesis in primates, *Science* 227(4690).

اکنون می‌دانیم که داشتن محیط محرک و انجام فعالیت بدنی هر دو برای عصب‌زایی اهمیت حیاتی دارند — که دقیقاً همان چیزی است که براساس این نظریه انتظار می‌رود که هرچه خاطرات بیشتری وارد سیستم شود، ذخیره‌سازی بلندمدت بیشتری مورد نیاز خواهد بود.

20. Levenson JM, Sweatt JD (2005), Epigenetic mechanisms in memory formation, *Nat Rev Neurosci* 6(2): 108–18.

در یک مثال دیگر، برچسب‌گذاری اپی‌ژنتیک ژنوم در حین تحکیم خاطرات بلندمدت از شرطی‌سازی محیطی ترس صورت می‌گیرد. در شرطی‌سازی محیطی ترس، یک محرک آزاردهنده و محیط جدید با هم ارائه می‌شوند. این همراهی منجر به تغییر در پروتئین‌هایی می‌شود که DNA به دور آن پیچیده و باز می‌شود. این تغییر بیان ژنتیکی اساساً هر کاری را می‌تواند انجام دهد، از جمله تقویت کارکرد سیناپس، تحریک‌پذیری نورون، و الگوهای بیان گیرنده. در مقایسه با شرطی‌سازی محیطی ترس، شکل دیگری از حافظه‌ی بلندمدت به نام مهار نهفته منجر به تغییر هیستون متفاوتی می‌شود، بدان معنا که احتمالاً نوعی کد هیستون وجود دارد که هنوز کشف نشده است، و در آن، انواع خاص حافظه با الگوهای خاصی از تغییر هیستون در ارتباط هستند.

21. Weaver ICG et al. (2004), Epigenetic programming by maternal behavior, *Nat Neurosci* 7(8): 847.

رشته‌ی اپی‌ژنتیک تغییرات DNA و پروتئین‌های اطراف آن را مطالعه می‌کند، که منجر به تغییرات مادام‌العمر در الگوی بیان ژن می‌شود. این تغییرات حاصل از تعامل بین ژنوم و محیط است. این تغییرات قابل‌توارث در بیان ژن در خود توالی DNA کد نشده‌اند؛ بنابراین، ممکن است سلول‌هایی که از نظر ژنوتیپی یکسان هستند، از نظر فنوتیپی متفاوت باشند.

22. Brand S (1999), *The Clock of the Long Now: Time and Responsibility* (New York: Basic Books).

ایده‌ی لایه‌بندی سرعت تغییر در گذشته هم وجود داشته است. برند ابتدا در استودیویش در لندن در سال ۱۹۹۶، نمودار تمدن سالم را با برآیند اینو ایجاد کرد. حتی قبل از آن در دهه‌ی ۱۹۷۰، فرانک دافی که معمار بود، چهار لایه را در ساختمان‌های تجاری برشمرد: صحنه (مثلاً مبلمان، که مرتب جابه‌جا می‌شود)، منظره (مثلاً دیوارهای درونی، که حدوداً هر پنج تا هفت سال جابه‌جا می‌شوند)، خدمات (مثلاً شرکتی که ساختمان را اجاره می‌کند، که این حدوداً در مقیاس هر پانزده سال تغییر می‌کند)، و پوسته (یعنی خود ساختمان، که چندین دهه دوام می‌آورد).

۲۳. به این صورت هم می‌توان گفت که تمام این پارامترهای دیگر شاید صرفاً روشی برای حفظ تعادل جهت یک تغییر مهم (مثلاً قدرت سیناپسی) باشد. من شخصاً فکر می‌کنم این غیرمحتمل است. مثل آن است که به یک لایه از اجتماع اشاره کنیم (مثلاً تجارت)، و بگوییم که تمام تغییرات دیگر تمدن صرفاً برای آن است که همه چیز را امن نگه داریم تا اینکه همیشه امکان جدیدی برای خرید کردن داشته باشیم.

۲۴. معمولاً متخصصان علوم اعصاب این را به روشی مطالعه می‌کنند که به اندازه‌ی عاشق شدن هیجان‌انگیز نیست. مثلاً از جانوران آزمایشگاهی مانند موش صحرایی استفاده می‌کنند. آن‌ها به موش یاد می‌دهند که کاری را در ازای دریافت پاداش انجام دهد، و سرعت نزدیک شدن جانور به عملکرد کامل را اندازه‌گیری می‌کنند. سپس با کنار گذاشتن بازخورد، این رفتار را خاموش می‌کنند، و اندازه‌گیری می‌کنند که چقدر طول می‌کشد تا آن رفتار از بین برود. حالا اگر، حتی مدت‌ها بعد، جانور را دوباره با بازخورد آموزش دهند، مشاهده می‌کنند که صرفه‌جویی زیادی در مدت یادگیری بروز می‌کند: جانور بار دوم خیلی سریع‌تر یاد می‌گیرد. رجوع کنید به:

Della-Maggiore V, McIntosh AR (2005), Time course of changes in brain activity and functional connectivity associated with long-term adaptation to a rotational transformation, *J Neurophysiol* 93:2254–62; Shadmehr R, Brashers-Krug T (1997), Functional stages in the formation of human long-term motor memory, *J Neurosci* 17:409–19; Landi SM, Baguear F, Della-Maggiore V (2011), One week of motor adaptation induces structural changes in primary motor cortex that predict long-term memory one year later, *J Neurosci* 31:11808–13; Yamamoto K, Hoffman DS, Strick PL (2006), Rapid and longlasting plasticity of input-output mapping, *J Neurophysiol* 96:2797–801.

25. Mulavara AP et al. (2010), Locomotor function after long-duration space flight: Effects and motor learning during recovery, *Exp Brain Res* 202:649–59.

26. Eagleman DM (2011), *Incognito: The Secret Lives of the Brain* (New York: Pantheon). See also Barkow J, Cosmides L, Tooby J (1992), *The Adapted Mind: Evolutionary Psychology and the Generation of Culture* (New York: Oxford University Press).

۲۷. به نظر من، به خاطر همین ساخته شدن چیزهای جدید بر پایه‌ی چیزهای قدیمی است که شهادت شهود عینی قابل اعتماد نیست. در یک جنایت، هر شاهد عینی شرح مختص خود را از این تجربه بیان می‌کند، و جهان را به‌صورت مخصوص به خود می‌فهمد. فیلترها و سوگیری‌های او چشم‌انداز پایه‌ای است که تجربه‌ی جدید روی آن قرار می‌گیرد. جای تعجب نیست که ورودی جدید در درون سر افراد مختلف از شیب‌های متفاوتی جریان می‌یابد. به‌طور کلی، بسیاری از تفاوت‌های بین ما، چه در سطح فردی و چه در سطح فرهنگی، به علت وابستگی حال به گذشته است.

28. Cytowic RE, Eagleman DM (2009), *Wednesday Is Indigo Blue: Discovering the Brain of Synesthesia* (Cambridge, Mass.: MIT Press).

29. Eagleman DM et al. (2007), A standardized test battery for the study of synesthesia, *J Neurosci Methods* 159(1): 139–45. The Synesthesia Battery can be found at synesthete.org.

30. Withoft N, Winawer J, Eagleman DM (2015), Prevalence of learned grapheme-color pairings in a large online sample of synesthetes, *PLoS One* 10(3): e0118996.

۳۱. پیشنهاد ما این بود که حس‌آمیزی حرف-رنگ نوعی تصویرسازی ذهنی است که بر اثر تجربه شکل می‌گیرد؛ یعنی حافظه مسیر آن را هدایت می‌کند. دقت کنید که این تناقضی با این یافته‌ها ندارد که پیدایش پاسخ حس‌آمیزی وابسته به استعداد ژنتیکی است. و اما در مورد منشأ رنگ‌ها برای سایر افرادی که حس‌آمیزی دارند، باید دانست که آهن‌رباها تنها تأثیرات خارجی مشاهده شده نبودند؛ موارد دیگر شامل حروف رنگی نوشته شده در کتاب‌ها، حروف الفبا روی نقاشی‌های دیواری، و پوسته‌های موجود در کلاس درس بود.

