

# کاهش عدم قطعیت زمان و هزینه‌ی پروژه‌های تونل‌سازی با به‌کارگیری روش DAT مطالعه‌ی موردی: تونل راه همرو

ارسلان محمودزاده (دانشجوی کارشناسی ارشد)

شکراه زارع\* (دانشیار)

رحمان دارای (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۳۹۶ (۱۳۸۳-۸۴)  
دوره‌ی ۲ - ۳۳، شماره‌ی ۱/۳، ص. ۹۳-۸۳

کاهش عدم قطعیت‌های قبل از شروع به ساخت تونل‌ها، به‌خصوص عدم قطعیت در مورد زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت تونل، می‌تواند در مراحل اولیه‌ی برنامه‌ریزی‌ها مفید واقع شود و ریسک تصمیم‌گیری‌ها را تا حد قابل قبولی کاهش دهد. DAT ابزاری آماری است که به پیش‌بینی احتمالاتی زمان و هزینه‌ی موردنیاز اجرای تونل قبل از شروع به ساخت می‌پردازد. در نوشتار حاضر، به کمک روش DAT با به‌کارگیری داده‌های قبل از شروع به ساخت تونل همرو، زمان و هزینه‌ی ساخت کل تونل مذکور به‌صورت احتمالاتی پیش‌بینی شده است. سپس زمان و هزینه‌ی به‌دست‌آمده به کمک روش DAT، با زمان و هزینه‌ی واقعی اجرای تونل همرو به‌منظور اعتبارسنجی روش ذکرشده و کاهش عدم قطعیت در مورد به‌کارگیری آن در پروژه‌های آتی مقایسه و درنهایت مشخص شده است که نتایج به‌دست‌آمده از روش DAT، شباهت زیادی با نتایج واقعی دارد و این مسئله، اعتبار روش DAT را جهت کاهش عدم قطعیت‌های زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت در پروژه‌های آتی اثبات می‌کند.

واژگان کلیدی: DAT، عدم قطعیت زمان و هزینه، مدل زمین‌شناسی، مدل ساخت، تونل همرو.

arissss.de@gmail.com  
zare@shahroodut.ac.ir  
daraii2004@yahoo.com

## ۱. مقدمه

تا اینکه یک مدل با عنوان مدل منابع به مدل‌های آن اضافه شد.<sup>[۱]</sup> سپس روشی برای ارزیابی فناوری تونل‌زنی تمام‌مقطع به روش DAT ارائه شده است.<sup>[۲]</sup> بعد از آن مدل DAT به‌گونه‌ی توسعه یافته است که بتواند در هنگام ساخت و در صورت دست‌یابی به داده‌های جدید و واقعی‌تر نسبت به داده‌های اولیه، مدل را به‌روزرسانی کند و عدم قطعیت‌ها را در مورد زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت تونل نسبت به مدل قبلی کاهش دهد.<sup>[۳]</sup>

به منظور برآورد زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت تونل، روش DAT در پروژه‌ی تونل‌های: سوچوون، وونهیو، وکنمور شمالی استفاده شده است.<sup>[۴-۵]</sup>

جهت بررسی تأثیر به‌روزرسانی مدل DAT به کمک داده‌های زمین‌شناسی جدید و واقعی در زمان ساخت تونل (حفاری قسمتی از تونل)، ابتدا زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت یک تونل را با به‌کارگیری داده‌های زمین‌شناسی اولیه به کمک روش DAT ارزیابی کرده و سپس با به‌روزرسانی داده‌های زمین‌شناسی در زمان ساخت تونل و به‌کارگیری آن‌ها در مدل مذکور، زمان و هزینه‌ی نهایی جدیدی برای ساخت تونل به‌دست آمده و در نهایت با هم مقایسه شده‌اند.<sup>[۶]</sup>

به‌منظور مدل‌سازی عدم قطعیت در پروژه‌ی خط زیرزمینی در شهر نیویورک و برآورد زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت تونل‌های پروژه‌ی خط راه‌آهن پرتقال، روش

از جمله مباحث مهم جهت طراحی و برنامه‌ریزی پروژه‌ها، کمینه‌سازی عدم قطعیت‌هاست. معمولاً عدم قطعیت‌ها در پروژه‌های زیرسطحی ناشی از شرایط ناشناخته‌ی زمین است، که باعث می‌شود در طراحی‌ها نتوان کل مسائلی را که ممکن است در زمان ساخت اتفاق بیفتد، در نظر گرفت. از مهم‌ترین عدم قطعیت‌ها می‌توان به عدم قطعیت در مورد زمان و هزینه‌ی نهایی پروژه اشاره کرد، زیرا آن‌ها در ارتباط با شناخت کامل شرایط زیرسطحی هستند. بنابراین در پروژه‌های زیرسطحی نمی‌توان زمان و هزینه‌ها را به‌صورت قطعی بیان کرد، بلکه باید از روش‌های احتمالاتی استفاده کرد.<sup>[۱]</sup>

به منظور برآورد عدم قطعیت‌ها به صورت احتمالاتی، ابزارهای (مدل‌های احتمالاتی) مختلفی ارائه شده است، که از آن جمله می‌توان به ابزار DAT<sup>۱</sup> اشاره کرد. DAT برای اولین بار توسط انیشتین (۱۹۸۰) ارائه شده است و بعد از آن توسط گروه پروفیسور انیشتین توسعه پیدا کرده و تا به امروز کارهای زیادی روی مدل DAT در پروژه‌های مختلف انجام شده است.

ابزار DAT در ابتدا فقط شامل دو مدل ساخت و مدل زمین‌شناسی بوده است،

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۷/۲۱، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۰/۸، پذیرش ۱۳۹۴/۱۰/۲۶.

DAT استفاده شده است. [۹۸]

از جمله جدیدترین کارهایی که در آن از روش DAT استفاده شده است، برآورد زمان و هزینه‌ی نهایی در حفاری چاه برای سیستم زمین گرمایی مهندسی EGS<sup>۲</sup> است. [۱۰]

ابزار کمک به تصمیم‌گیری DAT به پیش‌بینی زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت تونل با استفاده از دو مدل زمین‌شناسی و مدل ساخت می‌پردازد. این ابزار در مدل زمین‌شناسی، مجموعه‌های مختلفی از شرایط زمین‌شناسی را در نظر گرفته و هر مجموعه شرایط را یک کلاس زمین می‌نامد، که شامل روش حفاری و سیستم نگه‌داری مخصوصی است. در مدل زمین‌شناسی، احتمال وقوع هر کدام از این کلاس‌های زمین با استفاده از روش مارکوف در هر موقعیتی در طول تونل به دست می‌آید. در مدل ساخت با اختصاص دادن زمان و هزینه به هر کدام از کلاس‌ها به کمک نظر افراد متخصص و تجربه‌ی پروژه‌های انجام‌شده‌ی قبلی در شرایط مشابه، زمان و هزینه‌ی مربوط به هر کلاس در هر موقعیتی در طول تونل با توجه به مدل زمین‌شناسی می‌تواند به دست آید. سپس می‌توان زمان و هزینه‌ی کل تونل را از مجموع زمان و هزینه‌ها در کلیه‌ی موقعیت‌ها در طول تونل به صورت احتمالاتی برآورد کرد. [۱۱]

مطالعه‌ی حاضر بر روی تونل همرو با طول ۱۳۱۰ متر و سطح مقطع ۹۷ مترمربع به‌عنوان بخشی از جاده‌ی جدید در دست احداث سندج - مریوان صورت گرفته است. جهت برآورد زمان و هزینه، از داده‌های به‌دست‌آمده قبل از شروع به ساخت تونل استفاده شده و به‌منظور دست‌یابی به ماتریس‌های احتمال انتقال برای پارامترهای در نظر گرفته‌شده که در مدل مارکوف از آن‌ها استفاده می‌شود، کلاس‌های زمین متناسب با شرایط زمین‌شناسی اولیه و همچنین زمان و هزینه‌ی مربوط به اجرای هر متر از کلاس زمین موردنظر، پرسش‌نامه‌هایی تهیه و به کمک افراد باتجربه تکمیل شده‌اند. درنهایت از مجموع جواب‌های مربوط به پرسش‌نامه‌های مذکور، یک جواب نهایی به دست آمده و در روابط آماری استفاده شده است. روش کار به شیوه‌ی بوده است که در ابتدا، فاصله‌ی بین هر دو گمانه به بخش‌های مساوی (هر بخش به طول ۱۰ متر) تقسیم شده و در هر بخش، احتمال وقوع تمام کلاس‌های زمین در نظر گرفته‌شده با استفاده از روش مارکوف به دست آمده است. از آنجایی‌که هر کلاس زمین یک زمان و هزینه‌ی متفاوتی دارد، بنابراین احتمال وقوع زمان و هزینه‌های مختلف در داخل هر بخش نیز موجود است. سپس جهت دست‌یابی به زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت تونل، با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو در نرم‌افزار پرت مستر<sup>۳</sup>، زمان و هزینه‌ی تمام بخش‌ها با هم جمع شده و درنهایت، زمان و هزینه‌های متفاوتی با سطح اطمینان‌های مشخصی به دست آمده است.

از آنجایی‌که در زمان انجام مطالعه‌ی حاضر، پروژه‌ی تونل همرو به اتمام رسیده بوده و به دلیل در اختیار داشتن داده‌های بعد از ساخت با دقتی بالا، نتایج حاصل از روش DAT به کمک داده‌های بعد از ساخت تونل اعتبارسنجی شده است، تا بتوان در پروژه‌های آتی با عدم قطعیت کمتری این روش را جهت ارزیابی زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت تونل به‌کار برد و ریسک تصمیم‌گیری را تا حد قابل قبولی کاهش داد.

