

رسالة محمد



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
گروه مکانیک سنگ

عنوان:

کاربرد روش DAT (ابزار کمک به تصمیم گیری) در تونل سازی
مطالعه موردی: تونل جاده همرو

دانشجو: ارسلان محمودزاده

استاد راهنما

دکتر شکراله زارع

استاد مشاور

مهندس رحمان دارای

پایان نامه کارشناسی ارشد

دی ۱۳۹۴

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه مکانیک سنگ

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای ارسلان محمودزاده

تحت عنوان: کاربرد روش DAT (ابزار کمک به تصمیم‌گیری) در تونل سازی

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه
مورد پذیرش قرار گرفت.

| امضاء | استاد مشاور | امضاء | استاد راهنما |
|-------|-------------------|-------|------------------|
| | مهندس رحمان دارای | | دکتر شکراله زارع |

| امضاء | نماینده تحصیلات تکمیلی | امضاء | اساتید داور |
|-------|------------------------|-------|---------------------|
| | نام و نام خانوادگی: | | نام و نام خانوادگی: |
| | | | نام و نام خانوادگی: |
| | | | نام و نام خانوادگی: |
| | | | نام و نام خانوادگی: |

پاس خدای را که سخوران، در ستودن او مانند و شمارندگان، شمرن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند.

به پاس تعبیر عظیم از کلمه ایشار و از خودگذشتگان

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان

به پاس قلب های بزرگشان

و به پاس محبت های بی درنیشان که هرگز فروکش نمی کند

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی

به رسم ادب می نویسم تا به یادگار بماند، اما می دانم که واژه ها عاجزند. بدون شک جایگاه و منزلت استاد، فراتر از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم. اما برحسب وظیفه از استاد فرهیخته و شایسته، جناب آقای دکتر شکر اله زارع که در کمال سعصدر از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده گرفتند؛ جناب آقای مهندس رحمان دارای که زحمت مشاوره این پایان‌نامه را متقبل شدند، خانم مهندس هانیه نیکوگفتار؛ آقای مهندس فرهاد رضایی و آقای مهندس مختار محمدی که در مراحل مختلف انجام این تحقیق با کمال دلسوزی همکاری فرمودند؛

کمال تشکر و قدردانی را دارم.

امیدوارم که این تحقیق بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

تعهدنامه

اینجانب ارسلان محمودزاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ از دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان: کاربرد روش DAT (ابزار کمک به تصمیم‌گیری) در تونل‌سازی-مطالعه موردی: تونل جاده همرو تحت راهنمایی آقای دکتر شکراله زارع

متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند، در مقالات مستخرج از این پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) مربوط به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

کاهش عدم قطعیت‌های قبل از شروع به ساخت تونل‌ها، بخصوص عدم قطعیت در مورد زمان و هزینه نهایی ساخت تونل می‌تواند در مراحل اولیه برنامه‌ریزی‌ها مفید واقع گردد و ریسک تصمیم‌گیری‌ها را تا حد قابل قبولی کاهش دهد. روش آماری DAT که به پیش‌بینی احتمالاتی زمان و هزینه موردنیاز اجرای تونل قبل از شروع به ساخت می‌پردازد. در این پژوهش به کمک روش DAT با بکارگیری داده‌های قبل از شروع به ساخت تونل راه همرو، زمان و هزینه ساخت کل این تونل به صورت احتمالاتی پیش‌بینی شد. از جنبه‌های جدید این مطالعه که در روش DAT استفاده شده است، استفاده از نظر کارشناسان تونلسازی به منظور دستیابی به داده‌های ورودی روش DAT از طریق پرسشنامه، بکارگیری داده‌های مربوط به موقعیت ورودی و خروجی تونل و همچنین داده‌های مربوط به موقعیت گمانه‌ها به صورت غیرقطعی، کدنویسی مدل مارکوف در نرم‌افزار متلب به منظور اجرای مدل زمین‌شناسی روش DAT، استفاده از نرم‌افزار Primavera Risk Analysis در مدل ساخت جهت شبیه‌سازی مونت کارلو، مقایسه زمان و هزینه بدست آمده از روش DAT به کمک داده‌های قبل از شروع به ساخت تونل با زمان و هزینه واقعی اجرای تونل و اعتبار سنجی این روش جهت بکارگیری آن در پروژه‌های آتی و ... می‌باشد. بنابراین با دخیل دادن این جنبه‌های جدید در روش DAT، نتایجی که بدست آمد نشان داد که شباهت زیادی با نتایج واقعی دارد و این مسئله، اعتبار روش DAT را جهت کاهش عدم قطعیت‌های زمان و هزینه نهایی ساخت در پروژه‌های آتی اثبات می‌کند.

کلمات کلیدی: DAT، عدم قطعیت، مدل زمین شناسی، مدل ساخت، تونل جاده همرو.

مقالات مستخرج از پایان نامه

محمودزاده، ارسلان، زارع، شکراله، دارای، رحمان، "کاربرد روش DAT، ابزار کمک به تصمیم گیری در تونل سازی- مطالعه موردی: تونل جاده همرو"، دومین کنفرانس منطقه‌ای و یازدهمین کنفرانس تونل ایران، ۱۳۹۴.

محمودزاده، ارسلان، زارع، شکراله، دارای، رحمان، "کاهش عدم قطعیت زمان و هزینه پروژه های تونل سازی با بکارگیری روش DAT- مطالعه موردی: تونل راه همرو"، مجله علمی و پژوهشی عمران شریف، ۱۳۹۴.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول: کلیات

| | |
|---|--|
| ۲ | ۱-۱- مقدمه..... |
| ۲ | ۲-۱- تونل راه همرو..... |
| ۳ | ۳-۱- بیان مسئله و سؤال اصلی تحقیق..... |
| ۴ | ۴-۱- اهداف و ضرورت‌ها و روش انجام تحقیق..... |
| ۶ | ۵-۱- ساختار پایان‌نامه..... |

فصل دوم: ابزارنگار به تقسیم‌گیری دتونل سازی

| | |
|----|---|
| ۸ | ۱-۲- مقدمه..... |
| ۸ | ۲-۲- روش DAT..... |
| ۱۱ | ۳-۲- پیشینه روش DAT..... |
| ۲۰ | ۴-۲- داده‌های ورودی موردنیاز روش DAT..... |

فصل سوم: مدل زمین‌شناسی

| | |
|----|---|
| ۲۴ | ۱-۳- مقدمه..... |
| ۲۵ | ۲-۳- مدل پیش‌بینی زمین‌شناسی..... |
| ۲۶ | ۳-۳- تعریف مدل مارکوف..... |
| ۲۹ | ۴-۳- ماتریس احتمال انتقال..... |
| ۳۸ | ۵-۳- ماتریس شدت انتقال..... |
| ۴۱ | ۶-۳- روش پیش‌بینی احتمال وقوع حالت‌های یک پارامتر زمین‌شناسی در یک نقطه در طول مسیر تونل..... |
| ۴۸ | ۷-۳- دست‌یابی به نمودار تغییر حالت پارامتر..... |
| ۵۳ | ۸-۳- نمودار تغییر کلاس زمین..... |
| ۵۸ | ۹-۳- خلاصه فصل..... |

فصل چهارم: مدل ساخت

| | |
|----|-----------------------|
| ۶۰ | ۱-۴- مقدمه..... |
| ۶۰ | ۲-۴- چرخه (سیکل)..... |

| | | |
|---------|--------------------------|------|
| ۶۰..... | شبکه فعالیت..... | ۳-۴- |
| ۶۵..... | شبه سازی مونت کارلو..... | ۴-۴- |
| ۷۱..... | نتیجه گیری..... | ۵-۴- |

فصل پنجم: برآورد زمان و هزینه نهایی ساخت تونل جاده همرو به کمک روش DAT

| | | |
|----------|---|------|
| ۷۴..... | مقدمه..... | ۱-۵- |
| ۷۴..... | موقعیت جغرافیایی و راه های دسترسی به تونل همرو..... | ۲-۵- |
| ۷۷..... | مدل زمین شناسی تونل همرو..... | ۳-۵- |
| ۱۰۲..... | مدل ساخت..... | ۴-۵- |
| ۱۱۶..... | نتیجه گیری..... | ۵-۵- |

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

| | | |
|----------|-----------------|------|
| ۱۲۰..... | نتیجه گیری..... | ۱-۶- |
| ۱۲۲..... | پیشنهادات..... | ۲-۶- |

مراجع

| | |
|----------|------------|
| ۱۲۶..... | مراجع..... |
|----------|------------|

پیوست ها

| | |
|----------|------------------|
| ۱۳۰..... | پیوست (الف)..... |
| ۱۳۸..... | پیوست (ب)..... |

فهرست اشکال

| صفحه | عنوان |
|---------|---|
| ۱۰..... | شکل ۱-۲: مثالی از نمودار پراکندگی زمان-هزینه [۶]..... |
| ۱۳..... | شکل ۲-۲: تأثیر به‌روزرسانی DAT بر روی نتایج (زمان و هزینه نهایی) حاصل از آن..... |
| ۱۵..... | شکل ۳-۲: نمودار پراکندگی زمان-هزینه در مطالعات هاس..... |
| ۱۶..... | شکل ۴-۲: شماتیکی از تونل سوچون در کره جنوبی..... |
| ۱۸..... | شکل ۵-۲: نمودار پراکندگی زمان-هزینه برای تونل سوچون با روش DAT..... |
| ۱۹..... | شکل ۶-۲: مقدار زمان و هزینه قطعی و نمودار پراکندگی زمان-هزینه برای چهار مسیر محور پورتو-ویگو..... |
| ۲۰..... | شکل ۷-۲: نمودار پراکندگی زمان هزینه برای حفاری چاه در EGS توسط یوست به کمک DAT..... |
| ۲۲..... | شکل ۸-۲: مقایسه عدم قطعیت زمان-هزینه مربوط به دو حالت..... |
| ۲۷..... | شکل ۱-۳: تعریف زمان در فرایند مارکوف..... |
| ۲۸..... | شکل ۲-۳: انتقال میان حالت‌های پارامتر X..... |
| ۲۹..... | شکل ۳-۳: وسعت حالت ۱ از پارامتر X (H_{X_1})..... |
| ۳۰..... | شکل ۴-۳: دیاگرام احتمال انتقال میان سه حالت ۱، ۲ و ۳ در زنجیره مارکوف..... |
| ۳۴..... | شکل ۵-۳: تشکیل زنجیره انتقال با استفاده از روش فراوانی..... |
| ۳۵..... | شکل ۶-۳: نمودار تغییر حالت تغییر حالت پارامتر نوع سنگ..... |
| ۳۹..... | شکل ۷-۳: پروفیل تغییر حالت پارامتر X با سه حالت..... |
| ۴۱..... | شکل ۸-۳: پیش‌بینی احتمال وقوع هر کدام از حالت‌های یک پارامتر (X)..... |
| ۴۴..... | شکل ۹-۳: دیاگرام احتمال پرش قورباغه از یک حالت به حالت دیگر..... |
| ۵۰..... | شکل ۱۰-۳: پیش‌بینی احتمال وقوع حالت‌های پارامتر X در سلول‌های مجهول..... |
| ۵۲..... | شکل ۱۱-۳: نمودار تغییر حالت یک پارامتر معین با سه حالت در طول محور تونل..... |

- شکل ۳-۱۲: شماتیکی از چگونگی تشکیل پروفیل کلاس زمین..... ۵۴
- شکل ۳-۱۳: نمودار تغییر حالت پارامتر نوع سنگ با چهار حالت شیبست، دیوریت، کوارتزیت و متاکوارتزیت..... ۵۵
- شکل ۳-۱۴: نمودار تغییر حالت پارامتر RQD، با سه حالت کم، متوسط و زیاد..... ۵۵
- شکل ۳-۱۵: نمودار تغییر حالت کلاس زمین برای مثال ارائه شده..... ۵۷
- شکل ۴-۱: شبکه فعالیت یک سیکل از تونل برای زمانی که کل مقطع تونل در یک مرحله حفاری شود..... ۶۲
- شکل ۴-۲: شبکه فعالیت یک سیکل از تونل برای زمانی که مقطع تونل در دو مرحله مطابق شکل حفاری شود..... ۶۲
- شکل ۴-۳: فرایند ساخت تونل در طول n چرخه..... ۶۳
- شکل ۴-۴: احتمال وقوع هزینه مربوط به هر کدام از کلاس‌های زمین در سلول اول..... ۶۴
- شکل ۴-۵: احتمال وقوع هزینه مربوط به هر کلاس زمین در سلول اول..... ۶۵
- شکل ۴-۶: احتمال وقوع زمان مربوط به هر کلاس زمین در سلول اول..... ۶۵
- شکل ۴-۷: نمودار ستونی برای نمایش نحوه توزیع نتایج..... ۶۹
- شکل ۴-۸: نمودار تجمعی برای نمایش احتمال دستیابی به مقادیر موردنظر..... ۷۰
- شکل ۴-۹: نمودار پراکندگی برای تعیین ارتباط بین دو متغیر..... ۷۱
- شکل ۵-۱: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به تونل همرو..... ۷۵
- شکل ۵-۲: موقعیت تقریبی تونل همرو در پلان ۱/۵۰۰۰۰..... ۷۶
- شکل ۵-۳: پروفیل طولی تونل همرو..... ۷۹
- شکل ۴-۵: اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مسیر تونل همرو..... ۸۰
- شکل ۵-۵: تعداد و موقعیت سلول‌های مشاهده‌ای در مسیر تونل همرو..... ۹۱
- شکل ۵-۶: روش پیش‌بینی احتمال وقوع هر کدام از حالت‌های پارامترها در داخل سلول‌های مجهول..... ۹۵
- شکل ۵-۷: نمودار تغییر حالت تغییر حالت پارامتر نوع سنگ..... ۹۵
- شکل ۵-۸: نمودار تغییر حالت تغییر حالت پارامتر RQD..... ۹۶

- شکل ۵-۹: نمودار تغییر حالت تغییر حالت پارامتر شرایط آب زیرزمینی..... ۹۶
- شکل ۵-۱۰: نمودار تغییر حالت کلاس زمین..... ۱۰۲
- شکل ۵-۱۱: نمایش ۲۴ سلول (فعالیت) و ارتباط میان آن‌ها در نرم‌افزار Primavera Risk Analysis..... ۱۰۵
- شکل ۵-۱۲: تابع توزیع عمومی..... ۱۰۶
- شکل ۵-۱۳: توزیع زمان و هزینه منابع برای سلول (فعالیت) شماره ۲۰ تونل همرو..... ۱۰۷
- شکل ۵-۱۴: نمودار ستونی برای نمایش نحوه توزیع نتایج مربوط به هزینه نهایی پروژه تونل همرو..... ۱۰۹
- شکل ۵-۱۵: نمودار ستونی برای نمایش نحوه توزیع نتایج مربوط به مدت‌زمان نهایی پروژه تونل همرو..... ۱۱۰
- شکل ۵-۱۶: نمودار تجمعی برای نمایش مدت‌زمان و هزینه نهایی پروژه با سطوح اطمینان متفاوت..... ۱۱۰
- شکل ۵-۱۷: نمودار پراکندگی برای بیان ارتباط میان دو متغیر مدت‌زمان و هزینه نهایی پروژه تونل همرو..... ۱۱۳
- شکل ۵-۱۸: نمودار پراکندگی زمان-هزینه پروژه همرو وقتی که عدم قطعیت کم‌تری در مورد مدت‌زمان انجام پروژه در نظر گرفته شود..... ۱۱۴