32. Plummer W (1997), Total erasure, *People*.

33. Sherry DF, Schacter DL (1987), The evolution of multiple memory systems, *Psychol Rev* 94(4): 439; McClelland JL et al. (1995), Why there are complementary learning systems in the hippocampus and neocortex: Insights from the successes and failures of connectionist models of learning and memory, *Psychol Rev* 102(3): 419.

۳۴. برای یادگیری سریع، نرخ سریع یادگیری مورد نیاز است؛ ولی اگر بخواهید خاطرات متعدد را ذخیره کنید، موجب تداخل بیشتر و شکست فاجعه‌بار می‌شود. از طرف دیگر، اگر نرخ تغییر قدرت اتصال آهسته باشد، آنگاه اتصالات از تجربیات متعدد متوسط می‌گیرند، و لذا به سادگی منعکس‌کننده‌ی آمار زیربنایی محیط هستند. معمولاً تصور می‌شد که هیپوکامپ خاطرات را از خودش «عبور می‌دهد» و به بستر قشر منتقل می‌کند، ولی برخی داده‌های جدید نشان می‌دهد که این کار به‌طور موازی انجام می‌شود – هر دو هم‌زمان و به‌طور موازی یاد می‌گیرند. این مدل سیستم‌های یادگیری مکمل از زمان پیشنهاد اولیه (McCloskey و Cohen [۱۹۸۹]؛ McClelland و همکار [۱۹۸۹]؛ White [۱۹۸۹])، چندین بار اصلاح شده است، که هدف همه‌ی آن‌ها شناسایی محل قرارگیری سیستم‌های مکمل در مغز بوده است. در مدل اولیه، هیپوکامپ و قشر ذکر شده بود:

McClelland et al. (1995), Why there are complementary learning systems in the hippocampus and neocortex, *Psychol Rev* 102:419–57; O'Reilly et al. (2014), Complementary learning systems, *Cogn Sci* 38:1229–48.

مدل‌های جدیدتر بیان کرده‌اند که شاید نرخ‌های یادگیری مختلف همگی در هیپوکامپ صورت می‌گیرد: مسیر سه‌سیناپسی CA3 برای یادگیری رویدادهای کاملاً مشخص به کار می‌رود (نرخ یادگیری سریعی دارد)، در حالی که مسیر تک‌سیناپسی CA1 به خاطر نرخ یادگیری کندترش برای یادگیری آمار استفاده می‌شود. رجوع کنید به:

Schapiro et al. (2017), Complementary learning systems within the hippocampus: A neural network modeling approach to reconciling episodic memory with statistical learning, *Phil Trans R Soc B* 372(1711).

۱۱. گرگ و مریخ‌نورد

1. Coren MJ (2013), A blind fish inspires new eyes and ears for subs, *FastCoExist*.
2. See, for instance, Leverington M, Shemdin KN (2017), *Principles of Timing in FPGAs*.
3. Eagleman DM (2008), Human time perception and its illusions, *Curr Opin Neurobiol* 18(2): 131–36; Stetson C et al. (2006), Motor-sensory recalibration leads to an illusory reversal of action and sensation, *Neuron* 51(5): 651–59; Parsons B, Novich SD, Eagleman DM (2013), Motor-sensory recalibration modulates perceived simultaneity of cross-modal events, *Front Psychol* 4:46; Cai M, Stetson C, Eagleman DM (2012), A neural model for temporal order judgments and their active recalibration: A common mechanism for space and time?, *Front Psychol* 3:470.

دقت کنید که شب‌ها هم که افراد لنز تماسی خود را درمی‌آورند و عینک می‌زنند، وضعیت مشابهی پیش می‌آید. در چند لحظه‌ی اول، حس تعادل آن‌ها به هم می‌خورد. زیرا عینک صحنه را تا حدی تغییر می‌دهد، به‌گونه‌ای که حرکت چشم‌ها به تغییر بزرگ‌تری در میدان بینایی ترجمه می‌شود: خروجی به ورودی‌ای ترجمه می‌شود که اندکی غیرمنتظره است. چگونه می‌توان این مشکل را به سرعت حل کرد؟ از این طریق که پس از گذاشتن عینک، چند لحظه سرتان را به اطراف حرکت می‌دهید. با این کار، شبکه‌های عصبی شما به سرعت خروجی حرکتی را با ورودی حسی تنظیم مجدد می‌کنند.

۴. مثال‌های گریدهای هوشمند و گریدهای الکتریکی در منبع زیر با عمق بیشتری مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

Eagleman DM (2010), *Why the Net Matters: Six Easy Ways to Avert the Collapse of Civilization* (Edinburgh: Canongate Books).

۱۲. پیدا کردن عشق گم‌شده‌ی اوتزی

1. Fowler B (2000), *Iceman: Uncovering the Life and Times of a Prehistoric Man Found in an Alpine Glacier*, (Chicago: U Chicago Press).

برای شرح پرتونگاری‌های انجام شده، رجوع کنید به:

Gostner P et al. (2011), New radiological insights into the life and death of the Tyrolean Iceman, *Archaeol Sci* 38(12): 3425–31.

هم‌چنین، مراجعه کنید به:

Wierer U et al. (2018), The Iceman's lithic toolkit: Raw material, technology, typology, and use, *PLoS One*; Maixner F et al. (2016), The 5300-year-old *Helicobacter pylori* genome of the Iceman, *Science* 351(6269): 162–65.

2. Stretesky PB, Lynch MJ (2004), The relationship between lead and crime, *J Health Soc Behav* 45(2): 214–29; Nevin R (2007), Understanding international crime trends: The legacy of preschool lead exposure, *Environ Res* 104(3): 315–36; Reyes JW (2007), Environmental policy as social policy? The impact of childhood lead exposure on crime, *Contrib Econ Anal Pol* 7(1).

برای دانلود و مشاهده منابع و تصاویر رنگی - به دلیل صرفه‌جویی در مصرف کاغذ و کاهش هزینه‌ها - به روش زیر عمل کنید:

۱. به سایت رسمی نشر مراجعه کنید.

۲. کتاب را جستجو کنید.

۳. در بخش توضیحات بیشتر کتاب، منابع و عکس‌ها به طور رایگان قابل دانلود می‌باشند.

