رهیافت هندسی برای مسئله‌ی مسیر کوتاه‌ترین گذر در شبکه‌های شهری

(مهندس آیندهٔ ما — ستون مهندسی)

شبکه‌های شهری را می‌توان با گراف‌هایی مدل کرد که در آن چهارراه‌ها گره‌اند و خیابان‌ها یال‌هایی با وزن‌های متفاوت. مسئله‌ی کوتاه‌ترین گذر میان دو گره، با وزن‌های مثبت، با الگوریتم دایکسترا در زمان $O(E + V \log V)$ حل می‌شود. این مقاله نشان می‌دهد چگونه همان مسئله با محدودیت‌های واقعی شهر — عابر پیاده، خودرو، زمان چراغ راهنمایی و ظرفیت معابر — به مسئله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه تبدیل می‌شود و چرا پاسخ ساده دیگر کافی نیست.

مدل پایه: گراف وزن‌دار و دایکسترا

فرض کنید شهر را گرافی جهت‌دار $G = (V, E)$ با وزن $w(e) \geq 0$ برای هر یال e بگیریم. الگوریتم دایکسترا با صف کمینه (min-heap) کار می‌کند و اگر صف را با فیبوناچی پیاده کنیم، پیچیدگی $O(E + V \log V)$ می‌شود. تا اینجا همه چیز روشن است. اما وزن یال چه معنایی دارد؟ اگر وزن فاصله باشد، مسیر کوتاه‌ترین است؛ اگر زمان سفر باشد، مسیر سریع‌ترین؛ اگر هزینه باشد، ارزان‌ترین. تصمیم مهندسی از انتخاب وزن آغاز می‌شود، نه از الگوریتم.

چراغ‌های راهنمایی: زمان‌بندی ثابت در مقابل سازگار

یک چراغ راهنمایی با چرخه‌ی ثابت، مثلاً ۶۰ ثانیه سبز و ۴۰ ثانیه قرمز، برای عابر پیاده یک تأخیر تصادفی با میانگین ۱۸ ثانیه می‌سازد. اگر شبکه شامل ۲۰۰ چراغ باشد و عابر ۱۲ چراغ را طی کند، انتظار کل ۳۶۰ ثانیه است. اما اگر چراغ‌ها هماهنگ باشند و موج سبز ایجاد کنند، همان مسیر با ۹۰ ثانیه طی می‌شود. این تفاوت چهار برابر است و هیچ الگوریتم مسیریابی آن را جبران نمی‌کند. پس وزن یال باید تابعی از زمان باشد، نه عدد ثابت.

شبکه‌های شهری از دیدگاه مهندسی

(مهندس آینده‌ی ما — ستون مهندسی)

شهرها را می‌توان گراف دید: چهارراه‌ها گره‌اند و خیابان‌ها یال‌هایی با وزن‌های متفاوت. این ساده‌سازی به ما اجازه می‌دهد مسئله‌ی رفت‌وآمد را با ابزارهای ریاضی حل کنیم. اما وقتی مهندس می‌گوید «مسیر کوتاه‌ترین»، منظورش دقیقاً چیست؟ کوتاه‌ترین از نظر فاصله، زمان، هزینه، یا حتی احتمال تصادف؟ این مقاله از صفر شروع می‌کند و نشان می‌دهد چگونه یک مسئله‌ی ساده به مسئله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه تبدیل می‌شود.

گذرگاه‌های پرتردد، ۱ شهریور/آبان ۱۴۰۱ در شهر نارنجان

(مهندس آینده‌ی ما — ستون مهندسی)

شهر نارنجان در سال ۱۴۰۱ با ۱۲ گذرگاه پرتردد روبه‌رو است که روزانه بیش از ۴۲ هزار خودرو از آن عبور می‌کند. در این گزارش ۱۸ گذرگاه بررسی شده‌اند و داده‌ها از سامانه‌ی کنترل ترافیک شهر گردآوری شده‌اند. هدف ما این است که نشان دهیم چه زمانی و چرا گره‌ها کند می‌شوند و کدام تغییر کوچک بیشترین اثر را دارد. این گزارش برای مهندسان ترافیک، شهرداری‌ها و دانشجویان مهندسی نوشته شده است.

گذرگاه‌های پرتردد

گذرگاه میدان نخل به تنهایی ۳۱٪ از کل تأخیر ثبت‌شده در شهر را می‌سازد. پس از آن گذرگاه پل آهنی ۲۴٪ و گذرگاه بازار مرکزی ۱۹٪ قرار دارند. سه گذرگاه دیگر روی هم ۲۶٪ تأخیر می‌سازند و بقیه سهم کمی دارند. این توزیع نشان می‌دهد که مشکل پراکنده نیست و تمرکز بالایی دارد. اگر قرار باشد بودجه محدود تخصیص داده شود، باید از همین جا شروع کرد.