فهرست جداول

| عنوان | صفحه |
|---|------|
| جدول ۱-۲: پارامترهای در نظر گرفته شده همراه با حالت های آن ها برای تونل شکل ۱-۲..... | ۱۴ |
| جدول ۲-۲: مشخصات مربوط به کلاس های زمین در نظر گرفته شده برای تونل اصلی، تونل فرعی و چاه دسترسی در | ۱۴ |
| جدول ۳-۲: زمان و هزینه نهایی ساخت تونل برای داده های اولیه قبل از ساخت و دو سطح از به روز رسانی..... | ۱۶ |
| جدول ۴-۲: پارامترهای در نظر گرفته شده برای مدل زمین شناسی تونل سوچون همراه با حالت های آن ها..... | ۱۷ |
| جدول ۵-۲: کلاس های زمین بدست آمده برای تونل سوچون..... | ۱۷ |
| جدول ۶-۲: معرفی چهار مسیر راه آهن پرتقال محور پورتو-ویگو..... | ۱۹ |
| جدول ۷-۲: زمان و هزینه و همچنین نرخ پیشروی برای سه شرایط ساخت خوب، متوسط و ضعیف در محور پورتو-ویگو | ۱۹ |
| جدول ۱-۳: تعریف حالت های مربوط به پارامتر زمین شناسی "نوع سنگ"..... | ۲۸ |
| جدول ۲-۳: تعریف حالت های مربوط به چهار پارامتر زمین شناسی نوع سنگ، RQD، درجه هوازدگی و وجود آب..... | ۵۴ |
| جدول ۳-۳: پنج کلاس زمین شناسی برای مثال ارائه شده..... | ۵۷ |
| جدول ۱-۵: طول میانگین و ضریب شدت انتقال مربوط به هر حالت از هر پارامتر..... | ۸۷ |
| جدول ۲-۵: احتمال وقوع هر حالت از هر پارامتر در موقعیت سلول های مشاهده ای..... | ۹۰ |
| جدول ۳-۵: معرفی بردارهای زمین شناسی مربوط به هر کدام از کلاس های زمین در نظر گرفته شده..... | ۹۷ |
| جدول ۴-۵: مشخصات مربوط به روش حفاری و سیستم نگهداری هر کدام از کلاس های زمین..... | ۹۸ |
| جدول ۵-۵: زمان و هزینه مربوط به هر متر از کلاس زمین مورد نظر..... | ۱۰۴ |
| جدول ۶-۵: زمان و هزینه مربوط به هر سلول (۱۰ متر) از کلاس زمین مورد نظر..... | ۱۰۴ |

فصل اول:

کلیات

۱-۱- مقدمه

از جمله مباحث مهم جهت طراحی و برنامه‌ریزی پروژه‌ها، به حداقل رساندن عدم قطعیت‌ها^۱ است. معمولاً عدم قطعیت‌ها در پروژه‌های زیرسطحی، ناشی از شرایط ناشناخته زمین می‌باشد که باعث می‌شود در طراحی‌ها نتوان بررسی 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 هزینه نهایی^۲ 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.

به منظور برآورد عدم قطعیت‌ها به صورت احتمالاتی^۳، روش‌های احتمالاتی مختلفی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به روش DAT^۴ اشاره نمود. روش DAT، به پیش‌بینی زمان و هزینه نهایی ساخت تونل با استفاده از دو مدل زمین‌شناسی و مدل ساخت^۵ می‌پردازد [۱].

در این فصل، پس از بیان مسئله و سؤال اصلی تحقیق، ضرورت انجام تحقیق، اهداف تحقیق و در نهایت ساختار فصل‌های بعدی بیان خواهد شد.

۱-۲- تونل راه همرو

تونل راه همرو بخشی از جاده جدید در دست احداث سنندج - مریوان است که دارای طول حفاری ۱۳۱۰ متر می‌باشد. این تونل در مسیر جاده در حال احداث سنندج - مریوان 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

¹ Uncertainties

² Entire Time and Cost

³ Probability

⁴ Decision Aids for Tunneling

⁵ Geology and Construction Model

است. دهانه ورودی و خروجی تونل مذکور به ترتیب در کیلومتر ۹۲۰ + ۴ و ۲۳۲ + ۶ قرار دارد. منطقه مورد مطالعه مربوط به زون سنندج - سیرجان بوده و گسترده ترین واحد چینه شناسی تفکیک شده در منطقه از نظر سنی مربوط به پالئوسن - ائوسن پایینی بوده و به لحاظ لیتولوژیکی متشکل از سنگ‌هایی از جنس شیل های 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 لیتولوژی شامل شیل خاکستری و قرمز رنگ، آهک با رنگ‌های خاکستری، زرد و قرمز و هم‌چنین لایه‌های ماسه‌سنگ می‌شود. هم‌چنین می‌توان به رخنمون‌های پراکنده‌ای از واحد سنگ - چینه‌ای در بخش‌های شمالی منطقه در نزدیکی روستای قلعه شیخان اشاره نمود که از نظر لیتولوژیکی از آهک‌های ماسه‌ای نومولیت دار تشکیل شده‌اند [۲].

بر اساس بررسی‌های انجام شده در بازدیدهای زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی صورت گرفته از منطقه، در مجموع چهار گونه زمین‌شناسی مهندسی در مسیر تونل قابل شناسایی و تفکیک از یکدیگر می‌باشند. این گونه‌های زمین‌شناسی مهندسی عبارت‌اند از آهک^۱ (Li)، شیل^۲ (SH)، تناوب شیل‌های ماسه‌ای و آهک‌های شیلی^۳ (SHL) و تناوب آهک و شیل (LSH) [۲].

۱-۳- بیان مسئله و سؤال اصلی تحقیق

به دلیل شرایط ناشناخته زیرسطحی در مسیر تونل‌ها، معمولاً عدم قطعیت‌ها در مورد زمان و هزینه نهایی تونل بالا است و تنها می‌توان این زمان و هزینه را با عدم قطعیت بیان نمود. این عدم قطعیت‌ها در بسیاری از موارد منجر به تهدید پروژه خواهند شد به طوری که گاهی اوقات هزینه و زمان نهایی ساخت تونل در مقایسه با مقدار مورد انتظار اولیه به طور قابل توجهی بالا خواهد رفت و از این رو بررسی قابلیت

^۱ Limestone

^۲ Shale

^۳ Shale and Limestone

اطمینان در مورد زمان و هزینه نهایی ساخت تونل بسیار ضروری خواهد بود. از جمله تکنیک‌های توانمند برای پیش‌بینی زمان و هزینه نهایی ساخت تونل، روش احتمالاتی DAT می‌باشد که می‌تواند زمان و هزینه نهایی را تا حد قابل قبولی به صورت احتمالاتی بیان نماید.

هدف از این مطالعه، چگونگی بیان زمان و هزینه نهایی ساخت تونل با استفاده از روش DAT می‌باشد که می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های اولیه بسیار مفید واقع گردد.

به‌طور کلی، مهم‌ترین سؤال‌هایی که در این تحقیق به آن‌ها پاسخ داده خواهد شد به شرح ذیل است:

- ۱- تاثیر شرایط زمین‌شناسی مسیر تونل بر زمان و هزینه ساخت به چه شکلی خواهد بود؟
- ۲- چگونه می‌توان شرایط زمین‌شناسی مسیر تونل موردنظر را پیش‌بینی نمود؟
- ۳- برآورد زمان و هزینه نهایی ساخت تونل با توجه به شرایط زمین پیش‌بینی شده به چه شکلی خواهد بود؟
- ۴- نتایج بدست آمده برای زمان و هزینه در این پژوهش به کمک روش DAT قابل اطمینان هستند یا خیر؟

۴-۱- اهداف و ضرورت‌ها و روش انجام تحقیق

بهینه‌سازی طراحی و ساخت پروژه‌های زیرساختی می‌تواند منافع قابل توجهی را برای جامعه داشته باشد. جهت موفقیت در این امر، یک پروژه باید از شرایط مالی، فنی و ایمنی برخوردار بوده و در یک برنامه زمانی مشخص به اتمام برسد. بسیاری از تصمیم‌ها باید در مورد طراحی، تأمین مالی پروژه و نوع قرارداد گرفته شوند. این تصمیم‌گیری‌ها تحت عدم قطعیت بالا، مانند عدم قطعیت در هزینه ساخت، زمان تکمیل، تأثیر بر هزینه‌های مالکیت شخص ثالث و یا هزینه‌های تعمیر و نگهداری گرفته می‌شوند. ارزیابی این عدم قطعیت برای تصمیم‌گیری درست بسیار حائز اهمیت است. اغلب، راه‌حلی که بر اساس برآورد قطعی ارزان‌تر و سریع‌تر به نظر می‌رسد، با عدم قطعیت بالاتر و خطرهای بیش‌تر همراه است. بنابراین

تصمیم‌گیری بر اساس ارزش‌های قطعی مناسب نیست [۳]، [۴]. این عدم قطعیت‌ها در تونل‌ها در مقایسه با انواع دیگر از زیرساخت‌های طولی بیش‌تر ناشی از عدم قطعیت داده‌های ژئوتکنیکی/زمین‌شناسی محیطی می‌باشد که تونل در آن ساخته می‌شود. در همین راستا در این پژوهش به منظور تحقق این امر از روش DAT بهره گرفته شده است. از آنجایی که DAT از روش‌های آماری جهت ارزیابی زمان و هزینه نهایی بهره می‌گیرد، بنابراین می‌تواند در تخمین زمان و هزینه نهایی مربوط به پروژه، تقریب دقیقی را ارائه نماید.

شیوه انجام کار به شکلی بوده است که ابتدا با توجه به داده‌های زمین‌شناسی موجود در مورد پروژه (تونل راه همرو)، به بررسی مدل زمین‌شناسی پرداخته می‌شود. جهت تشکیل مدل زمین‌شناسی، ابتدا پارامترهایی مانند نوع سنگ، آب زیرزمینی و درجه هوازدگی را که بر روی عملکرد تونل‌سازی تأثیرگذار می‌باشند و داده‌های اولیه در مورد آن‌ها با توجه به اکتشافات و نقشه‌های زمین‌شناسی در دسترس می‌باشد، تعریف نموده و برای هر کدام از این پارامترها، حالت‌های ممکن ارائه خواهد شد (برای مثال سه حالت شیست، گرانیت و کوارتزیت برای پارامتر نوع سنگ). با تشکیل ماتریس احتمال انتقال حالت و در نتیجه با استفاده از مدل مارکوف، کل مسیر تونل را برای هر کدام از پارامترها به زون‌های همگنی تقسیم کرده و نمودار تغییر حالت مربوط به هر کدام از این پارامترها در طول مسیر تونل بدست می‌آید. در نهایت با ترکیب نمودارهای تغییر حالت مربوط به هر کدام از پارامترها، یک نمودار نهایی شکل می‌گیرد که به آن نمودار تغییر حالت کلاس زمین گفته می‌شود. نمودار تغییر حالت کلاس زمین دارای چند کلاس زمین مختلف بسته به نظر کارشناسان می‌باشد که هر کدام از این کلاس‌ها شامل یک روش حفاری و سیستم نگهداری مخصوصی بوده و برای مجموعه شرایط زمین‌شناسی مختلف در طول تونل بکار برده می‌شود. نمودار تغییر حالت کلاس زمین، احتمال وقوع هر کدام از کلاس‌های زمین را در هر موقعیتی در طول تونل بدست می‌دهد.

در مدل ساخت با اختصاص دادن زمان و هزینه به هر کدام از کلاس‌ها به کمک نظر افراد کارشناس

و تجربه پروژه‌های انجام شده قبلی در شرایط مشابه، زمان و هزینه مربوط به هر کلاس در هر موقعیتی در طول تونل با توجه به مدل زمین‌شناسی می‌تواند بدست آید. سپس می‌توان زمان و هزینه کل تونل را به کمک روش شبیه‌سازی مونت کارلو از مجموع زمان و هزینه‌ها در کلیه موقعیت‌ها در طول تونل به صورت احتمالاتی برآورد نمود. روش مونت کارلو در هر بار شبیه‌سازی، برای هر بخش با توجه به احتمال وقوع کلاس زمین، یکی از زمان و هزینه‌ها را به صورت تصادفی انتخاب می‌کند و هرکدام که احتمال وقوع بیش‌تری داشته باشد، در مجموع دوره‌های شبیه‌سازی، بیش‌تر تکرار خواهد شد. در نهایت نقاط زیادی در نمودار پراکندگی زمان-هزینه بدست می‌آید که هر نقطه مربوط به یک دور شبیه‌سازی است و زمان و هزینه نهایی را به صورت احتمالاتی بیان می‌نماید.

۱-۵- ساختار پایان‌نامه

در این مطالعه، پس از ارائه پیشینه و کلیاتی در مورد روش DAT در فصل دوم، فصل سوم به صورت جزئی به بیان مدل زمین‌شناسی خواهد پرداخت. فصل چهارم به‌طور کامل مدل ساخت را توصیف می‌نماید. در فصل پنجم برای تونل جاده همرو به‌عنوان مطالعه موردی جهت بدست آوردن زمان و هزینه نهایی قبل از شروع به ساخت با استفاده از روش DAT استفاده خواهد شد. در نهایت در فصل ششم، جمع‌بندی این چند فصل و پیشنهادهایی برای روش DAT ارائه می‌شود.

فصل دوم:

ابزار کمک به تصمیم گیری در تونل سازی

(DAT)

۲-۱- مقدمه

در این فصل علاوه بر پیشینه روش DAT، به‌طور مختصر توضیحاتی در مورد داده‌های اولیه موردنیاز برای آن و روش کار آن و همچنین نتایجی که از آن بدست می‌آید، ارائه شده است.

۲-۲- روش DAT

DAT روشی است که برای اولین بار در دهه ۱۹۸۰ توسط انیشتین جهت برآورد زمان و هزینه در پروژه‌های تونل‌سازی ارائه شد.

DAT از دو مدل اصلی تشکیل شده است:

- مدل زمین‌شناسی
- مدل ساخت

مدل زمین‌شناسی، نمودارهای زمین‌شناسی/ژئوتکنیکی^۱ احتمالاتی را ارائه می‌دهد. ورودی‌ها بر اساس داده‌های بدست‌آمده به‌وسیله زمین‌شناس‌ها و مهندس‌ها از کاوش‌های زمین‌شناسی^۲ می‌باشد. این نمودارها، شامل احتمال‌های شرایط زمین‌شناسی خاصی است که در موقعیت خاصی از تونل رخ می‌دهد و توسط ترکیب داده‌های ارزیابی‌شده عینی و غیرعینی به‌وسیله کارشناس‌ها بدست می‌آیند. به‌ویژه طول میانگین حالت‌های پارامتر^۳ زمین‌شناسی/ژئوتکنیکی و احتمال‌های انتقال^۴ آن‌ها ارزیابی می‌گردد. مثلاً برای یک پارامتر نوع سنگ^۵، طول میانگین حالت‌های پارامتر گرانیت^۶، فیلیت^۷ و شیست^۸ و همچنین احتمال اینکه فیلیت در ادامه گرانیت باشد، شیست در ادامه گرانیت باشد و... ارزیابی می‌شود.