نمایه

✓	آپوئتوز، ۲۲۴	انزوا، ۳۳	پرلمان، اسحاق، ۱۶۶
	آدمک مغزی، ۳۵	انعطاف‌پذیری آدمکی، ۱۶۱	پروتز، ۶۶
	آرینیا، ۷۱	اوتزی (مرد یخی تیرو)، ۲۸۹	پس پیامد حرکت، ۱۸۹
	آسوماتوگنوزی، ۱۵۷	اورتلیوس، آبراهام، ۲۲	پستانداران، ۵۹
	آسیب نخاعی، ۱۴۸	اینشتین، آلبرت، ۲۴۸، ۲۷	پل مغز، ۵۷
	آسیموف، آیزاک، ۱۸۲	✓	پلاتیپوس، ۶۰
	آل‌ایمر، ۲۴۲	بازآرایی مغزی، ۳۹، ۶۱، ۱۳۲، ۱۶۷	پلاستیسیته، ۱۹
	آموزه‌ی نورونی، ۲۵۱	بازتخصیص قشری، ۵۲	پنفیلد، وایلد، ۳۵
	آمیش، قوم، ۱۸۵	بازخورد حسی، ۱۵۱	پولگار، خواهران، ۱۶۵
	آنسفالت راسموسن، ۱۰	بازشناسی الگو، ۱۱۶	پویافزار، ۲۲
	آنوشیا، ۷۲	بازی‌وارسازی، ۱۸۴	پیامبر (جبران)، ۲۰۲
	آنوفتالمی، ۷۱	باکتری، ۲۰۳	پیش‌تازان فضا (سریال)، ۱۵۷
	آی‌بورگ، ۱۰۱	باکی‌ریتا، پل، ۷۵	✓
	اپی‌ژنتیک، ۲۶۰	بام بینایی، ۲۱۱	تاتی‌تاتی حرکتی، ۱۴۲
	اثر تروکسلر، ۱۹۴	بحران موشکی کوبا، ۲۰۷	تاوب، ادوارد، ۳۷
	ادراک مشترک، ۱۱۳	برق، توزیع، ۲۸۵	تجربه، ۱۴، ۲۶۶
	ارسطو، ۱۸۹، ۲۳۵	بریکینگ بد (سریال)، ۲۱۴	تحصیلات دانشگاهی، تأثیر بر مغز، ۲۷
	اژدهای کومودو، ۱۴	برین‌پورت، ۸۳	تعدیل‌کننده‌ی عصبی، ۱۷۸
	استیل‌کلین، ۱۷۸	بند سینه‌ای نئوسنسوری، ۹۵	تغییرپذیری، ۲۳۹
	اشپورتس‌هایم، یوهان، ۲۶	بتزین بدون سرب، ۲۹۳	تفکر، ۱۴۴
	اشکنازی، ولادیمیر، ۱۶۷	بورگ، ۱۵۷	تکامل، ۱۴۵، ۱۶۲
	اطلاعات‌گرایی، ۲۰۳	بومیان دیجیتال، ۱۸۱	تکلم، ۱۳۸، ۱۷۱
	اعتیاد، ۲۰۲	بیش‌یادآوری، ۲۶۷	تکوین، ۱۳۵
	افزایش حسی، ۱۱۰، ۱۱۶	بیگانه‌ها (فیلم)، ۱۴۶	توئیت، ۱۱۵
	افسردگی، ۳۳	بینایی، ۲۰۹	توکیو، ۱۷
	اکتاویوس، اوتو گانتز، ۱۳۱	بیونیک، ۱۶۴	تیراندازی با کمان، ۱۳۵
	الکتروود، کاشت در مغز، ۱۱۸	✓	✓
	انحراف چشم، ۲۹	پاتنم، هیلاری، ۱۱۷	جاذدنی، دستگاه‌های، ۶۹
	اندام خیالی، ۴۰	پاداش، ۱۷۴	جایگزینی حسی، ۷۴، ۷۷

۳۳۴ مغز پویا

جبران، جبران خلیل، ۲۰۲	ساکس، اولیور، ۱۵۸	قشر، ۳۵، ۸۰
جسم سلولی، ۲۶	سایبورگ، ۱۰۲	قشر بینایی، ۲۱۵
جلیقه‌ی نئوسنسوری، ۹۳	سکته‌ی مغزی، ۲۱۳، ۷۵	قشر پس‌سری، ۴۶، ۵۶
جنگ داخلی، ۴۱	سمعک، ۶۳	قشر حرکتی، ۳۵
جهت‌یابی پژواکی، ۵۱، ۸۶	سندروم ساوانت اوتیستی، ۵۳	قشر حسی‌پیکری، ۳۵
جیمز، ویلیام، ۱۹	سندروم قفل‌شدگی، ۱۴۷	قشر همه‌منظوره، ۷۳
✓ چشم سایبورگی، ۱۰۱	سیستم شبکه‌ی پیشانی، ۸۵	قطب‌نما، ۱۰۹
✓ حافظه، ۲۵۰، ۲۷۰	سیناپتوتوکسین، ۲۱۹	قطع داروی اعتیادآور، ۲۰۲
حافظه‌ی بلندمدت، ۲۷۱	سیناپس، ۲۵۲	قفل کشندی، ۶۰
حافظه‌ی کوتاه‌مدت، ۲۷۱	✓ شبکه‌ی عصبی، ۱۱۶، ۲۵۳	✓ کاخال، رامون، ۶۳، ۲۵۱
حرکت سریع چشم، ۵۷	شبکه‌ی هاپفیلد، ۲۵۳	کراکت، دانیل، ۳۱
حس‌آمیزی، ۲۶۸	شبکه‌ی، ۶۴	کریک، فرانسیس، ۱۳
حلزون شنوایی، ۶۳	شبیه‌سازی کامپیوتری، ۱۱۷	کودک ریمده، ۳۰، ۳۱
حلقه‌ی بازخورد، ۱۵۲	شطرنج، ۱۶۵	کونیس، میلا، ۲۳۲
✓ خط بریل، ۴۶، ۵۴، ۹۱	شکل‌پذیری، ۱۹	کیفیات ذهنی، ۱۲۱
✓ داروین، چارلز، ۲۶	شکل‌پذیری مغز، ۵۳	✓ گردش وضعی، ۶۰
درد، گیرنده، ۷۳	شنوایی، ۶۳	گسترش حسی، ۱۱۳
دکارت، رنه، ۱۱۷	شوارتزنگر، آرنولد، ۲۳۲	گوش درونی، ۶۳
دکتر اختاپوس، ۱۳۱	شویرمان، جن، ۱۴۹	گیتس، بیل، ۱۸۳
دل‌شکستگی، ۲۰۲	شینکانسن، ۱۷	✓ لایه‌بندی سرعت در مغز، ۲۶۲
دندریت، ۲۶	✓ ضربه‌ی مغزی، ۲۲۷	لئونارد، کارل، ۳۰
دنایای غرب (سریال)، ۱۰۶	✓ طرح‌واره در مغز، ۱۴۱، ۲۶۴	لباس غواصی و پروانه (بویی)، ۱۴۸
✓ رانش قاره‌ای، ۲۲	✓ عصب بینایی، ۶۵	لوی-مونتاچینی، ریتا، ۲۱۷
رؤیا، ۵۶	عصب‌زایی، ۲۶۰	لیدار، ۱۰۶
رتینیت پیگمنتوزا، ۶۴	عقدده‌های قاعده‌ای، ۲۵۸	✓ ماتریکس (فیلم)، ۱۱۷، ۲۶۶
رقابت بر سر قلمرو در مغز، ۴۸	عقیده‌کاوی، ۱۱۵	ماشین وظیفه، مغز به‌عنوان، ۴۸
روبانیک آواتاری، ۱۵۹	✓ غبار عصبی، ۱۱۹	ماهی کور، ۲۸۱
ریتیم شبانه‌روزی، ۲۸	گریزه، ۲۶۵	محدودیت‌درمانی، ۱۷۴
✓ زبان اشاره، ۲۶۳	✓ فاکتور رشد عصبی، ۲۱۹	مدارسازی ایستا، ۲۲، ۲۵
✓ ژنتیک، ۲۳۹	فراموشی پیش‌گستر، ۲۴۸	مدارسازی پویا، ۲۱
ژنوم انسان، ۲۸	✓ قانون ریبو، ۲۴۷	مدرسه‌ی نابینایان، ۵۴
✓ قانون هوای پاک، ۲۹۳	✓ قانون ریو، ۲۴۷	مدل سر سیب‌زمینی، ۶۹
		مرتبط بودن، ۱۷۸، ۱۸۷
		مرد عنکبوتی، ۱۱۵
		مرد عنکبوتی شگفت‌انگیز (مجله)،

