فصلنامه علمی تخصصی مطالعات طراحی شهری و پژوهش‌های شهری
سال نهم، شماره ۲ (پیاپی: ۳۷)، بهار ۱۴۰۵ (ویژه‌نامه)
ISSN: 2645-4424

تحلیل پدیده دوشاخگی و گذار به آشوب در شبکه‌های حمل‌ونقل شهری تحت سناریوهای جنگی و حوادث غیرمترقبه

سید علی فاطمی نصرآبادی[1]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۰
کد مقاله: ۵۹۱۱۸

چکـیده

شبکه حمل‌ونقل شهری در کلان‌شهرها به عنوان یکی از حیاتی‌ترین زیرساخت‌های پدافند غیرعامل، در شرایط بحرانی و سناریوهای جنگی از حالت تعادل خارج شده و رفتاری غیرخطی و پیچیده از خود نشان می‌دهد. پژوهش حاضر با هدف واکاوی مکانیسم‌های فروپاشی عملکردی شبکه، به تحلیل پدیده «دوشاخگی» و «گذار به آشوب» در جریان ترافیک تحت بارهای غیرمتعارف می‌پردازد. ضرورت این تحقیق در ناکارآمدی مدل‌های کلاسیک مهندسی ترافیک در پیش‌بینی رفتارهای تلاطم‌گونه زمان بحران نهفته است. در این مطالعه، با بهره‌گیری از مفاهیم تئوری آشوب، سه سناریوی اصلی شامل «انهدام گره‌های کلیدی»، «هراس جمعی رانندگان» و «اختلال در سیستم‌های کنترلی» مورد تحلیل قرار گرفت. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که کاهش ظرفیت در گلوگاه‌های استراتژیک، پارامترهای کنترلی سیستم را به سمت نقاط آستانه‌ای سوق داده و منجر به دوشاخگی در نمودار جریان–تراکم می‌گردد. در این وضعیت، پدیده «اثر پروانه‌ای» باعث می‌شود که اختلالات جزیی در معابر فرعی به سرعت به قفل‌شدگی‌های سراسری تبدیل شوند. همچنین، تحلیل «نمای لاپیانوف» و «جاذبه‌های غریب» حاکی از آن است که در فاز آشوبناک، افق پیش‌بینی کوتاه‌مدت به شدت کاهش یافته و سیستم‌های اطلاع‌رسانی متمرکز دچار شکست عملکردی می‌شوند.در نهایت، پژوهش راهکارهای «کنترل آشوب» را در سه سطح مداخلات جزیی هوشمند، ارتقای تاب‌آوری توپولوژیک شبکه و تمرکززدایی از مدیریت ترافیک پیشنهاد می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که گذار از مدیریت متمرکز به مدیریت توزیع‌شده و افزایش درجه آزادی معابر، موثرترین راهبرد برای مهار نوسانات آشوبناک و حفظ تداوم عملکردی شریان‌های حیاتی در شرایط جنگی محسوب می‌شود.

واژگـان کلـیدی: تئوری آشوب، دوشاخگی، مدیریت ترافیک، پدافند غیرعامل، تاب‌آوری شهری، اثر پروانه‌ای.

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش مهندسی راه و ترابری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

