پژوهشگری که راه جدیدی برای درک ارتباطات ابداع کرد*

استفان اورنز
مترجم: فرشید عبدالهی**

چکیده

مارک براورمن، دانشمند رایانه در دانشگاه پرینستون و متخصص در پیچیدگی اطلاعات، برندهٔ مدال چرتکهٔ اتحادیهٔ بین‌المللی، زمان زیادی را صرف تبدیل مسائل بسیار دشوار به زبان پیچیدگی اطلاعات کرده است. در این نوشتار شرح حال مختصری از او آورده شده است.

مارک براورمن، برندهٔ مدال چرتکهٔ اتحادیهٔ بین‌المللی ریاضی در سال ۲۰۲۲

مارک براورمن[1] تا ۱۷ سالگی در سه کشور زندگی کرد و به همین تعداد زبان صحبت می‌کرد. اگرچه او اقامتگاه اصلی ندارد، اما بی‌درنگ علوم کامپیوتر نظری را خانهٔ خود می‌خواند. او در دفتر دل‌باز خود در دانشگاه پرینستون، درحالی‌که بین تختهٔ سفیدی پر از معادلات ریاضی و دیواری تزئین‌شده با عکس‌های خانوادگی نشسته بود، گفت: «علم نظری رایانه هر چیزی است که می‌خواهید باشد». برای بیش از یک دهه، براورمنِ ۳۸ ساله، در حال توسعهٔ یک نظریهٔ متحول‌کننده جدید از ارتباطات تعاملی است، و کار پیشگامی را که کلود شانون هشت دههٔ پیش آغاز کرده بود، گسترش داده و بهبود می‌بخشد. چهارچوب روبه‌رشد براورمن به پژوهشگران اجازه می‌دهد تا مفاهیم انتزاعی مانند «اطلاعات» و «دانش» را به اصطلاحات دقیق ریاضی ترجمه کنند. در نتیجه، آن‌ها می‌توانند مسائل سخت را به‌صورت عبارات دقیق‌تر بازنویسی کنند. این برنامه به بینش‌های جدیدی در مورد محدودیت‌های محاسبات منجر شده است و به‌طور مستقیم با نحوهٔ تعامل برخط افراد صحبت می‌کند. برای این دستاورد و سایر دستاوردها، اتحادیهٔ بین‌المللی ریاضی، مدال چرتکهٔ[2] خود را به براورمن اعطا کرده است، که به‌عنوان بالاترین افتخاری که یک دانشمند رایانه می‌تواند دریافت کند، تلقی می‌شود (این جایزه، پیش از این به‌عنوان جایزهٔ نوانلینا شناخته می‌شد، اما پس از اشارهٔ مورخان به اینکه محقق فنلاندی که به اسم او نام‌گذاری شده بود، هوادار نازی‌ها بوده است، نام آن تغییر یافت). مدال چرتکه، تنها هر چهار سال یک‌بار اهدا می‌شود و سن برندهٔ این جایزه باید زیر ۴۰ سال باشد. در لوح تقدیر جایزه IMU آمده است که نقش براورمن در پیچیدگی اطلاعات منجر به درک عمیق‌تر از معیارهای مختلف هزینهٔ اطلاعات، زمانی که دو طرف با یک‌دیگر ارتباط برقرار می‌کنند، شده است. کار او، راه را برای استراتژی‌های کدگذاری جدید که کمتر در برابر خطاهای انتقال آسیب‌پذیر هستند و رویکردهای جدید برای فشرده‌سازی داده‌ها در حین انتقال و دست‌کاری‌ها هموار کرده است.

براورمن که در ژانویه از این جایزه مطلع شد، گفت: «بدیهی است که داشتن چنین شناختی عالی است و ممکن است آغاز چیزهای جدید را آسان‌تر کند». اما او همچنین به‌سرعت این ایده که او یک نابغه منفرد است را رد کرد. او گفت: «افراد بااستعداد زیادی وجود دارند» و افزود که «این حوزهٔ کوچک، اما پر از متفکران بااستعداد و همکاری‌های سازنده است». همکارِ براورمن در پرینستون، ریاضی‌دان آساف نائور[3]، براورمن را یک حل‌کننده مسئلهٔ «بی باک» می‌نامد. نائور گفت: «او بسیار کنجکاو، روشن‌فکر و ماجراجو است. وقتی یک چکش بزرگ در دست دارید، همه چیز شبیه یک میخ است. مارک، نظریهٔ علوم کامپیوتر را توسعه داده و می‌داند این یک چکش بسیار بزرگ است».