نمایه ۳۳۵ |

۱۳۱	نشانگر لغزش و چرخش (هواپیما)،	واسط مغز و ماشین، ۱۵۰
مرد یخی تیرو، ۲۸۹	۱۱۱	واقعیت مجازی، ۱۶۲
مریخ‌نورد، ۲۷۷	نکروز، ۲۲۴	وان، دان، ۵۶
مستعمره‌سازی آمریکای شمالی،	نلسون، هوریشیو، ۳۹	وگنر، آلفرد، ۲۲
۴۴	نور فرابنفش، ۱۰۳	✓
مسدودسازی، ۲۰۱	نور فروسرخ، ۱۰۴	هاربیسون، نیل، ۱۰۱
مغز، تکوین، ۳۲	نورگرایی، ۲۰۳	هارلو، هری، ۳۳
مکعب روبیک، ۵۳	نوروتروفین، ۲۱۹	هاوزر، کاسپار، ۲۹
موسیقی، ۵۰	نورون، ۱۱	هایدگر، مارتین، ۲۲۹
میدان مغناطیسی، ۱۰۸	نورون تحریکی، ۲۲۰	هب، دونالد، ۲۵۲
میلسپ، رانی، ۴۹	نورون مهاری، ۲۲۰	هسته‌ی زانویی جانبی، ۵۸
✓	نوویچ، اسکات، ۹۲	همایه، ۲۵۲
نابساوایی، ۷۳	نیکوللیس، میگل، ۱۰۴، ۱۵۵	هیپوکامپ، ۲۵۲
نابودگر (فیلم)، ۱۴۳	نیمکره‌برداری، ۱۰	✓
نانوروبات، ۱۱۹	✓	یادگیری (فیلم)، ۲۴۸
نرم‌افزارهای انطباقی، ۱۸۴	واتسون، جیمز، ۱۳	یادگیری ارتباطی، ۲۵۳

در ستایش کتاب

«اثری برجسته در زمینه‌ی علم عامه‌پسند... با بیانی استادانه.»

— کرکوس ریویو

«شرح بسیار جذابی از شکل‌پذیری و به‌هم‌پیوستگی شگفت‌انگیز مغز با زبان شیوا و عالمانه‌ی ایگلن، به‌همراه شعفی که با کنار هم قرار گرفتن جزئیات ظاهرا بی‌ارتباط، از فهمیدن کلیت موضوع حاصل می‌شود.»

— ماریا پوپووا، وبلاگ نکته‌های مغزی

«نثری شاداب... از زمان درگذشت ایزاک آسیموف، کمتر دانشمندی همچون دیوید ایگلن داشته‌ایم که افکار خود را با چنین بیان گیرایی ارائه نماید. مغز پویا کتابی است شگفت‌انگیز، گویی که اولیور ساکس و ویلیام گیسون در چمن جلوی خانه‌ی کارل سیگن نشسته‌اند و آن را به رشته‌ی تحریر درآورده‌اند.»

— وال استریت ژورنال

«این کتاب نگاهی است به شکل‌پذیری عصبی به‌شیوه‌ای که ذهن را مسرور می‌کند... مهارت ایگلن به‌عنوان معلم، ژرفای دید او، و تسلط‌اش بر پژوهش‌های جاری کتابی را آفریده است که برای خوانندگان بسیار آموزنده است.»

— پابلیشرز ویکلی

«دیوید ایگلن، این شرلوک هلمز علوم اعصاب، مرا به این باور رسانده است که تمام آنچه برای ساختن دنیایی آرمانی لازم است، در درون مغز هر کدام از ما جای گرفته است. دانش و اشتیاق او سرمست‌کننده است. کتاب او نشان‌دهنده‌ی اصولی است که درباره‌ی آن می‌نویسد؛ واژه‌های او ذهن مرا تغییر داده‌اند.»

— راسل برنر، کم‌دین و کنشگر

«از این کتاب افسونگر چیزهای زیادی می‌توان آموخت. خواندن آن به علاقه‌مندان علوم اعصاب، فناوری، و نقطه‌ی تقاطع این حوزه‌ها توصیه می‌شود.»

— لایبری ژورنال

«صفحات کتاب مغز پویا پر است از ایده‌های حیرت‌آور و بینش‌های خیره‌کننده. اشتیاق مُسری ایگلن، داستان‌های جالبی که بازگو می‌کند، و متن روان کتاب سبب می‌شود که سازگارپذیری مغز همچون داستانی پرکشش و گیرا باشد. این کتاب کاوشی است سرگرم‌کننده و توفانی درباره‌ی پیچیده‌ترین چیزی که در عالم یافت شده است.»

— خالد حسینی، نویسنده‌ی بادبادک‌باز

FURTHER READING

- Ahuja AK et al. (2011). Blind subjects implanted with the Argus II retinal prosthesis are able to improve performance in a spatial-motor task. *Br J Ophthalmol* 95(4): 539–43.
- Amedi A, Campardon J, Merabet L, Meijer P, Pascual-Leone A (2006). Towards closing the gap between visual neuroprostheses and sighted restoration: Insights from studying vision, cross-modal plasticity, and sensory substitution. *J Vision* 6(13): 12.
- Amedi A, Floel A, Knecht S, Zohary E, Cohen LG (2004). Transcranial magnetic stimulation of the occipital pole interferes with verbal processing in blind subjects. *Nat Neurosci* 7:1266–70.
- Amedi A, Raz N, Azulay H, Malach R, Zohary E (2010). Cortical activity during tactile exploration of objects in blind and sighted humans. *Restor Neurol Neurosci* 28(2): 143–56.
- Amedi A, Raz N, Pianka P, Malach R, Zohary E (2003). Early “visual” cortex activation correlates with superior verbal-memory performance in the blind. *Nat Neurosci* 6:758–66.
- Amedi A et al. (2007). Shape conveyed by visual-to-auditory sensory substitution activates the lateral occipital complex. *Nat Neurosci* 10:687–89.
- Ardouin J et al. (2012). FlyVIZ: A novel display device to provide humans with 360° vision by coupling catadioptric camera with HMD. In *Proceedings of the 18th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*.
- Arno P, Capelle C, Wanet-Defalque MC, Catalan-Ahumada M, Veraart C (1999). Auditory coding of visual patterns for the blind. *Perception* 28(8): 1013–29.
- Arno P et al. (2001). Occipital activation by pattern recognition in the early blind using auditory substitution for vision. *Neuroimage* 13(4): 632–45.
- Auvray M, Hanneton S, O'Regan JK (2007). Learning to perceive with a visuo-auditory substitution system: Localisation and object recognition with “The vOICe.” *Perception* 36:416–30.
- Auvray M, Myin E (2009). Perception with compensatory devices: From sensory substitution to sensorimotor extension. *Cogn Sci* 33(6): 1036–58.
- Bach-y-Rita P (2004). Tactile sensory substitution studies. *Ann NY Acad Sci* 1013:83–91.
- Bach-y-Rita P, Collins CC, Saunders F, White B, Scadden L (1969). Vision substitution by tactile image projection. *Nature* 221:963–64.
- Bach-y-Rita P, Danilov Y, Tyler ME, Grimm RJ (2005). Late human brain plasticity: Vestibular substitution with a tongue BrainPort human-machine interface. *Intellectica* 1(40): 115–22.
- Bailey CH, Kandel RR (1993). Structural changes accompanying memory storage. *Ann Rev Physiol* 55:397–426.
- Bakin JS, Weinberger NM (1996). Induction of a physiological memory in the cerebral cortex by stimulation of the nucleus basalis. *Proc Natl Acad Sci USA* 93:11219–24.
- Bangert M, Schlaug G (2006). Specialization of the specialized in features of external human brain morphology. *Eur J Neurosci* 24:1832–34.
- Barinaga M (1992). The brain remaps its own contours. *Science* 258:216–18.
- Bear MF, Singer W (1986). Modulation of visual cortical plasticity by acetylcholine and noradrenaline. *Nature* 320:172–76.
- Bennett EL, Diamond MC, Krech D, Rosenzweig MR (1964). Chemical and anatomical plasticity of brain. *Science* 164:610–19.
- Bliss TV, Lomo T (1973). Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anesthetized rabbit following stimulation of the perforant path. *J Physiol (London)* 232:331–56.
- Boldrini M et al. (2018). Human hippocampal neurogenesis persists throughout aging. *Cell Stem Cell* 22(4): 589–99.
- Borgstein J, Grootendorst C (2002). Half a brain. *Lancet* 359(9305): 473.
- Borsook D et al. (1998). Acute plasticity in the human somatosensory cortex following amputation. *Neuroreport* 9:1013–17.
- Bouton CE et al. (2016). Restoring cortical control of functional movement in a human with quadriplegia. *Nature* 533(7602): 247.
- Bower TGR (1978). Perceptual development: Object and space. In *Handbook of Perception*, vol. 8, *Perceptual Coding*, edited by EC Carterette and MP Friedman. Academic Press.
- Brandt AK and Eagleman DM (2017). *The Runaway Species*. Catapult Press.
- Bubic A, Striem-Amit E, Amedi A (2010). Large-scale brain plasticity following blindness and the use of sensory substitution devices. In *Multisensory Object Perception in the Primate Brain*, edited by MJ Naumer and J Kaiser, 351–80. Springer.
- Buonomano DV, Merzenich MM (1998). Cortical plasticity: From synapses to maps. *Annu Rev Neurosci* 21:149–86.
- Burrone J, O'Byrne M, Murthy VN (2002). Multiple forms of synaptic plasticity triggered by selective suppression of activity in individual neurons. *Nature* 420(6914): 414–18.
- Burton H (2003). Visual cortex activity in early and late blind people. *J Neurosci* 23(10): 4005–11.
- Burton H, Snyder AZ, Conturo TE, Akbudak E, Ollinger JM, Raichle ME (2002). Adaptive changes in early and late blind: A fMRI study of Braille reading. *J Neurophysiol* 87:589–607.
- Cai M, Stetson C, Eagleman DM (2012). A neural model for temporal order judgments and their active recalibration: A common mechanism for space and time? *Front Psychol* 3:470.
- Cañón Bermúdez GS, Fuchs H, Bischoff L, Fassbender J, Makarov D (2018). Electronic-skin compasses for geomagnetic field-driven artificial magnetoreception and interactive electronics. *Nat Electron* 1(11): 589–95.
- Carpenter GA, Grossberg S (1987). Discovering order in chaos: Stable self-organization of neural recognition codes. *Ann NY Acad Sci* 504:33–51.
- Chebat DR, Harrar V, Kupers R, Maidenbaum S, Amedi A, Ptito M (2018). Sensory substitution and the neural correlates of navigation in blindness. In *Mobility of Visually Impaired People*, 167–200. Springer.
- Chorost M (2011). *World Wide Mind: The Coming Integration of Humanity, Machines, and the Internet*. Free Press.
- Clark SA, Allard T, Jenkins WM, Merzenich MM (1988). Receptive-fields in the body-surface map in adult cortex defined by temporally correlated inputs. *Nature* 332:444–45.
- Cline H (2003). Sperry and Hebb: Oil and vinegar? *Trends Neurosci* 26(12): 655–61.
- Cohen LG et al. (1997). Functional relevance of cross-modal plasticity in blind humans. *Nature* 389:180–83.