¹ Geotechnical/Geological Profiles

² Geology Explorations

³ Parameter States

⁴ Transition Probabilities

⁵ Rock Type

⁶ Granite

⁷ Philite

⁸ Schist

روش DAT به منظور پیش‌بینی حالت‌های هر پارامتر زمین‌شناسی در طول مسیر تونل، از مدل مارکوف استفاده می‌کند. مدل مارکوف دارای حافظه تک‌مرحله‌ای^۱ است؛ به گونه‌ای که احتمال وقوع هر حالت را در هر موقعیتی در طول تونل با استفاده از موقعیت بلافاصله قبل از آن می‌سنجد. بعد از این که احتمال وقوع حالت‌های هر پارامتر زمین‌شناسی در هر موقعیتی در طول تونل با استفاده از مدل مارکوف تخمین زده شد، برای هر پارامتر، یک نمودار تغییر حالت بدست می‌آید که نمودار تغییر حالت پارامتر^۲ نامیده می‌شود و در نهایت از ترکیب تمام این نمودارها، نموداری تحت عنوان نمودار تغییر حالت کلاس زمین^۳ تشکیل خواهد شد. نمودار تغییر حالت کلاس زمین بدست آمده، بسته به نظر افراد کارشناس و با توجه به شرایط زمین‌شناسی، شامل چند کلاس می‌باشد که به هر کدام از آن‌ها یک روش حفاری و سیستم نگهداری اختصاص داده شده است [۴].

در مدل ساخت با در نظر گرفتن فرایند ساخت در طول تونل برای هر کلاس زمین، زمان و هزینه مورد انتظار برآورد می‌شود. 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 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 موردنظر را با تجربه از پروژه‌های اجراشده قبلی در شرایط مشابه و نظر افراد کارشناس برآورد نمود.

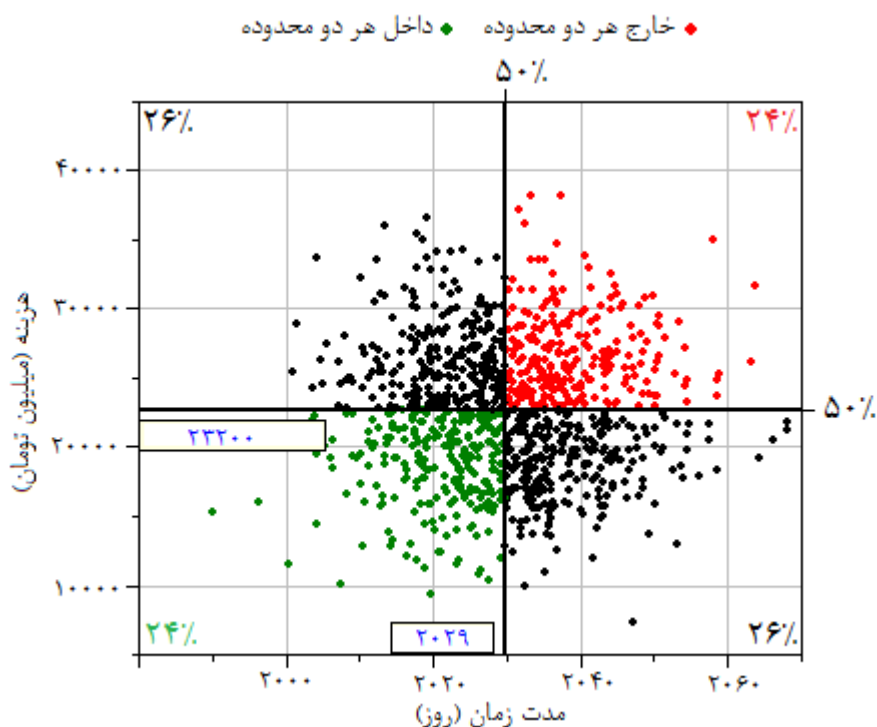
از آنجایی که احتمال وقوع هر کلاس زمین در هر موقعیتی در طول تونل متفاوت است، بنابراین احتمال وقوع زمان و هزینه‌های مختلف در هر موقعیتی در طول تونل نیز موجود خواهد بود. سپس جهت دستیابی به زمان و هزینه نهایی ساخت تونل، با استفاده از روش مونت کارلو، زمان و هزینه تمام موقعیت‌ها در طول تونل باهم جمع خواهند شد. روش مونت کارلو در هر بار شبیه‌سازی، برای هر بخش با توجه به احتمال وقوع کلاس زمین، یکی از زمان و هزینه‌ها را انتخاب می‌کند و هر کدام که احتمال

¹ One-Step Memory

² Parameter Profile

³ Ground Class Profile

وقوع بیش‌تری داشته باشد، در مجموع دوره‌های شبیه‌سازی، بیش‌تر تکرار خواهد شد. برای مثال اگر احتمال کلاس اول GC_1 در یک موقعیت معین در طول مسیر تونل ۸۰ درصد باشد و احتمال کلاس دوم GC_2 در همان موقعیت ۱۰ درصد باشد، به احتمال ۸۰ درصد هزینه این موقعیت مربوط به کلاس GC_1 و به احتمال ۱۰ درصد مربوط به کلاس GC_2 است. پس اگر فرآیند شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای ۱۰۰۰ بار تکرار گردد، تعداد بارهایی که به صورت تصادفی در این موقعیت، کلاس زمین GC_1 را انتخاب می‌نماید بسیار بیش‌تر از تعداد بارهای مربوط به کلاس زمین GC_2 خواهد بود. در نهایت نقاط زیادی در نمودار پراکندگی زمان - هزینه مطابق شکل ۱-۲ نشان داده می‌شود که هر نقطه مربوط به یک دور شبیه‌سازی است و زمان و هزینه نهایی را به صورت احتمالاتی بیان می‌نماید [۵]. با توجه به شکل ۱-۲، نقاطی که بارنگ سبز و قرمز نشان داده شده‌اند، به ترتیب بیانگر وقوع درصد بیش‌تر و کم‌تر نقاط شبیه‌سازی زمان و هزینه نهایی از مقادیر مشخص شده با استفاده از دو خط افقی (برای هزینه) و عمودی (برای زمان) می‌باشد (در این شکل، تعداد نقاط شبیه‌سازی که با رنگ سبز و قرمز نشان داده شده‌اند، به ترتیب بیش‌تر و کم‌تر از ۵۰ درصد کل نقاط شبیه‌سازی هم برای زمان و هم برای هزینه می‌باشند).



شکل ۱-۲: مثالی از نمودار پراکندگی زمان-هزینه [۶].

۲-۳- پیشینه روش DAT

مدل‌های احتمالاتی^۱ به‌طور گسترده‌ای در عمل تاکنون پذیرفته نشده است؛ دلیل اول این است که تقاضای واقعی برای مدل‌سازی کمی عدم قطعیت و ریسک وجود ندارد. دلیل دوم این است که مدل‌های موجود اغلب یک برآورد واقع‌بینانه از عدم قطعیت ارائه نمی‌دهند. با این حال، این وضعیت به‌نظر می‌رسد در سال‌های اخیر در حال تغییر بوده و تقاضا و قابلیت اطمینان از نتایج مدل افزایش یافته است. روش‌های مختلفی جهت مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها ارائه شده است. در سال ۲۰۰۷، روانپورا و آریاراتنام^۲ ابزاری بر مبنای شبیه‌سازی مونت کارلو^۳ برای پیش‌بینی عدم قطعیت زمان و هزینه‌های ساخت ارائه دادند. چانگ^۴ و همکاران (۲۰۰۶)، و بناردوس کالیامپاکوس^۵ (۲۰۰۴) نرخ‌های پیشروی^۶ مشاهده‌شده را به‌منظور به‌روزرسانی در پیش‌بینی نرخ‌های پیشروی و در نتیجه زمان حفاری برای بخش باقی‌مانده تونل با استفاده از تحلیل شبکه‌های بی‌زین^۷ و شبکه‌های عصبی مصنوعی^۸ بکار بردند. یک مدل تحلیلی توسط ایزاکسون استایل^۹ (۲۰۰۵) ارائه شده و یک مدل ترکیب شبکه‌های بی‌زی و شبیه‌سازی مونت کارلو توسط استیجر^{۱۰} (۲۰۰۹)، توسعه یافته است.

روش 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 آن در پروژه‌های مختلف انجام شده است. روش DAT در ابتدا تنها شامل دو مدل ساخت و مدل زمین‌شناسی بود تا این‌که در سال ۱۹۸۷ با در نظر گرفتن مدل منابع توسط ویجایا^{۱۱}، یک مدل به مدل‌های آن اضافه گردید. در سال ۱۹۹۶، جوسف

¹ Probabilistic Models

² Ariaratnam and Ruwanpura

³ Monte Carlo Simulation

⁴ Chung

⁵ Benardos and Kaliampakos

⁶ Advance Rates

⁷ Bayesian Networks

⁸ Artificial Neural Networks

⁹ Stille and Isaksson

¹⁰ Steiger

¹¹ Vijaya

و انیشتین روشی برای ارزیابی فناوری تونل‌زنی تمام مقطع به روش DAT ارائه نمودند. کریستوف هاس^۱ در سال ۲۰۰۰ مدل DAT را توسعه داد به‌گونه‌ای که در هنگام ساخت و در صورت دستیابی به داده‌های جدید و واقعی‌تر نسبت به داده‌های اولیه در نظر گرفته‌شده در مدل اولیه، بتوان مدل را به‌روزرسانی نموده و عدم قطعیت‌ها را در مورد زمان و هزینه نهایی ساخت تونل کاهش داد. آقای مین^۲ در سال ۲۰۰۳ در تونل سوچوون در کره جنوبی، روش DAT را جهت برآورد زمان و هزینه نهایی بکار برد. در سال ۲۰۰۵، جاد^۳ از این روش در تونل کنمور^۴ شمالی استفاده کرد. وینی^۵ در سال ۲۰۱۲ جهت مدل‌سازی عدم قطعیت در پروژه خط زیرزمینی در شهر نیویورک، روش DAT را بکار برد. مورت^۶ در سال ۲۰۱۱ از روش DAT جهت برآورد زمان و هزینه نهایی ساخت تونل‌های پروژه خط راه‌آهن پرتقال استفاده کرد. از جمله جدیدترین کارهایی که در آن از روش DAT بهره گرفته شده است، برآورد زمان و هزینه نهایی در حفاری چاه برای EGS^۷ در سال ۲۰۱۵ توسط یوست^۸ می‌باشد.

علاوه بر این پروژه‌ها، پروژه‌های تونل‌سازی دیگری نیز در سطح جهان با استفاده از روش DAT جهت برآورد زمان و هزینه نهایی تونل طراحی شده است و این روش نشان داده که جهت برآورد احتمالاتی زمان و هزینه در پروژه‌های تونل‌سازی، روش مناسب و کاربردی است.

در ادامه نتایج حاصل از روش DAT برای چند مورد از پروژه‌های اشاره‌شده در بالا ارائه شده است:

^۱ Christoph Haas

^۲ Min

^۳ Jad S.Karam

^۴ Kenmore

^۵ Vinnie Hung

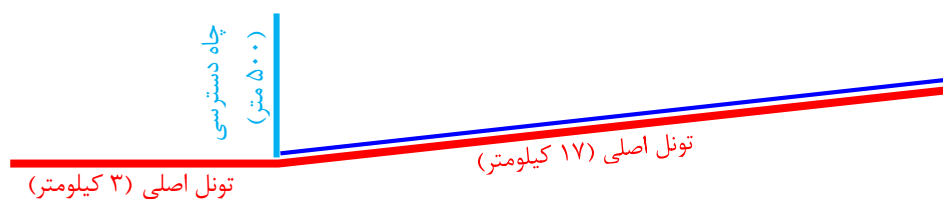
^۶ Y. Moret

^۷ Engineering Geothermal System

^۸ Yost

۱- به روزرسانی روش DAT^۱

کریستوف هاس^۲ در سال ۲۰۰۰ روش DAT را توسعه داد به گونه‌ای که در هنگام ساخت و در صورت دستیابی به داده‌های جدید و واقعی‌تر نسبت به داده‌های اولیه در نظر گرفته شده در مدل اولیه، بتوان روش را به روزرسانی نموده و عدم قطعیت‌ها را در مورد زمان و هزینه نهایی ساخت تونل کاهش داد. هاس به منظور بررسی تأثیر به روزرسانی روش DAT در برآورد زمان و هزینه نهایی ساخت تونل، تونلی را با شماتیک مطابق شکل ۲-۲ در نظر گرفت. با توجه به شکل ۲-۲ طول تونل اصلی برابر ۲۰ کیلومتر است که توسط یک چاه دسترسی با طول ۵۰۰ متر، به دو قسمت با طول‌های ۳ کیلومتر و ۱۷ کیلومتر تقسیم شده است. همچنین یک تونل فرعی به موازات بخش بزرگ‌تر تونل اصلی را شامل می‌شود. پارامترهای مورد استفاده در مدل زمین‌شناسی مطابق جدول ۱-۲ بوده که شامل ۵ پارامتر باحالت‌های مربوط به هر کدام از آن‌ها می‌باشد. با توجه به پارامترهای در نظر گرفته شده، در کل سه کلاس زمین تحت عنوان خوب، متوسط و بد برای هر کدام از چاه دسترسی، تونل اصلی و تونل فرعی مطابق جدول ۲-۲ تعریف شده است به گونه‌ای که این کلاس‌ها بتوانند برای ترکیب متفاوتی از حالت‌های پارامترها جوابگو باشند.



شکل ۲-۲: شماتیکی از تونل در نظر گرفته شده توسط هاس جهت بررسی تأثیر به روزرسانی DAT بر روی نتایج (زمان و هزینه نهایی) حاصل از آن [۷].

