نشریه علمی پژوهشی «مهندسی معدن» دوره سیزدهم، شماره ۳۹، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۲۶ تا ۴۲
Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME) Vol. 13, No. 39, 2018, pp. 26-42

به‌روزرسانی زمان و هزینه‌های مورد انتظار تونل در زمان ساخت به کمک مدل DAT

ارسلان محمودزاده[۱]، شکرا... زارع[۲]*

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود arissss.de@email.com
[۲] دانشیار، هیات‌علمی گروه مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود zare@shahroodut.ac.ir

(دریافت ۰۶ تیر ۱۳۹۶، پذیرش ۰۲ خرداد ۱۳۹۷)

چکیده

زمان‌بندی در برنامه‌ریزی و مدیریت ساخت پروژه‌ها بسیار مهم است. وابستگی پیچیده بین فعالیت‌های ساخت در تونل‌ها، زمان و هزینه‌های ساخت را تا حدودی تحت تاثیر قرار می‌دهد. شرایط زمین و زمان و هزینه‌های ساخت از موارد اساسی در تصمیم‌گیری‌ها برای مرحله برنامه‌ریزی و طراحی یک پروژه به حساب می‌آیند. در این مقاله، روش DAT برای ارزیابی احتمالاتی شرایط زمین و زمان و هزینه‌های ساخت به کار گرفته شده است. در طول ساخت، داده‌های زمین‌شناسی واقعی برای بخش‌های حفاری‌شده تونل در دسترس قرار می‌گیرد و عدم قطعیت‌های زمین‌شناسی برای این بخش‌ها به طور کامل از بین می‌رود. این داده‌های جدید در به‌روزرسانی شرایط زمین‌شناسی مورد انتظار مسیر تونل برای دست‌یابی به پیش‌بینی‌های دقیق‌تر برای بخش حفاری نشده، مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای 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 جاده گاران به عنوان مطالعه موردی استفاده شده است. برای نشان دادن تاثیر به‌روزرسانی‌ها بر روی نتایج اولیه، میزان زمان و هزینه‌های به دست آمده از مدل اولیه با زمان و هزینه‌های به دست آمده از مدل به¬روزرسانی شده، مقایسه شده است. در نهایت، کاهش عدم قطعیت در مورد زمان و هزینه‌های ساخت تونل نتیجه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، به‌روزرسانی داده‌ها در طول ساخت کمک بسیار خوبی در آگاه ساختن پیمان‌کارها و کارفرماهای پروژه در پذیرفتن میزان ریسک و ارایه پیشنهادها برای ساخت بخش‌های حفاری نشده تونل محسوب می¬شود.

کلمات کلیدی

مدل مارکوف، فرآیند به‌روزرسانی، زمان و هزینه‌های ساخت، تونل گاران

* نویسنده مسئول مکاتبات

۱-مقدمه

از جمله مباحث مهم برای طراحی و برنامه‌ریزی پروژه‌ها، به حداقل رساندن عدم قطعیت‌ها است. معمولا عدم قطعیت‌ها در پروژه‌های زیرسطحی، ناشی از شرایط ناشناخته زمین است که باعث می‌شود در طراحی‌ها نتوان کل مسایلی که ممکن است در زمان ساخت اتفاق بیافتد، در نظر گرفت. از مهم‌ترین عدم قطعیت‌ها می‌توان به زمان و هزینه نهایی پروژه اشاره کرد؛ زیرا این زمان و هزینه‌ها در ارتباط با شناخت کامل شرایط زیرسطحی اند، بنابراین در پروژه‌های زیرسطحی نمی‌توان زمان و هزینه‌ها را به طور قطعی بیان کرد بلکه باید از روش‌های احتمالاتی استفاده کرد.

برای برآورد عدم قطعیت‌ها به صورت احتمالاتی، ابزارها (مدل‌های احتمالاتی) مختلفی ارایه شده است که از آن جمله می‌توان به ابزار DAT [۱] اشاره کرد. DAT اولین بار توسط انیشتین در سال ۱۹۸۰ ارایه شد، بعد این مدل توسط گروه انیشتین توسعه یافت و تا به امروز کارهای زیادی روی مدل DAT در پروژه‌های مختلف انجام شده است.

ابزار DAT در ابتدا تنها شامل دو مدل ساخت و مدل زمین‌شناسی بود تا این که یک مدل به نام مدل منابع به مدل‌های آن اضافه شد[۲]، سپس روشی برای ارزیابی فناوری تونل‌زنی تمام مقطع به روش DAT ارایه شد[۳]. بعد از آن مدل DAT به‌گونه‌ای توسعه یافت که می‌توانست 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 هزینه نهایی ساخت تونل نسبت به مدل قبلی کاهش دهد[۴].

برای برآورد زمان و هزینه نهایی ساخت تونل، روش DAT در پروژه تونل سوچوون، تونل وونهیو و تونل کنمور شمالی استفاده شد[۵، ۶ و ۷].

مین و انیشتین[۲] در سال ۲۰۰۵ برای بررسی تاثیر به روزرسانی مدل DAT در زمان ساخت تونل، ابتدا زمان و هزینه نهایی ساخت یک تونل را با به کارگیری داده‌های زمین‌شناسی اولیه به کمک این روش ارزیابی کردند؛ سپس با به‌روزرسانی داده‌های زمین‌شناسی در زمان ساخت تونل و به کارگیری آن‌ها در مدل DAT، زمان و هزینه نهایی جدیدی برای ساخت تونل به دست آمد و در نهایت این زمان و هزینه‌ها را با هم مقایسه کردند[۷].

برای مدلسازی عدم قطعیت در پروژه خط زیرزمینی در شهر نیویورک و برآورد زمان و هزینه نهایی ساخت تونل‌های پروژه خط راه‌آهن پرتقال، روش DAT به کار گرفته شد[۸ و ۹].

از جمله جدیدترین کارهایی که از روش DAT بهره گرفته شده است، برآورد زمان و هزینه نهایی در حفاری چاه برای EGS[۳] است[۱۰].

ابزار DAT به پیش‌بینی زمان و هزینه نهایی ساخت تونل با استفاده از دو مدل زمین‌شناسی و مدل ساخت می‌پردازد. 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 منجر به افزایش عدم قطعیت‌ها و افزایش ریسک تصمیم‌گیری‌ها در مورد زمان و هزینه‌های به دست آمده می‌شود، بنابراین می‌توان حین اجرای پروژه با دست یابی به داده‌های واقعی در بخش‌های حفاری‌شده و تاثیر آن‌ها در مدل، عدم قطعیت‌ها را در مورد زمان و هزینه مورد نیاز اجرای بخش‌های حفاری نشده کاهش داد و برای برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری‌های دقیق‌تر در سایر بخش‌های حفاری نشده از آن بهره گرفت که در بحث مدیریت پروژه بسیار مهم است.

برای مدل DAT در دانشگاه MIT توسط گروه انیشتین نرم‌افزاری طراحی شده است که تمام مراحل مدل DAT را می‌توان با آن اجرا کرد ولی به دلیل در دسترس نبودن این نرم‌افزار، نویسندگان از نرم‌افزار MATLAB برای کدنویسی مدل مارکوف و نرم‌افزار PertMaster برای انجام شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو و نرم‌افزار اکسل[۴] برای ترسیم نمودارها بهره گرفته‌اند. همچنین نویسندگان در اکثر مراحل کار برای دستیابی به داده‌های دقیق‌تر از نظرات افراد کارشناس تونلسازی به کمک پرسش‌نامه بهره گرفته‌اند.

۲- روش کار

مطالعه حاضر بر روی تونل گاران با طول ۱۹۰۰ متر و سطح مقطع ۹۷ مترمربع به عنوان بخشی از جاده جدید در دست احداث سنندج - مریوان انجام شده است. البته اکنون در زمان انجام این مطالعه، پروژه تونل گاران به اتمام رسیده است و هدف از انتخاب این پروژه به عنوان مطالعه موردی، مقایسه زمان و هزینه حاصل از مدل DAT که در آن داده‌های قبل از شروع به ساخت تونل مورد استفاده قرار گرفته شده، با زمان و هزینه اجرای تونل در حالت واقعی است و البته قبلا تمام این کارها در منابع [۱۲]، [۱۳] و [۱۴] توسط نویسندگان انجام شده است؛

بنابراین در مقاله حاضر ضرورتی بر تکرار کارهای قبلی از جمله اعتبارسنجی مدل DAT دیده نشد بلکه بیش‌تر به بدنه اصلی مقاله حاضر که تصحیحات مدل DAT حین حفاری برای پروژه تونل جاده گاران است، پرداخته شده است.