- Collignon O, Lassonde M, Lepore F, Bastien D, Veraart C (2007). Functional cerebral reorganization for auditory spatial processing and auditory substitution of vision in early blind subjects. *Cereb Cortex* 17(2): 457–65.
- Collignon O, Renier L, Bruyer R, Tranduy D, Veraart C (2006). Improved selective and divided spatial attention in early blind subjects. *Brain Res* 1075(1): 175–82.
- Collignon O, Voss P, Lassonde M, Lepore F (2009). Cross-modal plasticity for the spatial processing of sounds in visually deprived subjects. *Exp Brain Res* 192(3): 343–58.
- Conner JM, Culbertson A, Packowski C, Chiba AA, Tuszynski MH (2003). Lesions of the basal forebrain cholinergic system impair task acquisition and abolish cortical plasticity associated with motor skill learning. *Neuron* 38:819–29.
- Constantine-Paton M, Law MI (1978). Eye-specific termination bands in tecta of three-eyed frogs. *Science* 202:639–41.
- Cronholm B (1951). Phantom limbs in amputees: A study of changes in the integration of centripetal impulses with special reference to referred sensations. *Acta Psychiatr Neurol Scand Suppl* 72:1–310.
- Cronly-Dillon J, Persaud KC, Blore R (2000). Blind subjects construct conscious mental images of visual scenes encoded in musical form. *Proc Biol Sci* 267(1458): 2231–38.
- Cronly-Dillon J, Persaud KC, Gregory RP (1999). The perception of visual images encoded in musical form: A study in cross-modality information transfer. *Proc Biol Sci* 266(1436): 2427–33.
- Crowley JC, Katz LC (1999). Development of ocular dominance columns in the absence of retinal input. *Nat Neurosci* 2:1125–30.
- Cytowic RE, Eagleman DM (2009). *Wednesday Is Indigo Blue: Discovering the Brain of Synesthesia*. MIT Press.
- Damasio AR, Tranel D (1993). Nouns and verbs are retrieved with differently distributed neural systems. *Proc Natl Acad Sci USA* 90(11): 4957–60.
- D'Angiulli A, Waraich P (2002). Enhanced tactile encoding and memory recognition in congenital blindness. *Int J Rehabil Res* 25(2): 143–45.
- Darian-Smith C, Gilbert CD (1994). Axonal sprouting accompanies functional reorganization in adult cat striate cortex. *Nature* 368:737–40.
- Day JJ, Sweatt JD (2010). DNA methylation and memory formation. *Nat Neurosci* 13(11): 1319.
- Diamond M (2001). Response of the brain to enrichment. *An Acad Bras Ciênc* 73:211–20.
- Donati AR et al. (2016). Long-term training with a brain-machine interface-based gait protocol induces partial neurological recovery in paraplegic patients. *Sci Rep* 6:30383.
- Dowling J (2008). Current and future prospects for optoelectronic retinal prostheses. *Nature-Eye* 23:1999–2005.
- Draganski B, Gaser C, Busch V, Schuierer G, Bogdahn U, May A (2004). Neuroplasticity: Changes in grey matter induced by training. *Nature* 427(6972): 311–12.
- Driemeyer J, Boyke J, Gaser C, Büchel C, May A (2008). Changes in gray matter induced by learning—revisited. *PLoS One* 3(7): e2669.
- Dudai Y (2004). The neurobiology of consolidations, or, how stable is the engram? *Ann Rev Psychol* 55:51–86.
- Eagleman DM (2001). Visual illusions and neurobiology. *Nat Rev Neurosci* 2(12): 920–26.
- Eagleman DM (2005). Distortions of time during rapid eye movements. *Nat Neurosci* 8(7): 850–51.
- Eagleman DM (2008). Human time perception and its illusions. *Curr Opin Neurobiol* 18(2): 131–36.
- Eagleman DM (2009). Silicon immortality: Downloading consciousness into computers. In *This Will Change Everything: Ideas That Will Shape the Future*, edited by J Brockman. Harper Perennial.
- Eagleman DM (2010). The strange mapping between the timing of neural signals and perception. In *Issues of Space and Time in Perception and Action*, edited by R Nijhawan. Cambridge University Press.
- Eagleman DM (2011). The brain on trial. *Atlantic Monthly*. July/August.
- Eagleman DM (2011). *Incognito: The Secret Lives of the Brain*. Pantheon.
- Eagleman DM (2012). Synaesthesia in its protean guises. *Br J Psychol* 103(1): 16–19.
- Eagleman DM (2015). Can we create new senses for humans? TED talks.
- Eagleman DM (2015). *The Brain: The Story of You*. Pantheon.
- Eagleman DM, Downar J (2015). *Brain and Behavior: A Cognitive Neuroscience Perspective*. Oxford University Press.
- Eagleman DM (2018). We will leverage technology to create new senses. *Wired*.
- Eagleman DM, Goodale MA (2009). Why color synesthesia involves more than color. *Trends Cogn Sci* 13(7): 288–92.
- Eagleman DM, Jacobson JE, Sejnowski TJ (2004). Perceived luminance depends on temporal context. *Nature* 428(6985): 854.
- Eagleman DM, Kagan AD, Nelson SS, Sagaram D, Sarma AK (2007). A standardized test battery for the study of synesthesia. *J Neurosci Methods* 159(1): 139–45.
- Eagleman DM, Montague PR (2002). Models of learning and memory. In *Encyclopedia of Cognitive Science*. Macmillan.
- Eagleman DM, Pariyadath V (2009). Is subjective duration a signature of coding efficiency? *Philos Trans R Soc* 364(1525): 1841–51.
- Eagleman DM, Sejnowski TJ (2000). Motion integration and postdiction in visual awareness. *Science* 287(5460): 2036–38.
- Eagleman DM, Vaughn DA (2020). A new theory of dream sleep. Under review.
- Edelman GM (1987). *Neural Darwinism: The Theory of Neuronal Group Selection*. Basic Books.
- Elbert T, Pentev C, Wienbruch C, Rockstroh B, Taub E (1995). Increased finger representation of the fingers of the left hand in string players. *Science* 270:305–6.
- Elbert T, Rockstroh B (2004). Reorganization of human cerebral cortex: The range of changes following use and injury. *Neuroscientist* 10:129–41.
- Eriksson PS et al. (1998). Neurogenesis in the adult human hippocampus. *Nat Med* 4(11): 1313–17.
- Feuillet L, Dufour H, Pelletier J (2007). Brain of a white-collar worker. *Lancet* 370:262.
- Finney EM, Fine I, Dobkins KR (2001). Visual stimuli activate auditory cortex in the deaf. *Nat Neurosci* 4(12): 1171–73.
- Flor H, Elbert T, Knecht S, Wienbruch C, Pantev C, Birbaumer N, Larbig W, Taub E (1995). Phantom-limb pain as a perceptual correlate of cortical reorganization following arm amputation. *Nature* 375(6531): 482–84.
- Florence SL, Taub HB, Kaas JH (1998). Large-scale sprouting of cortical connections after peripheral injury in adult macaque monkeys. *Science* 282:1117–21.
- Fuhr P, Cohen LG, Dang N, Findley TW, Haghighi S, Oro J, Hallett M (1992). Physiological analysis of motor reorganization following lower limb amputation. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 85(1): 53–60.
- Fusi S, Drew PJ, Abbott LF (2005). Cascade models of synaptically stored memories. *Neuron* 45(4): 599–611.
- Gougoux F, Lepore F, Lassonde M, Voss P, Zatorre RJ, Belin P (2004). Neuropsychology: Pitch discrimination in the early blind. *Nature* 430(6997): 309.
- Gougoux F, Zatorre RJ, Lassonde M, Voss P, Lepore F (2005). A functional neuroimaging study of sound localization: Visual cortex