چراغ راهنمایی: زمان‌بندی ثابت در مقابل سازگار

چراغ راهنمایی میدان نخل با چرخه‌ی ۶۰ ثانیه سبز و ۴۰ ثانیه قرمز کار می‌کند. این زمان‌بندی ثابت است و به تعداد خودروها توجه نمی‌کند. در ساعت ۸ تا ۹ صبح، صف خودروها تا ۳۰۰ متر می‌رسد و زمان انتظار به ۱۱ دقیقه می‌رسد. در همان ساعت، چراغ پل آهنی با زمان‌بندی سازگار کار می‌کند و صف به ۱۲۰ متر می‌رسد. تفاوت از کجا می‌آید؟ سازگار بودن یعنی چراغ زمان سبز را بر اساس طول صف تنظیم می‌کند. اما این کار هزینه دارد: به حسگر، دوربین و نرم‌افزار نیاز دارد و اگر حسگر خراب شود، چراغ به حالت پیش‌فرض برمی‌گردد.

محاسبه‌ی زمان سفر و شاخص اشباع

زمان سفر روی یک گذرگاه با فرمول $T = T_0 \cdot (1 + \alpha (V/C)^{\beta})$ محاسبه می‌شود. T_0 زمان سفر در شرایط خالی، V حجم خودرو، C ظرفیت گذرگاه، α و β ضرایب تجربی‌اند. برای $\alpha = 0.15$ و $\beta = 4$ و $V/C = 0.9$، زمان سفر حدود ۱.۶ برابر T_0 می‌شود. شاخص اشباع V/C است و هر گذرگاه با $V/C > 0.85$ باید بررسی شود. این فرمول ساده است و برای شهر واقعی باید کالیبره شود.

پیشنهاد: سه گام کم‌هزینه

گام اول: تنظیم زمان چراغ‌ها بر اساس ساعت روز، بدون نصب سخت‌افزار. گام دوم: نصب حسگر در ۴ گذرگاه پرتردد و آزمایش سازگار. گام سوم: ارزیابی نتایج و تصمیم درباره‌ی گسترش. هزینه‌ی تخمینی گام اول ۱۲ میلیون تومان است و گام دوم ۴۸ میلیون. بازگشت سرمایه برای گام اول حدود ۱۸ ماه است. این اعداد تخمینی‌اند و در گزارش کامل توضیح داده می‌شود.

محدودیت‌ها و کارهای آینده

این مدل فرض می‌کند رفتار رانندگان تصادفی نیست و همه از کوتاه‌ترین مسیر استفاده می‌کنند. در واقع برخی از مسیر آشنا استفاده می‌کنند و برخی از مسیر شلوغ. مدل احتمالی برای انتخاب مسیر، مدل ترافیک پویا و داده‌های واقعی از سامانه‌ی کنترل ترافیک شهر برای کالیبره کردن مدل، در شماره‌های بعد بررسی می‌شوند. اگر دوست دارید بدانید چرا فلان چراغ در فلان ساعت کند می‌شود، ستون را دنبال کنید.

شبکه‌های شهری از دیدگاه مهندسی

(مهندس آینده‌ی ما — ستون مهندسی)

شهرها را می‌توان با گراف‌هایی مدل کرد که در آن چهارراه‌ها گره‌اند و خیابان‌ها یال‌هایی با وزن‌های متفاوت. این ساده‌سازی به ما اجازه می‌دهد مسئله‌ی رفت‌وآمد را با ابزارهای ریاضی حل کنیم. اما وقتی مهندس می‌گوید «مسیر کوتاه‌ترین»، منظورش دقیقاً چیست؟ کوتاه‌ترین از نظر فاصله، زمان، هزینه، یا حتی احتمال تصادف؟ این مقاله از صفر شروع می‌کند و نشان می‌دهد چگونه یک مسئله‌ی ساده به مسئله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه تبدیل می‌شود.

مدل پایه: گراف وزن‌دار و دایکسترا

فرض کنید شهر را گرافی جهت‌دار $G = (V, E)$ با وزن $w(e) \geq 0$ برای هر یال e بگیریم. الگوریتم دایکسترا با صف کمینه (min-heap) کار می‌کند و اگر صف را با فیبوناچی پیاده کنیم، پیچیدگی $O(E + V \log V)$ می‌شود. تا اینجا همه چیز روشن است. اما وزن یال چه معنایی دارد؟ اگر وزن فاصله باشد، مسیر کوتاه‌ترین است؛ اگر زمان سفر باشد، مسیر سریع‌ترین؛ اگر هزینه باشد، ارزان‌ترین. پس وزن یال باید تابعی از زمان باشد، نه عدد ثابت.