## ۲. مدل زمین‌شناسی

شرایط زمین‌شناسی، یک عامل اصلی در انتخاب روش حفاری و نگه‌داری است. از آنجایی‌که داده‌های مربوط به شرایط زمین‌شناسی مسیر تونل بسیار کم و یا اصلاً موجود نیست، توصیف پیش‌بینی‌ها براساس عدم قطعیت خواهد بود. مدل

پیش‌بینی زمین‌شناسی با استفاده از داده‌های اولیه، نظیر: نقشه‌های زمین‌شناسی، مطالعات ژئوفیزیکی، مطالعات ژئوتکنیکی و... به پیش‌بینی شرایط زمین‌شناسی مورد انتظار در طول مسیر تونل می‌پردازد. معمولاً شرایط مورد انتظار در طول تونل نمی‌تواند به صورت قطعی بیان شود و بنابراین باید از روش‌های آماری جهت بیان احتمالاتی شرایط ذکرشده استفاده کرد. یکی از مهم‌ترین روش‌های آماری، که به پیش‌بینی شرایط زمین‌شناسی می‌پردازد، مدل مارکوف<sup>۴</sup> است، که حالت مربوط به هر کدام از پارامترها را با توجه به حالت قبلی از آن تخمین می‌زند. [۱] در ادامه، مراحل مختلف پیش‌بینی مدل زمین‌شناسی به ترتیب و به صورت مختصر ارائه شده است:

۱- ارزیابی احتمال انتقال از حالت  $i$  به حالت  $j$  ( $p_{ij}$ ) و ضریب شدت انتقال حالت  $i$  ( $C_{x_i}$ ) پارامتر زمین‌شناسی موردنظر به کمک روش‌های آماری (رابطه ۱): [۱۰]

$$p_{ij} = \frac{T_{ij}}{\sum_{k=1}^n T_{ik}} \quad (1)$$

که در آن،  $p_{ij}$  احتمال انتقال از حالت  $i$  به حالت  $j$ ؛  $T_{ij}$  تعداد انتقال‌ها از حالت  $i$  به حالت  $j$ ؛  $\sum_{k=1}^n T_{ik}$  مجموع انتقال‌ها از حالت  $i$  به سایر حالت‌های پارامتر مربوط ( $n$  تعداد کل حالت‌های پارامتر موردنظر) است.  $C_{x_i}$  ضریب شدت انتقال حالت  $i$  است، که عبارت از معکوس وسعت (طول) مورد انتظار حالت  $i$  ( $H_{x_i}$ ) در طول مسیر تونل است.

۲- محاسبه‌ی ماتریس شدت انتقال پارامتر  $X$  ( $A_X$ ) به کمک احتمال انتقال و ضریب شدت انتقال مطابق رابطه ۲.

۳- محاسبه‌ی ماتریس احتمال انتقال فاصله. براساس فرایند مارکوف، احتمال وقوع یک حالت معین از پارامتر زمین‌شناسی  $X$  در موقعیت‌های بعدی می‌تواند محاسبه شود. با توجه به شکل ۱، در اینجا احتمال وقوع حالت  $j$  ( $n, j = 1, 2, \dots, n$ ) تعداد حالت‌های پارامتر  $X$  از پارامتر  $X$  در یک موقعیت معین ( $L$ ) نسبت به موقعیت اولیه ( $O_0$ ) به فاصله‌ی  $u = (L - O_0)$  مدنظر است ( $L > O_0$ ). همواره باید موقعیتی باشد که احتمال وقوع حالت‌های یک پارامتر معین در آن مشخص باشد تا فرایند مارکوف بتواند با استفاده از آن، احتمال‌های مذکور را در نقاط بعدی پیش‌بینی کند. [۱۰]

$$A_x = \begin{bmatrix} -C_{x_1} & C_{x_1}p_{x_1 2} & \dots & C_{x_1}p_{x_1 n} \\ C_{x_2}p_{x_2 1} & -C_{x_2} & \dots & C_{x_2}p_{x_2 n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{x_n}p_{x_n 1} & C_{x_n}p_{x_n 2} & \dots & -C_{x_n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

جهت محاسبه‌ی احتمال وقوع حالت‌های پارامتر  $X$  در یک سلول به فاصله‌ی  $u$  نسبت به سلول اولیه، ماتریسی به‌کاربرده می‌شود که ماتریس احتمال انتقال

سلول	$X(O_0)$	...	$X(L)$
حالت	$i$	...	$j$

شکل ۱. پیش‌بینی احتمال وقوع هر کدام از حالت‌های یک پارامتر ( $X$ ) در فاصله‌ی  $u = (L - O_0)$  نسبت به موقعیت ( $O_0$ )، که احتمال وقوع حالت‌های  $X$  در آن مشخص است (هر موقعیت با یک سلول نمایش داده شده است).

افراد کارشناس تونل‌سازی از طریق پرسش‌نامه استفاده شده است، که مشخصات مربوط به این افراد و نوع پرسش‌نامه‌ها در ادامه ارائه شده است.

برای تکمیل پرسش‌نامه‌ها از نظرات ۱۰ نفر کارشناس تونل‌سازی با در اختیار گذاشتن داده‌های اولیه موجود استفاده شده است. این افراد با تحصیلات کارشناسی ارشد به بالا در زمینه‌های مهندسی عمران، مهندسی مکانیک سنگ، و مهندسی زمین‌شناسی با تجربه‌ی دست‌کم ۵ سال پیمانکاری ساخت تونل‌های جاده‌یی بوده‌اند. پرسش‌نامه‌های تهیه‌شده حالت سؤالی داشته‌اند. برای مثال به منظور دست‌یابی به ماتریس احتمال انتقال هر کدام از پارامترها، از افراد کارشناس سؤال شده است که: «با چه احتمالی انتقال از هر حالت یک پارامتر به حالت دیگر همان پارامتر صورت می‌گیرد؟»

یا برای دست‌یابی به کلاس‌های زمین سؤال شده است:

«با توجه به تعداد شرایط زمین‌شناسی پیش‌بینی‌شده در مطالعه‌ی حاضر، چند کلاس زمین پیشنهاد می‌دهید که مجموعاً جواب‌گوی تمامی شرایط ذکرشده باشند؟ مشخصات کلاس‌های زمین را بیان کنید.»

همچنین برای دست‌یابی به زمان و هزینه‌ی هر سیکل از اجرای تونل سؤال شده است:

«به هر کدام از کلاس‌های زمین چه زمان و هزینه‌ی را برای هر سیکل از ساخت با توجه به داده‌های موجود در مورد تونل و تجربه‌ی پروژه‌های اجراشده‌ی قبلی در شرایط مشابه پیشنهاد می‌دهید؟»

بنابراین در هر مرحله، میانگین نظرات افراد کارشناس تونل‌سازی، که از طریق پرسش‌نامه به دست آمده است، به عنوان داده‌های ورودی استفاده شده است.

#### ۱.۴. مدل زمین‌شناسی برای تونل همرو

از جمله مهم‌ترین پارامترهایی که در تونل‌زنی اثر می‌گذارند، عبارت‌اند از: نوع سنگ، RQD، جهت درزه‌داری، ناپیوستگی‌های اصلی، جریان آب، سختی، مقاومت فشاری و شیب‌توزیته<sup>[۱۰]</sup>. در مطالعه‌ی حاضر با توجه به اطلاعات اولیه، ۳ پارامتر نوع سنگ، RQD و آب زیرزمینی در نظر گرفته شده و حالت‌های مربوط به هر کدام از پارامترها در ادامه ارائه شده است:

۱. پارامتر نوع سنگ با ۴ حالت (حالت ۱: آهک (Li)، حالت ۲: شیل (Sh)، حالت ۳: تناوب شیل‌های ماسه‌یی و آهک‌های شیالی (SHL)، حالت ۴: تناوب آهک و شیل (LSH))؛
۲. پارامتر RQD با ۳ حالت (حالت ۱: کمتر از ۵، حالت ۲: ۵ - ۲۵، حالت ۳: ۲۵ - ۵۰)؛
۳. پارامتر آب زیرزمینی با ۳ حالت (حالت ۱: کم، حالت ۲: متوسط، حالت ۳: زیاد).

مطابق جدول ۱، برای هر حالت از ۳ پارامتر در نظر گرفته‌شده، طول میانگین به کمک نظرات افراد کارشناس تونل‌سازی با توجه به پروفیل طولی تونل، که قبل از شروع به ساخت تهیه شده بود، برآورد و در نهایت از میانگین نظرات آن‌ها استفاده شده است. سپس با معکوس‌کردن طول میانگین حالات، ضریب شدت انتقال هر کدام از حالات پارامترها نیز مطابق جدول ۱ به دست آمده است.

همچنین به کمک پرسش‌نامه‌هایی که توسط کارشناسان تکمیل شده‌اند، ماتریس‌های احتمال انتقال برای هر کدام از پارامترها همان‌طور که در ادامه مطابق جدول ۱ به دست آمده است. پرسش‌نامه‌های تهیه‌شده به صورت سؤالی بوده‌اند، برای مثال با چه احتمالی پارامتر نوع سنگ از حالت آهک به حالت شیل انتقال می‌یابد. حال با

فاصله  $(V_x(u))$  نام دارد و به صورت رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود:<sup>[۱۱]</sup>

$$V_x(u) = \{v_{x_{ij}}(u)\} \quad (3)$$

که در آن،  $v_{x_{ij}}(u)$  احتمال وقوع حالت  $j$  از پارامتر  $X$  به فاصله‌ی  $u$  از سلول  $O$  است، که حالت  $i$  دارد. همچنین رابطه‌ی ۳ را می‌توان به شکل رابطه‌ی ۴ نیز بیان کرد:<sup>[۱۱]</sup>

$$V_x(u) = \exp(uAX) = I + uAX + \frac{1}{2!}u^2A^2X + \dots + \frac{1}{m!}u^m A^m X \quad (4)$$

که در آن،  $I$  ماتریس واحد از مرتبه‌ی  $n$  (تعداد حالت‌های پارامتر  $X$ ) و  $m$  عدد خیلی بزرگی است که می‌تواند تا بی‌نهایت ادامه پیدا کند.

