

# 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، مسیریابی 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 برنامه‌های 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 راه‌ها و الویت‌دهی به احداث آنها از الگویی پیروی می‌کنند که موارد زیر را در برمی‌گیرد:

- 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 راه‌های 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 صنعتی، کشاورزی و نظامی،

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. پیشینه تحقیق

در این زمینه مطالعات زیادی انجام شده است که در زیر به صورت خلاصه به برخی از آنها اشاره می‌شود: ترنر<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> و کالوگرو<sup>۳</sup> مسأله را به چند زیرمرحله گسسته تقسیم کرده‌اند، به گونه‌ای که در هر مرحله می‌توان اقدام به تصمیم‌گیری موضعی کرد [4]. دیناردو<sup>۴</sup>، 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<sup>۵</sup> و غفاری<sup>۶</sup> 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<sup>۷</sup> 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<sup>۸</sup> 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<sup>۹</sup> ارائه

است. هر چه پروژه راه یا آزادراه طولانی‌تر باشد و از شهرهای بیشتری عبور کند، نگرش و بینش طراحی نیز گسترده‌تر 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)، تأمین‌کننده اهداف زیر باشد:

- ساخت مسیر هزینه زیادی در بر نداشته باشد،
- برای بهره‌بردار 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 بهره‌برداری و نگهداری آن بهینه باشد،
- مطابق با استانداردهای مطرح شده در آیین‌نامه‌های 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 سرمایه‌گذاری 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 سرمایه‌گذاری 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، وقت‌گیر و پرهزینه می‌کنند. هرچند که عوارض طبیعی در بسیاری از قسمتهای راه‌های برون شهری ممکن است تنها عامل تعیین‌کننده 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<sup>۱۱</sup> می‌نامند. در غیر این صورت، مدل برنامه‌ریزی ریاضی با محدودیت<sup>۱۲</sup> 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<sup>۱۳</sup>  $(K-T)$ ): 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  $\nabla$  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 گرادیان  $f(x)$  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، جهت<sup>۱۴</sup> 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.

$$H = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{pmatrix} \quad (10)$$

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 MAP<sup>۱۷</sup> و SUMT<sup>۱۸</sup> 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  $\nabla f$  و گرادیان محدودیت  $\nabla g_i$  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 (  $\epsilon$  عددی

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

#### الف) روش پیش گرادیان<sup>۱۴</sup>

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  $\alpha$  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  $\alpha$  به دست می آید. سپس  $f(x^k)$  که تابعی بر حسب  $\alpha$  است محاسبه می شود و مشتق آن نسبت به  $\alpha$  برابر صفر قرار داده می شود تا بزرگترین طول گام به دست آید. در نهایت  $\alpha$  به دست آمده در رابطه (۱) جاگذاری می شود و نقطه جدید  $x^k$  حاصل می شود [13].

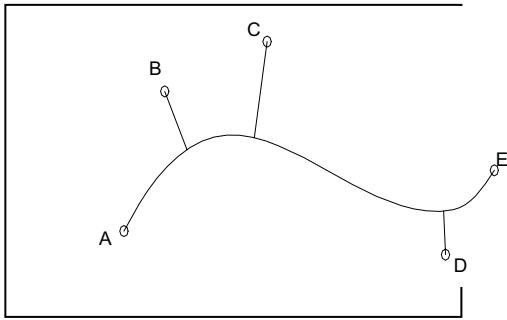
#### ب) روش نیوتن<sup>۱۵</sup>

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 هیشین<sup>۱۶</sup> است که به صورت زیر تعریف می شود:



شکل ۱. شکل عمومی مسیر بهینه

همان گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، مسیرهای ممکن زیادی می‌توانند 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 بهره‌برداری 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، حداقل‌ها و حداکثرهای مجاز در آیین‌نامه طرح هندسی راه و همچنین کم کردن هزینه راه، توپوگرافی منطقه مهم‌ترین نقش را ایفا می‌کند، ولی در مناطق دشتی و تپه ماهوری که عموماً از شیب‌های ملایمی تشکیل شده اند عامل طرح مسیر و پارامتر عمده هزینه، توپوگرافی نیست.