یک معجزهٔ ریاضی

براورمن، پسر یک مادرِ ریاضی‌دان و یک پدرِ فیزیک‌دان در سال ۱۹۸۴ در پرم[4] روسیه، یک شهر صنعتی در نزدیکی دامنه‌های غربی کوه‌های اورال، به‌دنیا آمد. در سال ۱۹۹۲ زمانی که او ۸ ساله بود، به‌دنبال فروپاشی اتحاد جماهیر شوروی و بی‌ثباتی ناشی از آن، خانوادهٔ جوان به حیفای اسرائیل نقل مکان کردند. درحالی‌که او همیشه به ریاضیات و برنامه‌نویسی کامپیوتر علاقه داشت، براورمن گفت والدینش هرگز اصرار نکردند. او گفت: «آن‌ها من را به نقطه‌ای رساندند که با ریاضی راحت باشم». او همچنین استعداد اولیه خود را برای این مباحث نشان داد و دو مدال برنز و یک طلا در المپیاد بین‌المللی ریاضی در سال‌های ۱۹۹۸، ۱۹۹۹ و ۲۰۰۰ به‌دست آورد.

[1] Mark Braverman [2] Abacus Medal [3] Assaf Naor [4] Perm [5] Technion

در تکنیون[5] حیفا، او در بهار ۲۰۰۱ در ریاضیات و علوم کامپیوتر دو مدرک گرفت. بعداً در همان سال خانوادهٔ او به کانادا نقل‌مکان کردند، جایی که مادرش یک موقعیت هیئت‌علمی در کلگری[6] دریافت کرده بود. در آن زمستان، او تحصیلات تکمیلی خود را در رشتهٔ علوم کامپیوتر در دانشگاه تورنتو آغاز کرد. او هنوز فقط ۱۷ سال داشت.

مکان ترجیحی براورمن برای فکرکردن، مبل دفترش است.