در ابتدا و قبل از شروع به ساخت تونل، با استفاده از داده‌های موجود برای هر کدام از پارامترهای جدول ۱-۲، نمودار پراکندگی زمان-هزینه ساخت تونل مطابق شکل ۲-۳ (الف) بدست آمده است. با

^۱ Updating in the Decision Aids for Tunneling

^۲ Christoph Haas

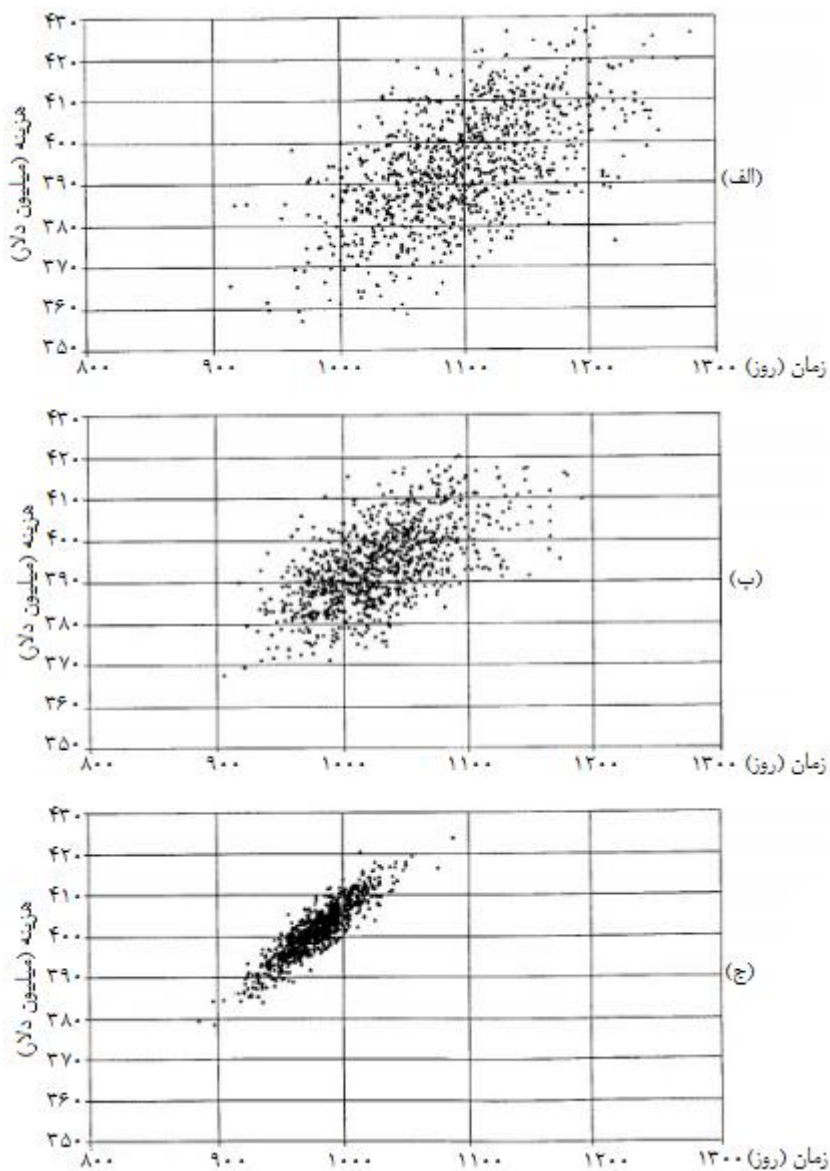
به روزرسانی تعدادی از داده‌های بکار گرفته شده اولیه در زمان ساخت، نمودار پراکندگی زمان-هزینه به صورت شکل ۲-۳ (ب) درآمده است. در نهایت با به روزرسانی داده‌های بیش تر و دقیق تر نمودن آن‌ها در زمان ساخت، نمودار پراکندگی زمان-هزینه مطابق شکل ۲-۳ (ج) بدست آمده است. با توجه به این نتایج، مشخص گردید که با به روزرسانی هر چه بیش تر داده‌های بکار گرفته شده در روش DAT همزمان با حفاری، نتایج دقیق تر شده و عدم قطعیت‌ها در مورد زمان و هزینه نهایی ساخت تونل کاهش می‌یابد.

جدول ۱-۲: پارامترهای در نظر گرفته شده همراه با حالت‌های آن‌ها برای تونل شکل ۱-۲ [۷].

| پارامتر | گسلش | درزه داری | شرایط کلی | روباره | آب |
|------------------|---------------------|---------------------|--------------------|------------|------------|
| حالت‌های پارامتر | ندارد شدید کم | زیاد متوسط کم | بد متوسط خوب | زیاد کم | کم زیاد |

جدول ۲-۲: مشخصات مربوط به کلاس‌های زمین برای تونل اصلی، تونل فرعی و چاه دسترسی در شکل ۲-۲ [۷].

| چاه دسترسی | تونل فرعی | تونل اصلی | کلاس |
|--|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| حفاری و انفجار چاه / ۶ سانتی‌متر شاتکریت | TBM کوچک / فقط شاتکریت | TBM / پوشش بتنی با سرعت | کلاس ۱ (شرایط خوب) |
| حفاری و انفجار چاه / ۱۵ سانتی‌متر شاتکریت | TBM کوچک / شاتکریت و راک بولت | TBM / پوشش بتنی در زمان متوسط | کلاس ۲ (شرایط متوسط) |
| حفاری و انفجار چاه / ۶ شاتکریت و راک بولت | TBM کوچک / قاب فولادی و شاتکریت | TBM / پوشش بتنی در زمان زیاد | کلاس ۳ (شرایط بد) |



شکل ۲-۳: نمودار پراکندگی زمان-هزینه در مطالعات هاس برای بررسی تأثیر فرایند به‌روزرسانی در نتایج مدل DAT. (الف) نمودار پراکندگی زمان-هزینه با داده‌های اولیه قبل از ساخت (بدون به‌روزرسانی)، (ب) نمودار پراکندگی زمان-هزینه در صورت به‌روزرسانی تعدادی از داده‌ها در حین ساخت، (ج) نمودار پراکندگی زمان-هزینه در صورت به‌روزرسانی داده‌های بیشتر و با دقت بالاتر در زمان ساخت [۷].

در نهایت میزان زمان و هزینه نهایی ساخت مطابق جدول ۲-۳ برای هر کدام از حالت‌های قبل از ساخت و به‌روزرسانی هنگام ساخت، بدست‌آمده است.

جدول ۳-۲: زمان و هزینه نهایی ساخت تونل برای داده‌های اولیه قبل از ساخت و دو سطح از به‌روزرسانی داده‌ها [۷].

| وضعیت داده‌ها | زمان نهایی ساخت (روز) | | هزینه نهایی ساخت (میلیون دلار) | |
|-----------------|-----------------------|------------------|--------------------------------|------------------|
| | میانگین | انحراف استاندارد | میانگین | انحراف استاندارد |
| قبل از ساخت | ۱۰۹۷ | ۵۹/۴ | ۳۹۴/۲ | ۱۲/۹۶ |
| به‌روزرسانی اول | ۱۰۳۰ | ۴۴/۴ | ۳۹۵ | ۹/۶۰ |
| به‌روزرسانی دوم | ۹۷۸ | ۲۵/۵ | ۴۰۱/۴ | ۶/۳۸ |

۲- بکارگیری روش DAT در تونل سوچون در کره جنوبی^۱

سانگیون مین^۲ در سال ۲۰۰۳ مدل DAT را در تونل راه سوچون^۳ که یکی از تونل‌های راه در کره جنوبی می‌باشد، بکار برد. این تونل شامل دو خط مطابق شکل ۴-۲ بود که یکی از آن‌ها در مسیر سوچون (تونل سوچون^۴) و یکی دیگر در مسیر دولسان (تونل دولسان^۵) قرار داشت. همچنین همان‌طور که از شکل ۴-۲ مشخص است، این دو تونل توسط پنج تونل تقاطع به هم متصل شده‌اند. طول تونل‌های سوچون و دولسان به ترتیب برابر ۱۹۱۰ متر و ۱۹۰۰ متر بود [۴].



شکل ۴-۲: شماتیکی از تونل سوچون در کره جنوبی شامل دو تونل اصلی دولسان و سوچون و پنج تونل تقاطع [۴].

پارامترهایی که در مدل زمین‌شناسی تونل سوچون بکار گرفته شده‌اند همراه با حالت‌های آن‌ها در جدول ۴-۲ آورده شده‌اند. همچنین کلاس‌های زمینی که از ترکیب حالت‌های این پارامترها بدست

^۱ Application of Decision Aids for Tunneling (DAT) to a Sucheon Tunnel in South Korea

^۲ S. Y. Min

^۳ Sucheon

^۴ Soonchon

^۵ Dolsan

آمده‌اند، مطابق جدول ۵-۲ است.

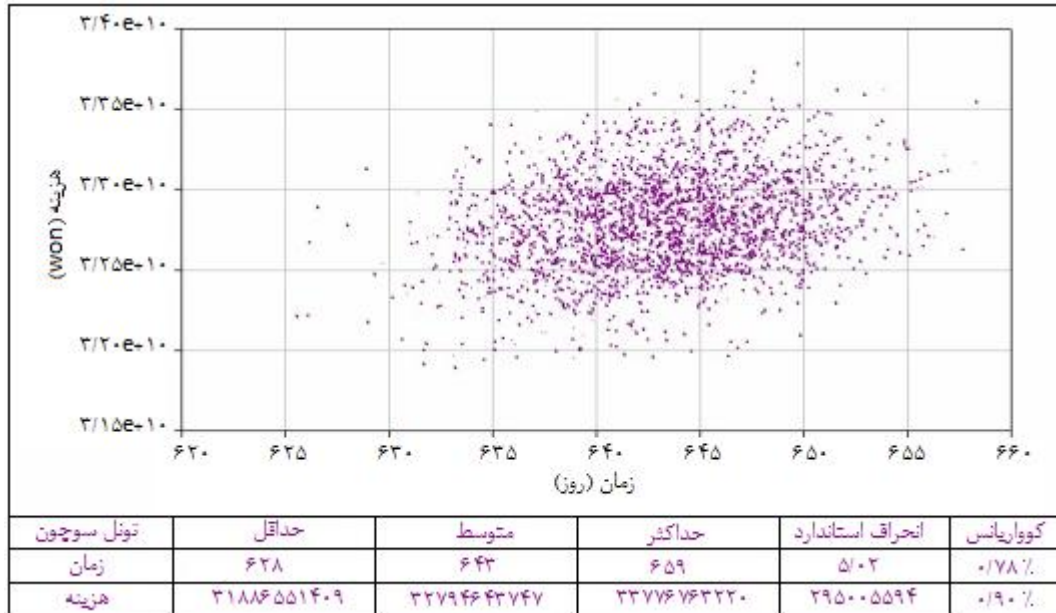
جدول ۴-۲: پارامترهای در نظر گرفته شده برای مدل زمین‌شناسی تونل سوچون همراه باحالت‌های آن‌ها [۴].

| پارامتر | حالت‌های پارامتر | | | | |
|-----------------------|------------------|-----------|----------|---------|------|
| | I | II | III | IV | V |
| طبقه‌بندی سنگ | | | | | |
| RMR | >۸۱ | ۶۱-۸۰ | ۴۱-۶۰ | ۲۱-۴۰ | <۲۰ |
| مقاومت (Ωm) | >۳۰۰۰ | ۱۰۰۰-۳۰۰۰ | ۳۰۰-۱۰۰۰ | ۱۰۰-۳۰۰ | <۱۰۰ |
| مقدار Q | >۴۰ | ۴-۴۰ | ۱-۴ | ۰/۱-۱ | <۰/۱ |
| روباره | کم | | متوسط | | زیاد |
| ارتفاع از سطح دریا | <۲۰۰ | | ۲۰۰-۲۵۰ | | >۲۵۰ |

جدول ۵-۲: کلاس‌های زمین بدست‌آمده برای تونل سوچون [۴].

| پارامتر | کلاس‌های زمین | | | | |
|---------------|---------------|-------|-------|-------|-------|
| | L-I | L-II | L-III | L-IV | L-V |
| طبقه‌بندی سنگ | I | II | III | IV | V |
| روباره | کم | کم | کم | کم | کم |
| پارامتر | کلاس‌های زمین | | | | |
| | M-I | M-II | M-III | M-IV | M-V |
| طبقه‌بندی سنگ | I | II | III | IV | V |
| روباره | متوسط | متوسط | متوسط | متوسط | متوسط |
| پارامتر | کلاس‌های زمین | | | | |
| | H-I | H-II | H-III | H-IV | H-V |
| طبقه‌بندی سنگ | I | II | III | IV | V |
| روباره | زیاد | زیاد | زیاد | زیاد | زیاد |

در نهایت نمودار پراکندگی زمان-هزینه برای تونل سوچون مطابق شکل ۵-۲ بدست‌آمده است.



شکل ۲-۵: نمودار پراکندگی زمان-هزینه برای تونل سوچون با روش DAT [۴].

۳- مدل‌سازی عدم قطعیت زمان و هزینه در پروژه خط راه‌آهن پرتغال^۱

مورت^۲ در سال ۲۰۱۱ از روش DAT جهت برآورد زمان و هزینه نهایی ساخت تونل‌های پروژه خط راه‌آهن پرتغال استفاده کرد. این پروژه شامل سه محور اصلی لیزبون-مادرید^۳، لیزبون-پورتو^۴ و پورتو-ویگو^۵ بود. مورت کار خود را جهت برآورد زمان و هزینه نهایی بر روی محور پورتو-ویگو انجام داد که شامل چهار مسیر به شرح جدول ۲-۶ بود [۸].

در ابتدا، برای سه کلاس خوب، متوسط و بد، زمان و هزینه و همچنین نرخ پیشروی به ازای هر متر را مطابق جدول ۲-۷ بدست آورده و سپس در مدل DAT بکار برده است. در نهایت نمودار پراکندگی زمان-هزینه برای هر کدام از چهار مسیر در جدول ۲-۶ را مطابق شکل ۲-۶ بدست آورده است [۸].

^۱ Modeling Cost and Time Uncertainty in Rail Line Construction

^۲ Y. Moret

^۳ Lisbon-Madrid

^۴ Lisbon-Porto

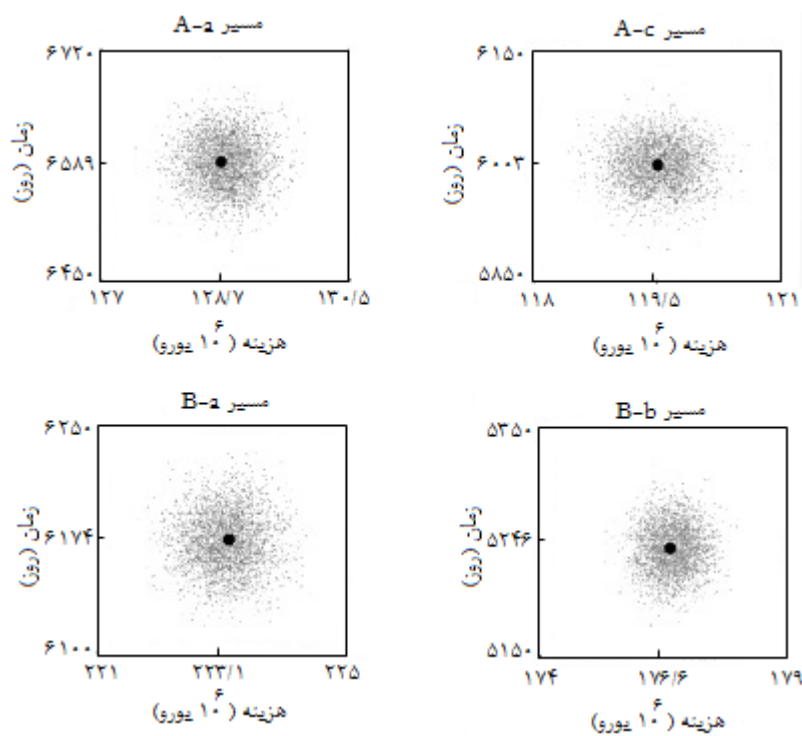
^۵ Porto-Vigo

جدول ۲-۶: معرفی چهار مسیر راه آهن پرتقال محور پورتو-ویگو [۸].

| نام مسیر | توصیف |
|----------|----------------------------|
| A-a | مسیر یک میان پورتو و براگا |
| A-c | مسیر دو میان پورتو و براگا |
| B-a | مسیر یک میان براگا و ویگو |
| B-b | مسیر دو میان براگا و ویگو |

جدول ۲-۷: زمان و هزینه و همچنین نرخ پیشروی برای سه شرایط ساخت خوب، متوسط و ضعیف در محور پورتو-ویگو [۸].

