تأثیر اینترنت بر ریاضیات•

والتر ویاینجر و ورن پاکسن*
ترجمهٔ افرا علیشاهی

مقدمه

اینترنت در سالهای اخیر و به‌ویژه از نخستین روزهای پیدایش وب[1]، تحولی شگفت‌انگیز یافته است. این واقعیت نه تنها در مجلات تخصصی، بلکه در نشریات عمومی نیز به‌خوبی منعکس شده است. آنتونی‌ـمیشل رونکوفسکی، مدیر اجرایی پیشین انجمن اینترنت معتقد است که «اینترنت انقلابی است خاص خود»، با رشدی بی‌سابقه، ساختاری که از فرط ناهمگنی بی‌همتاست، و وضعیت ترافیکی که نه تنها غیرقابل پیش‌بینی است، بلکه گاه آشوب‌گونه می‌نماید. در عین حال، عقیدهٔ عمومی این است که در قلب عملکرد اینترنت، ریاضیات نهفته است. به هر حال ریاضیات زبان کامپیوتر است، و اینترنت اکنون دهها میلیون کامپیوتر را به‌هم پیوسته است، و این میزان هر سال دو برابر می‌شود [Lo98]. با این‌همه اینترنت دنیای نوی است که در آن واقعیت مهندسی بر ریاضیاتِ معطوف به سنت غلبه کرده است و نیازمند «دگرگونیهایی در الگوها»ست که ترکیبی از «زیبایی» ریاضی و توان عملی زیاد مهندسی اینترنت را میسر سازد. در این مقاله خواهیم دید که تفاوتهای بنیادی اینترنت با شبکه‌های صوتی متعارف کدام‌اند، اینترنت در روند تکامل خود چگونه در مقیاس کوچک، یا بزرگ بر دنیای ریاضیات اثر می‌گذارد ــ هم بر شیوهٔ انجام کار ریاضی و هم بر نوع ریاضیاتی که انجام می‌شود (برای درک خود شبکه)، و چرا این تأثیرْ مهندسی اینترنت را به معدنی گرانبها برای امکانات تحقیقاتی نو، مهیج و جذاب در علوم ریاضی بدل کرده است [۱].

نظریهٔ تله‌ترافیک و مهندسی اینترنت

اصطلاح «نظریهٔ تله‌ترافیک[2]» در ابتدا بر همهٔ ریاضیات مورد استفاده در طراحی، کنترل، و مدیریت شبکه‌های تلفن عمومی[3] (PSTN) از قبیل استنباط آماری، مدلسازی ریاضی، بهینه‌سازی، صف‌بندی و تحلیل کارایی اطلاق می‌شد. بعدها دست‌اندرکاران این حوزه، آن را چنان تعمیم دادند که شبکه‌هایی از داده‌ها نظیر اینترنت را نیز شامل شود. بنابراین مهندسی اینترنت نیز که فعالیتی مشتمل بر طراحی، مدیریت، کنترل و عملکرد اینترنت سراسری بود، بخشی از نظریهٔ تلهٔترافیک شد و برای رسیدن به بینشی جدید و فهمی بنیادی از مخابرهٔ داده‌ها به شیوهٔ نوین بر علوم ریاضی تکیه کرد. اما از همان روزهای نخست، اینترنت بیشتر بر مهندسی و تجربه تکیه داشت و کمتر با ریاضیات و نظریه‌پردازی درگیر می‌شد. در حقیقت برخی از اعضای جامعه اینترنت به روشنی بر این باورند که اینترنت به این دلیل «کار می‌کند» که از ریاضیات ــ به‌ویژه نظریهٔ تله‌ترافیک ــ چشم پوشیده است، و در اینجا داستان جالبی نهفته است.

ریاضیات و خدمات تلفن به شیوهٔ قدیمی

احتمال آنکه فردی که ساکن یک کشور صنعتی است نتواند برای برقراری یک تماس تلفنی [۲] به خط آزاد دسترسی پیدا کند چقدر است؟ حال چقدر احتمال دارد که این فرد موفق به دستیابی به یک کارگزار[1] معروف وب بر روی اینترنت نشود؟

پاسخ این سؤالات از یک بار در ماه یا سال برای حالت اول تا یک بار در ساعت یا روز برای حالت دوم متغیر است. درواقع، نظریهٔ تله‌ترافیک سنتی ــ آن‌گونه که برای POTS (خدمات تلفن به شیوهٔ سادهٔ قدیمی)[2] به‌کار می‌رود ــ به‌زعم بعضیها از موفقترین کاربردهای تکنیکهای ریاضی در صنعت بوده است. این نظریه منجر به ایجاد شبکه‌های درجهٔ یک تلفنی شده است که به‌طور دائم متکی به کیفیت خدمات آنها هستیم و بهینه‌سازی‌های مبتنی بر این نظریه در معماری و عملیات روزمرهٔ شبکه‌های مخابراتی، امکان

۱. Web، مخفف World Wide Web

2. teletraffic 3. Public Switched Telephone Networks

1. server 2. Plain Old Telephone Service

پوشش تقریباً کامل تلفنی را در سراسر جهان صنعتی فراهم کرده است. ازجمله دلایل اصلی موفقیت عظیم نظریهٔ تله‌ترافیک و کاربردش در علم تلفن سنتی، ماهیت بسیار ایستای PSTNهای متعارف و اصل خوش‌تعریف و همیشه صادق تغییرپذیری محدود است، یعنی آن ویژگی سیستمهای همگن که در آنها می‌توان راجع به کاربران «نمونه» و رفتار «کلی» صحبت کرد و میانگینها کارایی سیستم را به‌نحو رضایت‌بخشی توصیف می‌کنند. دلیل مهم دیگر، محبوبیت خاص مدلهای پواسون در جامعهٔ مهندسی است، این جاذبه بیشتر به دلیل سادگیِ توصیف فیزیکی و تناسب عملی آنهاست: این مدلها اغلب به تعداد اندکی ورودی نیاز دارند که در عمل می‌توان آنها را به سادگی تخمین زد.

ماهیت ایستای PSTNهای سنتی این باور همگانی را به‌وجود آورده است که «قوانینی عام» بر شبکه‌های صوتی حاکم‌اند. مهمترین این قوانین ماهیت پواسونی پیامهای رسیده در نقاطی از شبکه است که در آنها ترافیک سنگینی انباشته می‌شود، نظیر شاه‌سیمهای اصلی بین مراکز تلفن. براساس این قانون، پیامهای رسیده دوبه‌دو مستقل‌اند و فواصل زمانی بین پیامها از یک توزیع نمایی با تنها یک پارامتر λ برخوردار است.

به بیان دقیقتر، اگر $X = (X_k : k \geq ۱)$ نشان‌دهندهٔ تعداد پیامهایی باشد که در بازه‌های زمانی متوالی نامتداخل با طول $\Delta t > ۰$ دریافت شده‌اند، آنگاه X یک فرایند افزایشی از نوع فرایند پواسون با پارامتر λ است اگر و تنها اگر متغیرهای تصادفی X_k مستقل باشند و همه طبق تابع زیر توزیع شده باشند:

$$P[X_k = n] = e^{-\lambda\Delta t}\frac{(\lambda\Delta t)^n}{n!}, \quad n \geq ۰ \qquad (۱)$$

مدلهایی از ترافیک نظیر فرایند پواسون که دینامیک کامل آنها را می‌توان با یک یا تعداد اندکی پارامتر توصیف نمود، *مسلک*[1] نامیده می‌شوند، و این خصیصه به دلایلی که خواهیم گفت بسیار مطلوب است.

قانون پواسون حداقل پنجاه سال اعتبار خود را در مدلسازی حفظ کرده است، و همین‌طور ناوردایی از ترافیک POTS که معلوم می‌کند که «زمانهای نگهداری» (فاصله‌های زمانی) پیامها کمابیش از یک توزیع نمایی پیروی می‌کنند. سه قانون مهم دیگر تله‌ترافیک، عبارت‌اند از اینکه: آهنگهای رشد به‌خوبی قابل پیش‌بینی هستند و امکان برنامه‌ریزی‌های دقیق کوتاه‌مدت و بلندمدت را برای ظرفیت خطوط فراهم می‌آورند؛ کنترلها و عملیات شبکه کاملاً متمرکزند، بنابراین می‌توان از اطلاعات در باره وضعیت عمومی شبکه بهره برد؛ و سرویسهای ارائه‌شده کاملاً منظم و تحت نظارت هستند.

از سوی دیگر، در محیط PSTN ایستا، اهمیتی که به اندازه‌گیریهای مستمر داده می‌شد دائماً کاهش یافته و برعکس بر نیاز به تکنیکهای تحلیلی تأکید شده است. با آنکه در ابتدا نظریهٔ تله‌ترافیک مبتنی بر مطالعات تجربی و نتایج اندازه‌گیریهای ترافیک بود که به دشواری از شبکه‌های تلفن عمومی جمع‌آوری می‌شد [۳]، به زودی این باور که فرایند پواسون و توزیع نمایی «قوانین عام» POTS هستند بر تمایل به جمع‌آوری و تحلیل داده‌های بیشتر فایق آمد. علاوه بر این، دستاوردهای جدید ریاضی مبنای فیزیکی مستحکمی برای ماهیت پواسونی پیامهای رسیده به شاه‌سیمها فراهم ساخت. به‌عنوان نمونه، قضیهٔ پالم-خینچین بیانگر آن است که برهم‌نهش بسیاری از فرایندهای بازسازی مستقل که به نحو مناسبی نرمال شده‌اند — و هر یک از آنها رسیدن پیام به یک خط تلفن واحد را توصیف می‌کنند — یک فرایند پواسون می‌سازد. مدلهای ترافیک حاصل به‌طورکلی به‌صورت ریاضی قابل پیمایش بودند و می‌شد از آنها برای پیش‌بینی دقیق بسیاری از معیارهای مهم کارایی استفاده کرد. نظریهٔ صف زاده شد. اعتماد به مدلهای ترافیک «حقیقی» از میان رفت، بر نیاز به اندازه‌گیری بیشتر ترافیک سرپوش گذاشته شد و توجه عمده بر پیشبرد نظریهٔ صف به‌عنوان یک شاخهٔ ریاضی نوپا متمرکز شد.

