مدل‌سازی شبکه‌های ترافیکی با استفاده از نظریهٔ بازی‌ها و مسیریابی بهینه در محیط GIS

پویا مجیدیان[1]، علیرضا وفائی‌نژاد[2*]

1- کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکدهٔ محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

2- استادیار مهندسی آب و محیط زیست، پردیس فنی مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

دریافت: 91/3/20 پذیرش: 92/10/15

چکیده

یکی از مهم‌ترین متغیرها در مدل‌سازی شبکه‌های ترافیکی، تراکم مسیرهای شبکه است. استفاده از مدلی که با درنظر گرفتن تراکم شبکه و برخورداری از حساسیت لازم به تغییرات آن بتواند کاربران شبکه را در تصمیم‌گیری - انتخاب بهترین مسیر - یاری رساند، سبب مدل‌سازی هرچه بهتر شبکهٔ ترافیکی می‌شود. درارتباط با این موضوع، نظریهٔ بازی‌ها در مدل‌سازی مسائل گوناگون ازجمله حمل‌ونقل و ترافیک، دارای قابلیت‌های فراوانی است. نظریهٔ بازی‌ها با مدل‌سازی مسئله در قالب یک بازی سعی در یافتن راه‌حل‌ها و تجزیه و تحلیل آن دارد. به بیانی دیگر، می‌توان آن را نظریهٔ تصمیم‌گیری دانست که بازی‌کنندگان را برای اتخاذ تصمیم‌های بهینه یاری می‌رساند. در این تحقیق، یک مدل بازی - براساس فرم نرمال - میان رانندگان حاضر در یک شبکهٔ ترافیکی طراحی شده و با حل و یافتن تعادل نش (Nash) بازی، مسیرهای بهینه و چگونگی برقراری تعادل در شبکهٔ ترافیکی مشخص شده است. در ادامه، با تلفیق نتایج به‌دست‌آمده از نظریهٔ بازی‌ها و سیستم اطلاعات جغرافیایی، بستری جهت تحلیل‌های شبکه، ازجمله مسیریابی بهینه فراهم شده است تا از این راه تصمیم‌گیرندگان بتوانند در مدیریت و سامان‌دهی هرچه بهتر شبکه‌های ترافیکی به بهترین شکل تصمیم‌گیری کنند.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های ترافیکی، نظریهٔ بازی‌ها، سیستم اطلاعات جغرافیایی، مسیریابی بهینه.

---

* نویسندهٔ مسئول مقاله: Email: a_vafaei@sbu.ac.ir

1- مقدمه

تراکم ترافیکی[1] یکی از جنبه‌های ناخوشایند زندگی شهری، و در سرتاسر جهان مطرح است. افزایش سطح این تراکم در نواحی شهری پیامدهای منفی زیادی را برای افراد، نهادها، مؤسسه‌ها و... درپی خواهد داشت. با افزایش جمعیت شهری و به‌تناسب آن افزایش ترافیک معابر، یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های فکری مردم، یافتن راه‌حلی برای کاهش زمان سفرهای درون‌شهری است. به‌منظور یافتن این راه‌حل باید شبکهٔ ترافیکی موجود مدل‌سازی، و در حالات مختلف (سطح تراکم ترافیک) تجزیه و تحلیل شود. برای مدل‌سازی شبکه می‌توان از مدل‌های ریاضی گوناگونی استفاده کرد؛ اما مدلی ایدئال خواهد بود که قابلیت پاسخ‌گویی به تراکم ترافیکی را داشته باشد. یکی از مدل‌هایی که در این زمینه می‌توان از آن استفاده کرد، نظریهٔ بازی‌ها[2]ست. نظریهٔ بازی‌ها با مدل‌سازی مسئله در قالب یک بازی، سعی در یافتن راه‌حل‌ها و تجزیه و تحلیل آن دارد. به بیانی دیگر، این نظریه را می‌توان نظریهٔ تصمیم‌گیری دانست که بازی‌کنندگان را برای اتخاذ تصمیم‌های بهینه یاری می‌رساند. نظریهٔ بازی‌ها مدلی را ارائه می‌دهد که طبق آن می‌توان استراتژی‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه و نتیجهٔ بازی را پیش‌بینی کرد.

با توجه به تراکم موجود در شبکه، هر راننده‌ای به‌دنبال انتخاب مسیری است که کمترین زمان سفر را داشته باشد (صابریان و همراه، 1388: 1). انتخاب بهترین مسیر باید نسبت به یک حالت تعادل (بهینه) انجام شود؛ به‌طوری که علاوه‌بر برطرف شدن نیازهای رانندگان، شبکهٔ موجود دارای بازدهی مناسب نیز باشد. ازاین‌رو، می‌توان این شرایط را به یک بازی تشبیه کرد که رانندگان موجود در شبکه بازی‌کنندگان هستند و مجموعهٔ اقداماتی (استراتژی) که هر بازیکن قادر به انجام آن است، در انتخاب مسیرها خلاصه می‌شود. هدف هر بازی‌کننده در این بازی، به‌دست آوردن بهترین نتیجه (کمترین زمان سفر) است که ممکن است توسط اقدامات دیگر بازی‌کنندگان تحت تأثیر قرار گیرد؛ به‌گونه‌ای که می‌توان گفت در این بازی گروهی از بازی‌کنندگان باید هم‌زمان تصمیم‌هایی (انتخاب مسیر) بگیرند؛ البته با آگاهی از این موضوع که نتیجهٔ نهایی به تصمیم‌های مشترک آن‌ها وابسته است. بهترین نتیجهٔ بازی (دست‌یابی هر

1. traffic congestion
2. game theory

بازی‌کننده به کوتاه‌ترین مسیر) زمانی به‌دست می‌آید که تمام بازی‌کنندگان به بهترین نتایج خود برسند. این موضوع با برقراری تعادل (تعادل نش[1]) میان انتخاب‌های بازی‌کنندگان میسر خواهد شد.