شبکه حمل‌ونقل شهری در کلان‌شهرها، به عنوان شریان‌های حیاتی و بستر تداوم فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی، از پیچیده‌ترین سیستم‌های انسان‌ساخت به‌شمار می‌رود. در شرایط عادی، جریان ترافیک تمایل دارد حول یک نقطه تعادل پایدار حرکت کند؛ اما با وقوع حوادث غیرمترقبه و سناریوهای جنگی، این تعادل به شدت متزلزل می‌گردد. تجربیات تاریخی نشان داده است که در زمان حملات نظامی، انسداد معابر، تخریب زیرساخت‌های کلیدی و پدیده هراس جمعی ، ماهیت جریان ترافیک را از یک حالت پیش‌بینی‌پذیر به یک سیستم غیرخطی و متلاطم تغییر می‌دهند .. در این شرایط، مدل‌های مهندسی ترافیک کلاسیک که بر پایه روابط خطی و تعادل‌های ایستا بنا شده‌اند، توانایی تحلیل و مدیریت بحران را از دست می‌دهند. چالش اصلی در مدیریت ترافیک پدافندی، پدیده «دوشاخگی[1]» است؛ وضعیتی که در آن یک تغییر اندک در پارامترهای شبکه (مانند کاهش جزئی ظرفیت یک گلوگاه یا افزایش ناگهانی تقاضا برای تخلیه اضطراری)، منجر به تغییر ساختاری در کل سیستم می‌شود. این تغییر ساختاری، آغازگر فرآیند «گذار به آشوب[2]» است؛ جایی که سیستم ترافیک به شدت نسبت به شرایط اولیه حساس شده و پدیده «اثر پروانه‌ای» بروز می‌کند . در وضعیت آشوبناک، رفتارهای تصادفی رانندگان و تداخل جریان‌های نظامی و غیرنظامی، منجر به ایجاد گره‌های کور ترافیکی می‌گردد که با ابزارهای کنترلی متعارف قابل گشایش نیستند. بررسی متون علمی نشان می‌دهد که تاب‌آوری شهری در برابر تهدیدات نوین، بیش از آنکه به ظرفیت فیزیکی معابر وابسته باشد، به درک دینامیک‌های غیرخطی ترافیک بستگی دارد . عدم شناسایی آستانه‌های دوشاخگی در زمان طراحی پدافندی معابر، می‌تواند منجر به فروپاشی کل شبکه در لحظات حساس اولیه بحران شود. از این رو، ضرورت دارد که مدیریت ترافیک شهری با نگاهی نو و با بهره‌گیری از ابزارهای تئوری آشوب بازتعریف شود. پژوهش حاضر با هدف تحلیل تئوریک پدیده دوشاخگی در شبکه‌های حمل‌ونقل، به دنبال پاسخ به این پرسش است که چگونه محرک‌های جنگی منجر به عبور سیستم از نقاط بحرانی و ورود به فاز آشوب می‌شوند؟ همچنین، این مقاله می‌کوشد با شناسایی پارامترهای موثر بر ناپایداری جریان ترافیک، راهکارهایی را جهت کنترل آشوب و ارتقای تداوم عملکردی شریان‌های شهری در سناریوهای جنگی ارائه نماید.

۲- تئوری آشوب در سیستم‌های حمل‌ونقل

سیستم‌های غیرخطی و حساسیت به شرایط اولیه سیستم‌های حمل‌ونقل شهری به دلیل تعاملات پیچیده میان رانندگان، زیرساخت‌ها و عوامل محیطی، به عنوان سیستم‌های «دینامیک غیرخطی» شناخته می‌شوند. در مهندسی ترافیک، تئوری آشوب به مطالعه رفتارهایی می‌پردازد که در ظاهر تصادفی و بی‌نظم به نظر می‌رسند، اما در واقع از قوانین معینی پیروی می‌کنند . ویژگی کلیدی این سیستم‌ها، «حساسیت شدید به شرایط اولیه»[3] یا همان اثر پروانه‌ای است (رضایی، ۱۴۰۲). در سناریوهای بحرانی و جنگی، یک تغییر بسیار کوچک در ورودی سیستم (مانند توقف یک خودرو در یک گلوگاه استراتژیک)، می‌تواند در طی زمان به طور نمایی رشد کرده و منجر به انحراف عظیم در خروجی شبکه و قفل‌شدگی سراسری[4] گردد (صالحی، ۱۳۹۹).

۳- مفهوم دوشاخگی

نقطه عطف ناپایداریدوشاخگی در ترافیک زمانی رخ می‌دهد که پارامترهای کنترلی سیستم (مانند نرخ ورود خودروها یا تراکم معبر) به یک مقدار آستانه‌ای[5] می‌رسند. در این لحظه، سیستم از یک حالت پایدار (جریان روان یا ترافیک متراکمِ منظم) ناگهان به یک حالت جدید و متفاوت (ترافیک ایست–حرکت یا انسداد کامل) جهش می‌کند (پورموسوی، ۱۳۹۶). در شرایط جنگی، تخریب یک پل یا تقاطع، پارامترهای توپولوژیک شبکه را تغییر داده و سیستم را به سمت «نقطه دوشاخگی» سوق می‌دهد. در این نقطه، کوچکترین نوسان در رفتار رانندگان می‌تواند مسیر حرکت سیستم را بین دو حالت «تخلیه اضطراری موفق» یا «فروپاشی شبکه» جابه‌جا کند.