اما تغییراتی که اخیراً در دنیای «ایستا»ی علم تلفن رخ داده است، آسودگی خاطر ناشی از این برازندگی و موفقیت ریاضی را متزلزل کرده است. الگوهای پنجاه سالهٔ استفاده از تلفن که زیربنای موفقیت مدلهای ترافیک بوده‌اند، اکنون با پیدایش دو کاربرد نو برای شبکهٔ تلفن کاملاً بی‌اعتبار شده‌اند. این تغییرات با پیدایش نمابرها در دههٔ هشتاد آغاز شدند و با همه‌گیرشدن استفاده از وب، اهمیتی اساسی یافتند.

تغییر اساسی در آنجاست که خصوصیات آماری پیامهای تلفنی که برای انتقال نمابر و دستیابی به اینترنت استفاده می‌شوند از بنیاد با پیامهای صوتی معمول متفاوت است. این پیامها به میزان قابل ملاحظه‌ای طولانیترند و زمان آنها نسبت به یک پیام صوتی بسیار متغیر است، و تعداد آنها (مخصوصاً پیامهای دستیابی به اینترنت) اخیراً به‌نحو چشمگیری افزایش یافته است. هر دو نوع پیام، اکنون با فراساختارهای PSTN موجود که برای مدیریت پیامهای صوتی طراحی شده‌اند ناسازگارند و ایجاد آشفتگی می‌کنند. در برخی موارد «انسداد[1]» پیامها تا سطح غیرقابل قبولی افزایش یافته است، خاصه در ساعات دیرهنگام شب که بیش از همه مورد استفادهٔ پیمایشگرهای وب است، و برای آنکه پیامهای دستیابی به اینترنت شبکهٔ تلفن عمومی را اشباع نکند ناگزیر باید از روشهای سردستی مهندسی استفاده کرد. واضح است که دیگر نظریه با واقعیت همخوان نیست، در نتیجه برنامه‌ریزی ظرفیت امری خطرناک و نادقیق شده است. به بیان مختصر، صنعت در تلاش است تا ترافیک اینترنت را از PSTN جدا کند.

بدرود پواسون

بسیار تلاش شد تا پیروزی افسانه‌ای مدلسازی شبکه‌های صوتی برای شبکه‌های داده‌ای تکرار شود، اما به واقع مدلسازی شبکه‌های صوتی به هنگام اعمال بر شبکه‌های داده‌ای فاجعه به بار آورده است، تنها به یک دلیل ساده اما اساسی که آنجا که به جای انسانها، کامپیوترها با هم صحبت می‌کنند، همهٔ قوانین به هم می‌ریزد.

ترافیک صوتی نسبتاً همگن و قابل پیش‌بینی است، و از دیدگاه مخابره، مقیاسهای زمانی طولانیتری را فرا می‌گیرد. بنابراین می‌توان چند ارتباط صوتی همزمان را به‌سادگی «تسهیم» کرد تا یک سیم یا «خط» مشترک (گرانبها) را بین خود تقسیم کنند و به هر ارتباط، سهم معینی از ظرفیت خط را تخصیص دهند. هنگامی‌که یک درخواست پیام می‌رسد، به‌سادگی می‌توان تعیین کرد

1. parsimonious

1. blocking

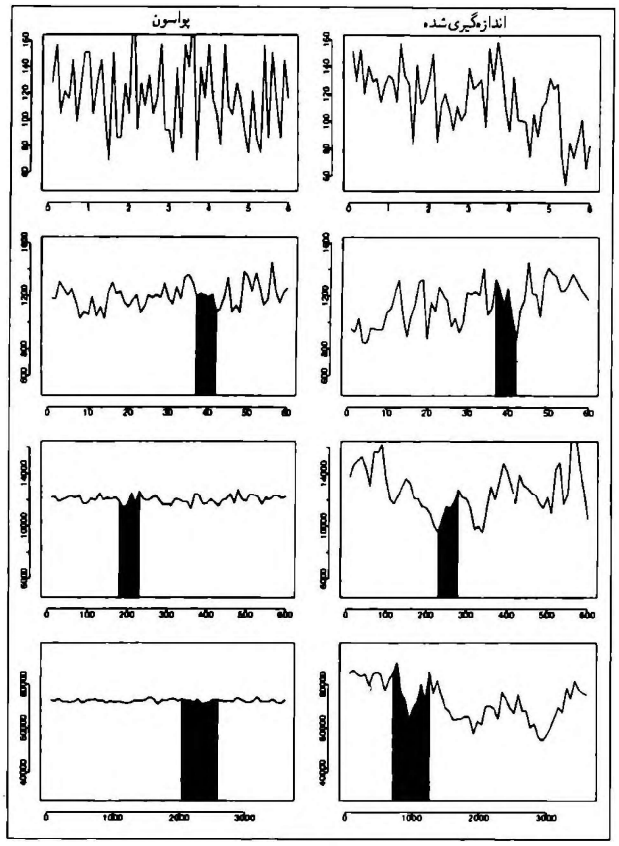
که آیا یک خط مشخص ظرفیت لازم برای تحمل بار اضافی را دارد یا خیر. در نتیجه، شبکه‌های صوتی به شیوه راه‌گزینی مداری[1] طراحی شده‌اند. در این شیوه، «مسیریابها»یی در داخل شبکه قرار دارند که ترافیک را از یک خط به خط بعدی به پیش می‌رانند تا سرانجام به مقصد برسد. مسیریابها رد هر ارتباط فعال را نگه می‌دارند و هنگامی‌که یک ترافیک جدید از راه می‌رسد، ارتباط متناظر با آن را جستجو می‌کنند تا محل ارسال ترافیک را تعیین کنند. این جداسازی، ایجاد «مدارهای مجازی» نامیده می‌شود، زیرا شبکه چنان رفتار می‌کند که گویی یک مدار مستقیم از منبع ترافیک تا مقصد آن برقرار شده است.

برخلاف ترافیک صوتی، ترافیک داده بسیار متغیر است، طول ارتباطهای مستقل از بسیار کوتاه تا بسیار بلند و آهنگ آنها از بسیار پایین تا بسیار بالا تغییر می‌کند. این خصوصیات منجر به طراحی ویژه‌ای برای شبکه‌های داده‌ای شده که در آن هر «بسته» داده یا هر «داده‌نگار» منفرد که از شبکه عبور می‌کند مستقل از بسته‌های قبلی همان ارتباط به محل مناسب ارسال می‌شود. هر بسته اطلاعات لازم را در خود دارد، و مسیریابها برای تعیین مقصد بسته و نحوهٔ ارسال آن تنها باید به «سربرگ» آن مراجعه کنند. در نتیجه مسیریابها دیگر وضعیت ارتباطهای فعال را نگه نمی‌دارند.

این انتقال از راه‌گزینی مداری به راه‌گزینی بسته‌ای[2] پیامدهای عمیقی داشته است. از یک سو این تغییر منجر به پیدایش شبکه‌هایی بسیار کارا شده است. همهٔ ظرفیت زمانی شبکه قابل دستیابی است و بسته‌هایی که تازه از راه رسیده‌اند می‌توانند از آن بهره ببرند. هر بسته در شبکه با سایر بسته‌ها رقابت می‌کند، اگر ترافیک رقابت در یک مسیر خاص، کم باشد، ارتباطی که از آن مسیر استفاده می‌کند می‌تواند از همهٔ «عرض باند» آن بهره ببرد و داده‌اش را بسیار سریع منتقل کند. اگر چند ارتباط بر روی یک مسیر با هم در رقابت باشند، هر کدام بخشی از عرض باند موجود را دریافت خواهند کرد (که ممکن است این تقسیم عادلانه هم نباشد). به‌علاوه راه‌گزینی بسته‌ای شبکه را بسیار مقاوم می‌کند. با استفاده از این روش، شبکه قادر است برای مسیریابی، خطها و مسیرهای معیوب را دور بزند بی‌آنکه اختلالی در ارتباطات فعال ایجاد کند. مسیریابها بی‌هیچ مشکلی می‌توانند ترافیک بازمسیریابی‌شده را دریافت کنند، زیرا دربارهٔ ترافیک «جاری» اطلاعی ندارند و بنابراین در پذیرش ترافیکی که تا این لحظه از وجود آن خبر نداشته‌اند با مشکل مواجه نخواهند شد ــ برخلاف شبکهٔ راه‌گزینی مداری که در آن مسیریابها نمی‌توانند به‌سادگی ترافیک بازمسیریابی‌شده را بپذیرند زیرا دربارهٔ مدار مجازی متناظر با آن چیزی نمی‌دانند.

اما اگر آهنگ ورود بسته‌ها بیش از ظرفیت خطها باشد، خطوط دچار سربار خواهند شد. در این شرایط بسته‌ها «در میانگیر[3] قرار داده می‌شوند» و در انتظار انتقال از طریق خط می‌مانند، اما اگر آهنگ مازاد ادامه یابد ــ شرایطی که «راه‌بندان» نامیده می‌شود ــ سرانجام میانگیرهای درون مسیریابها هم پر خواهند شد، و ناگزیر برخی از بسته‌ها باید به دور انداخته شوند. برای اطمینان از رفتار صحیح منابع به هنگام بروز راه‌بندان در شبکه، سازوکارهایی برای کنترل راه‌بندان پایانه به پایانه در قراردادهای انتقال داده در اینترنت تعبیه شده که در صورت بروز راه‌بندان، به صورت خودکار آهنگ انتقال داده را

1. circuit-switching 2. packet-switching 3. buffer



شکل۱ ترافیک اینترنت در مقابل ترافیک ترکیبی از یک مدل پواسون که بر میانگین و واریانس ترافیک اندازه‌گیری شده، منطبق شده و با سه مرتبهٔ بزرگی نشان داده شده است.