در این مناطق طول مسیر و شرایط بستر آن که در هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری تاثیر می‌گذارند عامل اصلی تعیین کننده در تابع هزینه راه هستند. بنابراین در این مناطق کمینه کردن تابع هزینه یعنی یافتن کوتاه‌ترین 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 ناهمواری‌های موضعی نظیر کوه و دره نیز هست که به دلیل هزینه زیاد عبور از این عوارض در طرح مسیر، سعی می‌شود که مسیر از آنها عبور نکند.

بنابراین مدل ریاضی بهینه‌سازی 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 دره‌ها، دریاچه‌ها، کوهها،

دلخواه است)، سپس مدل خطی حاصل با الگوریتم مربوطه مثل الگوریتم سیمپلکس<sup>۱۹</sup> (یا نرم‌افزارهای مربوطه مثل Lingo و gams ...) حل می‌شود، جواب حاصل، نقطه بعدی روش جستجوی MAP را تعیین می‌کند. این فرایند تا جایی ادامه پیدا می‌کند 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 می‌شود، به طوری که مسأله به یک مدل ریاضی بدون محدودیت تبدیل شده و سپس با استفاده از روشهای حل مدل ریاضی بدون محدودیت حل می‌شود.

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

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

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

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

## 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 بهینه‌سازی شبکه حمل و نقل برون شهری مطرح‌اند.

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 می‌شوند.

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<sup>۲۰</sup>، 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. وضعیت ای 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 می‌شود.

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

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 می‌آید. در این مرحله نقاط بعدی فرایند از رابطه زیر به دست می‌آیند.

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

اکنون  $f(x_i|_{i=1}^n, y_i|_{i=1}^n)$  تابعی از  $\alpha^0$  است. در این مرحله برای محاسبه حداکثر طول گام  $\alpha^0$  مشتق  $f$  نسبت به  $\alpha^0$ ، برابر صفر قرار داده می‌شود تا  $\alpha^0$  به دست آید. سپس  $\alpha^0$  به دست آمده در رابطه (17) جایگذاری می‌شود 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 می‌یابد.

### 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 می‌کند. 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، محدودیت‌های زمین شناسی، جنس کوه، امکانات

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

که در آن:

$f$  = مجموع کل هزینه ها،

$p$  = هزینه واحد طول مسیر اصلی،

$q_i$  = هزینه واحد طول قطعه آم راههای فرعی،

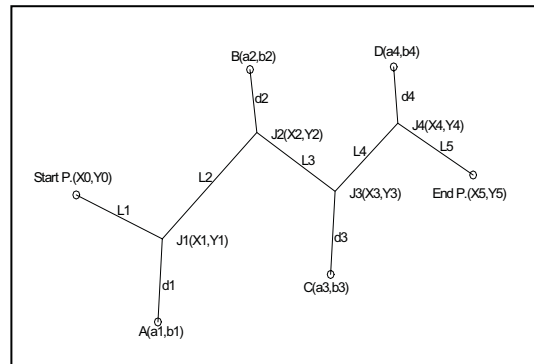
$a_i, b_i$  = مختصات نقاطی که باید به آنها دسترسی داشت،

$x_i, y_i$  = مختصات نقاط راه اصلی و

$n$  = تعداد نقاط دسترسی

را نمایش می دهند.

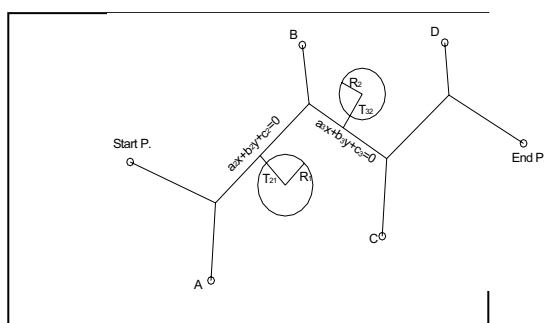
در این حالت فرض شده که هزینه واحد طول مسیر اصلی در طول مسیر ثابت است، ولی هزینه واحد طول راههای فرعی با توجه به درجه آنها و متناسب با حجم مبادلات بار و مسافر آنها متغیر است.