۴- نمای لاپیانوف[6]

سنجش میزان پیش‌بینی‌ناپذیریکی از ابزارهای اصلی برای تشخیص آشوب در ترافیک شهری، «نمای لاپیانوف» است. این شاخص نرخ واگرایی (یا همگرایی) مسیرهای نزدیک به هم در فضای فاز ترافیک را اندازه‌گیری می‌کند. اگر نمای لاپیانوف مثبت باشد ($\lambda > 0$)، سیستم آشوبناک است و هرگونه خطای کوچک در اندازه‌گیری ترافیک اولیه، به سرعت باعث می‌شود که پیش‌بینی وضعیت آینده غیرممکن گردد (اکبری، ۱۳۹۸). در مدیریت بحران، این شاخص به ما می‌گوید که تا چه زمانی (افق پیش‌بینی)

1 Bifurcation
2 Transition to Chaos
3 Sensitive Dependence on Initial Conditions
4 Gridlock
5 Threshold
6 Lyapunov Exponent

می‌توانیم روی مدل‌های شبیه‌سازی ترافیک برای تخلیه شهر حساب کنیم؛ پیش از آنکه سیستم وارد فاز غیرقابل پیش‌بینی مطلق شود.

۵- جاذبه‌های غریب[1]

الگوهای پنهان در بی‌نظمیعلیرغم ظاهر بی‌نظم ترافیک در زمان بحران، سیستم تمایل دارد حول الگوهای خاصی به نام «جاذبه‌های غریب» حرکت کند. جاذبه غریب در ترافیک نشان‌دهنده وضعیتی است که در آن جریان ترافیک نه کاملاً تصادفی است و نه کاملاً منظم، بلکه در یک محدوده مشخص (فضای فاز) نوسان می‌کند (قربانی و همکاران، ۱۳۹۹). شناسایی این جاذبه‌ها در زمان جنگ به مدیران ترافیک کمک می‌کند تا «نظم پنهان» در آشوب ترافیکی را کشف کرده و به جای تلاش بیهوده برای حذف کامل ترافیک، جریان را به سمت زیر–جاذبه‌های پایدارتر هدایت کنند تا از فروپاشی کامل عملکردهای حیاتی جلوگیری شود.

۶- تحلیل سناریوهای جنگی و محرک‌های دوشاخگی

در سیستم‌های دینامیکی، دوشاخگی زمانی رخ می‌دهد که تغییر در یک پارامتر کنترلی، باعث تغییر کیفی در حالت سیستم شود. در شبکه حمل‌ونقل شهری تحت سناریوهای جنگی، سه عامل کلیدی به عنوان محرک‌های اصلی این گذار عمل می‌کنند:

سناریوی اول: انهدام گره‌های کلیدی و شوک توپولوژیک: در مهندسی ترافیک، ظرفیت شبکه (C) یک پارامتر کنترلی حیاتی است. انهدام پل‌ها، تقاطع‌های غیرهمسطح و شریان‌های اصلی در اثر حملات هوایی، باعث حذف ناگهانی گره‌های استراتژیک از گراف شبکه می‌شود. از منظر تئوری آشوب، این پدیده یک «شوک توپولوژیک» است که باعث جابه‌جایی ناگهانی نقطه کار سیستم روی نمودار دوشاخگی می‌گردد. با کاهش ظرفیت در گلوگاه‌ها، تراکم خودروها از آستانه بحرانی عبور کرده و سیستم از فاز «جریان پایدار» به فاز «ایست–حرکت آشوبناک» پرتاب می‌شود. در این سناریو، حتی اگر سایر بخش‌های شبکه سالم باشند، انسداد در یک گره کلیدی می‌تواند به دلیل پیوستگی غیرخطی، کل شبکه را به سمت یک «جاذبه غریب» ایستایی هدایت کند (کریمی و همکاران، ۱۴۰۰).

