

## ارائه‌ی مدل ابتکاری DAT برای برآورد زمان و هزینه‌ی تونل و به‌روزرسانی با داده‌های حین حفاری

ارسلان محمودزاده<sup>۱</sup>؛ شکرآ... زارع<sup>۲\*</sup>؛ رحمان دارای<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود  
۲- دانشیار، هیئت‌علمی گروه مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود  
۳- دانشجوی دکترای مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱

دریافت: ۱۳۹۵/۰۲

### چکیده

زمان‌بندی از اهمیت فراوانی در برنامه‌ریزی و مدیریت ساخت پروژه‌ها برخوردار است. وابستگی پیچیده‌ی میان فعالیت‌های ساخت در تونل‌ها، زمان و هزینه‌های ساخت را تا حدودی تحت تأثیر قرار می‌دهد. شرایط زمین و زمان و هزینه‌های ساخت از موارد اساسی در تصمیم‌گیری‌ها برای مرحله‌ی برنامه‌ریزی و طراحی یک پروژه به حساب می‌آیند. در این مقاله، روش ابتکاری *DAT* به‌منظور ارزیابی احتمالاتی شرایط زمین و زمان و هزینه‌های ساخت بکار گرفته شده است. در طول ساخت، داده‌های زمین‌شناسی واقعی برای بخش‌های حفاری‌شده‌ی تونل در دسترس قرار می‌گیرد و عدم قطعیت‌های زمین‌شناسی برای این بخش‌ها به‌طور کامل از بین می‌رود. این داده‌های جدید می‌توانند در به‌روزرسانی شرایط زمین‌شناسی مورد انتظار مسیر تونل به‌منظور دستیابی به پیش‌بینی‌های دقیق‌تر برای بخش حفاری نشده، مورد استفاده قرار گیرند.

در این مقاله به‌منظور نشان دادن چگونگی پیش‌بینی شرایط زمین‌شناسی مورد انتظار در مسیر تونل، زمان و هزینه‌های مورد نیاز ساخت و همچنین به‌روزرسانی این موارد در طول فرآیند ساخت، از تونل جاده‌ی همرو به‌عنوان مطالعه موردی استفاده شده است. برای نشان دادن تأثیر به‌روزرسانی‌ها بر روی نتایج اولیه، میزان زمان و هزینه‌های به‌دست‌آمده از مدل اولیه با زمان و هزینه‌های به‌دست‌آمده از مدل به‌روزرسانی شده، مقایسه شده است. در نهایت، کاهش عدم قطعیت در مورد زمان و هزینه‌های ساخت تونل نتیجه شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، به‌روزرسانی داده‌ها در طول ساخت می‌تواند کمک بسیار خوبی در آگاه ساختن پیمان‌کارها و کارفرماهای پروژه در پذیرفتن میزان ریسک و ارائه‌ی پیشنهادها برای ساخت بخش‌های حفاری نشده‌ی تونل محسوب شود.

مدل ابتکاری *DAT*، عدم قطعیت زمان و هزینه، مدل زمین‌شناسی، مدل ساخت، به‌روزرسانی *DAT*.

واژگان کلیدی

## ۱- مقدمه

از جمله مباحث مهم جهت طراحی و برنامه‌ریزی پروژه‌ها، به حداقل رساندن عدم قطعیت‌ها است. معمولاً عدم قطعیت‌ها در پروژه‌های زیرسطحی، ناشی از شرایط ناشناخته‌ی زمین است که باعث می‌شود در طراحی‌ها نتوان کل مسائلی که ممکن است در زمان ساخت اتفاق بیفتد، در نظر گرفته شود. از مهم‌ترین عدم قطعیت‌ها می‌توان به عدم قطعیت در مورد زمان و هزینه‌ی نهایی پروژه اشاره کرد؛ زیرا این زمان و هزینه‌ها در ارتباط با شناخت کامل شرایط زیرسطحی هستند. بنابراین در پروژه‌های زیرسطحی نمی‌توان زمان و هزینه‌ها را به صورت قطعی بیان نمود بلکه باید از روش‌های احتمالاتی استفاده کرد [۱].

جهت برآورد عدم قطعیت‌ها به صورت احتمالاتی، ابزارها (مدل‌های احتمالاتی) مختلفی ارائه شده است که ابزار (Decision Aids for Tunneling) DAT از جمله آن‌ها می‌باشد. DAT برای اولین بار توسط انیشتین (۱۹۸۰) ارائه شد، بعد این مدل توسط گروه پروفیسور انیشتین توسعه یافت و تا به امروز کارهای زیادی روی مدل DAT در پروژه‌های مختلف انجام شده است.

ابزار DAT در ابتدا شامل دو مدل ساخت و مدل زمین‌شناسی بود تا این‌که یک مدل تحت عنوان مدل منابع به مدل‌های آن اضافه شد [۲]. سپس روشی برای ارزیابی فناوری تونل‌زنی تمام مقطع به روش DAT ارائه شد [۳]. بعد از آن مدل DAT به گونه‌ای توسعه یافت که می‌توانست در هنگام ساخت و در صورت دستیابی به داده‌های جدید و واقعی‌تر نسبت به داده‌های اولیه، مدل را به روزرسانی نموده و عدم قطعیت‌ها را در مورد زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت تونل نسبت به مدل قبلی کاهش دهد [۴].

به منظور برآورد زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت تونل، روش DAT در پروژه تونل سوچوون، تونل وونهبیو و تونل کنمور شمالی مورد استفاده قرار گرفت [۵]، [۶] و [۷].

جهت بررسی تأثیر به روزرسانی 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 به کارگیری داده‌های زمین‌شناسی اولیه به کمک این روش ارزیابی نمودند؛ سپس با به روزرسانی داده‌های زمین‌شناسی در

زمان ساخت تونل و به کارگیری آن‌ها در مدل DAT، زمان و هزینه‌ی نهایی جدیدی برای ساخت تونل به دست آمد و در نهایت این زمان و هزینه‌ها را با هم مقایسه نمودند [۷]. به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت در پروژه‌ی خط زیرزمینی در شهر نیویورک و برآورد زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت تونل‌های پروژه‌ی خط راه‌آهن پرتغال، روش DAT بکار گرفته شد [۸] و [۹].

از جمله جدیدترین کارهایی که در آن از روش DAT بهره گرفته شده است، برآورد زمان و هزینه‌ی نهایی در حفاری چاه برای (Engineering Geothermal System) EGS 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، مجموعه‌هایی از شرایط زمین‌شناسی مختلف را در نظر گرفته و هر مجموعه شرایط را یک کلاس زمین می‌نامد که شامل روش حفاری و سیستم نگهداری مخصوص به خود است. در مدل زمین‌شناسی، احتمال وقوع هر کدام از این کلاس‌های زمین با استفاده از روش مارکوف در هر موقعیتی در مسیر 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 مسیر 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 مسیر تونل به صورت احتمالاتی برآورد نمود [۱۱].

مدل DAT در دانشگاه MIT توسط گروه پروفیسور انیشتین نرم‌افزاری برای آن طراحی شده است که تمام مراحل مدل DAT را با آن نرم‌افزار می‌توان اجرا نمود ولی به دلیل در دسترس نبودن این نرم‌افزار، نویسندگان از نرم‌افزار MATLAB به منظور کد نویسی مدل مارکوف و نرم‌افزار PertMaster جهت انجام شبیه‌سازی‌های مونت کارلو و نرم‌افزار Excel برای ترسیم نمودارها بهره گرفته‌اند. همچنین از آنجایی‌که نویسندگان در اکثر مراحل کار برای دستیابی به داده‌های دقیق‌تر از نظرات افراد کارشناس تونل‌سازی به کمک پرسشنامه بهره گرفته‌اند، لذا در عنوان مقاله‌ی حاضر از مدل DAT تحت عنوان مدل ابتکاری DAT نام برده شده است.

مسیر تونل به بخش‌ها (سلول‌ها) مساوی هر کدام به طول ۱۰ متر تقسیم شد. شش تا از این سلول‌ها مربوط به موقعیت چهار گمانه و موقعیت ورودی و خروجی تونل بودند و به دلیل مشخص بودن احتمال وقوع حالات پارامترهای در نظر گرفته‌شده در این مطالعه (پارامترهای نوع سنگ، RQD و آب زیرزمینی)، با عنوان سلول‌های مشاهده‌ای از آن‌ها اسم برده شده است. لازم به ذکر است، با توجه به اینکه در این مطالعه از داده‌های قبل از شروع به ساخت تونل استفاده‌شده است و این داده‌ها برای موقعیت گمانه‌ها به صورت کاملاً دقیق نیستند و همچنین به دلیل اینکه در مرحله‌ی قبل از شروع به ساخت تونل فاصله‌ی حدود ۲۰۰ متر مربوط به پورتال ورودی و خروجی تونل خاک‌برداری نشده است، تمام مشاهدات به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شدند.

در مرحله‌ی بعد به منظور پیدا کردن احتمال وقوع حالات پارامترها در سایر سلول‌ها (سلول‌های مجهول)، مدل مارکوف در نرم‌افزار MATLAB کدنویسی شد و به کمک سلول‌های مشاهده‌ای، سایر سلول‌ها نیز از حالت مجهول درآمدند و در نتیجه برای هر پارامتر، پروفیلی تحت عنوان پروفیل پارامتر به دست آمد که احتمال وقوع هر حالت از هر پارامتر را در داخل هر سلول مشخص می‌ساخت. در نهایت از ترکیب حالات مختلف پارامترها، شرایط زمین‌شناسی مختلفی برای مسیر تونل به دست آمد که توسط ۱۰ نفر کارشناس تونل‌سازی، چند کلاس زمین (هر کدام شامل روش حفاری و سیستم نگهداری مخصوص) معرفی شد به گونه‌ای که هر کدام از این کلاس‌ها برای تعدادی از شرایط زمین به دست آمده جوابگو بودند. سپس از ترکیب پروفیل‌های پارامتر، پروفیلی به دست آمد که احتمال وقوع هر کدام از کلاس‌های زمین را در داخل هر سلول به دست می‌داد و پروفیل کلاس زمین نامیده شد.

از آنجایی که هر کلاس زمین یک‌زمان 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 PertMaster زمان و هزینه‌ی تمام بخش‌ها باهم جمع شدند. در نهایت به کمک نمودار پراکندگی، زمان و هزینه‌های متفاوتی با احتمال وقوع (عدم قطعیت)‌های مشخصی به دست آمد.

از آنجایی که بدنه‌ی اصلی این مطالعه به‌روزرسانی مدل DAT

مطالعه‌ی حاضر بر روی تونل همرو با طول ۱۳۱۰ متر و سطح مقطع ۹۷ مترمربع به‌عنوان بخشی از جاده‌ی جدید در دست احداث ساندج - مریوان صورت گرفته است. البته در زمان انجام این مطالعه، پروژه‌ی تونل همرو به اتمام رسیده بود و هدف از انتخاب این پروژه به‌عنوان مطالعه موردی، مقایسه‌ی زمان و هزینه‌ی حاصل از مدل DAT که در آن داده‌های قبل از شروع به ساخت تونل مورد استفاده قرار گرفته‌شده بود، با زمان و هزینه‌ی اجرای تونل در حالت واقعی بود و البته لازم به ذکر است که قبلاً تمام این کارها توسط نویسندگان در منابع [۱۲]، [۱۳] و [۱۴] انجام شده است؛ بنابراین در مقاله‌ی حاضر ضرورتی بر تکرار کارهای قبلی از جمله اعتبارسنجی مدل DAT دیده نشد بلکه بیش‌تر به بدنه‌ی اصلی مقاله‌ی حاضر که به‌روزرسانی مدل DAT در زمان حفاری است، پرداخته‌شده است.