شکل ۲. مختصات نقاط مسیر در یک دستگاه مختصات محلی

### ۲-۲-۵ کمیته‌سازی تابع هزینه

در این مرحله، مختصات نقاط تقاطع راههای دسترسی با راه مبنا  $(x_i, y_i)$  مجهولات مسئله هستند. اکنون با استفاده از روشهای کمیته‌سازی توابع، مقادیر  $x_i$  و  $y_i$  به نحوی پیدا می‌شوند که تابع هزینه  $(f)$  کمترین مقدار خود را داشته باشد. همان گونه که در قسمت قبل گفته شد، در این تحقیق از مدل‌های 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:

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

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

$\hat{x}_j, \hat{y}_j$  = مختصات منطقه ممنوعه  $J$  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،

$n + 1$  = تعداد قطعات مسیر اصلی،

$M$  = تعداد مناطق ممنوعه.

### ۲-۳-۵ حل یک مثال

برای مثال اگر قرار باشد دو شهر Start و End در یک منطقه دشتی و تپه ماهوری که عوارض توپوگرافی خاصی ندارد به یکدیگر متصل شوند، ابتدا مختصات این دو شهر در یک سیستم مختصات واحد مشخص می شود. سپس با توجه به صلاحیتهای بهره برداری، درجه راه مواصلاتی (راه مبنا) و در نتیجه هزینه ساخت و بهره برداری هر کیلومتر آن در دوره طرح مشخص می شود. حال باید موقعیت نقاط بین راهی که باید به این مسیر مبنا دسترسی داشته باشند و همچنین هزینه ساخت و بهره برداری هر

اجرائی و دیگر محدودیت های 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 کامل تر و قضاوت مهندسی طراح براساس تجربه بهتری باشد، خروجی مدل به مسیر بهینه واقعی نزدیک تر می شود.

### ۳-۵ مدل ریاضی مسیریابی با محدودیت

همان گونه که اشاره شد، در پروژه های راهسازی مناطقی وجود دارند که راه نباید از آنها عبور کند، باید با مدل سازی آنها و تعریف این محدوده ها به عنوان شرایط و محدودیت های 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 دایره ها و شعاع آنها که متناسب با شکل مناطق ممنوعه انتخاب می شوند، 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 می شود.

در این روش موقعیت تمام قطعات مسیر نسبت به مناطق ممنوعه که به صورت مناطق دایره ای تعریف شده اند کنترل می شوند. اگر قطعه ای از مسیر از میان این محدوده عبور کند، هزینه آن قطعه یا به عبارت دیگر ضریب آن قطعه در تابع هدف، بی نهایت می شود. بنابراین با این رویکرد برنامه کمینه سازی تابع هدف تمام قطعات مسیر را از این مناطق دور می کند.

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

ممنوعه

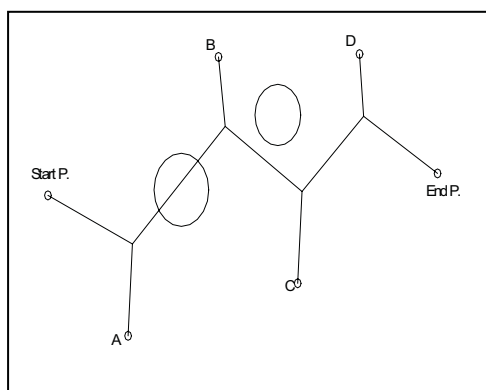
در این روش هیچ گونه تغییری در تابع هزینه داده نمی شود و فقط با اضافه کردن برخی محدودیت ها و شرط ها به برنامه بهینه سازی تمام نقاط مسیر تحت کنترل قرار می گیرند.

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، می توان 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.