او گفت: «در هر سنی که هستید، حرکت کردن سخت است». بااین‌حال، سفرهای او جهان‌بینی بزرگ‌تری را به‌همراه داشته است. براورمن گفت: «شما خانه ندارید، اما می‌دانید که فرهنگ‌های متعددی وجود دارد و شما می‌توانید به مردمِ یک فرهنگ در مورد مفاهیم اساسی فرهنگ دیگر بگویید. او فقط در مورد جغرافیا صحبت نمی‌کند: او گفت «علوم رایانهٔ نظری مکان مناسبی برای ایده‌هایی از حوزه‌های فکری متفاوت برای یافتن یک زبان مشترک است». جوایزی که او به‌دست آورده است، ازجمله جایزهٔ پرزبرگر[7] از انجمن اروپایی علوم رایانهٔ نظری و جایزهٔ واترمن[8] از بنیاد ملی علوم، اغلب به کاربرد گستردهٔ کار او در زمینه‌های دیگر اشاره می‌کند. کار دورهٔ کارشناسی او نمونه کاملی است. در اوایل دوران حضورش در تورنتو، براورمن در مورد مجموعه‌های جولیا کنجکاو شد، مجموعه‌ای از نقاط که شکل‌های فراکتالی خیره‌کننده و پیچیده را تولید می‌کنند، به‌این‌معنی که وقتی بزرگ‌نمایی می‌کنید، همان الگوها ظاهر می‌شوند. برای پیدا کردن مجموعهٔ جولیا از یک تابع چندجمله‌ای معین، کافی است یک نقطه را برای یافتن یک مقدار خروجی وارد کنید و سپس آن مقدار خروجی را به تابع وصل کنید. اجرای مکرر این فرایند، با استفاده از خروجی‌ها به‌عنوان ورودی، می‌تواند نشان دهد که چگونه نقطه، طی تکرارها تکامل می‌یابد. برخی از نقاطِ شروع به دنباله‌های تکراری اعداد منجر می‌شوند، اما برخی دیگر فقط بزرگ‌تر می‌شوند. اینها به بی‌نهایت فرار می‌کنند. مرز بین نقاطی که به‌طور منطقی نزدیک به جایی که شروع شده‌اند و نقاطی که به بی‌نهایت می‌روند، اشکال پیچیده ایجاد می‌کند. این اشکال، مجموعهٔ جولیای تابع هستند. آن‌ها به‌شدت در زمینهٔ ریاضیِ سیستم‌های دینامیکی، که بر چگونگی تکامل سیستم‌ها در طول زمان تمرکز می‌کنند، نقش دارند. کار براورمن فقط در زمینهٔ سیستم‌های دینامیکی نبود. او یک نوجوان دانشجوی کارشناسی ارشد در علوم کامپیوتر بود. مجموعه‌های جولیا معمولاً بخشی از برنامهٔ درسی نیستند. بااین‌حال، مشاور او استفان کوک[9] و ریاضی‌دان دانشگاه تورنتو، مایکل یامپولسکی[10]، براورمن را به کارهای قبلی هدایت کردند که مجموعه‌های جولیا را از دید علم رایانه نگاه می‌کرد. آن تحقیق، فراکتال‌ها را از نظر پیچیدگی توصیف کرد، چهارچوبی که (در میان چیزهای دیگر) به‌دنبال قوانین اساسی است که مسائل سخت را که می‌توانند در مدت زمان معقول حل شوند از مسائل فوق‌العاده سختی که فقط می‌توان آنها را تقریب کرد، جدا می‌کند. در مجموعه‌های جولیا، براورمن با ترسیم مشابهی مواجه شد: چه قوانین و توابعی نقاطی را که نزدیک می‌مانند از نقاطی که به بی‌نهایت فرار می‌کنند، جدا می‌کند؟ این، روشی کامل برای نگاه کردن به مسئله بود. یامپولسکی گفت: «او از نظر تحصیلی جوان بود، اما نسبت به همسالانش کمی جوان‌تر بود. کار کردن با فردی بسیار جوان و فوق‌العاده، سرگرم‌کننده بود. او این بلوغ فکری را داشت و بیشتر شبیه همسالان بود.»

براورمن تحقیقات خود را در مورد فراکتال‌ها با فکر کردن در مورد مکانیزم‌های اساسی آغاز کرد: از دیدگاه محاسباتی چه چیزی یک مجموعهٔ جولیا را خاص می‌کند؟ بخش اعظم این کار توسط ریاضی‌دان آمریکایی جان میلنور[11]، که اکنون در دانشگاه استونی بروک است، انجام شده بود. براورمن، با هدایت کوک و کار با یامپولسکی، استراتژی‌های میلنور را مطالعه کرد و شروع به تمرکز بر مجموعه‌هایی کرد که محاسبهٔ آن‌ها فوق‌العاده دشوار بود، مانند توابع پیچیده‌ای که نیاز به تکرارهای زیادی داشتند تا آشکار شود که آیا نزدیک می‌مانند یا به بی‌نهایت فرار می‌کنند. به‌همراه کوک، براورمن مدل‌های قبلی را بررسی کرد که قوانینی را ارائه می‌کردند که چه زمانی می‌توان محاسبه کرد و چه زمانی نمی‌توان. با گذشت زمان، محققان متعجب شدند: آیا برخی از توابع می‌توانند آن‌قدر پیچیده باشند که محاسبهٔ مجموعهٔ جولیای آن‌ها ناممکن باشد؟ اینجاست که ارزشمند بودن دیدگاه علم کامپیوتر ثابت می‌شود. این نوع سؤال، آیا مسائلی وجود دارد که نمی‌توانیم حل کنیم و آیا می‌توانیم آن را ثابت کنیم؟ نمونه‌ای از علم کامپیوتر نظری است. در سیستم‌های دینامیکی، رشته‌ای که توسط شبیه‌سازی‌های عددی پیش می‌رود، که با بدعت هم‌مرز است. یامپولسکی گفت: «شهود این بود که

[6]Calgary [7]Presburger Award [8]Waterman Award [9]Stephen Cook [10] Michael Yampolsky [11] John Milnor

محاسبهٔ آن‌ها ممکن است سخت باشد، اما همهٔ آن‌ها ممکن است. شاید برای دیدن تصویر فقط باید مدت زیادی منتظر بمانید، اما هیچ مانع عملی وجود نداشت».