نتایج به‌دست‌آمده از حل (تجزیه و تحلیل) بازی در سیستم‌های اطلاعاتی گوناگون بررسی می‌شود؛ اما ازآنجا که شبکهٔ ترافیکی در بستر مکان گسترده می‌شود، برای مدل‌سازی و تحلیل آن نیاز به سیستم اطلاعاتی است که قابلیت پردازش داده‌های مکانی (جغرافیایی) را داشته باشد. سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS[2]) امکان جمع‌آوری، ذخیره‌سازی، تجزیه و تحلیل، و بازیابی این نوع داده‌ها را فراهم می‌کند؛ بنابراین با به‌کارگیری آن می‌توان نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی و تحلیل شبکه‌های ترافیکی به‌کمک نظریهٔ بازی‌ها را بررسی کرد و با استفاده از قابلیت‌های آنالیز شبکه در محیط GIS، مسیرهای بهینه را یافت. به بیانی دیگر، GIS امکان تصمیم‌گیری بهینه را از طریق قابلیت مدیریت پایگاه داده، نمایش گرافیکی، تجسم کارتوگرافیک الگوهای زمانی و مکانی پیچیدهٔ تراکم ترافیک و کوتاه‌ترین مسیرهای به‌دست‌آمده فراهم می‌آورد (دلاور و همکاران، 1384: 2).

1-1- پیشینهٔ تحقیق

در ایران تاکنون دربارهٔ مدل‌سازی شبکه‌های ترافیکی با استفاده از نظریهٔ بازی‌ها پژوهشی انجام نشده است؛ درحالی که در کشورهای دیگر نمونه‌های زیادی از مدل‌سازی این‌گونه شبکه‌ها با استفاده از مدل‌های بازی و به‌کارگیری روش‌های مختلف جهت بهینه‌سازی آن‌ها (شبکه‌ها) مشاهده می‌شود (Hollander & Prashker, 2006; Zhang Et al., 2010) که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

واردراپ[3] (1952) اولین مدل بازی میان رانندگان حاضر در یک شبکهٔ ترافیکی را طراحی کرد. در این بازی، رانندگان بازی‌کنندگان هستند و مسیرهای موجود در شبکه مجموعهٔ استراتژی‌های هر بازی‌کننده درنظر گرفته شده است. رفتار بازی‌کنندگان به‌صورت غیرتعاونی[4]

1. nash equilibrium
2. Geographic Information System
3. Wardrop
4. non-cooperative

(عدم همکاری با یکدیگر) بوده و هر بازی‌کننده می‌کوشد با انتخاب بهترین مسیر، زمان سفر (تابعی از تراکم ترافیکی) خود را به حداقل رساند.

روزنتال[1] (1973) در تحقیقی مشابه، به مدل‌سازی مسئلهٔ تخصیص ترافیک در قالب یک بازی میان رانندگان یک شبکه پرداخته است. در این پژوهش، تعادل نش حاصل از استراتژی‌های خالص بازی به‌عنوان راه‌حل این مسئله معرفی شده است.

فیسک[2] (1984) اولین مدل بازی میان مجموعه‌ای از رانندگان و یک مقام مسئول[3] در شبکه را طراحی کرده است. در این بازی، اهداف بازی‌کنندگان (رانندگان- مقام مسئول) به‌ترتیب، انتخاب بهترین مسیر (جهت کاهش زمان سفر) و کاهش زمان سفر در سرتاسر شبکه (از طریق کنترل تقاطع‌ها) است. فیسک در تحقیق خود به تناظریابی میان مدل‌های بازی غیرتعاونی نش و استاکلبرگ[4] پرداخته و با بهره‌گیری از نتایج، مدل بازی برای بهینه‌سازی کنترل سیگنال در یک شبکهٔ ترافیکی را طراحی کرده است.

بن- آکیوا و چن[5] (1998) مسئلهٔ کنترل و تخصیص ترافیک را با یکدیگر ترکیب، و آن را در قالب بازی‌های غیرتعاونی میان کاربران (رانندگان) و مقام مسئول شبکه بررسی کرده‌اند. مدل‌سازی مسئلهٔ تخصیص کنترل در قالب سه مدل بازی Cournot، Stackelberg و Monopoly ارائه شده است.

بل[6] (2000) به طراحی یک بازی دونفره، غیرتعاونی و با مجموع صفر پرداخته است. این بازی میان کاربر شبکه (راننده) و موجودیتی باعنوان «شیطان» (عامل خارجی) انجام می‌شود. اهداف بازی‌کنندگان (راننده- شیطان) به‌ترتیب، انتخاب بهترین مسیر جهت کاهش هزینهٔ سفر (زمان سفر) و انتخاب طرح عملکرد اجزای مسیر برای افزایش هزینهٔ سفر راننده است. در این تحقیق، از تعادل نش حاصل از استراتژی‌های مخلوط بازی به‌منظور اندازه‌گیری عملکرد شبکه و ایجاد رویکردی جهت ارزیابی اعتمادپذیری آن استفاده شده است.