- activity predicts performance in early-blind individuals. *PLoS Biol* 3(2): e27.
- Gould E, Beylin AV, Tanapat P, Reeves A, Shors TJ (1999). Learning enhances adult neurogenesis in the hippocampal formation. *Nat Neurosci* 2:260–65.
- Gould E, Reeves A, Graziano MSA, Gross C (1999). Neurogenesis in the neocortex of adult primates. *Science* 286:548–52.
- Gu Q (2003). Contribution of acetylcholine to visual cortex plasticity. *Neurobiol Learn Mem* 80:291–301.
- Hallett M (1999). Plasticity in the human motor system. *Neuroscientist* 5:324–32.
- Halligan PW, Marshall JC, Wade DT (1994). Sensory disorganization and perceptual plasticity after limb amputation: A follow-up study. *Neuroreport* 5:1341–45.
- Hamilton RH, Keenan JP, Catala MD, Pascual-Leone A (2000). Alexia for Braille following bilateral occipital stroke in an early blind woman. *Neuroreport* 11:237–40.
- Hamilton RH, Pascual-Leone A, Schlaug G (2004). Absolute pitch in blind musicians. *Neuroreport* 15:803–6.
- Hasselmo ME (1995). Neuromodulation and cortical function: Modeling the physiological basis of behavior. *Behav Brain Res* 67:1–27.
- Hawkins J, Blakeslee S (2004). *On Intelligence*. Times Books.
- Hochberg LR, Serruya MD, Friehs GM, Mukand JA, Saleh M, Caplan AH, Branner A, Chen D, Penn RD, Donoghue JP (2006). Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia. *Nature* 442:164–71.
- Hoffman KL, McNaughton BL (2002). Coordinated reactivation of distributed memory traces in primate neocortex. *Science* 297:2070.
- Hoffmann R et al. (2018). Evaluation of an audio-haptic sensory substitution device for enhancing spatial awareness for the visually impaired. *Optom Vis Sci* 95(9): 757.
- Hubel DH, Wiesel TN (1965). Binocular interaction in striate cortex of kittens reared with artificial squint. *J Neurophysiol* 28:1041–59.
- Hurovitz C, Dunn S, Domhoff GW, Fiss H (1999). The dreams of blind men and women: A replication and extension of previous findings. *Dreaming* 9:183–93.
- Jacobs GH, Williams GA, Cahill H, Nathans J (2007). Emergence of novel color vision in mice engineered to express a human cone photopigment. *Science* 315(5819): 1723–25.
- Jameson KA (2009). Tetrachromatic color vision. In *The Oxford Companion to Consciousness*, edited by P Wilken, T Bayne, and A Cleeremans. Oxford University Press.
- Johnson JS, Newport EL (1989). Critical period effects in second language learning: The influence of maturational state on the acquisition of English as a second language. *Cogn Psychol* 21:60–99.
- Jones EG (2000). Cortical and subcortical contributions to activity-dependent plasticity in primate somatosensory cortex. *Annu Rev Neurosci* 23:1–37.
- Jones EG, Pons TP (1998). Thalamic and brainstem contributions to large-scale plasticity of primate somatosensory cortex. *Science* 282(5391): 1121–25.
- Karl A, Birbaumer N, Lutzenberger W, Cohen LG, Flor H (2001). Reorganization of motor and somatosensory cortex in upper extremity amputees with phantom limb pain. *J Neurosci* 21:3609–18.
- Karni A, Meyer G, Jezzard P, Adams M, Turner R, Ungerleider L (1995). Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during motor skill learning. *Nature* 377:155–58.
- Kay L (2000). Auditory perception of objects by blind persons, using a bioacoustic high resolution air sonar. *J Acoust Soc Am* 107(6): 3266–76.
- Kennedy PR, Bakay RA (1998). Restoration of neural output from a paralyzed patient by a direct brain connection. *Neuroreport* 9:1707–11.
- Kilgard MP, Merzenich MM (1998). Cortical map reorganization enabled by nucleus basalis activity. *Science* 279:1714–18.
- Knudsen EI (2002). Instructed learning in the auditory localization pathway of the barn owl. *Nature* 417:322–28.
- Kubaneck M, Bobulski J (2018). Device for acoustic support of orientation in the surroundings for blind people. *Sensors* 18(12): 4309.
- Kuhl PK (2004). Early language acquisition: Cracking the speech code. *Nat Rev Neurosci* 5:831–43.
- Kupers R, Ptito M (2014). Compensatory plasticity and cross-modal reorganization following early visual deprivation. *Neurosci Biobehav Rev* 41:36–52.
- Law MI, Constantine-Paton M (1981). Anatomy and physiology of experimentally produced striped tecta. *J Neurosci* 1:741–59.
- Lenay C, Gapenne O, Hannequin S, Marque C, Genouëlle C (2003). Sensory substitution: Limits and perspectives. In *Touching for Knowing, Cognitive Psychology of Haptic Manual Perception*, edited by Y Hatwell, A Streri, and E Gentaz, 275–92. John Benjamins.
- Levy B (2008). The blind climber who “sees” with his tongue. *Discover*, June 22, 2008.
- Lisman J, Cooper K, Sehgal M, Silva AJ (2018). Memory formation depends on both synapse-specific modifications of synaptic strength and cell-specific increases in excitability. *Nat Neurosci* 12:1.
- Lobo L et al. (2018). Sensory substitution: Using a vibrotactile device to orient and walk to targets. *J Exp Psychol Appl* 24(1): 108.
- Macpherson F, ed. (2018). *Sensory Substitution and Augmentation*. Oxford University Press.
- Mancuso K, Hauswirth WW, Li Q, Connor TB, Kuchenbecker JA, Mauck MC, Neitz J, Neitz M (2009). Gene therapy for red-green colour blindness in adult primates. *Nature* 461:784–88.
- Maravita A, Iriki A (2004). Tools for the body (schema). *Trends Cogn Sci* 8:79–86.
- Martin SJ, Grimwood PD, Morris RG (2000). Synaptic plasticity and memory: An evaluation of the hypothesis. *Annu Rev Neurosci* 23:649–711.
- Massiceti D, Hicks SL, van Rheede JJ (2018). Stereoscopic vision: Exploring visual-to-auditory sensory substitution mappings in an immersive virtual reality navigation paradigm. *PLoS One* 13(7).
- Matteau I, Kupers R, Ricciardi E, Pietrini P, Ptito M (2010). Beyond visual, aural, and haptic movement perception: hMT+ is activated by electrotactile motion stimulation of the tongue in sighted and in congenitally blind individuals. *Brain Res Bull* 82(5–6): 264–70.
- Meijer PB (1992). An experimental system for auditory image representations. *IEEE Trans Biomed Eng* 39(2): 112–21.
- Merabet LB et al. (2007). Combined activation and deactivation of visual cortex during tactile sensory processing. *J Neurophysiol* 97:1633–41.
- Merabet LB et al. (2008). Rapid and reversible recruitment of early visual cortex for touch. *PLoS One* 3(8): e3046.
- Merabet LB, Pascual-Leone A (2010). Neural reorganization following sensory loss: The opportunity of change. *Nat Rev Neurosci* 11(1): 44–52.
- Merabet LB, Rizzo J, Amedi A, Somers D, Pascual-Leone A (2005). What blindness can tell us about seeing again: Merging neuroplasticity and neuroprostheses. *Nat Rev Neurosci* 6(1): 71–77.
- Merzenich MM (1998). Long-term change of mind. *Science* 282(5391): 1062–63.
- Merzenich MM et al. (1984). Somatosensory cortical map changes following digit amputation in adult monkeys. *J Comp Neurol*