راورمن در سن ۱۷ سالگی در سه کشور زندگی می‌کرد و به سه زبان صحبت می‌کرد.

براورمن و یامپولسکی به‌کمک میلنور رفتند، کسی که از این رویکرد علم رایانه به سیستم‌های دینامیکی هیجان‌زده بود و این را اعلام کرده بود. برای سال‌ها، گروه، این سؤال عجیب را مطرح می‌کردند و به‌دنبال راه‌هایی برای نشان دادن این بودند که برخی از مجموعه‌های جولیا پیدا نمی‌شوند، چیزی ذاتاً دشوار برای اثبات. اما در سال ۲۰۰۵، با الهام از یافته‌های یک گروه فرانسوی، براورمن و یامپولسکی راهی به جلو پیدا کردند که شهود محققان را در هم شکست. آن‌ها دریافتند که برای برخی از توابع، محاسبهٔ مجموعه‌های جولیا نه‌تنها دشوار است، بلکه ناممکن است. یامپولسکی گفت: «این یکی از آن معجزات ریاضی و کمی شوکه کننده بود. جامعهٔ سیستم‌های پویا در ابتدا در برابر این ایده مقاومت کردند، اما می‌دانید گاهی اوقات ایده‌های ریاضی زمان خود را دارند». اولین مقالهٔ آن‌ها قوانین روشنی را برای مجموعه‌های جولیای قابل‌محاسبه ارائه کرد و الگوریتمی برای یافتن توابعی که مجموعه‌ها را نمی‌توان برای آن‌ها محاسبه کرد، ارائه کرد. این یافته منجر به سیل نتایج شد. به گفته یامپولسکی، یکی از شوکه‌کننده‌ترین آن‌ها دلیلی بر این بود که راه آن‌ها برای یافتن مجموعه‌های غیرقابل محاسبهٔ جولیا در واقع تنها راه برای انجام آن بود. این تحقیق، ابتدا پایهٔ پایان‌نامه کارشناسی ارشد براورمن و سپس کار دکترای او در تورنتو را تشکیل داد. پایان‌نامه او با کوک، مدل محاسباتی مورد استفاده برای بررسی مجموعه‌های جولیا را توصیف کرد و در نهایت او و یامپولسکی کتابی در این زمینه نوشتند که در سال ۲۰۰۹ منتشر شد. براورمن گفت «زمانی که کار را شروع کرد، این مبحث به‌نوعی از مُد افتاده بود، اما این موضوع او را آزار نمی‌داد.» او ادامه داد: «در علوم کامپیوتر این حوزهٔ طلایی از ایده‌ها وجود دارد. اگر خیلی آسان باشد، پر از نتایج می‌شود. اگر خیلی سخت باشد، آن‌قدر کم می‌شود که مردم علاقه خود را از دست می‌دهند و شما نمی‌توانید یک جامعه را حفظ کنید».