در ابتدا برای برآورد زمان و هزینه، از داده‌های به دست آمده قبل از شروع به ساخت تونل استفاده شد و برای دستیابی به ماتریس‌های احتمال انتقال برای پارامترهای در نظر گرفته شده که در روش مارکوف از آن‌ها استفاده می‌شود، کلاس‌های زمین متناسب با شرایط زمین‌شناسی اولیه و هم‌چنین زمان و هزینه مربوط به اجرای هر متر از کلاس زمین مورد نظر، پرسش نامه‌هایی تهیه و به کمک افراد باتجربه تکمیل شد. در نهایت از مجموع جواب‌های مربوط به این پرسش‌نامه‌ها، یک جواب نهایی به دست آمد و در روابط آماری به کار گرفته شد. روش کار به این شکل بود که در مدل زمین‌شناسی ابتدا کل مسیر تونل به بخش‌ها (سلول‌ها)ی مساوی هر یک به طول ۲۰ متر تقسیم شدند؛ شش تا از این سلول‌ها مربوط به موقعیت چهار گمانه و موقعیت دهانه ورودی و خروجی تونل بودند و به دلیل مشخص بودن احتمال وقوع حالات پارامترهای در نظر گرفته شده در این مطالعه (پارامترهای نوع سنگ، RMR و آب زیرزمینی)، با عنوان سلول‌های مشاهده‌ای از آن‌ها اسم برده شده است. در این مطالعه از داده‌های دقیقی که قبل از شروع به ساخت تونل در مورد موقعیت گمانه‌ها و دهانه‌های ورودی و خروجی تونل برای پارامترهای در نظر گرفته شده موجود بودند استفاده شده است؛ بنابراین برخلاف کارهای انجام شده قبلی در منابع [۱۲]، [۱۳] و [۱۴] که در آن‌ها به دلیل در دسترس نبودن داده‌های اولیه در مورد پارامترهای در نظر گرفته شده در موقعیت گمانه‌ها و دهانه‌های ورودی و خروجی تونل مشاهدات به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند، در این مطالعه تمام مشاهدات به صورت قطعی در نظر گرفته شد؛ بنابراین در این مطالعه فرمولی دیگر در مدل مارکوف استفاده شده است. در مرحله بعد برای مشخص ساختن احتمال وقوع حالات پارامترها در سایر سلول‌ها، مدل مارکوف در نرم‌افزار MATLAB کدنویسی شد و در نتیجه برای هر پارامتر، نمیرخی با عنوان نیمرخ پارامتر به دست آمد که احتمال وقوع هر حالت از هر پارامتر را در داخل هر سلول مشخص می‌سازد. 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 معرفی شد به‌گونه‌ای که هرکدام از این کلاس‌ها برای تعدادی از شرایط زمین به دست آمده جوابگو بودند، سپس از ترکیب نیمرخ‌های پارامتر، نیمرخی به دست آمد که احتمال وقوع هرکدام از کلاس‌های زمین را در داخل هر سلول به دست می‌داد و نیمرخ کلاس زمین نامیده شد. با توجه به اینکه هر کلاس زمین یک زمان و هزینه متفاوتی دارد، بنابراین احتمال وقوع زمان و هزینه‌های مختلف در داخل هر بخش نیز موجود بود، سپس برای دست‌یابی به زمان و هزینه نهایی ساخت تونل، با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو در نرم‌افزار PertMaster زمان و هزینه تمام بخش‌ها با هم جمع شدند. در نهایت به کمک نمودار پراکندگی، زمان و هزینه‌های متفاوتی با احتمال وقوع (عدم قطعیت)های مشخصی به دست آمد.

از آنجا که بدنه اصلی این مطالعه به‌روزرسانی ابزار DAT حین حفاری است، بنابراین 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، RMR و آب زیرزمینی و همچنین به‌روزرسانی ماتریس‌های احتمال انتقال و شدت انتقال برای هرکدام از این پارامترها) برای ۳۰۰ 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.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مدل زمین‌شناسی

شرایط زمین‌شناسی یک فاکتور اصلی در انتخاب روش حفاری و نگهداری است. از آنجایی‌که داده‌های مربوط به شرایط زمین‌شناسی مسیر تونل بسیار کم و یا اصلا موجود نیست، توصیف پیش‌بینی‌ها بر اساس عدم قطعیت خواهد بود. مدل پیش‌بینی زمین‌شناسی با استفاده از داده‌های اولیه مانند نقشه‌های زمین‌شناسی، بررسی‌های ژئوفیزیکی، بررسی‌های ژئوتکنیکی و نظایر آن به پیش‌بینی شرایط زمین‌شناسی مورد انتظار در مسیر تونل می‌پردازد. معمولا شرایط مورد انتظار در مسیر تونل نمی‌تواند به صورت قطعی بیان شود و بنابراین باید از روش‌های آماری برای بیان احتمالاتی این شرایط استفاده کرد. یکی از مهم‌ترین روش‌های آماری که به پیش‌بینی شرایط زمین‌شناسی می‌پردازد، روش مارکوف است که حالت مربوط به هرکدام از پارامترها را با توجه به حالت قبل از آن تخمین می زند. در ادامه مراحل مختلف پیش‌بینی مدل زمین‌شناسی به ترتیب و به صورت مختصر ارایه 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 مورد نظر به کمک روش‌های آماری (رابطه ۱)[۱].

$$p_{ij} = \frac{T_{ij}}{\sum_{k=1}^{n} T_{ik}} \quad , \quad C_{x_i} = \frac{1}{H_{x_i}} \qquad (1)$$

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 مربوطه (n تعداد کل حالت‌های پارامتر موردنظر)

C_{x_i} ضریب شدت انتقال حالت i که عبارت است از معکوس وسعت (طول) مورد انتظار حالت i (H_{x_i}) در طول مسیر تونل

ب) محاسبه ماتریس شدت انتقال پارامتر X (A_x) به کمک احتمال انتقال و ضریب شدت انتقال (رابطه ۲)

$$A_x = \begin{bmatrix} -C_{x_1} & C_{x_1} p_{x_{12}} & \dots & C_{x_1} p_{x_{1n}} \\ C_{x_2} p_{x_{21}} & -C_{x_2} & \dots & C_{x_2} p_{x_{2n}} \\ . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ C_{x_n} p_{x_{n1}} & C_{x_n} p_{x_{n2}} & \dots & -C_{x_n} \end{bmatrix} \qquad (2)$$

ج) محاسبه ماتریس احتمال انتقال فاصله: به کمک مدل مارکوف، احتمال وقوع یک حالت معین از پارامتر زمین‌شناسی X در موقعیت‌های بعدی محاسبه می‌شود. با توجه به شکل ۱، در اینجا احتمال وقوع حالت j ($j = 1,2,..,n$، n: تعداد حالت‌های پارامتر X) از پارامتر X در یک موقعیت معین (L) نسبت به موقعیت اولیه ($O_.$) به فاصله $u = (L - O_.)$ مدنظر است ($L > O_.$) همواره باید موقعیتی باشد که احتمال وقوع حالت‌های یک پارامتر معین در آن مشخص باشد تا فرآیند مارکوف بتواند با استفاده از آن، این احتمال‌ها را در نقاط بعدی پیش‌بینی کند[۱۶].

برای محاسبه احتمال وقوع حالت‌های یک پارامتر معین (به عنوان مثال پارامتر X) در یک سلول به فاصله مشخصی (فاصله u) نسبت به سلول اولیه، ماتریسی به کار برده می‌شود که ماتریس احتمال انتقال فاصله ($V_x(u)$) نام دارد (رابطه ۳)[۱۱].

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

که در آن:

$v_{x_{ij}}(u)$ احتمال وقوع حالت j از پارامتر X به فاصله u از سلول O_0 که دارای حالت i است.

معادله بالا را می‌توان به شکل رابطه ۴ نیز بیان کرد [۱].

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

که در آن:

I ماتریس واحد از مرتبه n (n تعداد حالت‌های پارامتر X)

m عدد خیلی بزرگی که می‌تواند تا بینهایت ادامه پیدا کند.

د) محاسبه احتمال وقوع حالت‌های پارامتر در شرایطی که در موقعیت O_0، حالت پارامتر به طور قطعی مشخص نباشد و یک تابع چگالی احتمال در مورد آن داده شده باشد. برای این حالت $S_{x_j}(u)$ احتمال وقوع حالت j از پارامتر X در موقعیت $O_. + u$ است (رابطه ۵)[۱۵].

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

بعد از دستیابی به احتمال وقوع حالت‌های تمام پارامترها، به کمک آن‌ها نیمرخ مربوط به هر پارامتر و در نهایت از ترکیب این نیمرخ‌ها، نیمرخ کلاس زمین به دست می‌آید. هدف مدل زمین‌شناسی، تشکیل نیمرخ کلاس زمین است تا از آن بتوان در مدل ساخت برای برآورد زمان و هزینه‌های هر کلاس در هر موقعیتی در مسیر تونل استفاده کرد.

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

شکل ۱- پیش‌بینی احتمال حالات پارامتر X در سایر بخش‌ها [۱۴]

۳-۲- مدل ساخت تونل

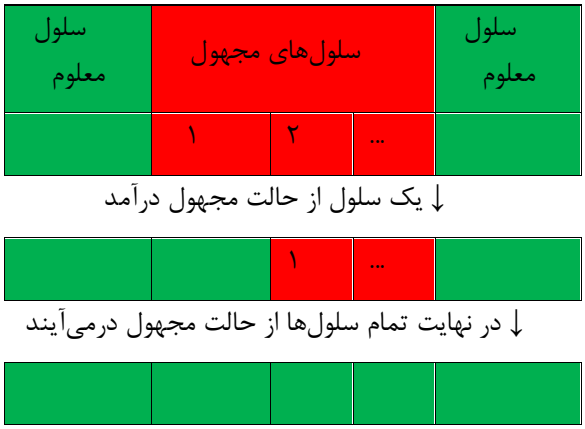
در پروژه‌های تونلسازی، اغلب به دلیل عدم قطعیت در مورد میزان زمان و هزینه مورد نیاز روش حفاری و سیستم نگهداری در نظر گرفته شده است، پیش‌بینی زمان و هزینه نهایی بسیار مشکل است و در نتیجه در برنامه‌ریزی‌های اولیه نمی‌توان به نتایج دقیقی در مورد آن دست یافت. مدل ساخت با در نظر گرفتن فرآیند ساخت در مسیر تونل برای هر کلاس زمین، زمان و هزینه مورد انتظار را برآورد می‌کند. هر کلاس زمین روش حفاری و سیستم نگهداری معینی دارد که در هر سیکل از ساخت، طی یک سری فعالیت‌ها انجام می‌شود که شبکه فعالیت نام دارد. در مدل ساخت می‌توان با توجه به شبکه فعالیت مربوط به هر کلاس زمین، زمان و هزینه هر سیکل از ساخت کلاس مورد نظر را با تجربه پروژه‌های اجرا شده در شرایط مشابه و نظر افراد متخصص برآورد و از آن برای پیش‌بینی زمان و هزینه نهایی ساخت تونل استفاده کرد.

۳-۳- به‌روز رسانی مدل DAT

در ابزار DAT به واسطه ناشناخته بودن شرایط زیرسطحی قبل از شروع به ساخت، در مورد داده‌های ورودی این ابزار عدم قطعیت‌هایی وجود دارد؛ ولی با شروع فرآیند ساخت و حفاری بخش‌هایی از آن می‌توان با دست‌یابی به داده‌های واقعی در این بخش‌ها، ابزار DAT را به‌روزرسانی کرد و عدم قطعیت‌های زمان و هزینه نهایی ساخت تونل را کاهش داد. برای به‌روزرسانی ابزار DAT در صورت دست‌یابی به داده‌های واقعی که در نتیجه حفاری بخشی از آن به دست آمده‌اند، باید داده‌های واقعی را به جای داده‌های قبلی در موقعیت‌های مشابه جایگزین و سپس کلیه مراحل روش DAT برای دو مدل زمین‌شناسی و مدل ساخت که در بخش‌های قبلی بیان شد، از اول تا آخر را دوباره اجرا کرد.