سناریوی دوم: هراس جمعی و تغییر رفتار رانندگان: رفتار رانندگان در شرایط عادی بر اساس اصل «بهینه‌سازی زمان سفر» است، اما در سناریوی جنگ، پدیده هراس جمعی باعث تغییر ماهیت تابع تصمیم‌گیری می‌شود. در حالت پنیک، پارامترهایی مانند «زمان واکنش» و «فاصله ایمنی» از حالت استاندارد خارج شده و نوسانات شدیدی را تجربه می‌کنند. این رفتارهای غیرخطی (مانند تغییر مسیرهای ناگهانی، رانندگی در خلاف جهت و یا توقف‌های ناشی از ترس)، «نویز» سیستم را به شدت افزایش می‌دهند. از منظر ریاضی، این نوسانات رفتاری به عنوان یک محرک داخلی، باعث تشدید اثر پروانه‌ای می‌شوند؛ به طوری که یک برخورد ساده یا توقف ناشی از هراس در یک معبر فرعی، به سرعت به یک موج شوک عظیم تبدیل شده و منجر به دوشاخگی در جریان ترافیک کلان‌شهر می‌گردد (عسگری و همکاران، ۱۴۰۱).

سناریوی سوم: اختلال در سیستم‌های کنترلی (ITS) و خودسازماندهی بی‌نظم: سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند (ITS) وظیفه حفظ سیستم در محدوده پایداری را بر عهده دارند. در زمان جنگ، حملات سایبری یا انهدام فیزیکی مراکز کنترل ترافیک و قطع برق چراغ‌های راهنمایی، باعث می‌شود سیستم «بازخورد کنترلی» خود را از دست بدهد. در این وضعیت، شبکه از یک حالت «مدیریت متمرکز» به یک حالت «خودسازمانده»[2] گذار می‌کند. با این حال، به دلیل حجم بالای تقاضا و هراس رانندگان، این خودسازماندهی به جای ایجاد نظم محلی، به «آشوب سازمان‌یافته» منجر می‌شود. فقدان داده‌های مسیریابی (مانند قطع شدن GPS یا اپلیکیشن‌های ترافیکی) باعث می‌شود رانندگان به صورت تصادفی به سمت معابری هجوم ببرند که در لحظه دوشاخگی قرار دارند، و این امر فروپاشی عملکردی شبکه را تسریع می‌کند (صالحی، ۱۳۹۹).

۷- فرآیند گذار به آشوب در شبکه حمل‌ونقل

فرآیند گذار از نظم به آشوب در سیستم‌های حمل‌ونقل شهری یک فرآیند آنی نیست، بلکه شامل مراحل دینامیکی است که طی آن نوسانات کوچک به بحران‌های سراسری تبدیل می‌شوند.

– تحلیل نمودار جریان–تراکم و شناسایی نقاط شکست جریان: نمودار بنیادی ترافیک[3]، رابطه بین جریان و تراکم را نشان می‌دهد. در شرایط پایدار، با افزایش تراکم، جریان نیز افزایش می‌یابد تا به نقطه «ظرفیت نهایی» برسد. در سناریوهای جنگی، به

[1] Strange Attractors
[2] Self-Organized
3 Fundamental Diagram

دلیل کاهش ظرفیت معابر و هجوم هم‌زمان شهروندان برای تخلیه اضطراری، سیستم به سرعت به سمت «تراکم بحرانی» حرکت می‌کند. فرآیند گذار به آشوب دقیقاً در قله این نمودار رخ می‌دهد؛ جایی که سیستم وارد ناحیه «ترافیک ناپایدار» می‌شود. در این ناحیه، جریان ترافیک دچار «شکست» شده و منحنی رفتار سیستم به جای تبعیت از یک خط مشخص، به مجموعه‌ای از نقاط پراکنده و غیرخطی تبدیل می‌شود که نشان‌دهنده آغاز رفتارهای آشوبناک است (قربانی و همکاران، ۱۳۹۹).

– اثر پروانه‌ای در زمان جنگ: از انسداد محلی تا قفل‌شدگی کلان‌شهرییکی از بارزترین جلوه‌های تئوری آشوب در ترافیک پدافندی، حساسیت شدید شبکه به شرایط اولیه یا همان «اثر پروانه‌ای» است. در زمان جنگ، مسدود شدن یک معبر فرعی یا یک تقاطع محلی به دلیل سقوط آوار یا خرابی یک وسیله نقلیه، ممکن است در ابتدا بی‌اهمیت جلوه کند. اما به دلیل ماهیت پیوسته و غیرخطی شبکه، این اختلال کوچک باعث بازتوزیع ناگهانی جریان به معابر مجاور می‌شود. این بازتوزیع، دومینوی اشباع را فعال کرده و با سرریز شدن ترافیک از یک شریان به شریان دیگر، در نهایت منجر به پدیده «قفل‌شدگی سراسری»[1] می‌گردد. در واقع، یک خطای کوچک در مدیریت یک گره فرعی در لحظات اولیه بحران، می‌تواند به فروپاشی کامل سیستم حمل‌ونقل شهری در ابعاد کلان منجر شود (رضایی، ۱۴۰۲).