فلسفهٔ خوش‌بینی ریاضی

در دوران تحصیلات تکمیلی، براورمن ارتباط مهم دیگری برقرار کرد، این بار با یک دانش‌آموخته به نام آنا، یک روان‌شناس آینده و همسر آینده‌اش. او نیز در روسیه متولد شد و اتفاقاً یک سال بعد از براورمن در همان مدرسه ابتدایی در حیفا بود. براورمن گفت: «ما در واقع هرگز بیش از یک کلمه با یک‌دیگر صحبت نکردیم». اما هر دو خانواده در نهایت به کانادا مهاجرت کردند، جایی که مارک و آنا دوباره ملاقات کردند، این بار با کلمات بیشتر و در سال ۲۰۰۷ ازدواج کردند. پس از دورهٔ دکتری، براورمن زمان بیشتری را صرف سفر و برقراری ارتباط کرد. او ابتدا یک ماه را در مؤسسه مطالعات پیشرفته در پرینستون گذراند، جایی که با دانشمند رایانهٔ نظری، آنوپ رائو[۱۲]، کسی که سال‌ها به‌طور پیوسته با او کار کرد، ملاقات کرد. پس از آن، او دو سال را به‌عنوان محقق فوق‌دکتری در مرکز تحقیقات ماکروسافت نیوانگلند[۱۳] در کمبریج، ماساچوست گذراند. پس از مایکروسافت، براورمن به کانادا بازگشت و یک سال را با عنوان هیئت علمی در دانشگاه تورنتو گذراند. در جستجوی مسائل طلایی، او روی پروژه‌های مختلفی کار کرد، از داده‌کاوی مراقبت‌های بهداشتی گرفته تا مسائل ریاضی تصادفی حل نشده. نائور، ریاضی‌دان پرینستون، گفت «براورمن دوست داشت خود را درگیر مسائل سخت کند.» ناور ادامه داد: «فرض کنید یک تخته‌سنگ در مقابل شما وجود دارد، و مردم برای مدت طولانی تلاش می‌کنند که این تخته سنگ را دور بزنند. سپس یک نفر می‌آید و برنامه‌ای برای دور زدن آن طراحی می‌کند. اگر کار نکرد، فرد، طرح دیگری و سپس طرح دیگری پیدا می‌کند». ناور استدلال می‌کند که این روحیه، نوعی خوش‌بینی عمیق را نشان می‌دهد. او گفت: «اگر خوش‌بینی نداشته باشید، هرگز آن سنگ را دور نمی‌زنید و مارک آن خوش‌بینی را دارد.»

او در سال ۲۰۱۱ به دانشکدهٔ پرینستون پیوست و آنا نیز به‌عنوان روانشناس بالینی به دانشگاه پیوست و این زوج، خانه‌ای در نزدیکی ساختمان علوم کامپیوتر خریدند. در این مرحله، بیش از هرجای دیگری در این خانه زندگی کرد. آنها دو فرزند دارند، یکی در سال ۲۰۱۶ و دیگری در سال ۲۰۱۸ متولد شد.

[12] Anup Rao [13] Microsoft Research New England

براومن از سال ۲۰۱۱ در پرینستون بوده است، بیش از مدتی که در هرجای دیگری زندگی کرده است.