۳-۴- مدل مارکوف و شبیه‌سازی مونت‌کارلو

مدل مارکوف برای پیش‌بینی شرایط زمین‌شناسی مسیر تونل در ابزار DAT به کار می‌رود. کار مدل مارکوف در روش DAT به‌گونه‌ای است که به کمک داده‌های موجود اولیه، شرایط زمین‌شناسی را برای بخش‌های حفاری‌نشده زمین پیش‌بینی می‌کند. در ابزار DAT برای اجرای مدل مارکوف ابتدا کل مسیر تونل به بخش‌های مساوی تقسیم شده که هر بخش یک سلول نیز نامیده می‌شود. در مرحله بعد ممکن است تعداد سلول‌هایی در مسیر تونل باشند که حالات مربوط به پارامترهای در نظر گرفته شده در آن‌ها به صورت قطعی یا غیرقطعی مشخص باشند (برای مثال موقعیت گمانه‌ها و یا هر موقعیتی در مسیر تونل که داده‌های مربوط به حالات پارامترهای در نظر گرفته شده در آن‌ها مشخص باشند) که این موقعیت‌ها هر کدام در داخل یک سلول قرار خواهند گرفت و آن سلول، سلول مشاهده‌ای خواهد بود. کار مدل مارکوف، پیش‌بینی شرایط زمین‌شناسی مسیر تونل به کمک سلول‌های مشاهده‌ای است. برای مثال مطابق شکل ۲، ابتدا مدل مارکوف به کمک سلول‌های مشاهده‌ای سبزرنگ، اولین سلول مجهول را پیش‌بینی می‌کند، سپس به همین ترتیب اولین 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 مسیر تونل در نیمرخی به نام نیمرخ پارامتر به دست می‌آید.



شکل ۲- روش کار مدل مارکوف در روش DAT

شبیه‌سازی مونت‌کارلو در مدل ساخت ابزار 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 هزینه مخصوص به خود را دارند با احتمال مشخصی اتفاق خواهند افتاد. روش کار شبیه‌سازی مونت‌کارلو 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 مونت‌کارلو در مجموع دورهای شبیه‌سازی در داخل هر سلول زمان و هزینه‌ای که با احتمال بیشتری رخ داده باشد، بیشتر تکرار خواهد شد. امروزه نرم‌افزارهای زیادی برای انجام شبیه‌سازی مونت‌کارلو وجود دارد که در این مطالعه از نرم‌افزار PertMaster بهره گرفته شده است.

۳-۵- به کارگیری ابزار DAT در تونل جاده گاران

۳-۵-۱- سیمای پروژه تونل گاران

تونل جاده گاران بخشی از جاده جدید در دست احداث سنندج – مریوان با طول حفاری ۱۹۰۰ متر و سطح مقطع ۹۷ مترمربع است. این تونل در شرق استان کردستان واقع شده است و دهانه ورودی و خروجی آن به ترتیب در کیلومتر ۴۹۰ + ۳۹ و ۳۹۰ + ۴۱ قرار دارد. منطقه مورد مطالعه مربوط به زون سنندج– سیرجان و گسترده‌ترین واحد چینه‌شناسی تفکیک شده در منطقه از نظر سنی مربوط به پالئوسن ائوسن پایینی است و به لحاظ سنگ‌شناسی 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 منطقه مورد مطالعه رخنمون دارند می‌توان به واحد چینه‌شناسی مربوط به کرتاسه بالایی پالئوسن اشاره کرد که از

نظر سنگ‌شناسی شامل شیل خاکستری و قرمز رنگ، آهک با رنگ‌های خاکستری، زرد و قرمز و لایه‌های ماسه‌سنگ می‌شود، همچنین می‌توان به رخنمون‌های پراکنده‌ای از واحد سنگ-چینه‌ای در بخش‌های شمالی منطقه اشاره کرد که از نظر سنگ-شناسی از آهک‌های ماسه‌ای نومولیت‌دار تشکیل شده‌اند. درنتیجه مطالعات انجام شده از منطقه در بازدیدهای زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی، در مجموع چهار گونه زمین‌شناسی مهندسی در مسیر تونل قابل شناسایی و تفکیک از یکدیگرند. این گونه‌های زمین‌شناسی مهندسی عبارت از آهک (Li)، شیل (Sh)، تناوب شیل‌های ماسه‌ای و آهک‌های شیلی (ShL) و تناوب آهک و شیل (LSh) است. در شکل ۳ نیمرخ طولی و سطح مقطع تونل گاران همراه با اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی نشان داده شده است.

۳-۵-۲- مدل زمین‌شناسی تونل گاران

مهم‌ترین پارامترهای موثر بر روی تونل‌زنی، نوع سنگ، RQD، RMR، جهت درزه‌داری، ناپیوستگی‌های اصلی، جریان آب، سختی، مقاومت فشاری و شیستوزیته است [۱۱]. در این مطالعه چون در ابتدا داده‌های مربوط به پارامترهای نوع سنگ، RMR و آب زیرزمینی به صورت دقیق‌تر موجود بودند و به دلیل عدم اطمینان از صحت داده‌های در دسترس در مورد سایر پارامترها، این پارامترها به عنوان پارامترهای زمین‌شناسی در نظر گرفته شدند که حالات مربوط به هرکدام در شکل ۳ نشان داده شده است.

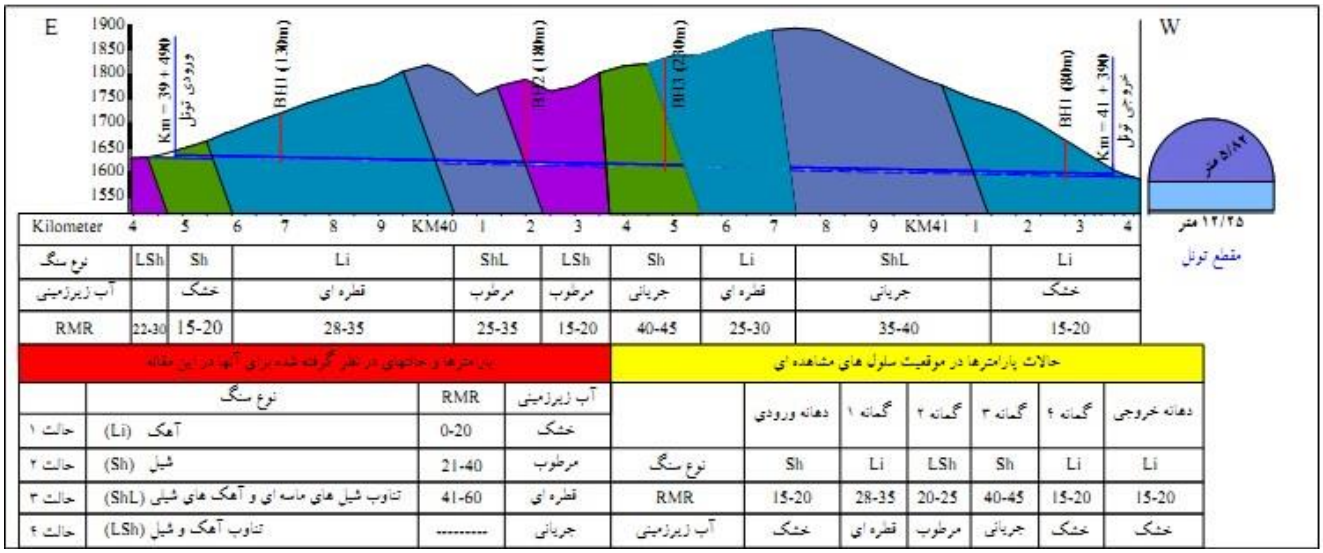
مطابق جدول ۱، برای هر حالت از سه پارامتر در نظر گرفته شده، طول میانگین به کمک نظرات افراد کارشناس با حداقل تحصیلات کارشناسی ارشد در رشته‌های مهندسی معدن و زمین‌شناسی و نیز حداقل ۵ سال سابقه کاری در پروژه‌های تونل، با توجه به نیمرخ طولی تونل که قبل از شروع به ساخت تهیه شده بود، برآورد و در نهایت از میانگین نظرهای این افراد استفاده شد، سپس با معکوس طول میانگین حالات، ضریب شدت انتقال هرکدام از حالت‌های پارامترها نیز مطابق جدول ۱ به دست آمد.

در ادامه به کمک پرسش‌نامه‌هایی که در اختیار ۱۰ نفر کارشناس تونلسازی با مشخصات یاد شده قرار داده شد، ماتریس‌های احتمال انتقال و شدت انتقال برای هرکدام 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 تقسیم می‌کند، سپس به کمک نیمرخ طولی تونل و داده‌های موجود، برای هر پارامتر مشخص می‌کند که اگر در مسیر تونل از یک بخش تعیین شده 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، با عنوان یک انتقال به حساب نمی‌آید به عبارتی دیگر زمانی انتقال انجام گرفته است که با ورود از یک بخش به بخش بعدی، حالت پارامتر به حالتی دیگر تغییر کند به همین دلیل 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 کرد. برای مثال اگر پارامتر نوع سنگ با چهار حالت در نظر گرفته شود و درایه‌های سطر اول ماتریس احتمال انتقال را محاسبه کند، در انتقال از حالت اول به سایر حالت‌های ۲، ۳ و ۴، برای محاسبه 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 کرد. سایر درایه‌ها نیز به همین صورت تعیین می‌شوند و در نهایت می‌توان آن‌ها را به صورت درصدی بیان کرد. حال با توجه به فرمول ماتریس شدت انتقال که قبلا بیان شد (فرمول ۲)، به کمک ضریب شدت انتقال و ماتریس احتمال انتقال، ماتریس شدت انتقال برای هر پارامتر به دست می‌آید.

ماتریس‌های پارامتر نوع سنگ:

$$P_1 = \begin{array}{c} \\ ۱ \\ ۲ \\ ۳ \\ ۴ \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} ۱ & ۲ & ۳ & ۴ \end{array} \\ \begin{bmatrix} ۰ & ۰/۱۴ & ۰/۷۵ & ۰/۱۱ \\ ۰/۵۶ & ۰ & ۰/۴۰ & ۰/۰۴ \\ ۰/۴۸ & ۰/۴۰ & ۰ & ۰/۱۲ \\ ۰/۵۵ & ۰/۱۳ & ۰/۳۲ & ۰ \end{bmatrix} \end{array}$$

$$A_1 = \begin{array}{c} \\ ۱ \\ ۲ \\ ۳ \\ ۴ \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} ۱ & ۲ & ۳ & ۴ \end{array} \\ \begin{bmatrix} -۰/۰۰۱۲ & ۰/۰۰۰۱ & ۰/۰۰۰۹ & ۰/۰۰۰۱ \\ ۰/۰۰۱۷ & -۰/۰۰۳۱ & ۰/۰۰۱۲ & ۰/۰۰۰۲ \\ ۰/۰۰۰۷ & ۰/۰۰۰۶ & -۰/۰۰۱۶ & ۰/۰۰۰۳ \\ ۰/۰۰۳۵ & ۰/۰۰۰۸ & ۰/۰۰۲۱ & -۰/۰۰۶۴ \end{bmatrix} \end{array}$$



شکل ۳- نیمرخ طولی و سطح مقطع تونل گاران[۱۷].

جدول ۱- طول میانگین و ضریب شدت انتقال حالات هر پارامتر

پارامتر	حالات پارامتر	طول میانگین (متر)	ضریب شدت انتقال (m^{-1})
نوع سنگ	Li	۸۰۰	۰/۰۰۱۲
	Sh	۳۲۰	۰/۰۰۴۱
	ShL	۶۲۵	۰/۰۰۱۶
	LSh	۱۵۵	۰/۰۰۶۴
RMR	۲۰-۰	۶۰۰	۰/۰۰۱۶
	۴۰-۲۱	۱۱۵۰	۰/۰۰۰۸
	۶۰-۴۱	۱۵۰	۰/۰۰۶۶
آب زیرزمینی	خشک	۳۸۵	۰/۰۰۲۵
	مرطوب	۳۲۰	۰/۰۰۳۱
	قطره‌ای	۸۰۰	۰/۰۰۱۲
	جریانی	۹۵	۰/۰۰۲۵

ماتریس‌های پارامتر RMR:

$$P_r = \begin{array}{c} \\ ۱ \\ ۲ \\ ۳ \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} ۱ & ۲ & ۳ \end{array} \\ \begin{bmatrix} ۰ & ۰/۹۲ & ۰/۰۸ \\ ۰/۸۵ & ۰ & ۰/۱۵ \\ ۰/۶۲ & ۰/۳۸ & ۰ \end{bmatrix} \end{array}$$

$$A_r = \begin{array}{c} \\ ۱ \\ ۲ \\ ۳ \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} ۱ & ۲ & ۳ \end{array} \\ \begin{bmatrix} -۰/۰۰۱۶ & ۰/۰۰۱۴ & ۰/۰۰۰۲ \\ ۰/۰۰۰۶ & -۰/۰۰۰۸ & ۰/۰۰۰۲ \\ ۰/۰۰۴۰ & ۰/۰۰۲۶ & -۰/۰۰۶۶ \end{bmatrix} \end{array}$$

ماتریس‌های پارامتر آب زیرزمینی:

$$P_w = \begin{array}{c} \\ ۱ \\ ۲ \\ ۳ \\ ۴ \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} ۱ & ۲ & ۳ & ۴ \end{array} \\ \begin{bmatrix} ۰ & ۰/۲۰ & ۰/۶۵ & ۰/۲۵ \\ ۰/۱۷ & ۰ & ۰/۶۰ & ۰/۲۳ \\ ۰/۳۳ & ۰/۲۷ & ۰ & ۰/۴۰ \\ ۰/۱۰ & ۰/۲۰ & ۰/۷۰ & ۰ \end{bmatrix} \end{array}$$

$$A_w = \begin{array}{c} \\ ۱ \\ ۲ \\ ۳ \\ ۴ \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} ۱ & ۲ & ۳ & ۴ \end{array} \\ \begin{bmatrix} -۰/۰۰۲۵ & ۰/۰۰۰۵ & ۰/۰۰۱۶ & ۰/۰۰۰۴ \\ ۰/۰۰۰۵ & -۰/۰۰۳۱ & ۰/۰۰۱۸ & ۰/۰۰۰۸ \\ ۰/۰۰۰۳ & ۰/۰۰۰۲ & -۰/۰۰۱۲ & ۰/۰۰۰۷ \\ ۰/۰۰۰۲ & ۰/۰۰۰۵ & ۰/۰۰۱۸ & -۰/۰۰۲۵ \end{bmatrix} \end{array}$$

برای پیش‌بینی احتمال وقوع حالت‌های پارامترها (نیمرخ پارامتر) در مسیر تونل گاران به کمک مدل مارکوف، فاصله میان هر دو سلول مشاهده‌ای به تعداد سلول‌هایی با طول هرکدام برابر ۲۰ متر مطابق شکل ۴ تقسیم شد.

با توجه به شکل ۴، سلول‌های مشاهده‌ای مربوط به گمانه‌ها و دهانه‌های ورودی و خروجی تونل به صورت رنگی نشان داده شده‌اند و برای هرکدام از این حالت‌های مشاهده‌ای، یک سلول با طول ۲۰ متر در نظر گرفته شده است، بنابراین در کل مسیر تونل، شش سلول مشاهده‌ای موجود است که همه آن‌ها به صورت قطعی در نظر گرفته شده‌اند.

دلیل در نظر گرفتن سلول‌های مشاهده‌ای به صورت قطعی این بود که داده‌های مربوط به موقعیت دهانه‌های ورودی و خروجی تونل و همچنین موقعیت چهار گمانه برای پارامترها به صورت دقیق مطابق جدول ۲ در دسترس بودند.

در تشکیل نیمرخ پارامتر، برای هر پارامتر، احتمال وقوع حالت‌های آن در تمام سلول‌ها در مسیر تونل قابل دستیابی است. برای به دست آوردن نیمرخ‌های پارامتر، چون احتمال وقوع حالت‌ها در موقعیت سلول‌های مشاهده‌ای به صورت قطعی بیان شد، از فرمول ۶ استفاده شده است. 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 هرکدام از حالت‌های سه پارامتر آب زیرزمینی، RMR و نوع سنگ را در سلول مجهول L_0 پیش‌بینی می‌کند.

در رابطه ۶ که برای شکل ۵ بیان شده است:

m و w نوع حالت پارامترها در سلول‌های مشاهده‌ای O_{t-1} و O_t

n تعداد حالت‌های پارامتر مورد نظر

$V^{ns}_{X_{m z_0}}(L_0 - O_{t-1})$ احتمال وقوع حالت z_0 از پارامتر X در سلول L_0 به شرط این که حالت در سلول مشاهده‌ای O_{t-1} ، m باشد (بالانویس ns معرف چند مشاهده‌ی قطعی است).

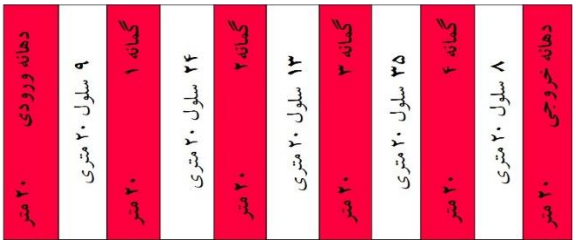
$V_{X_{z_0 w}}(O_t - L_0)$ احتمال وقوع حالت w از پارامتر X در سلول مشاهده‌ای O_t به شرط این‌که حالت در سلول L_0، z_0 باشد.

$V_{X_{m z_0}}(L_0 - O_{t-1})$ احتمال وقوع حالت z_0 پارامتر X در سلول L_0 به شرط اینکه حالت در سلول مشاهده‌ای O_{t-1}، m باشد.

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

بعد از پیدا کردن احتمال وقوع حالت‌ها در سلول مجهول L_0، نوبت به سلول مجهول L_1 می‌رسد به‌گونه‌ای که در رابطه ۶، L_1 جایگزین L_0 و z_1 جایگزین z_0 خواهد شد و به همین ترتیب برای سایر سلول‌های مجهول تا به سلول مجهول آخر در فاصله میان دو مشاهده می‌رسد.

برای پیدا کردن احتمال وقوع حالات پارامترهای در نظر گرفته شده، رابطه ۶ در MATLAB کدنویسی شد و نتایج مطابق شکل‌های ۴، ۵ و ۶ به دست آمد.



شکل ۴- تعداد و موقعیت سلول‌های مشاهده‌ای در مسیر تونل گاران.

جدول ۲- حالات هر پارامتر در موقعیت سلول‌های مشاهده‌ای

پارامتر		سلول‌های مشاهده‌ای					
نوع	حالت	ورودی	گمانه ۱	گمانه ۲	گمانه ۳	گمانه ۴	خروج
نوع سنگ	۱	✓				✓	✓
	۲		✓		✓		
	۳						
	۴			✓			
RMR	۱	✓				✓	✓
	۲		✓	✓			
	۳				✓		
آب زیرزمینی	۱	✓				✓	✓
	۲			✓			
	۳		✓				
	۴				✓		

این نیمرخ‌ها (نیمرخ پارامتر) اگر با نیمرخ طولی تونل که در شکل ۳ نشان داده شد مقایسه شوند، ارتباط خوبی را می‌توان میان آن‌ها مشاهده کرد به طوری‌که اگر در نیمرخ طولی تونل در موقعیتی، حالت مشخصی از یک پارامتر اتفاق افتاده باشد، در نیمرخ پارامتر نیز همان حالت در همان موقعیت در بیشتر موارد با احتمال بیشتری اتفاق افتاده است. همچنین در نیمرخ‌های پارامتر در بعضی از موقعیت‌ها احتمال وقوع حالات به صورت زیگزاگی و با تغییرات سریعی همراه است که در چنین وضعیتی می‌توان گفت نتایجی که برای ماتریس‌های احتمال انتقال و شدت انتقال به دست آمده است با نتایج حاصل از نظر افراد کارشناس برای موقعیت گمانه‌ها متفاوت و یا شباهت کمتری با هم دارند، بنابراین هرچه داده‌های ورودی روش DAT دقیق‌تر باشند، در نیمرخ‌های پارامتر کمتر حالت زیگزاگی و تغییرات سریع برای احتمال وقوع حالات یک پارامتر در مسیر تونل اتفاق می‌افتد.

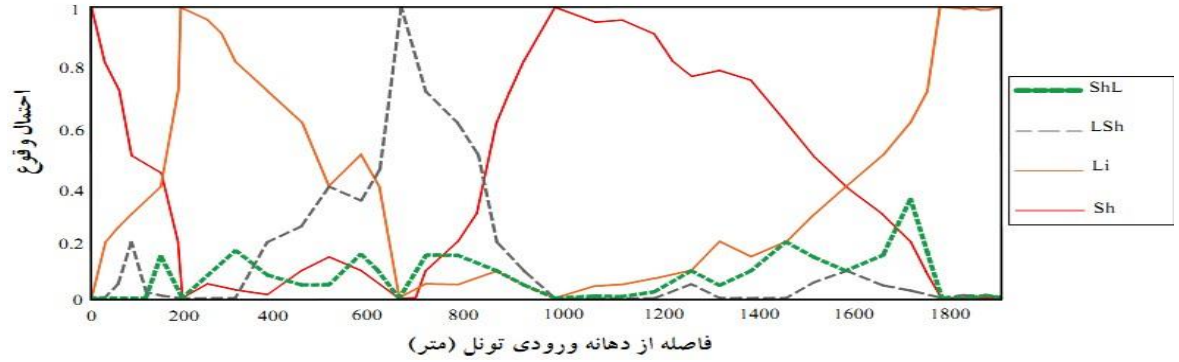
البته چنین مشکلی می‌تواند حین حفاری تونل و با دست‌یابی به داده‌های واقعی پارامترها برای بخش‌های حفاری‌شده برطرف شود تا کمتر با چنین تغییرات سریعی مواجه شد.

با توجه به پارامترها و حالت‌های در نظر گرفته‌شده، درکل ۳۶ ($۴ \times ۳ \times ۳ =$) شرایط مختلف زمین‌شناسی می‌تواند در مسیر تونل اتفاق بیافتد. 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 روش) می‌توان در نظر گرفت که هرکدام برای تعدادی از این شرایط مناسب باشند. شرایط زمین‌شناسی بنا به نظر افراد کارشناس، به کمک پرسش‌نامه در تعداد ۵ کلاس مطابق جدول ۳ جای گرفت که مشخصات مربوط به هرکدام از کلاس‌های زمین در نظر گرفته‌شده در جدول ۴ آمده است.

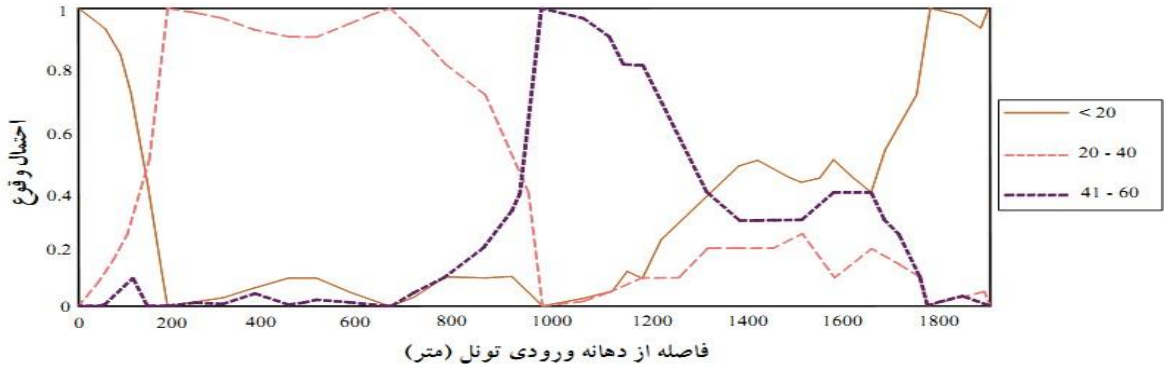
$$V^{ns}_{X_{m\,z_0}}\left(L_0 - O_{t-1}\right) = \begin{cases} \dfrac{V_{X_{z_0 w}}\left(O_t - L_0\right) V_{X_{m\,z_0}}\left(L_0 - O_{t-1}\right)}{V_{X_{m\,w}}\left(O_t - O_{t-1}\right)} & , \quad O_{t-1} < L_0 < O_t \quad , \quad t = 2, 3, \ldots, s \\ V_{X_{w\,z_0}}\left(L_0 - O_s\right) & , \quad L_0 > O_s \end{cases} \qquad (۶)$$

سلول	X(O۱)	X(L۰)	X(L۱)	...	X(L۸)	X(O۲)
حالت	m	z۰	z۱	...	z۸	w
سلول	X(O۲)	X(L۱۰)	X(L۱۱)	...	X(L۳۳)	X(O۳)
حالت	m	z۱۰	z۱۱	...	z۳۳	w
سلول	X(O۳)	X(L۳۵)	X(L۳۶)	...	X(L۴۷)	X(O۴)
حالت	m	z۳۵	z۳۶	...	z۴۷	w
سلول	X(O۴)	X(L۴۹)	X(L۵۰)	...	X(L۸۳)	X(O۵)
حالت	m	z۴۹	z۵۰	...	z۸۳	w
سلول	X(O۵)	X(L۸۵)	X(L۸۶)	...	X(L۹۴)	X(O۶)
حالت	m	z۸۵	z۸۶	...	z۹۴	w

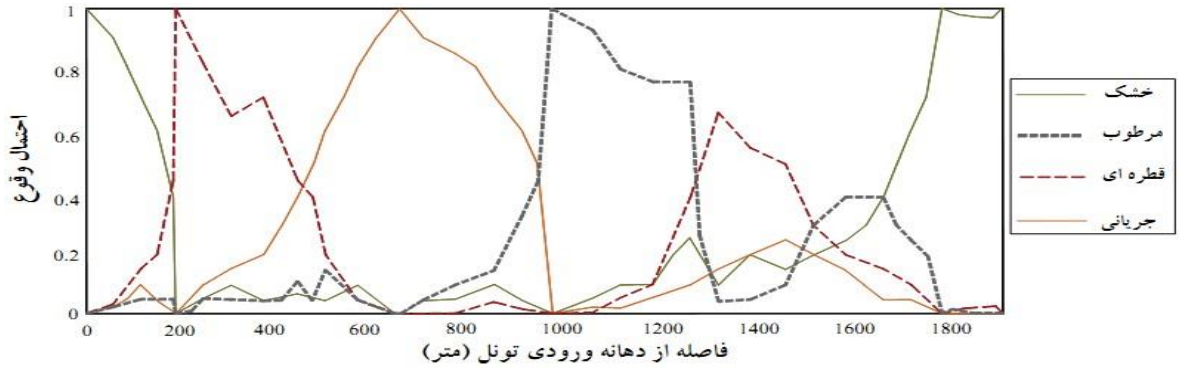
شکل ۵- روش پیش‌بینی احتمال وقوع حالات پارامترها در سلول‌های مجهول میان سلول‌های مشاهده‌ای رنگی. طول هر سلول برابر ۲۰ متر است.



شکل ۶- نیمرخ پارامتر نوع سنگ.



شکل ۷- نیمرخ پارامتر RMR.



شکل ۸- نیمرخ پارامتر شرایط آب زیرزمینی.

برای تشکیل نیمرخ کلاس زمین، از بردارهای زمین‌شناسی مربوط به هر پارامتر در جدول ۳ و داده‌های به دست آمده برای احتمال وقوع حالت‌های هر پارامتر استفاده شد. برای این کار، ابتدا داده‌های به دست آمده برای تشکیل نیمرخ‌های پارامتر در نرم‌افزار اکسل وارد شد، سپس با توجه به جدول ۳ که بردار یا بردارهای زمین‌شناسی هر کلاس زمین را معرفی می‌کند، احتمال وقوع هر یک از کلاس‌های زمین در داخل هر سلول به کمک نرم‌افزار اکسل به دست آمد.

برای بیان شیوه کار در نرم‌افزار اکسل به منظور دست‌یابی به احتمال وقوع هر کلاس زمین در داخل هر کدام از سلول‌ها برای این مطالعه، کلاس زمین ۵ را در نظر گرفته شده است که مطابق جدول ۴ شامل ۵ بردار زمین‌شناسی زیر است:

$$g_{51} = (1,3,1) \quad g_{52} = (1,3,2) \quad g_{53} = (2,3,1)$$

$$g_{54} = (3,3,1) \quad g_{55} = (4,3,1)$$

اگر هر یک از بردارها را به صورت (i,j,k) در نظر گرفته شود، i، j و k به ترتیب بیان‌کننده حالت پارامتر نوع سنگ، RMR و آب زیرزمینی‌اند. 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، حالت j از پارامتر RMR و حالت k از پارامتر

جدول ۳- معرفی بردارهای زمین‌شناسی مربوط به هرکدام از کلاس‌های زمین در نظر گرفته‌شده

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

جدول ۴- مشخصات مربوط به هرکدام از کلاس‌های زمین

شماره کلاس زمین	مشخصات
۱ (خیلی ضعیف)	روش تونل‌های جانبی– نگهداری: IPE 180، فاصله‌داری ۰٫۷۵ – ۰٫۵ متر و ۲۰ سانتی‌متر شاتکریت تقویت‌شده به وسیله دو لایه مش φ8@100×100 mm
۲ (ضعیف)	روش دیافراگم مرکزی– نگهداری: IPE 180، فاصله‌داری ۱ – ۰٫۷۵ متر و ۲۰ سانتی‌متر شاتکریت تقویت‌شده به وسیله دو لایه مش φ6@100×100 mm
۳ (ضعیف تا متوسط)	روش طاق و پاطاق– نگهداری: IPE 180، فاصله‌داری ۱٫۲ – ۱ متر و ۲۰ سانتی‌متر شاتکریت تقویت‌شده به وسیله دو لایه مش φ8@100×100 mm
۴ (متوسط)	روش طاق و پاطاق– نگهداری: IPE 180، راک بولت تمام تزریقی، φ25 mm, L : 4- , 6 m فاصله‌داری ۲ × ۲ و ۱۵ سانتی‌متر شاتکریت تقویت‌شده به وسیله دو لایه مشφ6@100×100 mm
۵ (متوسط تا خوب)	روش طاق و پاطاق– نگهداری: IPE 180، راک بولت تمام تزریقی، φ25 mm, L: 4- , 6 m فاصله‌داری ۲ × ۲ و ۱۰ سانتی‌متر شاتکریت تقویت‌شده به وسیله یک لایه مش φ6@100×100 mm