کاهش می‌دهند. در نتیجهٔ استفاده از این سازوکارها، شکل‌گیری ترافیک در شبکه تابع شرایطی خواهد بود که برای هر ارتباط در گذشته پیش آمده است. بنابراین، ترافیک اینترنت شامل سازوکاری بنیادی برای بیان همبستگیهای ارزشمند و پیچیده در طول زمان، و نیز مبادله‌های پیچیده بین ارتباطهای فعال است.

میراث مخربی از علم تلفن که بر پژوهشهای مربوط به شبکه‌های داده‌ای تأثیر گذاشت، آن بود که در دهه‌های هفتاد و هشتاد، اعتبارسنجی مفروضات اساسی مدلسازی در قبال نتایج حاصل از اندازه‌گیری ترافیک در شبکه‌های داده‌ای واقعی کاملاً کنار گذاشته شد، درحالی‌که تنها مطالعهٔ مختصری در مورد اندازه‌گیریها کافی بود تا کشف شود که ترافیک داده به‌شدت متغیر یا بسیار انفجاری[1] است، به این معنا که آهنگ یکنواختی ندارد، بلکه وقفه‌هایی بینابین دارد. اصطلاح «انفجاری» یک معنای شهودی آسان‌فهم دارد، اما پافشاری بر معنای ریاضی و دقیق آن، پیامد عمیقی در انتخاب مدلهای ریاضی ترافیک شبکه خواهد داشت. رویکرد طبیعی برای تبیین انفجاری بودن، تعریف آن براساس یک مقیاس زمانی است که فعالیتها و وقفه‌ها بر آن رخ می‌دهند. این مقیاس زمانی برای تلفن، به آهنگ λی فرایند پواسون (۱) مربوط خواهد بود که دینامیک پیامهای رسیده را توصیف می‌کند. مثلاً اگر $\lambda = ۱۰۰/\text{sec}$،

1. bursty

آنگاه مقیاس زمانی انفجاری بودن در حدود ۱۰ m sec است و احتمال رخداد فعالیتهای مستمر بالای میانگین یا وقفه‌های مستمر زیر میانگین بر مقیاسهای زمانی بسیار بزرگتر یا بسیار کوچکتر به سرعت کاهش خواهد یافت.

اما دست‌اندرکاران بارها مشاهده کرده‌اند که انفجار ترافیک در شبکه‌های داده‌ای به‌واقع در مقیاسهای زمانی بسیار متفاوتی رخ می‌دهد و این انفجاری بودن چندمقیاسی به‌سادگی با دنیای مدلسازی ترافیک مرسوم که بر فرایند پواسون مبتنی است سازگار نمی‌شود. نظام پواسون حتی زبان مناسبی هم برای بحث در باب انفجارهایی از این‌دست مهیا نمی‌کند [۴]. شکل ۱ نمایشی بصری از شکست مدلسازی پواسون در مواجهه با انفجار موجود در ترافیک، واقعی شبکه‌هاست. نمودارها براساس پیمایشی یک‌ساعته از ترافیک اینترنت که از روی خط اتصال یک شرکت بزرگ با اینترنت جمع‌آوری‌شده ترسیم شده‌اند [۵]. ما از روی این پیمایش و با تطبیق یک، مدل سادهٔ مبتنی بر پواسون بر میانگین و واریانس نمونهٔ اندازه‌گیری‌شده، پیمایش دیگری از سری بسته‌های رسیده در طول یک ساعت ساختیم. مدلسازیهای استادانهٔ دیگری نیز ممکن است، اما همان‌طور که در ادامه خواهید دید نتیجهٔ نهایی یکسان خواهد بود.

با تغییر مقیاس زمانی مشاهده، انفجاری بودن پیمایش اولیه و پیمایش ترکیبی را به‌چشم می‌بینیم. ردیف بالا زیرمجموعه‌ای از هر پیمایش را که به صورت تصادفی انتخاب شده است بر مقیاس زمانی ۱۰۰ میلی‌ثانیه نشان می‌دهد؛ یعنی هر نقطه در نمودار نمایانگر تعداد بسته‌های مشاهده‌شده در یک بازهٔ زمانی ۱۰۰ میلی‌ثانیه‌ای برای مدت ۶ ثانیه است. در ردیف دوم مقیاس زمانی ۱۰ برابر بزرگتر شده است: اکنون هر نقطه نمایانگر تعداد بسته‌ها در ثانیه است که در مجموع ۶۰ ثانیه را در بر می‌گیرد. ناحیهٔ سیاه نشان می‌دهد که نمودارهای ردیف قبل از کجا گرفته شده‌اند. نکتهٔ مهم آن است که نه‌تنها مقیاس محور X، بلکه مقیاس محور Y هم با ضریب ۱۰ افزایش یافته است. مقیاس هر دو محور در ردیف سوم ۱۰ برابر و در ردیف چهارم باز ۶ برابر شده است، چنانکه در این نقطه نمودارها کل یک ساعت پیمایش را دربر بگیرند.

اختلاف میان مدل پواسون و ترافیک اندازه‌گیری‌شده فاحش و تکان‌دهنده است: با افزایش مقیاس زمان، ترافیک پواسون «هموار می‌شود» و رفتاری کاملاً رام دارد، حال آنکه ترافیک اندازه‌گیری‌شده ابداً چنین رفتاری را نشان نمی‌دهد. از دیدگاه مهندسی تفاوت کاملاً اساسی است: ترافیکی را که رفتاری مشابه ستون سمت چپ دارد می‌توان به‌سادگی مدیریت کرد. در مقیاسهای زمانی بالاتر از یک حد معین دیگر اتفاق غیرمنتظره‌ای نمی‌افتد ــ همه چیز چنان ساده می‌شود که آهنگ دریافت در درازمدت به‌دست آید ــ نیازی به میانگیرهای بزرگ در مسیریابها یا راه‌گزین‌ها نیست. در انتخاب نقاط عمل مطمئن برای طراحی شاه‌سیمهای اصلی، لازم نیست محافظه‌کارانه عمل کنیم، و حتی ارزیابی کاربر از کیفیت خدمات نیز تأثیری در مسأله نخواهد داشت. اما کاملاً برعکس، ترافیک اندازه‌گیری‌شده (نظیر آنچه که در ستون سمت راست مشاهده می‌شود) سرکش است، و این حالت را در مقیاسهای زمانی کاملاً بزرگ نیز حفظ می‌کند، و مهندسی ترافیک متعارف را به‌هم می‌ریزد: مسیریابها برای کنارآمدن با نوسانهای ترافیک در مقیاسهای زمانی متعدد نیاز به میانگیرهای بزرگ دارند؛ در غیاب هر گونه کنترل مؤثر، نقاط عمل مطمئن باید محتاطانه انتخاب شوند، زیرا ترافیک می‌تواند خط را در هر زمان و بر هر مقیاس زمانی اشباع کند و کیفیت کل شبکه و رضایت کاربران مستقل را نمی‌توان تضمین کرد.

نظام مدلسازی پواسون بارها به مهندسین شبکه اینترنت حکم کرده است که انتظار رفتاری مشابه ستون سمت چپ را داشته باشند ــ اما آنچه واقعاً مشاهده می‌شود حرکت لگام‌گسیختهٔ سمت راست است! بنابراین جامعهٔ مهندسین اینترنت به این نتیجه رسیده است که نظریهٔ ترافیک برای توسعهٔ اینترنت به‌راستی نامناسب و زیان‌بار است. این جامعه رویکرد مبتنی بر فرایند پواسون را به‌ویژه به این دلیل مورد نقد قرار داده است که مدلها (۱) با تجارب عملی و مشاهدات مهندسین شبکه وجه‌اشتراک اندکی دارند؛ (۲) ساختارهای نظری بر مفروضاتی مبتنی هستند که در قبال داده‌های اندازه‌گیری‌شده بی‌اعتبارند، به‌ویژه هنگامی‌که برای توصیف انفجار، با پارامترهای اضافی بسط داده می‌شوند؛ (۳) بیش از آن پیچیده‌اند که به فراهم‌آوردن یک شهود یا درک فیزیکی از دینامیک ترافیک واقعی شبکه‌ها («جعبه‌های سیاه») کمک کنند؛ و (۴) به ورودیهایی (تخمینهای پارامترها) نیاز دارند که در عمل تعیین، جمع‌آوری یا تخمین آنها ممکن نیست.

