الگوریتم‌هایی برای زندگی

سرشناسه	:	کریستین، برایان. Christian, Brian
عنوان و نام پدیدآور	:	الگوریتم‌هایی برای زندگی / برایان کریستین و تام گریفیث. ترجمهٔ حسین حدادی‌نیا.
مشخصات نشر	:	تهران، نوین توسعه، ۱۴۰۱.
مشخصات ظاهری	:	۳۴۴ صفحه
شابک	:	۹۷۸-۶۲۲-۵۲۱۳-۲۵-۸
فهرست‌نویسی	:	فیپا
یادداشت	:	عنوان اصلی: Algorithms to Live By, 2016
موضوع	:	حل مسئله با کمک الگوریتم‌ها
رده‌بندی کنگره	:	BF ۳۹
رده‌بندی دیویی	:	۱۵۳ / ۴۳
شماره کتاب‌شناسی ملی	:	۹۰۱۸۶۱۶

تمامی حقوق این اثر، از جمله حق انتشار تمام یا بخشی از آن، برای ناشر محفوظ است.

نشر نوین

الگوریتم‌هایی برای زندگی

کاربرد علوم کامپیوتر در تصمیم‌گیری‌های روزانه

برایان کریستین، تام گریفیث

ترجمهٔ حسین حدادی‌نیا

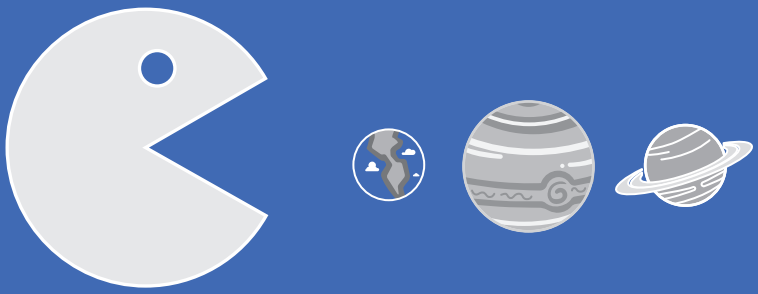
عنوان	:	الگوریتم‌هایی برای زندگی
مؤلف	:	برایان کریستین، تام گریفیث
مترجم	:	حسین حدادی‌نیا
صفحه‌آرا	:	صبا کریمی
زمان و نوبت چاپ	:	۱۴۰۱، اول، ۱۵۰۰ نسخه
ناشر	:	نشر نوین توسعه
شابک	:	۹۷۸-۶۲۲-۵۲۱۳-۲۵-۸
قیمت	:	۱۷۹,۰۰۰ تومان

تعهد ما به پایداری محیط‌زیست

کاغذ بالکی، کاغذی سبک، خوش‌رنگ و زیست محیطی است که در کشورهای باران‌خیزی همچون سوئد و فنلاند تولید می‌شود و مخصوص تولید کتاب است.

کتاب‌های نشر نوین نیز بر روی این کاغذها چاپ می‌شوند تا علاوه بر ساختن تجربهٔ خوب مطالعه برای خوانندگانمان، با هم، گامی برای حفظ محیط‌زیست برداریم.

nashrenovin.ir
nashrenovin.ir
nashrenovin



«نرم‌افزار دارد دنیا را می‌بلعد»

مارک اندریسن

با حمایت ♥ فینوتک

فهرست

مقدمه ۹

فصل ۱. توقف بهینه ۱۷

فصل ۲. کاوش و بهره‌برداری ۴۵

فصل ۳. رده‌بندی ۸۱

فصل ۴. میان‌گیری ۱۱۱

فصل ۵. برنامه‌ریزی ۱۳۹

فصل ۶. قانون بیز ۱۷۱

فصل ۷. بیش‌برازش ۱۹۹

فصل ۸. ساده‌سازی ۲۲۵

فصل ۹. تصادف ۲۴۳

فصل ۱۰. شبکه‌سازی ۲۷۳

فصل ۱۱. نظریهٔ بازی‌ها ۳۰۵

مقدمهٔ مترجم

گاهی وقت‌ها به شوخی و جدی از خود پرسیده‌ایم که این ریاضیاتی که خوانده‌ایم یا می‌خوانیم کجای زندگی به دردمان می‌خورد و چه زخمی را از ما مداوا می‌کند؛ از جذر و انتگرال دوگانه و آمار، تا مثلثات و احتمال.

ریاضی و الگوریتم برای ما همواره با قطعیت، پاسخ‌های نهایی که مو لای درزشان نمی‌رود، و البته دشواری در فهم و محاسبه همراه بوده است. اما در این کتاب، روی دیگری از سکهٔ ریاضیات را می‌بینیم. روی دیگری که اغلب به دنبال پاسخی قطعی، نهایی و یکتا نیست -که ممکن است توان رسیدن به چنین پاسخی را هم نداشته باشد- اما همیشه در جایی از زندگی روزمره گرهی را از مشکلاتمان باز می‌کند. از یافتن جای پارک، تا طراحی آزمایش‌های بالینی برای درمان‌ها و واکسن‌های جدید، نهایی کردن لیست مهمانان عروسی، چینش برنامه‌های لیگ برتر، برنامه‌ریزی کارهای روزانه، چیدن کمد لباس‌ها، یافتن راهکاری برای پاسخ به ایمیل‌ها و دایرکت‌های اینستاگرام و پیام‌های توییتر، پاسخی علمی به این سؤال که هیمنهٔ حکومت‌های غیردموکراتیکی مانند شوروی، و نمادهای آن مانند دیوار برلین کی فرو می‌ریزد و سیاست‌مداران فاسد کی می‌روند.

هنگام ویرایش و بازخوانی کتاب، از عزیزانی خواهش کردم با خواندن متن ترجمه، قسمت‌هایی را که فهم‌شان نیازمند دوباره‌خوانی است برایم مشخص کنند. از محبت خانم‌ها و آقایان سکینه ملازاده، محمد نخعی، ضحی سوری و نیکو جاویدپور بسیار ممنونم که نکته‌های ارزنده و دقت نظرشان به بهبود روایی و خوانایی ترجمه کمک بسیاری کرد. از لطف خواهر عزیزم سمیه حدادی‌نیا بسیار سپاس‌گزارم که در تمام طول ترجمه، دانش، کمک و نظراتش را از من دریغ نکرد. و در نهایت از دوست خوبم سعید قدوسی‌نژاد برای معرفی این کتاب ممنونم.

خدا را شاکرم از این‌که فرصت ترجمهٔ کتابی را داشتم که از خواندن هر صفحهٔ آن لذت می‌بردم. امیدوارم با این ترجمه، لذت خوانش کتاب را با شما هم به اشتراک بگذارم.

حسین حدادی‌نیا
پاییز ۱۴۰۱
تهران

مقدمه

الگوریتم‌هایی برای زندگی

فرض کنید در سان‌فرانسیسکو دنبال آپارتمانی می‌گردید. خیلی‌ها معتقدند پیدا کردن خانه در سان‌فرانسیسکو از هر شهر دیگری در آمریکا دشوارتر است. رونق شرکت‌های فناور و قوانین سخت‌گیرانهٔ آمایش شهری که ساخت‌وساز را محدود می‌کنند، باعث شده قیمت‌ها تنه به تنهٔ قیمت‌های نیویورک بزنند و گاهی حتی از نیویورک هم رقابتی‌تر باشند. آگهی‌های جدید ظرف چند دقیقه ایجاد و حذف می‌شوند، خانه‌های خالی به‌سرعت پر می‌شوند و معمولاً کلید نصیب کسی می‌شود که بتواند پیش از بقیه مالک را ببیند و چک رهن را در جیبش بچپاند.

قاعدتاً بررسی و تأمل باید ویژگی غالب رفتار عقلایی مشتری باشد، ولی چنین بازار بی‌رحمی فرصت چندانی برای آن باقی نمی‌گذارد. برخلاف کسانی مانند مشتریان پروپاقرص مراکز خرید یا مشتریان وب‌گرد که می‌توانند پیش از تصمیم‌گیری گزینه‌ها را مقایسه کنند، کسی که می‌خواهد در سان‌فرانسیسکو ساکن شود باید در لحظه بین دو گزینه تصمیم بگیرد: یا باید همین آپارتمان را بگیرید و بقیه را فراموش کنید، یا بروید و پشت سرتان را هم نگاه نکنید.

برای سادگی فرض کنیم فقط به دنبال بیشینه کردن احتمال پیدا کردن بهترین آپارتمانِ موجود هستید. هدف شما پرهیز از حسرت دوگانهٔ دوسر باخت بین «اونی که از دست رفت» و «اونی که هنوز ندیدیم» است. همان ابتدای ماجرا، یک دوراهی سر راه‌تان ظاهر می‌شود: وقتی مرجعی برای مقایسه ندارید، از کجا بفهمید آپارتمانی واقعاً بهترین است یا نه؟ از طرفی تا چند آپارتمان را نبینید (و از دست ندهید) چه‌طور

می‌توانید مرجعی برای مقایسه به دست آورید؟ هرچه بیشتر اطلاعات جمع کنید گزینهٔ مناسب را بهتر تشخیص می‌دهید، اما از طرفی احتمال رد کردن گزینهٔ مناسب در حین جمع‌آوری اطلاعات هم بیشتر می‌شود.

پس چه باید کرد؟ وقتی گشتن احتمالِ یافتن را کم می‌کند، چه‌طور می‌توان تصمیمی آگاهانه گرفت؟ تناقض بی‌رحمانه‌ای است.

بیشتر آدم‌ها در چنین موقعیت‌هایی به‌طور شهودی می‌گویند باید موازنه‌ای بین گشتن و گذشتن برقرار کرد؛ یعنی باید آن‌قدر آپارتمان دیده باشی تا استانداردی در ذهنت شکل بگیرد، سپس آپارتمانی را انتخاب کنی که آن استانداردها را برآورده کند. ایدهٔ برقراری تعادل کاملاً درست است. اما بیشتر آدم‌ها حرفی از جای این تعادل نمی‌زنند. خوش‌بختانه جواب این سؤال مشخص است:

سی و هفت درصد.

اگر به دنبال بهینه کردن شانس یافتن بهترین آپارتمان هستید، ۳۷٪ زمان خود را (۱۱ روز، اگر یک ماه برای جستجو زمان دارید) آزادانه بین گزینه‌ها پرسه بزنید. لازم نیست دسته‌چک همراه‌تان باشد؛ فقط دارید سبک‌سنگین می‌کنید. اما بعد از ۳۷ درصد، آماده باشید تا سریعاً وارد عمل شوید و اولین خانه‌ای را که از تمام گزینه‌های قبلی بهتر بود بگیرید. این کار یک مصالحهٔ ساده بین گشتن و گذشتن نیست، بلکه می‌توان ثابت کرد بهینه‌ترین راهکار است.

یافتن آپارتمان، در ریاضیات جزو مسائل «توقف بهینه» دسته‌بندی می‌شود. قانون ۳۷٪ چند قدم ساده -که دانشمندان علوم کامپیوتر به آن «الگوریتم» می‌گویند- برای حل این‌گونه مسائل تعریف می‌کند. یافتن آپارتمان تنها یکی از نمودهای توقف بهینه در زندگی روزمرهٔ ماست. پذیرش یا رد سلسله‌ای از گزینه‌ها، ساختاری است که در زندگی بارها و بارها به شکل‌های کمابیش مشابهی نمایان می‌شود. چند بار باید محوطه را بچرخید تا جای پارک مناسب پیدا شود؟ تا کجا باید سرمایه‌تان را به امید شانس در یک کسب‌وکاری پرریسک نگه دارید؟ چه‌قدر باید چشم به راه رسیدن گزینهٔ مناسبی برای خانه یا ماشینتان بنشینید؟

همین چالش در زمینهٔ پرفراز و نشیب دیگری هم بروز می‌کند: همسریابی. توقف بهینه، علم تک‌همسری پیاپی است.

این الگوریتم‌های ساده راهکارهایی برای تمام مسئله‌های توقف بهینه، شامل یافتن آپارتمان، ارائه می‌کنند. آدم‌ها هر روز با این مسائل دست به گریبانند -هرچند که شاعران در رنج عشق بیشتر از یافتن جای پارک قلم‌فرسایی کرده‌اند- و گاهی متحمل سختی بسیاری هم می‌شوند. اما لزومی به تحمل این سختی نیست. این مسائل، دست‌کم به‌طور ریاضیاتی، حل شده‌اند.

هر مستاجر، راننده یا خواستگار مستاصلی که می‌بینید، دارد چرخ را دوباره اختراع می‌کند. آن‌ها نه به درمان‌گر، که به الگوریتم نیاز دارند. درمان‌گر فقط می‌تواند بگوید که باید تعادلی بین وسواس فکری و تصمیم‌گیری عجولانه برقرار کنند.

اما الگوریتم می‌گوید که مرز این تعادل، ۳۷٪ است.