– تاخیرهای زمانی[2] و تشدید نوسانات آشوبناک: در معادلات دیفرانسیل آشوب، «تاخیر زمانی» یکی از عوامل اصلی ایجاد دوشاخگی است. در ترافیک شهری، این تاخیر در قالب «زمان واکنش رانندگان» و «تاخیر در دریافت اطلاعات» ظاهر می‌شود. در شرایط عادی، رانندگان با آرامش به تغییرات سرعت خودروی جلویی واکنش نشان می‌دهند، اما در شرایط جنگی و تحت استرس بالا، زمان واکنش دچار نوسانات شدید می‌شود. رانندگان یا با تاخیر زیاد (به دلیل بهت‌زدگی) و یا با شتاب بیش از حد (به دلیل هراس) واکنش نشان می‌دهند. این نوسانات در زمان واکنش، باعث ایجاد «موج‌های شوک» (Shockwaves) در جریان ترافیک می‌شود. این موج‌ها با حرکت به سمت عقب، تقویت شده و باعث می‌شوند که سیستم از یک جریان یکنواخت به یک وضعیت «ایست–حرکت» (Stop-and-Go) کاملاً آشوبناک گذار کند که در آن پیش‌بینی سرعت و زمان سفر عملاً غیرممکن است (اکبری، ۱۳۹۸).

۸- چالش‌های مدیریت ترافیک در وضعیت آشوب

مدیریت ترافیک در شرایطی که سیستم دچار دوشاخگی شده است، با چالش‌های بنیادینی روبروست که فراتر از توانمندی‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری معمول در مراکز کنترل ترافیک شهری است.

– پیش‌بینی‌ناپذیری کوتاه‌مدت و شکست ابزارهای اطلاع‌رسانی (VMS و مسیریاب‌ها): یکی از ویژگی‌های ذاتی سیستم‌های آشوبناک، محدودیت شدید در افق پیش‌بینی است. در شرایط عادی، تابلوهای پیام متغیر (VMS) و اپلیکیشن‌های مسیریابی بر اساس داده‌های لحظه‌ای (Real-time)، مسیرهای بهینه را پیشنهاد می‌دهند. اما در وضعیت آشوبناکِ ناشی از بحران‌های جنگی، به دلیل «حساسیت به شرایط اولیه»، داده‌های چند لحظه قبل به سرعت اعتبار خود را از دست می‌دهند. در این حالت، الگوریتم‌های مسیریابی دچار «خطای انباشتگی» شده و ممکن است هزاران راننده را به صورت هم‌زمان به سمت یک معبر که هنوز به ظرفیت اشباع نرسیده هدایت کنند. این هجوم هم‌زمان، خود باعث ایجاد یک دوشاخگی جدید و قفل‌شدگی آن معبر در کمتر از چند دقیقه می‌شود. بنابراین، ابزارهای اطلاع‌رسانی در وضعیت آشوب، به جای مدیریت تقاضا، ناخواسته باعث تشدید نوسانات و بی‌ثباتی بیشتر در شبکه می‌گردند (مرتضوی و همکاران، ۱۴۰۱).