-- محاسبه‌ی احتمال وقوع حالت‌های پارامتر در شرایطی که در موقعیت  $O$ ، حالت پارامتر به‌طور قطعی مشخص نباشد و یک تابع جرم احتمال در مورد آن داده شده باشد. برای حالت مذکور اجازه دهید  $S_{x_j}(u)$  احتمال وقوع حالت  $j$  از پارامتر  $X$  در موقعیت  $O + u$  باشد، آنگاه رابطه‌ی ۵ را خواهیم داشت:<sup>[۱۲]</sup>

$$S_{x_j}(u) = \sum_{i=1}^n S_{x_i}(0)v_{x_{ij}}(u) \quad (5)$$

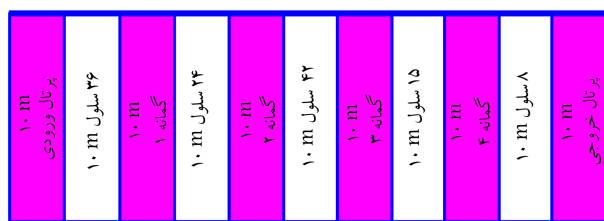
بعد از اینکه احتمال وقوع حالت‌های تمام پارامترهای موردنظر در مسیر تونل به دست آمد، می‌توان به کمک آن‌ها پروفیل مربوط به هر پارامتر و در نهایت از ترکیب پروفیل‌های به دست آمده، پروفیل کلاس زمین را به دست آورد. هدف مدل زمین‌شناسی، تشکیل پروفیل کلاس زمین است، تا از آن بتوان در مدل ساخت جهت برآورد زمان و هزینه‌های هر کلاس در هر موقعیتی در طول تونل استفاده کرد.

### ۳. مدل ساخت

در پروژه‌های تونل‌سازی، اغلب به دلیل عدم قطعیت در مورد میزان زمان و هزینه‌ی موردنیاز روش حفاری و سیستم نگه‌داری در نظر گرفته‌شده، پیش‌بینی زمان و هزینه‌ی نهایی بسیار مشکل خواهد بود و موجب می‌شود که در برنامه‌ریزی‌های اولیه نتوان به نتایج دقیقی در مورد آن دست یافت. مدل ساخت با در نظر گرفتن فرایند ساخت در طول تونل برای هر کلاس زمین، زمان، و هزینه‌ی مورد انتظار را برآورد می‌کند. هر کلاس زمین، یک روش حفاری و سیستم نگه‌داری معینی دارد که در طول هر چرخه از ساخت، طی یک سری فعالیت‌ها انجام می‌شود، که شبکه‌ی فعالیت نام دارد. در مدل ساخت می‌توان با توجه به شبکه‌ی فعالیت مربوط به هر کلاس زمین، زمان و هزینه‌ی هر چرخه از ساخت کلاس موردنظر را با تجربه از پروژه‌های اجرا شده‌ی قبلی در شرایط مشابه و نظر افراد متخصص برآورد کرد و از آن برای پیش‌بینی زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت تونل استفاده کرد.<sup>[۱۱،۹]</sup>

### ۴. به‌کارگیری روش DAT در تونل همرو

در به‌کارگیری روش DAT برای تونل جاده‌ی همرو، در مراحل مختلفی از مدل زمین‌شناسی و مدل ساخت به منظور دست‌یابی دقیق‌تر به داده‌های ورودی، نظرات



شکل ۲. تعداد و موقعیت سلول‌های مشاهده‌ی در مسیر تونل همرو.

• پارامتر آب زیرزمینی

$$P_w = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0,72 & 0,28 \\ 0,50 & 0 & 0,50 \\ 0,28 & 0,72 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$A_w = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -0,0016 & 0,00115 & 0,00045 \\ 0,0019 & -0,0038 & 0,0019 \\ 0,0006 & 0,0017 & -0,0023 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

به‌منظور پیش‌بینی احتمال وقوع هر کدام از حالات پارامترها (پروفیل پارامتر) در مسیر تونل همرو به کمک مدل مارکوف، فاصله‌ی میان هر دو سلول مشاهده‌ی به تعداد سلول‌هایی با طول هر کدام برابر ۱۰ متر مطابق شکل ۲ تقسیم شده است، که مطابق آن سلول‌های مشاهده‌ی مربوط به گمانه‌ها و پرتال ورودی و خروجی تونل به‌صورت رنگی نشان داده شده‌اند و برای هر کدام از این حالت‌های مشاهده‌ی، یک سلول با طول ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. بنابراین در کل مسیر تونل، ۶ سلول مشاهده‌ی موجود بودند که همه‌ی آن‌ها به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند. دلیل در نظر گرفتن سلول‌های مشاهده‌ی ابتدا و انتهای تونل (سلول‌های  $O_1$  و  $O_2$ ) به‌صورت غیرقطعی این بوده است که از هر دو طرف، فاصله‌ی حدود ۱۰۰ متر، مربوط به پرتال ورودی و خروجی تونل بوده و از آن به بعد طول حفاری تونل برابر ۱۳۱۰ متر شده است؛ بنابراین به‌صورت قطعی برای دو سلول مذکور، حالت‌های پارامترها با توجه به داده‌های قبل از شروع به حفاری پرتال‌های ورودی و خروجی تونل مشخص نشده است، ولی چون به قسمت ابتدا و انتهای تونل نزدیک بوده و همچنین به دلیل میزان روبراه‌ی کم، احتمال وقوع حالت‌های هر کدام از پارامترها به‌صورت غیرقطعی توسط افراد متخصص برآورد شده است و در نتیجه دو سلول مذکور به‌عنوان دو سلول مشاهده‌ی غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند. برای ۴ سلول مشاهده‌ی  $O_1, O_2, O_3, O_4$  نیز که مربوط به موقعیت گمانه‌ها بوده‌اند، حالت غیرقطعی در نظر گرفته شده است، زیرا در موقعیت گمانه‌ها با داده‌های به‌دست‌آمده نمی‌توان به‌صورت کاملاً قطعی در مورد نوع حالت پارامتر مورد نظر اظهار نظر کرد، از این رو سلول‌های نامبرده نیز به‌صورت سلول‌های مشاهده‌ی غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند و احتمال وقوع حالت‌های مختلف پارامترها برای آن‌ها توسط افراد متخصص با بهره‌گیری از پروفیل زمین‌شناسی و داده‌های حاصل از گمانه‌ها ارزیابی شده‌اند. در نهایت از میانگین‌گیری نظرات چند فرد کارشناس و نظرات متفاوتی از یک کارشناس، احتمال وقوع هر حالت در داخل سلول‌های مشاهده‌ی به‌صورت جدول ۲ به دست آمده است.

جدول ۱. طول میانگین و ضریب شدت انتقال مربوط به هر حالت از هر پارامتر.

پارامتر	حالت پارامتر	طول میانگین (m)	ضریب شدت انتقال ( $m^{-1}$ )
نوع سنگ	Li	۳۲۰	۰,۰۰۳۱
	SH	۱۲۰	۰,۰۰۸۳
	SHL	۷۸۰	۰,۰۰۱۲
	LSH	۹۰	۰,۰۱۱۱
RQD	کمتر از ۵	۲۸۰	۰,۰۰۳۵
	۵ تا ۲۵	۶۵۰	۰,۰۰۱۵
آب زیرزمینی	۲۵ تا ۵۰	۳۸۰	۰,۰۰۲۶
	کم	۶۲۰	۰,۰۰۱۶
متوسط	زیاد	۲۶۰	۰,۰۰۳۸
	زیاد	۴۳۰	۰,۰۰۲۳

توجه به فرمول ماتریس شدت انتقال، که قبلاً بیان شده است (رابطه‌ی ۲)، به کمک ضریب شدت انتقال و ماتریس احتمال انتقال، ماتریس شدت انتقال نیز برای هر پارامتر به دست آمده است.

• پارامتر نوع سنگ

$$P_r = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0,24 & 0,74 & 0,02 \\ 0,48 & 0 & 0,48 & 0,04 \\ 0,28 & 0,28 & 0 & 0,44 \\ 0,01 & 0,01 & 0,98 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$A_r = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -0,0031 & 0,0007 & 0,0022 & 0,0002 \\ 0,0039 & -0,0083 & 0,0039 & 0,0005 \\ 0,0003 & 0,0003 & -0,0012 & 0,0006 \\ 0,00015 & 0,00015 & 0,0108 & -0,0111 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

• پارامتر RQD

$$P_d = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0,10 & 0,90 \\ 0,05 & 0 & 0,95 \\ 0,33 & 0,67 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$A_d = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -0,0035 & 0,0003 & 0,0032 \\ 0,0001 & -0,0015 & 0,0014 \\ 0,0008 & 0,0018 & -0,0026 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

جدول ۲. احتمال وقوع هر حالت از هر پارامتر در موقعیت سلول‌های مشاهده‌ی.