درود بر فرکتالها

بسیاری از خبرگان شبکه در این نکته اتفاق‌نظر دارند که تنها راه شناخت عمیق ترافیک شبکه‌های داده‌ای آن است که نظریهٔ تله‌ترافیک را کنار بگذاریم و همه چیز را از نو شروع کنیم. جالب اینجاست که ریاضیات که عامل اصلی موفقیت نظریهٔ تله‌ترافیک برای شبکه‌های صوتی بوده است، به‌تازگی امکانات کافی برای پشتیبانی از نظر خبرگان شبکه فراهم آورده است: هرچند مفاهیم و ایده‌های این ریاضیات به اندازهٔ فاصله بین ترافیک صوتی و ترافیک داده با ریاضیات قبلی تفاوت دارد، ریاضیات مربوط به POTS در دو مورد تغییرپذیری محدود دارد، نخست در زمان ــ فرایندهای ترافیک یا مستقل‌اند یا همبستگیهای زمانی آنها به صورت نمایی رو به کاهش است ــ و دوم در فضا؛ یعنی توزیع کمیتهای وابسته به ترافیک دارای دنباله‌هایی است که به صورت نمایی نزولی هستند. اما ریاضیات شبکه‌های داده‌ای واجد تغییرپذیری شدید یا بحرانی است. به‌لحاظ آماری، تغییرپذیری شدید در زمان در فرایندهای ترافیک بر اثر وابستگی در دو طولانی حاصل می‌شود؛ یعنی خودْ همبستگی‌هایی که یک کاهش توانی را نشان می‌دهند. از سوی دیگر، اشکال بحرانی تغییرپذیری در فضا را می‌توان به صورت ممسکانه با استفاده از توزیعهای سنگین-دنباله[1] با واریانس نامتناهی تعریف کرد، یعنی توزیعهای احتمال F با این خاصیت که برای مقادیر بزرگ x،

$$1 - F(x) \approx \kappa_1 x^{-\beta} \qquad (2)$$

که در اینجا κ_1 یک ثابت متناهی مثبت و غیروابسته به x است و اندیس دنبالهٔ β دربازهٔ $(0, 2)$ قرار دارد. برای نمونه، خانوادهٔ مشهور «توزیعهای

1. heavy-tailed distributions

پارتو[1]» که در ابتدا برای مدلسازی توزیع درآمد در یک جمعیت معرفی شدند، این خصوصیت را برآورده می‌کنند.

معلوم می‌شود که رفتار توانی برخی از توصیفگرهای آماری آنها در زمان یا مکان، اغلب منجر به بروز خصوصیات فرکتالی [وخالی] در فرایندهای ترافیک متناظر می‌شود. در متن حاضر، ما یک فرایند ترافیک را دارای خصوصیات فرکتالی می‌دانیم اگر رابطه‌ای میان کمیتهای معین Qی فرایند مربوطه و تفکیک،[2] τ به فرم کلی زیر برقرار باشد:

$$Q(\tau) \approx \kappa_2 \tau^{f(D)} \qquad (۳)$$

که در اینجا κ_2 یک ثابت متناهی مثبت و غیرواسته به τ است. τ یک تفکیک در زمان یا مکان است که Q در آن محاسبه می‌شود، و (۳) تعیین می‌کند که چگونه Q باید به عنوان تابعی از تفکیک τ تغییر کند؛ $f(\cdot)$ یک تابع سادهٔ اغلبْ خطی از D است، و D یک بعد فرکتالی است. برای تعریف فرکتالی‌بودن، فرض می‌شود که رابطهٔ فوق برای دامنه‌ای از مقادیر متفاوت τ با مقدار Dای که کمتر از بعد فضای حاوی است، برقرار است.

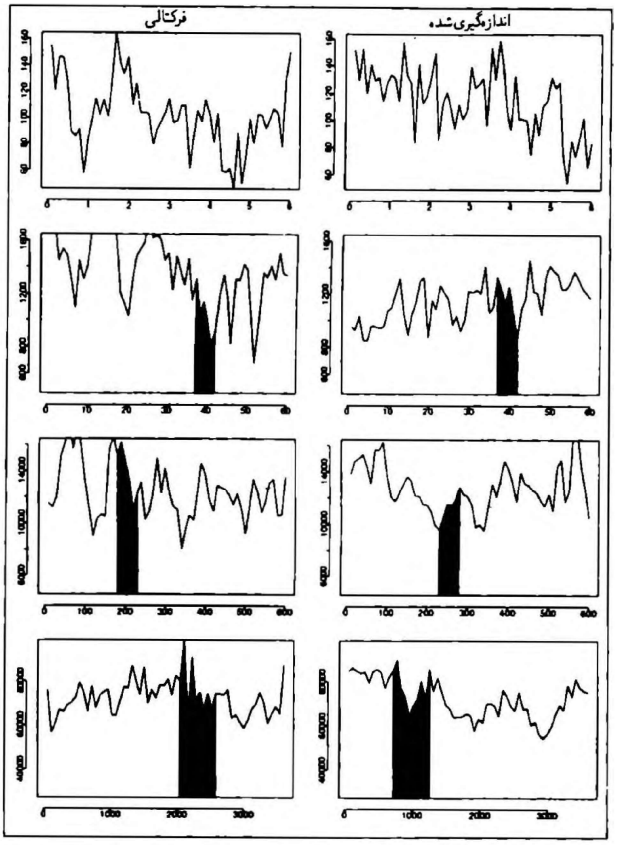
مفاهیم فرکتالی در نظریهٔ تله‌ترافیک وجود نداشته‌اند، اما نگاهی به شکل ۱ (سمت راست) رفتار فرکتالی را در دامنهٔ وسیعی از مقیاسهای زمانی، از صدها میلی‌ثانیه تا ثانیه و دهها ثانیه و بیشتر نشان می‌دهد. در حقیقت نمودارهای شکل ۲ نیز از نوع نمودارهای شکل ۱ است، بااین تفاوت، که این‌بار به‌جای مدل میتنی بر پواسون، از یک مدل ریاضی بسیار ساده به نام نوفهٔ گاوسی کسری[3] استفاده شده است که به مفهومی که به‌زودی به دقت بیان خواهیم کرد، اکیداً فرکتالی است. فعلاً یک فرایند گاوسی کوواریانس‌ـمانا[4]ی $X = (X_k : k \geq ۱)$ یک نوفه گاوسی کسری با پارامتر هرست[5] $H \in [۰٫۵, ۱)$ نامیده می‌شود اگر خود همبستگی بین X_n و X_{n+k}، $k \geq ۰$ از رابطهٔ

$$\mathbf{cor}(X_n, X_{n+k}) = \frac{۱}{۲}(|k+۱|^{۲H} - ۲|k|^{۲H} + |k-۱|^{۲H})$$

به‌دست آید. علاوه‌بر سازگارکردن مدل با میانگین و واریانس ترافیک اندازه‌گیری‌شده، یک پارامتر دیگر یعنی پارامتر هرست H نیز مورد نیاز است که درجهٔ تغییر مقیاس فرکتالها را تعیین می‌کند. از لحاظ بصری به‌نظر می‌آید که ترافیک حاصل از مدل فرکتالی در مکان صحیح قرارگرفته است، و می‌توان با افزودن تنها یک پارامتر به آن رسید! نکتهٔ آخر، خصوصیت بسیار مهم رویکرد مدلسازی فرکتالی است: این رویکرد اصل صرفه‌جویی[6] را رعایت می‌کند، یعنی به اندازهٔ کافی ساده هست که بتوان به اِعمال آن بر دامنهٔ وسیعی از شرایط امیدوار بود، بدون آنکه برای تعیین پارامترها مجبور باشیم حدسهای فراوان بزنیم.

با توجه به شکاکیت عمومی که در محافل مختلف جامعهٔ ریاضی نسبت به مفید و مناسب بودن فرکتالها و ضرورت استفاده از آنها وجود دارد [۶]، در باب مقیاس‌بندی فرکتال‌گونه در ترافیک اندازه‌گیری‌شده در شبکه‌های داده‌ای چه می‌توان گفت؟ برای آزمودن این پرسش، فرایند تصادفی زمانی‌ـگسستهٔ کوواریانس‌ـمانای صفرـمیانگین $X = (X_k : k \geq ۱)$

1. Pareto 2. resolution 3. fractional Gaussian noise
4. covariance-stationary 5. Hurst 6. parsimony



شکل۲ ترافیک اینترنت در مقابل ترافیک ترکیبی از یک مدل سادهٔ فرکتالی که بر میانگین و واریانس و پارامتر هرست (H) ترافیک اندازه‌گیری شده، منطبق شده و با سه مرتبهٔ بزرگی نشان داده شده است.

را دقیقاً خودهم‌انند، یا فرکتالی با پارامتر مقیاس‌بندی $H \in [۰٫۵, ۱)$ می‌نامیم، اگر برای همهٔ سطوح انبوهش یا «تفکیک»، $m \geq ۱$،

$$X^{(m)} = m^{H-۱} X$$

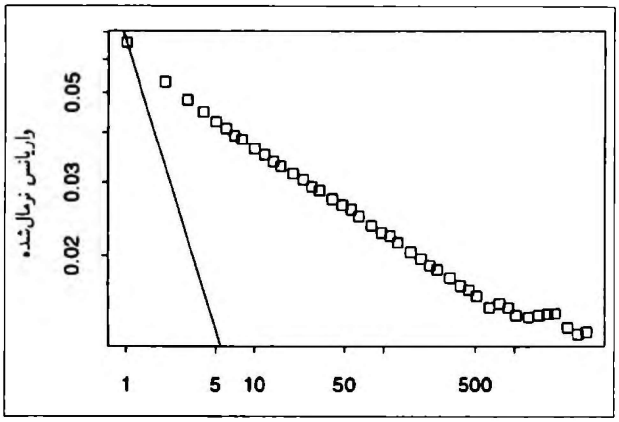
که در اینجا تساوی به مفهوم توزیعهای متناهی‌بعد درک می‌شود و فرایندهای انبوهش $X^{(m)}$ با رابطهٔ زیر تعریف می‌شود:

$$X^{(m)}(k) = m^{-۱}(X_{(m-۱)k+۱} + \cdots + X_{km}), \qquad k \geq ۱$$

مثلاً فرایند نوفهٔ گاوسی کسری که قبلاً معرفی شد با پارامتر مقیاس‌بندیِ برابر با پارامتر هرست، دقیقاً خودهمانند است. به‌سادگی می‌توان بررسی کرد که برای یک فرایند کاملاً خودهمانند با پارامتر مقیاس‌بندی H، رابطهٔ تابعی زیر

$$\mathbf{Var} X^{(m)} = \kappa_۱ m^{۲H-۲}$$

برقرار است و با فرم (۳) سازگار است. نمایش log_log خطی برای $\mathbf{Var} X^{(m)}$ نسبت به m، نمودار واریانس‌ـزمان نامیده می‌شود. نمونه‌ای از این نمودار



شکل۳ نمودار واریانس-زمان برای ترافیک اندازه‌گیری‌شدهٔ اینترنت. خط سمت چپ که به پایین شیبدار است، نمودار واریانس-زمانی را که از ترافیک پواسون انتظار می‌رود، نشان می‌دهد.