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

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

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

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

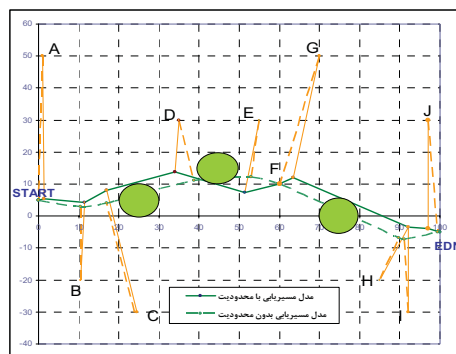
$$R_j = \text{شعاع منطقه ممنوعه } j \text{ ام}$$

$k$  = 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

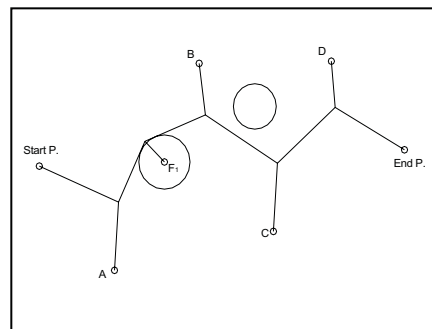
فاصله مسیر از مرکز منطقه ممنوعه (با سه منطقه ممنوعه) [۱۷]

### 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:

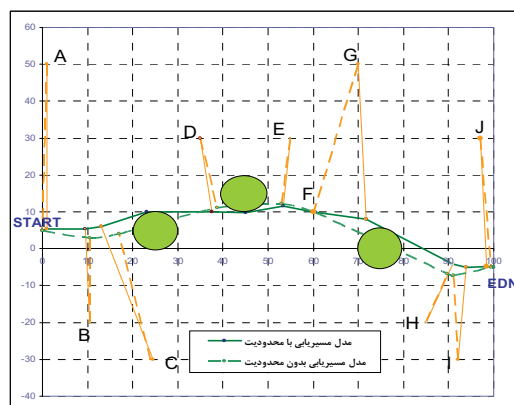
معدن چغارت، معدن سه‌چاهون، بهاباد، معدن چادرمولو، معدن پرواده، طبس، فردوس، بجستان، گناباد و کاشمر.

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 مسیرهایی که به دلیل نامناسب بودن محل گذر آنها، هزینه های مختلفی مانند هزینه های ساخت، بهره‌برداری و ... به پروژه تحمیل می شوند و اصلاح آنها نیاز به زمان و انرژی بسیار دارد. بنابراین استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری در مسیریابی الزامی به نظر می‌رسد.

بسیاری از پارامترهای تأثیرگذار در تابع هزینه ساخت و بهره برداری مسیر راه و راه‌آهن با وجود تفاوت مقادیر آنها، مستقیماً به طول مسیر وابسته‌اند، یعنی هرچه مسیر طولانی‌تر باشد، این هزینه‌ها بیشترند. از آنجا که هدف اصلی این مقاله ارایه مدل ریاضی بهینه‌یابی 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 راه‌آهن، توجه به تغییرات دقیق توپوگرافی، کاری دشوار و غیرضروری است و از طرف دیگر در این مرحله، شناخت عوارض کلی همانند کوه ها، دریاچه‌ها، مرداب‌ها، دره‌ها و مواردی از این قبیل برای طرح کریدور کفایت می‌کند. البته مدل‌های ارایه شده، برای مناطق کوهستانی و یا تپه ماهوری با تغییرات ارتفاع زیاد مناسب نیستند، زیرا در این گونه مناطق، توپوگرافی منطقه یکی از مهم‌ترین عوامل طرح مسیر است. تمام پارامترهای هزینه وابسته به طول مسیر را می‌توان در این مدل وارد کرد، به علاوه موقعیت عوارض مختلف طبیعی (دره‌ها، کوه‌ها، دریاچه‌ها ... )، مناطقی که از نظر زمین‌شناسی برای عبور مسیر مناسب نیستند (مرداب‌ها، زمین‌های سست ... )، مناطقی که از نظر زیست‌محیطی نباید مسیر از آنها گذر کند (جنگل‌ها، مراتع، ... )، و کلیه مناطق بین راهی که به هر دلیل عبور مسیر مناسب نیستند نیز در این روش قابل مدل سازی هستند. البته شناخت محل دقیق این محدوده‌ها و مشخصات آنها نیاز به سیستم‌های اطلاعاتی و جغرافیایی مانند GIS دارد.