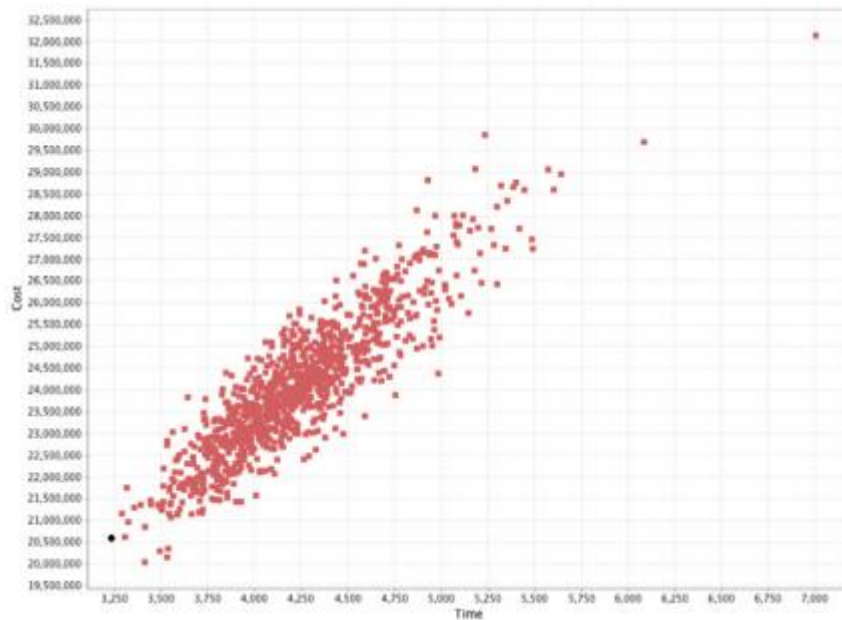
| | شرایط ساخت | | |
|---------------------------------|------------|-------|-------|
| | خوب | متوسط | ضعیف |
| هزینه به ازای واحد طول (euro/m) | ۷۲۵۰ | ۱۱۰۰۰ | ۱۷۰۰۰ |
| نرخ پیشروی (m/day) | ۴ | ۲ | ۱ |
| زمان به ازای واحد طول (day/m) | ۰/۲۵ | ۰/۵ | ۱ |



شکل ۲-۶: مقدار زمان و هزینه قطعی (رنگ سیاه) و نمودار پراکندگی زمان-هزینه (رنگ خاکستری) برای چهار مسیر محور پورتو-ویگو [۸].

۴- ارزیابی زمان و هزینه حفاری چاه برای EGS^۱

از جمله جدیدترین کارهایی که در آن از مدل DAT بهره گرفته شده است، برآورد زمان و هزینه نهایی در حفاری چاه برای EGS در سال ۲۰۱۵ توسط یوست می‌باشد. یوست به کمک مدل DAT، به همان شکل که در تونل‌ها استفاده می‌شود، زمان و هزینه نهایی را توانست برای حفاری چاه نیز برآورد نماید. نتایج بدست‌آمده توسط یوست به صورت نمودار پراکندگی زمان-هزینه شکل ۲-۷ است [۹].



شکل ۲-۷: نمودار پراکندگی زمان هزینه برای حفاری چاه در EGS توسط یوست به کمک DAT [۹].

۴-۲- داده‌های ورودی^۲ موردنیاز روش DAT

بدیهی است که هر روشی به منظور تصمیم‌گیری نیاز به ورودی‌هایی دارد تا بتواند بر روی آن‌ها پردازش انجام داده و آن‌ها را تبدیل به خروجی موردنیاز نماید. می‌دانیم که روش DAT شامل دو مدل زمین‌شناسی و مدل ساخت است که هر کدام از این مدل‌ها، داده‌هایی به‌عنوان ورودی نیاز دارند. مشخص است که هر چه تعداد این داده‌های ورودی بیشتر و دقیق‌تر باشند، نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهند. در

^۱ Engineering Geothermal System

^۲ Input Data

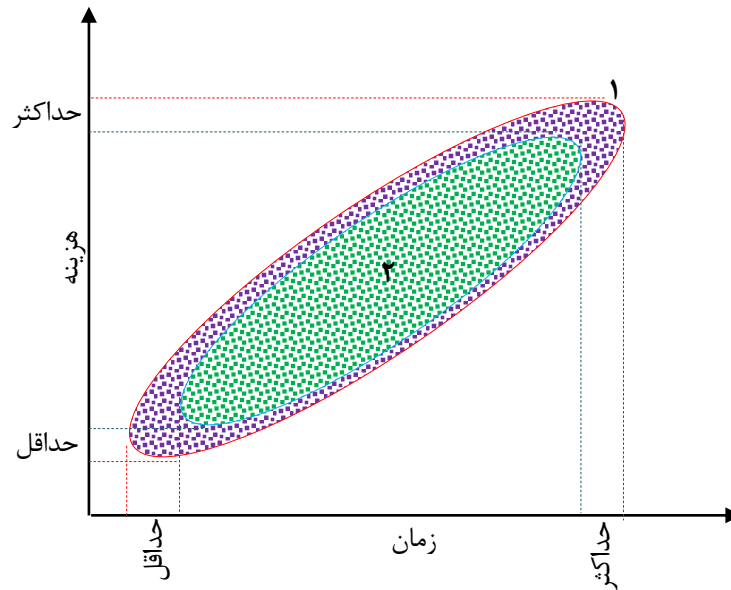
مدل زمین شناسی نیاز به داده‌های اولیه زمین شناسی و ژئوتکنیکی در مورد ناحیه تونل است؛ این داده‌ها از روی نقشه‌های زمین شناسی^۱، گمانه‌ها^۲، چاه نمودارها، بررسی‌های ژئوفیزیکی^۳ و ... بدست می‌آیند. در نهایت می‌توان با استفاده از این داده‌ها در مدل زمین شناسی به پیش‌بینی شرایط زمین شناسی در طول مسیر تونل پرداخت و برای هر مجموعه شرایط، یک کلاس زمین (شامل روش حفاری و سیستم نگهداری) مخصوصی در نظر گرفت. در نهایت می‌توان به نمودار تغییر حالت کلاس زمین دست یافت که بعداً در مورد آن بیش‌تر بحث خواهد شد. در مدل ساخت که هدف آن برآورد زمان و هزینه برای هر سیکل ساخت مربوط به هر کدام از کلاس‌های زمین شناسی در نظر گرفته شده در مدل زمین شناسی است، ورودی مورد نیاز، همان خروجی مدل زمین شناسی یعنی نمودار تغییر حالت کلاس زمین است تا از روی آن بتوان با در نظر گرفتن شبکه فعالیت برای هر کلاس زمین، زمان و هزینه مربوط به هر سیکل ساخت کلاس مربوطه را به کمک نظر افراد کارشناس برآورد نموده و سپس زمان و هزینه مربوط به هر کلاس زمین در هر موقعیتی در طول تونل بدست آید. واضح است که مدل ساخت نیز وابسته به مدل زمین شناسی است به گونه‌ای که اگر داده‌های ورودی در مدل زمین شناسی دقیق‌تر باشند، نمودار تغییر حالت کلاس زمین دقیق‌تری بدست می‌آید و مدل ساخت می‌تواند تصمیم‌های بهتری جهت برآورد زمان و هزینه برای هر کلاس زمین ارائه نماید. در نهایت روش DAT در مدل ساخت با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو به پیش‌بینی زمان و هزینه نهایی ساخت تونل می‌پردازد. برای مثال احتمال این که پروژه مورد نظر در ۳ سال با هزینه C_1 به پایان برسد ۷۰ درصد و احتمال این که در ۲ سال با هزینه C_2 به پایان برسد، ۵۰ درصد است ($C_1 > C_2$). هم‌چنین با استفاده از نمودار پراکندگی زمان - هزینه می‌توان حداقل و حداکثر زمان و هزینه مورد انتظار در پروژه را به صورت احتمالاتی بدست آورد و هر چه داده‌های ورودی دقیق‌تر و بیش‌تر بوده باشند، این حداقل و حداکثر زمان و هزینه به هم‌دیگر نزدیک‌تر بوده و عدم قطعیت‌ها نیز کاهش می‌یابد. برای مثال در شکل ۲-۸ عدم قطعیت برای حالت ۱

¹ Geological Maps

² Boreholes

³ Geophysics

به دلیل این‌که داده‌های ورودی کم و یا دقیق نبوده نسبت به حالت ۲ که داده‌های بیش‌تر با دقت بالاتری در دسترس بوده، بیش‌تر است [۳].



شکل ۲-۸: مقایسه عدم قطعیت زمان-هزینه مربوط به دو حالت. حالت ۱ به دلیل داده‌های ناقص دارای عدم قطعیت بالاتری نسبت به حالت ۲ است [۳]. با افزایش داده‌های ورودی و دقیق‌تر بودن آن‌ها، فاصله میان حداقل و حداکثر زمان یا هزینه کاهش خواهد یافت.

یکی از مدل‌های DAT که اشاره شد، مدل زمین‌شناسی است که در آن بر مبنای مدل مارکوف به پیش‌بینی شرایط زمین‌شناسی مسیر تونل به کمک داده‌های اولیه قبل از شروع به ساخت می‌پردازد. در فصل سوم به صورت جزئی به بیان مدل زمین‌شناسی پرداخته می‌شود.

فصل سوم:

مدل زمین‌شناسی

۳-۱- مقدمه

تونل زنی اغلب شامل درجه بالایی از عدم قطعیت‌ها به واسطه ناشناخته بودن شرایط زمین‌شناسی زیرسطحی و عدم درک صحیحی از اثر متقابل زمین - ساخت است. این عدم قطعیت‌ها به طور قابل توجهی منجر به افزایش هزینه‌ها خواهند شد. با افزایش روز به روز تقاضا برای ساخت پروژه‌های زیرسطحی، بایستی در فکر توسعه هر چه بیش‌تر روش‌های تونل زنی مناسب بود تا بتوان از افزایش هزینه‌های ناشی از عدم قطعیت‌ها جلوگیری به عمل آورد. مرحله اول جهت برآورد هزینه و بهینه‌سازی در تونل زنی، تهیه یک مدل پیش‌بینی زمین‌شناسی است. بر همین اساس، روش‌های مختلفی ارائه شده و روز به روز در حال توسعه است. در روش‌های طراحی رایج تنها یکی از گزینه‌های طراحی نگهداری و حفاری در سراسر طول تونل وجود دارد. این طراحی‌ها بایستی قبل از ساخت تونل معین شوند و بنابراین در این طراحی نیاز به در نظر گرفتن بدترین شرایط زمین‌شناسی مورد انتظار در طول مسیر تونل خواهد بود. این محافظه‌کاری در تونل‌زنی منجر به افزایش قابل ملاحظه‌ای در هزینه نهایی تونل خواهد شد [۱].

یکی از روش‌های دیگر جهت طراحی روش‌های حفاری و نگهداری، روش مبنی بر مشاهده^۱ یا روش انطباق پذیر^۲ هست. در این روش هنگام رویارویی با مقاطع مختلفی از تونل که شرایط زمین‌شناسی آن تغییر می‌کند، روش حفاری و سیستم نگهداری را متناسب با آن در طول حفاری انتخاب می‌نمایند. مشکل این روش ناآگاهی از مقدار هزینه مورد انتظار قبل از شروع به ساخت تونل می‌باشد. ممکن است گاهی افزایش هزینه‌ها ناشی از تغییر روش حفاری و سیستم نگهداری متناسب با هر شرایط زمین‌شناسی به حدی باشد که پروژه از نظر اقتصادی به صرفه نباشد؛ پس باید قبل از شروع به ساخت تونل، پیش‌بینی‌هایی در مورد شرایط زمین‌شناسی مورد انتظار در طول مسیر تونل با استفاده از داده‌های نقشه‌های زمین‌شناسی، داده‌های مربوط به گمانه‌ها، روش‌های ژئوفیزیکی، قضاوت افراد کارشناس

¹ Based-on Observation

² Adaptive

زمین‌شناسی و ... ارائه نمود تا بتوان برای هر شرایط زمین‌شناسی که ممکن است با آن روبرو شد، روش حفاری و سیستم نگهداری مناسبی را طراحی نموده و از روی آن به پیش‌بینی زمان و هزینه نهایی در مورد تونل پرداخت تا مشخص شود که با این شرایط پروژه تونل قابلیت اجرایی خواهد داشت یا خیر.

به‌منظور پیش‌بینی شرایط زمین‌شناسی قبل از شروع به ساخت، یک روش احتمالاتی که مبنی بر فرآیند مارکوف می‌باشد ارائه شده است [۱]. در این روش برای هرکدام از پارامترهای زمین‌شناسی مورد انتظار در طول مسیر تونل، حالت‌هایی در نظر گرفته می‌شود و فرآیند مارکوف، احتمال‌های مربوط به هرکدام از این حالت‌ها را در هر موقعیتی از تونل به‌صورت احتمالاتی با استفاده از مشاهده‌های عینی و غیرعینی قبل از ساخت تونل برآورد می‌کند. سپس برای هرکدام از پارامترهای زمین‌شناسی یک نمودار تغییر احتمال حالت بدست می‌آید و سرانجام از ترکیب تمام این نمودارها، یک نمودار نهایی تشکیل می‌گردد که نمودار تغییر حالت کلاس زمین نامیده می‌شود.

۳-۲- مدل پیش‌بینی زمین‌شناسی

شرایط زمین‌شناسی یک فاکتور اصلی در انتخاب روش‌های 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 [۵]. مدل پیش‌بینی زمین‌شناسی با استفاده از داده‌های اولیه نظیر نقشه‌های زمین‌شناسی، مطالعات ژئوفیزیکی، مطالعات ژئوتکنیکی و ... به پیش‌بینی شرایط زمین مورد انتظار در مسیر تونل می‌پردازد. معمولاً شرایط مورد انتظار در مسیر تونل نمی‌تواند به‌صورت قطعی^۱ بیان شود و بنابراین باید از روش‌های آماری^۲ جهت بیان احتمالاتی این شرایط استفاده نمود. یکی از مهم‌ترین روش‌های آماری که به پیش‌بینی شرایط زمین‌شناسی می‌پردازد، مدل مارکوف^۳ است که حالت^۴ مربوط به هرکدام از پارامترها را با توجه به حالت قبل از آن تخمین می‌زند. بعد از پیش‌بینی

^۱ deterministic

^۲ Stochastic Methodes

^۳ Markov Method

^۴ State

شرایط زمین برای هر کدام از پارامترهای زمین‌شناسی در طول مسیر تونل با استفاده از مدل مارکوف، نمودارهایی برای هر کدام از این پارامترها تحت عنوان نمودار تغییر حالت پارامتر بدست می‌آید که احتمال وقوع حالت‌های آن پارامتر را در هر موقعیتی در مسیر تونل به صورت احتمالاتی بیان می‌نمایند. در نهایت از ترکیب این نمودارها، یک نمودار نهایی بدست می‌آید که به آن نمودار تغییر حالت کلاس زمین^۱ گفته می‌شود [۱].

پس هدف از مدل زمین‌شناسی که در این فصل بیان می‌شود، دستیابی به نمودار تغییر حالت کلاس زمین است تا بعد از روی آن بتوان در مدل ساخت که در فصل چهارم ارائه می‌گردد، برای هر کدام از کلاس‌های زمین، زمان و هزینه مورد انتظار در هر موقعیتی در طول تونل و در نتیجه زمان و هزینه نهایی برای کل تونل را برآورد نمود.

۳-۳- تعریف مدل مارکوف^۲

مدل مارکوف یکی از بهترین فرایندهای آماری شناخته شده است که با مسائل پیچیده مانند محیط زمین‌شناسی سروکار دارد. مشخصه اصلی مدل مارکوف، یک حافظه تک‌مرحله‌ای^۳ است؛ یعنی اینکه جهت پیش‌بینی حالتی در آینده، از حالت اخیر استفاده می‌کند. این شرط در مدل مارکوف بسیار شرط محدودکننده‌ای است اما باید در نظر داشت که مرحله اخیر، مرحله مهم‌تری برای پیش‌بینی شرایط آینده است. در حقیقت مزیت عمده فرض حافظه تک‌مرحله‌ای به جای حافظه چندمرحله‌ای این است که محاسبه احتمال‌ها نسبتاً ساده‌تر بوده و اغلب می‌توان توزیع‌های احتمال کامل را یافت [۵].