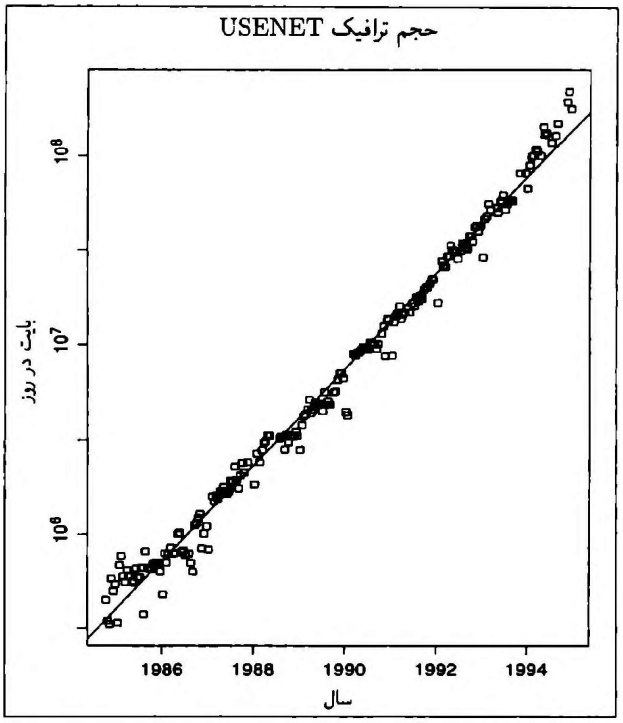
که براساس پیمایش ترافیک اینترنت شکل ۱ و ۲ رسم شده، در شکل ۳ نشان داده شده است. واضح است که محدودهٔ مقیاس‌بندی مورد مشاهده سه دهه را در بر می‌گیرد، و گواه قاطعی بر مقیاس‌بندی فرکتال‌گونه است. محدودهٔ مقیاس‌بندی سه تا پنج دهه‌ای در پیمایش شبکه‌های مختلف متداول است.

در ارزیابی اعتبار توصیف یک فرایند با استفاده از یک مدل خودهمانند، باید مراقب بود تا ناماناهای واقعی (مثل آهنگ دریافت ارتباط که با زمان تغییر می‌کند) با رفتار فرکتالی مانا اما بسیار متغیر اشتباه نشوند. این دو ممکن است هم به چشم و هم در تعدادی از آزمونهای آماری مشابه به‌نظر بیایند، اما این تفاوت را می‌توان با بهره‌گیری از پیمایشهای ترافیک شبکه در ابعاد بسیار بزرگ، نشان داد، مثلاً می‌توان قطعات پنج دقیقه‌ای متعددی را از یک پیمایش استخراج کرد، آنها را تحلیل نمود تا رفتار فرکتالی احتمالی آنها مشخص شود، و سپس نتایج را با نتایج حاصل از قطعات پنج دقیقه‌ای همسایه و نیز قطعات ده دقیقه‌ای دربرگیرندهٔ آنها مقایسه کرد. اگر تحلیلها نتایج سازگاری به‌دست دهند، این نظر تأیید خواهد شد که داده‌ها را می‌توان به صورت مانا به‌خوبی مدل کرد. معمولاً وقتی که داده‌ها به پایان می‌رسند و زیرنمونه‌ها آن‌قدر کوچک می‌شوند که برای تحلیل مناسب نیستند، این فرایند ممکن است با مشکل مواجه شود. اما برای ترافیک شبکه، هر چقدر داده که بخواهیم در اختیار داریم. بنابراین انگیزهٔ کافی خواهیم داشت تا تکنیکهای آماری بدیعی به‌دست آوریم که بتوانند از ابعاد بزرگ نمونه‌ها کاملاً بهره‌برداری کنند، و مفاهیم متعارفی را که در طول سالیان برای کار با نمونه‌های کوچک پرورده شده‌اند جایگزین مفاهیم جدید کنیم. همان‌طور که دیدید، این روشهای نو با روشهای استنباط متعارف نظیر ارزیابی نیکویی برازش یا آزمون فرض وجه اشتراک اندکی دارند، اما در عوض نشان می‌دهند که چگونه مفهوم «افزایش توانمندی با استفاده از مجموعه‌های بزرگ داده‌ها» که به وسیلهٔ توکی[1] مطرح شد، در عمل به‌کار می‌رود و می‌تواند بر ماهیت فرکتالی ترافیک اینترنت گواهی دهد.

مشکل درگ اینترنت

اگرچه کشف ماهیت فرکتالی اینترنت را می‌توان نقطهٔ شروع امیدوارکننده‌ای

1. J. Tukey



شکل۴ بایتهایی که روزانه از طریق تابلوی اخبار USENET (در اینترنت) فرستاده می‌شوند.

برای تعیین مشخصات دقیق اینترنت تلقی کرد، اما این امر تقریباً اثری نگذاشته است زیرا جنبه‌های کمتر مورد توجه واقع شده‌ای وجود دارند که تعیین مشخصات و فهم دقیق و کامل اینترنت را بسیار دشوار می‌کنند. هر خصوصیت، شکلی از تغییر را منعکس می‌کند ــ این نمودی است از این واقعیت که هیچ‌چیز در شبکه «نوعی» نیست. تغییر در طول زمان، بین سایتها، و در مفروضات اساسی دربارهٔ نحوهٔ استفاده از شبکه رخ می‌دهد [Pa94].

اینترنت در حال تغییر

اولین جنبهٔ اساسی تغییر در اینترنت رشد آن است. به بیان ساده، رشد شبکه نمایی است، در طول یک دهه چنین بوده است، و نشانه‌ای از کاهش آهنگ آن در دست نیست. شکل ۴ یک آمار رشد را نشان می‌دهد: حجم ترافیک در روز برحسب بایت که از طریق سیستم تابلوی اخبار USENET منتقل می‌شود. داده‌ها از ۱۹۸۴ شروع می‌شوند و تا ۱۹۹۴ ادامه می‌یابند. اندازه‌گیریها به‌خوبی بر یک خط راست منطبق می‌شوند، که نشان‌دهندهٔ رشد نمایی هستند در حدود ۸۰٪ در هر سال در طول یک دهه است (به مقیاس لگاریتمی-خطی توجه کنید). واضح است که رشد اینترنت مطلب تازه‌ای نیست ــ و به هیچ وجه با وب آغاز نشده است ــ و آمارهای فعلی با رشدی که ابداً رو به کاهش ندارد سازگارند.

جنبهٔ دیگری که اینترنت از آن جنبه با تغییرات شدید مواجه است مشخصات ترافیک اندازه‌گیری شده در سایتهای مختلف و در زمانهای مختلف است. مثلاً در نمونه‌ای از ترافیک اینترنت که در سال ۱۹۹۱ در یک آزمایشگاه

پژوهشی به دست آمده است، تقریباً ۶۷٪ از داده‌هایی که به سایت وارد یا از آن خارج شده در نتیجهٔ استفاده از قرارداد انتقال فایل استاندارد اینترنت یا FTP بوده است. اما در همان زمان در نمونه‌ای از ترافیک یک دانشگاه، تنها ۱۸٪ از داده‌های مبادله شده به FTP مربوط بوده است. در دانشگاه دیگری این نسبت ۵۰٪ بوده است. واضح است که اگر پژوهشگران تنها یکی از این سایتها را (هر قدر دقیق) مطالعه می‌کردند، برای سایتهای دیگر نتیجه‌ای کاملاً نادرست به دست می‌آمد.

مشکل مشابهی در مورد زمان وجود دارد. نمونه‌ای از ترافیک FTP در یک آزمایشگاه پژوهشی در اکتبر ۱۹۹۲ نشان داد که میانهٔ اندازهٔ داده‌های منتقل شده ۴۵۰۰ بایت است. این میانه بر بیش از ۶۰۰۰۰ انتقال محاسبه شده که به نظر می‌آید آمارهٔ بسیار مطمئنی است. اما پنج ماه بعد، همان آماره بر بیش از ۸۰۰۰۰ انتقال محاسبه شد و میانه‌ای برابر با ۲۱۰۰ بایت به دست داد، که از نصف مقدار قبلی هم کمتر بود! در مارس ۱۹۹۸ همان میانه بر ۴۵۰۰۰۰ انتقال محاسبه شد و نتیجه برابر با ۱۰۹۰۰ بایت بود. بنابراین هر یک از این سه نقطه از زمان هر قدر دقیق مورد مطالعه قرار می‌گرفتند، نتایج به دست آمده برای این آمارهٔ «بسیار مطمئن» برای سایر نقاط زمان کاملاً نادرست بود.