سلول‌های مشاهده‌ی						پارامتر
پرتال خروجی	گمانه‌ی ۴	گمانه‌ی ۳	گمانه‌ی ۲	گمانه‌ی ۱	پرتال ورودی	
۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۸۰	۰٫۹۰	حالت ۱
۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۵۴	۰٫۰۹	۰٫۱۰	۰٫۰۵	حالت ۲
۰٫۱۰	۰٫۹۵	۰٫۴۰	۰٫۸۵	۰٫۰۶	۰٫۰۴	حالت ۳
۰٫۸۵	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۴	۰٫۰۱	حالت ۴
۰٫۰۱	۰٫۰۵	۰٫۱۵	۰٫۹۵	۰٫۰۹	۰٫۰۳	حالت ۱
۰٫۹۰	۰٫۱۵	۰٫۸۰	۰٫۰۴	۰٫۹۰	۰٫۹۵	حالت ۲
۰٫۰۹	۰٫۸۰	۰٫۰۵	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	حالت ۳
۰٫۰۳	۰٫۸۰	۰٫۸۵	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۲	حالت ۱
۰٫۰۷	۰٫۱۵	۰٫۱۰	۰٫۹۵	۰٫۰۸	۰٫۰۸	حالت ۲
۰٫۹۰	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۱	۰٫۹۰	۰٫۹۰	حالت ۳

نوع سنگ

RQD

آب زیرزمینی

$$O_t \text{ و } O_{t-1}$$

$n$ : تعداد حالت‌های پارامتر مورد نظر؛

$(L_0 - O_{t-1})$ : احتمال وقوع حالت  $z$  از پارامتر  $X$  در سلول  $L_0$  به شرط مشاهده‌ی غیرقطعی است؛

$P[X(O_{t-1}) = m]$ : احتمال اینکه حالت پارامتر  $X$  در سلول مشاهده‌ی  $O_{t-1}$  باشد  $m$  باشد (برای هر پارامتر از ۱ تا  $n$  متغیر است)؛

$P[X(O_t) = w]$ : احتمال اینکه حالت پارامتر  $X$  در سلول مشاهده‌ی  $O_t$  باشد  $w$  باشد (برای هر پارامتر از ۱ تا  $n$  متغیر است)؛

$(O_t - L_0)$ : احتمال وقوع حالت  $w$  از پارامتر  $X$  در سلول مشاهده‌ی  $O_t$  به شرط اینکه حالت در سلول  $L_0$  باشد؛

$(L_0 - O_{t-1})$ : احتمال وقوع حالت  $z$  از پارامتر  $X$  در سلول  $L_0$  به شرط اینکه حالت در سلول مشاهده‌ی  $O_{t-1}$  باشد؛

$(O_t - O_{t-1})$ : احتمال وقوع حالت  $w$  از پارامتر  $X$  در سلول مشاهده‌ی  $O_{t-1}$  به شرط اینکه حالت در سلول مشاهده‌ی  $O_t$  باشد.

رابطه‌ی ۶ مربوط به سلول‌های مجهول میان دو سلول مشاهده‌ی  $O_1$  و  $O_2$  است، که احتمال وقوع هر کدام از حالت‌های ۳ پارامتر آب زیرزمینی، RQD و نوع سنگ را در سلول مجهول  $L_0$  پیش‌بینی می‌کند. بعد از پیدا کردن احتمال وقوع حالت‌ها در سلول مجهول  $L_0$ ، نوبت به سلول مجهول  $L_1$  می‌رسد، به‌گونه‌ی که در رابطه‌ی ۶، جایگزین  $L_0$  و  $L_1$  جایگزین  $z$  خواهد شد و به همین ترتیب نوبت برای سایر سلول‌های مجهول تا سلول مجهول آخر در فاصله‌ی میان دو مشاهده خواهد رسید.

به‌منظور پیدا کردن احتمال وقوع هر کدام از حالت‌های پارامترهای در نظر گرفته‌شده، رابطه‌ی ۶ در نرم‌افزار متلب<sup>۵</sup> کدنویسی شده است. نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار متلب برای احتمال وقوع حالت‌های هر پارامتر در داخل هر سلول در طول تونل، مطابق شکل‌های ۴ الی ۶ به‌دست آمده است.

با توجه به پارامترها و حالت‌های در نظر گرفته‌شده برای آن‌ها، در کل ۳۶ ( $3 \times 3 \times 4 = 36$ ) شرایط (بردار) مختلف زمین‌شناسی می‌تواند در طول مسیر تونل اتفاق بیفتد. بدیهی است که نمی‌توان برای هر کدام از این شرایط یک روش حفاری و سیستم نگه‌داری در نظر گرفت، بلکه چند روش حفاری و سیستم نگه‌داری

سلول	$X(O_1)$	$X(L_1)$	$X(L_1)$	...	$X(L_{1s})$	$X(O_1)$
حالت	$m$	$z_1$	$z_1$	...	$z_{1s}$	$w$
سلول	$X(O_2)$	$X(L_{2p})$	$X(L_{2p})$	...	$X(L_{2s})$	$X(O_2)$
حالت	$m$	$z_{2p}$	$z_{2s}$	...	$z_{2s}$	$w$
سلول	$X(O_p)$	$X(L_{pp})$	$X(L_{pp})$	...	$X(L_{ps})$	$X(O_p)$
حالت	$m$	$z_{pp}$	$z_{ps}$	...	$z_{ps}$	$w$
سلول	$X(O_s)$	$X(L_{1s})$	$X(L_{1s})$	...	$X(L_{1s})$	$X(O_s)$
حالت	$m$	$z_{1s}$	$z_{1s}$	...	$z_{1s}$	$w$
سلول	$X(O_s)$	$X(L_{1s})$	$X(L_{1s})$	...	$X(L_{1s})$	$X(O_s)$
حالت	$m$	$z_{1s}$	$z_{1s}$	...	$z_{1s}$	$w$

شکل ۳. روش پیش‌بینی احتمال وقوع هر کدام از حالت‌های پارامترها در داخل سلول‌های مجهول میان هر دو سلول مشاهده‌ی با طول ۱۰ متر برای هر سلول (سلول‌های مشاهده‌ی به‌صورت رنگی نمایان شده‌اند).

حال نوبت به تشکیل پروفیل پارامتر می‌رسد که در آن برای هر پارامتر، احتمال وقوع حالت‌های آن در تمام سلول‌ها در مسیر تونل قابل‌دست‌یابی است. جهت به‌دست‌آوردن پروفیل‌های پارامتر، چون احتمال وقوع حالت‌ها در موقعیت سلول‌های مشاهده‌ی به‌صورت غیرقطعی بیان شده است، از رابطه‌ی ۶ استفاده شده است.<sup>[۱]</sup>

$$V_{X_{mz}}^{ns} (L_0 - O_{t-1}) = \begin{cases} \sum_{m=1}^n P[X(O_{t-1}) = m] & O_{t-1} \leq L_0 < O_t, \\ \sum_{w=1}^n P[X(O_t) = w] \frac{V_{X_{zw}}(O_t - L_0) V_{X_{mz}}(L_0 - O_{t-1})}{V_{X_{mw}}(O_t - O_{t-1})} & t = 2, 3, \dots, s \\ \sum_{w=1}^n P[X(O_s) = w] V_{X_{wz}}(L_0 - O_s) & L_0 \geq O_s \end{cases} \quad (6)$$

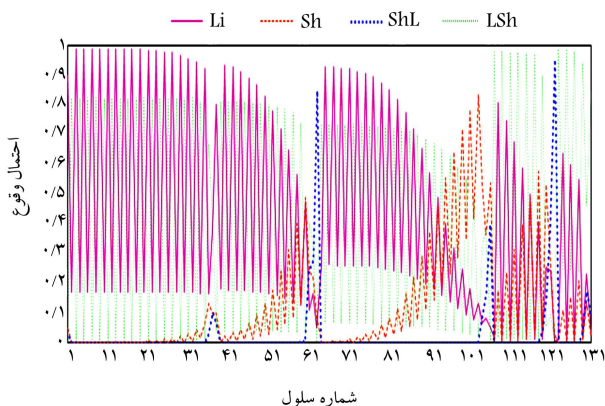
در رابطه‌ی ۶ که برای شکل ۳ بیان شده است، داریم:  $w, m$  تابع چگالی احتمال حالت‌های یک پارامتر معین در سلول‌های مشاهده‌ی

جدول ۳. معرفی بردارهای زمین‌شناسی مربوط به هر کدام از کلاس‌های در نظر گرفته‌شده‌ی زمین.

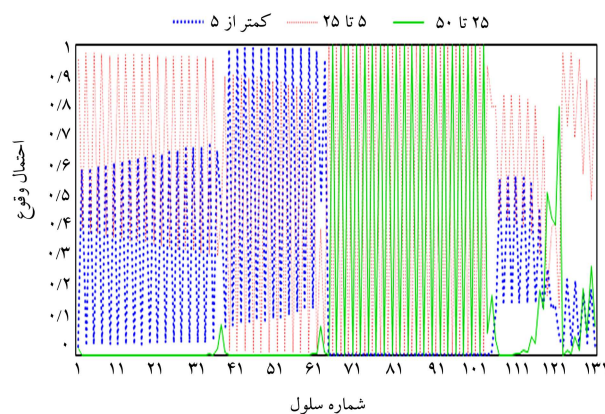
شماره‌ی کلاس زمین	حالت پارامتر		
	نوع سنگ	RQD	آب زیرزمینی
۱	۱، ۲، ۳، ۴	۱	۱، ۲، ۳
۲	۲	۲	۲، ۳
۳	۱، ۴	۲	۱، ۲، ۳
۴	۱، ۳	۳	۳
۵	۱، ۲، ۳	۲	۱، ۲، ۳
	۲، ۴	۳	۳
	۱، ۲، ۳، ۴	۳	۱
	۴	۳	۲

جدول ۴. مشخصات مربوط به هر کدام از کلاس‌های زمین.