برای یک توزیع احتمالاتی $N(t^*)$ که به وسیله یک مدل مارکوف اداره می‌شود، رابطه زیر برقرار

است [۵]:

$$P_X \{X(t_{i+1}) | X(t_{i-1}), \dots\} = P_X \{X(t_{i+1}) | X(t_i)\} \quad ۱-۳$$

^۱ Ground Class Profile

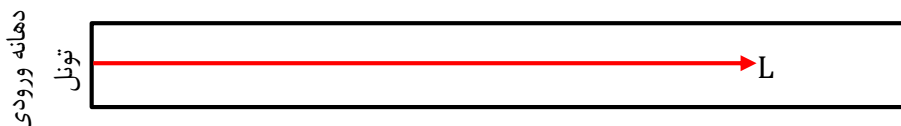
^۲ Markov Process

^۳ One-Step Memory

که $X(t_i)$ ، $X(t_{i-1})$ و ... به ترتیب نتایج متغیرهای تصادفی $X(t_i)$ ، $X(t_{i-1})$ و ... هستند و هم‌چنین $t_{i+1} > t_i > t_{i-1}$. بنابراین، تاریخچه حوادث گذشته بجز حالت اخیر، هیچ تأثیری بر روی توزیع‌های احتمالاتی متغیر تصادفی در یک‌زمان بعدی ندارد [۱۰].

اگر تعداد حالت‌های مربوط به یک متغیر تصادفی (متناهی یا نامتناهی) قابل شمارش باشد، متغیر تصادفی از نوع گسسته است؛ اما در صورتی که تعداد حالت‌های آن نامتناهی غیرقابل شمارش باشد، به آن متغیر تصادفی پیوسته اطلاق می‌شود [۱۱].

در این مطالعه، "زمان" هم‌ارز با موقعیت در طول محور تونل می‌باشد؛ که موقعیت به‌وسیله یک مسافت L نسبت به یک نقطه ثابت معین (برای مثال دهانه تونل) مشخص می‌شود. در موقعیت نشان داده‌شده در شکل ۱-۳، جهت پیشروی تونل در جهت مثبت ($+L$) است [۵].



شکل ۱-۳: تعریف زمان در فرایند مارکوف [۵].

مدل مارکوف از سه جزء اصلی حالت، انتقال حالت و وسعت (طول) تشکیل شده است. در بخش‌های زیر به بیان این سه جزء اصلی پرداخته شده است:

۱-۳-۳- حالت

حالت^۱ یک متغیر تصادفی، مقادیر متغیری است که می‌تواند اختیار کند. به‌عنوان مثال، برای پارامتر زمین "نوع سنگ"، حالت‌های پارامتر (r) می‌تواند به‌صورت جدول ۱-۳ باشد [۱].

^۱ State

جدول ۳-۱: تعریف حالت‌های مربوط به پارامتر زمین‌شناسی "نوع سنگ" [۴].

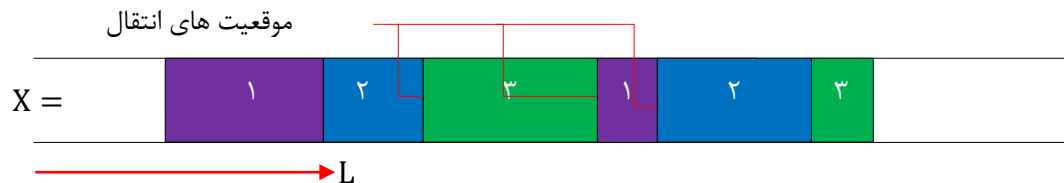
| تعریف | حالت های پارامتر / τ |
|-------------|---------------------------|
| شیست | ۱ |
| متاکوارتزیت | ۲ |
| دیوریت | ۳ |
| کوارتزیت | ۴ |

در این جدول برای مثال $\tau = 3$ به این معنی است که حالت پارامتر "نوع سنگ"، دیوریت است.

۳-۳-۲- انتقال حالت

یک پارامتر زمین‌شناسی X در یک موقعیت معین L می‌تواند به صورت یک متغیر تصادفی $X(L)$ بیان شود. با تغییر L از صفر به سمت بینهایت، مقدار $X(L)$ تغییر می‌کند (شکل ۳-۲). هرکدام از این تغییرها، یک انتقال حالت^۱ نامیده می‌شود. اگر در یک موقعیت معین $X(L) = i$ باشد، احتمال اینکه حالت بعدی j باشد برابر است با $p_{X_{ij}}$ (احتمال انتقال از حالت i به حالت j). برای مثال در شکل ۳-۲

اگر $X(L) = 1$ باشد، احتمال اینکه حالت بعدی ۲ باشد برابر است با $p_{X_{12}}$ [۵].



شکل ۳-۲: انتقال میان حالت‌های پارامتر X [۵].

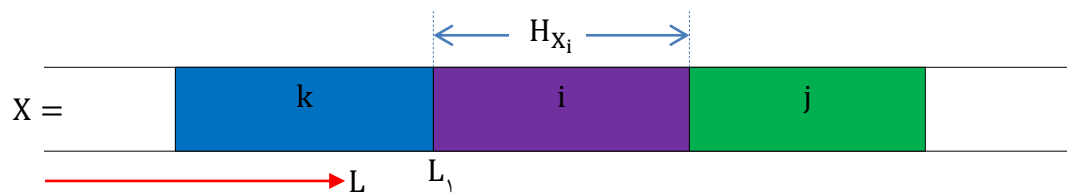
۳-۳-۳- وسعت (طول)

بعد از آنکه یک پارامتر X به داخل یک ناحیه معین i در L_1 وارد شد، فاصله زمانی برای اینکه پارامتر X در حالت i باقی بماند، وسعت (طول)^۲ حالت i در L_1 (H_{X_i}) نامیده می‌شود. در شکل ۳-۳، وسعت حالت i مربوط به پارامتر X (H_{X_i}) نشان داده شده است ($k \neq i \neq j$) [۵].

² Transition State

^۲ Extent(Length)

در این مطالعه به منظور تعیین وسعت حالت‌های هرکدام از پارامترها، از نقشه پروفیل زمین‌شناسی، داده‌های ژئوتکنیکی / زمین‌شناسی و قضاوت افراد کارشناس بهره گرفته خواهد شد.



شکل ۳-۳: وسعت حالت i از پارامتر $X (H_{X_i})$.

۳-۴ - ماتریس احتمال انتقال

در مدل مارکوف برای نشان دادن احتمال انتقال از یک حالت i به حالت دیگر j، از ماتریسی به نام ماتریس احتمال انتقال^۱ استفاده می‌شود که در این مطالعه با P نمایش داده شده است. برای هرکدام از پارامترها باید یک ماتریس احتمال انتقال از مرتبه n بدست آید که n تعداد حالت‌های پارامتر است. در هر سطر از ماتریس احتمال، احتمال انتقال از یک حالت به سایر حالت‌ها نشان داده می‌شود. برای بدست آوردن ماتریس احتمال انتقال، ابتدا باید ماتریس انتقال^۲ میان حالت‌ها p را بدست آورد. هر درایه ماتریس انتقال p با a_{ij} نمایش داده می‌شود. بعد از آنکه ماتریس p بدست آمد، مطابق فرمول ۲-۳ هرکدام از درایه‌های سطرهای آن را بر مجموع درایه‌های همان سطر تقسیم نموده و ماتریسی که بدست می‌آید، ماتریس احتمال انتقال P است.

$$p_{ij} = \frac{T_{ij}}{\sum_{k=1}^n T_{ik}} \quad ۲-۳$$

که در آن، p_{ij} بیانگر احتمال انتقال از حالت i به حالت j، T_{ij} تعداد انتقال‌ها از حالت i به حالت

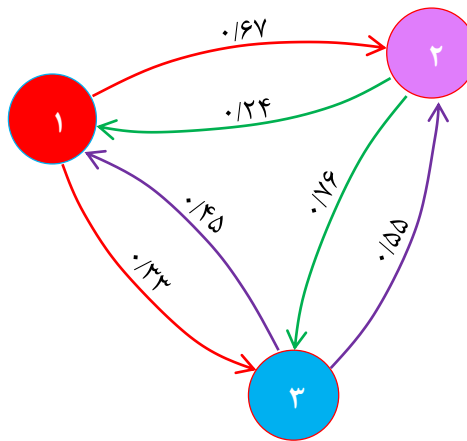
و $\sum_{k=1}^n T_{ik}$ مجموع انتقال‌ها از حالت i به سایر حالت‌های پارامتر مربوطه است (n تعداد کل حالت‌های

^۱ Transition Probability Matrix

^۲ Transitiom Matrix

پارامتر مورد نظر [۱۲].

به عنوان مثال فرض کنید که احتمال انتقال میان حالت‌های ۱، ۲ و ۳ به صورت دیاگرام نشان داده شده در شکل ۳-۴ است؛ در این صورت ماتریس احتمال انتقال آن به صورتی می‌باشد که در ادامه آورده شده است. هم‌چنین مجموع درایه‌های هر سطر از ماتریس احتمال انتقال برابر یک است [۱۲].



شکل ۳-۴: دیاگرام احتمال انتقال میان سه حالت ۱، ۲ و ۳ در زنجیره مارکوف [۱۲].

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0.167 & 0.33 \\ 0.24 & 0 & 0.16 \\ 0.45 & 0.55 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

۳-۴-۱- روش‌های تعیین ماتریس احتمال انتقال

همان‌طور که قبلاً در مورد ماتریس احتمال انتقال صحبت شد، هر پارامتر با دو یا چند حالت می‌تواند یک ماتریس احتمال انتقال را بسازد. مجموع درایه‌های هر سطر ماتریس احتمال انتقال باید برابر یک بوده و بجز درایه‌های روی قطر اصلی، سایر درایه‌های آن مخالف صفر باشند [۱۳].

$$p_{i1} + p_{i2} + \dots + p_{i3} = 1 \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad 3-3$$

ماتریس احتمال انتقال از داده‌های مربوط به گمانه‌ها، رخنمون‌ها، نقشه‌های زمین‌شناسی

تحت الارضی و چاه نمودارها استنتاج می شود. لاگ های مربوط به چاه ها، داده های عمده ای را در امتداد عمود بر لایه بندی در راستای یک بعد ارائه می دهد، که به درک توزیع فضایی پارامترهای زیرسطحی می انجامد، اما داده های کمی را در مورد گسترش جانبی این پارامترها فراهم می آورد [۱۴].

به طور کلی دو نوع روش جهت تشکیل ماتریس احتمال انتقال وجود دارد [۱۰]:

الف- روش فراوانی^۱

اگر داده های کافی در مورد شرایط زمین شناسی منطقه مورد نظر در دسترس باشد، می توان با روش فراوانی ماتریس احتمال انتقال میان حالت های یک پارامتر را بدست آورد. بهترین داده ها، داده های مربوط به منطقه مورد نظر و در راستای مسیر تونل هستند. تعداد انتقال هایی که از حالتی i به حالت دیگر j یک پارامتر بدست می آید نباید کم تر از $(n-1) \cdot 10$ (تعداد کل حالت های پارامتر مورد نظر) باشد. بنابراین شرط استفاده از روش فراوانی به منظور دستیابی به بهترین تخمین ماتریس احتمال انتقال باید به صورت زیر باشد [۱۰]:

$$p_{x_{i_1}} + p_{x_{i_2}} + \dots + p_{x_{i_n}} \geq 10 \cdot (n-1) \quad ۴-۳$$

پس با این شرط، هیچ کدام از درایه های ماتریس انتقال و ماتریس شدت انتقال بجز درایه های روی قطر اصلی برابر صفر نخواهد شد؛ یعنی همواره باید در هر موقعیتی یک احتمالی از یک حالت به حالت های دیگر پارامتر مورد نظر موجود باشد.

به عنوان داده های اولیه که در روش فراوانی استفاده می شوند، نقشه ها و پروفیل های زمین شناسی تونل را می توان نام برد. در صورت استفاده از نقشه ها، یک یا چند خط موازی با محور تونل به صورت سرتاسری مطابق شکل ۳-۵، الف کشیده می شود و سپس حالت هایی از پارامتر مورد نظر را که این خط با آن ها برخورد می کند ثبت شده و در نهایت برای هر کدام از پارامترها، نمودار تغییر حالتی شکل گرفته

^۱ Frequency-Based Method

که از کنار هم قرار گرفتن این نمودارها از بالا به پایین به ترتیب با کاهش میانگین وسعت حالت‌های پارامترهای موردنظر، یک زنجیره انتقال بدست می‌آید. این زنجیره انتقال در هر ردیف، انتقال میان حالت‌های یک پارامتر معین را ارائه می‌دهد (توجه کنید زمانی که از چند خط استفاده می‌شود، باید به اندازه کافی از هم دور باشند تا نتایج مشابهی برای آن‌ها ثبت نگردد). در نهایت جهت بدست آوردن ماتریس احتمال انتقال میان حالت‌های یک پارامتر معین، از میانگین ماتریس‌های احتمال انتقال بدست‌آمده برای این پارامتر در زنجیره‌های انتقال مختلف استفاده می‌شود [۱].

به‌عنوان مثال، شکل ۳-۵، الف را در نظر بگیرید. در این شکل از دو خط (خط ۱ و خط ۲) برای محاسبه ماتریس احتمال انتقال در مسیر تونل استفاده شده است. هرکدام از این خط‌ها در مسیر خود با حالت‌هایی از پارامترهای مختلف برخورد می‌کنند. اگر فرض شود پارامترهای در نظر گرفته‌شده برای خط ۱، $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$ باشند، زنجیره انتقالی که برای آن‌ها بدست می‌آید به‌صورت شکل ۳-۵، ب می‌باشد (فرض شده که وسعت میانگین حالت‌های پارامترها از X_1 به سمت X_N کاهش پیدا می‌کند). هم‌چنین برای خط ۲ نیز باید چنین زنجیره‌ای با همان پارامترها در نظر گرفته شود و در نهایت برای تشکیل ماتریس احتمال انتقال یک پارامتر معین، از میانگین ماتریس احتمال انتقال بدست‌آمده برای این پارامتر در زنجیره ۱ و زنجیره ۲ استفاده می‌شود.

زمانی که از پروفیل طولی تونل برای بدست آوردن ماتریس احتمال انتقال استفاده شود، باید مطابق حالت قبلی که برای نقشه‌ها بیان شد عمل کرد. در این حالت خطی که در نظر گرفته می‌شود به‌صورت شکل ۳-۶، الف در مسیر تونل می‌باشد و برای آن یک زنجیره انتقال بدست می‌آید. به‌منظور دستیابی به زنجیره‌های انتقال بیش‌تر، باید در صورت وجود از پروفیل‌های مربوط به تونل‌های دیگر که نزدیک به تونل موردنظر هستند، استفاده شود [۱].