* * *

مجموعهٔ مشخصی از مسائل هستند که همهٔ افراد با آن‌ها مواجه می‌شوند. این مسائل نتیجهٔ مستقیم زندگی ما در زمان و مکان متناهی است. در یک روز یا در یک دهه، چه کارهایی باید بکنیم و سراغ چه کارهایی نباید برویم؟ چه میزانی از آشفتگی را باید بپذیریم و چه میزان از نظم و ترتیب اضافی است؟ چه تعادلی باید بین دست زدن به تجربه‌های جدید و تکرار تجربه‌های خوشایند برقرار کرد تا مطلوب‌ترین زندگی را داشته باشیم؟

این‌گونه مسائل مخصوصِ انسان‌ها به نظر می‌رسند، اما این‌طور نیست. بیش از نیم قرن است که دانشمندان علوم کامپیوتر با مسائلی هم‌ارز این دوراهی‌های روزمره دست‌وپنجه نرم می‌کنند و بسیاری از آن‌ها را هم حل کرده‌اند. یک پردازنده چه‌طور باید «توجه»ش را تقسیم کند تا تمام خواسته‌های کاربر را با کم‌ترین سربار و در کم‌ترین زمان برآورده کند؟ کِی باید سراغ وظایف دیگر برود و اصلاً چند وظیفهٔ هم‌زمان را باید شروع کند؟ بهترین راهِ استفاده از حافظهٔ محدودش چیست؟ باید دادهٔ بیشتری جمع کند، یا بر اساس داده‌های فعلی‌اش اقدام کند؟ گاهی نحوهٔ استفادهٔ مناسب از یک شبانه‌روز به چالشی برای انسان‌ها تبدیل می‌شود، اما کامپیوترها به سادگی از تک‌تک میلی‌ثانیه‌ها خوب استفاده می‌کنند. از این رفتار کامپیوترها چیزهای زیادی می‌توان آموخت.

صحبت از الگوریتم برای زندگی انسانی، ترکیب غریبی به نظر می‌رسد. خیلی‌ها با

شنیدن واژهٔ «الگوریتم» به یاد کارهایی رازآلود و عجیب می‌افتند که با داده‌های بزرگ، دولت‌های بزرگ و کسب‌وکارهای بزرگ سر و کار دارد: بخش فزاینده‌ای از زیرساخت‌های دنیای مدرن، که کاربرد عملی چندانی در امور انسانی ندارد. اما الگوریتم، صرفاً چند گام متناهی است که برای حل یک مسئله برداشته می‌شود. الگوریتم‌ها بسیار گسترده‌تر -و البته بسیار قدیمی‌تر- از کامپیوترها هستند. آدم‌ها خیلی پیش از ماشین‌ها از الگوریتم استفاده می‌کرده‌اند.

کلمهٔ «الگوریتم» از نام ریاضی‌دانی ایرانی به نام خوارزمی گرفته شده است. او در قرن نهم کتابی دربارهٔ روش‌های انجام دستیِ محاسبات ریاضی نوشته است. (نام کتابش «الجبر و المقابله» است و کلمهٔ «الجبر» در عنوان این کتاب، ریشهٔ معادل انگلیسی‌اش[1] است.) اما اولین الگوریتم‌های ریاضیاتیِ شناخته‌شده، حتی از کتاب خوارزمی هم قدیمی‌ترند: لوح گلی چهار هزار ساله‌ای مربوط به سومریان که در نزدیکی بغداد کشف شده و روشی برای تقسیم اعداد چندرقمی ارائه می‌کند.

اما الگوریتم فقط مختص ریاضیات نیست. وقتی از روی دستور پخت کیک می‌پزید، الگوریتمی را دنبال می‌کنید. وقتی از روی الگو ژاکت می‌بافید، الگوریتمی را دنبال می‌کنید. وقتی با نوک شاخ گوزن ضربات دقیق و منظمی به سنگ چخماق می‌زنید و آن را تیز می‌کنید -گام مهمی در ساختن ابزار سنگی ظریف- الگوریتمی را دنبال می‌کنید. الگوریتم‌ها از عصر حجر بخشی از فناوری انسانی بوده‌اند.

* * *

در این کتاب، ایدهٔ **طراحی الگوریتم انسانی** را دنبال می‌کنیم؛ جستجوی راهکارهای بهتر برای چالش‌های روزمرهٔ آدم‌ها. دیدن زندگی روزمره با عینک علوم کامپیوتر، دستاوردهای متعددی به دنبال دارد. واضح‌تر از همه اینکه راه‌حل‌هایی منسجم و عملی برای برخی مسائل به ارائه می‌دهد. توقف بهینه می‌گوید کِی بگردیم و کی بگذریم. مصالحهٔ کاوش/بهره‌برداری به ما می‌گوید که چگونه بین آزمودن چیزهای جدید و لذت بردن از علاقه‌مندی‌های شناخته‌شدهٔ خود تعادل برقرار کنیم. نظریهٔ مرتب‌سازی به ما می‌گوید که چه‌طور دفتر کارمان را مرتب کنیم و آیا اصلاً نیازی به این کار هست؟ نظریهٔ ذخیره‌سازی روش چیدن کمد را به ما می‌آموزد. نظریهٔ زمان‌بندی

1. Algebra

هم روش پرکردن وقت را به ما یاد می‌دهد.

در سطح بعدی، علوم کامپیوتر واژگانی را ارائه می‌کند که به درک اصول عمیق حاکم بر هر یک از این حوزه‌ها کمک می‌کند. به قول کارل ساگان[1] «علم بیشتر یک طرز فکر است تا پیکره‌ای از دانش». حتی وقتی زندگی به‌هم‌ریخته‌تر از آن است که انتظار تحلیل عددی دقیق یا پاسخی دم‌دستی داشته باشیم، استفاده از شهود و مفاهیم حاصل از حل گونه‌های ساده‌ترِ این مسائل، راهی برای درک موضوعات کلیدی و درجا نزدن پیش پایمان می‌گذارد.

به صورت کلی‌تر، نگاه از زاویهٔ دید علوم کامپیوتر می‌تواند آگاهی ما نسبت به موضوعات بسیاری را ارتقا دهد؛ موضوعاتی از قبیل ماهیت ذهن انسان، معنای عقلانیت، و دیرینه‌ترین سؤال دنیا: چگونه زندگی کردن. بهره‌گیری از شناخت برای حل مسائلی از زندگی روزمره که بن‌مایهٔ محاسباتی دارند، می‌تواند نگاهمان را به رفتار عقلایی انسان‌ها متحول کند.

ایده گرفتن از مبانی کاری کامپیوترها برای تعیین طرز تفکر و تصمیم‌گیری، باورها و رفتارها ممکن است به نظر خیلی‌ها ساده‌انگارانه و حتی اشتباه باشد. حتی اگر علوم کامپیوتر در خصوص طرز فکر و رفتار حرفی برای گفتن داشته باشد، آیا باید به آن گوش داد؟ زندگی ربات‌ها و هوش مصنوعی در داستان‌های علمی‌تخیلی نوید زندگی جذابی را نمی‌دهد که کسی مایل به تجربه‌اش باشد.

تا حدی به خاطر این است که وقتی به کامپیوتر فکر می‌کنیم، سیستم مکانیکی خشک و بی‌روحی در ذهن‌مان نقش می‌بندد: ماشین‌هایی که به‌سختی مشغول اجرای منطق استقرایی هستند، تمام گزینه‌ها را بی‌رحمانه یک‌به‌یک بررسی می‌کنند تا به تصمیم برسند و بدون آوردن خم به ابرو آن‌قدر فکر می‌کنند تا به پاسخ درست برسند. راستش اولین کسی که کامپیوتر را تصور کرد، چنین چیزی در ذهن داشت. آلن تورینگ[2] ایدهٔ اولیهٔ کامپیوتر را شبیه به ریاضی‌دانی می‌دانست که محاسبه‌ای پیچیده و طولانی را با دقت و قدم‌به‌قدم طی می‌کند تا به جوابی درست و بی‌چون‌وچرا برسد.

---

1. Carl Sagan

۲. Alan Turing؛ ریاضی‌دان، فیلسوف و زیست‌شناس نظری قرن نوزده -م. (مطالب و پانوشت‌های مترجم، با علامت «-م.» متمایز شده‌اند.)

به همین دلیل، اینکه کامپیوترهای مدرن در مواجهه با مسائل دشوار واقعاً این‌گونه رفتار نمی‌کنند ممکن است برایتان عجیب باشد. برای کامپیوترهای مدرن، محاسبات سرراست چالش خاصی ایجاد نمی‌کند. اما وظایفی مانند مکالمه با آدم‌ها، بازسازی فایل‌های معیوب، یا بردن بازی گو[1] مهم‌ترین چالش‌های امروز علوم کامپیوترند. این‌ها، مسائلی هستند که یا قوانین شفاف و قطعی ندارند، یا برخی از اطلاعات لازم آن‌ها در دسترس نیست، یا پیدا کردن جواب دقیق و درست آن‌ها مستلزم بررسی احتمالات بی‌انتهایی است. الگوریتم‌هایی که پژوهشگران برای حل مسائل دشوار توسعه داده‌اند، کامپیوترها را از اتکای صرف به محاسبات طاقت‌فرسا بسیار فراتر برده است. حل مسائل دنیای واقعی مستلزم سر و کله زدن با احتمالات، مصالحه بین زمان و دقت، و استفاده از تخمین است.

کامپیوترها همانطور که برای حل مسائل دنیای واقعی آماده‌تر می‌شوند، نه تنها الگوریتم‌هایی را ارائه می‌کنند که برای زندگی آدم‌ها مفیدند، بلکه حتی استاندارد بهتری هم برای محک زدنِ ادراک انسان ارائه می‌کنند. طی یکی دو دههٔ گذشته، اقتصاد رفتاری روایت منحصر به فردی را در مورد انسان‌ها مطرح کرده است: اینکه ما غیرعقلایی هستیم و در معرض خطا قرار داریم، و دلیل اصلی‌اش هم سخت‌افزار ویژه و معیوب مغزمان است. این داستان خودانتقادی هر روز آشناتر می‌شود، اما برخی سؤال‌ها همچنان ما را آزار می‌دهند. مثلاً چرا بچه‌های چهارساله هنوز بعضی کارهای شناختی مثل بینایی، زبان و استدلال عِلّی را بهتر از ابرکامپیوترهای چند میلیون‌دلاری انجام می‌دهند؟

پاسخ‌هایی که از جانب علوم کامپیوتر به مسائل روزمره داده می‌شود داستانی متفاوت را دربارهٔ ذهن انسان بازگو می‌کنند. زندگی پر از مسائلی است که در کمال سادگی دشوارند. اشتباهات آدم‌ها بیش از آنکه حرفی از خطاهای ذهن انسان بزنند، دشواری‌های ذاتی مسئله را بیان می‌کنند. تفکر الگوریتمی دربارهٔ دنیا، آموختن ساختارهای بنیادین مسائل پیشِ رو و خصوصیات راهکارهای آن‌ها می‌تواند کمکمان کند ببینیم چقدر خوب هستیم و خطاهایی را که مرتکب می‌شویم بهتر بفهمیم.

انسان‌ها همواره با برخی از دشوارترین انواع مسائل پیش روی دانشمندان علوم

---

۱. Go؛ یک بازی رومیزی قدیمی که در شرق آسیا رواج دارد و با وجود قوانین ساده، می‌تواند بسیار پیچیده باشد -م.

کامپیوتر مواجه‌اند. آدم‌ها معمولاً مجبورند در شرایط عدم قطعیت، محدودیت زمانی، اطلاعات ناقص و در دنیایی پر از تغییر تصمیم‌گیری کنند. در برخی موقعیت‌ها حتی تازه‌ترین یافته‌های علوم کامپیوتر هم هنوز به الگوریتم‌های همیشه‌درست و کارآمدی دست نیافته است. برای برخی موقعیت‌ها هم ممکن است چنین الگوریتم‌هایی اصلاً وجود خارجی نداشته باشد.

حتی در مواردی هم که الگوریتم‌های بی‌نقصی پیدا نشده‌اند، نبرد بین نسل‌های مختلف دانشمندان علوم کامپیوتر با سرکش‌ترین مسائل جهان واقعی، بینش‌هایی ایجاد کرده است. این بینش‌های گران‌مایه با شهود ما در خصوص عقلانیت در تضادند، و هیچ شباهتی به تجویزهای دقیق ریاضی‌دانانی ندارند که تلاش می‌کنند جهان را به سمت خطوطی صاف و تمیز برانند. مثلاً می‌گویند: همیشه همهٔ گزینه‌هایت را بررسی نکن. حتماً لازم نیست همیشه به دنبال دستاوردی باشی که به نظر بهترین است. گاهی شلوغ‌پلوغ کن. سبک سفر کن. کارها را پشت گوش بینداز. به حرف دلت گوش کن و زیاد فکر نکن. استراحت کن. سکه بینداز. ببخش اما فراموش نکن. به خودت اعتماد کن.

زندگی با بهره‌گیری از خِرد علوم کامپیوتر خیلی هم بد نیست و بر خلاف بسیاری از پند و اندرزها، پشتوانه‌ای اثبات‌شده دارد.