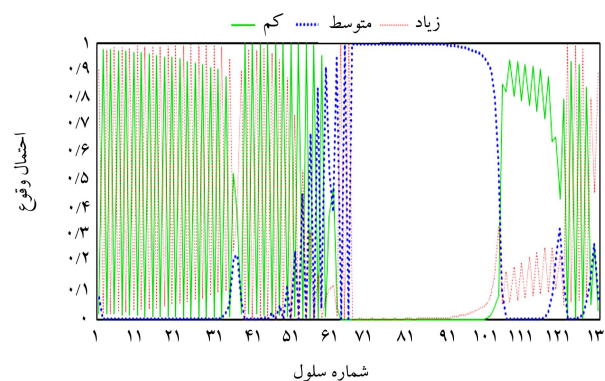
شماره‌ی کلاس زمین	مشخصات
۱	روش تونل‌های جانبی- نگهداری: IPE ۱۸۰، فاصله‌داری ۰/۷۵ - ۰/۵ متر و ۲۰ سانتی‌متر شاتکریت تقویت شده به وسیله‌ی دو لایه مش ۱۰۰ × ۱۰۰ mm @ ۸φ
۲	روش دیافراگم مرکزی- نگهداری: IPE ۱۸۰، فاصله‌داری ۱ - ۰/۷۵ متر و ۲۰ سانتی‌متر شاتکریت تقویت شده به وسیله‌ی دو لایه مش ۱۰۰ × ۱۰۰ mm @ ۶φ
۳	روش طاق و پطاق - نگهداری: IPE ۱۸۰، فاصله‌داری ۱/۲ - ۱ متر ۲۰ سانتی‌متر شاتکریت تقویت شده به وسیله‌ی دو لایه مش ۱۰۰ × ۱۰۰ mm @ ۶φ
۴	روش طاق و پطاق - نگهداری: IPE ۱۸۰، راک بولت تمام تزریقی، L: ۴ - ۶ m، φ۲۵ mm، فاصله‌داری ۲ × ۲ و ۱۵ سانتی‌متر شاتکریت تقویت شده به وسیله‌ی دو لایه مش ۱۰۰ × ۱۰۰ mm @ ۶φ
۵	روش طاق و پطاق - نگهداری: IPE ۱۸۰، راک بولت تمام تزریقی، L: ۴ - ۶ m، φ۲۵ mm، فاصله‌داری ۲ × ۲ و ۱۰ سانتی‌متر شاتکریت تقویت شده به وسیله‌ی یک لایه مش ۱۰۰ × ۱۰۰ mm @ ۶φ



شکل ۴. پروفیل پارامتر نوع سنگ در تونل همرو.



شکل ۵. پروفیل پارامتر RQD در تونل همرو.



شکل ۶. پروفیل پارامتر شرایط آب زیرزمینی در تونل همرو.

در مطالعه‌ی حاضر ۵ روش می‌توان در نظر گرفت که هر کدام برای تعدادی از این بردارهای زمین‌شناسی مناسب باشند. بردارهای زمین‌شناسی مذکور بنا به نظر افراد کارشناس، به کمک پرسش‌نامه در تعداد ۵ کلاس مطابق جدول ۳ جای گرفته‌اند، که مشخصات مربوط به هر کدام از کلاس‌های در نظر گرفته‌شده‌ی زمین در جدول ۴ ارائه شده است.

برای تشکیل پروفیل کلاس زمین، از بردارهای زمین‌شناسی مربوط به هر پارامتر در جدول ۳ و داده‌های به‌دست‌آمده برای احتمال وقوع حالت‌های هر پارامتر استفاده شده است. برای این کار، ابتدا داده‌های به‌دست‌آمده برای تشکیل پروفیل‌های پارامتر در نرم‌افزار اکسل وارد شده‌اند. سپس با توجه به جدول ۳، که بردار یا بردارهای

$$+ P[r(l) = ۱ \text{ and } d(l) = ۳ \text{ and } w(l) = ۳]$$

$$+ P[r(l) = ۳ \text{ and } d(l) = ۳ \text{ and } w(l) = ۳]$$

$[g(l) \text{ belongs to } GC\tau]$

$$= P[r(l) = ۱] * P[d(l) = ۲] * P[w(l) = ۱]$$

$$+ P[r(l) = ۱] * P[d(l) = ۲] * P[w(l) = ۲]$$

$$+ P[r(l) = ۱] * P[d(l) = ۲] * P[w(l) = ۳]$$

$$+ P[r(l) = ۴] * P[d(l) = ۲] * P[w(l) = ۱]$$

$$+ P[r(l) = ۴] * P[d(l) = ۲] * P[w(l) = ۲]$$

$$+ P[r(l) = ۴] * P[d(l) = ۲] * P[w(l) = ۳]$$

$$+ P[r(l) = ۱] * P[d(l) = ۳] * P[w(l) = ۳]$$

$$+ P[r(l) = ۳] * P[d(l) = ۳] * P[w(l) = ۳]$$

$P[g(l) \text{ belongs to } GC\tau]$ : احتمال وقوع کلاس زمین ۳ در سلول ۱؛

$r(l)$ : حالت پارامتر نوع سنگ در سلول ۱؛

$d(l)$ : حالت پارامتر RQD در سلول ۱؛

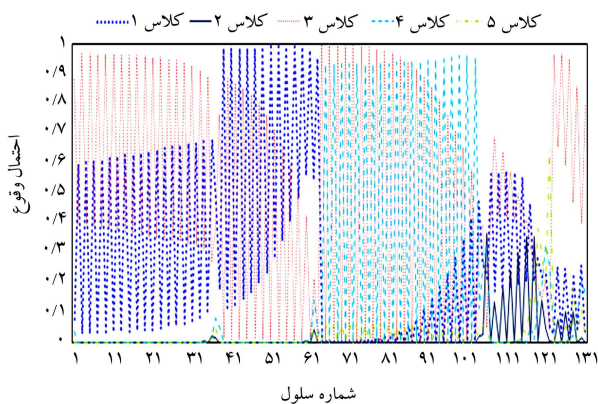
$w(l)$ : حالت پارامتر آب زیرزمینی در سلول ۱؛

$P[r(l) = i]$ : احتمال اینکه حالت پارامتر نوع سنگ در سلول ۱،  $i$  باشد؛

$P[d(l) = j]$ : احتمال اینکه حالت پارامتر RQD در سلول ۱،  $j$  باشد؛

$P[w(l) = k]$ : احتمال اینکه حالت پارامتر آب زیرزمینی در سلول ۱،  $k$  باشد.

برای سایر کلاس‌های زمین نیز به این صورت عمل شده و در نهایت با استفاده از نتایج به دست آمده برای هر کلاس زمین، پروفیلی مطابق شکل ۷ به دست آمده است، که احتمال وقوع هر کدام از کلاس‌های زمین را در داخل تمام سلول‌ها به دست می‌دهد و با عنوان پروفیل کلاس زمین خوانده می‌شود. با توجه به مطالب ذکر شده، مدل مارکوف جهت دست‌یابی به پروفیل کلاس زمین از داده‌های مربوط به موقعیت سلول‌های مشاهده‌ی و ماتریس‌های شدت انتقال استفاده می‌کند، که تمام آن‌ها در مطالعه‌ی حاضر از طریق پرسش‌نامه به کمک افراد کارشناس تونل‌سازی به دست آمده‌اند. طبیعی است هر چه داده‌های موجود در موقعیت سلول‌های مشاهده‌ی دقیق‌تر باشند و پرسش‌نامه‌ها با دقت بیشتری جواب داده شوند، پروفیل کلاس زمین به دست آمده شباهت بیشتری با پروفیل واقعی زمین خواهد داشت.



شکل ۷. پروفیل کلاس زمین در تونل همرو.

زمین‌شناسی هر کلاس زمین را معرفی می‌کند، احتمال وقوع هر کدام از کلاس‌های زمین در داخل هر سلول به کمک نرم‌افزار اکسل به دست آمده است.

به منظور بیان شیوه‌ی کار در نرم‌افزار اکسل جهت دست‌یابی به احتمال وقوع هر کلاس زمین در داخل هر کدام از سلول‌ها برای مطالعه‌ی حاضر، کلاس زمین ۳ در نظر گرفته شده است، که مطابق جدول ۳ شامل ۸ بردار زمین‌شناسی بدین صورت است:

$$g_{\tau 1} = (۱, ۲, ۱) \quad g_{\tau 2} = (۱, ۲, ۲)$$

$$g_{\tau 3} = (۱, ۲, ۳) \quad g_{\tau 4} = (۴, ۲, ۱)$$

$$g_{\tau 5} = (۴, ۲, ۲) \quad g_{\tau 6} = (۴, ۲, ۳)$$

$$g_{\tau 7} = (۱, ۳, ۳) \quad g_{\tau 8} = (۳, ۳, ۳)$$

در مطالعه‌ی حاضر، اگر هر کدام از بردارها را به صورت  $(i, j, k)$  در نظر بگیریم،  $i, j$  و  $k$  به ترتیب بیان‌کننده‌ی حالت پارامتر نوع سنگ، RQD، و آب زیرزمینی هستند. بنابراین بردار  $(i, j, k)$  برای یک کلاس زمین معین به این معنی است که در کلاس مذکور برای هر سلول، حالت  $i$  از پارامتر نوع سنگ ( $i$  یکی از ۴ پارامتر نوع سنگ)، حالت  $j$  از پارامتر RQD ( $j$  یکی از ۳ حالت پارامتر RQD) و حالت  $k$  از پارامتر آب زیرزمینی ( $k$  یکی از ۳ حالت پارامتر آب زیرزمینی) با احتمال مشخصی اتفاق می‌افتد. بنابراین برای پیدا کردن احتمال وقوع هر کلاس زمین در یک سلول معین باید برای هر بردار  $(i, j, k)$  مربوط به آن کلاس، احتمال وقوع حالت  $i, j$  و  $k$  را در داخل آن سلول مشخص و سپس این احتمال‌ها را برای هر بردار در هم ضرب کرد. اگر کلاس زمین شامل چند بردار زمین‌شناسی باشد، محاسبات را برای هر کدام از بردارها باید در داخل هر سلول انجام داد و در نهایت آن‌ها را با هم جمع کرد، تا احتمال وقوع آن کلاس در داخل هر سلول به دست آید. در ادامه، با توجه به مطالب ارائه‌شده، چگونگی دست‌یابی به احتمال وقوع کلاس زمین ۳ در داخل سلول ۱ نشان داده شده است:

$P[g(l) \text{ belongs to } GC\tau]$

$$= P \left[ \begin{array}{l} g(l) = g_{\tau 1} \text{ or } g(l) = g_{\tau 2} \text{ or } g(l) = g_{\tau 3} \text{ or } g(l) = g_{\tau 4} \\ g(l) = g_{\tau 5} \text{ or } g(l) = g_{\tau 6} \text{ or } g(l) = g_{\tau 7} \text{ or } g(l) = g_{\tau 8} \end{array} \right]$$

$$= P[g(l) = g_{\tau 1}] + P[g(l) = g_{\tau 2}]$$

$$+ P[g(l) = g_{\tau 3}] + P[g(l) = g_{\tau 4}]$$

$$+ P[g(l) = g_{\tau 5}] + P[g(l) = g_{\tau 6}]$$

$$+ P[g(l) = g_{\tau 7}] + P[g(l) = g_{\tau 8}]$$

$$= P[r(l) = ۱ \text{ and } d(l) = ۲ \text{ and } w(l) = ۱]$$

$$+ P[r(l) = ۱ \text{ and } d(l) = ۲ \text{ and } w(l) = ۲]$$

$$+ P[r(l) = ۱ \text{ and } d(l) = ۲ \text{ and } w(l) = ۳]$$

$$+ P[r(l) = ۴ \text{ and } d(l) = ۲ \text{ and } w(l) = ۱]$$

$$+ P[r(l) = ۴ \text{ and } d(l) = ۲ \text{ and } w(l) = ۲]$$

$$+ P[r(l) = ۴ \text{ and } d(l) = ۲ \text{ and } w(l) = ۳]$$



هدف مدل زمین‌شناسی، دستیابی به پروفیل کلاس زمین است، تا بتوان از آن به‌عنوان ورودی مدل ساخت استفاده کرد.

### ۲.۴. مدل ساخت برای تونل همرو

در مدل ساخت، زمان و هزینه‌ی اجرای تونل در هر سلول برای هر کلاس زمین به دست می‌آید. به‌منظور برآورد زمان و هزینه برای هر سلول (۱۰ متر) در تونل همرو، به کمک پرسش‌نامه از افراد کارشناس خواسته شده است که ابتدا برای هر کدام از کلاس‌های زمین، یک شبکه‌ی فعالیت در نظر بگیرند، که یک چرخه‌ی ساخت (حفاری و نگه‌داری) از کلاس زمین موردنظر را کامل کند. سپس به کمک شبکه‌ی فعالیت مذکور، میزان زمان و هزینه‌ی کمیته، متوسط، و بیشینه‌ی مربوط به هر فعالیت (برای سال ۱۳۹۴)، حداقل‌ها پایان یک فعالیت و شروع فعالیت جدید، تأخیرها، خرابی ماشین‌آلات، و... با استفاده از تجربه‌ی پروژه‌های اجراشده‌ی قبلی در شرایط زمین‌شناسی مشابه تقریب زده شده و درنهایت، زمان و هزینه‌های به‌دست‌آمده با هم جمع شده است تا زمان و هزینه‌ی کمیته، متوسط، و بیشینه برای هر چرخه‌ی ساخت از کلاس‌های زمین به دست آید. سپس از میانگین‌گیری نظرهای ارائه‌شده توسط افراد کارشناس مختلف برای هر کلاس زمین، زمان، و هزینه‌ی کمیته، متوسط، و بیشینه به ازاء هر ۱۰ متر ساخت (هر سلول) مطابق جدول ۵ به دست آمده است. همچنین از آنجایی که هزینه‌ی هر چرخه‌ی ساخت سال‌به‌سال در حال افزایش است، بنابراین، میزان کمیته، متوسط، و بیشینه‌ی افزایش درصدی هزینه‌ها به‌صورت سالیانه توسط افراد کارشناس به دست آمده و درنهایت با تبدیل افزایش صورت‌گرفته، هزینه‌ها برای هر ۱۰ متر از کلاس‌های زمین، میزان کمیته، متوسط، و بیشینه‌ی افزایش درصدی هزینه‌ها به‌صورت سالیانه نیز برای هر سلول مطابق جدول ۵ به دست آمده است.

نکته‌ی که باید در مطالعه‌ی حاضر مدنظر قرارگیرد، این است که در پرسش‌نامه، جهت برآورد زمان و هزینه‌ها برای هر چرخه‌ی ساخت از یک کلاس زمین معین از افراد کارشناس خواسته شده است تا فرض کنند تونل فقط از یک طرف (ورودی یا خروجی) حفاری شود و نتایج به‌دست‌آمده برای زمان و هزینه‌های ساخت نیز برای فرض موردنظر است. هم‌چنین در برآورد زمان و هزینه‌ها، کف تونل (عملیات مربوط به ساخت جاده‌ی تونل) در نظر گرفته نشده است.

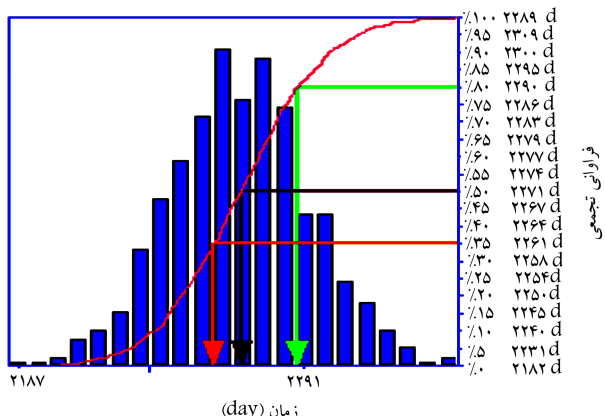
حال بعد از دستیابی به زمان و هزینه‌های اجرای ساخت هر سلول (۱۰ متر) برای هر کلاس زمین، نوبت به تخمین زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت کل تونل می‌رسد. به‌منظور برآورد زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت تونل باید زمان و هزینه‌ی تمام سلول‌ها (۱۳۱ سلول) را با هم جمع کرد. از آنجایی که در داخل هر سلول، هر کدام از کلاس‌های زمین با احتمال مشخصی اتفاق می‌افتد (پروفیل کلاس زمین)، باید برای ارزیابی زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت کل تونل، روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو را به‌کار برد.

### ۳.۴. برآورد احتمالاتی زمان و هزینه‌ی کل ساخت تونل همرو به کمک روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو

در نوشتار حاضر برای انجام روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، از نرم‌افزار پرت مستر استفاده شده است. پس از واردکردن داده‌ها در نرم‌افزار پرت مستر، نسبت به اجرای شبیه‌سازی مونت‌کارلو اقدام شده است. در خلال اجرای شبیه‌سازی، برنامه‌ی تهیه‌شده به تعداد مشخصی تکرار شده و در هر یک از آن‌ها، مقادیر غیرقطعی برنامه (در مطالعه‌ی حاضر زمان و هزینه) براساس توزیع‌ها و اطلاعات واردشده به‌صورت تصادفی تعیین شده‌اند. نرم‌افزار پرت مستر در انتهای هر تکرار، میزان زمان و هزینه‌ی نهایی را در خود ذخیره‌سازی می‌کند. پس از اتمام کلیه‌ی تکرارها، از مقادیر مذکور برای رسم نمودارهای موردنظر و نیز تهیه‌ی تابع احتمالی مربوط به اجرای هر یک از این موارد استفاده شده است.<sup>[۱۱]</sup>

در نوشتار حاضر تعداد شبیه‌سازی‌ها برای ۱۰۰۰۰ بار انجام شده و نتایج حاصل از آن‌ها در ادامه ارائه شده است.

شکل‌های ۸ و ۹، نمودارهای ستونی مربوط به هزینه‌ی نهایی و مدت زمان نهایی تونل همرو را نشان می‌دهند، که مطابق آن‌ها نحوه‌ی توزیع نتایج هزینه و مدت زمان نهایی پروژه همرو بیان شده است. برای سطح اطمینان‌های متفاوتی از صفر تا ۱۰۰ درصد، نتایج متفاوتی برای زمان و هزینه‌ها به‌دست آمده است. هر سطح اطمینان در واقع، زمان و هزینه‌ی بیشینه‌ی را جهت اتمام پروژه به‌دست می‌دهد. به‌عنوان یک حالت بهینه می‌توان سطح اطمینان وقوع هر کدام از زمان و هزینه‌ی نهایی را برابر ۵۰٪ در نظر گرفت. اگر برای مطالعه‌ی حاضر سطح اطمینان ۵۰٪ در نظر گرفته شود (مطابق شکل‌های ۸ و ۹)، پروژه با بیشینه‌ی هزینه حدود

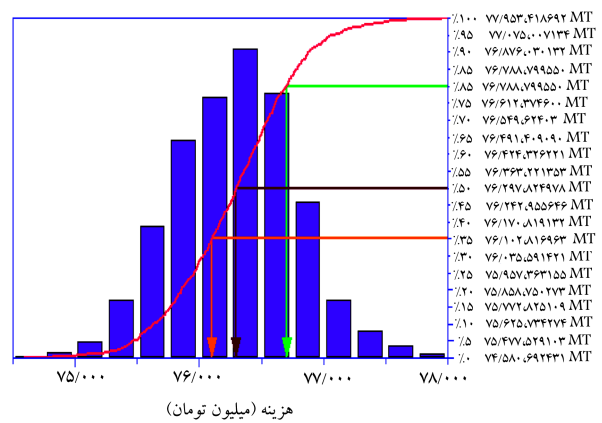
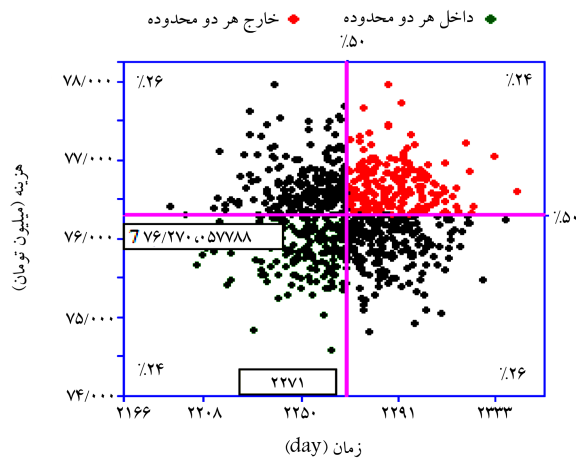


شکل ۸. نمودار ستونی برای نمایش نحوه‌ی توزیع نتایج مربوط به مدت زمان نهایی پروژه‌ی تونل همرو.