- Miller TC, Crosby TW (1979). Musical hallucinations in a deaf elderly patient. *Ann Neurol* 5:301–2.
- Mitchell SW (1872). *Injuries of Nerves and Their Consequences*. Lippincott.
- Montague PR, Eagleman DM, McClure SM, Berns GS (2002). Reinforcement learning. In *Encyclopedia of Cognitive Science*. Macmillan.
- Moosa AN et al. (2013). Long-term functional outcomes and their predictors after hemispherectomy in 115 children. *Epilepsia* 54(10): 1771–79.
- Muckli L, Naumer MJ, Singer W (2009). Bilateral visual field maps in a patient with only one hemisphere. *Proc Natl Acad Sci USA* 106(31): 13034–39.
- Muhlau M et al. (2006). Structural brain changes in tinnitus. *Cereb Cortex* 16:1283–88.
- Nagel SK, Carl C, Kringe T, Martin R, König P (2005). Beyond sensory substitution—learning the sixth sense. *J Neural Eng* 2(4): R13–26.
- Nau AC, Pinter C, Arnoldussen A, Fisher C (2015). Acquisition of visual perception in blind adults using the BrainPort artificial vision device. *Am J Occup Ther* 69(1): 1–8.
- Neely RM, Piech DK, Santacruz SR, Maharbiz MM, Carmena JM (2018). Recent advances in neural dust: Towards a neural interface platform. *Curr Opin Neurobiol* 50:64–71.
- Neville H, Bavelier D (2002). Human brain plasticity: Evidence from sensory deprivation and altered language experience. *Prog Brain Res* 138:177–88.
- Noë A (2009). *Out of Our Heads*. Hill and Wang.
- Norimoto H, Ikegaya Y (2015). Visual cortical prosthesis with a geomagnetic compass restores spatial navigation in blind rats. *Curr Biol* 25(8): 1091–95.
- Nottebohm F (2002). Neuronal replacement in adult brain. *Brain Res Bull* 57(6): 737–49.
- Novich SD, Eagleman DM (2015). Using space and time to encode vibrotactile information: Toward an estimate of the skin's achievable throughput. *Exp Brain Res* 233(10): 2777–88.
- Nudo RJ, Milliken GW, Jenkins WM, Merzenich MM (1996). Use-dependent alterations of movement representations in primary motor cortex of adult squirrel monkeys. *J Neurosci* 16(2): 785–807.
- O'Brien J, Bloomfield SA (2018). Plasticity of retinal gap junctions: Roles in synaptic physiology and disease. *Annu Rev Vis Sci* 4:79–100.
- O'Regan JK, Noë A (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behav Brain Sci* 24(5): 939–73; discussion 973–1031.
- Orsetti M, Casamenti F, Pepeu G (1996). Enhanced acetylcholine release in the hippocampus and cortex during acquisition of an operant behavior. *Brain Res* 724: 89–96.
- Ortiz-Terán L et al. (2016). Brain plasticity in blind subjects centralizes beyond the modal cortices. *Front Syst Neurosci* 10:61.
- Ortiz-Terán L et al. (2017). Brain circuit–gene expression relationships and neuroplasticity of multisensory cortices in blind children. *Proc Natl Acad Sci* 114(26): 6830–35.
- Osinski D, Hjelme DR (2018). A sensory substitution device inspired by the human visual system. *11th International Conference on Human System Interaction*.
- Parsons B, Novich SD, Eagleman DM (2013). Motor-sensory recalibration modulates perceived simultaneity of cross-modal events. *Front Psychol* 4:46.
- Pascual-Leone A, Amedi A, Fregni F, Merabet L (2005). The plastic human brain cortex. *Annu Rev Neurosci* 28:377–401.
- Pascual-Leone A, Hamilton R (2001). The metamodal organization of the brain. In *Vision: From Neurons to Cognition*, edited by C Casanova and M Ptito, 427–45. Elsevier Science.
- Pascual-Leone A, Peris M, Tormos JM, Pascual AP, Catala MD (1996). Reorganization of human cortical motor output maps following traumatic forearm amputation. *Neuroreport* 7:2068–70.
- Pasupathy A, Miller EK (2005). Different time courses of learning-related activity in the prefrontal cortex and striatum. *Nature* 433(7028): 873–76.
- Penfield W (1961). Activation of the record of human experience. *Ann R Coll Surg Engl* 29(2): 77–84.
- Perrett SP, Dudek SM, Eagleman DM, Montague PR, Friedlander MJ (2001). LTD induction in adult visual cortex: Role of stimulus timing and inhibition. *J Neurosci* 21(7): 2308–19.
- Petitto LA, Marentette PF (1991). Babbling in the manual mode: Evidence for the ontogeny of language. *Science* 251:1493–96.
- Poirier C, De Volder AG, Scheiber C (2007). What neuroimaging tells us about sensory substitution. *Neurosci Biobehav Rev* 31:1064–70.
- Pons TP, Garraghty PE, Ommaya AK, Kaas JH, Taub E, Mishkin M (1991). Massive cortical reorganization after sensory deafferentation in adult macaques. *Science* 252:1857–60.
- Proulx MJ, Stoerig P, Ludwig E, Knoll I (2008). Seeing “where” through the ears: Effects of learning-by-doing and long-term sensory deprivation on localization based on image-to-sound substitution. *PLoS One* 3(3): e1840.
- Ptito M, Fumal A, De Noordhout AM, Schoenen J, Gjedde A, Kupers R (2008). TMS of the occipital cortex induces tactile sensations in the fingers of blind Braille readers. *Exp Brain Res* 184(2): 193–200.
- Rajangam S, Tseng PH, Yin A, Lehw G, Schwarz D, Lebedev MA, Nicolelis MA (2016). Wireless cortical brain-machine interface for whole-body navigation in primates. *Sci Rep* 6:22170.
- Ramachandran VS (1993). Behavioral and MEG correlates of neural plasticity in the adult human brain. *Proc Natl Acad Sci USA* 90:10413–20.
- Ramachandran VS, Rogers-Ramachandran D, Stewart M (1992). Perceptual correlates of massive cortical reorganization. *Science* 258:1159–60.
- Rao RP, Sejnowski TJ (2003). Self-organizing neural systems based on predictive learning. *Philos Transact A Math Phys Eng Sci* 361(1807): 1149–75.
- Raz N, Amedi A, Zohary E (2005). V1 activation in congenitally blind humans is associated with episodic retrieval. *Cereb Cortex* 15:1459–68.
- Renier L, Anurova I, De Volder AG, Carlson S, VanMeter J, Rauschecker JP (2010). Preserved functional specialization for spatial processing in the middle occipital gyrus of the early blind. *Neuron* 68(1): 138–48.
- Renier L, De Volder AG, Rauschecker JP (2014). Cortical plasticity and preserved function in early blindness. *Neurosci Biobehav Rev* 41:53–63.
- Ribot T (1882). *Diseases of the Memory: An Essay in the Positive Psychology*. D. Appleton.
- Roberson ED, Sweatt JD (1999). A biochemical blueprint for long-term memory. *Learn Mem* 6(4): 381–88.
- Rosenzweig MR, Bennett EL (1996). Psychobiology of plasticity: Effects of training and experience on brain and behavior. *Behav Brain Res* 78:57–65.