منبع اساسی دیگر تغییرات مشکل‌آفرین اینترنت، ظهور بسیار سریع برنامه‌های کاربردی جدید است. در اکتبر ۱۹۹۲ آزمایشگاه پژوهشی فوق‌الذکر به مجموع چهل‌وپنج ارتباط وب در ماه پیوست. اما در ماههای بعدی وب گسترش یافت و ترافیک همان سایت وب در هر شش هفته دو برابر شد و این روند دو سال تمام ادامه یافت. امروزه این سایت در بیش از نیم‌میلیون ارتباط وب در روز مشارکت دارد. از دید پژوهشگران اینترنت، وب از ناکجا آمد. هیچ‌کس، حتی اولین مبلغین وب چنین موفقیت عظیمی را در خیال‌پردازانه‌ترین رویاهایشان پیش‌بینی نمی‌کردند. و اشکال اینجاست که ترافیک وب دارای خصوصیاتی است که تا آن هنگام در اینترنت متداول نبود. برون‌یابیهای دقیق که ترافیک آینده را پیش‌بینی می‌کردند یک‌شبه عملاً قدیمی و از کارافتاده شدند! [۷]

به سوی استنباط علمی

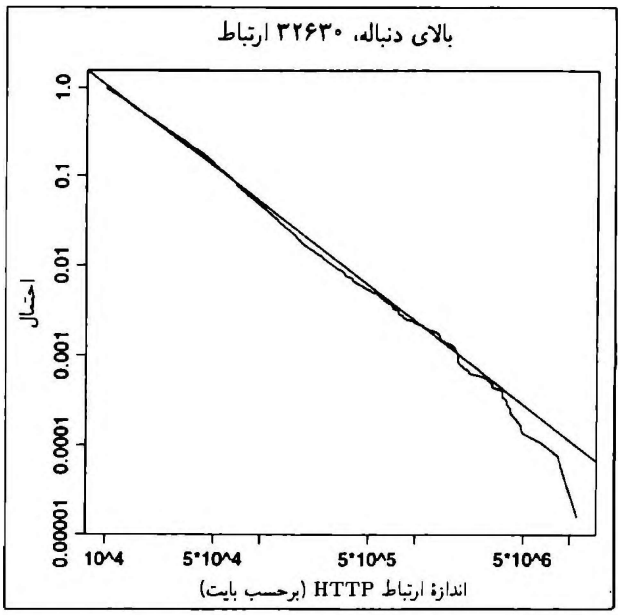
واضح است که اگر کسی بخواهد رفتار اینترنت را به طور کامل و درست بفهمد و پیشگویی کند، دشواریهایی که در بخش قبل ذکر شد باید برایش هشدار دهنده باشد؛ این دشواریها نشان می‌دهند که موانع بسیاری وجود دارند که باید بر آنها غلبه کرد، باید در نظر داشت که اینترنت بسیار سریع تغییر می‌کند و ذاتاً واگراست. یک رویکرد مناسب برای مواجهه با سرعت تغییرات اینترنت و ناهمگنی بیش از اندازهٔ آن این است که اساس یافته‌های خود را بر آزمایشهای دقیقی بگذاریم که بر حوزهٔ گسترده‌ای از اندازه‌گیریهای اینترنت صورت می‌گیرند. این اندازه‌گیریها باید در ابعاد وسیع، در زمانهای متفاوت، در نقاط مختلف شبکه و تحت شرایط متفاوت انجام شوند. اما این رویکرد اشکالاتی هم دارد: نه تنها به معنی فرایند زمان‌بر و دشوارکاوش در داده‌هاست، بلکه استنباط آماری (آن‌گونه که امروزه تلقی و اجرا می‌شود) هنگام مواجهه با تعداد کثیری از مجموعه‌های بزرگ داده‌ها به اندازهٔ کافی کارا نیست. استنباط آماری معمول بر تحلیل تک مجموعه‌ای از داده‌ها که معمولاً کوچک است متکی است، و وقتی برای آزمون «مدلهای واقعی» با استفاده از نمونه‌های کوچک به کار می‌رود عملکردی تقریباً بهینه دارد، و در طی سالها، زرادخانه‌ای از تکنیکها و ابزارهای مناسب برای کمک به تحلیلگران داده فراهم آورده است [Ch95].

اما آن‌چه پژوهشگران اینترنت به آن نیاز دارند روشهای استنباطی است که بتوانند گردایه‌ای بزرگ از مجموعه‌های حجیمی از داده‌ها را به نحو ثمربخشی پردازش کنند. اینان به ابزاری برای یافتن روابط شبه‌قانون بین مجموعه‌های مختلف داده‌ها نیاز دارند که به حوزهٔ وسیعی از شرایط مختلف تعمیم یابد. این رویکردها آنچه را که به صورت کلی «استنباط علمی» نامیده می‌شود تعریف می‌کنند. این رویکردها در علم فیزیک تاریخچه‌ای طولانی دارند، اما در علوم‌اجتماعی و در نوشتگان آمار متعارف کاملاً نادیده گرفته شده‌اند. به دلیلی که توکی آن را «بسط مبنا» می‌نامد، برای مطالعهٔ ترافیک اینترنت به استنباط علمی نیاز داریم، بسط مبنا به معنای تلاش برای آشکارسازی ناورداهای ترافیک است، یعنی صفاتی که نسبت به شرایط در حال تغییر شبکه حساس نیستند. چنین رویکردی می‌خواهد یک شهود و درک فیزیکی براساس توضیحات «جعبه سیاه» معمول یا شیوهٔ متداول تطبیق داده‌ها بنا کند. درضمن، استنباط علمی قالب و چارچوب مناسبی برای پژوهشگران ترافیک اینترنت فراهم می‌کند که براساس آن بتوانند به وجود مدلهای ممسکانه برای ترافیک اینترنت امیدوار باشند: هر مدلی که دارای تعداد کثیری پارامتر باشد ناگزیر غیرعملی است، زیرا پژوهشگران مطلع می‌دانند که امیدی به یافتن مقادیر با معنا برای همهٔ پارامترها نیست. به بیان دیگر، در زمینهٔ ترافیک اینترنت امساک تنها در صورت یافتن ناورداهای ترافیک قابل حصول است.

امیدی هست؟ ریاضیاتی هست؟

متأسفانه هیچ دستورالعمل استنباط علمی برای شناسایی ناورداهای ترافیک براساس تعداد زیادی مجموعهٔ حجیم و خوش‌کیفیت از داده‌های ترافیک اینترنتی وجود ندارد. البته هنوز می‌توانیم تلاش کنیم تا ناورداها را از طریق تحلیل دستی مجدانه و تفکر عمیق بیابیم. هرگونه موفقیت در شناسایی ناورداها ارزش طلا را دارد، زیرا این امید را به همراه می‌آورد که نوعی مدل وابسته و ممسکانه برای ترافیک شبکه قابل اثبات باشد. در ادامه آنچه را که امروزه به عنوان ناورداهایی که با موفقیت تعیین شده‌اند می‌شناسیم به تفصیل بررسی خواهیم کرد.

نخست، در حالی که مدلهای پواسون به عنوان مبنای مشخص‌سازی ورود بسته‌های داده در اینترنت کاملاً کنار گذاشته شده‌اند، شواهد قاطعی وجود دارد که نشان می‌دهد این مدلها برای حوزهٔ پیش‌پا افتادهٔ مشخص‌سازی مراجعهٔ انسانها به اینترنت قابل به کارگیری هستند. یعنی زمانهایی که انسانها برای انجام کار مشخصی شروع به استفاده از اینترنت می‌کنند، واقعاً با فرایندی بی‌حافظه با آهنگ دریافتی که می‌توان آن‌را در طول بازه‌های زمانی از چند دقیقه تا حتی یک ساعت ثابت فرض کرد هماهنگی دارند. این ناوردا بر مجموعهٔ داده‌های حاصل از اندازه‌گیریهای مربوط به اینترنت مبتنی است که



شکل۵ نمودار توزیع متمم log_log (مشروط) اندازهٔ ارتباطهای WWW، با این فرض که اندازهٔ هر ارتباط حداقل ۱۰۰۰۰ بایت است.

اطلاعاتی دربارهٔ زمان شروع مثلاً ارتباطهای TELNET و FTP [PF95]، یا جلسات وب [FGWK98] در خود دارند، و در طی چند سال از مکانهای متعددی جمع‌آوری شده‌اند.

یک ناوردای بسیار جالب دیگر آن است که وقتی اندازه‌ها (برحسب بایت یا تعداد بسته‌ها) یا طول زمان مجموعه‌ای از جلسات یا ارتباطات شبکه (برحسب ثانیه) را در نظر می‌گیریم تقریباً همیشه چنین به نظر می‌آید که توزیع تجربی دارای خصوصیت سنگین‌ـدنبالگی (۲) است که در آن $\beta < 2$ و حتی گاه $\beta \approx 1$. این حالات، تغییرپذیری بسیار زیاد را نشان می‌دهند: $\beta < 2$ یعنی فرایند ترافیک مورد بحث چنان مدلسازی شده است که دارای واریانس نامتناهی، و در حالت $\beta \leqslant 1$ دارای میانهٔ نامتناهی است.

شکل ۵ نشان می‌دهد که این دنباله‌های سنگین کاملاً با داده‌های اندازه‌گیری شده همخوانی دارند. داده‌های این نمودار از ترافیک یک روز وب در یک آزمایشگاه پژوهشی به دست آمده است. این روز به تصادف از بین صدها روز ثبت ترافیک انتخاب شده است. حال به اندازهٔ هر ارتباط وب نگاهی می‌اندازیم. روی‌هم‌رفته، ۲۲۶۰۰۰ ارتباط وجود داشت. اگر توجه خود را به ارتباطهایی که حداقل ۱۰۰۰۰ بایت منتقل کرده‌اند (یعنی ۱۴٪ بالای دنباله) محدود کنیم، و نمودار تابع توزیع متمم (۲) آنها را نسبت به اندازهٔ متناظر، در مقیاس log-log رسم کنیم، نمودار شکل ۵ به دست خواهد آمد. یک خط راست روی چنین نموداری رفتار دنباله را نشان می‌دهد که با یک توزیع پارتو مطابقت دارد. و شیب آن $-\beta$ را به دست می‌دهد. به روشنی دیده می‌شود که بیش از ۳۲۰۰۰ نقطه در شکل ۵ واقعاً روی خط قرار می‌گیرند، و با $\beta \approx 1.3$، داده‌ها واقعاً با واریانس نامتناهی سازگارند.