ضرورت و اهمیت به‌روزرسانی مدل DAT از آنجا ناشی می‌شود که داده‌های ورودی DAT قبل از شروع به ساخت تونل به صورت احتمالاتی است و ممکن است این داده‌های اولیه دقیق نباشند و یا اشتباه باشند که در نتیجه می‌تواند منجر به افزایش عدم قطعیت‌ها و در نتیجه افزایش ریسک تصمیم‌گیری‌ها در مورد زمان و هزینه‌های به‌دست‌آمده شود، لذا می‌توان در زمان اجرای پروژه با دست‌یابی به داده‌های واقعی برای بخش‌های حفاری‌شده و تأثیر آن‌ها در مدل، عدم قطعیت‌ها را در مورد زمان و هزینه‌ی مورد نیاز اجرای بخش‌های حفاری نشده کاهش داد و جهت برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری‌های دقیق‌تر برای سایر بخش‌های حفاری‌شده از آن بهره گرفت که می‌تواند در بحث مدیریت پروژه بسیار حائز اهمیت باشد.

در ابتدا جهت برآورد زمان و هزینه، از داده‌های به‌دست‌آمده قبل از شروع به ساخت تونل استفاده‌شده و به‌منظور دست‌یابی به ماتریس‌های احتمال انتقال برای پارامترهای در نظر گرفته‌شده که در روش 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 مورد نظر، پرسشنامه‌هایی تهیه شد و به کمک افراد باتجربه، این پرسشنامه‌ها تکمیل شدند. در نهایت از مجموع جواب‌های مربوط به این پرسشنامه‌ها، یک جواب نهایی به دست آمد و در روابط آماری بکار گرفته شد.

روش کار به شیوه‌ای بود که در مدل زمین‌شناسی ابتدا کل

طول مورد انتظار حالت  $i$  ( $H_{X_i}$ ) در مسیر تونل.

ب) محاسبه ماتریس شدت انتقال پارامتر  $X$  ( $A_X$ ) به کمک احتمال انتقال و ضریب شدت انتقال مطابق فرمول (۲).

$$A_X = \begin{bmatrix} -C_{X_1} & C_{X_1}P_{X_{12}} & \dots & C_{X_1}P_{X_{1n}} \\ C_{X_2}P_{X_{21}} & -C_{X_2} & \dots & C_{X_2}P_{X_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{X_n}P_{X_{n1}} & C_{X_n}P_{X_{n2}} & \dots & -C_{X_n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ج) محاسبه ماتریس احتمال انتقال فاصله: بر اساس 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  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) : تعداد حالت‌های پارامتر  $X$  از پارامتر  $X$  در یک موقعیت معین ( $L$ ) نسبت به موقعیت اولیه  $(O_0)$  به فاصله  $u = (L - O_0)$  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، این احتمال‌ها را در نقاط بعدی پیش‌بینی نماید [۱] و [۱۰].

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

شکل ۱: پیش‌بینی احتمال وقوع حالت‌های پارامتر  $X$  در سایر بخش‌ها [۱۴].

برای محاسبه احتمال وقوع حالت‌های یک پارامتر معین (به‌عنوان مثال پارامتر  $X$ ) در یک سلول به فاصله مشخصی (فاصله  $u$ ) نسبت به سلول اولیه، ماتریسی بکار برده می‌شود که ماتریس احتمال انتقال فاصله  $V_X(u)$  نام دارد و به صورت فرمول (۳) تعریف می‌شود [۱۳].

$$V_X(u) = \{v_{X_{ij}}(u)\} \quad (3)$$

که در آن  $v_{X_{ij}}(u)$  احتمال وقوع حالت  $j$  از پارامتر  $X$  به فاصله  $u$  از سلول  $O_0$  بوده و دارای حالت  $i$  است. همچنین معادله (۳) را می‌توان به صورت معادله (۴) نیز بیان نمود [۱۳].

حین حفاری است، لذا بعد از دستیابی به زمان و هزینه نهایی به کمک داده‌های قبل از شروع به ساخت تونل، با به‌روزرسانی داده‌ها (به‌روزرسانی حالات پارامترهای نوع سنگ، RQD و آب زیرزمینی و همچنین به‌روزرسانی ماتریس‌های احتمال انتقال و شدت انتقال برای هرکدام از این پارامترها) برای ۱۰۰ متر حفاری‌شده از دو طرف ورودی و خروجی تونل، مدل به‌روزرسانی شد و عدم قطعیت‌های کم‌تری نسبت به حالت قبل از به‌روزرسانی برای زمان و هزینه‌ها به دست آمد.

## ۲- مدل زمین‌شناسی

شرایط زمین‌شناسی یک فاکتور اصلی در انتخاب روش حفاری و نگهداری است. از آنجایی که داده‌های مربوط به شرایط زمین‌شناسی مسیر تونل بسیار کم و یا اصلاً موجود نیست، توصیف پیش‌بینی‌ها بر اساس عدم قطعیت خواهد بود. مدل پیش‌بینی زمین‌شناسی با استفاده از داده‌های اولیه نظیر نقشه‌های زمین‌شناسی، بررسی‌های ژئوفیزیکی، بررسی‌های ژئوتکنیکی و ... به پیش‌بینی شرایط زمین‌شناسی مورد انتظار در مسیر تونل می‌پردازد. معمولاً شرایط مورد انتظار در مسیر تونل نمی‌تواند به صورت قطعی بیان شود و بنابراین باید از روش‌های آماری جهت بیان احتمالاتی این شرایط استفاده نمود. یکی از مهم‌ترین روش‌های آماری که به پیش‌بینی شرایط زمین‌شناسی می‌پردازد، مدل مارکوف است که حالت مربوط به هرکدام از پارامترها را با توجه به حالت قبل از آن تخمین می‌زند [۱]. در ادامه مراحل مختلف پیش‌بینی مدل زمین‌شناسی به ترتیب و به صورت مختصر ارائه شده است:

الف) 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 [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  $j$  و  $T_{ij}$  تعداد انتقال‌ها از حالت  $i$  به حالت  $j$  است.

مجموع انتقال‌ها از حالت  $i$  به سایر حالت‌های پارامتر مربوطه ( $n$  تعداد کل حالات پارامتر موردنظر).

$C_{X_i}$ : ضریب شدت انتقال حالت  $i$  که عبارت است از عکس

نظر افراد متخصص برآورد نمود و از آن جهت پیش‌بینی زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت تونل استفاده کرد.

#### ۴- به‌روزرسانی مدل DAT

در روش DAT به‌واسطه‌ی ناشناخته بودن شرایط زیرسطحی قبل از شروع به ساخت، در مورد داده‌های ورودی این ابزار عدم قطعیت‌هایی وجود دارد؛ ولی با شروع فرایند ساخت و حفاری بخش‌هایی از آن می‌توان با دستیابی به داده‌های واقعی در این بخش‌ها، مدل DAT را به‌روزرسانی نمود و در نتیجه، عدم قطعیت‌ها را در مورد زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت تونل کاهش داد. برای به‌روزرسانی DAT در صورت دستیابی به داده‌های واقعی که در نتیجه‌ی حفاری بخشی از آن به‌دست‌آمده‌اند، بایستی داده‌های واقعی را به‌جای داده‌های قبلی در موقعیت‌های مشابه جایگزین نموده و سپس کلیه‌ی مراحل روش DAT برای دو مدل زمین‌شناسی و مدل ساخت که در بخش‌های قبلی بیان شد، از اول تا آخر را دوباره اجرا نمود.

#### ۵- مدل مارکوف و شبیه‌سازی مونت کارلو

مدل مارکوف جهت پیش‌بینی شرایط زمین‌شناسی مسیر تونل در روش DAT بکار می‌رود. کار مدل مارکوف در روش DAT به‌گونه‌ای است که به کمک داده‌های موجود اولیه، شرایط زمین‌شناسی را برای بخش‌های حفاری نشده‌ی زمین پیش‌بینی می‌نماید. در روش DAT به‌منظور اجرای مدل مارکوف ابتدا کل مسیر تونل به بخش‌های مساوی تقسیم خواهد شد که هر بخش یک سلول نیز نامیده می‌شود. در مرحله‌ی بعد ممکن است تعداد سلول‌هایی در مسیر تونل باشند که حالات مربوط به پارامترهای در نظر گرفته‌شده در آن‌ها به‌صورت قطعی یا غیرقطعی مشخص باشند (برای مثال موقعیت گمانه‌ها و یا هر موقعیتی در مسیر تونل که داده‌های مربوط به حالات پارامترهای در نظر گرفته‌شده در آن‌ها مشخص باشند) که این موقعیت‌ها هرکدام در داخل یک سلول قرار خواهند گرفت و آن سلول، سلول مشاهده‌ای خواهد بود. کار مدل مارکوف، پیش‌بینی شرایط زمین‌شناسی برای پارامترهای در نظر گرفته‌شده درون سلول‌های مجهول به کمک سلول‌های مشاهده‌ای می‌باشد. برای مثال مطابق شکل (۲) ابتدا مدل مارکوف به کمک سلول‌های مشاهده‌ای سبزرنگ، اولین سلول مجهول را پیش‌بینی می‌کند سپس به همین ترتیب اولین

$$V_X(u) = \exp(uA_X) = I + uA_X + \frac{1}{2!} u^2 A_X^2 + \dots + \frac{1}{m!} u^m A_X^m \quad (4)$$

در معادله‌ی (۴)، I ماتریس واحد از مرتبه‌ی n (n تعداد حالت‌های پارامتر X) و m عدد خیلی بزرگی است که می‌تواند تا بی‌نهایت ادامه پیدا کند.

د محاسبه‌ی احتمال وقوع حالات پارامتر در شرایطی که در موقعیت  $O_0$ ، حالت پارامتر به‌طور قطعی مشخص نباشد و یک تابع جرم احتمال در مورد آن داده‌شده باشد. برای این حالت اجازه دهید  $S_{X_j}(u)$  احتمال وقوع حالت j از پارامتر X در موقعیت  $O_0 + u$  باشد، آنگاه معادله‌ی (۵) را خواهیم داشت [۱۲].

$$S_{X_j}(u) = \sum_{i=1}^n S_{X_i}(0) v_{X_{ij}}(u) \quad (5)$$

بعداً این که احتمال وقوع حالات تمام پارامترهای موردنظر در مسیر تونل به دست آمد، می‌توان به کمک آن‌ها پروفیل مربوط به هر پارامتر و در نهایت از ترکیب این پروفیل‌ها، 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 مسیر 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 دست‌یافت. مدل ساخت با در نظر گرفتن فرایند ساخت در مسیر تونل برای هر کلاس زمین، زمان و هزینه‌ی مورد انتظار را برآورد می‌کند. هر کلاس زمین دارای یک روش حفاری و سیستم نگهداری معینی است که در طول هر سیکل 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 سیکل از ساخت کلاس موردنظر را با تجربه‌از پروژه‌های اجراشده‌ی در شرایط مشابه و

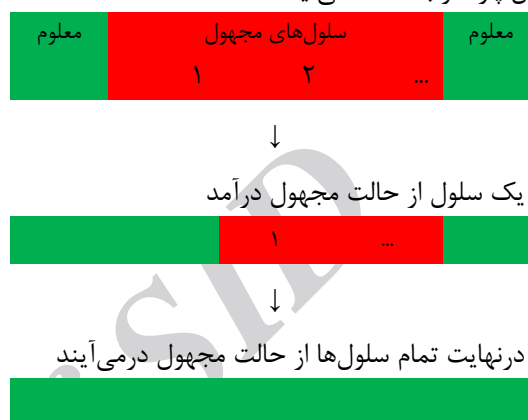
## ۶- به کارگیری مدل ابتکاری DAT در تونل همرو

### ۶-۱- سیمای پروژه‌ی تونل همرو

تونل راه همرو بخشی از جاده‌ی جدید در دست احداث سنندج - مریوان است که دارای طول حفاری ۱۳۱۰ متر و سطح مقطع ۹۷ مترمربع می‌باشد. این تونل در شرق استان کردستان، در ۵ کیلومتری شمال شویشه و در محدوده‌ای با طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۴۰ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۲۷ دقیقه واقع شده است. دهانه‌ی ورودی و خروجی تونل مذکور به ترتیب در کیلومتر ۹۲۰ + ۴ + ۲۳۲ قرار دارد. منطقه‌ی مورد مطالعه مربوط به زون سنندج-سیرجان و گسترده‌ترین واحد چینه‌شناسی تفکیک شده در منطقه از نظر سنی مربوط به پالئوسن ائوسن پایینی بوده و به لحاظ لیتولوژیکی متشکل از سنگ‌هایی از جنس شیل‌های ماسه‌ای همراه با عدسی‌های آهکی و سنگ‌های آتشفشانی می‌شود. از جمله سایر واحدهای چینه‌شناسی که در فواصل دورتر نسبت به منطقه‌ی مورد مطالعه رخمون دارند می‌توان به واحد چینه‌شناسی مربوط به کرتاسه‌ی بالایی پالئوسن اشاره کرد که از نظر لیتولوژی شامل شیل خاکستری و قرمز رنگ، آهک بارنگ‌های خاکستری، زرد و قرمز و همچنین لایه‌های ماسه‌سنگ می‌شود. همچنین می‌توان به رخمون‌های پراکنده‌ای از واحد سنگ - چینه‌ای در بخش‌های شمالی منطقه در نزدیکی روستای قلعه شیخان اشاره نمود که از نظر لیتولوژیکی از آهک‌های ماسه‌ای نومولیت‌دار تشکیل شده‌اند [۱۵].

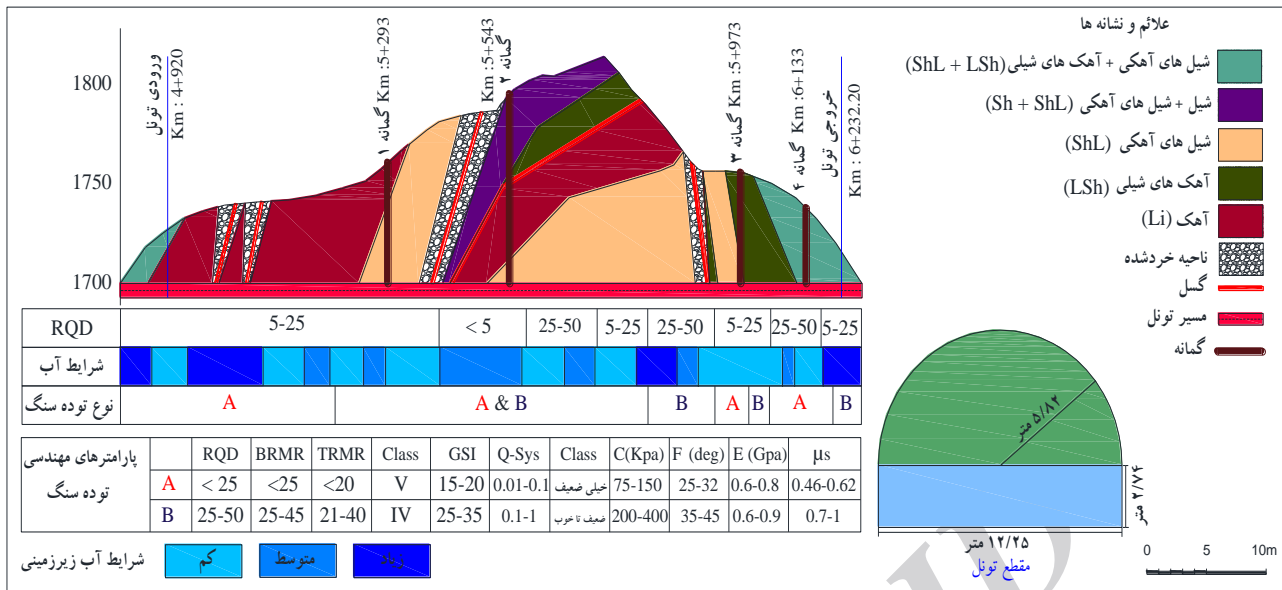
در نتیجه‌ی بررسی‌های انجام شده در بازدیدهای زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی صورت گرفته از منطقه، در مجموع چهار گونه‌ی زمین‌شناسی مهندسی در مسیر تونل قابل شناسایی و تفکیک از یکدیگر هستند. این گونه‌های زمین‌شناسی مهندسی عبارت‌اند از آهک (Li)، شیل (Sh)، تناوب شیل‌های ماسه‌ای و آهک‌های شیلی (ShL) و تناوب آهک و شیل (LSh). در شکل (۳) پروفیل طولی و سطح مقطع تونل همرو همراه با اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی نشان داده شده است. [۱۵].

سلول پیش‌بینی شده جای یکی از سلول‌های مشاهده‌ای اول را می‌گیرد و اولین سلول مجهول میان سلول‌های مشاهده‌ای جدید نیز پیش‌بینی می‌شود و این روند ادامه می‌یابد تا تمام سلول‌های مجهول پیش‌بینی شوند. در نتیجه به کمک مدل مارکوف برای هر پارامتر در نظر گرفته شده، حالات پارامتر به صورت احتمالاتی در کل مسیر تونل در پروفیلی تحت عنوان پروفیل پارامتر به دست می‌آید.



شکل ۲: روش کار مدل مارکوف در روش DAT.

روش شبیه‌سازی مونت کارلو در مدل ساخت روش DAT کاربرد دارد. در مدل ساخت بعد از اینکه زمان و هزینه‌ها برای روش‌های حفاری و سیستم‌های نگهداری متناسب با شرایط زمین‌شناسی پیش‌بینی شده در نظر گرفته شد، در داخل هر سلول هر کدام از روش‌های حفاری و سیستم‌های نگهداری که زمان و هزینه‌ی مخصوص به خود را دارند با احتمال مشخصی اتفاق خواهند افتاد. روش کار شبیه‌سازی مونت کارلو به این صورت است که در هر بار شبیه‌سازی، در داخل هر سلول یک زمان و هزینه را در نظر می‌گیرد و زمان و هزینه‌های تمام سلول‌ها را در هر بار شبیه‌سازی با هم جمع می‌کند. همچنین در روش شبیه‌سازی مونت کارلو در مجموع دوره‌های شبیه‌سازی در داخل هر سلول زمان و هزینه‌ای که با احتمال بیشتری اتفاق افتاده باشد، بیش‌تر تکرار خواهد شد. امروزه نرم‌افزارهای زیادی به منظور انجام شبیه‌سازی مونت کارلو موجود هستند که در این مطالعه از نرم‌افزار PertMaster بهره گرفته شده است.



شکل ۳: پروفیل طولی و سطح مقطع تونل همرو [۱۵].

سابقه‌ی کاری در پروژه‌های تونل‌سازی با توجه به پروفیل طولی تونل که قبل از شروع به ساخت تهیه‌شده بود، برآورد شد و درنهایت از میانگین نظرهای این افراد استفاده شد. سپس با معکوس کردن طول میانگین حالات، ضریب شدت انتقال هر کدام از حالت‌های پارامترها نیز مطابق جدول (۱) به دست آمد.

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
	۲۵ تا ۵	۶۵۰	۰/۰۰۱۵
	۲۵ تا ۵۰	۳۸۰	۰/۰۰۲۶
آب	کم	۶۲۰	۰/۰۰۱۶
	متوسط	۲۶۰	۰/۰۰۳۸
	زیاد	۴۳۰	۰/۰۰۲۳

## ۶-۲- مدل زمین‌شناسی تونل همرو

از جمله مهم‌ترین پارامترهایی که بر روی تونل‌زنی اثر می‌گذارند، عبارت‌اند از: نوع سنگ، RQD، جهت درزه‌داری، ناپیوستگی‌های اصلی، جریان آب، سختی، مقاومت فشاری و سیستوزیته [۱۰].

در این مطالعه چون در ابتدا داده‌های مربوط به سه پارامتر نوع سنگ، RQD و آب زیرزمینی به صورت دقیق‌تر موجود بودند و به دلیل عدم اطمینان از صحت داده‌های در دسترس مربوط به سایر پارامترها، بنابراین این سه پارامتر به عنوان پارامترهای زمین‌شناسی در نظر گرفته شدند که حالت‌های مربوط به هر کدام از پارامترها در ادامه ارائه شده است.

۱- پارامتر نوع سنگ با چهار حالت (حالت ۱: آهک (Li)، حالت ۲: شیل (Sh)، حالت ۳: تناوب شیل‌های ماسه‌ای و آهک‌های شیلی (SHL)، حالت ۴: تناوب آهک و شیل (LSH))

۲- پارامتر RQD با سه حالت (حالت ۱: کم‌تر از ۵، حالت ۲: ۵ تا ۲۵، حالت ۳: ۲۵ تا ۵۰)

۳- پارامتر آب زیرزمینی با ۳ حالت (حالت ۱: کم، حالت ۲: متوسط، حالت ۳: زیاد)

مطابق جدول (۱)، برای هر حالت از سه پارامتر در نظر گرفته‌شده، طول میانگین به کمک نظرات افراد کارشناس تونل‌سازی با حداقل تحصیلات کارشناسی ارشد در رشته‌های مهندسی معدن و زمین‌شناسی و همچنین حداقل ۵ سال

به منظور پیش‌بینی احتمال وقوع هر کدام از حالت‌های پارامترها (پروفیل پارامتر) در مسیر تونل همرو به کمک مدل مارکوف، فاصله‌ی میان هر دو سلول مشاهده‌ای به تعداد سلول‌هایی با طول هر کدام برابر ۱۰ متر مطابق شکل (۴) تقسیم شد.

ماتریس‌های پارامتر نوع سنگ:

$$P_T = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0.24 & 0.74 & 0.02 \\ 0.48 & 0 & 0.48 & 0.04 \\ 0.28 & 0.28 & 0 & 0.44 \\ 0.01 & 0.01 & 0.98 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$A_T = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -0.0031 & 0.0007 & 0.0022 & 0.0002 \\ 0.0039 & -0.0083 & 0.0039 & 0.0005 \\ 0.0003 & 0.0003 & -0.0012 & 0.0006 \\ 0.00015 & 0.00015 & 0.0108 & -0.0111 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

ماتریس‌های پارامتر RQD:

$$P_d = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0.10 & 0.90 \\ 0.05 & 0 & 0.95 \\ 0.33 & 0.67 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$A_d = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -0.0035 & 0.0003 & 0.0032 \\ 0.0001 & -0.0015 & 0.0014 \\ 0.0008 & 0.0018 & -0.0026 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

ماتریس‌های پارامتر آب زیرزمینی:

$$P_w = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0.72 & 0.28 \\ 0.50 & 0 & 0.50 \\ 0.28 & 0.72 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$A_w = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -0.0016 & 0.00115 & 0.00045 \\ 0.0019 & -0.0038 & 0.0019 \\ 0.0006 & 0.0017 & -0.0023 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

در ادامه به کمک پرسشنامه‌هایی که در اختیار ۱۰ نفر کارشناس تونل‌سازی با مشخصات فوق‌الذکر قرار داده شد، ماتریس‌های احتمال انتقال و شدت انتقال برای هر کدام از پارامترها همان‌طور که در ادامه آورده شده است، به دست آمد. روش تعیین هر کدام از درایه‌های ماتریس احتمال انتقال به این شکل است که در ابتدا هر فرد کارشناس کل مسیر تونل را به بخش‌های مساوی که تقسیم می‌کند. سپس به کمک پروفیل طولی تونل و داده‌های موجود، برای هر پارامتر مشخص می‌کند که اگر در مسیر تونل از یک بخش تعیین‌شده وارد بخش بعدی شویم، برای چند بار حالت پارامتر تغییر می‌کند. همچنین مشخص می‌سازد که در هر انتقال، حالت پارامتر از چه حالتی به چه حالت دیگری تغییر یافته است. در صورتی که حالت پارامتر تغییر نکند و در همان حالت خود باقی بماند، تحت عنوان یک انتقال به حساب نمی‌آید به عبارتی دیگر زمانی می‌گوییم انتقال صورت گرفته است که اگر از یک بخش وارد بخش بعدی شویم، حالت پارامتر به حالتی دیگر تغییر کند به همین خاطر در ماتریس‌های احتمال انتقال، احتمال انتقال از یک حالت به خودش برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. بعد از اینکه تعداد انتقال‌ها از یک حالت به سایر حالت‌ها برای هر پارامتر مشخص شد می‌توان درایه‌های ماتریس احتمال انتقال را محاسبه نمود. برای مثال اگر پارامتر نوع سنگ را با چهار حالت در نظر بگیریم و بخواهیم درایه‌های سطر اول ماتریس احتمال انتقال را محاسبه کنیم، تعداد انتقال از حالت اول به سایر حالت‌های ۲، ۳ و ۴ را باید داشته باشیم. برای محاسبه‌ی احتمال انتقال از حالت ۱ به حالت ۲ باید تعداد انتقال‌ها از حالت ۱ به حالت ۲ را بر مجموع کل انتقال‌ها از حالت ۱ به حالت‌های ۲، ۳ و ۴ تقسیم کنیم. سایر درایه‌ها نیز به همین صورت تعیین می‌شوند و در نهایت می‌توانیم آن‌ها را به صورت درصدی بیان کنیم. حال با توجه به فرمول ماتریس شدت انتقال که قبلاً بیان شد (فرمول (۲))، به کمک ضریب شدت انتقال و ماتریس احتمال انتقال، ماتریس شدت انتقال نیز برای هر پارامتر به دست می‌آید.



از این رو این سلول‌ها نیز به صورت سلول‌های مشاهده‌ای غیرقطعی در نظر گرفته شدند و احتمال وقوع حالت‌های مختلف پارامترها برای آن‌ها توسط افراد کارشناس با بهره‌گیری از پروفیل زمین‌شناسی و داده‌های حاصل از گمانه‌ها، ارزیابی شدند. روش ارزیابی به‌گونه‌ای است که هر فرد کارشناس با توجه به داده‌های اولیه و داده‌های مربوط به موقعیت گمانه‌ها که در اختیار او قرار داده شده است، احتمال وقوع هر کدام از حالات پارامترها را در موقعیت سلول‌های مشاهده‌ای تخمین می‌زند. در نتیجه از میانگین‌گیری نظرات ۱۰ فرد کارشناس، احتمال وقوع هر حالت در داخل سلول‌های مشاهده‌ای به صورت جدول (۲) به دست آمد.

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 به دست آوردن پروفیل‌های پارامتر، چون احتمال وقوع حالت‌ها در موقعیت سلول‌های مشاهده‌ای به صورت غیرقطعی بیان شد، از فرمول (۶) استفاده شده است [۱].

فرمول (۶) مربوط به سلول‌های مجهول میان دو سلول مشاهده‌ای مانند  $O_1$  و  $O_2$  (سلول ورودی و گمانه‌ی ۱) است که احتمال وقوع هر کدام از حالت‌های سه پارامتر آب زیرزمینی، RQD و نوع سنگ را در سلول مجهول  $L$  پیش‌بینی می‌نماید. در فرمول (۶) که برای شکل (۵) بیان شده است، داریم:

$w$  و  $m$ : تابع چگالی احتمال حالت‌های یک پارامتر معین در سلول‌های مشاهده‌ای  $O_{t-1}$  و  $O_t$ .

$n$ : تعداد حالت‌های پارامتر مورد نظر.

پورتال ورودی ۱۰ متر	۳۶ سلول ۱۰ متری	گمانه ۱ ۱۰ متر	۲۴ سلول ۱۰ متری	گمانه ۲ ۱۰ متر	۴۲ سلول ۱۰ متری	گمانه ۳ ۱۰ متر	۱۵ سلول ۱۰ متری	گمانه ۴ ۱۰ متر	۸ سلول ۱۰ متری	پورتال خروجی ۱۰ متر
------------------------	-----------------	-------------------	-----------------	-------------------	-----------------	-------------------	-----------------	-------------------	----------------	------------------------

شکل ۴: تعداد و موقعیت سلول‌های مشاهده‌ای در مسیر تونل همرو.

با توجه به شکل (۴)، سلول‌های مشاهده‌ای مربوط به گمانه‌ها و پورتال ورودی و خروجی تونل به صورت رنگی نشان داده شده‌اند و برای هر کدام از این حالت‌های مشاهده‌ای، یک سلول با طول ۱۰ متر در نظر گرفته شده است؛ بنابراین در کل مسیر تونل، شش سلول مشاهده‌ای موجود بودند که همه‌ی آن‌ها به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شدند. دلیل در نظر گرفتن سلول‌های مشاهده‌ای ابتدا و انتهای تونل (در ورودی و خروجی تونل) به صورت غیرقطعی این بود که ابتدا از هر دو طرف نیاز به خاک‌برداری فاصله‌ی حدود ۱۰۰ متر به دلیل میزان روباره‌ی کم بود و از آن به بعد حفاری تونل به طول ۱۳۱۰ متر شروع می‌شد؛ بنابراین به صورت قطعی برای این دو سلول، حالت‌های پارامترها با توجه به داده‌های قبل از شروع به خاک‌برداری ۱۰۰ متر از ورودی و خروجی تونل مشخص نشد ولی چون به قسمت ابتدا و انتهای تونل نزدیک بود و همچنین به دلیل میزان روباره‌ی کم، توانسته شد که احتمال وقوع حالت‌های هر کدام از پارامترها به صورت غیرقطعی توسط افراد متخصص برآورد شود و در نتیجه این دو سلول به عنوان دو سلول مشاهده‌ای غیرقطعی در نظر گرفته شدند. برای چهار سلول مشاهده‌ای گمانه‌ی ۱، گمانه‌ی ۲، گمانه‌ی ۳ و گمانه‌ی ۴ نیز که مربوط به موقعیت گمانه‌ها بودند، حالت غیرقطعی در نظر گرفته شد زیرا در موقعیت گمانه‌ها با داده‌های به دست آمده نمی‌توان به صورت کاملاً قطعی در مورد نوع حالت پارامتر مورد نظر اظهار نظر کرد،

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

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

پارامتر	سلول‌های مشاهده‌ای					
	ورودی	گمانه ۱	گمانه ۲	گمانه ۳	گمانه ۴	خروجی
نوع سنگ	حالت ۱	۰/۸۰	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۳
	حالت ۲	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۵۴	۰/۰۳	۰/۰۲
	حالت ۳	۰/۰۶	۰/۸۵	۰/۴۰	۰/۹۵	۰/۱۰
	حالت ۴	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۸۵
RQD	حالت ۱	۰/۰۹	۰/۹۵	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۰۱
	حالت ۲	۰/۹۰	۰/۰۴	۰/۸۰	۰/۱۵	۰/۹۰
	حالت ۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۸۰	۰/۰۹
آب زیرزمینی	حالت ۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۸۵	۰/۰۳
	حالت ۲	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۹۵	۰/۱۰	۰/۰۷
	حالت ۳	۰/۹۰	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۹۰

سلول	$X(O_1)$	$X(L_0)$	$X(L_1)$	...	$X(L_{35})$	$X(O_2)$
حالت	m	$z_0$	$z_1$	...	$z_{35}$	w
سلول	$X(O_2)$	$X(L_{37})$	$X(L_{38})$	...	$X(L_{60})$	$X(O_3)$
حالت	m	$z_{37}$	$z_{38}$	...	$z_{60}$	w
سلول	$X(O_3)$	$X(L_{62})$	$X(L_{63})$	...	$X(L_{103})$	$X(O_4)$
حالت	m	$z_{62}$	$z_{63}$	...	$z_{103}$	w
سلول	$X(O_4)$	$X(L_{105})$	$X(L_{106})$	...	$X(L_{119})$	$X(O_5)$
حالت	m	$z_{105}$	$z_{106}$	...	$z_{119}$	w
سلول	$X(O_5)$	$X(L_{121})$	$X(L_{122})$	...	$X(L_{128})$	$X(O_6)$
حالت	m	$z_{121}$	$z_{122}$	...	$z_{128}$	w

شکل ۵ - روش پیش‌بینی احتمال وقوع هر کدام از حالت‌های پارامترها در داخل سلول‌های مجهول میان هر دو سلول مشاهده‌ای. طول هر سلول برابر ۱۰ متر در نظر گرفته شده و سلول‌های مشاهده‌ای به صورت رنگی نمایان شده‌اند.

سلول مشاهده‌ای  $O_t$  به شرط این‌که حالت در سلول  $L$ ،  $z$  باشد.

سلول  $L$  به شرط این‌که حالت در سلول مشاهده‌ای  $O_{t-1}$ ،  $m$  باشد.

سلول  $L$  به شرط اینکه حالت در سلول مشاهده‌ای  $O_{t-1}$ ،  $m$  باشد.

سلول مشاهده‌ای  $O_t$  به شرط این‌که حالت  $w$  از پارامتر  $X$  در

سلول مشاهده‌ای  $O_{t-1}$ ،  $m$  باشد.

بعد از پیدا کردن احتمال وقوع حالت‌ها در سلول مجهول  $L$ ،

نوبت به سلول مجهول  $L_1$  می‌رسد به گونه‌ای که در فرمول (۶)،  $L_1$  جایگزین  $L$  و  $z_1$  جایگزین  $z$  خواهد شد و به همین

در سلول  $L$  به شرط این‌که حالت در سلول مشاهده‌ای  $O_{t-1}$ ،  $m$  باشد (بالانویس ns معرف چند مشاهده‌ی غیرقطعی است).

احتمال وقوع حالت  $z$  از پارامتر  $X$  در سلول  $L$  به شرط این‌که حالت در سلول مشاهده‌ای  $O_{t-1}$ ،  $m$  باشد (بالانویس ns معرف چند مشاهده‌ی غیرقطعی است).

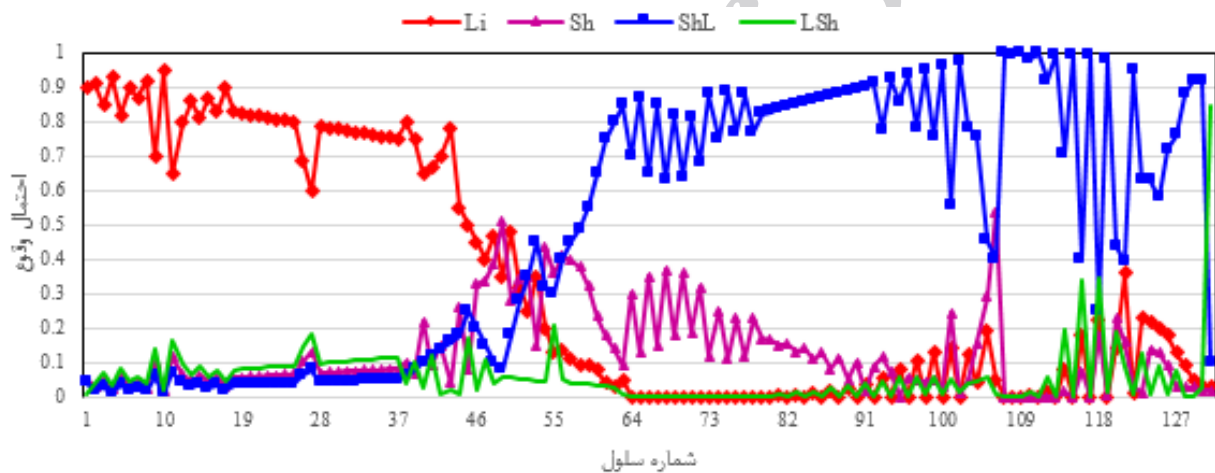
احتمال این‌که حالت پارامتر  $X$  در سلول مشاهده‌ای  $O_{t-1}$ ،  $m$  باشد (بالانویس ns معرف چند مشاهده‌ی غیرقطعی است).

احتمال این‌که حالت پارامتر  $X$  در سلول مشاهده‌ای  $O_t$ ،  $w$  باشد (بالانویس ns معرف چند مشاهده‌ی غیرقطعی است).

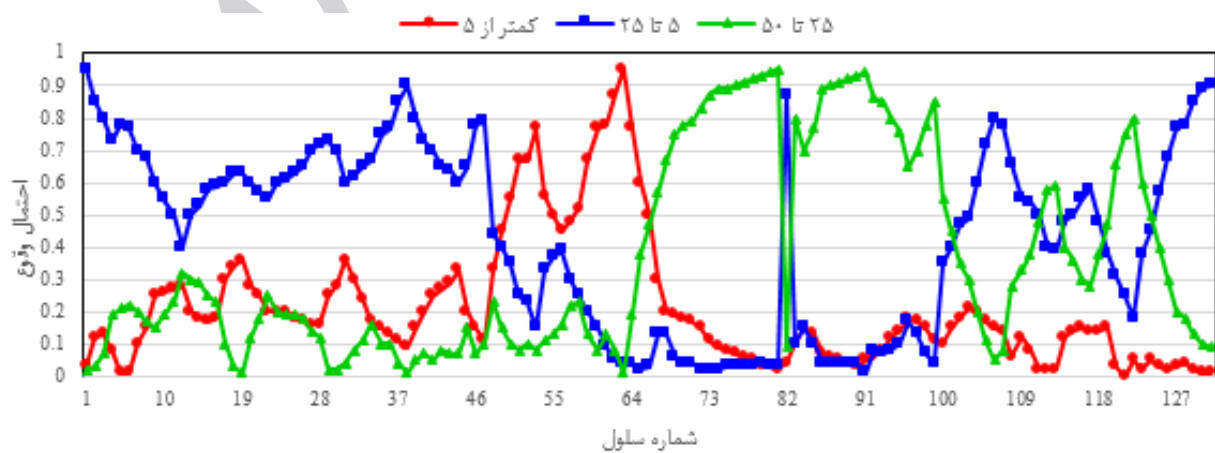
احتمال وقوع حالت  $w$  از پارامتر  $X$  در سلول مشاهده‌ای  $O_{t-1}$ ،  $m$  باشد (بالانویس ns معرف چند مشاهده‌ی غیرقطعی است).

احتمال وقوع حالات به صورت زیگزاگی و با تغییرات سریعی همراه هستند که در چنین وضعیتی می توان گفت نتایجی که برای ماتریس های احتمال انتقال و شدت انتقال به دست آمده است با نتایج حاصل از نظر افراد کارشناس برای موقعیت گمانه ها متفاوت و یا شباهت کمتری باهم دارند؛ بنابراین هرچه داده های ورودی روش DAT دقیق تر باشند، در پروفیل های پارامتر کم تر حالت زیگزاگی و تغییرات سریع برای احتمال وقوع حالات یک پارامتر در مسیر تونل اتفاق می افتد. البته چنین مشکلی می تواند حین حفاری تونل و با دستیابی به داده های واقعی پارامترهای در نظر گرفته شده برای بخش های حفاری شده برطرف شود و کم تر با چنین تغییرات سریعی مواجه شد. یکی از موارد مهمی هم که در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته است همین موضوع است که در قسمت به روزرسانی داده ها حین حفاری به آن پرداخته خواهد شد.

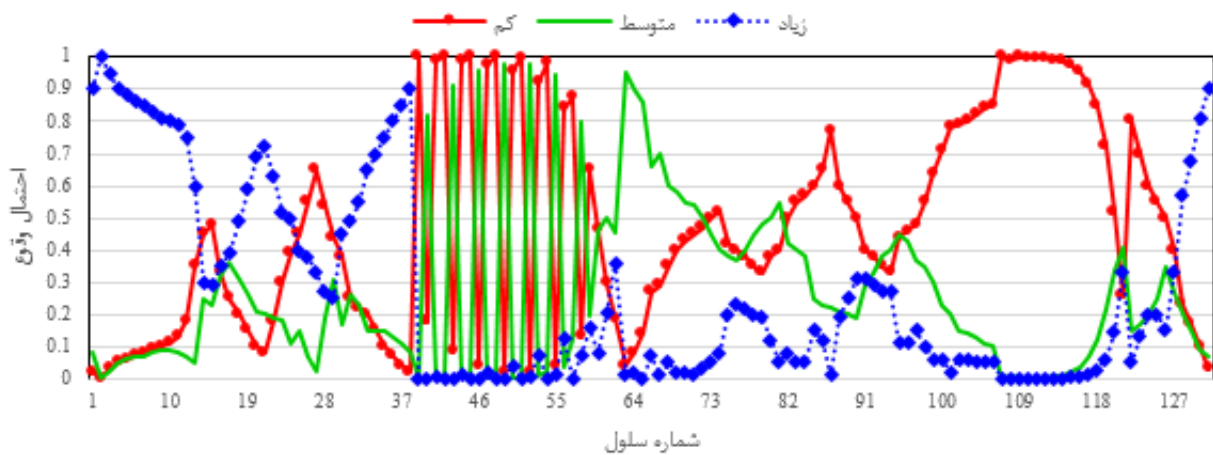
ترتیب برای سایر سلول های مجهول تا به سلول مجهول آخر در فاصله ی میان دو مشاهده می رسد. به منظور پیدا کردن احتمال وقوع هر کدام از حالت های پارامترهای در نظر گرفته شده، فرمول (۶) در نرم افزار MATLAB کدنویسی شد [۱۶]. در نهایت احتمال وقوع حالت های هر پارامتر در داخل هر سلول در مسیر تونل، مطابق شکل های (۶، ۷ و ۸) به دست آمد. این پروفیل ها که تحت عنوان پروفیل پارامتر از آن ها نام برده می شود اگر با پروفیل طولی تونل که در شکل (۳) نشان داده شد مقایسه شوند، ارتباط خوبی را می توان میان آن ها مشاهده کرد به طوری که اگر در پروفیل طولی تونل در موقعیتی یک حالت مشخصی از یک پارامتر اتفاق افتاده باشد در پروفیل پارامتر نیز همان حالت در همان موقعیت در بیش تر موارد با احتمال بیش تری اتفاق افتاده است. همچنین در پروفیل های پارامتر در بعضی از موقعیت ها



شکل ۶: پروفیل پارامتر نوع سنگ.



شکل ۷: پروفیل پارامتر RQD.



شکل ۸: پروفیل پارامتر شرایط آب زیرزمینی.

جدول ۳: معرفی بردارهای زمین‌شناسی مربوط به هرکدام از کلاس‌های زمین در نظر گرفته شده.

شماره کلاس زمین	حالت پارامتر نوع سنگ	حالت پارامتر <i>RQD</i>	حالت پارامتر آب زیرزمینی
۱	۱، ۲، ۳، ۴	۱	۱، ۲، ۳
۲	۲	۲	۲، ۳
۳	۲	۳	۱، ۲، ۳
۴	۱، ۲، ۳	۳	۳
۵	۲، ۳، ۴	۲	۱، ۲، ۳

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 شد. برای این کار، ابتدا داده‌های به‌دست‌آمده برای تشکیل پروفیل‌های پارامتر در نرم‌افزار Excel وارد شدند. سپس با توجه به جدول (۳) که بردار یا بردارهای زمین‌شناسی هر کلاس زمین را معرفی می‌نماید، احتمال وقوع هرکدام از کلاس‌های زمین در داخل هر سلول در نرم‌افزار Excel به دست آمد.

با توجه به پارامترها و حالت‌های در نظر گرفته شده برای هرکدام از آن‌ها، درکل  $36 (= 3 \times 3 \times 4)$  شرایط (بردار) مختلف زمین‌شناسی می‌تواند در کل مسیر تونل اتفاق بیفتد. بدیهی است که نمی‌توان برای هرکدام از این شرایط یک روش حفاری و سیستم نگهداری در نظر گرفت بلکه چند روش حفاری و سیستم نگهداری (در این مطالعه ۵ تا) می‌توان در نظر گرفت که هرکدام برای تعدادی از این بردارهای زمین‌شناسی مناسب باشند. این بردارهای زمین‌شناسی به کمک پرسشنامه در تعداد ۵ کلاس مطابق جدول (۳) جای گرفتند که مشخصات مربوط به هرکدام از کلاس‌های زمین در نظر گرفته شده در جدول (۴) آمده است. برای دستیابی به جدول‌های (۳) و (۴) نیازی نیست که از نظر چند فرد کارشناس استفاده شود و تنها یک فرد کارشناس با تجربه در زمینه‌ی ساخت چنین تونل‌های جاده‌ای کفایت می‌کند. در این مطالعه برای دستیابی به این داده‌ها از نظر فردی کارشناس با مدرک تحصیلی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی معدن/گرایش مکانیک سنگ با حداقل ۱۵ سال سابقه‌ی کاری در زمینه‌ی ساخت تونل‌های کوهی و جاده‌ای بهره گرفته شد. در ابتدا فرد کارشناس با تجربه از پروژه‌های اجراشده‌ی قبلی در شرایط مشابه پنج کلاس زمین از خیلی ضعیف تا متوسط تا خوب مطابق جدول (۴) در نظر گرفت. سپس هرکدام از شرایط مختلف زمین‌شناسی با توجه به پارامترها و حالات مختلف در نظر گرفته شده برای هرکدام از آن‌ها را در کلاس قابل اجرا برای آن جای داد و در نهایت جدول (۳) به دست آمد.

(RQD) و حالت  $k$  از پارامتر آب زیرزمینی ( $k$  یکی از سه حالت پارامتر آب زیرزمینی) با احتمال مشخصی اتفاق می‌افتد؛ بنابراین برای پیدا کردن احتمال وقوع هر کلاس زمین در یک سلول معین بایستی برای هر بردار  $(i,j,k)$  مربوط به آن کلاس، احتمال وقوع حالت  $i$ ،  $j$  و  $k$  را در داخل آن سلول مشخص نموده و سپس این احتمال‌ها را برای هر بردار در هم ضرب نمود. اگر کلاس زمین شامل چند بردار زمین‌شناسی باشد، برای هر کدام از بردارها باید در داخل هر سلول این محاسبات را انجام داده و در نهایت آن‌ها را باهم جمع نمود 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  $l$  نشان داده شده است:

$$\begin{aligned}
 & P[g(l) \text{ belongs to } GC_r] \\
 &= P[g(l) = g_{11}] + P[g(l) = g_{12}] \\
 &+ P[g(l) = g_{13}] + P[g(l) = g_{14}] \\
 &+ P[g(l) = g_{15}] + P[g(l) = g_{16}] \\
 &+ P[g(l) = g_{17}] + P[g(l) = g_{18}] \\
 &= P[r(l) = 1 \text{ and } d(l) = 2 \text{ and } w(l) = 1] \\
 &+ P[r(l) = 1 \text{ and } d(l) = 2 \text{ and } w(l) = 2] \\
 &+ P[r(l) = 1 \text{ and } d(l) = 2 \text{ and } w(l) = 3] \\
 &+ P[r(l) = 4 \text{ and } d(l) = 2 \text{ and } w(l) = 1] \\
 &+ P[r(l) = 4 \text{ and } d(l) = 2 \text{ and } w(l) = 2] \\
 &+ P[r(l) = 4 \text{ and } d(l) = 2 \text{ and } w(l) = 3] \\
 &+ P[r(l) = 1 \text{ and } d(l) = 3 \text{ and } w(l) = 3] \\
 &+ P[r(l) = 3 \text{ and } d(l) = 3 \text{ and } w(l) = 3] \\
 & [g(l) \text{ belongs to } GC_r] \\
 &= P[r(l) = 1] * P[d(l) = 2] * P[w(l) = 1] \\
 &+ P[r(l) = 1] * P[d(l) = 2] * P[w(l) = 2] \\
 &+ P[r(l) = 1] * P[d(l) = 2] * P[w(l) = 3] \\
 &+ P[r(l) = 4] * P[d(l) = 2] * P[w(l) = 1] \\
 &+ P[r(l) = 4] * P[d(l) = 2] * P[w(l) = 2] \\
 &+ P[r(l) = 4] * P[d(l) = 2] * P[w(l) = 3] \\
 &+ P[r(l) = 1] * P[d(l) = 3] * P[w(l) = 3] \\
 &+ P[r(l) = 3] * P[d(l) = 3] * P[w(l) = 3]
 \end{aligned}$$

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

شماره کلاس زمین	مشخصات
۱	روش تونل‌های جانبی - نگهداری: IPE 180 (خیلی ضعیف) فاصله‌داری ۰/۷۵ - ۰/۵ متر و ۲۰ سانتی‌متر شاکریت تقویت‌شده به‌وسیله‌ی دولایه مش $\phi 8 @ 100 \times 100$ mm
۲	روش دیافراگم مرکزی - نگهداری: IPE 180 (ضعیف) فاصله‌داری ۱ - ۰/۷۵ متر و ۲۰ سانتی‌متر شاکریت تقویت‌شده به‌وسیله‌ی دولایه مش $\phi 6 @ 100 \times 100$ mm
۳	روش طاق و پطاق - نگهداری: IPE 180 (ضعیف تا متوسط) فاصله‌داری ۱/۲ - ۱ متر و ۲۰ سانتی‌متر شاکریت تقویت‌شده به‌وسیله‌ی دولایه مش $\phi 8 @ 100 \times 100$ mm
۴	روش طاق و پطاق - نگهداری: IPE 180 (متوسط) بولت تمام تزریقی، $\phi 25$ mm, L : 4-6 m ، فاصله‌داری $2 \times 2$ و $2 \times 1.5$ سانتی‌متر شاکریت تقویت‌شده به‌وسیله‌ی دولایه مش $\phi 6 @ 100 \times 100$ mm
۵	روش طاق و پطاق - نگهداری: IPE 180 (متوسط تا خوب) بولت تمام تزریقی، $\phi 25$ mm, L : 4-6 m ، فاصله‌داری $2 \times 2$ و $2 \times 1.0$ سانتی‌متر شاکریت تقویت‌شده به‌وسیله‌ی یک‌لایه مش $\phi 6 @ 100 \times 100$ mm

به‌منظور بیان شیوه‌ی کار در نرم‌افزار Excel جهت دستیابی به احتمال وقوع هر کلاس زمین در داخل هر کدام از سلول‌ها برای این مطالعه، کلاس زمین ۳ را در نظر می‌گیریم که مطابق جدول (۳) شامل ۸ بردار زمین‌شناسی زیر است:

$$\begin{aligned}
 g_{11} &= (1, 2, 1) & g_{12} &= (1, 2, 2) \\
 g_{13} &= (1, 2, 3) & g_{14} &= (4, 2, 1) \\
 g_{15} &= (4, 2, 2) & g_{16} &= (4, 2, 3) \\
 g_{17} &= (1, 3, 3) & g_{18} &= (3, 3, 3)
 \end{aligned}$$

در این مطالعه اگر هر کدام از بردارها را به‌صورت  $(i,j,k)$  در نظر بگیریم،  $i$ ،  $j$  و  $k$  به ترتیب بیان‌کننده 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 این کلاس برای هر سلول، حالت  $i$  از پارامتر نوع سنگ ( $i$  یکی از چهار پارامتر نوع سنگ)، حالت  $j$  از پارامتر RQD ( $j$  یکی از سه حالت پارامتر

وقوع هر کدام از کلاس‌های زمین را در داخل تمام سلول‌ها به دست می‌دهد و به‌عنوان پروفیل کلاس زمین شناخته شده است. هدف مدل زمین‌شناسی، دستیابی به پروفیل کلاس زمین است تا بتوان از آن به‌عنوان ورودی مدل ساخت استفاده نمود.

در شکل (۹) نیز همانند پروفیل‌های پارامتر، حالت زیگزگی و تغییرات سریع در احتمال وقوع کلاس‌های زمین مشاهده می‌شود که این وضعیت نیز به دلیل همان پروفیل‌های پارامتر است به‌گونه‌ای که اگر داده‌های اولیه دقیق نباشند علاوه بر پروفیل‌های پارامتر، بر روی پروفیل کلاس زمین هم تأثیرگذار هستند و یا به عبارتی هر چه پروفیل‌های پارامتر دقیق‌تر باشند، پروفیل کلاس زمین دقیق‌تری به دست می‌آید.

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

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

$d(l)$ : حالت پارامتر RQD در سلول  $l$

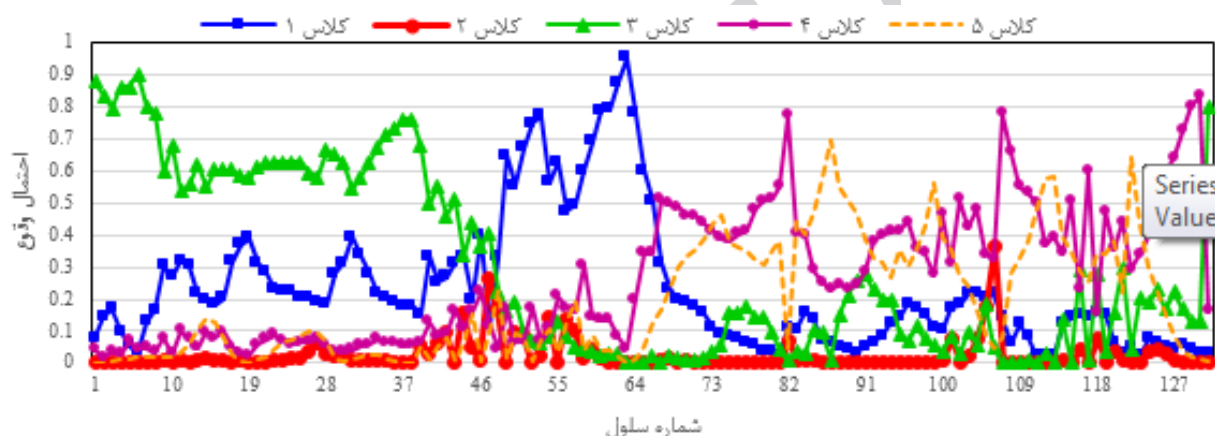
$w(l)$ : حالت پارامتر آب زیرزمینی در سلول  $l$

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

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

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

برای سایر کلاس‌های زمین نیز به این صورت عمل شد و درنهایت با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده برای هر کلاس زمین، پروفیلی مطابق شکل (۹) به دست آمد. این پروفیل، احتمال



شکل ۹: پروفیل کلاس زمین.

حداکثر برای هر سیکل ساخت از کلاس‌های زمین به دست آید. سپس از میانگین‌گیری نظرهای ارائه شده به‌وسیله افراد کارشناس مختلف برای هر کلاس زمین، زمان و هزینه حداقل، متوسط و حداکثر به ازای هر ده متر ساخت (هر سلول) مطابق جدول (۵) به دست آمد. همچنین از آنجایی‌که هزینه‌های ساخت سال‌به‌سال در حال افزایش است، بنابراین، میزان حداقل، متوسط و حداکثر افزایش هزینه‌ها به‌صورت سالیانه توسط افراد کارشناس به دست آمد و درنهایت با تبدیل این افزایش هزینه‌ها برای هر ده متر از کلاس‌های زمین، میزان حداقل، متوسط و حداکثر افزایش هزینه‌ها به‌صورت سالیانه نیز برای هر سلول مطابق جدول (۵) به دست آمد. نکته‌ای که بایستی در این مطالعه مدنظر قرار گیرد، این است

## ۷- مدل ساخت برای تونل همرو

در مدل ساخت، زمان و هزینه 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 (۱۰ نفر) خواسته شد که ابتدا برای هر کدام از کلاس‌های زمین، فعالیت‌هایی که یک سیکل ساخت (حفاری و نگهداری) از کلاس موردنظر را کامل نماید در نظر بگیرند؛ سپس به کمک این فعالیت‌ها، میزان زمان و هزینه حداقل، متوسط و حداکثر مربوط به هر فعالیت (برای سال ۱۳۹۴) را با تجربه از پروژه‌های اجراشده قبلی در شرایط زمین‌شناسی مشابه تقریب زده تا درنهایت زمان و هزینه حداقل، متوسط و

داده‌ها در نرم‌افزار *PertMaster* می‌توان نسبت به اجرای شبیه‌سازی مونت‌کارلو اقدام نمود. در خلال اجرای شبیه‌سازی، برنامه‌ی تهیه‌شده به تعداد مشخصی تکرار می‌شود. در هر یک از این تکرارها، مقادیر غیرقطعی برنامه (در این مطالعه زمان و هزینه) بر اساس توزیع‌ها و داده‌های واردشده به صورت تصادفی تعیین می‌شوند. نرم‌افزار *PertMaster* در انتهای هر تکرار، میزان زمان و هزینه‌ی نهایی را در خود ذخیره‌سازی می‌نماید. پس از اتمام کلیه‌ی تکرارها، از این مقادیر برای رسم نمودارهای موردنظر و نیز تهیه‌ی تابع احتمالی مربوط به اجرای هر یک از این موارد استفاده می‌شود.

به دلیل این‌که برای هرکدام از زمان و هزینه‌ها سه مقدار حداقل، متوسط و حداکثر موجود بود، بنابراین در نرم‌افزار *PertMaster* به منظور اجرای شبیه‌سازی از توابع توزیع مثلثی استفاده شد.

در نهایت بعد از اجرای شبیه‌سازی مونت‌کارلو (برای ۱۰۰۰۰ بار تکرار)، نمودار پراکندگی زمان - هزینه به صورت شکل (۱۰) به دست آمد. در شکل (۱۰) زمان و هزینه‌ی حداقل و حداکثر نشان داده شده است و می‌توان به عنوان یک حالت بهینه نقطه‌ای را به عنوان زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت تونل انتخاب کرد که دارای بیش‌ترین تکرار در اجرای شبیه‌سازی‌ها باشد.

که در پرسشنامه، جهت برآورد زمان و هزینه‌ها برای هر سیکل ساخت از یک کلاس زمین معین، از افراد کارشناس خواسته شد تا فرض کنند تونل تنها از یک طرف (ورودی یا خروجی) حفاری شود و نتایج به دست آمده برای زمان و هزینه‌های ساخت نیز برای این فرض است. همچنین در برآورد زمان و هزینه‌ها، روسازی کف تونل (عملیات مربوط به ساخت جاده‌ی تونل) در نظر گرفته نشده است.

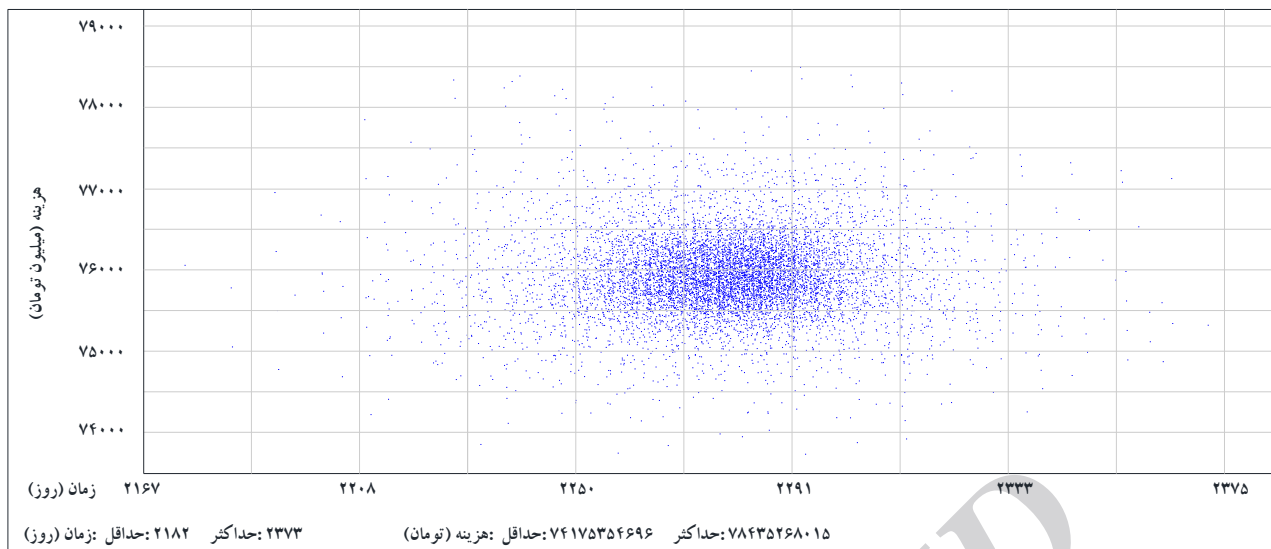
حال بعد از دست‌یابی به زمان و هزینه‌های اجرای ساخت هر سلول (ده متر طول) برای هر کلاس زمین، نوبت به تخمین زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت کل تونل می‌رسد. به منظور برآورد زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت تونل، باید زمان و هزینه‌ی تمام سلول‌ها (۱۳۱ سلول) را باهم جمع نمود. از آنجایی‌که در داخل هر سلول، هرکدام از کلاس‌های زمین با احتمال مشخصی اتفاق می‌افتد (پروفیل کلاس زمین)، می‌توان برای ارزیابی زمان و هزینه‌ی نهایی ساخت کل تونل، روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو را بکار برد.

#### ۸- برآورد احتمالاتی زمان و هزینه‌ی ساخت تونل همرو با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو

در این مقاله، برای انجام روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، نرم‌افزار *PertMaster* مورد استفاده قرار گرفت [۱۷]. پس از وارد نمودن

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

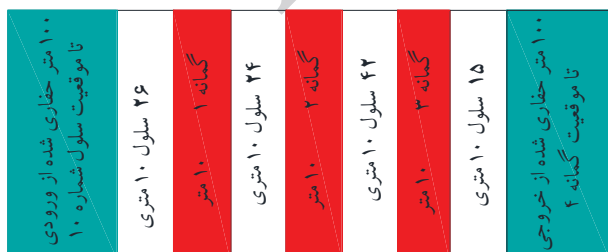
شماره‌ی کلاس زمین	زمان به ازای هر سلول (روز)			هزینه به ازای هر سلول (میلیون تومان)			افزایش هزینه برای هر سلول به صورت سالیانه (درصد)		
	حداکثر	متوسط	حداقل	حداکثر	متوسط	حداقل	حداکثر	متوسط	حداقل
۱	۲۰	۱۶/۷	۱۳/۴	۴۲۴/۴۵	۳۸۵/۶۳	۳۵۰	۲۵ - ۳۰	۱۵ - ۲۰	۵ - ۱۰
۲	۱۶/۷	۱۴/۲	۱۱/۷	۳۸۵/۶۳	۳۵۰	۳۱۸/۳۵	۲۵ - ۳۰	۱۵ - ۲۰	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 ۱۰: نمودار پراکنندگی زمان - هزینه‌ی ساخت تونل قبل از به‌روزرسانی DAT.

جدول (۶) احتمال وقوع حالت‌های تمام پارامترها را در موقعیت سلول‌های مشاهده‌ای بعد از به‌روزرسانی نشان می‌دهد. در نهایت پروفیل‌های پارامتر و کلاس زمین بعد از به‌روزرسانی مطابق شکل‌های (۱۲) تا (۱۵) به دست آمدند.

در بخش‌های قبلی گفته شد که حالت زیگزاگی و تغییرات سریع در پروفیل‌های پارامتر و نیز پروفیل کلاس زمین ناشی از عدم همخوانی داده‌های مربوط به موقعیت گمانه‌ها و ماتریس‌های احتمال انتقال و شدت انتقال می‌باشد. حال در این بخش بعد از حفاری ۱۰۰ متر از هر دو بخش ورودی و خروجی تونل و نیز با تأثیر دادن داده‌های واقعی این بخش‌های حفاری شده برای پارامترهای در نظر گرفته‌شده در مدل، حالت‌های زیگزاگی و تغییرات سریع در احتمال وقوع حالات پارامترها و کلاس‌های زمین خیلی کمتر شده است و در نتیجه‌ی آن مطابق شکل (۱۶) زمان و هزینه‌های ساخت تونل با عدم قطعیت‌های کم‌تری به دست آمده‌اند.



شکل ۱۱: تعداد و موقعیت سلول‌های مشاهده‌ای در مسیر تونل همرو بعد از به‌روزرسانی.

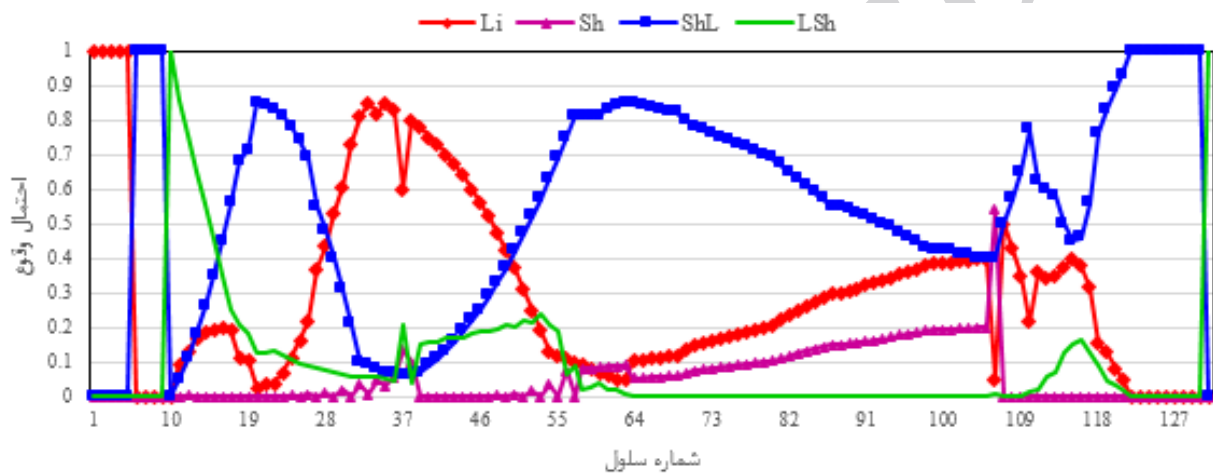
## ۹- به‌روزرسانی مدل برای تونل همرو به کمک داده‌های حین حفاری

به‌منظور به‌روزرسانی مدل ابتکاری DAT در تونل همرو، داده‌های واقعی مربوط به حالات پارامترها به‌جای داده‌های قبلی در موقعیت‌های مشابه برای ۱۰۰ متر اول ورودی و خروجی تونل جایگزین شدند و همچنین ماتریس‌های احتمال انتقال و شدت انتقال جدیدی به‌واسطه‌ی تغییر در ضریب شدت انتقال و وسعت هرکدام از حالت‌های پارامترها، توسط افراد کارشناس به دست آمد. شکل (۱۱) تعداد و موقعیت سلول‌های مشاهده‌ای را بعد از به‌روزرسانی نشان می‌دهد. همچنان که مشاهده می‌شود، برای به‌روزرسانی مدل از پنج سلول مشاهده‌ای استفاده شده است؛ زیرا بعد از حفاری ۱۰۰ متر از هر دو طرف ورودی و خروجی، سینه‌کار تونل به ترتیب تا انتهای سلول شماره‌ی ۱۰ و سلول گمانه‌ی ۴ رسیده است؛ بنابراین در به‌روزرسانی مدل، داده‌های واقعی برای بخش‌های حفاری‌شده‌ی تونل در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای به‌روزرسانی مدل در بخش‌های حفاری نشده، سلول انتهایی حفاری‌شده از هر دو طرف (سلول شماره‌ی ۱۰ و سلول مربوط به گمانه‌ی ۴) به‌عنوان سلول‌های مشاهده‌ای قطعی در نظر گرفته می‌شوند. پس باین‌وجود باید از سه سلول مشاهده‌ای غیرقطعی (سلول‌های مربوط به گمانه‌های ۱، ۲ و ۳) و دو سلول مشاهده‌ای قطعی در به‌روزرسانی مدل برای بخش حفاری نشده استفاده نمود.

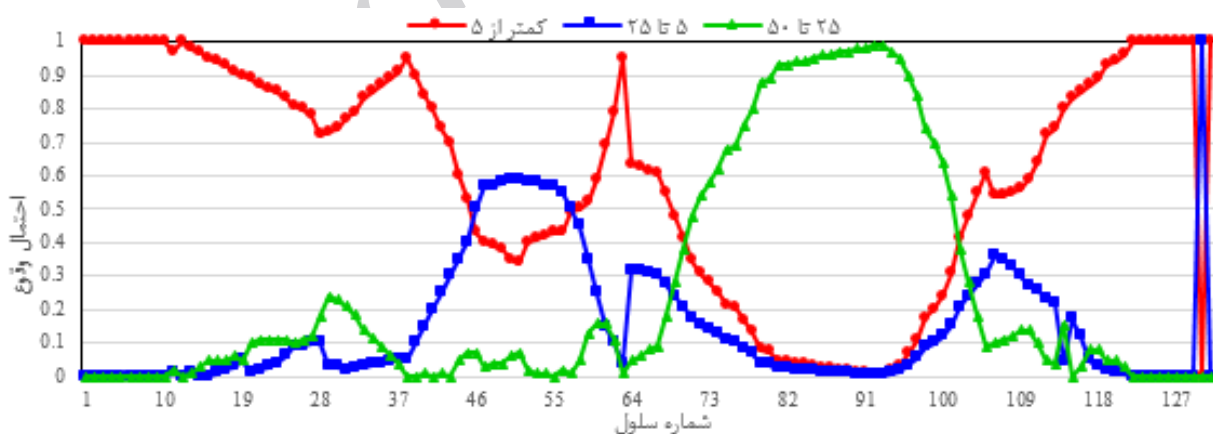


جدول ۶: احتمال وقوع هر حالت از هر پارامتر در موقعیت سلول‌های مشاهده‌ای بعد از به‌روزرسانی.

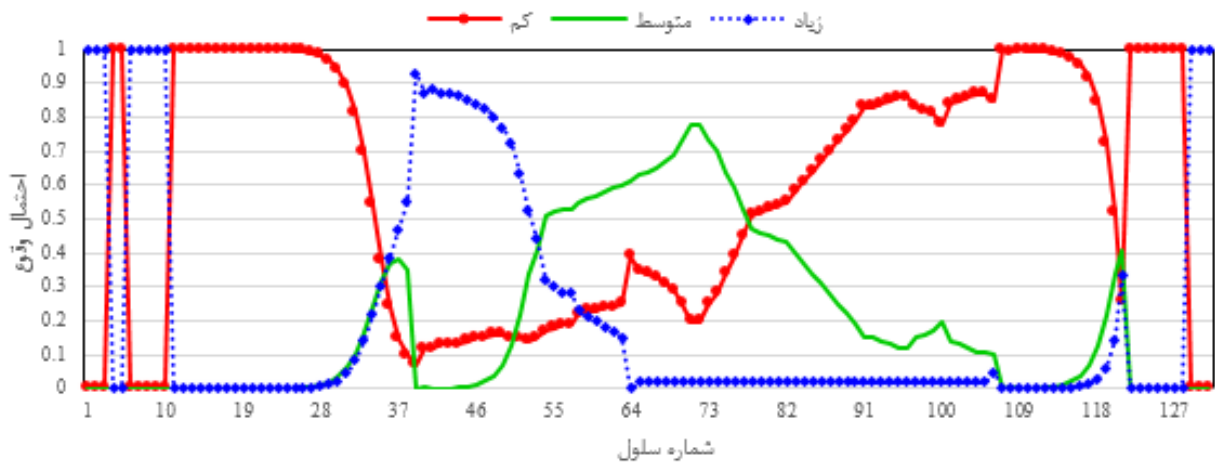
سلول‌های مشاهده‌ای					پارامتر	
گمانه ۴	گمانه ۳	گمانه ۲	گمانه ۱	سلول ۱۰	حالت	پارامتر
۰	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۸۰	۰	حالت ۱	نوع سنگ
۰	۰/۵۴	۰/۰۹	۰/۱۰	۰	حالت ۲	
۱	۰/۴۰	۰/۸۵	۰/۰۶	۰	حالت ۳	
۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴	۱	حالت ۴	
۱	۰/۱۵	۰/۹۵	۰/۰۹	۱	حالت ۱	RQD
۰	۰/۸۰	۰/۰۴	۰/۹۰	۰	حالت ۲	
۰	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۰	حالت ۳	
۱	۰/۸۵	۰/۰۴	۰/۰۲	۰	حالت ۱	آب زیرزمینی
۰	۰/۱۰	۰/۹۵	۰/۰۸	۰	حالت ۲	
۰	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۹۰	۱	حالت ۳	



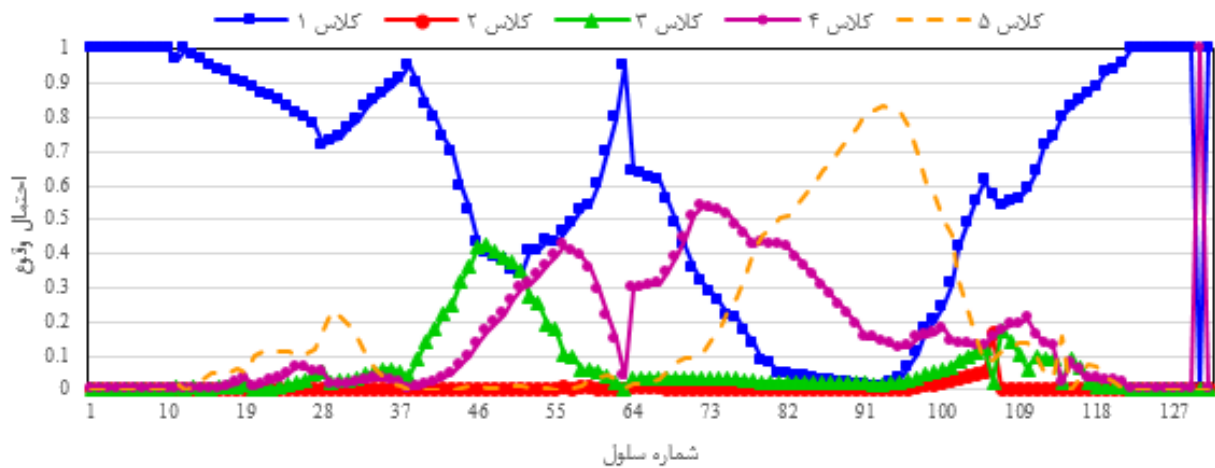
شکل ۱۲: پروفیل پارامتر نوع سنگ بعد از به‌روزرسانی.



شکل ۱۳: پروفیل پارامتر RQD بعد از به‌روزرسانی.



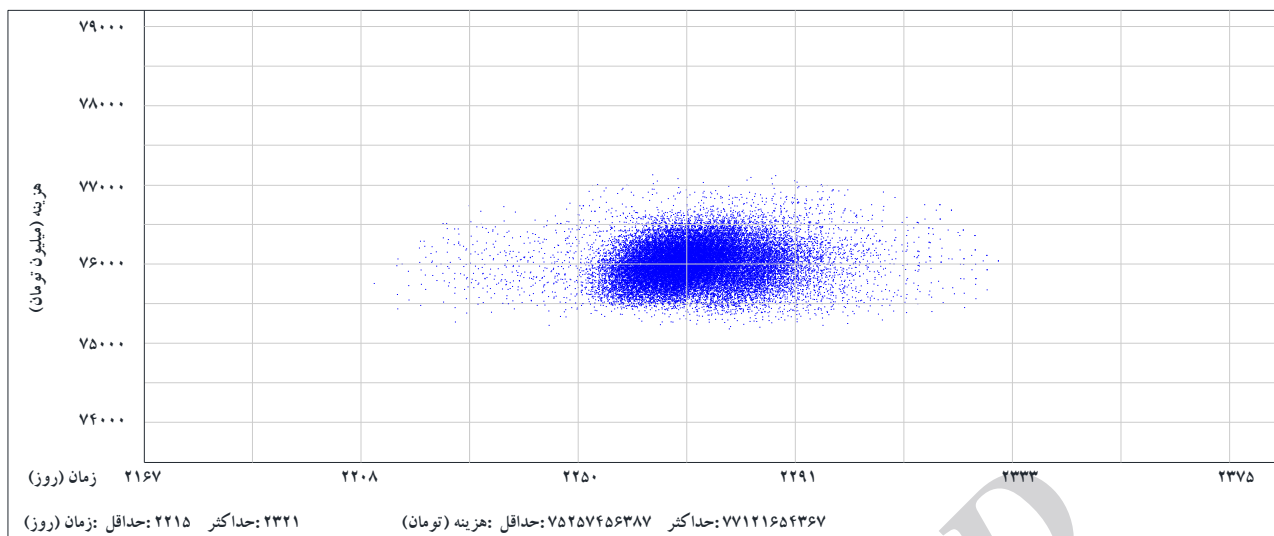
شکل ۱۴: پروفیل پارامتر آب زیرزمینی بعد از به روزرسانی.



شکل ۱۵: پروفیل کلاس زمین بعد از به روزرسانی.

تغییر کرد. همان‌طور که از شکل (۱۶) مشخص است، میزان حداقل و حداکثر زمان و هزینه‌ها به همدیگر نزدیک‌تر شده‌اند و این یعنی عدم قطعیت‌های مربوط به زمان و هزینه ساخت تونل در نتیجه‌ی به‌روزرسانی، کاهش یافته است.

بعد از به‌روزرسانی پروفیل کلاس زمین، به‌روزرسانی داده‌های ورودی در نرم‌افزار PertMaster جهت اجرای شبیه‌سازی مونت‌کارلو انجام شد. در نتیجه‌ی این شبیه‌سازی‌ها، نمودار پراکندگی زمان-هزینه برای تونل همرو به‌صورت شکل (۱۶)



شکل ۱۶: نمودار پراکندگی زمان - هزینه‌ی ساخت تونل بعد از به‌روزرسانی مدل.

## ۱۰- نتیجه‌گیری

هزینه‌ی ساخت کل این تونل به‌صورت احتمالاتی پیش‌بینی شد. در نتیجه میزان زمان حداقل و حداکثر به ترتیب برابر ۲۱۸۲ و ۲۳۷۳ روز و همچنین میزان هزینه‌ی حداقل و حداکثر به ترتیب برابر ۷۴،۱۷۵،۳۵۴،۶۹۶ و ۷۸،۴۳۵،۲۶۸،۰۱۵ تومان به دست آمد. سپس با به‌روزرسانی داده‌ها در هنگام ساخت برای ۱۰۰ متر در هر کدام از موقعیت‌های ورودی و خروجی تونل، مدل ابتکاری *DAT* به‌روزرسانی شد و در نتیجه عدم قطعیت‌ها نسبت به حالت قبل از به‌روزرسانی برای زمان و هزینه کاهش یافت؛ به‌گونه‌ای که میزان زمان حداقل و حداکثر به ترتیب برابر ۲۲۱۵ و ۲۳۲۱ روز و همچنین میزان هزینه‌ی حداقل و حداکثر به ترتیب برابر ۷۵،۲۵۷،۴۵۶،۳۸۷ و ۳۶۷،۷۷،۱۲۱،۶۵۴ تومان به دست آمد.

عدم قطعیت زمین‌شناسی، منبع اصلی ریسک در ساخت زیرزمینی است که اغلب منجر به فرض نمودن بدترین شرایط زمین‌شناسی ممکن می‌شود و در نتیجه، هزینه‌ها به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. انتخاب حفاری و نگهداری بر اساس شرایط زمین‌شناسی موجود، منجر به صرفه‌جویی قابل توجهی در طول ساخت خواهد شد. به‌منظور کاهش عدم قطعیت‌ها، ابزارهای مختلفی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به ابزار *DAT* اشاره نمود. *DAT* ابزاری آماری است که با استفاده از داده‌های موجود، به پیش‌بینی احتمالاتی زمان و هزینه‌ی موردنیاز اجرای تونل می‌پردازد. در این مقاله ابتدا به کمک مدل ابتکاری *DAT* با به‌کارگیری داده‌های قبل از شروع به ساخت تونل همرو، زمان و

## ۱۱- مراجع

Tunneling. Ph.D. Thesis submitted at the Massachusetts Institutes of Technology(MIT).

[5] Min. S. Y., Einstein. H. H., Lee. J. S., Kim. T. K. (2003.). Application of decision aids for tunneling (DAT) to a drill and blast tunnel. J. Civil Eng. KSCE. 7(5), 619-628. DOI: 10.1007/BF02838325.

[6] Min. S. Y., Einstein. H. H. (2003). DAT Application for the Wonhyo tunnel. Korea: KRRI.

[7] Min. S. Y., Einstein. H. H. (2005). Application of decision aids for tunneling (DAT) to update excavation cost/time information. J. Civil Eng. KSCE. 9(4), 335-

[1] Chan. M. (1981). A Geological Prediction and Updating Model in Tunneling. Ph.D. Thesis submitted at the Massachusetts Institutes of Technology(MIT).

[2] Halabe. V. B. (1995). Resource Modeling for DAT. Ph.D. Thesis submitted at the Massachusetts Institutes of Technology(MIT).

[3] Sinfield. J. V., Einstein. H. H. (1996). Evaluation of Tunneling Technology Using the Decision Aids for Tunneling. Tunneling and Underground Space Technology. 11(4), 491-504. DOI:10.1016/S0886-7798(96)89245-5

[4] Haas. C. (2000). Updating in the Decision Aids for

- [۱۲] محمودزاده، ارسلان؛ زارع، شکراله؛ دارای، رحمان (۱۳۹۴). کاربرد روش DAT (ابزار کمک به تصمیم‌گیری در تونل‌سازی)- مطالعه‌ی موردی: تونل جاده‌ی همرو؛ دومین کنفرانس منطقه‌ای و یازدهمین کنفرانس تونل ایران.
- [۱۳] محمودزاده، ارسلان؛ زارع، شکراله؛ دارای، رحمان (۱۳۹۴). کاهش عدم قطعیت زمان و هزینه‌ی پروژه‌های تونل‌سازی با به‌کارگیری روش DAT- مطالعه‌ی موردی: تونل راه همرو؛ مجله‌ی علمی-پژوهشی عمران شریف.
- [14] Mahmoodzadeh. A., Zare. S. (2016). Probabilistic prediction of expected ground condition and construction time and costs in road tunnels. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 8(6), 734-745. DOI: /10.1016/j.jrmge.2016.07.001.
- [۱۵] مهندسین مشاور ره آور (۱۳۸۸). گزارش مطالعات تونل‌های محور تیژ تیژ گاران - تونل همرو، مرحله دوم، ۱۵۷ صفحه.
- [16] MATLAB software, R. (2013).
- [17] PertMaster tutorials, V. 8. (2009).
346. DOI: 10.1007/BF02829047.
- [8] Hung. V. (2012). Modelling Ancertainty in the NEW YORK City No. 7 Subwat Line Extenstion Project Using Decision Aids for Tunnelling (DAT). Ph.D. Thesis submitted at the Massachusetts Institutes of Technology(MIT).
- [9] Moret. Y. (2011). Modeling Cost and Time Uncertainty in Rail Line Construction. Ph.D. Thesis submitted at the Massachusetts Institutes of Technology(MIT).
- [10] Yost. K., Valentin. A., Einstein. H. H. (2015). Estimating Cost and Time of Well Bore Drilling for Engineered Geothermal Systems (EGS)-Considering Uncertainties.53, 85-99. DOI: 10.1016 /j.geoth-ermics.2014.04.005
- [11] Ioannou. G., ASCE. A. M. (1989). A Geological Prediction Model for Tunneling. *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*. 115(3), 339-356. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364 (19-87)113%3A4(569).