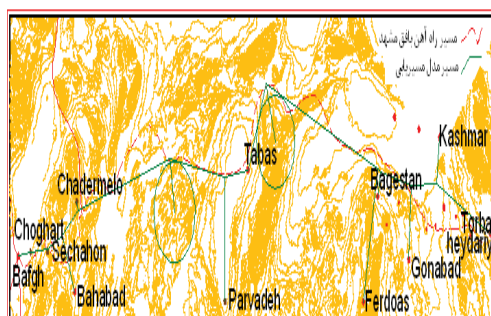
یافته‌های این تحقیق را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- چون مسیرهای پیشنهادی اولیه به صورت دستی رسم می‌شوند، دور از انتظار نیست که در یک پروژه حدود ۹۰۰ کیلومتری مثل راه‌آهن 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 شده‌اند. دوایر رسم شده در شکل موقعیت مناطق ممنوعه تعریف شده برای مدل را نشان می‌دهند.

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

برای ارزیابی اقتصادی این دو مسیر، طول مسیر اصلی (ریلی) بین ایستگاه‌های اصلی که به عنوان نقاط بین‌راهی برای برنامه بهینه‌سازی 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 راه‌آهن و یا آزادراه‌ها، کوتاه کردن این مسیرها حتی به اندازه یک کیلومتر، صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در کل پروژه ایجاد می‌کند. 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، کوروش (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 مسیرهای 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 های 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.

#### پانویس‌ها:

- 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, 80<sup>th</sup>. 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, Frederick, 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.

# **Preliminary Route Corridor Location Considering the Compulsory Points and the Protected Areas**

*M. Saffarzadeh, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*

*A.M.Boroujerdian and A. Rad, MSc., Civ. Eng., Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*

*E-mail:saffar\_m@modares.ac.ir*

## **ABSTRACT**

Routes should be designed with a comprehensive and long term approach so that they create cost effective road networks. The accurate location and details of the roads can't be specified all at once in one stage. Thus alignment is specified in various stages, using different-scale aerial maps and photographs. The first step in the design of road corridors is determination of general route model considering the sequence to the access points. The purpose of this research is to present an economically optimum model for this matter.

In this paper after describing a short history of the past studies in the field of road routing, the current methods are evaluated and consequently two mathematical models are presented for route location in plain areas. In the first method the harsh and difficult areas are not modeled. A major point of road corridor design is that the road should be so designed that it could not pass through forbidden protected military or environmental fields. The major capability of the second method is predicting these areas in the optimum road corridor. In rolling and level areas, the costs are mostly dependant on the length of the road. All the costs (including construction and operation), are converted to the unit cost of the road length. Due to different conditions in various roads, the total cost factor will change in different areas. In addition to the construction costs, the operation cost in the design period for each of access points is an important factor in the cost function of the road. Therefore, the importance of the points to which we should have access to, is the major factor for the shortness of the path. The operation cost per kilometer of access road for each point is determined by factors like passenger and goods traffic volume. The total cost function in the analysis of this research is equal to construction and utilization costs. Therefore, in an intercity road or railroad network, the minimum construction cost is a form of the network in which in addition to the appropriate connection of the urban areas, natural resources and industrial centers, the length of the roads are optimal.

In this research the mathematical non-linear programming has been used for modeling. These methods convert the problem to a mathematical model and then solve them. Converting a problem to a mathematical model increases the ability to investigate it, and therefore, provides better opportunities to get benefit of a variety of mathematical programs.

An important application of the presented mathematical models is therefore their utilization in provision of master highway and railroad corridor plans in plain areas. Such corridors may also be used in route location projects in larger scale maps, in plain areas. The presented

model in this paper yields the final route corridor in a way that economic, social and political requirements of the project are fulfilled. All the cost parameters of the route length can enter the model. The natural and geographical phenomena like valleys, mountains, lakes, lagoons, soft soils, environmentally protected areas, are able to be included in this model.

**Keywords:** Route location, forbidden areas, optimization, cost function