* * *

درست مثل طراحی الگوریتم برای کامپیوتر که در ابتدا موضوعی بین رشته‌ای -ترکیب غریبی از ریاضیات و مهندسی- بود، موضوع طراحی الگوریتم برای انسان‌ها هم ذیل رشتهٔ خاصی نمی‌گنجد. امروزه طراحی الگوریتم نه تنها از علوم کامپیوتر، ریاضیات و مهندسی، که از حوزه‌های هم‌خانواده مانند آمار و پژوهش عملیاتی هم بهره می‌گیرد. ما هم همان‌طور که به ارتباط الگوریتم‌های ماشین‌ها با زندگی انسان‌ها فکر می‌کنیم، باید به علوم شناختی، روان‌شناسی، اقتصاد و سایر علوم هم توجه داشته باشیم.

ما نویسندگان این کتاب، با این حوزهٔ بین‌رشته‌ای آشنا هستیم. برایان دانش‌آموختهٔ علوم کامپیوتر، فلسفه و زبان انگلیسی است و فعالیت کاری خود را در فصل مشترک این سه رشته پیگیری کرده است. تام دانش‌آموختهٔ روان‌شناسی و آمار است و هم‌اکنون استاد دانشگاه برکلی است و روی رابطهٔ بین شناخت انسانی

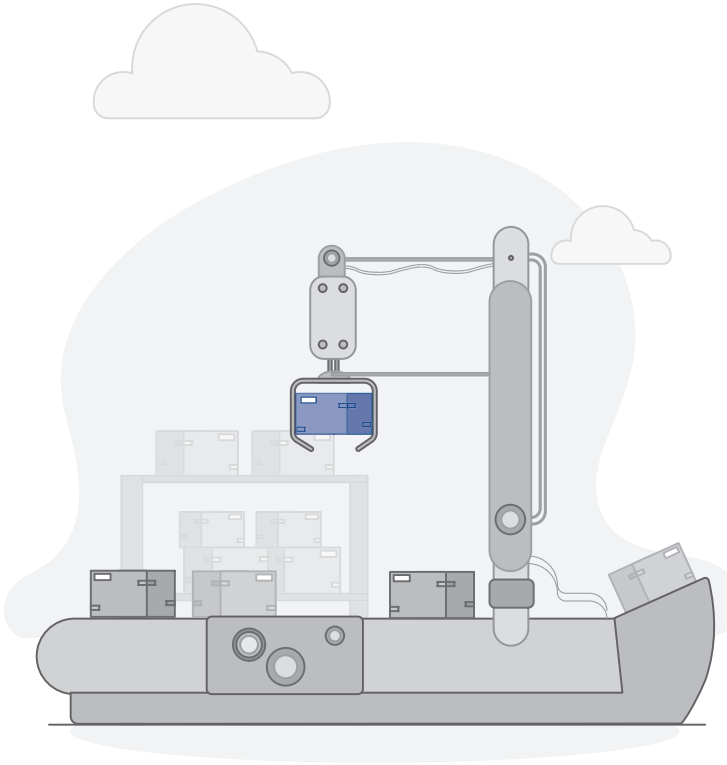
و کامپیوتر کار می‌کند. اما هیچ‌کس نمی‌تواند در تمام زمینه‌های مربوط به طراحی الگوریتم‌های بهتر برای انسان‌ها متخصص باشد. از این‌رو، در بخشی از جستجوهایمان به دنبال الگوریتم‌هایی برای زندگی، با کسانی صحبت کردیم که برخی از مشهورترین الگوریتم‌های پنجاه سال اخیر را ایجاد کرده‌اند. از آن‌ها که جزو باهوش‌ترین آدم‌های دنیا هستند، پرسیدیم تحقیقاتشان چه تأثیری بر رویکردشان در زندگی گذاشته است؟ از یافتن همسر گرفته تا مرتب کردن جوراب‌هایشان.

در صفحه‌های بعدی سفرمان را با چندتا از بزرگ‌ترین چالش‌های پیش روی کامپیوتر و ذهن انسان شروع می‌کنیم: چگونه باید فضای متناهی، زمان متناهی، توجه محدود، نادانسته‌های ناشناخته، اطلاعات ناقص و آیندهٔ پیش‌بینی‌ناپذیر را مدیریت کنیم؛ چگونه این کار را با ظرافت و اعتماد به نفس انجام دهیم؛ و چگونه این کار را در اجتماعی انجام دهیم که همه هم‌زمان به همین کار مشغول‌اند. همچنین، دربارهٔ ساختار ریاضیاتی بنیادین این چالش‌ها و دربارهٔ مهندسی بهینهٔ کامپیوترها -که گاهی بر خلاف تصور ماست- می‌آموزیم. در مورد طرز کار ذهن و راه‌های متمایز اما عمیقاً مرتبطش برای حل‌وفصل مسائل مشابه و غلبه بر محدودیت‌های مشابه هم خواهیم آموخت. در نهایت، علاوه بر نکاتی منسجم برای حل مسائل روزمره، علاوه بر روش جدیدی برای دیدن ساختار ظریفی که حتی پشت بدقلق‌ترین معماهای انسانی هم وجود دارد و علاوه بر درک مشقت‌های مشترک انسان و کامپیوتر، به دستاورد عمیق‌تری هم دست خواهیم یافت: واژگان تازه‌ای برای درک دنیا و فرصتی برای خودشناسی.

۱

توقف بهینه

کِی جستجو را متوقف کنیم



اگرچه نامهٔ دعوت به مراسم عروسی تمام مسیحیان با اعلامی موقرانه شروع می‌شود که «ازدواج قراری الاهی است»، اما من به عنوان یک فیلسوف، می‌خواهم با جزییات بیشتری این موضوع را بشکافم.

ـ *یوهان کپلر*[1]

اگر مارتین را به هر کس دیگری ترجیح می‌دهی؛ اگر فکر می‌کنی که او دل‌پذیرترین مردی‌ست که تاکنون با او معاشرت داشته‌ای، چرا معطلی؟

ـ *جین آستین، اما*[2]

مشاوران راهنمای کالج با پدیده‌ای بسیار رایج مواجه‌اند؛ عشاقی که در اولین سال کالج برای جشن شکرگزاری به شهر خود می‌آیند و چهار روز بعد تنها و مجرد به کالج برمی‌گردند. این پدیده آن‌قدر رایج است که حتی برای آن نامی هم انتخاب شده: «جدایی بوقلمونی».

برایان غمگین در سال اول کالج به مشاور راهنمای کالج خود مراجعه کرد. دوست‌دختر دوران دبیرستانش به کالج دیگری در ایالتی بسیار دور رفته است، و آن‌ها درگیر رابطه‌ای از راه دور هستند. آن‌ها دست‌به‌گریبان سؤالی غریب‌تر و فلسفی‌تر هم هستند: اصلاً رابطهٔ آن‌ها چقدر خوب است؟ آن‌ها هیچ معیار واقعی از رابطه‌های دیگر نداشتند که بر اساس آن رابطهٔ خود را بسنجند. مشاور برایان مشکل رایج دوگانهٔ سال‌اولی[3] آن‌ها را تشخیص داد و راهکاری بسیار سهل‌انگارانه به برایان پیشنهاد کرد: «دادهٔ بیشتری جمع‌آوری کن.»

بی‌پیرایه، مقیدان به تک‌همسری سریالی با یک مشکل بنیادین و گریزناپذیر مواجه‌اند. چه موقع به اندازهٔ کافی با آدم‌های مختلف بودیم که متوجه شویم بهترین یار ما کیست؟ اگر جمع‌آوری داده به قیمت از دست رفتن همان یار برتر باشد چه؟ به

1. Johannes Kepler
2. Jane Austen, Emma
3. Freshman-year dillema

نظر می‌رسد موقعیتی دوسر باخت است.

همان‌طور که دیدیم، این موقعیت اره، این دل‌شکستگی عاشق سال اولی، همان چیزی است که ریاضی‌دانان به آن مسئلهٔ «توقف بهینه» می‌گویند و می‌توانند جواب دقیقی هم داشته باشد: سی و هفت درصد.

البته این به پیشفرض‌هایی که دربارهٔ عشق دارید هم مرتبط می‌شود.

مسئلهٔ منشی

در هر مسئلهٔ توقف بهینه، دو راهی اساسی این نیست که کدام گزینه را انتخاب کنیم، بلکه چه تعداد گزینه را اصلاً در نظر بگیریم. کاربرد این مسائل تنها به عشاق و مستاجران محدود نمی‌شود. بلکه برای راننده‌ها، صاحب‌خانه‌ها، دزدها و خیلی‌های دیگر هم کاربرد دارد.

قانون ۳۷٪ از مهم‌ترین معمای مسئله‌های توقف بهینه نشأت گرفته است که به «مسئلهٔ منشی» هم شناخته می‌شود. ساختار آن بسیار شبیه دو راهی مستاجری بود که پیش‌تر اشاره کردیم. تصور کنید شما با تعدادی از متقاضیان برای سمت منشی مصاحبه می‌کنید، و هدف شما بیشینه کردن شانس جذب بهترین متقاضی در سبد رزومه‌ها است. در حالی‌که نمی‌توانید به تک‌تک متقاضیان امتیازی را اختصاص دهید، به راحتی می‌توانید قضاوت کنید که کدام را ترجیح می‌دهید. (بیان ریاضی آن این است که شما فقط به اعداد ترتیبی دسترسی دارید -رتبهٔ نسبی متقاضیان در مقایسه با یکدیگر- اما به اعداد اساسی، که نمرهٔ آن‌ها بر اساس معیاری عمومی باشد دسترسی ندارید.) شما به ترتیبی تصادفی و جدا جدا با متقاضیان مصاحبه می‌کنید. می‌توانید در هر زمان به متقاضیان پیشنهاد همکاری بدهید و آن‌ها مسلماً قبول می‌کنند و جستجو متوقف می‌شود. اما اگر شما مصاحبه را با یک متقاضی تمام کنید و تصمیم بگیرید که او را استخدام نکنید، شانس استخدام او را برای همیشه از دست می‌دهید.

مسئلهٔ منشی برای اولین بار به عنوان چیستانی -بدون ذکر صریح عنوان منشی- در سال ۱۹۶۰ در ستون محبوب ریاضیات تفریحی مارتین گاردنر[1] در مجلهٔ آمریکای علمی

1. Martin Gardner

منتشر شد. اما منشأ اولیهٔ این مسئله هنوز مبهم است. پیش از اینکه جستجوی ما تبدیل به سفری ماجراجویانه برای بار زدن و بررسی آرشیو مکاتبات کاغذی گاردنر در استنفورد شود، جز چند حدس راه به جایی نبردیم. مطالعهٔ مکاتبات کاغذی شبیه استراق سمع تلفنی است. شما فقط صدای یک طرف تماس را می‌شنوید و سمت دیگر را باید حدس بزنید. ما هم فقط پاسخ‌هایی را داشتیم که به نتایج بررسی گاردنر دربارهٔ ریشه‌های این مسئله در پنجاه و اندی سال پیش مربوط بود و نه خود نامه‌های گاردنر را. هر چه بیشتر می‌خواندیم داستان پیچیده‌تر می‌شد.

فردریک ماستلر[1] ریاضی‌دان از دانشگاه هاروارد چیزهایی را دربارهٔ این مسئله از همکارش اندرو گلیسون[2] در سال ۱۹۵۵ به خاطر داشت. او هم مسئله را از کسی دیگر و جایی دیگر شنیده بود. لئو موزر[3] از دانشگاه آلبرتا نامه‌ای فرستاد که دربارهٔ این مسئله در «یادداشت‌هایی» از گسکِل[4] چیزهایی خوانده بود. گسکل هم این‌ها را از همکارش در بوینگ نقل کرده بود. راجر پینکهام[5] از دانشگاه راتگرز نامه‌ای نوشت که اولین بار در سال ۱۹۵۵ این مسئله را از ریاضی‌دانی در دانشگاه دوک به نام شانفیلد[6] شنیده است و اینکه «باور دارم که شانفیلد گفت مسئله را از یک نفر در میشیگان شنیده است.»

تقریباً مطمئنیم که «یک نفر در میشیگان» همان مریل فلود[7] است. اگرچه اسمی از او خارج از ریاضیات شنیده نمی‌شود، تأثیر فلود در علوم کامپیوتر غیر قابل کتمان است. شناساندن مسئلهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد (که درباره‌اش در فصل هشت بیشتر توضیح می‌دهیم)، ابداع دوراهی زندانی (که در فصل ۱۱ درباره‌اش صحبت می‌کنیم) و حتی شاید ابداع کلمهٔ «نرم‌افزار»، همه بخشی از کارهای فلود است. فلود اولین کسی بود که قانون ۳۷٪ را در سال ۱۹۵۸ کشف کرد. ادعا می‌شود که از سال ۱۹۴۹ روی این مسئله کار می‌کرد، اما خودش از کسان دیگری یاد می‌کند که این کار را شروع کرده‌اند.