باید در نظر داشت که در صورت استفاده از پروفیل نیز باید شرط قبلی که برای نقشه‌ها بیان شد

برقرار باشد؛ یعنی برای حالت i از پارامتر X :

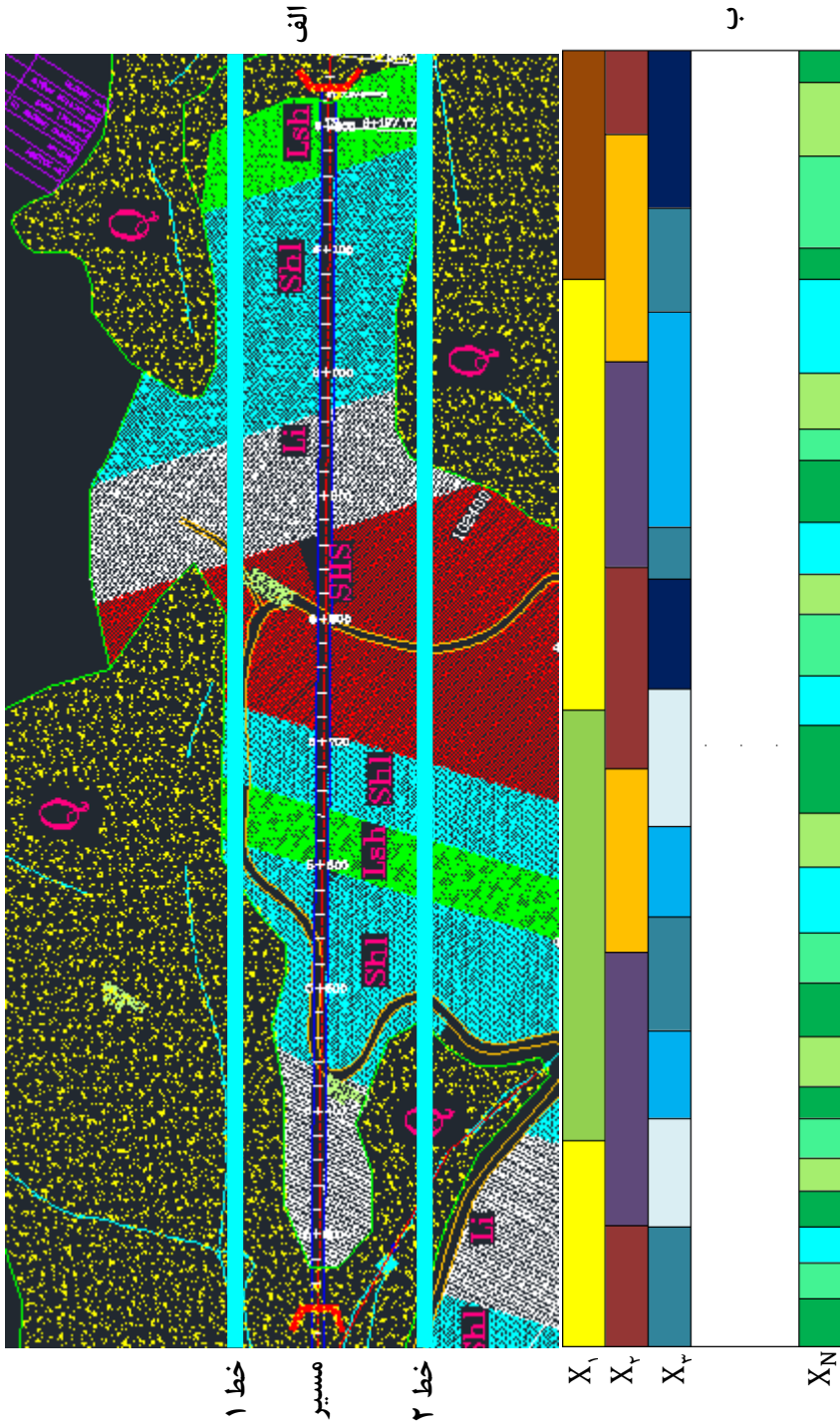
$$p_{x_{i_1}} + p_{x_{i_2}} + \dots + p_{x_{i_n}} \geq 1 \cdot (n-1) \quad 5-3$$

جهت درک بهتر این روش، پروفیلی مطابق شکل ۶-۳، الف فرض می‌شود که مربوط به مسیر تونل است. برای مثال اگر هدف بدست آوردن ماتریس احتمال انتقال برای پارامتر نوع سنگ با پنج حالت نشان داده شده در این پروفیل با استفاده از روش فراوانی باشد، باید ابتدا مطابق شکل ۶-۳، ب پروفیل مربوط به حالت‌های پارامتر نوع سنگ برای مسیر خط در نظر گرفته شده بدست آید و سپس با استفاده از آن تعداد انتقال‌ها از یک حالت به حالت دیگر شمرده شود و در فرم ماتریسی به صورت زیر ارائه گردد:

$$p_r = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

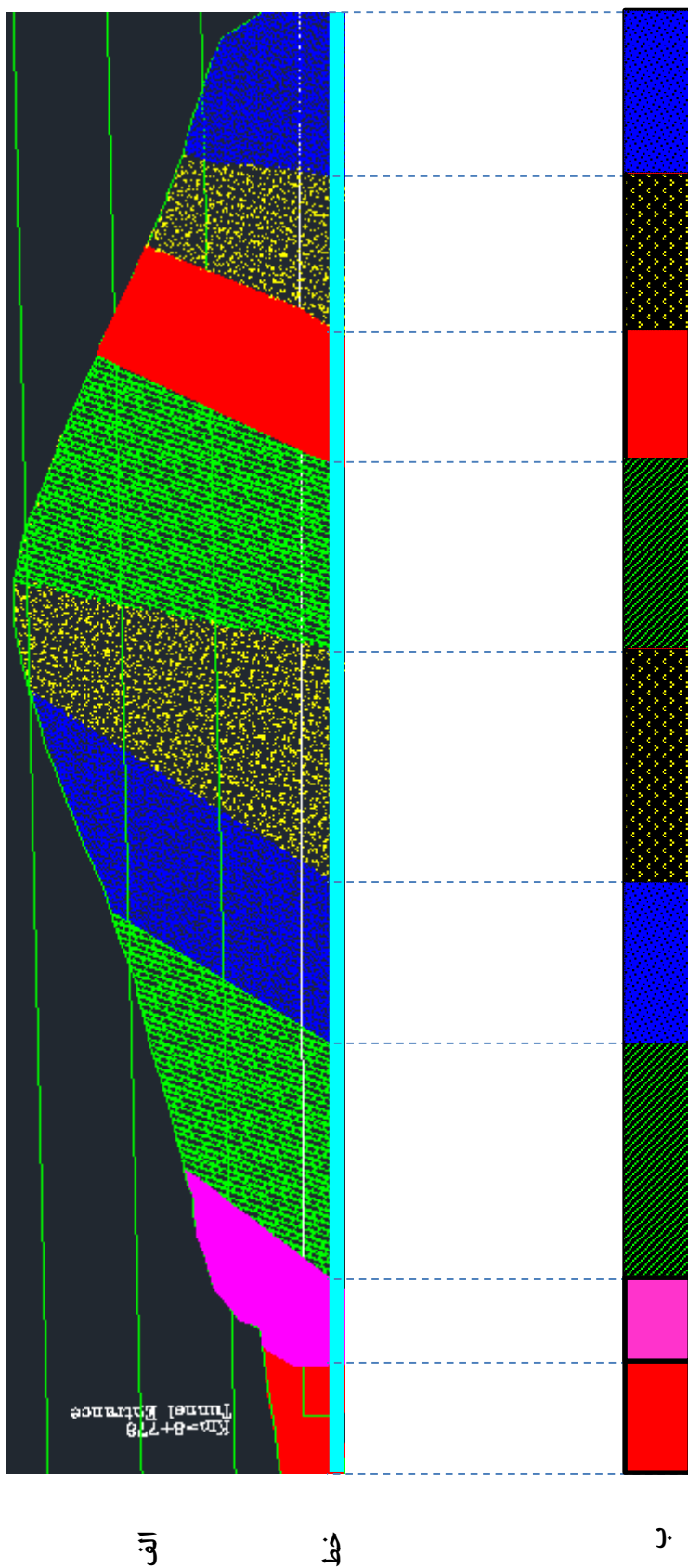
که p_r ماتریس احتمال انتقال پارامتر r است.

همچنان که مشاهده می‌شود، در این ماتریس، درایه‌های روی قطر اصلی برابر صفر هستند چون انتقال از یک حالت به خودش وجود ندارد (البته روشی دیگر نیز وجود دارد که انتقال از یک حالت به خودش را نیز در نظر می‌گیرد). همچنین بعضی از درایه‌های غیر از قطر اصلی این ماتریس برابر صفر بوده زیرا در آن برای پارامتر نوع سنگ، شرط $1 \cdot (n-1)$ برقرار نیست و این نشان می‌دهد که نمی‌توان از روش فراوانی استفاده کرد بلکه باید جهت محاسبه ماتریس احتمال انتقال پارامتر نوع سنگ، روش قضاوت را بکار برد که در بخش بعدی بیان خواهد شد.



شکل ۳-۵: تشکیل زنجیره انتقال با استفاده از روش فراوانی [۱۵].

الف) نقشه زمین شناسی از منطقه مورد نظر که در آن از دو خط به موازات محور تونل برای ثبت پارامترها و حالت های آن ها استفاده شده است [۱۵].
 ب) تشکیل زنجیره انتقال برای پارامتر های $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$ که خط مورد نظر در مسیر تونل آن ها را قطع می کند. نمودار تغییر حالت پارامترها از بالا به پایین به ترتیب با کاهش وسعت میانگین حالت های پارامتر مرتب شده اند. برای هر کدام از خط ها باید چنین زنجیره ای بدست آید.



ب- روش قضاوت^۱

روش قضاوت برای زمانی بکار می‌رود که داده‌های موجود در مورد زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه برای استفاده از روش فراوانی ناقص و یا کم باشند. در چنین شرایطی باید از دانش زمین‌شناس متخصص (قضاوت) که آشنا با زمین‌شناسی ناحیه تونل است، استفاده کرد. در صورتی که نظرات افراد کارشناس مختلف و یا نظرات متفاوتی از یک فرد کارشناس در زمینه احتمال انتقال از یک حالت به حالت دیگر بدست آمد، باید برای دستیابی به احتمال انتقال نهایی، از میانگین نظرات استفاده کرد. فرد کارشناسی که از او سؤال می‌شود، باید داده‌های اولیه در مورد منطقه از جمله نمودار تغییر حالت زمین‌شناسی مسیر تونل، اکتشاف‌های انجام شده، داده‌های ژئوتکنیکی و غیره در اختیار او قرار گیرد تا بتواند در مورد میزان احتمال انتقال از یک حالت به دیگری تصمیم بگیرد [۱].

از جمله سؤال‌هایی که می‌تواند از فرد یا افراد کارشناس پرسیده شود، می‌تواند به صورت زیر باشد [۴]:

"اگر حالت i از پارامتر X در موقعیت معینی در طول تونل اتفاق بیفتد، احتمال این که حالت بعدی آن j باشد، چقدر خواهد بود؟"

در سؤال بالا منظور از موقعیت، جایی است که حالت i اتفاق می‌افتد و می‌تواند هر جایی در طول محور تونل باشد؛ بنابراین جواب باید مستقل از موقعیت باشد [۱].

به عنوان یک مثال از سؤال بالا [۱۰]:

"اگر طولی از تونل دارای سنگی با RQD متوسط باشد، احتمال این که حالت بعدی دارای سنگی با RQD بالا باشد، چقدر است؟"

^۱ Judgment Method

در صورتی که از یک فرد کارشناس سؤال شود، باید یک مقدار حداکثر، یک مقدار حداقل و یک مقدار متوسط برای احتمال وقوع حالت z بعد از حالت i از او پرسیده و سپس میانگین آن‌ها را بدست آورد. اما اگر از چند فرد کارشناس سؤال شود، می‌توان برای هر کدام از آن‌ها مقدار حداقل، حداکثر و متوسط را میانگین گرفته و سپس دوباره از مقدارهای بدست‌آمده به‌وسیله همه آن‌ها میانگین گرفت [۱۰].

مجموع احتمال‌های انتقال بدست‌آمده از یک حالت به حالت‌های دیگر باید برابر ۱ باشد و در غیر این صورت باید احتمال انتقال از یک حالت به دیگری را بر مجموع انتقال‌های آن حالت به حالت‌های دیگر تقسیم نمود تا مجموع آن‌ها برابر ۱ شود [۱]. برای مثال اگر یک پارامتر با ۳ حالت موجود باشد و جواب‌ها از حالت ۱ به حالت ۲ و ۳ در نهایت به صورت زیر باشد، آنگاه:

$$\text{احتمال انتقال از ۱ به ۲: } 0/6$$

$$\text{احتمال انتقال از ۱ به ۳: } 0/7$$

می‌توان دید که مجموع احتمال‌های انتقال از حالت ۱ به حالت ۲ و ۳ برابر $1/3$ شده و بیش‌تر از یک است. بنابراین باید هر کدام از این احتمال‌ها را بر $1/3$ تقسیم کرده تا مجموع آن‌ها برابر ۱ شود:

$$\frac{0/6}{1/3} = 0/4615$$

$$\frac{0/7}{1/3} = 0/5384$$

در نتیجه:

$$\text{احتمال انتقال از ۱ به ۲: } 0/4615$$

$$\text{احتمال انتقال از ۱ به ۳: } 0/5384$$

بعد از تشکیل ماتریس احتمال انتقال با یکی از روش‌های بالا، نوبت به ماتریسی می‌رسد که ماتریس شدت انتقال نام دارد و در بخش بعدی به صورت کامل توصیف می‌شود.

۳-۵- ماتریس شدت انتقال

پس از تشکیل ماتریس احتمال انتقال با توجه به روش‌های گفته شده در بخش‌های قبلی، لازم است ماتریسی را تحت عنوان ماتریس شدت انتقال^۱ معرفی نمود که جهت پیش‌بینی حالت‌های یک پارامتر در نقاط بعدی بکار می‌رود. در این مطالعه، ماتریس شدت انتقال پارامتر X با A_X نمایش داده می‌شود و عبارت است از:

$$A_X = \begin{bmatrix} -C_{X_1} & C_{X_1} p_{X_1 2} & \cdot & \cdot & \cdot & C_{X_1} p_{X_1 n} \\ C_{X_2} p_{X_2 1} & -C_{X_2} & \cdot & \cdot & \cdot & C_{X_2} p_{X_2 n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ C_{X_n} p_{X_n 1} & C_{X_n} p_{X_n 2} & \cdot & \cdot & \cdot & -C_{X_n} \end{bmatrix} \quad ۶-۳$$

مشاهده می‌شود که ماتریس A_X از دو جزء C_{X_i} و $p_{X_{ij}}$ تشکیل شده است؛ که C_{X_i} ضریب شدت

انتقال^۲ و $p_{X_{ij}}$ احتمال انتقال^۳ از حالت i به حالت j پارامتر X می‌باشد. n تعداد حالت‌های پارامتر X

است. بنابراین می‌توان ماتریس A_X را به صورت زیر نیز بیان نمود [۱]:

$$A_X = \left\{ a_{X_{ij}} \right\} \quad a_{X_{ij}} = \begin{cases} -C_{X_i} & (i=j) \\ C_{X_i} p_{X_{ij}} & (i \neq j) \end{cases} \quad ۷-۳$$

ضریب شدت انتقال حالت i (C_{X_i})، عبارت است از معکوس وسعت (طول) مورد انتظار حالت i

(H_{X_i}) در طول مسیر تونل. برای مثال اگر وسعت مورد انتظار حالت گرانیت از پارامتر نوع سنگ (H_{X_g})

(در طول مسیر تونل برابر ۳۰۰ متر باشد، ضریب شدت انتقال حالت گرانیت (C_{X_g}) برابر است با [۵]:

^۱ Transition Intensity Matrix

^۲ Transition Intensity Coefficient

^۳ Transition Probability

$$C_{xg} = \frac{1}{H_{xg}} = \frac{1}{300} = 0.00333 \text{ m}^{-1}$$

بنابراین برای بدست آوردن ضریب شدت انتقال حالت i از پارامتر X (C_{X_i})، نیاز به وسعت حالت

i این پارامتر (H_{X_i}) در طول تونل می‌باشد. برای بدست آوردن H_{X_i} نیز مانند $p_{X_{ij}}$ که در بخش قبلی

بیان شد، دو روش فراوانی و روش قضاوت وجود دارد که در ادامه توصیف خواهند شد.