---

1. Rosenthal
2. Fisk
3. ارگان‌های دولتی و شرکت‌هایی که عهده‌دار عرضهٔ خدمات حمل‌ونقل عمومی‌اند.
4. Stackelberg
5. Ben-Akiva & Chen
6. Bell

فالدینی و یو[1] (2004) برای حل مسئلهٔ جریان ترافیک، دو مدل بازی یکی میان رانندگان شبکه و دیگری میان رانندگان و مقام مسئول شبکه ساخته‌اند. در این بازی‌ها، رانندگان (رفتار رانندگان شبکه در قالب سیستم‌های چندعامله[2] بررسی شده است.) به‌صورت غیرتعاونی با یکدیگر رقابت می‌کنند و با انتخاب بهترین مسیر می‌کوشند زمان سفرشان را کاهش دهند. درمقابل، مقام مسئول شبکه در تلاش است از طریق تنظیمات سیگنال، زمان سفر را در سرتاسر شبکه کاهش دهد. مدل بازی اول به‌عنوان مسئلهٔ تخصیص و مدل بازی دوم به‌عنوان مسئلهٔ کنترل درنظر گرفته و در قالب یک مدل ترکیبی (تخصیص- کنترل) بررسی شده است.

گااو و سان[3] (2007) به طراحی یک بازی تعمیم‌یافته از تعادل نش میان مجموعه‌ای از مسافران و اپراتورهای یک شبکهٔ حمل‌ونقل شهری پرداخته‌اند. در این بازی کلاسیک، مسافران برای کاهش هزینه‌ها به‌صورت عقلانی، مستقل و با آگاهی کامل به انتخاب بهینهٔ مسیر و حالت سفر خود پرداخته و درمقابل، اپراتورها به‌دنبال افزایش سود خود از طریق تأمین حالات سفر برای مسافران هستند. در این تحقیق، براساس اصل تعادل اقتصاد عمومی، مدلی تجاری جهت پیش‌بینی هم‌زمان چگونگی انتخاب بهینهٔ مسیر و حالت سفر مسافران، با توجه به عملکرد اپراتورها در سیستم حمل‌ونقل عمومی شهری طراحی شده است.

نکتهٔ درخور توجه در تمام مطالعات این است که نتایج تجزیه و تحلیل بازی‌های طراحی‌شده در سیستم‌های اطلاعاتی مانند سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) بررسی نشده‌اند؛ بنابراین، در این مقاله می‌کوشیم با مدل‌سازی شبکه‌های ترافیکی توسط نظریهٔ بازی‌ها و بهره‌گیری از قابلیت‌های آنالیز شبکه (مسیریابی) در محیط GIS، به کاهش ترافیک و بهینه‌سازی شبکه‌های ترافیکی بپردازیم.

2- بازی نرمال

این فرم از معمولی‌ترین فرم‌های یک بازی است؛ به‌طوری که N بازی‌کننده (A، B، C، ...) در آن شرکت خواهند داشت ($N \geq 2$)، بازی‌کنندهٔ iام دارای X_i استراتژی (متغیر تصمیم‌گیری)

1. Faldini & Yu
2. multi-agents systems
3. Gao & Sun

است $(1 \le i \le m_i)$؛ آن‌گونه که X_i ممکن است محدود و گسسته (به فرم معمول $A_{i,1}$، $A_{i,2}$، ...، $A_{i,mi}$) یا نامحدود و پیوسته (از یک فضای E^n) باشد. فرض بر آن است که استراتژی‌ها ازقبل در فرم نرمال، برای هر بازی‌کننده مشخص بوده و مطلوبیت یا نتیجهٔ او از تصمیم‌گیری به‌صورت یک تابع f_i مشخص است. تابع f_i برای هر بازی‌کننده متأثر از تصمیم‌های خود او و دیگر بازی‌کنندگان به این صورت خواهد بود:

$$f_i : f_i(X_1 , X_2 , \dots , X_i , X_N) \quad ; \quad 1 \le i \le m_i$$

بازی‌کنندگان به‌طور هم‌زمان و بدون همکاری قبلی (غیرتعاونی) به تصمیم‌گیری می‌پردازند؛ درحالی که هدف هرکدام از آن‌ها بهینه‌سازی f_i خواهد بود. بنابراین، مسئله برای بازی‌کنندهٔ iام شامل مشخص کردن آن استراتژی از استراتژی‌های X_i است که موجب ارزش بهینهٔ ممکن برای f_i می‌شود. درمجموع، برای N بازی‌کننده، مسئله شامل دسترسی به یک نقطهٔ تعادل (تعادل نش) است؛ به‌گونه‌ای که یک ترکیب از استراتژی‌ها آن‌چنان مشخص شود که f_i برای تمام بازی‌کنندگان درحد ممکن (بهترین وجه) تأمین شود و انحراف از آن نقطه موجب زیان همه یا برخی بازی‌کنندگان شود؛ به این معنا که انتخاب هر استراتژی ازسوی هر بازی‌کننده جز استراتژی‌های تعیین‌شده در نقطهٔ تعادل، موجب زیان او خواهد شد (اصغرپور، 1389: 266).

3- مدل بازی پیشنهادی

در این مدل، بازی N نفره نرمال، محدود و غیرتعاونی Γ، با سناریوی زیر ارائه شده است:

یک کارخانه برای راه‌اندازی سریع‌تر خط تولید خود از چندین شرکت تولیدی درخواست خرید و ارسال مواد اولیه کرده است. ازآنجا که نیاز کارخانه به مواد اولیه بسیار فوری است، مقرر شده فقط بار اولین خودروی که به کارخانه می‌رسد، تحویل گرفته و به رانندهٔ آن پاداش داده شود و بار رانندگانی که با تأخیر (نسبت به اولین راننده) به کارخانه می‌رسند، تحویل گرفته نمی‌شود؛ درنتیجه راننده‌ای که بتواند با انتخاب بهترین مسیر (مسیر بهینه)، در کمترین زمان ممکن پیش از رانندگان دیگر به کارخانه برسد، پیروز این بازی خواهد بود.