1. Frederick Mosteller
2. Andrew Cleason
3. Leo Moser
4. R. E. Gaskell
5. Roger Pinkham
6. J. Shoenfield
7. Merrill Flood

مسئلهٔ منشی از هرکجا که آمده باشد، یک معمای ریاضی تقریباً بی‌نقص است: توضیحی ساده، راه‌حلی چغر، پاسخی کوتاه و کاربردهایی بسیار جذاب. در نتیجه، آوازهٔ این معما خیلی سریع دهان به دهان در حلقه‌های ریاضی‌دانان دههٔ ۵۰ پیچید و به خاطر ستون گاردنر در دههٔ ۶۰، به ذهن عموم مردم گره خورد. تا دههٔ ۸۰ میلادی شکل‌های مختلف مسئلهٔ منشی این‌قدر مورد تحلیل قرار گرفته بودند که برای هر کدام در مقاله‌هایی در زیرگونه‌های خود بررسی می‌شدند.

دیدن تغییرات انسان‌شناسانه‌ای که هر فرهنگ به این مسئله می‌دهد بسیار جذاب است. تصویر ما از شطرنج، چیزی مربوط به قرون وسطای اروپاست اما ریشه‌های اصلی آن را باید در قرن هشتم میلادی هند جستجو کرد. شطرنج در قرن پانزده خیلی شدید اروپایی شد. حتی شاه و وزیر و فیل هم تغییر نام دادند[1]. مسائل توقف بهینه هم مثل شطرنج در تناسخ‌های متوالی، هر بار بازتاب دغدغه‌های غالب روزگار خود بودند. در قرن نوزدهم این مسائل را با روایت‌هایی مثل لاتاری‌های باروک و انتخاب دختران از میان خواستگاران خود توضیح می‌دادند؛ در اوایل قرن بیستم، جستجوی رانندگان برای هتل در تعطیلات و هم‌چنین جستجوی پسرها برای یافتن شریک خود، و در بحبوحهٔ فرهنگ کاغذبازی و مردسالارانهٔ میانه‌های قرن بیستم، جستجوی رئیس‌های مرد برای انتخاب دستیاران خانم این مسئله را توضیح می‌داد. عبارت «مسئلهٔ منشی» اولین‌بار در مقاله‌ای در سال ۱۹۶۴ استفاده شد و از جایی بعد آن، این لفظ برای این مسئله بین همه جا افتاد.

از کجا ٪۳۷؟

در انتخاب منشی ممکن است دو جور اشتباه کنید: زود بس کنید، یا دیر. وقتی زود بس کنید، بهترین متقاضی را ندیده رها کرده‌اید. وقتی خیلی دیر بس کنید، برای متقاضی بهتری که دیگر وجود ندارد گزینه‌هایتان را پرانده‌اید. استراتژی بهینه باید تعادلی بین این دو پیدا کند. مرزی باریک بین زیاد گشتن و جستجوی ناکافی.

---

۱. در حالی که ما فارسی‌زبانان به خاطر ریشه‌های مشترک هم‌چنان به این مهره‌ها شاه وزیر و فیل می‌گوییم، در انگلیسی این مهره‌ها به شاه (King)، ملکه (Queen) و اسقف (Bishop) مشهورند. شایان ذکر است «شاه» (Shah) در زبان‌های دیگر کلمه‌ای خاص برای پادشاهان ایران است و کلمهٔ (King) کاربردی عمومی دارد -م.

وقتی دنبال یافتن بهترین متقاضی هستید و نه چیزی کم‌تر، واضح است که در طول مصاحبه‌ها نباید به انتخاب کسی که بین گزینه‌های بررسی شده تا الان بهترین نبوده حتی فکر کنید. اما «بهترین گزینهٔ تاکنون» بودن هم برای انتخاب کافی نیست؛ اولین متقاضی که مصاحبه می‌شود عملاً «بهترین گزینهٔ تاکنون» است. منطقی است که هرچه جلوتر می‌رویم، احتمال مواجه شدن با «بهترین گزینهٔ تاکنون» کم‌تر می‌شود. با فرض توزیع یک‌نواخت، دومین متقاضی ٪۵۰ شانس دارد که بهترین باشد، متقاضی پنجم یک‌پنجم، متقاضی ششم فقط یک ششم، و همین‌طور تا آخرین متقاضی. درست است که هرچه جلوتر می‌رویم «بهترین گزینهٔ تاکنون»، گزینهٔ چشم‌گیرتری خواهد بود، اما شانس دیدارش هم کم‌تر می‌شود.

شکی نیست که انتخاب اولین «بهترین گزینهٔ تاکنون» که می‌بینیم -که همان اولین متقاضی باشد- خیلی شتاب‌زده است. اگر مثلاً صد متقاضی داشته باشیم انتخاب دومین «بهترین گزینهٔ تاکنون» هم باز عجولانه است. پس چکار باید کرد؟

چند استراتژی شهودی پیش روی ماست. مثلاً، انتخاب سومین نفری که از همه بهتر باشد؛ یا چهارمین نفر. یا انتخاب اولین گل بعد از زنجیری از دست‌های پوچ؛ بهترین گزینهٔ تاکنون بعد از تعداد زیادی متقاضی نامناسب.

اما در عمل هیچ‌یک از این استراتژی‌های به نظر منطقی، خیلی خوب نیستند. بهترین استراتژی چیزی شبیه «یه دور بزنم، می‌خرم» است: زمان مشخصی را صرف «دور زدن» می‌کنید و به گشتن در گزینه‌ها و جمع‌آوری اطلاعات می‌پردازید. در این دوره اساساً هیچ انتخابی نمی‌کنید، هرچقدر هم که جذاب و شگفت‌انگیز باشد. بعد از این زمان، شما وارد مرحلهٔ «خرید» می‌شوید و اولین گزینه‌ای را انتخاب می‌کنید که از تمام گزینه‌های مرحلهٔ دور زدن بهتر بود.

کافی است نگاهی به مسئلهٔ منشی با کم‌ترین تعداد متقاضیان بیندازیم تا متوجه شویم «دور زدن و خریدن» از کجا و چطور شکل می‌گیرد. وقتی فقط یک متقاضی داریم، مسئله خیلی ساده است: شما استخدام شدید! با دو متقاضی، شانس شما مستقل از اینکه چه کنی ٪۵۰ است؛ می‌توانید متقاضی اول را استخدام کنید (که نیمی از اوقات بهترین است) یا به صورت پیشفرض اولی را مرخص کنید و دومی را استخدام کنید (که او هم نیمی از اوقات بهترین است).

آمدن متقاضی سوم داستان را ناگهان خیلی جذاب می‌کند. اگر به صورت تصادفی استخدام کنیم، احتمال موفقیت (انتخاب بهترین گزینهٔ ممکن) ٪۳۳ است. با روش دور زدن و خریدن با دو متقاضی نتوانستیم عملکردی بهتر از انتخاب تصادفی داشته باشیم؛ با سه متقاضی چطور؟ به نظر می‌رسد که می‌توانیم، و همه‌ش به خاطر رفتاری است که در مصاحبهٔ دوم داریم. وقتی اولین متقاضی را می‌بینیم هیچ اطلاعاتی نداریم: به نظر بهترین گزینهٔ تاکنون می‌آید. وقتی که سومین متقاضی را می‌بینیم هیچ اختیاری نداریم: چون بقیه را رد کردیم باید به او پیشنهاد کار بدهیم. اما وقتی متقاضی دوم را می‌بینیم، کمی اطلاعات و کمی اختیار داریم: می‌دانیم از نفر اول بهتر است یا بدتر، و در رد و انتخابش اختیار عمل داریم. چه می‌شود اگر متقاضی دوم را وقتی که بهتر از اولی‌ست (که او را فقط برای فهمیدن مظنه بررسی کردیم) انتخاب کنیم، وگرنه ردش کنیم و متقاضی سوم را انتخاب کنیم؟ این بهترین استراتژی هنگام داشتن تنها سه متقاضی است؛ با این روش، نیمی از اوقات بهترین گزینه را انتخاب کرده‌ایم: درست به اندازهٔ وقتی که دو متقاضی داشتیم[۱].

بررسی این سناریوها برای چهار متقاضی نشان می‌دهد که از متقاضی دوم به بعد باید به دنبال انتخاب بهترین باشیم، و با داشتن پنج رزومه نباید قبل از متقاضی سوم وارد فاز «خرید» شویم.

هرچه تعداد متقاضی‌ها بیشتر می‌شود، مرز بین دور زدن و خریدن به ٪۳۷ نزدیک‌تر می‌شود تا به قانون ٪۳۷ برسیم: ٪۳۷ اول متقاضیان را فقط ببین و هیچ‌کدام را انتخاب نکن؛ بعد از آن اولین فردی را استخدام کن که از تمام متقاضیانی که تا آن موقع دیده‌ای بهتر است[۲].

---

۱. با این استراتژی ٪۳۳ ریسک رد کردن بهترین متقاضی را داریم و ٪۱۶ ریسک اینکه هرگز او را نبینیم. برای توضیح بیشتر، شش ترتیب برای متقاضیان وجود دارد (به ترتیب از راست): ۱-۲-۳، ۱-۳-۲، ۲-۱-۳، ۲-۳-۱، ۳-۱-۲ و ۳-۲-۱. استراتژی بررسی متقاضی اول و انتخاب اولین گزینهٔ بهتر از او در سه حالت از شش ترتیب یاد شده منجر به انتخاب بهترین گزینهٔ ممکن می‌شود (۲-۱-۳، ۲-۳-۱ و ۳-۲-۱) و در سه حالت بعدی شکست می‌خورد؛ دو بار به دلیل سخت‌گیری بیش از حد (۱-۲-۳ و ۱-۳-۲) و یک بار برای تساهل زیاد (۳-۲-۱).

۲. در واقع کمی کمتر از ٪۳۷. اگر بخواهیم دقیق باشیم، نسبت بهینهٔ متقاضیانی که باید ببینید $\frac{1}{e}$ است. e هم همان عدد نپر است که در محاسبات بازده مرکب استفاده می‌کنیم و برابر است با ۲٫۷۱۸۲۸... البته نیازی نیست که e را با ۱۲ رقم اعشار حفظ کنید: نرخ موفقیت هر عددی بین ٪۳۵ و ٪۴۰ بسیار نزدیک به بیشینهٔ ممکن است.

تعداد متقاضی	بهترین متقاضی را بعد از این تعداد مصاحبه انتخاب کنید	احتمال یافتن بهترین متقاضی
3	1 (33.33%)	50%
4	1 (25%)	45.83%
5	2 (40%)	43.33%
6	2 (33.33%)	42.78%
7	2 (28.57%)	41.43%
8	3 (37.5%)	40.98%
9	3 (33.33%)	40.59%
10	3 (30%)	39.87%
20	7 (35%)	38.42%
30	11 (36.67%)	37.86%
40	15 (37.5%)	37.57%
50	18 (36%)	37.43%
100	37 (37%)	37.10%
1000	369 (36.9%)	36.81%

شکل ۱- انتخاب بهینهٔ منشی

همان‌طور که مشاهده می‌کنید، استراتژی بهینه در نهایت شانسی سی و هفت درصدی برای انتخاب بهترین منشی به ما می‌دهد؛ یکی از تقارن‌های نادر ریاضیاتی که عدد استراتژی با شانس موفقیتش یکی شده. جدول بالا استراتژی بهینه برای مسئلهٔ منشی با تعداد مختلف متقاضی را نشان می‌دهد که در آن با افزایش تعداد متقاضیان احتمال موفقیت -مشابه مرز بهینهٔ حرکت از دور زدن به خرید- به ۳۷٪ میل می‌کند.

نرخ شکست ۶۳ درصدی با وجود پیروی از بهترین استراتژی ممکن حقیقتی تلخ است. حتی وقتی در مسئلهٔ منشی بهترین راهکار را در پیش می‌گیریم، بیشتر وقت‌ها

موفق نمی‌شویم؛ به این معنا که نمی‌توانیم بهترین گزینهٔ ممکن را انتخاب کنیم. این، برای کسانی که در زندگی عاطفی خود دنبال «نیمهٔ گمشده»شان می‌گردند خبر خوبی نیست. اما بارقهٔ امیدی وجود دارد. منطقاً با بزرگ‌تر شدن تعداد انتخاب‌ها، شانس انتخاب بهترین گزینهٔ موجود کم می‌شود. اگر به صورت تصادفی انتخاب کنیم، با سبدی از یک‌صد متقاضی، احتمال انتخاب بهترین گزینهٔ موجود ۱٪ است و در سبدی از یک میلیون متقاضی، این احتمال به یک ده هزارم درصد می‌رسد. اما محاسبات مسئلهٔ منشی تغییر نمی‌کند. اگر در زمان مناسب توقف کنید، احتمال انتخاب بهترین گزینهٔ موجود در میان ۱۰۰ متقاضی، یا در میان یک میلیون متقاضی، همیشه ۳۷٪ است. پس هرچه تعداد انتخاب‌ها بیشتر می‌شود، ارزش الگوریتم بهینه بیشتر می‌شود. درست است که یافتن سوزن اکثر اوقات ممکن نیست، اما توقف بهینه بهترین راهکار شما در مقابل هر کاه‌دانی است، هرچقدر هم که بزرگ باشد.