پس از اقامت در نیوجرسی، براورمن شروع به کار در زمینهٔ پیچیدگی اطلاعات کرد، حوزه‌ای که رائو در سال ۲۰۰۸ به او معرفی کرد. پیچیدگی اطلاعات از رشتهٔ بزرگ‌تر نظریهٔ اطلاعات منشعب شده است، که با کار نوآورانهٔ کلود شانون در سال ۱۹۴۸ آغاز شد، که در آن چهارچوب ریاضی برای ارسال پیام از یک نفر به دیگری از طریق یک کانال را تعیین کرد. آن مقاله به دنبال کمّی‌کردن اطلاعات بود و جهان را با مفهوم «بیت» به عنوان واحد اصلی و ذخیره شدهٔ آن آشنا کرد. شانون نوشت، چالش اساسی انتقال داده‌ها از نقطه‌ای به نقطه دیگر با صحت دقیق یا تقریباً دقیق بود. اگر داده‌ها حاوی چیزی «ساده»، مانند جریانی از ارقام تصادفی و کانال بدون خش باشند، به‌اندازهٔ کافی آسان است. اما اگر این داده‌ها دارای روابط آماری پیچیده باشند (مانند صدها هزار کلمه در زبان انگلیسی) یا اگر کانال پر از خش باشد، این کار به سرعت دشوار می‌شود. شانون با به‌کارگیری ابزارهای مکانیک آماری، ایدهٔ فشرده‌سازی داده‌ها را رسمیت بخشید و ایدهٔ «آنتروپی» را به‌عنوان کمیتی مرتبط با مقدار اطلاعات در یک پیام تطبیق داد. براورمن گفت که بینش کلیدی او جدا کردن آنتروپی خود پیام از ظرفیت کانال ـ سرعت ارسال اطلاعات ـ بود. در این شرایط، تا زمانی که آنتروپی پیام از ظرفیت کانالِ ارتباطی تجاوز نکند، می‌توان یک کار ارتباطاتی را اجرا کرد. این ایده طبیعتاً سؤال دیگری را مطرح می‌کند: کمترین مقدار آنتروپی مورد نیاز برای ارسال پیام از طریق یک کانال چه‌قدر است؟ عمری واینستاین[۱۴]، دانشمند رایانهٔ نظری در دانشگاه عبری[۱۵] اورشلیم و یکی از اولین دانشجویان دکترای براورمن در پرینستون، گفت: «شانون نشان داد که اگر مکالمه یک‌طرفه باشد، جایی که فقط یک‌طرف صحبت می‌کند، با کمترین مقدار آنتروپی ممکن می‌توانید داده‌ها را به‌طور بهینه فشرده کنید.» شانون به خطوط تلفن پرازخش فکر می‌کرد. براورمن بر گسترش کار شانون فراتر از انتقال یک‌طرفه تمرکز کرد. به‌طورخاص، او می‌خواست نه‌تنها به نحوه ارسال داده‌ها، بلکه در مورد نحوه اشتراک‌گذاری و دستکاری آن‌ها، مانند یک الگوریتم، فکر کند. او می‌توانست راه‌هایی را ببیند که ایده‌های شانون می‌توانست در زمینه پیچیدگی ارتباطات اعمال شود، که می‌پرسد: هزینه محاسبه ارتباطات چه‌قدر است؟ این سؤال به‌طور دقیق‌تری اتفاقی که میلیاردها بار در روز در اینترنت اتفاق می‌افتد، را نشان می‌دهد: دو طرف، مثلاً خریدار و فروشنده، با یک‌دیگر ارتباط برقرار می‌کنند تا معامله‌ای را انجام دهند. آن‌ها فقط به نتیجه اهمیت می‌دهند، به دانستن اینکه چه‌قدر پول پرداخت شده و به چه کسی، نه به چگونگی انجام گرفتن آن. رسیدن به آن هدف می‌تواند به پیام‌های تکراری و پشت‌سرهم نیاز داشته باشد.

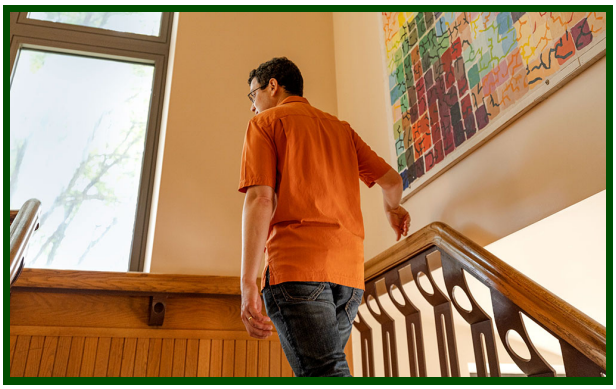
براورمن دید که فرمول‌بندی نظریهٔ اطلاعات را می‌توان با این سناریو تطبیق داد، اما این امر پیچیده خواهد بود. چه ریاضیاتی زیربنای این ارتباط است؟ در ابتدا، این چالش، مجموعه‌ای از مسائل گسسته و در دسترس را پیشنهاد می‌کرد که بی‌شباهت به موقعیت‌های یک‌طرفه‌ای که شانون در ابتدا بررسی کرد، نبود. براورمن گفت: «در ابتدا انگیزهٔ من حل برخی از مسائل بود، اما من بیشتر از ساختن نظریه‌ها لذت می‌برم، بنابراین معلوم شد که باید نظریه‌ای ساخته شود». ساختن یک نظریه به‌معنای حل مسائل، ابداع شواهد، یافتن ارتباط با حوزه‌های دیگر و جذب دانشجویان تحصیلات تکمیلی برای کمک بود. او گفت: «بخش خوبی از ۱۰ سال بعدی را صرف کار روی آن کردم».