3-1- ساختار بازی Γ

$$\Gamma = (N, \{S^i\}_{i\in N}, \{f^i\}_{i\in N}) \qquad \text{رابطهٔ } 1$$

در این بازی، N مجموعه‌ای از بازی‌کنندگان، S^i فضای محدود استراتژی‌های خالص[1] بازی‌کنندهٔ iام و f^i تابع نتیجهٔ بازی‌کنندهٔ iام است. در شبکهٔ ترافیکی موجود، رانندگان همان بازی‌کنندگان این بازی‌اند و فضای استراتژی‌های خالص آن‌ها شامل مسیرهای موجود در شبکه است. تابع نتیجه برای هر راننده، زمان سفر است که با انتخاب یک مسیر از مسیرهای موجود در شبکه به‌دست می‌آید. در این بازی، رانندگان به‌صورت غیرتعاونی و با هدف به‌دست آوردن کمترین زمان سفر- انتخاب مسیر بهینه- برای رسیدن از مبدأ به مقصد مورد نظر (کارخانه) با هم رقابت می‌کنند.

3-2- بررسی ساختار بازی

اگر $N = \{1,2,\dots,n\}$ باشد، فضای ترکیبات احتمالی استراتژی‌های خالص در بازی برابر با $S = \prod_{i\in N} S^i$ خواهد بود؛ درنتیجه می‌توان گفت $f^i : S \to \mathbb{R}$. اگر بازی‌کنندهٔ iام دارای m^i استراتژی خالص باشد، تعداد استراتژی‌های خالص (m) و تعداد ترکیبات استراتژی‌های خالص (M) بازی به‌ترتیب برابر با $\sum_{i=1}^{n} m^i$ و $\prod_{i=1}^{n} m^i$ خواهد بود. ترکیبات استراتژی‌های خالص بازی را می‌توان به این صورت نشان داد:

$$\begin{aligned} (S_1^1, S_1^2, \dots, S_1^{n-1}, S_1^n) &:= 1 \\ (S_1^1, S_1^2, \dots, S_1^{n-1}, S_2^n) &:= 2 \\ \vdots \qquad\qquad & \vdots \\ \left(S_{m^1}^1, S_{m^2}^2, \dots, S_{m^{n-1}}^{n-1}, S_{m^{n-1}}^n\right) &:= (M-1) \\ \left(S_{m^1}^1, S_{m^2}^2, \dots, S_{m^{n-1}}^{n-1}, S_{m^n}^n\right) &:= M \end{aligned} \qquad \text{رابطهٔ } 2$$

S_j^i: استراتژی خالص jام بازی‌کنندهٔ iام

1. pure strategies

هر بازی‌کننده براساس یک ترکیب خاص از استراتژی‌های خالص، دارای یک نتیجه خواهد بود. ماتریس نتیجهٔ[1] هر بازی‌کننده به‌صورت یک بردار (به‌طول M) درنظر گرفته می‌شود؛ بنابراین می‌توان ماتریس نتیجهٔ بازی Γ (با N بازی‌کننده و هر بازی‌کننده دارای $m^i(i = 1,2,\dots,n)$ استراتژی) را به این صورت نمایش داد:

$$F_\Gamma = \begin{pmatrix} f_1^1 & f_1^2 & \cdots & f_1^n \\ f_2^1 & f_2^2 & \dots & f_2^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{M-1}^1 & f_{M-1}^2 & \cdots & f_{M-1}^n \\ f_M^1 & f_M^2 & \dots & f_M^n \end{pmatrix}$$

رابطهٔ 3

f_j^i: نتیجهٔ بازی‌کنندهٔ iام براساس ترکیب jام از استراتژی‌های خالص.

بازی Γ را ازدیدگاه استراتژی‌های مخلوط[2] نیز می‌توان بررسی کرد. یک استراتژی مخلوط از بازی‌کنندهٔ iام، بیانگر توزیع احتمال در فضای S^i است و فضای تمام استراتژی‌های مخلوط بازی‌کنندهٔ iام، با $\Sigma^i = \{\sigma^i \in \mathbb{R}^{m^i+} | \sum_{j=1}^{m^i} \sigma_j^i = 1\}$ مشخص می‌شود. برای هر $\sigma^i \in \Sigma^i$، احتمال نسبت داده‌شده به استراتژی خالص S_j^i، برابر با σ_j^i خواهد بود. اگر به ترکیب استراتژی مخلوط σ توجه کنیم، آن‌گاه احتمال رخداد ترکیب استراتژی‌های خالص $S_{j^1}^1, S_{j^2}^2, \dots, S_{j^n}^n$ برابر با $\sigma(s) = \prod_{i\in N} \sigma_{j^i}^i$ خواهد بود. در چنین حالتی، نتیجه‌ای که به بازی‌کنندهٔ iام نسبت داده می‌شود، برابر با $f^i(\sigma) = \sum_{s\in S} \sigma(s) f^i(s)$ خواهد بود که $f^i(s)$ نتیجهٔ نسبت داده‌شده به بازی‌کنندهٔ iام در ترکیب استراتژی‌های خالص s است.

3-3- حل بازی Γ

منظور از حل بازی، یافتن تعادل نش موجود در بازی است؛ زیرا در حالت تعادل نش، تمام بازی‌کنندگان با انتخاب استراتژی‌های بهینه، به بهترین نتایج خود دست می‌یابند. یک نمایهٔ استراتژی مخلوط σ، تعادل نش بازی Γ نامیده می‌شود، اگر:

---

1. payoff matrix

2. mixed strategy: نوع خاصی از استراتژی است که از چندین استراتژی خالص- با فراوانی‌های معین- تشکیل شده است.

$$f^i(\sigma) \geq f^i\left(\sigma^{-i}, \sigma^i\right), \quad \forall i \in N, \quad \forall \sigma^i \in \Sigma^i$$ رابطهٔ 4

$\left(\sigma^{-i}, \sigma^i\right)$ بیانگر نمایهٔ استراتژی مخلوط تشکیل‌یافته از تمام بازی‌کنندگان، جز بازی‌کنندهٔ iام است. با یافتن تعادل نش موجود در بازی می‌توان به استراتژی بهینهٔ هریک از بازی‌کنندگان دست یافت. به بیانی دیگر، با بررسی تعادل نش موجود در بازی Γ می‌توان مسیر و زمان سفر بهینهٔ هریک از رانندگان حاضر در شبکهٔ ترافیکی را به‌دست آورد.

3-4- پیاده‌سازی بازی Γ

در روند پیاده‌سازی مدل بازی Γ، از مدل بهینه‌سازی غیرخطی استفاده شده است. در این مدل، تعداد متغیرها برابر با مجموع تعداد استراتژی‌های خالص بازی و تعداد بازی‌کنندگان است. همچنین، قیود و توابع هدف به‌صورت چندجمله‌ای درنظر گرفته شده است. در مسئلهٔ بهینه‌سازی یادشده به‌دنبال به‌حداقل رساندن اختلاف میان نتیجهٔ بهینه و نتیجهٔ به‌دست‌آمده از یک ترکیب ممکن از استراتژی‌های مخلوط بازی هستیم که از این طریق می‌توان به تعادل نش موجود در بازی دست یافت که بیانگر استراتژی بهینهٔ بازی‌کنندگان است. مسئلهٔ بهینه‌سازی (Opt) به این صورت است:

(Opt)

$$\begin{aligned} &\text{Min} \quad z(x) \\ &\text{s.t.} \quad g(x) \leq 0 \\ &\qquad h(x) = 0 \\ &\qquad x_i \geq 0 \quad \forall i = 1,2,\dots,m \\ &\qquad x_i: \text{نامحدود} \quad \forall i = m+1, m+2, \dots, m+n \end{aligned}$$ رابطهٔ 5

$$z(x) = \sum_{i \in N} \left(\beta^i - f^i(\sigma)\right)$$

$$g(x) = f^i\left(\sigma^{-i}, s_j^i\right) - \beta^i \quad \forall j = 1,2,\dots,m^i, \forall i \in N$$

$$h(x) = \sum_{j=1}^{m^i} \sigma_j^i - 1 \quad \forall i \in N$$

برای پیاده‌سازی روند حل مسئلهٔ بهینه‌سازی، از برنامه‌نویسی در نرم‌افزار MATLAB (با بهره‌گیری از برنامه‌نویسی متوالی درجهٔ دوم [SQP]، برگرفته از روش شبه‌نیوتن [QN]) استفاده شده است. در این زمینه، برنامهٔ ارائه‌شده قادر به حل بازی Γ خواهد بود و با معرفی ماتریس سطری (بردار) دربردارندهٔ تعداد استراتژی‌های خالص هر بازی‌کننده (S) و ماتریس نتیجهٔ بازی‌کنندگان (F)- براساس ترکیبات استراتژی‌های خالص بازی- می‌توان به ماتریس شامل استراتژی‌های مخلوط بازی‌کنندگان تحت تعادل نش بازی (Prob) دست یافت. به بیانی دیگر، این ماتریس (Prob) بیانگر احتمال (فراوانی) انتخاب یک استراتژی خالص توسط یک بازی‌کننده است و این احتمال استراتژی بهینهٔ بازی‌کننده در تعادل نش بازی را مشخص خواهد کرد.

3-5- شبیه‌سازی شبکهٔ ترافیکی برای اجرای مدل بازی Γ

در این مرحله، از گرافی جهت‌دار با 12 یال و 9 گره استفاده شده است (شکل 1). یال‌ها و گره‌های این گراف به‌ترتیب بیانگر لینک‌های شبکه و زوج مبدأ- مقصدهای[1] کاربران (رانندگان) است.

شکل 1 شبکهٔ ترافیکی شبیه‌سازی‌شده

1. Origin-Destination

تخصیص زمان سفر به هریک از لینک‌های شبکه در دو حالت ثابت و متغیر درنظر گرفته شده است. زمان سفر در حالت متغیر، تابعی از تراکم ترافیکی یا تعداد خودروهای حاضر در هر لینک است؛ به‌گونه‌ای که با افزایش تعداد خودروها، زمان سفر افزایش می‌یابد. در محاسبهٔ زمان سفر مسیرهای موجود در شبکه جهت اتصال مبدأ- مقصد مورد نظر، فقط تعداد خودروهای موجود در لینک‌هایی با زمان سفر متغیر، اهمیت دارد (جدول 1).

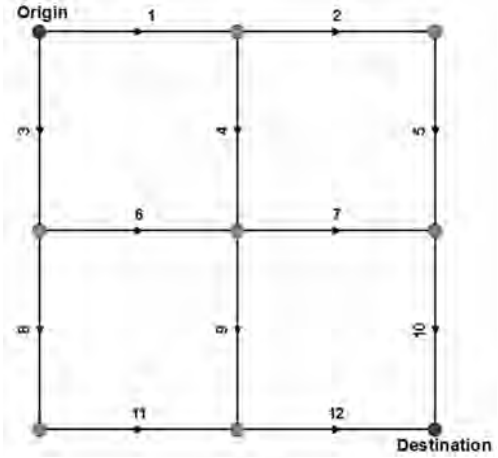
جدول 1 زمان سفر و تعداد خودروهای قرارگرفته در لینک‌های شبکه

لینک	زمان سفر (دقیقه)	تعداد خودرو
1	15	-
2	20	-
3	15	-
4	20	-
5	x/100	1000
6	20	-
7	x/100	4000
8	20	-
9	x/100	4000
10	20	-
11	x/100	1000
12	20	-

x: تعداد خودرو

طول (مسافت) تمام لینک‌ها برابر فرض شده است.

در ادامهٔ روند شبیه‌سازی، یک زوج از گره‌ها به‌عنوان مبدأ- مقصد (O-D) رانندگان شبکه درنظر گرفته شده است (شکل 2).



شکل 2 مبدأ- مقصد مورد نظر در شبکه

شرح مسیرهای موجود در شبکه جهت اتصال مبدأ- مقصد مورد نظر در جدول شمارهٔ دو آمده است.

جدول 2 مسیرهای موجود در شبکه جهت اتصال مبدأ- مقصد مورد نظر

مسیر	لینک	زمان سفر (دقیقه)
a	1 2 5 10	65
b	3 8 11 12	65
c	1 4 9 12	95
d	1 4 7 10	95
e	3 6 9 12	95
f	3 6 7 10	95

4- یافته‌ها

4-1- اجرای مدل بازی و استخراج نتایج

به‌منظور اجرای (حل) این مدل، به‌عنوان نمونه، تعداد بازی‌کنندگان برابر با 3 و تعداد استراتژی‌های موجود برای هریک از آن‌ها برابر با 6 درنظر گرفته شده است؛ درنتیجه 3 راننده با وارد شدن در شبکهٔ ترافیکی یادشده، درحالی با یکدیگر رقابت می‌کنند که هریک قادر به

انتخاب یک مسیر از میان 6 مسیر موجود در شبکه برای رسیدن به مقصد خود (کارخانه) خواهند بود (سرعت حرکت رانندگان ثابت فرض شده است).

براساس برنامهٔ ارائه‌شده برای حل بازی Γ، باید ماتریس نتیجهٔ (زمان سفر) رانندگان (F) با توجه به ترکیبات مختلف از مسیرهای شش‌گانه محاسبه شود. با توجه به ساختار برنامهٔ Γ مبنی‌بر یافتن استراتژی‌های بهینه‌ای که سبب دست‌یابی بازی‌کنندگان به بهترین (بیشترین) نتیجه یا مطلوبیت ممکن می‌شود (مفهوم نظریهٔ بازی‌ها) و متفاوت بودن ماهیت نتایج (زمان‌های سفر) رانندگان و تلاش آن‌ها در به حداقل رساندن این نتایج، زمان‌های سفر (درایه‌های ماتریس F) باید با علامت منفی درنظر گرفته شود. با محاسبهٔ ماتریس F، معرفی المان‌های ورودی (S، F) و اجرای برنامه، خروجی مورد نظر مطابق جدول شمارهٔ سه خواهد بود.

جدول 3 نتایج اجرای برنامهٔ Γ

استراتژی/ مسیر	احتمال (فراوانی) انتخاب استراتژی/ مسیر		
	بازی‌کننده/ رانندهٔ اول	بازی‌کننده/ رانندهٔ دوم	بازی‌کننده/ رانندهٔ سوم
استراتژی/ مسیر اول	0.5	0.5	0.5
استراتژی/ مسیر دوم	0.5	0.5	0.5
استراتژی/ مسیر سوم	0.0	0.0	0.0
استراتژی/ مسیر چهارم	0.0	0.0	0.0
استراتژی/ مسیر پنجم	0.0	0.0	0.0
استراتژی/ مسیر ششم	0.0	0.0	0.0

برپایهٔ جدول شمارهٔ سه، استراتژی‌های بهینهٔ بازی Γ، استراتژی‌های اول و دوم هستند. در تعادل نش به‌دست‌آمده، بازی‌کنندگان با احتمال (فراوانی) برابر این استراتژی‌ها را انتخاب می‌کنند. درواقع، تعادل نش بازی Γ دربردارندهٔ این نکته است که بازی‌کنندگان جهت دست‌یابی به نتیجهٔ مورد نظرشان باید از میان دو استراتژی (استراتژی‌های اول و دوم) یکی را برگزینند. به بیانی دیگر، با حل و یافتن تعادل نش بازی Γ، مسیرهای بهینهٔ موجود در شبکهٔ ترافیکی- جهت کاهش زمان سفر رانندگان- مشخص شده است. با توجه به تعداد مسیرهای

بهینه و احتمالات انتخاب این مسیرها، زمان سفر رانندگان براساس ترکیبات مسیرهای بهینه به شرح جدول شمارهٔ چهار است.

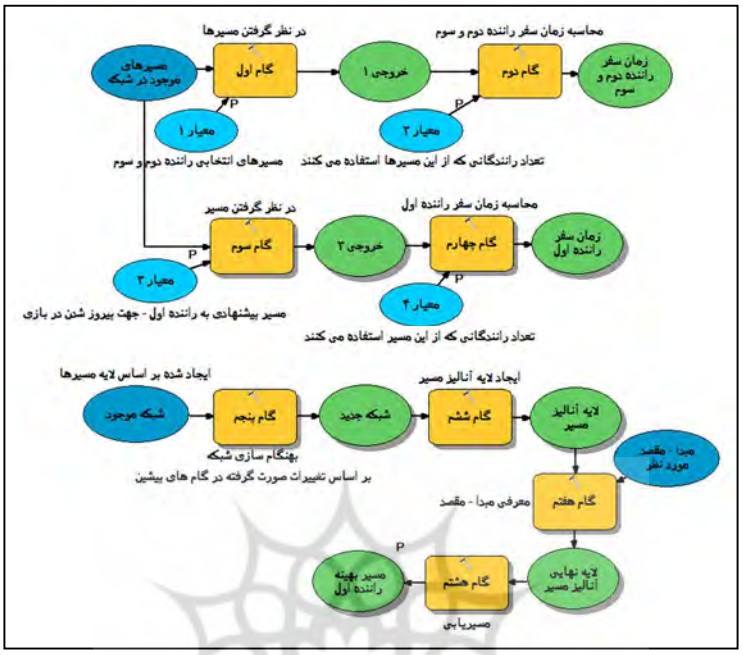
جدول 4 زمان سفر رانندگان براساس ترکیبات مسیرهای بهینه

ترکیب مسیر	زمان سفر (دقیقه)		
	رانندهٔ اول (D1)	رانندهٔ دوم (D2)	رانندهٔ سوم (D3)
a,a,a	65.03	65.03	65.03
a,a,b	65.02	65.02	65.01
a,b,a	65.02	65.01	65.02
a,b,b	65.01	65.02	65.02
b,a,a	65.01	65.02	65.02
b,a,b	65.02	65.01	65.02
b,b,a	65.02	65.02	65.01
b,b,b	65.03	65.03	65.03

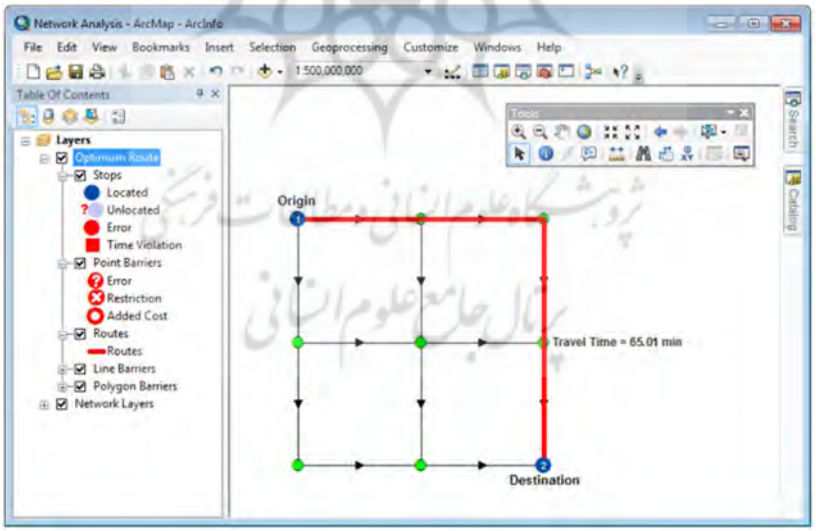
با توجه به سناریوی بازی Γ- مبنی‌بر پیروز شدن یکی از رانندگان- ترکیبی از مسیرهای بهینه (ر.ک: جدول 4) که در آن یکی از رانندگان برای نمونه رانندهٔ اول (D1) زودتر از دیگران به مقصد مورد نظر (کارخانه) می‌رسد، در محیط GIS تحلیل و تجزیه شده است.

4-2- تجزیه و تحلیل نتایج در محیط GIS

برای تجزیه و تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از حل بازی Γ، از نرم‌افزار Arc GIS 10 استفاده شده است. در این نرم‌افزار به‌کمک برنامهٔ کاربردی Model Builder و بهره‌گیری از ابزار Network Analyst، مدلی جهت تحلیل شبکهٔ ترافیکی ارائه شده که در آن، مسیر بهینهٔ رانندهٔ مورد نظر (رانندهٔ اول) برای پیروز شدن در بازی، با توجه به مسیرهای انتخابی رانندگان دیگر مشخص می‌شود (شکل 3).



شکل 3 مدل مسیریاب



شکل 4 مسیر بهینهٔ رانندهٔ اول

در اجرای مدل مسیریاب فرض شده که مسیر انتخابی رانندهٔ دوم و سوم مسیر b است. بر این اساس، با وارد کردن پارامترها و اجرای مدل، مسیر بهینهٔ رانندهٔ اول مشخص می‌شود (شکل 4).

رانندهٔ اول با انتخاب این مسیر می‌تواند در کمترین زمان ممکن به مقصد مورد نظر برسد و پیروز بازی شود.

5- نتیجه

در این تحقیق، مدلی برای کاهش ترافیک در شبکه‌های شهری طراحی شد. با توجه به تراکم موجود در مسیرهای شبکه- که یکی از مهم‌ترین عوامل در برنامه‌ریزی ترافیک است- از مدلی برگرفته از نظریهٔ بازی‌ها برای مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل شبکه‌های ترافیکی استفاده شد. به همین منظور، یک مدل بازی (براساس فرم نرمال از بازی‌ها) بررسی شد و با برنامه‌نویسی در نرم‌افزار Matlab، برنامه‌ای جهت حل (یافتن تعادل نش) بازی تنظیم شد. برای اجرای این برنامه (Γ) و آزمون آن، تعداد بازی‌کنندگان (رانندگان) و استراتژی‌های هریک از آن‌ها (مسیرهای موجود در شبکه جهت اتصال مبدأ- مقصد مورد نظر)، به‌ترتیب برابر با 3 و 6 درنظر گرفته شد. از بررسی نتایج اجرای برنامه دریافت شد که خروجی مربوطه از صحت و مطلوبیت کافی برخوردار است؛ زیرا در تعادل نش به‌دست آمده، کوتاه‌ترین مسیرهای موجود در شبکه به‌عنوان مسیرهای بهینه به رانندگان پیشنهاد شده است. با افزایش چشمگیر تعداد رانندگان و مسیرهای موجود در شبکه، زمان لازم جهت انجام محاسبات توسط برنامهٔ نام‌برده تا حد زیادی افزایش پیدا خواهد کرد.

با توجه به آنچه بیان شد، بهره‌گیری از نظریهٔ بازی‌ها در مدل‌سازی شبکه‌های ترافیکی (شهری) سبب کاهش زمان و هزینهٔ سفر کاربران می‌شود و کاهش تراکم موجود در مسیرها، بهینه‌بودن شبکه را به‌دنبال خواهد داشت. از سوی دیگر، تلفیق نظریهٔ بازی‌ها و GIS بستری را برای تحلیل‌های شبکه، ازجمله یافتن و نمایش مسیر بهینه فراهم می‌آورد و تصمیم‌گیرندگان را در مدیریت و سامان‌دهی بهتر شبکه‌های ترافیکی یاری می‌رساند.

در پایان، یادآوری می‌شود که با توجه به ساختار مدل بازی ارائه‌شده و روش به‌کاررفته در حل بازی (حل مسئلهٔ بهینه‌سازی و یافتن تعادل نش)، از ارزیابی و مقایسهٔ نتایج

به‌دست‌آمده از نظریهٔ بازی‌ها با دیگر مدل‌ها و الگوریتم‌هایی (الگوریتم مورچه‌ها، الگوریتم ژنتیک و ...) که می‌تواند در مدل‌سازی و آنالیز شبکه‌های ترافیکی مورد استفاده قرار گیرد، صرف‌نظر شده است.

6- منابع

- اصغرپور، محمدجواد، *تصمیم‌گیری گروهی و نظریهٔ بازی‌ها با نگرش تحقیق در عملیات*، تهران: انتشارات دانشگاه تهران، 1389.
- دلاور، محمودرضا، جلال امینی، نجمه نیسانی و لیلا حاجی‌بابایی، «تخمین تراکم ترافیک با استفاده از منطق فازی و بررسی کاربردهای آن در سیستم‌های اطلاعات مکانی» در *همایش ژئوماتیک 84*، تهران: سازمان نقشه‌برداری کشور، 1384.
- صابریان، جواد و مجید همراه، «بهبوداجرایالگوریتم‌های مسیریابی درشبکه‌هایشهری» در *همایش ژئوماتیک 88*، تهران: سازمان نقشه‌برداری کشور، 1388.
- Bell, M.G.H., "A Game Theory Approach to Measuring the Performance Reliability of Transport Networks", *Transportation Research: Part B*, No. *34(6)*, Pp. 533-545, 2000.
- Asghar-pour, M.J., *Group Decision Making and Game Theory with Operational Research Approach*, Tehran: University of Tehran, 2004. [In Persian]
- Chen, O.J. & M.E. Ben-Akiva, "Game Theoretic Formulations of Interaction between Dynamic Traffic Control and Dynamic Traffic Assignment", *Journal of the Transportation Research Board, No. 1617,* Pp. 179-188, 1998.
- Fisk, C.S., "Game Theory and Transportation Systems Modeling", *Transportation Research: Part B, No. 18(4-5)*, Pp. 301-313, 1984.

- Saberian, J. & M. Hamrah, "Improving Implementation of Routing Algorithms in Urban Networks" in *Geomatics Congress 2010*, Tehran: National Cartographic Center (NCC), Pp. 20-21, May 2010. [In Persian]
- Hollander, Y.& J.N. Prashker, "The Applicability of Non-cooperative Game Theory in Transport Analysis", *Transportation, No. 33*, Pp. 481-496, 2006.
- Delavar, M.R., J. Amini, N. Neisani & L. Hajibabaei, "Estimating Traffic Congestion by the Use of Fuzzy Logic and Analyzing Its Applications in Geographic Information Systems" in *Geomatics Congress 2006*, Tehran: National Cartographic Center (NCC), May 2006. [In Persian]
- Rosenthal, R.W., "A Class of Games Possessing Pure-strategy Nash Equilibria", *International Journal of Game Theory, No.2(1)*, Pp. 65-67, 1973.
- Sun, L.J. & Z.Y. Gao, "An Equilibrium Model for Urban Transit Assignment Based on Game Theory", *European Journal of Operational Research, No. 181(1)*, Pp. 305-314, 2007.
- Wardrop, J.G., *Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research*, Institution of Civil Engineers, 1952.
- Yu, J. & E. Faldini, "A Game Theoretic Approach to Traffic Flow Control", Paper Project, Leuven, Belgium: Department of Engineering and Computer Science, The Katholieke Universiteit Leuven (KU Leuven), 2004.
- Zhang, H., Y. Su, L. Peng & D. Yao, "A Review of Game Theory Applications in Transportation Analysis", *Proceedings of International Conference on Computer and Information Application*, Tianjin, China, Pp. 152-157, Dec. 3-5 2010.