جدول ۵. زمان و هزینه‌ی مربوط به هر سلول (۱۰ متر) از کلاس زمین موردنظر.

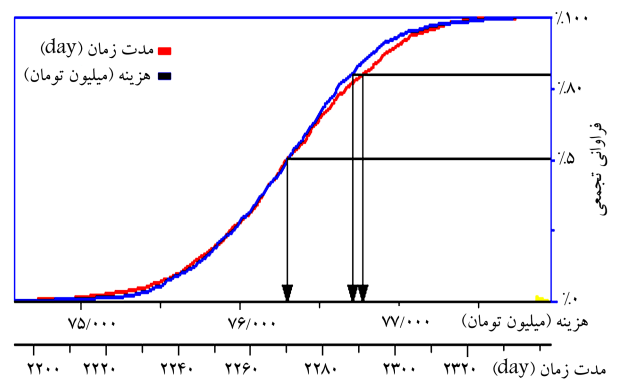
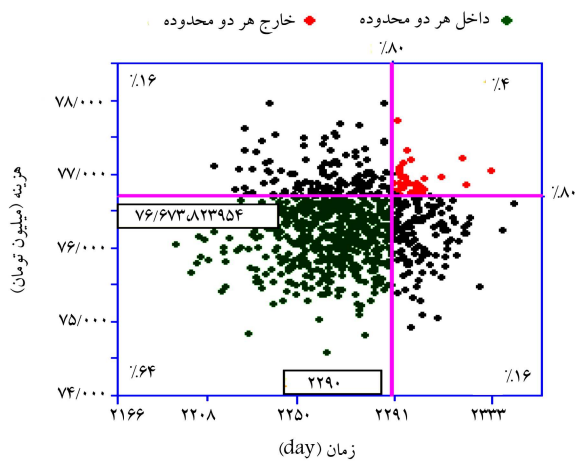
شماره‌ی کلاس زمین	زمان به ازاء هر سلول (روز)			هزینه به ازاء هر سلول (میلیون تومان)			افزایش هزینه برای هر سلول به صورت سالیانه (درصد)		
	بیشینه	متوسط	کمینه	بیشینه	متوسط	کمینه	بیشینه	متوسط	کمینه
۱	۲۰	۱۶٫۷	۱۳٫۴	۴۲۴٫۴۵	۳۸۵٫۶۳	۳۵۰	۲۵-۳۰	۱۵-۲۰	۵-۱۰
۲	۱۶٫۷	۱۴٫۲	۱۱٫۷	۳۸۵٫۶۳	۳۵۰	۳۱۸٫۳۵	۲۵-۳۰	۱۵-۲۰	۵-۱۰
۳	۱۴٫۲	۱۱٫۷	۱۰	۳۵۰	۳۱۸٫۳۵	۲۷۶٫۷۸	۲۵-۳۰	۱۵-۲۰	۵-۱۰
۴	۱۱٫۷	۱۰	۸٫۴	۳۱۸٫۳۵	۲۷۶٫۷۸	۲۳۶٫۲۰	۲۵-۳۰	۱۵-۲۰	۵-۱۰
۵	۱۰	۸٫۴	۶٫۳	۲۷۶٫۷۸	۲۳۶٫۲۰	۱۷۲٫۹۶	۲۵-۳۰	۱۵-۲۰	۵-۱۰





شکل ۹. نمودار ستونی برای نمایش نحوه توزیع نتایج مربوط به هزینه نهایی پروژهی تونل همرو.

شکل ۱۱. نمودار پراکندگی با سطح اطمینان ۵۰٪ برای هر کدام از زمان و هزینه‌ها.



شکل ۱۰. نمودار تجمعی برای نمایش بیشینه‌ی زمان و هزینه‌ها با سطح اطمینان متفاوتی از صفر تا ۱۰۰٪.

شکل ۱۲. نمودار پراکندگی با سطح اطمینان ۸۰٪ برای هر کدام از زمان‌ها و هزینه‌ها (عدم قطعیت کمتر نسبت به شکل ۱۱).

نهایی به این معنی است که نصف نقاط شبیه‌سازی بالای خط افقی و نصف آن‌ها پایین این خط واقع هستند. همچنین سطح اطمینان ۵۰٪ برای مدت زمان نهایی به این معنی است که نصف نقاط شبیه‌سازی در سمت چپ خط عمودی و نصف آن‌ها در سمت راست این خط هستند. نقاط سبز، معرف نقاطی هستند که پایین خط افقی (برای هزینه) و در سمت چپ خط عمودی (برای مدت زمان) قرار دارند و به این معنی هستند که زمان و هزینه نهایی مربوط به آن‌ها با سطح اطمینان کمتر از سطح اطمینان مشخص شده به ترتیب به وسیله‌ی خط عمودی و افقی است و هر چه سطح اطمینان در نظر گرفته شده به وسیله‌ی دو خط افقی و عمودی بیشتر باشد، تعداد نقاط سبزرنگ مذکور بیشتر است و عدم قطعیت در مورد اتمام پروژه با بیشینه‌ی زمان و هزینه به دست آمده کمتر خواهد شد. نقاط قرمز رنگ برعکس نقاط سبزرنگ، نقاطی هستند که با افزایش سطح اطمینان در نظر گرفته شده به وسیله‌ی دو خط افقی و عمودی، تعداد آن‌ها کمتر شده و عدم قطعیت در مورد اتمام پروژه با بیشینه‌ی زمان و هزینه به دست آمده کاهش خواهد یافت. نقاط سیاه، نقاطی هستند که برای یکی از خط‌های افقی و عمودی سبز و برای دیگری قرمز هستند. هر چه سطح اطمینان در نظر گرفته شده به وسیله‌ی دو خط عمودی و افقی بیشتر باشد، تعداد نقاط سیاه رنگ کمتر می‌شود و در نتیجه، عدم قطعیت در مورد اتمام پروژه با بیشینه‌ی زمان و هزینه به دست آمده کاهش خواهد یافت (شکل ۱۲).

۷۶۲۷۰۰۰۰۰۰ تومان در بیشینه‌ی زمان ۲۲۷۱ روز به اتمام می‌رسد. البته باید توجه داشت که این زمان و هزینه نهایی برای وقتی است که تونل فقط از یک طرف (ورودی یا خروجی) حفاری شود، زیرا در پرسش‌نامه خواسته شده است که زمان و هزینه‌ها طوری تخمین زده شوند که فرض شود تونل فقط از یک بخش حفاری خواهد شد. زمانی که فرض بر این باشد که تونل از دو طرف حفاری شود، زمان نهایی نصف زمان به دست آمده برای یک طرف و هزینه‌ی آن نیز کاهش می‌یابد؛ زیرا برای زمان کمتر، هزینه نیز کمتر تحت تأثیر افزایش هزینه‌های سالیانه قرار خواهد گرفت. شکل ۱۰، نمودار تجمعی مدت زمان نهایی و هزینه نهایی پروژه‌ی تونل همرو را نشان می‌دهد، که به کمک آن می‌توان با سطح اطمینان‌های متفاوتی بیشینه‌ی زمان و هزینه پروژه را مشخص ساخت. در نمودار مذکور، بیشینه‌ی زمان و هزینه‌ی تونل همرو برای سطح اطمینان ۵۰٪ و ۸۰٪ نشان داده شده است.

برای نشان دادن ارتباط میان دو متغیر مدت زمان نهایی و هزینه نهایی پروژه‌ی تونل همرو، از نمودار پراکندگی مطابق شکل ۱۱ استفاده شده است، که مطابق آن مثلاً تعیین می‌شود که با یک سطح اطمینان مشخص، چه زمان و چه هزینه‌ی برای پروژه مورد نیاز است. در شکل ۱۱، مدت زمان نهایی و هزینه نهایی برای پروژه‌ی تونل همرو با سطح اطمینان ۵۰٪ نشان داده شده است، که مطابق آن نقاط با سه رنگ متفاوت نشان داده شده‌اند. خط افقی و عمودی (خطوط عمود بر هم داخل چهارچوب نمودار) به ترتیب بیان‌کننده‌ی وقوع هزینه نهایی و مدت زمان نهایی پروژه با سطح اطمینان مشخصی هستند. برای مثال، سطح اطمینان ۵۰٪ برای هزینه‌ی

گفت ۱۵ روز بیشتر برای زمان و حدود ۳۰۰ میلیون کمتر برای هزینه‌ها نسبت به حالت واقعی در نظر گرفته شده است و در این صورت تفاوت چندانی با حالت واقعی ندارد.