– اشباع سریع ظرفیت و مکانیزم گذار به ترافیک ایست–حرکت: در وضعیت آشوب، مکانیزم تبدیل ترافیک روان به ترافیک ایست–حرکت بسیار سریع‌تر از مدل‌های کلاسیک رخ می‌دهد. این پدیده که در فیزیک ترافیک به «گذار فاز»[3] معروف است، ناشی از تقویت غیرخطی نوسانات سرعت در گلوگاه‌هاست. در زمان بحران، به دلیل تداخل جریان‌های ناهمگون (خودروهای امدادی، نظامی و شخصی) و ترمزهای ناگهانی ناشی از استرس رانندگان، موج‌های شوک کوچکی ایجاد می‌شود که به سرعت به سمت عقب حرکت کرده و بزرگتر می‌شوند. این موج‌ها باعث می‌شوند که حتی در تراکم‌هایی کمتر از ظرفیت اسمی راه، سیستم به وضعیت «ایست–حرکت» سقوط کند. چالش اصلی مدیران در این لحظه، ناتوانی در تخلیه این موج‌های شوک است؛ چرا که در حالت آشوب، سیستم وارد یک «جاذبه غریب» ایستایی شده و انرژی لازم برای بازگشت به حالت روان را به صورت خودبه‌خودی ندارد (حسینی و باقری، ۱۳۹۷).

۹- راهکارهای کنترل آشوب در پدافند غیرعامل

کنترل آشوب در شبکه‌های ترافیکی به معنای حذف کامل نوسانات نیست، بلکه هدف، ابقای سیستم در محدوده‌ای است که کارایی حداقلی خود را از دست ندهد. در این راستا، راهکارهای زیر پیشنهاد می‌گردد:

1 Gridlock
2 Time Delays
3 Phase Transition

مداخلات جزیی هوشمند و پایداری جریان: در تئوری کنترل آشوب، از تکنیک «اختلالات کوچک هدفمند» برای بازگرداندن سیستم به مسیر پایدار استفاده می‌شود. در مدیریت ترافیک بحران، این مفهوم در قالب «تلنگرهای هوشمند» ظاهر می‌شود. به جای مسدود کردن کامل مسیرها یا اجبار رانندگان، می‌توان با تغییرات جزیی در زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی در گره‌های دوردست یا ایجاد محدودیت‌های نرم در ورودی بزرگراه‌ها، از تجمع بیش از حد خودروها در نقاط دوشاخگی جلوگیری کرد. این مداخلات کوچک باعث می‌شود که موج‌های شوک قبل از رسیدن به مرحله «تغییر فاز به آشوب»، مستهلک شوند. این روش به‌ویژه در زمان جنگ که منابع کنترلی محدود است، با کمترین هزینه، بیشترین بازدارندگی را در برابر فروپاشی شبکه ایجاد می‌کند (شفیعی، ۱۴۰۱).

طراحی شبکه‌های تاب‌آور و افزایش درجه آزادی معابر: یکی از دلایل اصلی وقوع دوشاخگی در ترافیک، محدود بودن مسیرهای جایگزین و وابستگی شدید شبکه به چند شریان اصلی) است. برای جلوگیری از گذار به آشوب، طراحی شهری باید به سمت افزایش «درجه آزادی»[1] حرکت کند. شبکه‌های شطرنجی با پیوستگی بالا نسبت به شبکه‌های درختی و سلسله‌مراتبی، تاب‌آوری بیشتری در برابر آشوب دارند؛ زیرا در صورت انهدام یک گره کلیدی، جریان ترافیک می‌تواند در بی‌نهایت مسیر فرعی توزیع شود بدون آنکه به تراکم بحرانی برسد. ایجاد «گذرگاه‌های پدافندی چندمنظوره» و حذف بن‌بست‌های فیزیکی در بافت‌های متراکم، از راهکارهای کالبدی برای مهار دوشاخگی در سناریوهای جنگی محسوب می‌شود (علوی و همکاران، ۱۴۰۰).

تمرکززدایی از مدیریت ترافیک و نقش گره‌های خودگردان محلی: در وضعیت آشوب، مرکزگرایی در تصمیم‌گیری۲ به دلیل تأخیر در انتقال داده‌ها و احتمال انهدام مرکز فرماندهی، به شکست می‌انجامد. راهکار جایگزین، «مدیریت توزیع‌شده» است که در آن هر ناحیه شهری یا هر تقاطع بزرگ به عنوان یک «واحد خودسازمانده» عمل می‌کند. در این الگو، گره‌های محلی بر اساس وضعیت ترافیکی محیط پیرامون خود (بدون نیاز به دستور از مرکز)، تصمیمات لحظه‌ای برای هدایت جریان اتخاذ می‌کنند. این رویکرد باعث می‌شود که اگر بخشی از شهر دچار آشوب شد، این بی‌نظمی به صورت ویروسی به سایر بخش‌ها سرایت نکند و هر منطقه به صورت مستقل، پایداری خود را حفظ نماید (طاهری، ۱۴۰۲).