یافتن پاسخ

بزرگ‌ترین سهم براورمن ساخت چهارچوبی گسترده بود که قوانین کلی و بزرگی را که مرزهای ارتباطات تعاملی را توصیف می‌کرد، بیان می‌کرد. قوانینی که راه‌کارهای جدیدی را برای فشرده‌سازی و ایمن‌سازی داده‌ها در هنگام ارسال برخط توسط الگوریتم‌ها را پیشنهاد می‌کنند. محققان قبلی بررسی کرده بودند که چگونه دو نفر ممکن است اطلاعات را ارسال یا دریافت کنند، به‌ویژه در موقعیت‌های ساده که ممکن است یک نفر چیزی نداند، یا اگر همپوشی اطلاعاتی نداشته باشند. در دهۀ ۱۹۷۰، دانشمندان کامپیوتر سناریوهایی را در مورد اینکه اگر این دو نفر در ابتدا همپوشی اطلاعات داشته باشند چه اتفاقی می‌افتد، مطالعه و حل کردند. اما براورمن و همکارانش اولین کسانی بودند که نشان دادند این مبادلات به جای وظایف انتقال داده، کاری محاسباتی هستند. به‌عنوان مثال: تصور کنید دو نفر هرکدام فهرستی از حیوانات و یک پروتکل ارسال و دریافت پیام دارند. آن‌ها می‌خواهند تعیین کنند که، در صورت وجود، کدام حیوانات مشترکاتی

[14] Omri Weinstein [15] Hebrew University

دارند و چه‌قدر تلاش می‌شود تا آن را کشف کنند. در این شرایط، هر فرد اطلاعاتی برای شروع دارد (می‌داند که در مورد حیوانات صحبت می‌کند)، و هر پیامی به آن اطلاعات اضافه می‌کند. این افزایش در اطلاعات به هزینهٔ ارتباطات در بیت‌های مرتبط است و مقاله‌ای توسط براورمن و رائو [۱۶] در سال ۲۰۱۱ این ارتباط را محکم‌تر از قبل کرد.



براورمن از طریق کار خود، دقت ریاضی را به نحوه درک ما از ارتباطات بین چندین طرف، مانند تجارت آنلاین، آورده است.

این اثبات آن‌ها را به بینش‌های دیگری در مورد ارتباطات، از جمله نسخه‌ای از سؤالی به نام مسئلهٔ مجموع مستقیم، هدایت کرد، که به موضوع هزینه می‌پردازد: آیا هزینهٔ ارتباطی حل چندین نسخه از یک مسئلهٔ مشابه با هزینهٔ حل یک‌دفعهٔ آن ضرب در تعداد تکرار، یکی است؟ یا «تخفیف حجمی» وجود دارد؟ در مورد انتقال داده، مجموع مستقیم برقرار است. اما براورمن و رائو نشان دادند که برای موقعیت‌های تعاملی، مسئله، معادل یک سؤال به‌ظاهر نامرتبط است که به‌عنوان مسئلهٔ «فشرده‌سازی تعاملی» شناخته می‌شود. پرسش این است که اگر دو نفر میلیون‌ها پیام متنی را مبادله کنند، اما فقط ۱۰۰۰ بیت اطلاعات را دریافت کنند، آیا می‌توان تبادل را با یک ذخیره‌سازی فشردهٔ ۱۰۰۰ بیتی عوض کرد؟ با استفاده از کار براورمن و رائو، محققان نشان داده‌اند که پاسخ یک نه قطعی است. این ارتباط بین نظریهٔ اطلاعات و پیچیدگی محاسباتی، براورمن را برانگیخت تا به‌دنبال راه‌های جدیدی برای بهینه‌سازی فشرده‌سازی داده‌ها در زمانی که بین دو یا چندنفر به‌اشتراک گذاشته می‌شود باشد، چیزی که اصل ارتباطات آنلاین است. بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰، براورمن و همکارانش قوانین ریاضی را برای فشرده‌سازی اطلاعات به‌اشتراک گذاشته شده بین دو یا چند طرف را توصیف کردند. این کار سؤالات دیگری را ایجاد کرد. برای مثال، با همکاران و شاگردانش، بررسی کردند که نوع مکالمه چگونه هزینه‌های ارتباط را افزایش می‌دهد. براورمن فقط این سؤالات را باز نکرد؛ او دیدگاه جدیدی را معرفی کرد که به محققان اجازه داد ابتدا آن‌ها را بیان کنند و سپس آن‌ها را به زبان رسمی ریاضی برگردانند. نظریهٔ براورمن زمینه را برای بررسی این سؤالات و شناسایی پروتکل‌های ارتباطی جدیدی که ممکن است در فناوری‌های آینده نمایان شوند، ایجاد کرد.