انتخاب عشاق

> کشش بین زن و مرد در سال‌های مختلف عمر این‌قدر مشابه است که از لحاظ ریاضی می‌تواند کمیتی ثابت تلقی شود.
>
> *ـ توماس مالتوس*

> وقتی برای فرزندانم تعریف می‌کنم که با اولین مردی که ملاقات کردم ازدواج کردم، حالت تهوع می‌گیرند.
>
> *ـ باربارا بوش*

پیش از اینکه استاد درس تحقیق در عملیات دانشگاه کارنگی ملون[1] شوم، مایکل تریک[2] دانشجوی ارشدی سینه‌سوخته بود که به دنبال عشق زندگی‌اش می‌گشت؛ «یک بار به ذهنم رسید که مسئلهٔ من عملاً همان مسئلهٔ منشی است. دنبال یک نفر می‌گردم و تعدادی هم گزینه برای انتخاب دارم. هدفم هم این است که بهترین گزینه

1. Carnegie Mellon
2. Michael Trick

را انتخاب کنم.» مایکل شروع به بررسی کمّی کرد. او نمی‌دانست در طول زندگی با چند دختر آشنا می‌شود. اما قانون ۳۷٪ تبصره‌ای دارد: می‌تواند بر تعداد متقاضیان، یا بر زمان بررسی گزینه‌ها اعمال شود. اگر فرض کنیم بهترین زمان برای تشکیل زندگی چیزی بین هجده تا چهل سالگی‌ست، بر اساس قانون ۳۷٪ بهترین زمان برای گذار از گل‌گشت به انتخاب، جایی همان اوایل ۲۶ سالگی است. مایکل در آن زمان دقیقاً ۲۶ سال داشت. وقتی با اولین زنی آشنا شد که از تمام گزینه‌های قبلی بهتر بودند، مایکل کاری را که باید انجام داد: «از او خواستگاری کردم، و خب بهم جواب رد داد».

مشکل ریاضی‌دانان با عاشقی ریشهٔ تاریخی دارد. عموم ما یوهان کپلر[1] را به کشف بیضی‌شکل بودن مدار گردش سیاره‌ها می‌شناسیم. او نقش مهمی در «انقلاب کوپرنیکی» داشت که در آن گالیله و نیوتون تصور انسان را از جایگاهش در آسمان‌ها دگرگون کرد. اما کپلر دغدغه‌هایی زمینی هم داشت. بعد از مرگ اولین همسرش در سال ۱۶۱۱، کپلر تلاش بی‌بدیلی برای تجدید فراش کرد و در مجموع از یازده نفر خواستگاری کرد. از بین چهار نفر اول، از چهارمی «به خاطر قدِ بلند و بدن ورزیده» بیش از همه خوشش آمد. اما جستجو به همین‌جا ختم نشد. کپلر اضافه می‌کند «البته اگر عشق و استدلال پای نفر پنجم رو وسط نمی‌کشید می‌تونست همون‌جا قضیه ختم بخیر بشه. اما عشق و وفاداری و پشتکار و عقل معاش پنجمی دل من رو با خودش برد. خصوصاً که رفتارش با بچه‌های ازدواج اولم هم خیلی خوب بود». اما کپلر به جستجو ادامه داد.

دوستان و بستگان کپلر مدام افراد جدیدی را با او آشنا می‌کردند و کپلر هم به آشنایی با هیچ‌کدام نه نمی‌گفت، اما همیشه دو دل بود. فکر و ذکرش با نفر پنجم بود. در نهایت و بعد از یازده بار خواستگاری، جستجو را متوقف کرد. «وقتی داشتم به رگنسبورگ[2] برمی‌گشتم، رفتم پیش خانم پنجم و راز دلم رو گفتم. بهم جواب مثبت داد». کپلر و سوزانا روتینگر[3] با هم ازدواج کردند و شش فرزند دیگر هم آوردند و به خوبی و خوشی در کنار هم زندگی کردند.

کپلر و مایکل هر کدام به نوعی مستقیماً ساده‌سازی‌های مسئلهٔ منشی را برای

1. Johannes Kepler

۲. Regensberg؛ شهری در شرق ایالت باواریا -م.

3. Susanna Reuttinger

یافتن شریک زندگی تجربه کردند. در شکل کلاسیک مسئلهٔ منشی، متقاضیان پیشنهاد را همیشه می‌پذیرند و تجربهٔ شنیدن پاسخ منفی از سوی مایکل پیش نمی‌آید. هم‌چنین، بر خلاف استراتژی که کپلر پیش گرفت نمی‌شود دوباره به گزینه‌ای که رد شده برگشت.

در دهه‌هایی که از معرفی مسئلهٔ منشی می‌گذرد، سویه‌های گوناگونی از این مسئله مطالعه شده و برای تعدادی از شرایط مختلف استراتژی‌هایی برای توقف بهینه مشخص شده است. مثلاً امکان رد شدن پیشنهاد، راهکاری سرراست و ریاضیاتی دارد: زود و زیاد پیشنهاد بده. اگر احتمال رد شدن پیشنهاد ٪۵۰ باشد، با همان تحلیل ریاضیاتی که به قانون ٪۳۷ منجر شد به این نتیجه می‌رسیم که پس از فقط یک چهارم جستجو، پیشنهادها را شروع کنید. اگر پاسخ منفی گرفتید، به هرکسی که بعد از آن بهترین گزینهٔ تاکنون بود پیشنهاد دهید تا بالاخره فردی پیشنهاد شما را بپذیرد. با این استراتژی، احتمال موفقیت شما -دادن پیشنهاد به بهترین متقاضی موجود و پذیرش از سوی او- باز هم ٪۲۵ خواهد بود. این، برای سناریویی که دو مانع «رد پیشنهاد» و «دشواری ایجاد استانداردی برای پیشنهاد» را ترکیب می‌کند، شانس کمی نیست.

کپلر خودش را برای «بی‌قراری و تردید»ی که باعث ادامهٔ جستجو شد، سرزنش می‌کرد. در نامه‌ای به دوستی نزدیک اشاره کرد «واقعاً برای قلب ناآروم من راهی جز اینکه بفهمم برآورده کردن این همه نیاز، نشدنیه وجود نداشت تا به سرنوشت راضی بشه؟» اینجا هم البته فرضیهٔ توقف بهینه راهی برای تسلای خاطر کپلر دارد. در شرایطی که امکان برگشت به گزینه‌های رد شده وجود داشته باشد، «بی‌قراری و تردید» بخشی از بهترین استراتژی است، و نه نشانه‌ای از افول اخلاقی و روانی. اگر بتوانید به گزینه‌های پیشین برگردید الگوریتم بهینه نرمشی کوچک در قانون «دور بزنم می‌خرم» ایجاد می‌کند: دورهٔ بدون تعهدی طولانی‌تر و برنامه‌ای برای بازگشت.

برای مثال فرض کنید اگر در همان قرار اول پیشنهاد بدهید پذیرفته می‌شود، اما اگر معطل کنید، نیمی از اوقات پیشنهاد شما رد می‌شود. در این شرایط از لحاظ ریاضی ثابت می‌شود که بهتر است بدون اینکه تعهدی بدهید ٪۶۱ گزینه‌ها را بررسی کنید، و سپس با رسیدن به بهترین گزینهٔ تاکنون، در ٪۳۹ بعدی پیشنهاد بدهید. اگر همهٔ گزینه‌ها را بررسی کردید و هنوز مثل کپلر دلبری نداشتید، سراغ بهترین گزینه‌ای بروید که از آن گذشتید. اینجا هم تقارن بین استراتژی و نتیجه برقرار است

و در شرایطی که بتوانید به گزینه‌های قبلی برگردید، ٪۶۱ شانس دارید که بهترین گزینهٔ موجود را انتخاب کنید.

تفاوت بین مسئلهٔ کلاسیک منشی و واقعیت؛ برای کپلر پایان خوشی را رقم زد. در واقع این نرمش برای مایکل هم خوب بود. بعد از پاسخ منفی، او درسش را تمام کرد و شغلی در آلمان پیدا کرد. آنجا «توی یه بار با دختر خوشگلی آشنا شدم و در همون نگاه اول عاشقش شدم. سه هفتهٔ بعد هم‌خونه شدیم و ازش خواستم مدتی با هم بریم آمریکا زندگی کنیم. اون هم پذیرفت. شش سال بعد هم با هم ازدواج کردیم».

اطلاعات کامل: قدرت تمایز بین خوب و بد

سویه‌هایی که تاکنون از مسئلهٔ منشی بررسی کردیم -امکان رد پیشنهاد و امکان بازگشت به گزینه‌های پیشین- مفروضات شکل کلاسیک مسئله را کاملاً تغییر می‌دهند. اما بهترین رویکرد این سویه‌ها هم مشابه حالت اصلی مسئله است: برای زمانی معین بگرد و سپس آمادهٔ انتخاب باش.

اما پیش‌فرض بسیار مهم دیگری را هم می‌توان زیر سؤال برد. ما از پیش درکی عینی از اینکه متقاضی خوب یا بد یعنی چه نداریم. هم‌چنین، وقتی بین دو متقاضی مقایسه می‌کنیم می‌دانیم کدام بهتر است، اما نمی‌دانیم چقدر بهتر است. همین واقعیت باعث می‌شود فاز «گشتن» ناگزیر باشد. فازی که در آن ریسک از دست دادن متقاضی محشر اما سحرخیزی را می‌پذیریم که زودتر از دیگران مصاحبه می‌شود. ریاضی‌دان‌ها به این جور بازی‌های توقف بهینه «بازی‌های بدون اطلاعات»[1] می‌گویند.

این چینش تفاوت فاحشی با بیشتر جستجوها به دنبال یک خانه، شریک زندگی و یا حتی منشی دارد. فرض کنید که معیاری عینی برای سنجش منشی‌ها داشتیم؛ مثلاً هر متقاضی در یک آزمون استاندارد تایپ با نمرهٔ درصدی شرکت می‌کرد که مشخص می‌کرد هر فرد بین گزینه‌های مختلف چه جایگاهی دارد. به این شکل متقاضی با امتیاز ٪۵۱ فقط کمی بالای میانگین است، و یک متقاضی با امتیاز ٪۷۵ از سه چهارم افرادی که تست داده‌اند بهتر است و قس علی هذا.

1. No-information game

فرض کنید که مجموعهٔ متقاضیان هم نمایندهٔ دقیقی از جامعهٔ کلی هستند و چولگی یا پیش‌گزینشی ندارد. هم‌چنین فرض کنید که سرعت تایپ تنها عامل تعیین‌کننده برای انتخاب منشی باشد. ریاضی‌دانان به چنین مسئله‌ای «اطلاعات کامل» می‌گویند و این، داستان را کاملاً عوض می‌کند. «هیچ تجمع تجربه‌ای برای تعیین استاندارد نیاز نیست، و گاهی می‌توان در همان ابتدا انتخاب درست داشت»[1]. مثلاً اگر اولین متقاضی ما فردی با امتیاز ۹۵٪ باشد، همان‌موقع متوجه قابلیت‌هایش می‌شویم و در لحظه استخدامش می‌کنیم؛ با فرض اینکه متقاضی با امتیاز بالاتر در گزینه‌های ما نباشد.

پیچیدگی کار دقیقاً همین‌جاست. اگر باز هم هدف اصلی گرفتن بهترین فرد در بین متقاضیان باشد، باید احتمال وجود متقاضی ندیدهٔ بهتر را در نظر بگیریم. اما با داشتن اطلاعات کامل می‌توانیم این احتمال را مستقیماً اندازه‌گیری کنیم. برای مثال احتمال اینکه امتیاز متقاضی بعدی ۹۶٪ یا بیشتر باشد همیشه برابر با ۵٪ است. از این رو، تصمیمِ توقف یا ادامهٔ بررسی، کاملاً به تعداد متقاضیان باقی‌مانده بستگی دارد. اطلاعات کامل ما را از گشتن پیش از انتخاب بی‌نیاز می‌کند. در عوض می‌توانیم از قانون آستانه[2] استفاده کنیم. بر اساس این قانون، اولین متقاضی را که امتیازش از حد مشخصی بالاتر بود، انتخاب می‌کنیم. اگرچه نیازی نیست که تعدادی از کاندیداها را ببینیم تا این آستانه را تعیین کنیم، اما لازم است همیشه آگاه باشیم که چقدر فرصت بیشتر برای جستجو داریم.

محاسبات نشان می‌دهد وقتی تعداد زیادی متقاضی در چنته دارید، گزینه‌های خوب را هم باید به امید یافتن گزینه‌ای بهتر رد کنید. اما با کاهش تعداد گزینه‌ها، باید به فردی که صرفاً از میانگین بهتر است رضایت دهید. خبر کوتاه است و جان‌کاه: وقتی که مادر نیست به زن‌بابا باید ساخت. و از سوی دیگر هر وقت نازکش داری، نازکن. در هر دو حالت، محاسبات نشان می‌دهد که سطح انتظارات را دقیقاً کجا تنظیم کنید.