۱۰- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف واکاوی دینامیک‌های غیرخطی در شبکه‌های حمل‌ونقل شهری نشان داد که رفتار ترافیک در شرایط بحرانی و سناریوهای جنگی، فراتر از مدل‌های خطی و پیش‌بینی‌های کلاسیک مهندسی است. بر اساس تحلیل‌های انجام شده، نتایج کلیدی زیر حاصل شده است:

۱. عبور از آستانه پایداری: حملات نظامی و حوادث غیرمترقبه با تغییر ناگهانی در توپولوژی شبکه (حذف گره‌ها و یال‌های کلیدی)، پارامترهای کنترلی سیستم را به سمت «نقطه دوشاخگی» سوق می‌دهند. در این نقطه، سیستم ترافیک دچار یک تغییر ماهوی شده و از وضعیت جریان منظم به وضعیت آشوبناک گذار می‌کند که در آن، کوچکترین اختلال محلی می‌تواند به قفل‌شدگی سراسری بینجامد.

۲. اثر پروانه‌ای و حساسیت ترافیکی: در وضعیت آشوب، شبکه به شدت نسبت به شرایط اولیه حساس می‌شود. پدیده هراس جمعی و رفتارهای غیرخطی رانندگان به عنوان محرک‌های درونی، اثر پروانه‌ای را تشدید می‌کنند. این بدان معناست که در زمان بحران، مدیریت معابر فرعی به اندازه شریان‌های اصلی اهمیت می‌یابد، چرا که یک انسداد کوچک در لایه‌های پایین شبکه می‌تواند از طریق موج‌های شوک، پایداری کلان‌شهر را از بین ببرد.

۳. ناکارآمدی مدیریت متمرکز: یافته‌ها نشان می‌دهد که سیستم‌های هوشمند حمل‌ونقل (ITS) و ابزارهای اطلاع‌رسانی متمرکز در لحظات اولیه ورود به فاز آشوب، به دلیل پدیده «اشباع اطلاعاتی» و «رفتار گله‌ای رانندگان»، کارایی خود را از دست می‌دهند. در این شرایط، تکیه بر مدیریت توزیع‌شده و گره‌های خودفرمان، راهکار موثرتری برای مهار بی‌نظمی است.

۱۰-۱- پیشنهادها راهبردی

– بازنگری در طراحی کالبدی: پیشنهاد می‌شود در طراحی شبکه‌های پدافندی، به جای تمرکز صرف بر افزایش عرض معابر، بر افزایش «درجه آزادی» و پیوستگی شبکه تاکید شود تا آستانه وقوع دوشاخگی ارتقا یابد.

– پیاده‌سازی سیستم‌های کنترل آشوب: بهره‌گیری از تکنیک‌های «مداخلات جزیی هوشمند» در اتاق‌های مدیریت بحران برای هدایت نرم جریان و جلوگیری از شکل‌گیری جاذبه‌های غریب ایستایی.

– تدوین پروتکل‌های محلی: ایجاد ساختارهای مدیریت ترافیک ناحیه–محور که در صورت قطع ارتباط با مرکز، قادر به اتخاذ تصمیمات مستقل جهت حفظ جریان در منطقه خود باشند.

1 Degrees of Freedom
2 Centralized Management

در نهایت، تئوری آشوب نه به معنای ناتوانی در مدیریت، بلکه به معنای لزوم تغییر پارادایم از «کنترل مطلق» به «هدایت هوشمند نوسانات» است. درک نقاط دوشاخگی به مدیران شهری این امکان را می‌دهد که پیش از فروپاشی کامل شبکه، مداخلات پیشگیرانه را در نقاط حساس اعمال نمایند.

منابع

۱) اکبری، ر. (۱۳۹۸). ارزیابی شاخص‌های تاب‌آوری شریان‌های حیاتی حمل‌ونقل در پدافند شهری. فصلنامه پژوهش‌های مدیریت بحران، ۱۱(۱)، ۵۵-۷۲.

۲) پورموسوی، م. (۱۳۹۶). تحلیل نقش برنامه‌ریزی شهری در کاهش آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها. تهران: انتشارات سمت.