چراغ‌های راهنمایی: زمان‌بندی ثابت در مقابل سازگار

چراغ راهنمایی میدان نخل با چرخه‌ی ثابت ۶۰ ثانیه سبز و ۴۰ ثانیه قرمز کار می‌کند. این زمان‌بندی ثابت است و به تعداد خودروها توجه نمی‌کند. در ساعت ۸ تا ۹ صبح، صف خودروها تا ۳۰۰ متر می‌رسد و زمان انتظار به ۱۱ دقیقه می‌رسد. در همان ساعت، چراغ پل آهنی با زمان‌بندی سازگار کار می‌کند و صف به ۱۲۰ متر می‌رسد. تفاوت از کجا می‌آید؟ سازگار بودن یعنی چراغ زمان سبز را بر اساس طول صف تنظیم می‌کند. اما این کار هزینه دارد: به حسگر، دوربین و نرم‌افزار نیاز دارد و اگر حسگر خراب شود، چراغ به حالت پیش‌فرض برمی‌گردد.

محاسبه‌ی زمان سفر و شاخص اشباع

زمان سفر روی یک گذرگاه با فرمول $T = T_0 \cdot (1 + \alpha (V/C)^{\beta})$ محاسبه می‌شود. T_0 زمان سفر در شرایط خالی، V حجم خودرو، C ظرفیت گذرگاه، α و β ضرایب تجربی‌اند. برای $\alpha = 0.15$ و $\beta = 4$ و $V/C = 0.9$، زمان سفر حدود ۱.۶ برابر T_0 می‌شود. شاخص اشباع V/C است و هر گذرگاه با $V/C > 0.85$ باید بررسی شود. این فرمول ساده است و برای شهر واقعی باید کالیبره شود.

پیشنهاد: سه گام کم‌هزینه

گام اول: تنظیم زمان چراغ‌ها بر اساس ساعت روز، بدون نصب سخت‌افزار. گام دوم: نصب حسگر در ۴ گذرگاه پرتردد و آزمایش سازگار. گام سوم: ارزیابی نتایج و تصمیم درباره‌ی گسترش. هزینه‌ی تخمینی گام اول ۱۲ میلیون تومان است و گام دوم ۴۸ میلیون. بازگشت سرمایه برای گام اول حدود ۱۸ ماه است. این اعداد تخمینی‌اند و در گزارش کامل توضیح داده می‌شود.

محدودیت‌ها و کارهای آینده

این مدل فرض می‌کند رفتار رانندگان تصادفی نیست و همه از کوتاه‌ترین مسیر استفاده می‌کنند. در واقع برخی از مسیر آشنا استفاده می‌کنند و برخی از مسیر شلوغ. مدل احتمالی برای انتخاب مسیر، مدل ترافیک پویا و داده‌های واقعی از سامانه‌ی کنترل ترافیک شهر برای کالیبره کردن مدل، در شماره‌های بعد بررسی می‌شوند. اگر دوست دارید بدانید چرا فلان چراغ در فلان ساعت کند می‌شود، ستون را دنبال کنید.

گذرگاه‌های پرتردد، ۱ شهریور/آبان ۱۴۰۱ در شهر نارنجان

(مهندس آینده‌ی ما — ستون مهندسی)

شهر نارنجان در سال ۱۴۰۱ با ۱۲ گذرگاه پرتردد روبه‌رو است که روزانه بیش از ۴۲ هزار خودرو از آن عبور می‌کند. در این گزارش ۱۸ گذرگاه بررسی شده‌اند و داده‌ها از سامانه‌ی کنترل ترافیک شهر گردآوری شده‌اند. هدف ما این است که نشان دهیم چه زمانی و چرا گره‌ها کند می‌شوند و کدام تغییر کوچک بیشترین اثر را دارد. این گزارش برای مهندسان ترافیک، شهرداری‌ها و دانشجویان مهندسی نوشته شده است.

گذرگاه‌های پرتردد

گذرگاه میدان نخل به تنهایی ۳۱٪ از کل تأخیر ثبت‌شده در شهر را می‌سازد. پس از آن گذرگاه پل آهنی ۲۴٪ و گذرگاه بازار مرکزی ۱۹٪ قرار دارند. سه گذرگاه دیگر روی هم ۲۶٪ تأخیر می‌سازند و بقیه سهم کمی دارند. این توزیع نشان می‌دهد که مشکل پراکنده نیست و تمرکز بالایی دارد. اگر قرار باشد بودجه محدود تخصیص داده شود، باید از همین جا شروع کرد.

چراغ