ساده‌ترین راه درک مسئله در این سناریو این است که از انتها شروع کنید و به عقب بازگردید. اگر به آخرین متقاضی رسیدید، چاره‌ای جز انتخاب او ندارید. اما وقتی متقاضیِ یکی مانده به آخر را بررسی می‌کنید باید بپرسید آیا از ۵۰٪ متقاضیان بهتر

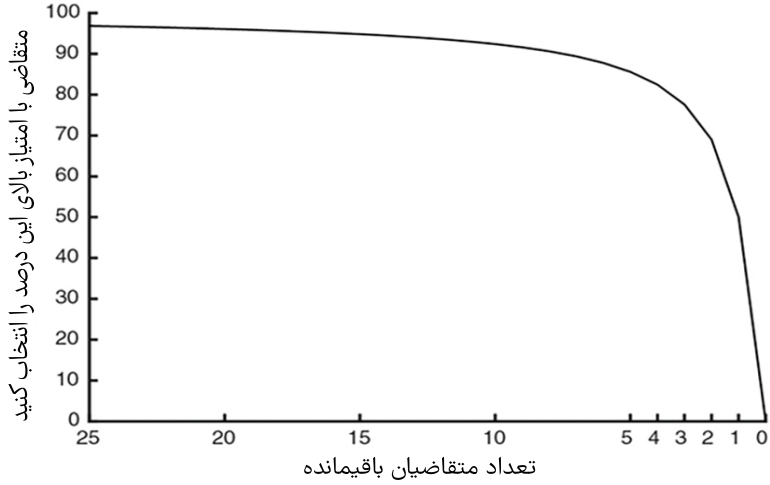
---

۱. بخشی از مقالهٔ بدوی توضیح مسئله در سال ۱۹۶۶ -م.

2. Threshold Rule

هست؟ اگر بله، استخدامش کنید. اگر نه، بهتر است شانس خود را با نفر آخر هم امتحان کنید، چرا که طبق تعریف احتمال اینکه او بهتر یا مساوی میانگین باشد، ۵۰ درصد است. به همین شکل، چهارمین متقاضی از آخر را فقط وقتی انتخاب کنید که امتیازش بالای ٪۶۹ باشد، و پنجمین متقاضی از آخر را اگر امتیازش بالای ٪۷۸ باشد، و همین‌طور هرچه به عقب و گزینه‌های بیشتر برمی‌گردید، مشکل‌پسندتر باشید. در هیچ شرایطی کسی را انتخاب نکنید که از میانگین پایین‌تر است، مگر هیچ گزینهٔ دیگری نداشته باشید. و چون هنوز به دنبال انتخاب بهترین گزینهٔ موجود هستید، کسی را انتخاب نکنید که از دیگر گزینه‌های بررسی شده بهتر نیست.

احتمال یافتن بهترین گزینه در این نسخهٔ مسئلهٔ منشی با اطلاعات کامل به ٪۵۸ می‌رسد. هنوز تا اطمینان خاطر فاصلهٔ زیادی‌ست، اما خیلی بهتر از نرخ موفقیت ٪۳۷ است که در بازی بدون اطلاعات با قانون ٪۳۷ به دست می‌آمد. اگر همهٔ اطلاعات لازم را داشته باشید، هرچقدر هم که تعداد متقاضیان زیاد شود، بیشتر اوقات موفق می‌شوید.



شکل ۲- آستانهٔ توقف بهینه در مسئلهٔ منشی با اطلاعات کامل

و به این شکل بازی‌های با اطلاعات کامل رهاوردی غیرمنتظره و عجیب برای ما دارند: احتمال پیدا کردن گنج بیشتر از یافتن عشق واقعی است. اگر شریک زندگی‌تان را بر اساس هر معیار عینی -مثل دهک درآمدی- بسنجید، اطلاعات بسیار بیشتری

در دسترستان است تا وقتی که بر اساس پاسخ‌های احساسی مبهمی (عشق) جستجو کنید که برای سنجش نیاز به تجربه و مقایسهٔ هم‌زمان دارد.

برای تغییر راهکار مسئله از «قانون گشتن و انتخاب» به «قانون آستانه» نباید حتماً دنبال سرعت تایپ یا درآمد سالانه باشید. هر سنجه‌ای که اطلاعات دقیقی از جایگاه نسبی متقاضی در یک جامعهٔ بزرگ آماری بدهد کافی است تا شانس انتخاب بهترین گزینهٔ موجود افزایشی چشم‌گیر داشته باشد.

با تغییر دیگر مفروضات مسئلهٔ منشی، سویه‌های دیگری از این مسئله ایجاد می‌شود که با چالش‌های واقعی یافتن شریک زندگی یا منشی هم‌راستاترند. اما درس‌آموخته‌های توقف بهینه منحصر به قرارهای عاشقانه و استخدام نیست. تلاش برای انتخاب بهترین گزینه وقتی که با آن‌ها یکی یکی مواجه می‌شوید ساختار اصلی مسائلی مثل فروش خانه، پارک کردن خودرو و خروج از مسابقهٔ برده است. مسائلی که همه به شکلی حل‌شده هستند.

کِی بفروشیم؟

با تغییر دو جنبه از مسئلهٔ کلاسیک منشی، از دنیای قرارهای عاشقانه به بنگاه املاک پا می‌گذاریم. پیش‌تر از منظر مسئلهٔ توقف بهینه به اجارهٔ آپارتمان نگاه کرده بودیم، اما تملک ساختمان هم دست کمی از آن ندارد.

فرض کنید می‌خواهید خانه‌تان را بفروشید. بعد از سر و کله زدن و مشورت با چند بنگاه املاک، دستی به سر و روی خانه می‌کشید و خانه را برای فروش آگهی می‌کنید. به تدریج بازدید و پیشنهاد مشتری‌ها شروع می‌شود. هر مشتری که پیشنهادی می‌دهد، باید تصمیم بگیرید که پیشنهاد را می‌پذیرید یا رد می‌کنید. اما رد کردن مشتری هزینه دارد. یک هفته یا حتی یک ماه دیگر باید قسط وام خانه را بدهید تا مشتری بعدی بیاید و هیچ تضمینی هم نیست که پیشنهاد بعدی بهتر باشد.

فروش خانه شبیه بازی با اطلاعات کامل است. ارزش عینی پیشنهادها را می‌دانیم که مشخص می‌کند کدام پیشنهاد بهتر است و چقدر با باقی پیشنهادها متفاوت است. به علاوه مظنهٔ بازار را هم داریم که کمک می‌کند دامنهٔ تقریبی پیشنهادهای مورد انتظار را پیش‌بینی کنیم. این دامنه، اطلاعاتی «درصدی» مشابه آنچه در آزمون تایپ داشتیم

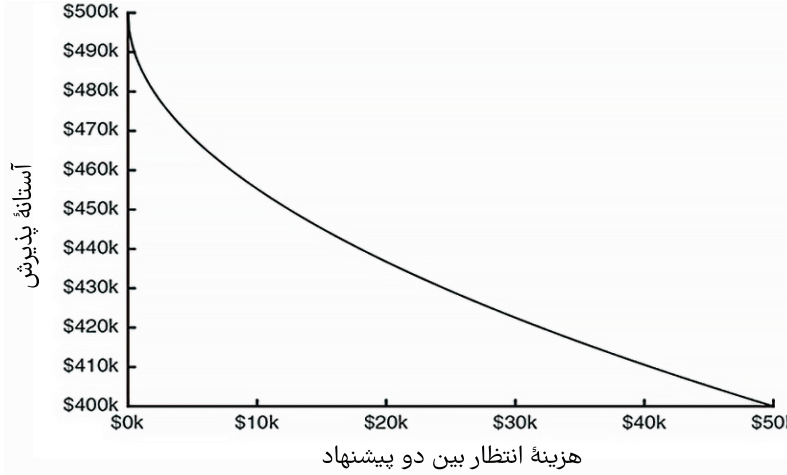
به ما می‌دهد. تفاوت اینجاست که الان هدف ما صرفاً انتخاب بهترین پیشنهاد نیست بلکه باید بیشترین خروجی را از کل فرآیند داشته باشیم. وقتی انتظار هزینهٔ مشخصی دارد، یک پیشنهاد خوب امروز، سرتر از پیشنهادی است که کمی بهتر باشد و چند ماه دیگر داده شود.

با داشتن این اطلاعات دیگر نیازی نیست دوره‌ای برای تعیین آستانهٔ پذیرش پیشنهادها را بدون تعهد بررسی کنیم. بلکه می‌توانیم با آستانه‌ای برای پذیرش شروع کنیم، هر پیشنهادی زیر آن را رد کنیم، و اولین پیشنهاد بالاتر از آستانه را بپذیریم. بدیهی است که اگر اندوختهٔ ما برای پرداخت وام محدود باشد، یا تعداد پیشنهادهای مورد انتظارمان محدود باشد، با نزدیک شدن به این محدودیت‌ها باید سطح استانداردمان را پایین بیاوریم. برای همین است که خریدارها به دنبال «فروشندهٔ واقعی» هستند. اما اگر هیچ محدودیتی باعث نشود به این فکر کنیم که کف‌گیر به ته دیگ خورده، می‌توانیم صرفاً روی تحلیل هزینه-فایدهٔ بازیِ صبر تمرکز کنیم.

بیایید ساده‌ترین حالت را بررسی کنیم: شرایطی که در آن بازهٔ قیمتی پیشنهادها را می‌دانیم، و توزیع پیشنهادها در این بازه یکنواخت است. اگر نگران این نباشیم که پیشنهادها یا پس‌اندازمان تمام شود، می‌توانیم فقط به این فکر کنیم که با صبر کردن برای یک پیشنهاد بهتر، چه چیزهایی را به دست می‌آوریم یا از دست می‌دهیم. اگر پیشنهاد فعلی را رد کنیم، آیا احتمال گرفتن پیشنهاد بهتر ضرب‌در انتظار ما از میزان بالاتر بودن پیشنهاد، به هزینه‌های صبر کردن می‌چربد؟ محاسبات بسیار مشخص است و تابعی از هزینهٔ فرصت صبر کردن برای یک پیشنهاد برای تعیین قیمت توقف به ما می‌دهد.

چه بخواهید عمارتی شاه‌نشین را بفروشید و چه زاغه‌ای محقر، در محاسبات فرقی نمی‌کند. تنها چیزی که در محاسبات تأثیر می‌گذارد، فاصلهٔ بین بالاترین و پایین‌ترین پیشنهادی است که احتمال دارد بگیرید. اگر چند عدد واقعی را در معادله‌ها بگذاریم، می‌توانیم ببینیم که این الگوریتم چقدر مسئله را برای ما واضح می‌کند. فرض کنید که دامنهٔ مورد انتظار ما برای پیشنهادها از ۴۰۰ هزار دلار تا ۵۰۰ هزار دلار است. اگر هزینهٔ انتظار ناچیز باشد، می‌توانیم در پذیرش پیشنهادها خیلی سخت‌گیر باشیم. اگر هزینهٔ انتظار بین گرفتن دو پیشنهاد فقط یک دلار باشد، آستانهٔ پذیرش ما ۴۹۹ هزار و ۵۵۲ دلار و ۷۹ سنت است و نه یک سنت کم‌تر. اگر هزینهٔ انتظار بین هر دو پیشنهاد ۲۰۰۰

دلار باشد، باید هر پیشنهادی بهتر از ۴۸۰ هزار دلار را بپذیریم. در بازار راکدی که هزینهٔ انتظار بین دو پیشنهاد ۱۰ هزار دلار باشد، هر پیشنهادی بالای ۴۵۵ هزار و ۲۷۹ دلار را باید بپذیریم. در نهایت، اگر هزینهٔ انتظار بین دو پیشنهاد بیشتر یا مساوی نیمی از دامنهٔ پیشنهادها باشد -در اینجا ۵۰ هزار دلار و بیشتر- صبرکردن هیچ سودی ندارد؛ بهترین راه این است که اولین پیشنهاد را بپذیریم و کار را یک‌سره کنیم. کاچی به از هیچی.



شکل ۳- آستانهٔ توقف بهینه در مسئلهٔ فروش خانه

در این مسئله باید توجه داشته باشیم که آستانهٔ توقف بهینه فقط به هزینهٔ جستجو مرتبط است. چون احتمال اینکه پیشنهاد بعدی مطلوب باشد -و هزینهٔ دریافتن آن- همیشه ثابت است، دلیلی ندارد که قیمت آستانهٔ توقف با ادامهٔ جستجو کم‌تر شود. ما یک‌بار این آستانه را پیش از شروع تعیین می‌کنیم، و تا انتها با همان آستانهٔ توقف بهینه پیش می‌رویم.