آوی ویگدرسون [۱۷] دانشمند رایانهٔ نظری در مؤسسه مطالعات پیشرفته [۱۸] که در سال ۱۹۹۴ برندهٔ جایزهٔ نوانلینا شد، گفت: «این یک نظریه بسیار قدرتمند است و یک بسط زیبا، غنی و پیچیده از کار شانون است». درحالی‌که براورمن همچنان به پیشبرد این نظریه ادامه می‌دهد، همان‌گونه‌که دانشجویان سابق و فوق‌دکترای او آن را به جلو می‌برند، بخش عمده‌ای از کار او انجام شده است. اکنون، علایق او بیشتر بر حوزهٔ جدیدی به نام طراحی مکانیزم متمرکز شده است که از رویکردهای ریاضی اقتصاد و نظریهٔ بازی استفاده می‌کند. او همچنین اخیراً با نائور [۱۹] در چالش‌های دیرینهٔ ساخت چیزی به نام توسیع توابع لیپشیتس [۲۰]، مسئله‌ای در تجزیه و تحلیل کلاسیک و هندسه، پیشرفت کرده است. نائور گفت: «او قطعاً بینش‌هایی را از علوم رایانه به‌ارمغان می‌آورد که با روشی که من پرورش یافته‌ام بسیار متفاوت است. او دیدگاهی دارد که با طرز فکر من متفاوت است. اما این یک شهود و یک دیدگاه است. او فلسفه‌ای دارد که خودش توسعه داده است، چشم اندازی که او به ارمغان می آورد.».

کسب مدال چرتکه هیچ‌کدام از اینها را تغییر نمی‌دهد. در هرصورت، کنجکاوی ریاضی براورمن در طول سال‌ها عمیق‌تر شده است و هدف اصلی رسالهٔ او را تقویت می‌کند: مقابله با مسائل دشوار در واقع یافتن زبان مناسب برای بررسی آن‌ها است. این در رشته‌های دیگر درست نیست: شما نمی‌توانید فقط به آلفا قنطورس [۲۱] برخورد کنید، یا به‌طور تصادفی واکسن کُوید ۱۹ را کشف کنید. پیشرفت‌های بزرگ معمولاً نیازمند فناوری و سال‌ها پیشرفت تدریجی هستند. اما در ریاضیات و علوم رایانه، راه‌حل‌های بزرگ می‌توانند در این نزدیکی باشند و در زبانی ناشناخته پنهان شوند. او گفت: «شما اساساً می‌توانید احساس کنید که چیزی نمی‌دانید، درحالی‌که فقط پنج دقیقه به حل مسئله توسط شما زمان مانده باشد»، و این چیزی است که او می‌خواهد به دانشجویان و وارثان ریاضی خود منتقل کند. او گفت «جایزهٔ بزرگی مانند چرتکه یک مسئولیت است. این شما را سفیر می‌کند و این را به دانشجویان نشان می‌دهد که این ایده‌ها کاملاً دیوانه‌کننده نیستند».

*Stephen Ornes, The scientist who developed a new way to understand communication, *Quanta Magazine*, 2022.

**دانشگاه شیراز

[۲۱] نزدیک‌ترین ستاره به خورشید

[16] Rao [17] Avi Wigderson [18] the Institute for Advanced Study [19] Naor [20] Lipschitz