۳) جمشیدی، ع. (۱۴۰۱). پویایی‌شناسی سیستم‌ها در تحلیل تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

۴) حسینی، م.، و باقری، ع. (۱۳۹۷). بررسی اثر موج‌های شوک بر ایمنی و پایداری جریان ترافیک در بزرگراه‌های شهری. مجله علمی مهندسی حمل‌ونقل و ترافیک، ۳(۱)، ۷۵-۹۰.

۵) رحیمی، گ. (۱۳۹۹). کاربرد سیستم‌های پیچیده در بازسازی پس از جنگ زیرساخت‌های شهری. تهران: انتشارات مرکز پژوهش‌های دفاعی.

۶) رضایی، ف. (۱۴۰۲). تحلیل سیستم‌های پیچیده و تئوری آشوب در مهندسی ترافیک. تهران: انتشارات دانشگاه علم و صنعت.

۷) سلیمانی، م.، و محمدی، پ. (۱۴۰۲). نقش تئوری بازی‌ها و رفتارشناسی رانندگان در تخلیه اضطراری شهرها. فصلنامه علمی راهور، ۱۱(۴۰)، ۸۵-۱۰۲.

۸) شفیعی، م. (۱۴۰۱). راهبردهای نوین پدافند غیرعامل در زیرساخت‌های حمل‌ونقل شهری. تهران: انتشارات دانشگاه جامع امام حسین (ع).

۹) صالحی، م. (۱۳۹۹). تاب‌آوری زیرساخت‌های هوشمند شهری در برابر تهدیدات نوین. مجله پدافند الکترونیکی و سایبری، ۸(۱)، ۶۲-۴۵.

۱۰) طاهری، ه. (۱۴۰۲). مدیریت هوشمند توزیع‌شده در کلان‌شهرها تحت شرایط قطع ارتباطات مرکزی. نشریه علمی مدیریت بحران و پدافند غیرعامل، ۹(۴)، ۱۵-۳۲.

۱۱) عسگری، ع.، و همکاران. (۱۴۰۱). تدوین الگوی مدیریت جامع حمل‌ونقل کلان‌شهرها در شرایط اضطراری. مجله علمی پدافند غیرعامل و توسعه پایدار، ۴(۳)، ۱۲-۳۰.

۱۲) عظیمی، س.، و نوری، ح. (۱۴۰۰). مدل‌سازی رفتار غیرخطی رانندگان در شرایط تخلیه اضطراری با استفاده از تئوری سیستم‌های پیچیده. فصلنامه مدیریت شهری و روستایی، ۲۰(۶۲)، ۱۱۵-۱۲۸.

۱۳) علوی، ز.، و همکاران. (۱۴۰۰). واکاوی رابطه بین توپولوژی شبکه معابر و تاب‌آوری شهری در برابر حملات نظامی. فصلنامه معماری و شهرسازی پایدار، ۸(۲)، ۱۱۰-۱۲۵.

۱۴) قربانی، س.، و همکاران. (۱۳۹۹). مدل‌سازی تخصیص مسیر در شبکه‌های حمل‌ونقل شهری تحت شرایط بحران نظامی. نشریه علمی مهندسی حمل‌ونقل، ۱۱(۴)، ۸۸-۱۰۵.

۱۵) کریمی، م.، و احمدی، س. (۱۴۰۰). ارزیابی آسیب‌پذیری پل‌های شهری در برابر انفجار و اثرات آن بر جریان ترافیک. نشریه علمی مهندسی زیرساخت‌های حمل‌ونقل، ۶(۲)، ۱۵-۳۰.

۱۶) مرتضوی، س.، و همکاران. (۱۴۰۱). چالش‌های به‌کارگیری سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند (ITS) در مدیریت بحران‌های پدافندی. نشریه پدافند غیرعامل ایران، ۱۳(۲)، ۴۱-۵۶.

۱۷) نصیری، الف. (۱۴۰۰). اصول پدافند غیرعامل در مهندسی ترافیک و حمل‌ونقل شهری. تهران: انتشارات سازمان شهرداری‌ها و دهیاری‌های کشور.

۱۸) یزدانی، ا. (۱۳۹۹). تحلیل تاب‌آوری عملکردی شبکه‌های شریانی تحت بارهای ترافیکی غیرمتعارف. تهران: انتشارات مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران.