

تعیین کریدور اولیه شریانهای حمل و نقل زمینی براساس محدودیت‌های نقاط اجباری و مناطق ممنوعه*

محمود صفارزاده، دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
امین میرزا بروجردیان، کارشناس ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
عباس راد، دانشجوی کارشناسی ارشد صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
E-mail: saffar_m@modares.ac.ir

چکیده:

مهم‌ترین مرحله طراحی پروژه‌های مختلف زیربنایی در زمینه شریانهای حمل و نقل زمینی مانند راه و راه آهن، تعیین کریدور اولیه مسیر است. نکته اصلی در طرح کریدور مسیر، عبور نکردن آن از مناطق صعب العبور و حفاظت شده است. در این تحقیق دو مدل ریاضی برای مسیر یابی در مناطق دشتی یا تپه ماهوری ارائه می‌شوند. در مدل اول با استفاده از برنامه ریزی غیرخطی ریاضی، مسیر ماریپیچی که مناطق ممنوعه موجود در کریدور را دور می‌زند و با کمترین هزینه به نقاط تعریف شده بین راهی دسترسی دارد، تعیین می‌شود. مدل دوم با استفاده از یک شیوه ابتکاری مسیر طرح شده، مدل اول را بهینه می‌کند. در انتها با استفاده از این مدلها مسیر راه آهن بافق-مشهد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین کاربردهای مدل ریاضی ارائه شده، استفاده از آن برای تهیه طرح جامع کریدورهای آزادراهی و ریلی کشور در مناطق دشتی و تپه ماهوری است.

واژه‌های کلیدی: مسیریابی، مناطق ممنوعه، بهینه‌سازی، تابع هزینه

۱. مقدمه

نخستین مرحله در طراحی یک مسیر (راه یا راه آهن) نیازسنجی ساخت آن است. این نیاز بستگی به برنامه های دولت در گسترش و پیشرفت کشور دارد. ساخت هر راه، راه آهن، فرودگاه، بندر و اسکله در گوشه‌ای از کشور، بافت آن منطقه را دگرگون می‌کند. برنامه ریزان کلان کشور در نیازسنجی راه ها و الویت‌دهی به احداث آنها از الگویی پیروی می‌کنند که موارد زیر را در برمی‌گیرد:

- سیاست کشور در زمینه اقتصادی، سیاسی، اجتماعی، فرهنگی، صنعتی، کشاورزی و نظامی،

- سیاست کشور در زمینه همگن‌سازی گسترش نواحی گوناگون کشور،

- سیاست کشور در زمینه بکارگیری یک روش ترابری مناسب، با توجه به فناوری روز،

- چگونگی ترافیک حال و آینده،

- پراکندگی شبکه راه های ساخته شده و گسترش آنها

- برنامه رشد صادرات و واردات و گسترش بنادر.

همانند هر پروژه صنعتی، مسیریابی و ساخت راه باید بر پایه یک نگرش قرار داشته باشد. احداث راه، یک پروژه ملی و کشوری

دسترسی به مراکز تولید سفر با توجه به عوارض طبیعی، ضوابط طرح هندسی، زمین شناسی، جنس پی راه و خاک بستر، وجود مصالح مناسب، نگهداری راه، زیبایی راه، حفظ محیط زیست و غیره.

۳. پیشنهاد تحقیق

در این زمینه مطالعات زیادی انجام شده است که در زیر به صورت خلاصه به برخی از آنها اشاره می‌شود:

ترنر^۱ مسأله مسیریابی را به صورت شبکه مدل کرده است و سپس با بکارگیری روشهای بهینه سازی شبکه، مثل روش کوتاه‌ترین مسیر، مسأله را حل می‌کند. او در مطالعه دیگری برای یافتن مسیر بهینه به جای استفاده از روش کوتاه‌ترین مسیر، مسأله را به صورت یک روش برای حمل و نقل کالا بین دو نقطه مدل کرده است [3].

در روش دیگری آتاناسولیس^۲ و کالوگرو^۳ مسأله را به چند زیرمرحله گسسته تقسیم کرده‌اند، به گونه‌ای که در هر مرحله می‌توان اقدام به تصمیم‌گیری موضعی کرد [4]. دیناردو^۴، در روش خود مسأله مسیریابی را به صورت سه بعدی مدل کرده و از برنامه ریزی پویا برای یافتن مسیر با حداقل هزینه، استفاده کرده است [5]. نصیری^۵ و غفاری^۶ در مدلی، مسیریابی را به یک مسأله انتخاب نقطه بهینه در صفحات عرضی پی در پی از کریدور مسیر تبدیل کردند. در این روش حداکثر شیب مجاز طولی و حداقل شعاع قوس افقی تحت کنترل قرار گرفته است. سپس این مسأله را براساس برنامه‌ریزی پویا مدل‌سازی و حل کرده‌اند [6].

هگون^۷ نیز مسیریابی را به صورت سه بعدی توسط برنامه‌ریزی پویا مدل کرده است، مدل او ابتدا با یک شبکه درشت اقدام به یافتن مسیر کرده و سپس برای دقیق‌تر کردن مسیر در حوالی جواب یافته شده، از شبکه‌ای با دقت بیشتر استفاده می‌کند و این عمل را آنقدر تکرار می‌کند تا به مسیری با دقت قابل قبول برسد [7]. نیکلسون^۸ نیز در روشی مشابه، ابتدا از یک شبکه درشت برای مسیریابی استفاده می‌کند، سپس با استفاده از حساب تغییرات گسسته مسیر نهایی را تعیین می‌کند [8].

یکی از روش‌هایی که به طور همزمان می‌تواند یک مسیر با شیب‌های ملایم را به صورت سه بعدی مدل کند، روش جستجوی عددی است. یکی از روشهای ابتکاری که در این زمینه وجود دارد، استفاده از الگوریتم ژنتیک است که توسط جانگ^۹ ارائه

است. هر چه پروژه راه یا آزادراه طولانی تر باشد و از شهرهای بیشتری عبور کند، نگرش و بینش طراحی نیز گسترده تر می‌شود. هدف از ساخت یک راه یا راه آهن بهبود ترابری (مسافر و کالا) است، بنابراین راهی که ساخته می‌شود باید از دیدگاه فنی (کلان)، تأمین کننده اهداف زیر باشد:

- ساخت مسیر هزینه زیادی در بر نداشته باشد،
- برای بهره بردار ایمنی برای لازم را به همراه داشته باشد،
- آسایش و رفاه همه مردم را در نظر داشته باشد،
- خسارت زیست محیطی آن از حداقل‌های مجاز فراتر نرود،
- مخارج بهره برداری و نگهداری آن بهینه باشد،
- مطابق با استانداردهای مطرح شده در آیین نامه های طرح هندسی راه باشد.

۲. مراحل اساسی طرح و احداث مسیر

مسیر یابی از دیر باز امری دشوار و طاقت فرسا بوده است و در این مورد طراح بایستی عوامل زیادی را در نظر بگیرد. برای طراحی هر مسیر می‌باید به عوامل مختلفی از جمله نیازهای اجتماعی، اقتصادی، زیست محیطی و فرهنگی توجه شود و همچنین سه هدف مهم یعنی ایمنی، راحتی و تسریع در حمل و نقل برای استفاده کنندگان راه‌های کشور ایجاد شود. به عنوان مثال در طرح و احداث یک راه، هزینه سرمایه گذاری و بازده آن باید در کل سیستم ارتباطات با دقت لازم مورد بررسی قرار گیرد تا از دیدگاه منافع ملی و اهداف استراتژیک کشور و در راستای رشد و توسعه پایدار، اولویت‌های سرمایه گذاری در کل سیستم مشخص شوند. محل دقیق و تمام جزئیات مسیر را نمی‌توان یکباره و در یک مرحله مشخص کرد. از این رو مسیر راه در مراحل مختلف و با استفاده از نقشه‌ها و عکسهای هوایی معین می‌شود [1]. در انتخاب مسیر راه، عوامل بسیاری دخیل هستند که کار را مشکل، وقت گیر و پرهزینه می‌کنند. هرچند که عوارض طبیعی در بسیاری از قسمتهای راه‌های برون شهری ممکن است تنها عامل تعیین کننده مسیر باشند، ولی نباید مسیر این راهها بدون توجه به عوامل اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی تعیین شود.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب مسیر، یافتن وضعیت متعادلی است که با مخارج کمتر، دسترسی بیشتر را فراهم ساخته و عوارض نامطلوب محیطی را در حداقل نگاه می‌دارد. عواملی که باید در انتخاب مسیر مورد نظر قرار گیرند عبارتند از [2]:

اگر S کل فضای برداری E^n باشد، آنگاه مدل را مدل برنامه‌ریزی ریاضی بدون محدودیت^{۱۱} می‌نامند. در غیر این صورت، مدل برنامه‌ریزی ریاضی با محدودیت^{۱۲} نامیده می‌شود. مدل برنامه‌ریزی ریاضی با محدودیت را می‌توان به صورت زیر نیز بیان کرد:

$$\begin{aligned} \text{Min } & f(x) \\ g_i(x) & \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (2)$$

شرط وجود جواب برای این مدلها، و قضیه اساسی حل آنها در زیر آمده است.

(قضیه کوهن تاکر^{۱۳} $(K-T)$): در صورتی که f ، g_i مشتق پذیر از درجه اول باشند و شرایط درجه اول کیفیت محدودیت برقرار باشد، x^* کمینه عمومی برنامه ریزی محدب (بر اساس رابطه ۲) از روابط زیر حاصل می‌شود [12]:

$$g_i(x^*) \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

شرط شدنی بودن x^*

$$u_i^* g_i(x^*) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

شرط مکملی

$$\nabla f(x^*) - \sum_{i=1}^m u_i^* \nabla g_i(x^*) = 0 \quad (5)$$

شرط لاگرانژین

اپراتور ∇ که در معادلات بالا استفاده شده است، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\nabla f(x) = \left(\frac{\partial f(x)}{\partial x_1}, \frac{\partial f(x)}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f(x)}{\partial x_n} \right)^T \quad (6)$$

که به آن، اپراتور دلتا یا گرادینان $f(x)$ می‌گویند.

۴-۱ روشهای حل مدل برنامه ریزی محدب بدون

محدودیت

برای حل مسائل برنامه‌ریزی ریاضی بدون محدودیت، روشهای مختلفی وجود دارند که در ادامه به بررسی اجمالی دو روش، پیش

شده است [۹]. در یک روش مشابه، جها^{۱۴} برای ورودی اطلاعات در الگوریتم خود از سیستم اطلاعات جغرافیایی یا GIS استفاده کرده و بنابراین مدل او در یافتن هزینه‌هایی که به موقعیت جغرافیایی محل بستگی دارند، در مقایسه با روش جانگ، از دقت بیشتری برخوردار است [10].

با توجه به محدودیتهای استفاده از مدل‌های ریاضی و ناسازگاری آنها با مسایل اجرایی، استفاده از این روشها هنوز معمول نشده است. امروزه عمدتاً مهندسين طراح با استفاده از تجربه‌های مربوط به راههای گذشته و نیازهای کارفرما و نقشه عمومی توپوگرافی، گزینه‌هایی را به عنوان مسیرهای اولیه در نظر می‌گیرند و پس از بررسی آنها و انجام سعی و خطا، این گزینه‌ها را بهبود می‌بخشند و سپس با توجه به محدودیت‌های طرح، نقاط اجباری و دیگر مسایل مطروحه در پروژه بر اساس قضاوت مهندسی و ارزیابی اقتصادی همان گزینه‌ها، مسیری را پیشنهاد کرده و آن را نهایی می‌کنند. با توجه به این که کیفیت این مسیرها عمدتاً وابستگی زیادی به تجربه طراح دارد، بنابراین نمی‌توان این روش را دقیق دانست. در صورت نادرست بودن مسیرهای اولیه مورد بررسی، هزینه‌های بسیاری به پروژه‌ها تحمیل می‌شود که حتی در صورت استفاده از بهترین شیوه‌های طرح خط پروژه در مراحل بعدی دیگر نمی‌توان این هزینه‌ها را جبران کرد.

۴. مدل برنامه‌ریزی ریاضی

در این تحقیق از مدل برنامه ریزی ریاضی برای مدل‌سازی مساله مورد بررسی، استفاده شده است. این روش‌ها ابتدا مساله را به یک مدل ریاضی تبدیل کرده و سپس آنرا حل می‌کنند. تبدیل مساله به یک مدل ریاضی قابلیت بررسی آنرا بسیار افزایش می‌دهد و امکان استفاده از برنامه‌های متنوع ریاضی را فراهم می‌آورد. بنا بر این در ادامه تعریف مدل برنامه ریزی ریاضی و یک قضیه اساسی که در حل این مدلها مورد استفاده قرار می‌گیرد آورده شده‌اند [11].

تعریف: مدل برنامه ریزی ریاضی عبارت است از:

$$\text{Min } f(x), x \in S, x \in E^n \quad (1)$$

که در آن، $f: R^n \rightarrow R$ تابعی دلخواه و S زیر مجموعه‌ای از نقاط فضای برداری E^n است.

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial \alpha_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial \alpha_2 \partial \alpha_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial \alpha_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial \alpha_2 \partial \alpha_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial \alpha_n \partial \alpha_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial \alpha_n \partial \alpha_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial \alpha_n^2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

روش نیوتن از روش پیش گرادیان سریع تر است و در بعضی موارد با یک تکرار به جواب می رسد [13].

۴-۲ روشهای حل مدل برنامه ریزی محدب با محدودیت

برای حل مسائل برنامه ریزی با محدودیت روشهای مختلفی وجود دارند که بسته به شکل تابع هدف و محدودیت های آن اعم از این که خطی یا غیرخطی باشند، طبقه بندی می شوند. در این تحقیق با توجه به نوع تابع هدف (هزینه) و محدودیت های آن که غیرخطی هستند دو روش MAP¹⁷ و SUMT¹⁸ مورد استفاده قرار می گیرند.

الف) روش MAP

در این روش تابع غیرخطی هزینه و محدودیت های غیرخطی آن با تابع هزینه و محدودیت خطی تقریب زده می شوند. جستجو در این روش با یک نقطه اولیه x شروع می شود و سپس گرادیان تابع هزینه ∇f و گرادیان محدودیت ∇g_i به ازای این نقطه اولیه محاسبه می شوند. این مقادیر به ترتیب ضرایب تابع هزینه و تابع محدودیت در مدل خطی جایگزین هستند.

$$\begin{aligned} \text{Min } C^0 x \\ a^0_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (11)$$

که در آن:

$$C^0 = \nabla f(x^0) \quad (12)$$

$$a^0_i = \nabla g_i(x^0) \quad (13)$$

البته برای این که با این تقریب بعضی نقاط غیرموجه، موجه جلوه داده نشوند (نقطه موجه، نقطه ای است که در محدودیت های مدل ریاضی صدق کند)، یک محدودیت به صورت $x^* - \epsilon \leq x \leq x^* + \epsilon$ به مدل اضافه می شود (ϵ عددی

گرادیان و نیوتن پرداخته می شود. در این روش ها انتخاب نقطه شروع و معیار توقف، به اختیار کاربر است.

الف) روش پیش گرادیان¹⁴

با توجه به این که برای کمینه کردن تابع، با در نظر گرفتن بردار گرادیان با علامت منفی بیشترین کاهش برای تابع هدف حاصل می شود، این روش از یک نقطه ابتدایی x^0 شروع شده و با یک طول گام α در جهت بردار گرادیان با علامت منفی حرکت کرده و به نقطه جدید می رسد و این کار تا جایی ادامه می یابد که $|\nabla f| < \epsilon$ شود.

$$x^k = x^{k-1} + \alpha^{k-1} d^{k-1} \quad (7)$$

$$d^k = -\nabla f(x) \Big|_{x=x^k} \quad (8)$$

که در آن:

x^k = مقدار x در مرحله k ام و

d^{k-1} = جهت جستجو در مرحله $k-1$ ام است.

باید توجه داشت که برای محاسبه x^k با توجه به این که x^{k-1} و d^{k-1} معلوم هستند، رابطه (۱) بر حسب پارامتر α به دست می آید. سپس $f(x^k)$ که تابعی بر حسب α است محاسبه می شود و مشتق آن نسبت به α برابر صفر قرار داده می شود تا بزرگترین طول گام به دست آید. در نهایت α به دست آمده در رابطه (۱) جاگذاری می شود و نقطه جدید x^k حاصل می شود [13].

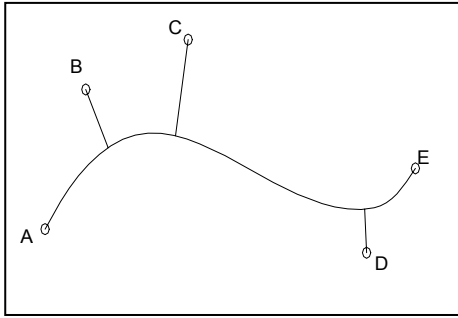
ب) روش نیوتن¹⁵

روش نیوتن تا حدود زیادی مانند روش پیش گرادیان است و تنها تفاوت آن در محاسبه بردار d است که به صورت معادله (۹) تعریف می شود.

$$d^k = -[H(x^k)]^{-1} \nabla f(x^k) \quad (9)$$

که در آن:

H = ماتریس هیشین¹⁶ است که به صورت زیر تعریف می شود:



شکل ۱. شکل عمومی مسیر بهینه

همان گونه که در شکل ۲ دیده می شود، مسیرهای ممکن زیادی می توانند نقاط A و E را به هم متصل کنند و به نقاط B و C و D هم دسترسی داشته باشد، اما مسیر بهینه در این مسئله، مسیری است که مجموع هزینه ساخت و بهره برداری راه اصلی و راههای دسترسی کمترین هزینه را داشته باشد. بنابراین یافتن تابع هزینه راه اولین قدم در بحث مدلسازی ریاضی مسیریابی است. عامل عمده طرح مسیر در مناطق کوهستانی کمینه کردن حجم عملیات خاکی است، زیرا در این مناطق شکل توپوگرافی منطقه تحمیل کننده شرایط بسیاری است که مسیر راه نیز تابع آنهاست، یعنی برای رعایت ضوابط، حداقل ها و حداکثرهای مجاز در آیین نامه طرح هندسی راه و همچنین کم کردن هزینه راه، توپوگرافی منطقه مهم ترین نقش را ایفا می کند، ولی در مناطق دشتی و تپه ماهوری که عموماً از شیب های ملایمی تشکیل شده اند عامل طرح مسیر و پارامتر عمده هزینه، توپوگرافی نیست.

در این مناطق طول مسیر و شرایط بستر آن که در هزینه های ساخت و بهره برداری تاثیر می گذارند عامل اصلی تعیین کننده در تابع هزینه راه هستند. بنابراین در این مناطق کمینه کردن تابع هزینه یعنی یافتن کوتاه ترین مسیر ممکن که ضمن دسترسی به نقاط بین راه، از مناطقی که هزینه ساخت راه در آنها کمتر است عبور کرده باشد. معمولاً وضعیت طبیعی زمین در این مناطق دارای ناهمواری های موضعی نظیر کوه و دره نیز هست که به دلیل هزینه زیاد عبور از این عوارض در طرح مسیر، سعی می شود که مسیر از آنها عبور نکند.

بنابراین مدل ریاضی بهینه سازی مسیر باید علاوه بر یافتن مسیری با کمترین هزینه، شرایط دیگری را نیز پاسخگو باشد. یکی از این شرایط نقاط اجباری موجود در منطقه است که مسیر باید از آنها عبور کند. بالعکس گاهی در طراحی کریدور، مناطقی وجود دارد که مسیر نباید از آنها عبور کند مانند دره ها، دریاچه ها، کوهها،

دلخواه است)، سپس مدل خطی حاصل با الگوریتم مربوطه مثل الگوریتم سیمپلکس^{۱۹} (یا نرم افزارهای مربوطه مثل Lingo و gams ...) حل می شود، جواب حاصل، نقطه بعدی روش جستجوی MAP را تعیین می کند. این فرایند تا جایی ادامه پیدا می کند که نامساوی $|\Delta f| < \epsilon$ برقرار شود.

ب) روش SUMT

در این روش، محدودیت مسأله $(g(x))$ توسط یک ضریب r ($0 < r < 1$) با تابع هزینه ترکیب می شود، به طوری که مسأله به یک مدل ریاضی بدون محدودیت تبدیل شده و سپس با استفاده از روشهای حل مدل ریاضی بدون محدودیت حل می شود.

$$\min f(x) + r \frac{1}{g(x)} \quad (14)$$

مسأله با یک r مشخص و یک نقطه اولیه x^0 شروع می شود. جواب به دست آمده، نقطه بعدی فرایند حل روش را تعیین می کند. در این روش r در هر مرحله با یک تصاعد هندسی مشخص، کاهش می یابد [15].

لازم به ذکر است که شرط کافی برای محدب بودن مدل های بیان شده این است که ماتریس هیشین (H) تابع هدف تعریف شده در آنها معین و مثبت باشد، یعنی باید دترمینان ماتریس های مربعی شامل اعضای قطری ماتریس هیشین، مثبت باشند، یا به عبارتی باید:

$$\det \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} \end{bmatrix} \geq 0, \dots, \det H \geq 0, \det \left[\frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} \right] \geq 0 \quad (15)$$

۵. مدلسازی به روش برنامه ریزی ریاضی

شکل کلی اتصال نقاط به یکدیگر و درجه مسیرهای ارتباطی بین نقاط از مسایل بسیار مهمی هستند که در بهینه سازی شبکه حمل و نقل برون شهری مطرح اند.

در این تحقیق به انواع الگوهای اتصال نقاط و نحوه تعیین درجه مسیرهای ارتباطی پرداخته نشده است. مسئله تعریف شده برای این تحقیق عبارت از یافتن یک مسیر بهینه به منظور اتصال دو شهر اصلی با دسترسی به نقاط مهم بین راهی است که با الگوی شکل ۱ به یکدیگر مرتبط می شوند.

مناطق حفاظت شده زیست محیطی، مناطق حفاظت شده نظامی، برخی مناطق دارای زمینهای کشاورزی، مناطقی که از نظر زمین شناسی برای عبور مسیر مناسب نیستند و دیگر مناطق ممنوعه ای که به هر دلیل مسیر نباید تا شعاعی از نزدیکی آنها عبور کند.

۱-۵ مؤلفه های تابع هزینه مسیر

مهم ترین عامل انتخاب یک مسیر از بین چند گزینه، نسبت سود به هزینه آن در طول عمر طرح است. سازمان اقتصادی کشورهای توسعه یافته^{۲۰}، انواع هزینه های یک مسیر راه یا راه آهن را در طول عمر آن در سه گروه مختلف طبقه بندی می کند، هزینه طراحی و نظارت، هزینه ساخت و هزینه بهره برداری، که هر کدام از آنها شامل هزینه های مختلفی است [1].

با توجه به این که هزینه طراحی و نظارت برای تمام گزینه ها تقریباً یکسان است و مقدار آن بسیار کمتر از هزینه های ساخت و بهره برداری است بنابراین می توان در تحلیل های اقتصادی انتخاب مسیر از آن چشم پوشی کرد.

عمده هزینه های راه یا راه آهن با وجود تفاوت مقادیر آنها، مستقیماً به طول مسیر وابسته اند، یعنی هرچه مسیر طولانی تر باشد این هزینه ها بیشترند [۱]. از جمله این هزینه ها می توان به هزینه تهیه زمین، عملیات خاکی، روسازی، زهکشی و ایمنی اشاره کرد. هزینه های تعمیر و نگهداری مسیر راه و راه آهن نیز مستقیماً به طول مسیر وابسته اند که می توان نحوه این ارتباط و تابع هزینه آنرا در تحقیقات مختلفی جستجو کرد [10].

هزینه استفاده کننده، از دیگر عوامل مؤثر در طرح مسیر است که آن نیز دربرگیرنده هزینه های مختلفی از جمله هزینه های عملکردی و وسیله نقلیه (برای مثال هزینه سوخت)، هزینه زمان سفر و هزینه تصادفات است که تابع ارتباط آنها با طول مسیر در مطالعات مختلفی آورده شده است که از آن جمله به مراجع [14 و 15] اشاره می شود.

کمی کردن هزینه های اجتماعی و زیست محیطی به آسانی امکان پذیر نیست و در نظر گرفتن آنها در تابع هزینه برای ارزیابی مسیر کاری مشکل است. فیشر و همکارانش، مطالعاتی در این زمینه انجام داده اند و دامنه ای برای تغییرات هزینه های زیست محیطی برحسب سنت، بر وسیله نقلیه، کیلومتر ارایه کرده اند [16]. تابع هزینه کل به کار رفته در تحلیل این تحقیق برابر مجموع میانگین هزینه های ساخت و بهره برداری واحد طول راه یا راه آهن در طول عمر طرح است.

وضعیت توپوگرافی منطقه اعم از اینکه منطقه دشت یا تپه ماهور و یا کوهستانی باشد تأثیر فراوانی بر هزینه ساخت راه می گذارد. از طرف دیگر درجه راه، اعم از اینکه راه، آزادراه، بزرگراه، راه اصلی و یا راه فرعی باشد، و یا نوع روسازه راه آهن نیز در هزینه ساخت آن بسیار مؤثرند، بنابراین در یک شبکه راه و یا راه آهن برون شهری، کمینه هزینه ساخت حالتی از شبکه است که در آن علاوه بر اتصال مناسب مناطق شهری، منابع طبیعی و مراکز صنعتی به یکدیگر، طول انواع راهها در آن در حالت بهینه باشد.

در پروژه های عملی گاهی بعضی از نقاط بین راهی به دلایل خاص برای پروژه به عنوان نقاط اجباری تعریف می شوند، یعنی نقاطی که مسیر مینا باید از آنها بگذرد. در این مدل برای تعریف این نقاط میتوان هزینه ساخت و بهره برداری راه دسترسی آنها به مسیر مینا را بی نهایت تعریف کرد. در این حالت برنامه بهینه یابی مدل، برای کاهش مجموع هزینه ها، طول راه دسترسی این نقاط را به حداقل ممکن می رساند.

۲-۵ مدل ریاضی مسیریابی بدون محدودیت

در مرحله اول فرض می شود، هیچ منطقه ممنوعه ای در کریدور طرح مسیر وجود ندارد، بنابراین در این حالت مسئله به یافتن یک مدل ریاضی بدون محدودیت تبدیل می شود. در این روش ابتدا تابع هزینه راه مدلسازی می شود و سپس با استفاده از روشهای ریاضی بهینه سازی مناسب، کمینه مقدار آن به ازای تغییرات موقعیت راه در پلان محاسبه می شود. وضعیتی از راه که کمترین هزینه را دربرداشته باشد، به عنوان جواب مطلوب انتخاب می شود.

۱-۲-۵ مدل ریاضی تابع هزینه مسیر

در این مدل مجموع هزینه های ساخت و بهره برداری واحد طول مسیر مینا که نقاط ابتدا و انتهای مسیر را به هم وصل می کنند با p و مجموع هزینه ساخت و بهره برداری واحد طول راه دسترسی برای قطعه Am ، qi در نظر گرفته شده است. اگر محل تقاطع راههای فرعی (راههای دسترسی) با راه اصلی، نقاطی به نام Ji و با مختصات Xi و Yi در نظر گرفته شود (شکل ۲).

با ضرب هزینه واحد طول هر قطعه از مسیر در طول آن، هزینه مربوط به هر قطعه پیدا می شود اکنون با جمع این هزینه ها، هزینه مربوط به مجموع قطعات مسیر محاسبه می شود.

آزاد، ابتدا مشتق جزئی تابع نسبت به تمام متغیرهای آزاد یعنی $\nabla f(x_i|_{i=1}^n, y_i|_{i=1}^n)$ محاسبه می شود.

$$\nabla f(x_i|_{i=1}^n, y_i|_{i=1}^n) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Big|_{i=1}^n, \frac{\partial f}{\partial y_i} \Big|_{i=1}^n \right) \quad (17)$$

سپس با جاگذاری مقادیر اولیه $(x_1^0, x_2^0, x_3^0, \dots, y_1^0, y_2^0, y_3^0, \dots)$ در معادلات (17)، مقدار $\nabla f(x_i|_{i=1}^n, y_i|_{i=1}^n)$ به دست می آید. در این مرحله نقاط بعدی فرایند از رابطه زیر به دست می آیند.

$$\begin{aligned} &(x_1^1, x_2^1, x_3^1, \dots, y_1^1, y_2^1, y_3^1, \dots) = \\ &(x_1^0, x_2^0, x_3^0, \dots, y_1^0, y_2^0, y_3^0, \dots) - \\ &\alpha^0 \cdot \nabla f(x_i|_{i=1}^n, y_i|_{i=1}^n) \end{aligned} \quad (17)$$

اکنون $f(x_i|_{i=1}^n, y_i|_{i=1}^n)$ تابعی از α^0 است. در این مرحله برای محاسبه حداکثر طول گام α^0 مشتق f نسبت به α^0 ، برابر صفر قرار داده می شود تا α^0 به دست آید. سپس α^0 به دست آمده در رابطه (17) جایگذاری می شود تا $(x_i^1|_{i=1}^n, y_i^1|_{i=1}^n)$ به دست آید. این فرایند تا زمان برقراری نامساوی $|\Delta f| < \epsilon$ ادامه می یابد.

۳-۲-۵ اصلاح مسیر طرح شده

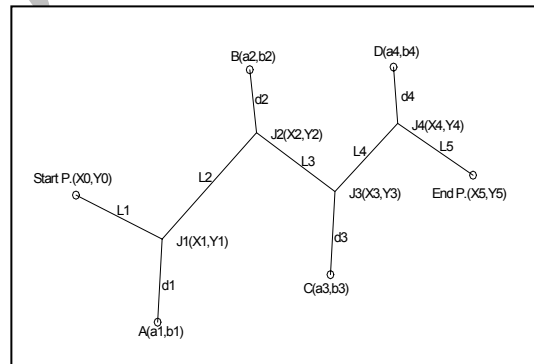
پس از طرح مسیر توسط برنامه، مهندس طراح باید آن را بر روی نقشه های مختلف اطلاعات جغرافیایی تطبیق دهد و اگر مسیر از مناطقی عبور کرده که به هر دلیل مناسب نیستند، با تعریف نقاط اجباری برای برنامه، مسیر بهینه را در حالت جدید دوباره طراحی کند. مثلاً ممکن است مسیر اولیه از میان یک دریاچه یا مرداب و یا رودخانه عبور کند، در این حالت مهندس طراح براساس اطلاعات مهندسی رودخانه و ملاحظات مختلف فنی و اقتصادی، بهترین مقطع عبور مسیر از رودخانه (بهترین مقطع برای احداث پل) را به عنوان نقطه اجباری برای برنامه تعریف می کند. البته گاه در مناطق دشتی و تپه ماهوری نیز سلسله کوه هایی وجود دارند که مسیر، ناگزیر باید آنها را قطع کند. در این حالت نیز باید مهندس طراح براساس نوع منطقه و شرایط خاص آن اعم از شکل توپوگرافی، محدودیت های زمین شناسی، جنس کوه، امکانات

$$f = p \sum_{i=1}^{n+1} \sqrt{(x_{i-1} - x_i)^2 + (y_{i-1} - y_i)^2} + \sum_{i=1}^n q_i \sqrt{(x_i - a_i)^2 + (y_i - b_i)^2} \quad (16)$$

که در آن:

- f = مجموع کل هزینه ها،
- p = هزینه واحد طول مسیر اصلی،
- q_i = هزینه واحد طول قطعه آم راههای فرعی،
- a_i, b_i = مختصات نقاطی که باید به آنها دسترسی داشت،
- x_i, y_i = مختصات نقاط راه اصلی و
- n = تعداد نقاط دسترسی را نمایش می دهند.

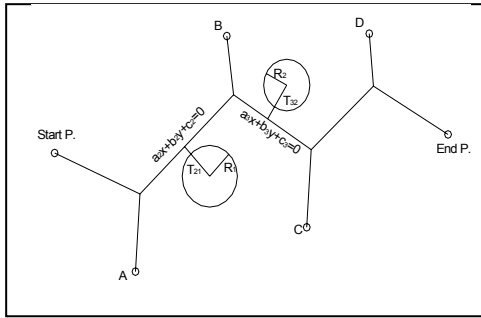
در این حالت فرض شده که هزینه واحد طول مسیر اصلی در طول مسیر ثابت است، ولی هزینه واحد طول راههای فرعی با توجه به درجه آنها و متناسب با حجم مبادلات بار و مسافر آنها متغیر است.



شکل ۲. مختصات نقاط مسیر در یک دستگاه مختصات محلی

۲-۲-۵ کمیته سازی تابع هزینه

در این مرحله، مختصات نقاط تقاطع راههای دسترسی با راه مبدأ (x_i, y_i) مجهولات مسئله هستند. اکنون با استفاده از روشهای کمیته سازی توابع، مقادیر x_i و y_i به نحوی پیدا می شوند که تابع هزینه (f) کمترین مقدار خود را داشته باشد. همان گونه که در قسمت قبل گفته شد، در این تحقیق از مدل های برنامه ریزی ریاضی برای بهینه سازی تابع هزینه استفاده شده است. یکی از روشهای حل مدل برنامه ریزی ریاضی اشاره شده روش پیش گرادیان بود. در این روش، به منظور یافتن کمیته تابع هزینه، با تعدادی متغیر



شکل ۳. مشخصات مسیر بهینه و مناطق ممنوعه

اگر معادله خط قطعه i ام مسیر $a_i x + b_i y + c_i = 0$ فرض شود، فاصله مرکز منطقه ممنوعه j ام از قطعه مسیر i ام به شکل زیر محاسبه می شود (شکل ۳):

$$T_{ij} = \frac{|a_i \hat{x}_j + b_i \hat{y}_j + c_i|}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}} \quad (18)$$

که در آن:

$$T_{ij} = \text{فاصله مرکز منطقه ممنوعه } j \text{ ام از قطعه مسیر } i \text{ ام،}$$

$$a_i, b_i, c_i = \text{ضرایب معادله خط قطعه } i \text{ ام از مسیر اصلی،}$$

$$\hat{x}_j, \hat{y}_j = \text{مختصات منطقه ممنوعه } j \text{ ام،}$$

اکنون با اضافه کردن شرط زیر به مدل، تمام نقاط مسیر اصلی از مناطق ممنوعه دور می شوند.

$$T_{ij} \geq R_j \quad (i = 1, \dots, n+1, \quad j = 1, \dots, m) \quad (19)$$

که در آن،

$$n+1 = \text{تعداد قطعات مسیر اصلی،}$$

$$M = \text{تعداد مناطق ممنوعه.}$$

۵-۳-۲ حل یک مثال

برای مثال اگر قرار باشد دو شهر Start و End در یک منطقه دشتی و تپه‌ماهوری که عوارض توپوگرافی خاصی ندارد به یکدیگر متصل شوند، ابتدا مختصات این دو شهر در یک سیستم مختصات واحد مشخص می‌شود. سپس با توجه به صلاح‌دیدهای بهره‌بردار، درجه راه مواصلاتی (راه مبنا) و در نتیجه هزینه ساخت و بهره‌برداری هر کیلومتر آن در دوره طرح مشخص می‌شود. حال باید موقعیت نقاط بین‌راهی که باید به این مسیر مبنا دسترسی داشته باشند و همچنین هزینه ساخت و بهره‌برداری هر

اجرائی و دیگر محدودیت‌های فنی و اجرایی، بهترین مقطع برای احداث تونل را به عنوان نقطه اجباری برای برنامه بهینه سازی تعریف کند. بنابراین با توجه به مطالب مذکور هرچه اطلاعات ورودی به مدل کامل‌تر و قضاوت مهندسی طراح براساس تجربه بهتری باشد، خروجی مدل به مسیر بهینه واقعی نزدیک‌تر می‌شود.

۵-۳-۳ مدل ریاضی مسیریابی با محدودیت

همان گونه که اشاره شد، در پروژه‌های راهسازی مناطقی وجود دارند که راه نباید از آنها عبور کند، باید با مدل‌سازی آنها و تعریف این محدوده‌ها به عنوان شرایط و محدودیت‌های تابع اصلی، مدل را کامل کرد. برای تعریف این مناطق در یک مدل ریاضی، این مناطق باید با توجه به شکل نامنظم آنها با اشکال منظم هندسی قابل برازش، تعریف شوند.

در این تحقیق از دایره به عنوان یک شکل هندسی منظم برای تعریف مناطق ممنوعه استفاده شده، به این نحو که کاربر باید با مشخص کردن مرکز این دایره‌ها و شعاع آنها که متناسب با شکل مناطق ممنوعه انتخاب می‌شوند، برنامه مسیر یابی را هدایت کند.

در این مدل با اعمال یک ضریب در تابع هزینه، مقدار هزینه در اثر عبور از مناطق مختلف کریدور طرح، کنترل می‌شود.

در این روش موقعیت تمام قطعات مسیر نسبت به مناطق ممنوعه که به صورت مناطق دایره‌ای تعریف شده‌اند کنترل می‌شوند. اگر قطعه‌ای از مسیر از میان این محدوده عبور کند، هزینه آن قطعه یا به عبارت دیگر ضریب آن قطعه در تابع هدف، بی‌نهایت می‌شود. بنابراین با این رویکرد برنامه کمینه سازی تابع هدف تمام قطعات مسیر را از این مناطق دور می‌کند.

۵-۳-۱ مدل محدودیت فاصله مسیر از مرکز منطقه

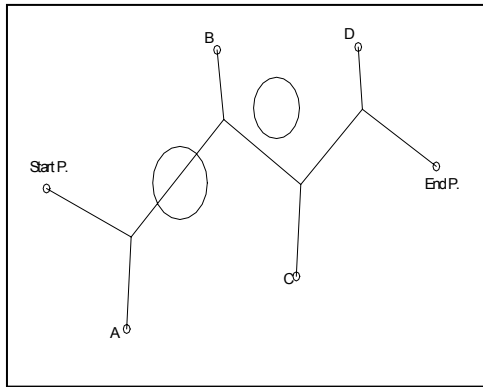
ممنوعه

در این روش هیچ گونه تغییری در تابع هزینه داده نمی‌شود و فقط با اضافه کردن برخی محدودیت‌ها و شرط‌ها به برنامه بهینه سازی تمام نقاط مسیر تحت کنترل قرار می‌گیرند.

اگر فاصله مرکز منطقه ممنوعه j ام که با مختصات (x_j, y_j) و شعاع R_j تعریف شده است، با مسیر محاسبه شود، می‌توان حداقل این فاصله را به R_j محدود کرد.

همچنین هزینه ساخت و بهره برداری این مسیر صفر در نظر گرفته می شود، زیرا به صورت واقعی چنین مسیری ساخته نخواهد شد، و دوباره مسئله حل می شود، این کار آن قدر ادامه می یابد تا مسیر طراحی شده با هیچ منطقه ممنوعه‌ای تداخل نداشته باشد.

حالت اول: مسیر شکل ۵ بدون در نظر گرفتن مناطق ممنوعه رسم شده است.



شکل ۵. مسیر بهینه بدون در نظر گرفتن مناطق ممنوعه

حالت دوم: با اضافه کردن شرط زیر دوباره مسئله حل می شود. این بار فرض شده که مرکز منطقه ممنوعه (k امین نقطه دسترسی) از مسیر اصلی است.

$$\text{Minimize } f = \sum_{i=1}^{n+1} p_i L_i + \sum_{i=1}^n q_i d_i \quad (20)$$

$$\text{Constraint } d_{kj} \geq R_j \quad (21)$$

$$(x_k - \hat{x}_j)^2 + (y_k - \hat{y}_j)^2 \geq R_j^2$$

$$\hat{x}_j, \hat{y}_j = \text{مختصات مرکز منطقه ممنوعه } j \text{ ام}$$

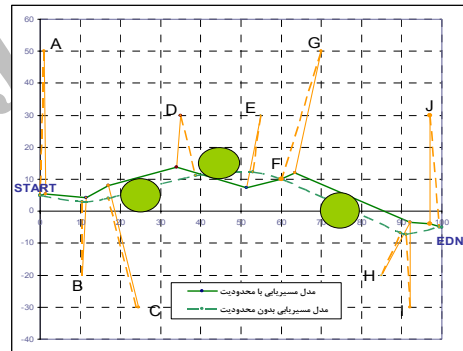
$$R_j = \text{شعاع منطقه ممنوعه } j \text{ ام}$$

k = شماره منطقه ممنوعه ای که به عنوان نقطه دسترسی مجازی برای مدل تعریف شده،

d_{kj} = طول راه دسترسی مرکز منطقه ممنوعه j ام از نقطه k ام مسیر.

کیلومتر آنها به صورت مجزا مشخص شود. به دلیل تفاوت درجه راههای دسترسی و همچنین حجم ترافیک متفاوت آنها که با توجه به جمعیت، وسعت منطقه و تبادلات اقتصادی و صنعتی هر نقطه شهری معین می شود، هزینه واحد طول راههای دسترسی متفاوت فرض شده است [۱۷].

همان طور که در شکل ۴ دیده می شود، در این مثال، تعداد نقاط دسترسی بین راهی ۱۰ واحد فرض شده، که مختصات و هزینه واحد طول آنها (کیلومتر/هزینه) به صورت فرضی برای مدل مسیریابی با محدودیت و مدل مسیریابی بدون محدودیت تعریف شده است. به منظور مقایسه بهتر دو مدل مسیریابی سه منطقه ممنوعه با مختصات مشخص برای این مدل مسیریابی با محدودیت تعریف شد. همان طور که در شکل ۴ دیده می شود، به دلیل موقعیت مناطق ممنوعه در این مثال، مسیر بهینه در حالت مسیریابی با محدودیت طولانی تر از حالت مسیر بهینه در حالت مسیریابی بدون محدودیت است.



شکل ۴. نمایی از خروجی مسیریابی با مدل محدودیت

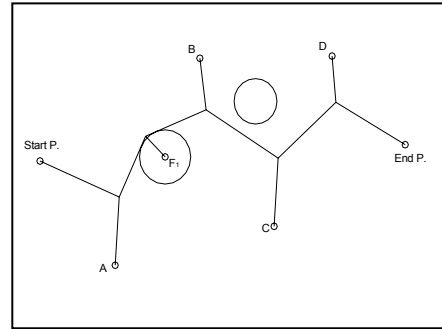
فاصله مسیر از مرکز منطقه ممنوعه (با سه منطقه ممنوعه) [۱۷]

۳-۳-۵ مدل مسیریابی اصلاح شده

در این روش، ابتدا یکبار مسئله توسط برنامه بهینه سازی بدون محدودیت حل می شود و مسیر اصلی و مسیرهای فرعی رسم می شوند سپس محدوده هایی که مسیر رسم شده از آنها عبور می کند تعیین می شوند.

در این مرحله مراکز مناطق ممنوعه ای که مسیر بهینه با آنها تلاقی دارد، به عنوان نقاطی که باید مسیر به آنها دسترسی داشته باشد در مدل اولیه وارد می شوند، با این تفاوت که طول راه دسترسی این مراکز، باید از شعاع منطقه ممنوعه R_F بزرگتر باشد.

به دلیل لولا شدن مسیر در کنار مناطق ممنوعه، مسیر پیشنهادی این مدل بهتر از مسیر مدل قبل است.



شکل ۶. مسیر مبنا در کنار منطقه ممنوعه لولا شده است

۶. مطالعه موردی مسیر راه آهن بافق - مشهد

در این جا به منظور ارزیابی اقتصادی احداث مسیر راه آهن بافق - مشهد از مدل ارایه شده در این تحقیق استفاده شده است. با توجه به وضعیت کلی توپوگرافی منطقه که عموماً به صورت دشت و تپه‌ماهور است، این پروژه را می‌توان به وسیله مدل پیشنهادی مذکور مورد ارزیابی قرار داد. البته عوارضی در نقشه توپوگرافی دیده می‌شوند که این مناطق توسط محدوده های ممنوعه دایره شکل برای برنامه تعریف شده اند.

ابتدا نقاط پرجمعیت و معادن بین راه که از نظر مسایل بهره‌برداری و اقتصادی اهمیت فراوانی دارند، شناسایی شده و در مدل مسیریابی به عنوان نقاط دسترسی بین‌راهی تعریف می‌شوند. شهرها و معادن بین‌راهی که از اهمیت زیادی برخوردار بوده و به عنوان نقاط دسترسی بین‌راهی برای مدل تعریف شده‌اند به شرح زیرند:

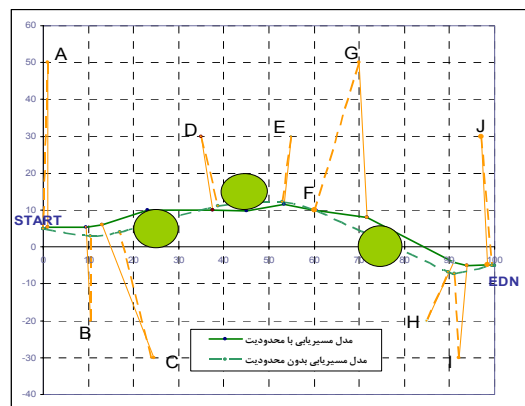
معدن چغارت، معدن سه‌چاهون، بهاباد، معدن چادرمولو، معدن پرواده، طبس، فردوس، بجستان، گناباد و کاشمر.

در این جا بافق به عنوان نقطه ابتدایی مسیر و تربت‌حیدریه به عنوان نقطه انتهایی آن مطرح بوده اند. بنابراین دوری و نزدیکی مسیر به دیگر نقاط بین راهی با توجه به هزینه ساخت و بهره‌برداری راه دسترسی به آنها در این مدل ریاضی تعیین می‌شود. چون در این برنامه نسبت هزینه تمام شده مسیرها مهم است بنابراین، اگر ضریب هزینه (ساخت و بهره‌برداری)، مسیر راه آهن ۰/۶ (به طور متوسط هزینه ساخت هر کیلومتر راه آهن در این منطقه ۶ میلیارد ریال است) فرض شود، ضریب هزینه دیگر مسیرها با توجه به اهمیت نقاط دسترسی آنها (هم از نظر ساخت و هم بهره‌برداری)، تعیین می‌شود.

ضرایبی که در این مدل وارد شده‌اند به تایید کارشناسان این امر رسیده‌اند. با توجه به برخی هزینه‌های اجتماعی، نقطه بین‌راهی طبس به عنوان یک نقطه با اهمیت زیاد در این مدل تعریف شده ضریب هزینه آن ۱ در نظر گرفته شده است. در این جا یکبار مسیر بهینه به کمک مدل مسیریابی بدون محدودیت به دست آمد، سپس با توجه به عبور مسیر از مناطق با توپوگرافی ناهموار و پرهزینه، دو محدوده از این مناطق برای برنامه مدل‌سازی شدند. در

چون در این روش مراکز مناطق ممنوعه به عنوان نقاط دسترسی تعریف می‌شوند، مسیر مبنا در گذر از محدوده این مناطق لولا شده، و تابع هزینه در مقایسه با حالت قبل که در آنجا مسیر به صورت صلب جابه‌جا می‌شد، بهینه می‌شود.

در ضمن، در این روش چون در تحلیل دوم، فقط مناطق ممنوعه‌ای در مدل وارد می‌شوند که در تحلیل اول، مسیر بهینه با آنها تلاقی داشته است، زمان تحلیل بسیار بهینه است. اما در اینجا به دلیل لولا بودن مسیر مبنا در کنار مناطق ممنوعه احتمال عبور قسمتهای جزئی از مسیر مبنا از میان این مناطق وجود دارد که باید در نقشه‌های نهایی به صورت محلی اصلاح شود. خروجی این مدل برای مثال مطروحه در قسمتهای قبل در شکل ۷ نشان داده شده است. همان گونه که دیده می‌شود در مرحله اول مسیر طرح شده به کمک مدل مسیریابی بدون محدودیت، با منطقه ممنوعه تلاقی داشته، بنابراین در مرحله دوم این مناطق به عنوان نقاط دسترسی برای مدل مسیریابی با محدودیت تعریف شده است.



شکل ۷. نمایشی از خروجی مدل مسیریابی اصلاح شده

(برای مثال قبل) [۱۷]

۷. نتیجه گیری

تعیین مسیرهای اولیه و یافتن بهترین گزینه از بین آنها عاملی تعیین کننده در هزینه های یک پروژه است. چه بسا مسیری که به دلیل نامناسب بودن محل گذر آنها، هزینه های مختلفی مانند هزینه های ساخت، بهره برداری و ... به پروژه تحمیل می شوند و اصلاح آنها نیاز به زمان و انرژی بسیار دارد. بنابراین استفاده از نرم افزارهای کامپیوتری در مسیریابی الزامی به نظر می رسد.

بسیاری از پارامترهای تأثیرگذار در تابع هزینه ساخت و بهره برداری مسیر راه و راه آهن با وجود تفاوت مقادیر آنها، مستقیماً به طول مسیر وابسته اند، یعنی هرچه مسیر طولانی تر باشد، این هزینه ها بیشترند. از آنجا که هدف اصلی این مقاله ارایه مدل ریاضی بهینه یابی طرح کریدور مسیر بوده، نه طرح مسیر نهایی، به پارامترهای دیگر طرح مسیر کمتر اشاره شده است.

علاوه بر این چون مدل های ارایه شده در این تحقیق سعی دارند، کریدور بهینه اولیه را بیابند، بنابراین در یک نگاه جامع و کلان به یک پروژه عظیم راهسازی و یا راه آهن، توجه به تغییرات دقیق توپوگرافی، کاری دشوار و غیرضروری است و از طرف دیگر در این مرحله، شناخت عوارض کلی همانند کوه ها، دریاچه ها، مرداب ها، دره ها و مواردی از این قبیل برای طرح کریدور کفایت می کند. البته مدل های ارایه شده، برای مناطق کوهستانی و یا تپه ماهوری با تغییرات ارتفاع زیاد مناسب نیستند، زیرا در این گونه مناطق، توپوگرافی منطقه یکی از مهم ترین عوامل طرح مسیر است. تمام پارامترهای هزینه وابسته به طول مسیر را می توان در این مدل وارد کرد، به علاوه موقعیت عوارض مختلف طبیعی (دره ها، کوه ها، دریاچه ها ...)، مناطقی که از نظر زمین شناسی برای عبور مسیر مناسب نیستند (مرداب ها، زمین های سست ...)، مناطقی که از نظر زیست محیطی نباید مسیر از آنها گذر کند (جنگل ها، مراتع ...)، و کلیه مناطق بین راهی که به هر دلیل برای عبور مسیر مناسب نیستند نیز در این روش قابل مدل سازی هستند. البته شناخت محل دقیق این محدوده ها و مشخصات آنها نیاز به سیستم های اطلاعاتی و جغرافیایی مانند GIS دارد.

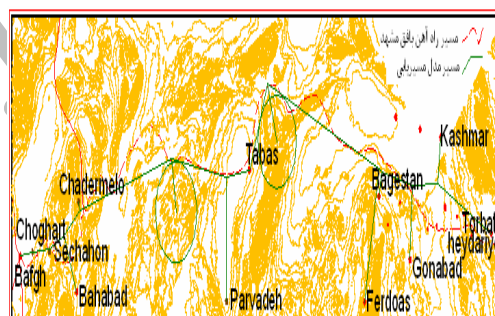
یافته های این تحقیق را می توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- چون مسیرهای پیشنهادی اولیه به صورت دستی رسم می شوند، دور از انتظار نیست که در یک پروژه حدود ۹۰۰ کیلومتری مثل راه آهن بافق - مشهد، بتوان با استفاده از نرم افزارهای ریاضی طول مسیر را به مقدار ۷۰ کیلومتر کاهش داد (کمتر از ۱۰٪)، اما

این حالت مسیر پیشنهادی مدل از مناطقی عبور کرد که از نظر فنی و یا اقتصادی مشکل خاصی نداشتند، بنابراین برای مقایسه نتایج مسیر پیشنهادی مدل ریاضی و مسیر طراحی شده هر دو مسیر به صورت انطباقی در شکل ۸ نمایش داده شده اند. دوایر رسم شده در شکل موقعیت مناطق ممنوعه تعریف شده برای مدل را نشان می دهند.

با مقایسه مسیر موجود (مسیر خمیده) و مسیر پیشنهادی توسط برنامه (مسیر شکسته)، مشاهده می شود که مسیر طراحی شده حدوداً نزدیک به مسیر بهینه است، اما در برخی قسمت ها اختلافاتی دیده می شود که باید در نقشه های دقیق تر و با در نظر گرفتن تمام شرایط محیطی و اجرایی بررسی شوند.

برای ارزیابی اقتصادی این دو مسیر، طول مسیر اصلی (ریلی) بین ایستگاه های اصلی که به عنوان نقاط بین راهی برای برنامه بهینه سازی تعریف شده بودند، در هر دو مورد محاسبه شد [۱۷].



شکل ۸. مسیر بهینه پیشنهادی مدل و مسیر طراحی شده [۱۷]

در اینجا طول مسیر موجود ۶۶۳/۴ کیلومتر و طول مسیر بهینه طراحی شده توسط مدل ۵۸۹/۲ کیلومتر است. اختلاف طول مسیر بهینه با مسیر طراحی شده برابر ۷۴/۲ کیلومتر است.

به دلیل زیاد بودن هزینه ساخت مسیرهای اصلی مانند راه آهن و یا آزادراه ها، کوتاه کردن این مسیرها حتی به اندازه یک کیلومتر، صرفه جویی قابل ملاحظه ای در کل پروژه ایجاد می کند. البته باید شرایط توپوگرافی و دیگر معیارهای مسیریابی در نظر گرفته شوند. قابل توجه است که مسیر پیشنهادی برنامه و مسیر اجرایی در مقیاس (۱/۲۵۰۰۰۰)، مورد مطالعه قرار گرفتند و یا به عبارت دیگر در این جا، کریدور مسیر بافق - مشهد با خروجی مدل مقایسه شده است.

طراح باید براساس نقشه های دقیق توپوگرافی و جغرافیایی، مسیر نهایی را طراحی کنند.

- به علت تشابه زیاد مسایل مسیر یابی راه و راه آهن با مسیریابی خطوط لوله نفت، گاز، خطوط انتقال نیرو، تلفن، شبکه های آبرسانی، فاضلاب و غیره، با اندکی تغییرات می توان این مدل را در مسیر یابی دیگر شریانهای حیاتی نیز به کار گرفت.

۸. مراجع

1. OECD (1973) "Optimization of road alignment by the use of computers", Paris, OECD.
2. AASHTO (1987) "Maintenance manual", Washington, D.C.
3. Turner, A.K. [et al] (1971) "A computer assisted method of regional route location", Highway Research Record, Vol. 48, pp.1-15.
4. Athanassoulis, G.C and Calogero, V. (1973) "Optimal location of a new highway from A to B, a computer technique for route planning", PTRC Seminar Proceedings on Cost Models and Optimization in Highways.
5. Denardo, E. V. (1982) "Dynamic programming models and applications", New Jersey Prentice Hall.
6. غفاری ایرد موسی، کوزوش (۱۳۸۰) "مسیریابی راه با روش برنامه ریزی پویا"، پایان نامه کارشناسی ارشد، تهران، دانشگاه صنعتی شریف.
7. Hogon, J. D. (1973) "Experience with OPTLOC optimum location of highways by computer", PTRC Seminar Proceedings on Cost Model and Optimization in Highway.
8. Nicholson, A.J. (1976) "A variational approach to optimal route location", Highway Engineers, Vol.23, pp.22-25.
9. Jong, J. C. (1998) "Optimizing highway alignment with genetic algorithms", Maryland, University of Maryland.

استفاده از برنامه های ریاضی و کامپیوتری برای رسم مسیره های اولیه از آن جهت اهمیت دارند که در پروژه های راهسازی و راه آهن، به دلیل هزینه زیاد ساخت و بهره برداری هر کیلومتر آنها، با یک کیلومتر تغییر طول مسیر، هزینه پروژه میلیاردها تومان تغییر می کند.

- خروجی مدل مسیریابی بدون محدودیت می تواند برای ارزیابی اقتصادی پروژه ها و محاسبه هزینه های احتمالی به پروژه، به علت عبور از مناطق ممنوعه، مورد استفاده قرار گیرد. در ضمن در پروژه هایی با دید کلان، به منظور یافتن کریدور کلی مسیر ابزار نسبتاً خوبی است.

- مدل های ارایه شده در این تحقیق می توانند تمام پارامترهای تابع هزینه را که قابل تعریف در واحد طول راه هستند در نظر بگیرند و مسیر بهینه ای را بیابند که جمع هزینه احداث و بهره برداری آن در چرخه عمر پروژه، کمینه باشد. این روش در مقایسه با شیوه های قضاوت مهندسی که تا کنون از آنها استفاده می شده، گام مؤثری در بهبود وضعیت اقتصادی پروژه ها است.

- سرعت تحلیل و کارایی مناسب مدل مسیریابی با محدودیت فاصله مسیر از منطقه ممنوعه، از خصوصیات این مدل است. در این مدل فاصله تمام نقاط مسیر از مناطق ممنوعه کنترل می شود، و مدل به هیچ وجه اجازه عبور مسیر از آنها را نمی دهد. اما با توجه به این که نقاط لولایی مسیر در آن فقط نقاط تقاطع راه مبنا با راه های دسترسی هستند، در مقایسه با مدل مسیریابی لولایی دارای انعطاف پذیری کمتری است که این به معنای اقتصادی تر بودن مسیر پیشنهادی مدل مسیر یابی لولایی است.

- مدل مسیریابی اصلاح شده در مقایسه با مدل های دیگر دارای بیشترین انعطاف پذیری در مسیریابی است، که این باعث افزایش بهینه بودن خروجی آن از دیگر مدل های ارایه شده است.

- یکی از مسایل مهمی که باید در همان مراحل اولیه مسیریابی در نظر گرفته شود، موقعیت راه های موجود در منطقه است که برای طرح اقتصادی پروژه های راهسازی باید به آنها توجه و یا در صورت امکان از آنها نیز استفاده کرد. این مسئله به صورت مستقیم در مدل های ارایه شده وجود ندارد، ولی می توان با ترکیب برخی اطلاعات ورودی مانند تعریف نقاط اجباری و واحد هزینه راهها مدیریت طرح مسیر را بر عهده گرفت.

- مدل های ارایه شده در این مقاله تنها ابزارهای رایانه ای هستند که می توانند در اختیار مهندسان با تجربه قرار بگیرند و آنها را در طرح مسیر بهینه یاری رسانند. برای طرح دقیق مسیر، مهندسین

۱۷. بروجردیان، امین میرزا (۱۳۸۳) "مدل مسیریابی بهینه راه با توجه به نقاط دسترسی موجود در کریدور"، پایان نامه کارشناسی ارشد، تهران، دانشگاه تربیت مدرس.

پانویس ها:

- 1- Turner
- 2- Athanassoulis
- 3- Calogero
- 4- Denardo
- 5- Nasiry
- 6- Ghafary
- 7- Hogon
- 8- Nicholson
- 9- Jong
- 10- Jha
- 11- Unconstrained Mathematical Programming
- 12- Constrained Mathematical Programming
- 13- Kohn-Tucker
- 14- Pregradient Method
- 15- Newton Method
- 16- Hessian Matrix
- 17- Method of Approximation Programming
- 18- Sequential Unrestricted Maxim Technique
- 19- Simplex Algorithm
- 20- Organization of Economic Cooperation & Development

10. JHA, M.K. (2001) "Considering maintainability in highway alignment optimization", TRB, 80th. Annual Meeting, Paper no.01-3170.

11. Bazara, M.S. and Shetty, C.M. (1979) "Nonlinear programming :Theory and algorithms", New York, John Wiley and Sons Inc.

12. Hertog, D. Den (1995) "Interior point approach to linear, quadratic and convex programming algorithms and complexity", Netherlands, Kluwer Academic Publishers.

13. Hillier, Frederich, S. and Liberman, G.J. (1995) "Introduction to operations research", New York, Mc Graw-Hill Inc.

14. Jong, Jyh-Cherng and Schonfeld, P. (1999) "Cost functional for optimizing highway alignment", TRR1 659, pp.58-67.

15. Zeegar, C.V.[et al] (1992) "Safety effect of geometric improvement of horizontal curves", TRB,1356, PP.11-19.

16. Fisher. and Decorla, P. (1994) "Computer multimodal alternatives in major travel corridors", TRB1429, pp.15-23.