آب زیرزمینی با احتمال مشخصی اتفاق می‌افتد، بنابراین برای پیدا کردن احتمال وقوع هر کلاس زمین در یک سلول معین باید احتمال وقوع حالات 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، برای هر یک از بردارها باید در داخل هر سلول این محاسبات را 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 چگونگی دست‌یابی به احتمال وقوع کلاس زمین ۵ در داخل سلول x نشان داده شده است:

$$P[g(x) \text{ belongs to } GC_5] = P[g(x) = g_{51}] + P[g(x) = g_{52}] + P[g(x) = g_{53}] + P[g(x) = g_{54}] + P[g(x) = g_{55}] = P[l(x) = ۱ \ \& \ r(x) = ۳ \ \& \ w(x) = ۱] + P[l(x) = ۱ \ \& \ r(x) = ۳ \ \& \ w(x) = ۲] + P[l(x) = ۲ \ \& \ r(x) = ۳ \ \& \ w(x) = ۱] + P[l(x) = ۳ \ \& \ r(x) = ۳ \ \& \ w(x) = ۱] + P[l(x) = ۴ \ \& \ r(x) = ۳ \ \& \ w(x) = ۱] = P[l(x)=۱] * P[r(x)=۳] * P[w(x)=۱] + P[l(x)=۱] * P[r(x)=۳] * P[w(x)=۲] + P[l(x)=۲] * P[r(x)=۳] * P[w(x)=۱] + P[l(x)=۳] * P[r(x)=۳] * P[w(x)=۱] + P[l(x)=۴] * P[r(x)=۳] * P[w(x)=۱]$$

که در آن:

$P[g(x) \text{ belongs to } GC_5]$: احتمال وقوع کلاس ۵ در سلول x

$l(x)$ حالت پارامتر نوع سنگ در سلول x

$r(x)$ حالت پارامتر RMR در سلول x

$w(x)$ حالت پارامتر آب زیرزمینی در سلول x

$P[l(x) = i]$ احتمال وقوع حالت i پارامتر نوع سنگ در سلول x

$P[r(x) = j]$ احتمال وقوع حالت j پارامتر RMR در سلول x

$P[w(x) = k]$ احتمال وقوع حالت k پارامتر آب زیرزمینی در سلول x

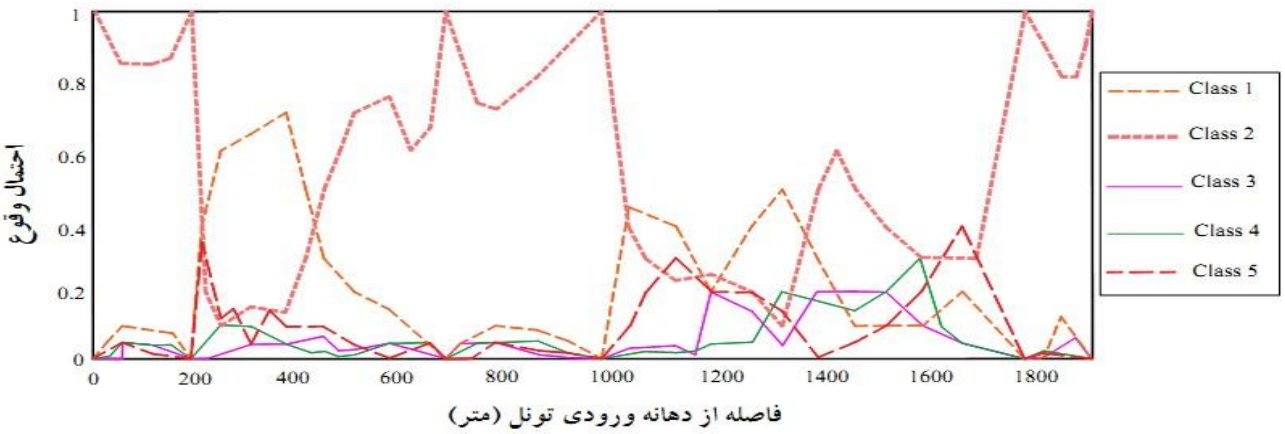
برای سایر کلاس‌های زمین نیز به این صورت عمل شد و در نهایت نیمرخ شکل ۹ به دست آمد که احتمال وقوع هر یک از کلاس‌های زمین را در داخل هر سلول نشان می‌دهد و به عنوان نیمرخ کلاس زمین شناخته شده است.

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

در شکل ۹ نیز همانند نیمرخ‌های پارامتر، حالت زیگزاگی و تغییرات سریع در احتمال وقوع کلاس‌های زمین مشاهده می‌شود که این وضعیت نیز به دلیل همان نیمرخ‌های پارامتر است به‌گونه‌ای که اگر داده‌های اولیه دقیق نباشد علاوه بر نیمرخ‌های پارامتر، بر روی نیمرخ کلاس زمین هم تاثیرگذارند و یا به عبارتی هر چه نیمرخ‌های پارامتر دقیق‌تر باشند، نیمرخ کلاس زمین دقیق‌تری به دست می‌آید.

۳-۵-۳- مدل ساخت برای تونل گاران

در مدل ساخت، زمان و هزینه اجرای تونل در هر سلول برای هر کلاس زمین به دست می‌آید. برای برآورد زمان و هزینه برای هر سلول در تونل گاران، به کمک پرسش‌نامه از افراد کارشناس (۱۰ نفر) خواسته شد که ابتدا برای هرکدام از کلاس‌های زمین، فعالیت‌هایی که یک سیکل ساخت (حفاری و نگهداری) از کلاس مورد نظر را کامل می‌کند در نظر بگیرند؛ سپس به کمک این فعالیت‌ها، میزان زمان و هزینه حداقل، متوسط و حداکثر مربوط به هر فعالیت (برای سال ۱۳۹۶) را با تجربه از پروژه‌های اجرا شده قبلی در شرایط زمین‌شناسی مشابه تقریب زنند تا در نهایت زمان و هزینه حداقل، متوسط و حداکثر برای هر سیکل ساخت از کلاس‌های زمین به دست آید، سپس از میانگین‌گیری نظرهای ارایه شده به وسیله افراد کارشناس مختلف برای هر کلاس زمین، زمان و هزینه حداقل، متوسط و حداکثر به ازای هر ۲۰ متر ساخت (هر سلول) مطابق جدول ۵ به دست آمد.



شکل ۹- نیمرخ کلاس زمین برای تونل گاران.

جدول ۵- زمان و هزینه هر سلول (۲۰ متر) از کلاس زمین موردنظر

زمان و هزینه برای هرسلول		کلاس های زمین				
		۱	۲	۳	۴	۵
زمان (روز)	حداکثر	۱۸٫۴	۱۷٫۲	۱۳٫۹	۱۲٫۸	۱۰٫۵
	متوسط	۱۶٫۷	۱۴٫۲	۱۱٫۷	۱۰	۸٫۴
	حداقل	۱۳٫۸	۱۲٫۷	۱۰٫۱	۸٫۶	۷٫۲
هزینه (هزار تومان)	حداکثر	۴۹۰	۴۷۳	۴۴۰	۳۸۷	۳۳۶
	متوسط	۴۷۸	۴۶۶	۴۲۴	۳۶۹	۳۱۴
	حداقل	۴۶۸	۴۵۳	۴۱۷	۳۵۷	۲۹۳

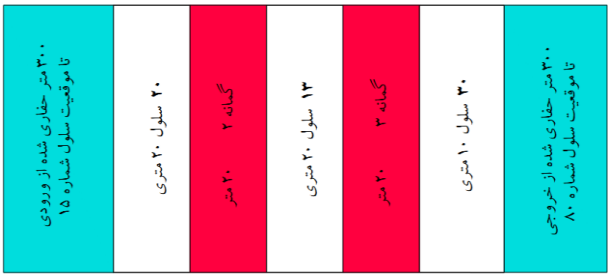
در این پرسش‌نامه، برای برآورد زمان و هزینه‌ها برای هر سیکل ساخت از یک کلاس زمین معین، از افراد کارشناس خواسته شد تا فرض کنند تونل تنها از یک طرف (ورودی یا خروجی) حفاری شود و نتایج به دست آمده برای زمان و هزینه‌های ساخت نیز بر این فرض است. هم‌چنین در برآورد زمان و هزینه‌ها، روسازی کف تونل (عملیات مربوط به ساخت جاده تونل) در نظر گرفته نشده است. برای تخمین زمان و هزینه نهایی ساخت کل تونل، باید زمان و هزینه تمام سلول‌ها با هم جمع شود. از آنجایی‌که در داخل هر سلول، هر یک از کلاس‌های زمین با احتمال مشخصی اتفاق می‌افتد، می‌توان برای ارزیابی زمان و هزینه نهایی ساخت، روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو را به کار برد.