توجه کنید که خاصیت سنگین دنبالگی برای توزیع یک خاصیت جمعی یک منبع ترافیک، نظیر حجم داده‌ای که این منبع خواهد فرستاد، مطرح می‌شود. این خاصیت دربارهٔ اینکه منبع چگونه داده‌ها را به سری بسته‌هایی تقسیم می‌کند و آنها را در طول شبکه منتقل می‌کند چیزی به ما نمی‌گوید. بنابراین ممکن است این سؤال پیش بیاید که کشف اینکه خاصیت نامتناهی بودن واریانس در سطح ارتباط یا جلسه، یک ناوردای ترافیکی است به چه کار می‌آید. پاسخ دور از انتظار است: نتایج ریاضی جدیدی به دست آمده‌اند که وجود اندازه‌ها یا طول مدت ارتباطهای با واریانس نامتناهی را مستقیماً به کشف مقیاسهای فرکتالی در ترافیک جمعی شبکه در سطح بسته‌ها ربط می‌دهند! بنابراین پس از مجموعهٔ داده‌های حاصل از اندازه‌گیریهای اینترنت در سطح ارتباط، وجود ضروری خاصیت واریانس نامتناهی در مجموعه داده‌ها نیز عامل مهمی در حرکت از مدلهای مبتنی بر پواسون ترافیک داده به مدلهای مبتنی بر فرکتال بوده است. ناوردا بودن این خصیصه روشن می‌کند که چرا مقیاس فرکتالی نیز یک ناورداست. به علاوه، این نکته مبنایی برای یک توصیف فیزیکی بسیار ساده از ماهیت فرکتالی ترافیک جمعی شبکه (یعنی مجموع تعداد بسته‌ها یا بایتها در هر واحد زمان) شد که به صورت تجربی مشاهده شده بود. به این ترتیب دنباله‌های سنگین به رازگشایی از مدلسازی فرکتالی ترافیک بسیار یاری رساندند.

جالبتر اینکه در حقیقت پیشرفت نتایج مسیری در جهت خلاف آنچه تاکنون گفتیم پیموده است. این‌طور نبود که پژوهشگران ابتدا خصیصهٔ سنگین دنبالگی یا واریانس نامتناهی ارتباطهای مستقل را ببینند و بعد آن‌را با مدلهای فرکتالی ترافیک قیاس کنند. بلکه بر اساس تحلیل گستردهٔ پیمایشهای متعددی که از شبکه‌های محلی مختلف در طی یک دورهٔ چهار ساله جمع‌آوری شده بود و با اعمال اصول «بسط مبنا» و افزایش توانمندی با استفاده از مجموعه‌های بزرگ داده‌ها، برخی از پژوهشگران برای اولین‌بار خیز بلندی به سمت استفاده از مدلهای فرکتالی ترافیک برداشتند که در آن زمان تقریباً دیوانه‌وار بود [LTWW94]. اگرچه در آن زمان پژوهشگران هنوز نمی‌توانستند مستقیماً به سؤال «چرا فرکتال؟» پاسخ دهند، اما در سازوکارهای ممکن به دقت اندیشه کردند ــ اندیشه‌ای که اساساً به جامعهٔ پژوهشگران شبکه فهماند «بروید و به دنبال دنباله‌های سنگین بگردید». وقتی پژوهشگران دانستند که باید به دنبال چه بگردند، آنها را همه‌جا یافتند! مثلاً می‌توان دنباله‌های سنگین را در زمان مصرف شده CPU توسط فرایندهای مختلف، اندازهٔ فایلها در یک سیستم فایل، اندازهٔ اقلام وب، فواصل زمانی بین فشردن کلیدها توسط شخصی که در حال تایپ است، اندازهٔ انفجارهای FTP، و اندازهٔ طول زمانی انفجارها یا دوره‌های بیکاری ارتباطهای مستقل Ethernet یافت.

این مثالها روشن می‌کنند که برخی از پیشرفتهای به سختی به دست آمدهٔ امروز در جهت فهم دینامیک ترافیک اینترنت حاصل همکاری نزدیک بین ریاضیدانها و پژوهشگران شبکه است. از سویی، همهٔ جزئیات مربوط به معماری شبکه‌های نوین داده‌ای، سلسله مراتب قراردادهای مورد استفاده، و فن‌آوریهای مختلف شبکه در اختیار ریاضیدانان قرار داده شده است. با این حال هنوز باید بسیاری از این جزئیات کم‌اهمیت را درک کرد تا مطمئن شویم که پژوهش ریاضی ازکاربرد شبکه فاصله نگرفته است. از سوی دیگر، پژوهشگران شبکه معمولاً کمتر به جزئیات دقیق یک اثبات یا تعریف ریاضی

علاقه‌مندند، اما می‌خواهند در سطح شهودی و/یا از طریق استدلالهای تجربی متقاعد شوند. در واقع تجارب و تجهیزات اینترنت و اندازه‌گیریها و مدلهای عملی حاصل، دستاوردهای مهندسی با اهمیتی هستند، و نتایج نظری در هندسهٔ فرکتالی، نشان‌دهندهٔ ریاضیاتی زیبا و فریبنده است. اما امید آن است که این دو در ترکیب با هم به شناخت بسیار بهتری از اینترنت منتهی شوند.

آیا توجه ریاضیدانان لازم است؟

کشف نخستین نمودهای مقیاس‌بندی فرکتالی با تردید بسیاری از ریاضیدانان روبه‌رو شد. آنها این پدیده را «هوس» گذرایی تلقی کردند که می‌آید و می‌رود، و چیزی برای عرضه کردن ندارد، مانند آنچه در سایر حوزه‌های علوم طبیعی یا اجتماعی نظیر هیدرولوژی، اقتصاد یا بیوفیزیک رخ داده بود، یعنی ثابت شده بود که «جنون» فرکتالی عمر کوتاهی دارد و بر بحثهای فلسفی درباره هدف کلی مدلسازی تأثیری نمی‌گذارد.

آنچه از دید این ریاضیدانان پنهان ماند این بود که کاربرد تحلیل فرکتالی در شبکه، از اساس با سایر کاربردها متفاوت است. نه تنها واقعیت مهندسی اینترنت یک نیروی پیش‌راننده است، بلکه مجموعه‌های داده‌های در دسترس نیز یکتا و برجسته هستند، هم از جهت حجم و کیفیت و هم مهمتر از آن، از جنبهٔ مقدار اطلاعاتی که در هر مشاهده (یعنی بستهٔ داده) نهفته است. این اطلاعات، دانش دقیقی دربارهٔ لایه‌های مختلف ساختار سلسله مراتبی شبکه‌های امروزی، دربارهٔ چگونگی تعامل قراردادهای مختلف این لایه‌ها با یکدیگر، و به طور غیرمستقیم دربارهٔ تعامل بین ارتباطهای مختلفی که در یک خط خاص با هم سهیم شده‌اند در اختیار ما می‌گذارد. غنای داده‌ها تأثیری عمیق بر نحوهٔ تحلیل، تفسیر و مدلسازی مجموعه‌های داده‌ها به جا گذاشته است. تصور حوزهٔ دیگری از علم که در آن داده‌های در دسترس چنین اطلاعات دقیقی دربارهٔ جنبه‌های مختلف وضعیت ارائه کنند دشوار است.

تغییر دیدگاه از پواسونی به فرکتالی در پژوهشهای ترافیک شبکه، بر شناخت ما از ترافیک، واقعی شبکه تأثیر عمده‌ای داشته است، تا آنجا که اکنون می‌دانیم که چرا ترافیک جمعی اینترنت بر مقیاسهای زمانی چندصد میلی‌ثانیه و بیشتر، رفتاری فرکتالی از خود نشان می‌دهد. استدلالهای ریاضی مربوطه هم دقیق و هم ساده‌اند و کاملاً با شهود پژوهشگران شبکه همسو هستند، و می‌توان آنها را به سادگی برای کسی که در کار شبکه خبره نیست توضیح داد، و اینها بر موفقیت این تغییر نگرش صحه می‌گذارند. بخش دیگری از این درک جدید که به همان اندازه اهمیت دارد فهم این مطلب است که ما هنوز تصور روشن مشابهی از دینامیک ترافیک اینترنت بر مقیاسهای زمانی کمتر از چندصد میلی ثانیه نداریم؛ در این مقیاسها، سازوکارهای کنترل راه‌بندان پایانه به پایانه، جریان بسته‌ها را در لایه‌های مختلف سلسله مراتب شبکه تعیین می‌کنند. اما یافته‌های تجربی به تازگی حاکی از آن است که ترافیک اندازه‌گیری شدهٔ اینترنت بر این مقیاسهای زمانی کوچک نشان‌دهندهٔ بروز بی‌نظمیهای محلی است که با رفتار مقیاس‌بندی چندفرکتالی سازگارند و می‌توان آنها را به‌خوبی با استفاده از تکنیکهای مبتنی بر موجک[1] تحلیل کرد. با آنکه انتظار می‌رود که موجکها تحلیل چند فرکتالی ترافیک اینترنت را تسهیل کنند، اما کاربرد شبکه نیز به همان اندازه بر گسترش روشهای جدید مبتنی بر موجک به عنوان راهی برای بهره‌برداری از خصوصیات و ساختار غنی مجموعه‌های داده‌های در دسترس، تأثیر سازنده دارد.