لورا آلبرت مکلی[1] که خود متخصص بهینه‌سازی در دانشگاه ویسکانسین در مدیسون است به یاد می‌آورد که هنگام فروش خانه‌اش از دانش خود در مسائل توقف بهینه استفاده کرد. «اولین پیشنهادی که گرفتیم خیلی خوب بود، اما چون می‌خواستن

1. Laura Albert McLay

یک‌ماه زودتر خونه رو تحویل بدیم خرج زیادی روی دست‌مون می‌گذاشت. یک پیشنهاد جذاب دیگه هم بود. اما در نهایت تصمیم گرفتیم که صبر کنیم تا پیشنهاد دندون‌گیر دیگه‌ای پیدا بشه.» برای خیلی از فروشنده‌ها رد کردن یک یا دو پیشنهاد خوب کاری بسیار دشوار است، خصوصاً اگر اولین پیشنهادهای متعاقبش بدتر باشند. اما مکلی خون‌سرد و مسلط به کار خود ادامه داد: «البته اگر نمی‌دونستم که از لحاظ علمی هم تصمیمم درسته کار خیلی خیلی سخت‌تر می‌شد.»

این قوانین هر جایی که در آن دنباله‌ای از پیشنهادها وجود داشته باشند و جستجو یا انتظار برای پیشنهاد بعدی هزینه داشته باشد صادق است. در نتیجه نمونه‌های مرتبط آن بسیار فراتر از فروش خانه است. برای مثال، اقتصاددان‌ها از این الگوریتم برای مدل‌سازی جستجوی افراد برای شغل استفاده می‌کنند و در آن به خوبی به این تناقض ظاهری پاسخ می‌دهند که چرا متقاضیان بیکار و فرصت‌های شغلی خالی هم‌زمان وجود دارند.

در واقع، این سویه‌های مسئلهٔ توقف بهینه ویژگی جالب دیگری هم دارند. در جستجوی کپلر برای عشق، قابلیت «بازگشت» به یک فرصت پیشین بسیار حیاتی بود. اما در فروش خانه و یافتن شغل، حتی اگر بتوانید سراغ پیشنهادهای قبلی بروید و آن‌ها هم حتماً بپذیرند، هرگز نباید این کار را بکنید. چیزی که قبل از این، کم‌تر از آستانهٔ پذیرش شما بوده قرار نیست الان به آن رسیده باشد. بهایی که برای جستجو پرداختید، هزینهٔ از دست رفته است. نرمش به خرج ندهید، مسئله را دوباره حل نکنید، و به عقب بازنگردید.

کی پارک کنیم؟

> سه مسئلهٔ اجرایی اصلی در پردیس دانشگاه روابط دانشجویان، امکانات ورزشی برای فارغ‌التحصیلان و پارکینگ برای پرسنل است.
>
> *ـ کلارک کر، رئیس دانشگاه برکلی ۱۹۵۸-۱۹۶۷*

خودرو حوزهٔ دیگری است که در آن مسائل توقف بهینه زیاد به چشم می‌خورند؛ و بازگشت به عقب کار عاقلانه‌ای نیست. رانندگان از ابتدا در ادبیات مسئلهٔ منشی حضور

داشتند و چارچوب حرکت مداوم رو به جلو هر تصمیم مرتبط با خودرو را به شکلی از مسائل توقف تبدیل می‌کند: جستجو برای رستوران، یافتن دستشویی عمومی و البته یافتن جای پارک که بحرانی‌ترین مسئله برای رانندگان شهری است. دانلد شوپ[1]، استاد برنامه‌ریزی شهری دانشگاه UCLA و به تعبیر مجلهٔ لس‌آنجلس‌تایمز «سلطان پارکینگ»، بهترین کسی بود که برای بررسی این موضوع می‌توانستیم پیدا کنیم.

وقتی برای دیدار دانلد از شمال کالیفرنیا به سمت جنوب حرکت کردیم به او اطمینان خاطر دادیم که برای ترافیک پیش‌بینی نشده به اندازهٔ کافی زمان در نظر گرفته‌ایم. او پاسخ داد «به نظرم بهتره جای ترافیک پیش‌بینی نشده، برای ترافیک پیش‌بینی شده برنامه‌ریزی کنید». همه شوپ را به کتاب *هزینه‌های پارکینگ مجانی* می‌شناسند. او تلاش زیادی کرد تا بحث و ادراک عمومی دربارهٔ مفهوم رانندگی و رسیدن به مقصد شکل بگیرد.

باید با رانندهٔ بیچاره هم‌دردی کرد. در مدل شوپ، پارکینگ ایدئال پارکینگی است که تعادلی ظریف بین «نرخ پارکینگ»، زمان و دشواری پیاده‌روی از پارکینگ، زمان لازم برای جستجوی پارکینگ (که به مقصد، زمان روز و... بسیار وابسته است)، و هزینهٔ بنزین مصرف شده برای جستجو برقرار کند. وقتی تعداد سرنشینان تغییر کند، معادله هم تغییر می‌کند. زیرا آن‌ها می‌توانند هزینه‌های پارکینگ و بنزین را دنگی حساب کنند، اما زمان جستجو و پیاده‌روی تقسیم نمی‌شود. راننده باید در نظر بگیرد که هرجا پارکینگ بیشتری باشد، تقاضای بیشتری هم دارد؛ پارکینگ مولفه‌ای از نظریهٔ بازی‌ها را دارد: همان‌طور که شما تلاش می‌کنید از بقیه پیشی بگیرید، دیگران هم بیکار ننشسته‌اند[2]. با این حساب، بسیاری از چالش‌های پارک کردن خودرو به نرخ اشغال برمی‌گردد. نرخ اشغال، نسبت جای پارک‌های اشغال شده به تمام جاهای پارک است. وقتی نرخ اشغال پایین است، یافتن جای پارک مناسب کار سختی نیست. وقتی نرخ اشغال بالاست، صرف یافتن جایی برای پارک چالش بزرگی می‌شود.

به نظر شوپ، بسیاری از دردسرهای یافتن جای پارک از عواقب پیاده‌سازی سیاست‌هایی است که باعث نرخ اشغال‌های بالا شده‌اند. اگر هزینهٔ پارک در مکانی خاص خیلی کم (یا خدای نکرده مجانی) باشد، به جای پارک در جایی کمی دورتر و قدم

1. Donald Shoup

۲. در فصل ۱۱ دربارهٔ دشواری‌های محاسباتی نظریهٔ بازی‌ها بیشتر می‌خوانید.

زدن تا مقصد نهایی، انگیزهٔ زیادی برای پارک کردن در آنجا ایجاد می‌شود. اما وقتی همه می‌خواهند آنجا پارک کنند بسیاری با پارکینگی پر مواجه می‌شوند و برای پیدا کردن جایی در آن حوالی وقت و بنزین زیادی را هدر می‌دهند.

در راهکار شوپ پارکومترهایی هستند می‌توانند قیمت را بر اساس تقاضا بالا ببرند (این پارکومترها در مرکز سان‌فرانسیسکو نصب شده‌اند). قیمت‌ها برای نگه‌داشتن حد مشخصی از نرخ اشغال طراحی می‌شوند. شوپ می‌گوید این نرخ باید چیزی حدود ۸۵٪ باشد که در مقایسه با پارکینگ‌های تا خرخره پر اکثر شهرهای بزرگ کاهش بسیاری است. او می‌گوید وقتی نرخ اشغال از ۹۰٪ به ۹۵٪ می‌رسد فقط ۵٪ خودروی بیشتری در خود جای داده، اما زمان جستجوی همه را دو *برابر* می‌کند.

کافی است متوجه شویم پارکینگ یک مسئلهٔ توقف بهینه است تا تأثیر کلیدی نرخ اشغال در استراتژی پارک واضح شود. با حرکت در طول خیابان، هر جای خالی که می‌بینید باید تصمیمی بگیرید: آیا باید پارک کنید، یا کمی به مقصد نزدیک‌تر شوید و شانستان را امتحان کنید؟

فرض کنید در جاده‌ای بی‌انتها هستید که جای پارک‌ها در طول مسیر به صورت یک‌نوا توزیع شده. هدف شما این است که فاصلهٔ پیاده‌روی بین جای پارک و مقصد نهایی را کمینه کنید. در این حالت راهکار، قانون بگرد و انتخاب کن است. در این شرایط باید تمام جای پارک‌های خالی که از مقصد نهایی تا میزان مشخصی دورترند را رها کنید، و وارد اولین پارکینگ خالی بعد از آن شوید. فاصله‌ای که حد بین گشتن و انتخاب است به نسبت پارکینگ‌هایی که احتمالاً پُرند یا همان نرخ اشغال وابسته است. فاصلهٔ مناسب برای انتخاب بر اساس نرخ اشغال در شکل ۴ مشخص شده است.

نرخ اشغال جای پارک	تا این تعداد جای پارک به مقصد نزدیک شوید و اولین جای خالی را انتخاب کنید
0	0
50	1
75	3
80	4
85	5
90	7
95	14
96	17
97	23
98	35
99	69
99.9	693

شکل ۴- انتخاب بهینهٔ جای پارک

اگر این خیابان بی‌انتها در کلان‌شهری با نرخ اشغال ۹۹٪ باشد، با تنها یک درصد جای پارک خالی، شما باید اولین جای خالی که حدود ۷۰ ماشین فاصله دارد (چیزی حدود ۴۰۰ متر) را بچسبید. اما اگر شوپ کارش را بکند و نرخ اشغال به ۸۵٪ کاهش پیدا کند، قبل از ۷ دهنه مغازه مانده به مقصدتان نیازی نیست دنبال جای پارک بگردید.

اکثر مسیرهای ما در جاده‌های مستقیم بی‌انتها نیست. برای همین، محققان برای شکل‌های دیگر این مسئله تعدیلاتی را نسبت به حالت اولیه در نظر گرفتند. مثلاً شرایطی که راننده می‌تواند مسیر را دور بزند، یا زمانی که با نزدیک‌تر شدن به مقصد، پارکینگ‌های خالی کم‌تر می‌شوند، یا وقتی که با راننده‌های دیگری در همان مسیر در رقابتید. در هر صورت، هرچه جاهای خالی بیشتر باشد، کار ساده‌تر است. این یک درس‌آموخته برای سیاست‌گذاران شهر است: مسئلهٔ پارکینگ تنها یک مسئلهٔ بهینه‌سازی نیست که در آن بهره‌وری (نرخ اشغال) یک منبع (جای پارک) را بهینه کنیم. علاوه بر آن یک *فرآیند* -مسئلهٔ توقف بهینه- است که توجه و زمان و بنزین مصرف می‌کند و آلودگی و ترافیک ایجاد می‌کند. سیاست درست، به تمام مسئله می‌پردازد. اتفاقاً جای پارک‌های خالی در مکان‌های پرتردد نشان می‌دهد همه‌چیز روبه‌راه است.

از شوپ پرسیدیم که آیا تحقیقاتش به بهینه‌سازی رفت‌وآمد خودش در ترافیک لس‌آنجلس به دانشگاه UCLA کمکی کرده؟ و آیا سلطان پارکینگ جهان آس پیکی در دست خودش دارد؟ او جواب داد «آره. با دوچرخه می‌رم».

کی بی‌خیال شویم؟

مجلهٔ فوربس در سال ۱۹۹۷ بوریس بِرزووسکی[1] را با ثروتی حدود ۳ میلیارد دلار، ثروتمندترین مرد روسیه شناخت. فقط ده سال قبل، او ریاضی‌دانی بود که با حقوق آکادمی دانشمندان شوروی روزگار می‌گذراند. او با روابطی که در طول تحقیقاتش بهم زده بود شرکتی راه‌اندازی کرد که تعامل بین خودروسازهای خارجی و شرکت خودروسازی دولتی اوتوواز[2] را تسهیل می‌کرد؛ و از این مسیر برای خودش دم و دستگاهی بهم زد. شرکت برزووسکی تبدیل به دلال عمدهٔ ماشین‌های تولیدی اوتوواز شد. او با استفاده از طرح‌های اقساطی از ابرتورم روبل روسیه بار خود را بست. با استفاده از سرمایه‌ای که از این شراکت به دست آورده بود، بخشی از سهام اوتوواز، و پس از آن شبکهٔ تلویزیونی ORT، و در نهایت شرکت نفتی سیبنِفت را خرید. با ورود به طبقهٔ اشراف نوکیسه (اولیگارش‌ها)، سر از سیاست درآورد و از انتخاب مجدد بوریس یِلتسین[3] در سال ۱۹۹۶ و پس از او، ولادیمیر پوتین[4] در سال ۱۹۹۹ حمایت کرد.

اما اینجا بود که ورق برگشت. کمی پس از انتخاب پوتین، برزووسکی علناً به اصلاحات قانون اساسی اعتراض کرد که باعث افزایش اختیارات رئیس‌جمهور می‌شد. انتقادهای ادامه‌دار او از پوتین باعث شد میانهٔ آن‌ها شکرآب شود. در اکتبر ۲۰۰۰، وقتی از پوتین دربارهٔ انتقادهای برزووسکی سؤال شد چنین جواب داد: «حکومت چماقی دستش داره که فقط یک‌بار می‌شه باهاش ضربه زد، اما صاف وسط پیشونی. ما هنوز از چماقمون استفاده نکردیم... اما وقتی که خیلی عصبانی بشیم در استفاده‌ش شک نمی‌کنیم.» برزووسکی ماه بعد برای همیشه از روسیه به انگلیس پناهنده شد و اعتراض‌هایش به پوتین را در آنجا ادامه داد.