۳-۵-۴- برآورد احتمالاتی زمان و هزینه ساخت تونل گاران با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو

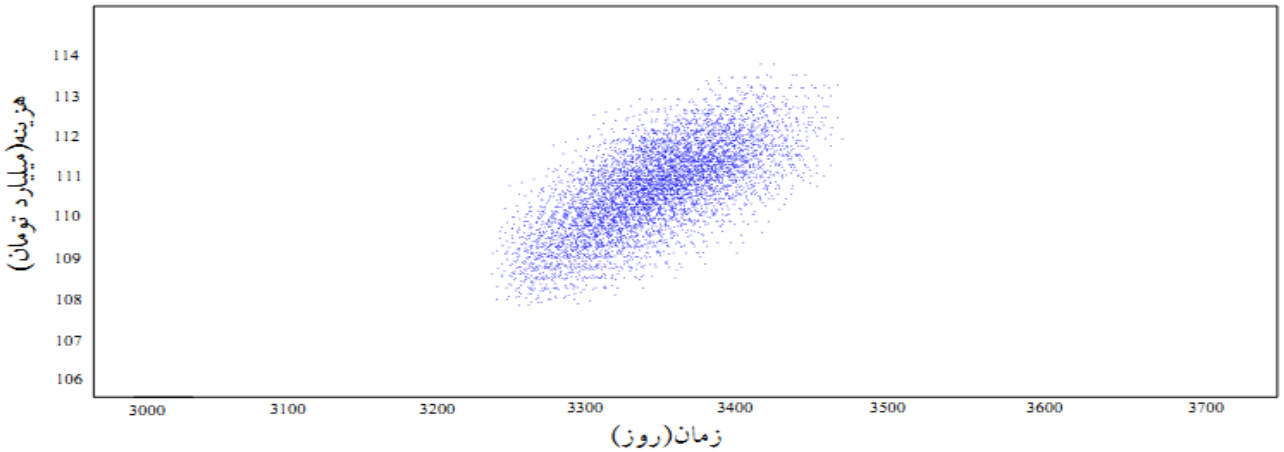
برای روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، نرم‌افزار PertMaster استفاده شد. پس از وارد کردن داده‌ها در این نرم‌افزار، می‌توان نسبت به اجرای شبیه‌سازی مونت‌کارلو اقدام کرد. در خلال اجرای شبیه‌سازی، برنامه تهیه‌شده به تعداد مشخصی تکرار می‌شود. در هر یک از این تکرارها، مقادیر غیرقطعی برنامه (زمان و هزینه) بر اساس توزیع‌ها و داده‌های واردشده به صورت تصادفی تعیین می‌شوند. این نرم‌افزار در انتهای هر تکرار، میزان زمان و هزینه نهایی را در خود ذخیره‌سازی می‌کند. در نهایت، از این مقادیر برای رسم نمودارهای موردنظر و نیز تهیه تابع احتمالی مربوط به اجرای هر یک از این موارد استفاده می‌کند. به دلیل این‌که برای هرکدام از زمان و هزینه‌ها سه مقدار حداقل، متوسط و حداکثر موجود بود، بنابراین در نرم‌افزار PertMaster برای اجرای شبیه‌سازی از توابع توزیع مثلثی استفاده شد (در تابع توزیع مثلثی برای مقدار مد از مقدار متوسط زمان و هزینه‌ها استفاده شده است). 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 هزینه حداقل و حداکثر نشان داده شده است که می‌توان در یک حالت بهینه نقطه‌ای را به عنوان زمان و هزینه نهایی ساخت تونل انتخاب کرد که بیش‌ترین تکرار در اجرای شبیه‌سازی‌ها را داشته باشد.

۳-۵-۵- به‌روزرسانی مدل DAT برای تونل گاران

برای به‌روزرسانی مدل DAT، داده‌های واقعی حالات پارامترها به جای داده‌های قبلی در موقعیت‌های مشابه در ۳۰۰ متر اول ورودی و خروجی تونل جایگزین شدند و ماتریس‌های احتمال انتقال و شدت انتقال جدیدی به واسطه 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. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای به‌روزرسانی مدل از چهار سلول مشاهده‌ای استفاده شده است. جدول ۶ حالت‌های تمام پارامترها را در موقعیت سلول‌های مشاهده‌ای بعد از به‌روزرسانی نشان می‌دهد. در نهایت نیمرخ‌های پارامتر و کلاس زمین بعد از به‌روزرسانی مطابق شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ به دست آمدند.



شکل ۱۱- تعداد و موقعیت سلول‌های مشاهده‌ای در مسیر تونل گاران بعد از به‌روزرسانی.



شکل ۱۰- نمودار پراکندگی زمان – هزینه ساخت تونل قبل از به‌روزرسانی DAT.

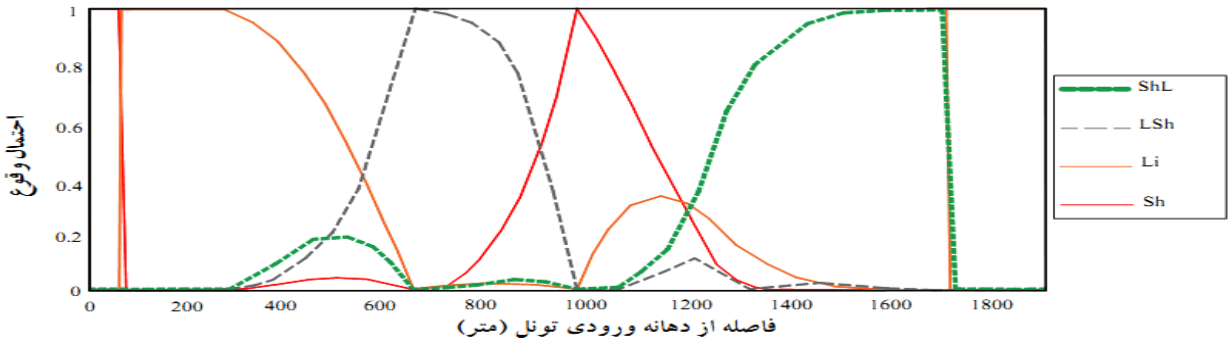
جدول ۶ - حالات پارامترها در سلول‌های مشاهده‌ای بعد از به‌روزرسانی

پارامتر		سلول‌های مشاهده‌ای			
نوع	حالت	ش.۱۵	گ.۲	گ.۳	ش.۸۰
سنگ	۱	✓			
	۲			✓	
	۳				✓
	۴		✓		
RMR	۱	✓			
	۲		✓		✓
	۳			✓	
آب	۱				
	۲		✓		
	۳	✓			
	۴			✓	✓

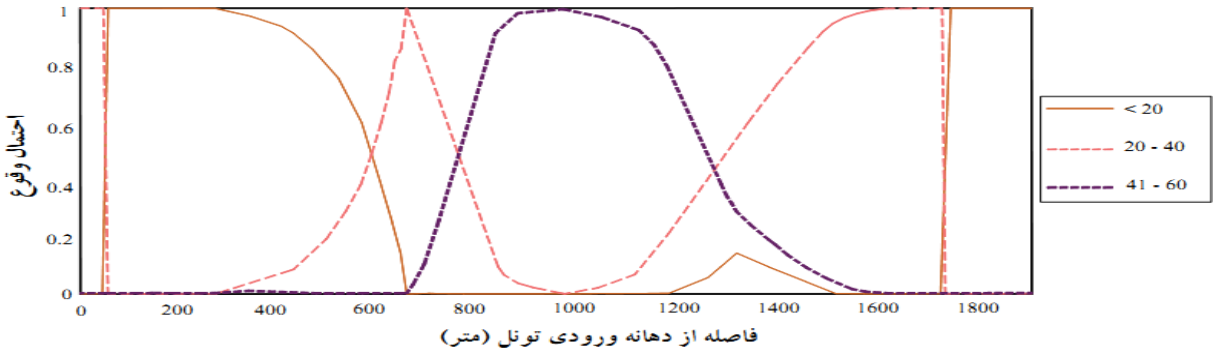
در بخش‌های قبلی گفته شد که حالت زیگزاگی و تغییرات سریع در نیمرخ‌های پارامتر و نیز نیمرخ کلاس زمین ناشی از عدم همخوانی داده‌های مربوط به موقعیت گمانه‌ها و ماتریس‌های احتمال انتقال و شدت انتقال است. حال در این بخش بعد از حفاری ۳۰۰ متر از هر دو بخش ورودی و خروجی تونل و نیز با تاثیر دادن داده‌های واقعی این بخش‌های حفاری شده برای پارامترهای در نظر گرفته شده در مدل، حالت‌های زیگزاگی و تغییرات سریع در احتمال وقوع حالات پارامترها و کلاس‌های زمین خیلی کمتر شده است و در نتیجه آن مطابق شکل ۱۶ زمان و هزینه‌های ساخت تونل با عدم قطعیت‌های کمتری به دست آمده‌اند.

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 نتیجه به‌روزرسانی، کاهش یافته است. در جدول ۷ میانگین حداکثر و حداقل زمان و هزینه‌های کل ساخت تونل گاران که از روش *DAT* به دست آمد، قبل و بعد از به‌روزرسانی همراه با انحراف معیار نشان داده شده است. با توجه به انحراف معیارها می‌توان گفت تقریبا ۳۰ درصد برای زمان و هزینه‌ها در اثر به‌روزرسانی مدل کاهش عدم قطعیت رخ داده است؛ بنابراین به‌روزرسانی مدل *DAT* حین حفاری می‌تواند تاثیر قابل‌ملاحظه‌ای در نتایج این ابزار داشته باشد و عدم قطعیت‌های زمان و هزینه ساخت بخش‌های حفاری نشده تونل را به‌طور چشمگیری کاهش دهد.

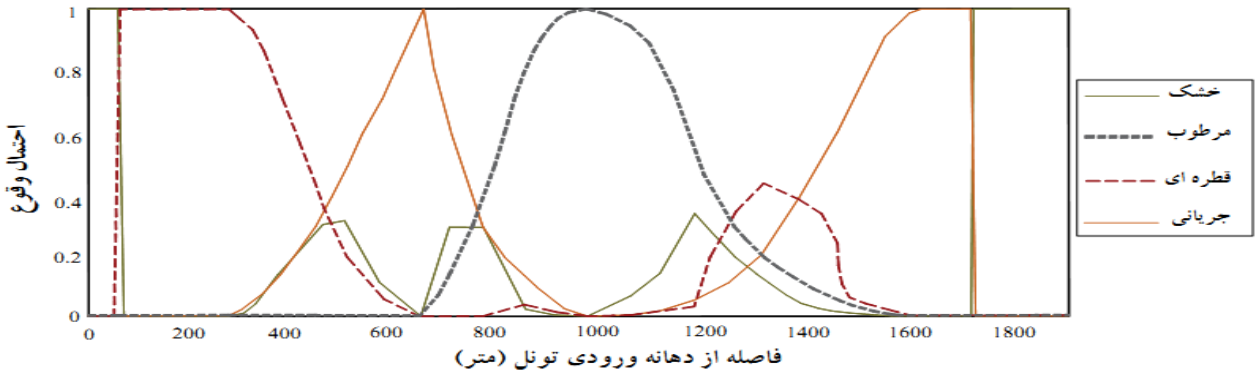
.