- Royer S, Pare D (2003). Conservation of total synaptic weight through balanced synaptic depression and potentiation. *Nature* 422(6931): 518–22.
- Sachdev RNS, Lu SM, Wiley RG, Ebner FF (1998). Role of the basal forebrain cholinergic projection in somatosensory cortical plasticity. *J Neurophysiol* 79:3216–28.
- Sadato N, Pascual-Leone A, Grafman J, Deiber MP, Ibanez V, Hallett M (1998). Neural networks for Braille reading by the blind. *Brain* 121:1213–29.
- Sampaio E, Maris S, Bach-y-Rita P (2001). Brain plasticity: “Visual” acuity of blind persons via the tongue. *Brain Res* 908(2): 204–7.
- Sathian K, Stilla R (2010). Cross-modal plasticity of tactile perception in blindness. *Restor Neurol Neurosci* 28(2): 271–81.
- Schulz LE, Gopnik A (2004). Causal learning across domains. *Dev Psychol* 40:162–76.
- Schweighofer N, Arbib MA (1998). A model of cerebellar metaplasticity. *Learn Mem* 4(5): 421–28.
- Sharma J, Angelucci A, Sur M (2000). Induction of visual orientation modules in auditory cortex. *Nature* 404:841–47.
- Simon M (2019). How I became a robot in London—from 5,000 miles away. *Wired*.
- Singh AK, Phillips F, Merabet LB, Sinha P (2018). Why does the cortex reorganize after sensory loss? *Trends Cogn Sci* 22(7): 569–82.
- Smirnakis SM, Brewer AA, Schmid MC, Tolias AS, Schüz A, Augath M, Inhoffen W, Wandell BA, Logothetis NK (2005). Lack of long-term cortical reorganization after macaque retinal lesions. *Nature* 435(7040): 300–307.
- Southwell DG, Froemke RC, Alvarez-Buylla A, Stryker MP, Gandhi SP (2010). Cortical plasticity induced by inhibitory neuron transplantation. *Science* 327(5969): 1145–48.
- Spedding M, Gressens P (2008). Neurotrophins and cytokines in neuronal plasticity. *Novartis Found Symp* 289:222–33; discussion 233–40.
- Steele CJ, Zatorre RJ (2018). Practice makes plasticity. *Nat Neurosci* 21(12): 1645.
- Stetson C, Cui X, Montague PR, Eagleman DM (2006). Motor-sensory recalibration leads to an illusory reversal of action and sensation. *Neuron* 51(5): 651–59.
- Tapu R, Mocanu B, Zaharia T (2018). Wearable assistive devices for visually impaired: A state of the art survey. *Pattern Recognit Lett*.
- Thaler L, Goodale MA (2016). Echolocation in humans: An overview. *Wiley Interdiscip Rev Cogn Sci* 7(6): 382–93.
- Thiel CM, Friston KJ, Dolan RJ (2002). Cholinergic modulation of experience-dependent plasticity in human auditory cortex. *Neuron* 35:567–74.
- Tulving E, Hayman CAG, Macdonald CA (1991). Long-lasting perceptual priming and semantic learning in amnesia: A case experiment. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn* 17:595–617.
- Udin SH (1977). Rearrangements of the retinotectal projection in *Rana pipiens* after unilateral caudal half-tectum ablation. *J Comp Neurol* 173:561–82.
- Velliste M, Perel S, Spalding MC, Whitford AS, Schwartz AB (2008). Cortical control of a prosthetic arm for self-feeding. *Nature* 453:1098–101.
- von Melchner L, Pallas SL, Sur M (2000). Visual behaviour mediated by retinal projections directed to the auditory pathway. *Nature* 404:871–76.
- Voss P, Gougoux F, Lassonde M, Zatorre RJ, Lepore F (2006). A positron emission tomography study during auditory localization by late-onset blind individuals. *Neuroreport* 17(4): 383–88.
- Voss P, Gougoux F, Zatorre RJ, Lassonde M, Lepore F (2008). Differential occipital responses in early- and late-blind individuals during a sound-source discrimination task. *Neuroimage* 40(2): 746–58.
- Weaver IC et al. (2004). Epigenetic programming by maternal behavior. *Nat Neurosci* 7(8): 847–54.
- Weiss T, Miltner WH, Liepert J, Meissner W, Taub E (2004). Rapid functional plasticity in the primary somatomotor cortex and perceptual changes after nerve block. *Eur J Neurosci* 20:3413–23.
- Whitlock JR, Heynen AJ, Shuler MG, Bear MF (2006). Learning induces long-term potentiation in the hippocampus. *Science* 313(5790): 1093–97.
- Wiesel TN, Hubel DH (1963). Single-cell responses in striate cortex of kittens deprived of vision in one eye. *J Neurophysiol* 26:1003–17.
- Witthoft N, Winawer J, Eagleman DM (2015). Prevalence of learned grapheme-color pairings in a large online sample of synesthetes. *PLoS One* 10(3).
- Won AS, Bailenson JN, Lanier J (2015). Homuncular flexibility: The human ability to inhabit nonhuman avatars. In *Emerging Trends in the Social and Behavioral Sciences*, edited by R Scott and M Buchmann, 1–6. John Wiley & Sons.
- Yamahachi H, Marik SA, McManus JN, Denk W, Gilbert CD (2009). Rapid axonal sprouting and pruning accompany functional reorganization in primary visual cortex. *Neuron* 64(5): 719–29.
- Yang TT, Gallen CC, Ramachandran VS, Cobb S, Schwartz BJ, Bloom FE (1994). Noninvasive detection of cerebral plasticity in adult human somatosensory cortex. *Neuroreport* 5:701–4.
- Zola-Morgan SM, Squire LR (1990). The primate hippocampal formation: Evidence for a time-limited role in memory storage. *Science* 250(4978): 288–90.