بنابراین مشخص شده است که نتایج به دست آمده برای مدت زمان و هزینه ساخت کل تونل همرو به کمک داده‌های بعد از ساخت، مطابقت زیادی با زمان و هزینه‌ی نهایی به دست آمده با روش DAT (با سطح اطمینان ۵۰٪) به کمک داده‌های قبل از شروع به ساخت دارد. از این رو می‌توان در برآورد مدت زمان و هزینه‌های ساخت تونل برای پروژه‌های آبی، از روش DAT قبل از شروع به ساخت استفاده کرد و عدم قطعیت‌ها را به‌طور قابل توجهی به‌منظور کاهش ریسک تصمیم‌گیری مدت زمان و هزینه در مرحله‌ی برنامه‌ریزی‌های اولیه کاهش داد.

## ۵. نتیجه‌گیری

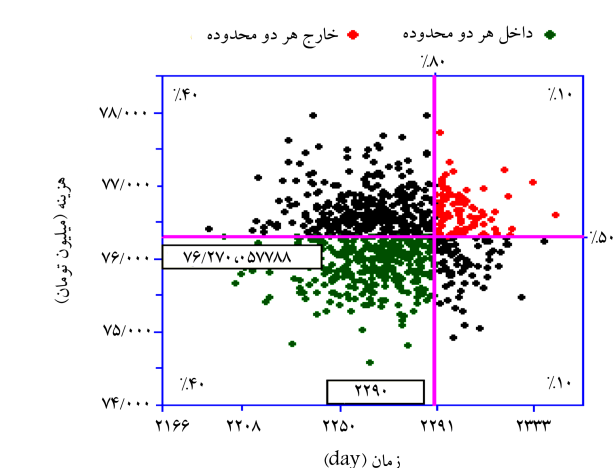
عدم قطعیت زمین‌شناسی، منبع اصلی ریسک در ساخت زیرزمینی است، که اغلب منجر به فرض کردن بدترین شرایط زمین ممکن می‌شود و در نتیجه، هزینه‌ها به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. کاهش طراحی و ساخت محافظه‌کارانه و انتخاب حفاری و نگاه‌داری براساس شرایط زمین‌شناسی موجود، منجر به صرفه‌جویی قابل توجهی در طول ساخت خواهد شد.

برای یک پروفیل زمین‌شناسی خاص، دنباله‌ی بهینه‌ی روش‌های طراحی و ساخت که تابعی از تداوم شرایط زمین‌شناسی است، با هزینه‌های تولید و هزینه‌ی روش‌های مختلف نگاه‌داری و حفاری همراه است. در نتیجه، طراحی، برنامه‌ریزی ساخت، و ارزیابی هزینه‌ی تونل‌ها، نیاز به در نظر گرفتن تنوع شرایط زمین‌شناسی دارد. این شرایط قبل از ساخت شناخته شده نیست و باید به‌طور کلی سازنده‌های زمین‌شناسی در مجاورت پروژه با مشاهده‌ی موقعیت‌های خاص توسط برنامه‌های اکتشاف زیرسطحی توصیف شود. طراحان و پیمانکاران باید از این اطلاعات جهت توسعه‌ی توصیف زمین‌شناسی و تصمیمات استفاده کنند. این موارد منجر به توسعه‌ی یک توصیف احتمالاتی زمین‌شناسی و انتخاب روش حفاری و سیستم نگاه‌داری می‌شود. در نهایت با استفاده از ابزارهای آماری مختلف، می‌توان عدم قطعیت‌ها را در مورد زمان و هزینه‌ی نهایی پروژه کاهش داد.

در نوشتار حاضر، ابزار کمک به تصمیم‌گیری (DAT) در تونل‌سازی به‌منظور پیش‌بینی زمان و هزینه‌های ساخت تونل جاده‌ی همرو به کمک داده‌های قبل از شروع به ساخت تونل به‌کار رفته است. نتایج به دست آمده برای مدت زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت تونل با روش DAT به کمک داده‌های قبل از ساخت، با مدت زمان و هزینه‌ی اجرا شده‌ی تونل در حالت واقعی مقایسه شده است. در نهایت با توجه به نزدیک بودن نتایج حاصل از DAT با نتایج واقعی نتیجه شده است که می‌توان در برآورد مدت زمان و هزینه‌های ساخت تونل برای پروژه‌های آبی از روش DAT قبل از شروع به ساخت استفاده کرد و عدم قطعیت‌ها را به‌طور قابل توجهی به‌منظور کاهش ریسک تصمیم‌گیری مدت زمان و هزینه در مرحله‌ی برنامه‌ریزی‌های اولیه کاهش داد.

## پانویس‌ها

1. decision aids for tunneling
2. engineering geothermal system



شکل ۱۳. نمودار پراکنندگی زمان - هزینه‌ی پروژه‌ی همرو، وقتی که عدم قطعیت کمتری در مورد مدت زمان انجام پروژه نسبت به هزینه در نظر گرفته شود.

گاهی شرایط به‌گونه‌ی است که ایجاب می‌کند عدم قطعیت یکی از متغیرها (زمان و هزینه) کمتر یا بیشتر از یکی دیگر باشد. زمانی که برای مثال مطابق شکل ۱۳ می‌خواهیم در مورد مدت زمان پروژه، عدم قطعیت کمتری داشته باشیم، در این صورت سطح اطمینان در نظر گرفته شده به‌وسیله‌ی خط عمودی (برای مدت زمان) باید بیشتر از این احتمال به‌وسیله‌ی خط افقی برای هزینه باشد؛ به این معنی که نقاط سبز رنگ برای خط عمودی بیشتر از خط افقی باشد. بنابراین بسته به شرایط اقتصادی جامعه، نوع پروژه و سایر موارد که می‌توانند تأثیرگذار باشند، عدم قطعیت می‌تواند برای زمان و هزینه‌ی نهایی تونل متفاوت در نظر گرفته شود و در برنامه‌ریزی‌های اولیه از آن استفاده کرد.

از آنجایی که در زمان انجام مطالعه‌ی حاضر، پروژه‌ی تونل همرو به اتمام رسیده بود و به دلیل در اختیار داشتن داده‌های بعد از ساخت با دقتی بالا تصمیم بر آن شده است که نتایج به دست آمده با روش DAT به کمک داده‌های بعد از ساخت تونل اعتبارسنجی شود، تا بتوان در پروژه‌های آبی با عدم قطعیت کمتری این روش را جهت ارزیابی زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت تونل به‌کار برد. مدت زمان و هزینه‌ی به دست آمده به کمک داده‌های بعد از ساخت و افرادی که ساخت تونل همرو را بر عهده داشته‌اند، به ترتیب برابر ۲۲۵۶ روز و ۷۶۵۶۰۸۷۹۰۰۰ تومان به دست آمده است. البته باید توجه داشت که چون در مطالعه‌ی حاضر زمان شروع به ساخت تونل همرو سال ۱۳۹۴ فرض شده است، بنابراین هزینه‌های واقعی برای سال ۱۳۹۴ مطابق آیین‌نامه به‌روزرسانی شده و همچنین با توجه به میزان زمان واقعی اجرای تونل، این هزینه‌ها به‌صورت سالیانه ۲۵٪ افزایش یافته‌اند، تا در نهایت این میزان هزینه‌ی واقعی به دست آمده است. همچنان که از نمودارهای به دست آمده برای مدت زمان و هزینه‌ی ساخت تونل همرو به کمک روش DAT مشخص است، این زمان و هزینه به ترتیب با احتمال ۲۷٪ و ۷۲٪ اتفاق افتاده‌اند. از آنجایی که در نوشتار حاضر، سطح اطمینان ۵۰٪ به‌عنوان یک حالت بهینه در نظر گرفته شده است، می‌توان

3. Pert Master
4. Markov
5. Matlab

## منابع (References)

1. Chan, M.H.C. "A geological prediction and updating model in tunneling", Thesis (M.S.), Massachusetts Institute of Technology Cambridge, University of MIT, 236 p. (1981).
2. Vijaya, B.H. "Resource modeling for DAT", Massachusetts Institute of Technology Cambridge, University of MIT, 358 p. (1995).
3. Sinfield, J.V. and Einstein, H.H. "Evaluation of tunneling technology using the decision aids for tunneling", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **11**(4), pp. 491-504 (1996).
4. Christoph, H. "Updating in the decision aids for tunneling", Massachusetts Institute of Technology Cambridge, University of MIT, 374 p. (2000).
5. Min, S.Y., Einstein, H.H., Lee, J.S. and Kim, T.K. "Application of decision aids for tunneling (DAT) to a drill and blast tunnel", *J. Civil Eng., KSCE*, **7**(5), pp. 619-628 (2003).
6. Min, S.Y. and Einstein, H.H., *DAT Application for the Wonhyo Tunnel*, Final Report to Korea Railroad Research Institute (KRRRI) (2003).
7. Min, S.Y., Einstein, H.H., Lee, J.S. and Lee, H.S. "Application of decision aids for tunneling (DAT) to update excavation cost/time information", *J. Civil Eng., KSCE*, **9**(4), pp. 335-346 (2005).
8. Hung, V. "Modelling uncertainty in the NEW YORK city No. 7 subwat line extension project using decision aids for tunnelling (DAT)", Massachusetts Institute of Technology Cambridge, University of MIT, 95 p. (2012).
9. Moret, Y. "Modeling cost and time uncertainty in rail line construction", Massachusetts Institute of Technology Cambridge, University of MIT, 443 p. (2011).
10. Yost, K., Valentin, A. and Einstein, H.H. "Estimating cost and time of well bore drilling for engineered geothermal systems (EGS)-considering uncertainties", Massachusetts Institute of Technology Cambridge, University of MIT (2015).
11. Ioannou, G. "A geological prediction model for tunneling", *Journal of Construction Engineering and Management*, **115**(3), pp. 339-356 (1989).
12. Photios Ioannou, G. "The economic value of geologic exploration as a risk reduction strategy", Massachusetts Institute of Technology Cambridge, University of MIT, 465 p. (1984).