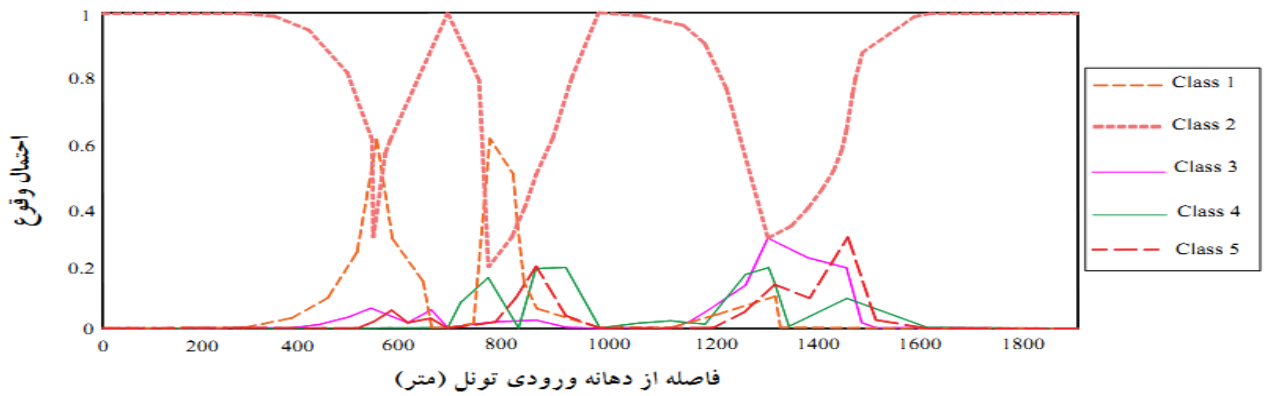
شکل ۱۲- نیمرخ پارامتر نوع سنگ بعد از به‌روزرسانی.



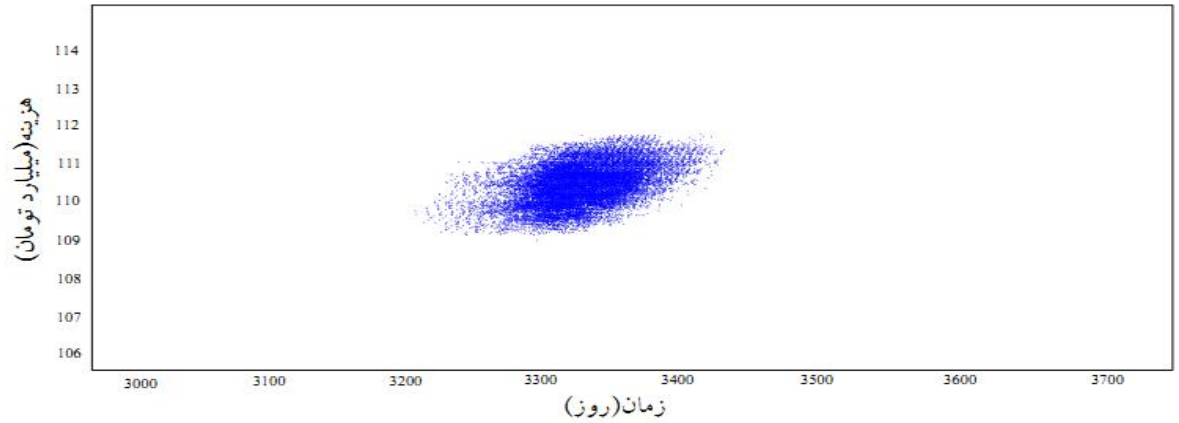
شکل ۱۳- نیمرخ پارامتر RMR بعد از به‌روزرسانی.



شکل ۱۴- نیمرخ پارامتر آب زیرزمینی بعد از به‌روزرسانی .



شکل ۱۵- نیمرخ کلاس زمین بعد از به‌روزرسانی.



شکل ۱۶- نمودار پراکندگی زمان – هزینه ساخت تونل بعد از به‌روزرسانی مدل.

جدول۷- میانگین حداکثر و حداقل زمان و هزینه‌های ساخت کل تونل گاران قبل و بعد از به‌روزرسانی مدل DAT

	کل زمان ساخت (روز)		کل هزینه ساخت (میلیارد تومان)	
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
قبل از به‌روز رسانی	۳۳۵۵	۳۶٫۶۳	۱۱۰٫۶۷۱	۰٫۸۶
بعد از به‌روز رسانی	۳۳۲۵	۲۵٫۷۶	۱۱۰٫۵۱۵	۰٫۵۹

۴- نتیجه‌گیری

عدم قطعیت زمین‌شناسی، منبع اصلی ریسک در ساخت زیرزمینی است که اغلب منجر به فرض بدترین شرایط زمین‌شناسی ممکن می‌شود و در نتیجه، هزینه‌ها به مقدار قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. انتخاب روش حفاری و نگهداری بر اساس شرایط زمین‌شناسی موجود، منجر به صرفه‌جویی قابل‌توجهی در طول ساخت خواهد شد. برای کاهش عدم قطعیت‌ها، ابزارهای مختلفی ارایه شده است که از آن جمله می‌توان به ابزار DAT اشاره کرد. DAT ابزاری آماری است که با استفاده از داده‌های موجود، به پیش‌بینی احتمالاتی زمان و هزینه مورد نیاز اجرای تونل می‌پردازد

در این مقاله ابتدا به کمک ابزار DAT با به کارگیری داده‌های قبل از شروع به ساخت تونل گاران، زمان و هزینه ساخت کل این تونل به صورت احتمالاتی پیش‌بینی شد به‌طوری‌که میانگین حداقل و حداکثر زمان و هزینه‌های پیش‌بینی شده به ترتیب برابر ۳۳۵۵ روز و ۱۱۰٫۶۷۱ میلیارد تومان به دست آمد. سپس با به‌روزرسانی داده‌ها در هنگام ساخت برای ۳۰۰ متر در هرکدام از موقعیت‌های ورودی و خروجی تونل، مدل DAT به‌روزرسانی شد و میانگین حداقل و حداکثر زمان و هزینه‌های پیش‌بینی‌شده به ترتیب برابر ۳۳۲۵ روز و ۱۱۰٫۵۱۵ میلیارد تومان به دست آمد. همچنین با مقایسه انحراف معیارهای زمان و هزینه ساخت تونل در قبل و بعد از به‌روزرسانی، مشخص شد که عدم قطعیت‌ها تقریبا به میزان ۳۰ درصد در اثر به‌روزرسانی کاهش یافته‌اند که این نشان از تاثیر قابل‌توجه به‌روزرسانی‌ها بر روی ابزار DAT دارد.

با توجه به نتایج به دست آمده، به‌روزرسانی داده‌ها در طول ساخت کمک بسیار خوبی در آگاه ساختن پیمان‌کارها و کارفرماهای پروژه در پذیرفتن میزان ریسک و ارایه پیشنهادها برای ساخت بخش‌های حفاری نشده تونل است. به عنوان پیشنهاد می‌توان مدل DAT را در سایر پروژه‌های عمرانی و معدنی از جمله تونل‌های شهری، تونل‌های معدنی، مخازن هیدروکربوری، مغارها و نظایر آن به کار گرفت.

منابع و مراجع

[1] Chan. M; 1981; "*A Geological Prediction and Updating Model in Tunneling* (PhD Thesis)", Combridge: Massachusetts: University of Massachusetts Institutes of Technology, 236 p.

[2] Vijaya. H; 1995; "*Resource Modeling for DAT* (PhD Thesis)", Combridge: Massachusetts: University of Massachusetts Institutes of Technology, 358 p.

[3] Joseph. V Sinfield; Einstein. H; 1996; "*Evaluation of Tunneling Technology Using the Decision Aids for Tunneling*", Tunneling and Underground Space Technology, 491-504. Doi: 10.1016/S08867798 (96)89245-5.

[4] Christoph, H; 2000; "*Updating in the Decision Aids for Tunneling* (PhD. Thesis)", Combridge: Massachusetts: University of Massachusetts Institutes of Technology, 374 p.

[5] Min. S. Y; Einstein. H; 2003; "*Application of Decision Aids for Tunneling (DAT) to a Drill and Blast Tunnel"*, J. Civil Eng.Korean Society of Civil Engineers, 619–628.

[6] Min. S. Y; Einstein. H; 2003; "*DAT Application for the Wonhyo Tunnel*", Korea: Korea Railroad Research Institute.

[7] Min. S. Y; Einstein. H; 2005; "*Application of Decision Aids for Tunneling (DAT) to Update Excavation Cost/Time Information*", J. Civil Eng. KSCE, 335–346.

[8] Hung. V; 2012; "*Modelling Uncertaintyin the NEW YORK City No. 7 SubwayLine Extenstion Project Using Decision Aids for Tunnelling (DAT)* (PhD Thesis)", Combridge: Massachusetts: University ofMassachusetts Institutes of Technology.

[10] Moret. Y; 2011; "*Modeling Cost and Time Uncertainty in Rail Line Construction* (PhD Thesis)*",* Combridge: Mss: University of Massachusetts Institutes of Technology, 443 p.

[11] Yost. K; Valentin. A; Einstein. H; 2015; "*Estimating Cost and Time of Well Bore Drilling for Engineered Geothermal Systems (EGS)-Considering Uncertainties"*, Geothermics Journal, 5, 85-99.

[۱۲] محمودزاده، ارسلان؛ زارع، شکراله؛ دارای، رحمان (۱۳۹۴). کاربرد روش DAT (ابزار کمک به تصمیم‌گیری در تونل‌سازی)- مطالعه موردی: تونل جاده همرو؛ دومین کنفرانس منطقه‌ای و یازدهمین کنفرانس تونل ایران.

[۱۳] محمودزاده، ارسلان؛ زارع، شکراله؛ دارای، رحمان (۱۳۹۴). کاهش عدم قطعیت زمان و هزینه پروژه‌های تونل‌سازی با به کارگیری روش DAT- مطالعه موردی: تونل راه همرو؛ مجله 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.

[15] Ioannou. G; A. A; 1989; "*A Geological Prediction Model for Tunneling*", American Society of Civil Engineers, 115, 339-356.

[16] Ioannou. G; 1984; "*The Economic Value of Geologic Exploration as a Risk Reduction Strategy* (PhD Thesis)", Combridge, Massachusetts Institutes of Technology T, 465 p.

[۱۷] مهندسین مشاور ره آور (۱۳۸۸) "گزارش مطالعات تونل‌های محور تیژ تیژ _ گاران"، مرحله دوم، ۱۵۷ صفحه.

[18] *MATLAB software*, R; 2013.

[19] *PertMaster tutorials*, V. 8; 2009.

پی‌نوشت‌ها

[1] Decision Aids for Tunneling
[2] Min and Einstein
[3] Engineering Geothermal System
[4] Excel