بالاخره، از پیشرفتهایی با ماهیت متفاوت یاد می‌کنیم که به شدت محتاج عنایت ریاضیات است و بسیار امید می‌رود که مسائل ریاضی جالبی در خود داشته باشد. اکنون پروژه‌های پژوهشی بسیاری براساس اندازه‌گیریهای روشمند اینترنت دردست انجام‌اند: مجموعه‌ای از هزاران سکوی کاوش[1] بالقوه در شبکه وجود دارند که هم در اندازه‌گیریهای مستقل و هم در اندازه‌گیریهای هماهنگ مسیرهای شبکه دخیل هستند تا رفتار شبکه را تعیین کنند و مشکلات را بیابند. این نگرش شبکه‌ای به دینامیک ترافیک اینترنت، هم ابعاد زمان و فضا را در برمی‌گیرد و هم ابعادی را که به‌وسیله لایه‌های مختلف سلسله مراتب شبکه تعریف شده‌است. واضح است که در اینجا مسائل جالب آنهایی هستند که به تعاملها، وابستگیها و ناهمگنیها در زمان، فضا و در خلال لایه‌های مختلف شبکه می‌پردازند. علاوه بر این، وقتی هدف غایی آن باشد که دهها میلیون کاربر اینترنت، مستقل از مکان استقرار یا زمان دستیابی به اطلاعات، قادر باشند میزان استفادهٔ خود از اینترنت را تعیین کنند، و مهندسی شبکه به گونه‌ای بهبود یابد که نیازهای بیشمار آنان را تأمین کند، آنگاه مسائل تحلیلی نیاز به یک عنصر مرکزی مقیاس دارند، که باید به حدودی بسیار فراتر از آنچه تاکنون مدنظر بوده توسعه یابد. اگرچه مقیاس صرف ممکن است رُعب‌آور به نظر بیاید، اما ما هنوز امتیاز بزرگی در اختیار داریم و آن مجموعه‌های عالی از داده‌هاست که می‌توان بر روی آنها کار کرد. آنگاه مسائل به یک چالش دشوار بدل می‌شوند، و حل آنها از حوزهٔ ریاضیات صرفاً جالب فراتر می‌رود و وارد نظام پاسخ‌گویی به سؤالاتی می‌شود که به تعیین میزان اهمیت این زیربنای عظیم جهانی کمک خواهد کرد.

یادداشتها

۱. توجه کنید که هدف این مقاله ارائهٔ یک راهنمای جامع کتاب‌شناسانه از آخرین دستاوردها و پیشرفتهای این حوزه نیست؛ خوانندهٔ علاقه‌مند می‌تواند چنین راهنمایی را مثلاً در مقالهٔ تحقیقاتی اخیر [WTE96] بیابد.

۲. در اینجا منظور ما یک پیام صوتی است. حالت جالب شمارگیری برای تماس با یک ارائه‌دهندهٔ خدمات اینترنت را کمی بعد بررسی خواهیم کرد.

۳. ارلانگ، پالم، ویاکینتن و عده‌ای دیگر حدود نیم‌قرن پیش پیشگامان این کار بودند.

۴. به‌واقع، پژوهشگرانی را می‌بینیم که در تلاش برای توصیف مشاهدات خود به استعاره متوسل شده‌اند: «یخ‌شکن‌های ترافیک بر "موجها"ی باند سوارند، و آنها نیز به نوبهٔ خود بر روی "برآمدگیها"ی باندتر حرکت می‌کنند.» [FL91]

۵. نتایج اندازه‌گیریها به‌وسیلهٔ موگل (J. Mogul) در ۱۹۹۵ جمع‌آوری شده‌اند و از طریق بایگانی ترافیک اینترنت، http://www. acm. org/sigcomm/ITA، قابل دستیابی هستند.

۶. برای مثال به تحقیق اخیر انویر و همکارانش [ABLM98] نگاه کنید که برای همهٔ مجلات فیزیکال ریویو از ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۶، یک محدودهٔ مقیاس‌بندی‌شدهٔ فرکتالی‌بودن را گزارش می‌دهد که به صورت تجربی تعریف شده است و روی‌هم‌رفته ۳ر۱ دهه (مرتبهٔ بزرگی، مبنای ۱۰) را در بر می‌گیرد.

1. wavelet

1. probe platform

۷. خاطر نشان می‌کنیم که این پدیده منحصر به وب نیست. برنامه‌های کاربردی دیگری نیز ناگهان ظهور کرده‌اند. وب ــ تاکنون ــ تنها موردی است که توسعهٔ انفجاری آن بیش از چند سال ادامه یافته است.

مراجع

[ABLM98] D. Avnir, O. Biham, D. Lidar, and O. Malcai, *Is the geometry of nature fractal?*, Science **279**, (Jan. 2, 1998), 39-40.

[Ch95] C. Chatfield, *Model uncertainty, data mining and statistical inference*, J. Roy. Statist. Soc. A **158** (1995), 419-466.

[FGWK98] A. Feldmann, A. C. Gilbert, W. Willinger, and T. G. Kurtz, *The changing nature of network traffic: Scaling phenomena*, Comput. Commun. Rev. **28**, no. 2 (April 1998).

[FL91] H. Fowler and W. E. Leland, *Local area network traffic characteristics, with implications for broadband network congestion management*, IEEE J. Selected Areas Commun. **9** (Sept. 1991), 1139-1149.

[LTWW94] W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, and D. V. Wilson, *On the self-similar nature of Ethernet traffic (Extended Version)*, IEEE/ACM Trans. Networking **2** (1994), 1-15.

[Lo98] M. Lottor, `http://www.nw.com/zone/WWW/top.html`, February 1998.

[Pa94] V. Paxson, *Growth trends in wide-area TCP connections*, IEEE Network **8** (July/August 1994), 8-17.

[PF95] V. Paxson and S. Floyd, *Wide-area traffic: The failure of poisson modeling*, IEEE/ACM Trans. Networking **3** (June 1995), 226-244.

[WTE96] W. Willinger, M. S. Taqqu, and A. Erramilli, *A bibliographical guide to self-similar traffic and performance modeling for modern high-speed networks*, Stochastic Networks: Theory and Applications (F. P. Kelly, S. Zachary, and I. Ziedins, eds.), Roy. Statist. Lecture Note Ser., vol. 4, Clarendon Press, Oxford, 1996, pp. 339-366.

* * * * * *

• Walter Willinger and Vern Paxson, "Where mathematics meets the Internet", *Notices Amer. Math. Soc.*, (8) **45** (1998) 961-970.

* والتر ویلینجر، آزمایشگاه تحقیقاتی AT&T در فلورهم پارک نیوجرزی، آمریکا

`walter@research.att.com`

** ورن پاکسن، آزمایشگاه ملی لورنس، وابسته به دانشگاه کالیفرنیا در برکلی، آمریکا

`vern@ee.lbl.gov`

. . . واضح به‌نظر می‌رسد که در پنجاه سال آینده شاهد تغییرات اساسی در تقریباً همهٔ جنبه‌های زندگی، و بیش از هر چیز در رابطهٔ بین فرد و نهاد، خواهیم بود. بیشتر نهادها به‌صورت فعلیشان وجود نخواهند داشت. اما در دنیایی که مملو از افراد مطلع و مختار است و تغییر تنها مشخصهٔ ثابت آن است، چه وسایلی برای تضمین ثبات اجتماعی وجود خواهد داشت؟ این وسایل به چه صورتی خواهند بود؟ وقتی تکنولوژی مخابرات محدودیتهای مکانی و زمانی را از پیش پای فرد بردارد، چه بر سر هویت جامعه خواهد آمد؟ قانون چه کسی بر سپهر اطلاعاتی (cyberspace) حاکم خواهد بود؟ اگر از تکنولوژی برای تشدید پراکندگی در جامعهٔ انسانی، به جای وحدت بخشیدن به نژاد انسانی تحت الگویی واحد، استفاده کنیم، چگونه از سردرگمی پرهیز خواهیم کرد؟ در صورت وجود هزار کانال تلویزیونی، سرنوشت ارزشهای مشترک، و آگاهی مشترک که عامل پیوند افراد اجتماع‌اند چه خواهد بود؟ اگر هرکسی ناشر آرای خودش باشد، معیار و استاندارد چه معنایی خواهد داشت؟ وقتی سرعت تولید دانش از توانایی ما برای مدیریت آن فراتر رود، آیا از کوشش دست خواهیم کشید و در پیلهٔ واقعیت عملی فرو خواهیم رفت؟

اشکال این پرسشها و پرسشهای مشابه این است که ممکن است پرسشهای نابجایی باشند. منتقدان گوتنبرگ نگران آن بودند که فن چاپ فاجعهٔ حذف حافظه را به‌بار آورد. سازندگان پردازندهٔ مرکزی (mainframe) در دههٔ ۱۹۵۰ از تصور یک بازار ملی آمریکایی که حداکثر به پنج کامپیوتر نیاز داشته باشد، نگران بودند. مخالفان تلگراف می‌پرسیدند «ایالت مین چه حرفی دارد که با ایالت تگزاس بزند؟» ما به‌ناگزیر محصور در زمینه و شرایط تاریخی خود هستیم. بنابراین رویدادها، گرایشها، و اثرات نوآوریها را براساس آنچه امور واقع می‌دانیم، تعبیر می‌کنیم. ولی مسأله این است که آنچه امروز امر واقع است، ممکن است فردا نباشد. پس چگونه می‌توانیم خارج از قالب زمانی و تاریخی خود دربارهٔ خود بیندیشیم؟ . . .

یکی از مهیجترین جنبه‌های تکنولوژی اطلاعات این است که در حالی که دنیا را پیچیده و پیچیده‌تر و سرعت تغییرات آن را بیشتر و بیشتر می‌کند، در حالی که فاصلهٔ زمانی بین نوآوری و تأثیر آن را کوتاه و کوتاهتر می‌سازد، در حالی که همهٔ ما را هر چه بیشتر از طریق شبکه به هم نزدیک، و با هم مرتبط می‌سازد، در عین حال برای هر یک از ما امکان زندگی اختصاصی‌تر و انفرادی‌تری را فراهم می‌کند؛ همچنین سرعت و مقیاس عملکرد سیستمها امکان جستجو و یافتن الگوهای فرایند تغییر را میسر می‌سازد.

* * * * * *

برگرفته از پیشگفتاری به قلم James Burk بر کتاب
Peter J. Denning and Robert M. Metcalfe, *Beyond Calculation*, Copernicus, Springer-Verlag (1997)