---

1. Boris Berezovsky
2. AvtoVAZ
3. Boris Yeltsin
4. Vladimir Putin

برزووسکی چطور تصمیم گرفت کی زمان ترک روسیه است؟ آیا اصلاً راهی ریاضیاتی برای بررسی «خداحافظی در اوج» هست؟ قطعاً برزووسکی هم به این سؤال فکر کرده است. چون تمام سال‌هایی که ریاضی‌دان بود را فقط صرف بررسی مسئلهٔ توقف بهینه کرده بود؛ او اولین -و تاکنون تنها- کتابی را نوشته که در آن صرفاً به مسئلهٔ منشی پرداخته شده است.

مسئلهٔ خداحافظی در اوج به شکل‌های بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است. اما مناسب‌ترین حالت به موضوع برزووسکی -با عذرخواهی از تمام نوکیسه‌های روس- به «مسئلهٔ دزد» معروف است. در این مسئله، یک دزد فرصت چندین دستبرد متوالی را دارد. هر دزدی غنیمتی دارد و هر بار هم شانسی برای دستگیر شدن هست. اما اگر دزد دستگیر شود تمام منافع جمع شده را از دست می‌دهد. او برای بیشینه کردن دستاورد مورد انتظارش از چه الگوریتمی باید استفاده کند؟

این خبر خوبی برای نویسنده‌های فیلم‌های جنایی نیست، اما وقتی گروه دزدان تلاش می‌کنند دزد قدیمی بازنشسته را به یک کار نهایی ترغیب کنند، دزد دانا کافی است فقط نگاهی به اعداد بیندازد. به علاوه، نتایج خیلی شهودی هم هستند: تعداد دفعاتی که می‌توانید دزدی کنید برابر است با احتمال موفقیتتان، تقسیم بر احتمال شکستتان. اگر شما دزدی حرفه‌ای باشید و ۹۰٪ مواقع قسر در بروید (و ۱۰٪ احتمال شکست و باخت همه‌چیز باشد) باید بعد از بار دزدی خودتان را بازنشسته کنید. اما یک تازه‌کار شل‌دست که احتمال موفقیتش پنجاه پنجاه است چه؟ بار اول چیزی برای از دست دادن ندارید، اما شانس خود را دوباره امتحان نکنید.

با وجود خبرگی در توقف بهینه، داستان برزووسکی پایان تلخی داشت. او در مارس ۲۰۱۳ مرد. محافظش جنازه‌اش را با طنابی دورگردن در حمام قفل شدهٔ خانه‌اش در برکشایر پیدا کرد. نتیجهٔ نهایی کالبدشکافی خودکشی بود: پس از باختن بخش اعظم دارایی‌اش در پرونده‌های عظیم قانونی با دشمنانش در روسیه، خودش را حلق‌آویز کرد. شاید او باید زودتر رها می‌کرد، پس از جمع کردن چند ده میلیون دلار و پیش از ورود به سیاست. اما افسوس که این، رسم او نبود. لئونید بوگوسلاوسکی[1]، یکی از دوستان ریاضی‌دانش، داستانی از جوانی‌شان تعریف می‌کند. زمانی که هر دو محققان

1. Leonid Boguslavsky

جوانی بودند. در یک سفر، قایقی که می‌خواستند برای اسکی روی آب از آن استفاده کنند خراب شد. دیوید هافمن[1] این داستان را در کتابش *اشراف نوکیسه (اولیگارش‌ها)*[2] این‌گونه روایت می‌کند:

> در حالی‌که دوستانشان در ساحل آتشی روشن کرده بودند، بوگوسلاوسکی و برزووسکی به اسکله رفتند تا موتور قایق را تعمیر کنند... سه ساعت بعد، موتور را بازکردند و دوباره بستند. باز هم موتور کار نمی‌کرد. آن‌ها بیشتر مهمانی را از دست دادند. اما برزووسکی اصرار داشت که آن‌ها *باید* تلاش کنند. بوگوسلاوسکی می‌گوید: «ما به این در و اون در زدیم اما برزووسکی ول‌نکن‌تر از این حرف‌ها بود.»

جالب اینجاست که هرگز بی‌خیال نشدن هم در ادبیات توقف بهینه بررسی شده است. شاید در نگاه اول شبیه هیچ‌یک از مسائلی که بررسی کردیم نباشد، اما در برخی از مسائل تصمیم‌گیری متوالی، هیچ قانونی برای توقف بهینه وجود ندارد. یک مثال ساده، بازی «سه به هیچ» است. در این بازی شما تمام پولتان را شرط می‌بندید. به احتمال ٪۵۰ تمام پولتان را می‌بازید، و به احتمال ٪۵۰ هم سه برابر مقداری را که شرط بستید می‌گیرید. فرض کنید شما یک دلار دارید و می‌توانید این بازی را هرچقدر دوست دارید تکرار کنید. چند بار باید بازی کنید؟ با وجود سادگی این مسئله چون با هر دفعه بازی میانگین دریافتی شما کمی بیشتر می‌شود، هیچ قانونی برای توقف بهینه‌اش وجود ندارد. مثلاً اگر شما با یک دلار وارد بازی شوید، نیمی از اوقات ۳ دلار می‌برید و نیمی از اوقات هیچ. پس امید ریاضی پولی که بعد از یک دور بازی خواهید داشت، ۱/۵ دلار است. اگر در دور اول خوش‌شانس باشید، با ۳ دلاری که به دست آوردید دو پیشامد ۹ دلار و هیچ را خواهید داشت، که میانگین بازگشت شرط‌بندی دوم را به ۴/۵ دلار می‌رساند. محاسبات نشان می‌دهد که شما باید *همیشه* به بازی ادامه دهید. اما اگر این کار را بکنید، در نهایت همه‌چیز را خواهید باخت. به جای حل، بهتر است از بعضی مسائل دوری کنید.

---

1. David Hoffman
2. The Oligarchs

توقف مدام

فقط یک بار در این دنیا زندگی می‌کنم. پس هر کار نیک و هر مهربانی را که می‌توانم برای یک هم‌نوع انجام دهم باید همین الان انجام دهم. نباید فراموش کنم یا به تعویق بیندازم، چون از این مسیر دیگر نخواهم گذشت

ـ استفان گرله[1]

بعد از ظهر را [خوش] بگذران، چون دیگر برنمی‌گردد.

ـ آنی دیلارد[2]

تا اینجا به نمونه‌های مختلف از شرایطی پرداختیم که مردم در زندگی با مسائل توقف مواجه می‌شوند. واضح است که بیشتر ما هر روز با شکلی از این مسائل دست و پنجه نرم می‌کنیم. چه هنگام یافتن شریک زندگی باشد یا پیدا کردن آپارتمان، زندگی پر از مسائل توقف بهینه است. سؤال اصلی اینجاست که آیا به خاطر تکامل یا آموزش یا شهود، واقعاً بهترین استراتژی را انتخاب می‌کنیم؟

در نگاه اول، پاسخ منفی است. ده‌ها مطالعه در این زمینه انجام شده و پاسخ همه مشابه است: افراد تمایل دارند که زودتر از حد توقف کنند و بهترین متقاضی را نادیده بگذارند. برای اینکه درک بهتری از یافته‌های این مطالعات داشته باشیم، با امنون راپوپورت[3] از دانشگاه کالیفرنیا ریورساید صحبت کردیم. او بیش از چهل سال است که روی توقف بهینه مطالعه می‌کند.

راپوپورت و همکارش دریل سیل[4] در سال ۱۹۹۰ مطالعه‌ای را انجام دادند که به مسئلهٔ کلاسیک منشی بسیار نزدیک بود. افراد در این مطالعه با اشکال مختلفی از مسئلهٔ منشی مواجه می‌شدند که هر یک بین ۴۰ تا ۸۰ متقاضی داشت. حدودا ٪۳۱ اوقات، بهترین متقاضی انتخاب شد که فاصلهٔ چندانی با حالت آرمانی ٪۳۷ ندارد.

1. Stephen Grellet
2. Annie Dillard
3. Amnon Rapoport
4. Darryl Seale

مسیری که بیشتر افراد طی می‌کردند با قانون بگرد و انتخاب کن سازگار بود، اما حدود ۸۰٪ مواقع زودتر از زمانی که باید وارد مرحلهٔ انتخاب می‌شدند.

راپوپورت از این یافته در زندگی شخصی خود استفاده می‌کند. او می‌گوید: «با وجود اینکه ذاتاً خیلی عجولم و می‌خوام اولین آپارتمانی رو که می‌بینم بگیرم، سعی می‌کنم خودم رو کنترل کنم.» و تلاش می‌کند در مواجهه با مسئله‌های توقف بهینه بر میلش برای تصمیم‌گیری سریع غلبه کند.

این شتاب‌زدگی باعث توجه به نکتهٔ دیگری می‌شود که در مسئلهٔ کلاسیک منشی در نظر گرفته نشده بود. شما در تمام زمانی که دنبال منشی هستید، منشی ندارید. به علاوه، به جای انجام کارهای خودتان، تمام روز را صرف مصاحبه‌های کاری کرده‌اید.

این شکل از هزینه، توقف زودهنگام افراد در حل مسئلهٔ منشی را در آزمایش توضیح می‌دهد. راپوپورت نشان داد که اگر هزینهٔ ملاقات با هر متقاضی فرضا ۱٪ ارزش یافتن بهترین منشی باشد، استراتژی بهینه بسیار نزدیک به نقطه‌ای می‌شود که افراد در آزمایش گشتن را به پایان می‌رسانند و انتخاب می‌کنند.

عجیب اینجاست که در آزمایش راپوپورت، جستجو هزینه‌ای نداشت. پس چرا افراد در آزمایش جوری رفتار کردند که انگار این هزینه وجود دارد؟

چون همیشه هزینهٔ زمان برای افراد وجود دارد. هزینه‌ای که از طراحی آزمایش نمی‌آید، بلکه از زندگی افراد نشأت می‌گیرد.

این هزینهٔ «درون‌زاد» جستجو -که عموماً در مدل‌های توقف بهینه منعکس نمی‌شود- می‌تواند فاصلهٔ تصمیم‌گیری‌های انسانی از این مدل‌ها را توضیح دهد. نِیل بیردِن[1] که پژوهش‌گر توقف بهینه است می‌گوید: «حوصلهٔ ما انسان‌ها بعد از جستجوی زیاد سر می‌ره. این بی‌حوصلگی غیرمنطقی نیست، اما مدل کردن دقیقش خیلی سخته».

جریان زمان همهٔ تصمیم‌گیری‌ها را به توقف بهینه تبدیل می‌کند و این، یعنی اهمیت بیشتر مسائل توقف بهینه. کتاب راهنمای جامع توقف بهینه با این جمله شروع می‌شود: «نظریهٔ توقف بهینه در مورد مسئلهٔ انتخاب زمانی برای انجام یک اقدام

1. Neil Bearden

مشخص است.» که تعریفی بسیار دقیق از شرایط انسانی است. همان‌طور که برای زمان مناسب خرید و فروش سهام تصمیم می‌گیریم، برای زمان مناسب بازکردن نوشیدنی محبوب‌مان، زمان مناسب برای قطع کردن صحبت‌های دوستانمان، و زمان مناسب برای بوسیدن دیگری هم تصمیم می‌گیریم.

با این نگاه، مهم‌ترین و باورناپذیرترین فرض بنیادین مسئلهٔ منشی -ترتیب سفت و سخت، و مسیر یک‌طرفهٔ اجتناب‌ناپذیرش- همان تعریف زمان است. اساس آشکار مسئلهٔ توقف بهینه، همان بنیان مخفی زندگی است. همان است که ما را مجبور می‌کند بر اساس پیشامدهایی که اصلاً ندیدیم تصمیم بگیریم. همان است که با وجود تلاش برای بهینگی، نرخ‌های بالای شکست را به ما می‌قبولاند. هیچ چیز تکرار نمی‌شود. ممکن است که گزینه‌های *مشابهی* به تورمان بخورد، اما هرگز، همان قبلی نیست. تردید و بی‌عملی به اندازهٔ تصمیم‌ها بازگشت‌ناپذیرند. نسبت راننده به فضا در جادهٔ یک‌طرفه شبیه نسبت ما به بعد چهارم است: فقط یک بار این راه را می‌رویم.

عموماً فکر می‌کنیم که تصمیم‌گیری عقلایی یعنی بررسی جامع تمام گزینه‌ها، سنجش دقیق آن‌ها و انتخاب بهترین. اما در عمل، وقتی که ساعت برنمی‌گردد، کمتر وجهی از تصمیم‌گیری یا حتی تفکر به این اندازه مهم است که کِی بس کنیم.