الف - روش فراوانی

همانند روش فراوانی که برای محاسبه $p_{X_{ij}}$ در بخش قبلی بیان شد، در اینجا هم برای هر کدام از

پارامترهای زمین‌شناسی با استفاده از نقشه‌ها و یا پروفیل‌های زمین‌شناسی مسیر تونل، پروفیل تغییر

حالت یک پارامتر مانند شکل ۳-۷ بدست می‌آید و با توجه به آن میزان طول یا وسعتی که یک حالت

معین در سراسر تونل می‌تواند داشته باشد، محاسبه می‌شود. ممکن است برای هر پارامتر با توجه به

این‌که از چند خط در موقعیت‌های مختلفی استفاده شده است، چند پروفیل تغییر حالت بدست آید و

در این صورت برای محاسبه وسعت نهایی هر حالت از این پارامتر، از وسعت بدست‌آمده به‌وسیله همه

پروفیل‌ها میانگین گرفته می‌شود [۱].

شرط استفاده از روش فراوانی برای برآورد وسعت حالت‌های یک پارامتر، این است که در پروفیل

تغییر حالت هر پارامتر، حداقل ۱۰ طول برای هر حالت در موقعیت‌های متفاوتی موجود باشد [۱].



شکل ۳-۷: پروفیل تغییر حالت پارامتر X با سه حالت. وسعت هر حالت برابر با مجموع وسعت‌های آن حالت در نقاط

مختلفی از پروفیل است. چون تعداد طول‌های هر حالت بیش‌تر از ۱۰ می‌باشد، بنابراین می‌توان روش فراوانی را برای

محاسبه وسعت‌های آن‌ها به کار برد.

ب- روش قضاوت

روش قضاوت برای زمانی بکار می‌رود که داده‌های موجود در مورد زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه برای استفاده از روش فراوانی ناقص و یا کم باشند. در چنین شرایطی باید از دانش زمین‌شناس متخصص (قضاوت) که آشنا با زمین‌شناسی ناحیه تونل باشد، استفاده کرد. در صورتی که نظرهای افراد کارشناس مختلف و یا نظرهای متفاوتی از یک فرد کارشناس در زمینه وسعت یک حالت معین در سراسر مسیر تونل بدست آمد، باید برای دستیابی به وسعت نهایی هر حالت، از میانگین نظرها استفاده کرد. فرد کارشناسی که از او سؤال می‌شود، باید داده‌های اولیه در مورد منطقه از جمله پروفیل زمین‌شناسی مسیر تونل، اکتشاف‌های انجام شده، داده‌های ژئوتکنیکی و غیره در اختیار او قرار گیرد تا بتواند در مورد میزان وسعت یک حالت تصمیم بگیرد [۱].

از جمله سؤالاتی که می‌تواند از فرد یا افراد متخصص پرسیده شود، می‌تواند به صورت زیر باشد [۱]:

"به طور متوسط، وسعت حالت i از پارامتر X در طول مسیر تونل چقدر می‌باشد؟"

به عنوان یک مثال از سؤال بالا [۱]:

"به طور متوسط، وسعت حالت گرانیت از پارامتر نوع سنگ در طول مسیر تونل مورد نظر چقدر است؟"

یا

"در چند درصد طول تونل حالت پارامتر نوع سنگ، گرانیت خواهد بود؟"

بعلاوه این که وسعت هر حالت از تمام پارامترهای در نظر گرفته شده با یکی از روش‌ها بدست آمد، می‌توان ضریب شدت انتقال را برای تمام حالت‌های هر پارامتر بدست آورد و در نهایت ماتریس شدت انتقال را تشکیل داد. از ماتریس شدت انتقال جهت پیش‌بینی احتمال وقوع یک حالت از پارامتر معین در هر موقعیتی در طول تونل استفاده می‌شود که در بخش‌های بعدی به صورت جزئی توضیح داده خواهد شد.

۳-۶- روش پیش‌بینی احتمال وقوع حالت‌های یک پارامتر زمین‌شناسی در یک

نقطه در طول مسیر تونل

بر اساس مدل مارکوف، احتمال وقوع یک حالت معین از پارامتر زمین‌شناسی X در موقعیت‌های بعدی می‌تواند محاسبه شود. با توجه به شکل ۳-۸، 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) 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 مدل مارکوف بتواند با استفاده از آن، این احتمال‌ها را در نقاط بعدی پیش‌بینی نماید (شکل ۳-۸) [۱۳].

در این مطالعه، کل مسیر تونل مانند شکل ۳-۸ به بخش‌های یکسانی تقسیم شده است که هر بخش یک سلول^۱ نامیده می‌شود. هر سلول بیانگر یک موقعیت معین در طول تونل است و فرض بر این می‌باشد که هر سلول همگن^۲ است، یعنی در داخل هر سلول تنها یکی از حالت‌های پارامتر موردنظر اتفاق می‌افتد. فاصله میان دو سلول معین که با $u = (L - O)$ نمایش داده می‌شود، برابر تعداد سلول‌های قرارگرفته میان آن‌ها می‌باشد.

| | | | | | | |
|------|-------|--|-----|--|------|--|
| سلول | X(O.) | | ... | | X(L) | |
| حالت | i | | ... | | j | |

شکل ۳-۸: پیش‌بینی احتمال وقوع هر کدام از حالت‌های یک پارامتر (X) در فاصله $u = (L - O)$ نسبت به موقعیتی (O) که احتمال وقوع حالت‌های X در آن مشخص است. هر موقعیت با یک سلول نمایش داده شده است.

جهت محاسبه احتمال وقوع حالت‌های پارامتر X در یک سلول به فاصله u نسبت به سلول اولیه، ماتریسی به کار برده می‌شود که ماتریس احتمال انتقال^۳ فاصله نام دارد و با $V_X(u)$ نمایش داده

¹ Cell

² Homogeneous

³ Matrix of Interval Transition Probability

می شود [۱]:

$$V_X(u) = \{v_{X_{ij}}(u)\} \quad ۸-۳$$

که در آن $v_{X_{ij}}(u)$ احتمال وقوع حالت Z از پارامتر X به فاصله u از سلول O می باشد که دارای حالت i است.

با مشتق گرفتن از $V_X(u)$ ، معادله مشتق کولموگروف^۱ به صورت زیر بدست می آید [۱]:

$$\frac{dV_X(u)}{du} = V_X(u) A_X \quad ۹-۳$$

که A_X همان ماتریس شدت انتقال است.

جهت بیان معادله بالا به صورت عمومی، فاصله بسیار کوچک du را در نظر بگیرید [۱]:

$$v_{X_{ij}}(u+du) = v_{X_{ij}}(u)v_{X_{jj}}(du) + \sum_{k \neq j} v_{X_{ik}}(u)v_{X_{kj}}(du) \quad ۱۰-۳$$

بنابراین:

$$v_{X_{ij}}(u+du) - v_{X_{ij}}(u) = -v_{X_{ij}}(u)C_{X_i} du + \sum_{k \neq j} v_{X_{ik}}(u)v_{X_{kj}}(du) \quad ۱۱-۳$$

$$v_{X_{ij}}(u+du) - v_{X_{ij}}(u) = -v_{X_{ij}}(u)C_{X_i} du + \sum_{k \neq j} v_{X_{ik}}(u)a_{X_{kj}}(du) \quad ۱۲-۳$$

با تقسیم نمودن معادله ۱۲-۳ به du و گرفتن حد آن زمانی که du به صفر میل می کند [۱۳]:

$$\frac{v_{X_{ij}}(u)}{du} = -v_{X_{ij}}(u)C_{X_i} + \sum_{k \neq j} v_{X_{ik}}(u)a_{X_{kj}} \quad ۱۳-۳$$

حال جهت بیان معادله ۹-۳ به شکل عمومی [۱۳]:

$$V_X(u) = \exp(uA_X) = I + uA_X + \frac{1}{2!}u^2A_X^2 + \dots + \frac{1}{m!}u^m A_X^m \quad ۱۴-۳$$

^۱ Kolmogorov Differential Equation

در معادله ۳-۱۴، I ماتریس واحد از مرتبه n (تعداد حالت‌های پارامتر X) و m عدد خیلی بزرگی می‌باشد که می‌تواند تا بینهایت ادامه پیدا کند. هم‌چنین [۱۴]:

$$\exp(uA_x) = \sum_{m=0}^{\infty} A^m \frac{u^m}{m!} \quad ۱۵-۳$$

تا اینجا با استفاده از ماتریس احتمال انتقال فاصله، احتمال وقوع حالت‌های یک پارامتر در سلول‌هایی که به فاصله u از سلول O قرار دارند، می‌تواند محاسبه شود. حال می‌خواهیم احتمال وقوع حالت‌های پارامتر را در شرایطی بدست آوریم که در موقعیت O، حالت پارامتر به‌طور قطعی مشخص نباشد و یک تابع جرم احتمال (PMF) در مورد آن داده شده باشد. برای این حالت اجازه دهید $S_{x_j}(u)$ احتمال وقوع حالت j از پارامتر X در موقعیت +u باشد، آنگاه [۱]:

$$S_{x_j}(u) = \sum_{i=1}^n S_{x_i} v_{x_{ij}}(u) \quad ۱۶-۳$$

که n تعداد حالت‌های پارامتر X و $S_{x_i}(u)$ احتمال وقوع حالت i ($i = 1, 2, \dots, n$) از پارامتر X در سلول اول می‌باشد. به‌منظور بیان معادله ۳-۱۶ با جزئیات بیشتر، $S_X(u)$ را به‌صورت بردار سطری زیر در نظر بگیرید [۱]:

$$S_X(u) = [S_1(u) \quad S_2(u) \quad \dots \quad S_n(u)] \quad ۱۷-۳$$

از این رو می‌توان معادله ۳-۱۶ را به شکل زیر بیان نمود [۱]:

$$S_X(u) = S_X(0) V_X(u) = S_X(0) \exp(u A_X) \quad ۱۸-۳$$

۳-۶-۱- احتمال‌های حالت پایا^۱

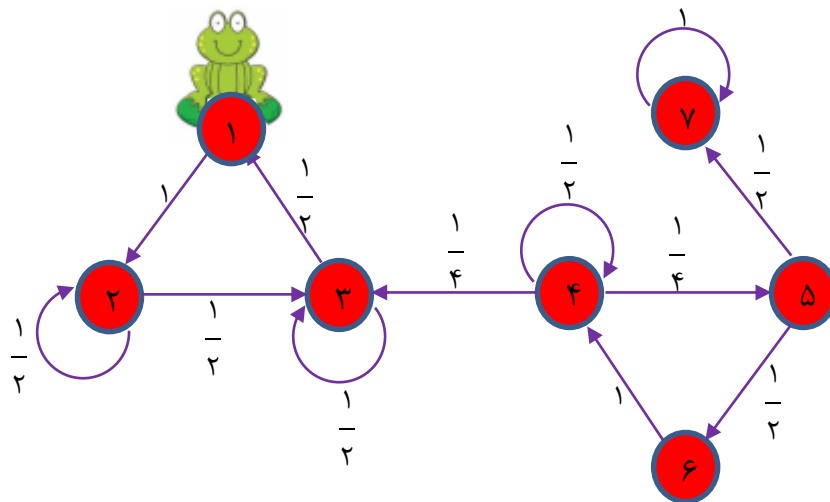
اگر بخواهیم احتمال حالت بعد از چند مرحله را بیان کنیم، می‌بینیم که از یک مرحله‌ای به بعد (مرحله k ام)، دیگر احتمال انتقال از یک حالت i به حالت دیگر ز تغییری نمی‌کند و ثابت می‌ماند. در

¹ Stable State Probabilities

این وضعیت گفته می‌شود که سیستم به حالت پایا رسیده است [۱۵].

به منظور درک بهتر این موضوع، فرض کنید قورباغه‌ای مطابق شکل ۳-۹ هفت حالت $X(n) =$ (۱, ۲, ۳, ۴, ۵, ۶, ۷) برای پرش دارد. حالت شروع، حالت ۱ می‌باشد که بعد از پرش با احتمال یک به حالت ۲ می‌رود. احتمال اینکه به ترتیب بعد از ۳، ۵ و ۱۰۰۰ پرش دوباره به حالت ۱ برگردد، برابر $\frac{1}{4}$ ، $\frac{1}{5}$ و $\frac{3}{16}$ است. از این رو می‌توان دید زمانی که قورباغه از یک حالت به حالت دیگری می‌پرد، دارای احتمالی می‌باشد و این احتمال از یک حالت به حالت دیگری به تعداد پرش‌ها بستگی دارد. زمانی که این پرش‌ها به سمت بینهایت میل می‌کند، احتمال از یک حالت به حالت دیگر نیز به سمت عدد ثابتی میل خواهد کرد [۱۶].

ماتریس احتمال k مرحله‌ای با P^k نمایش داده می‌شود.



شکل ۳-۹: دیاگرام احتمال پرش قورباغه از یک حالت به حالت دیگر [۱۶].

پس اگر در شکل ۳-۹ تنها سه حالت ۱، ۲ و ۳ برای پرش قورباغه در نظر گرفته شود، ماتریس

احتمال انتقال آن با توجه به تعداد مراحل به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$P^1 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0/200 & 0/400 & 0/400 \\ 0/200 & 0/400 & 0/400 \\ 0/200 & 0/400 & 0/400 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$P^2 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0/100 & 0/500 & 0/500 \\ 0/250 & 0/250 & 0/500 \\ 0/250 & 0/500 & 0/250 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$P^4 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0/25 & 0/375 & 0/375 \\ 0/187 & 0/437 & 0/375 \\ 0/187 & 0/375 & 0/437 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$P^8 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0/203 & 0/398 & 0/398 \\ 0/199 & 0/402 & 0/398 \\ 0/199 & 0/398 & 0/402 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$P^{20} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0/200 & 0/400 & 0/400 \\ 0/200 & 0/400 & 0/400 \\ 0/200 & 0/400 & 0/400 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$P^{30} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0/200 & 0/400 & 0/400 \\ 0/200 & 0/400 & 0/400 \\ 0/200 & 0/400 & 0/400 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

همچنین اگر بخواهیم در مورد یک پارامتر X در مسیر تونل صحبت کنیم، با افزایش فاصله u ، تأثیر حالت موجود در سلول O (حالت i) بر روی احتمال وقوع حالت‌ها در موقعیت‌های بعدی کم‌تر می‌شود. زمانی که u به سمت بینهایت میل می‌کند، احتمال وقوع یک حالت معین z در فاصله u به مقدار ثابتی محدود شده و مستقل از حالت L می‌شود. این ثابت محدود، یک احتمال حالت محدود V_{X_j} نامیده می‌شود و عبارت است از [۱۳]:

$$V_{X_j}(u) = \lim_{u \rightarrow \infty} v_{X_{ij}}(u) \quad 19-3$$

حال اجازه دهید $V_1 \quad V_2 \quad \dots \quad V_3$ بردار احتمال حالت پایا باشد. با داشتن ماتریس شدت انتقال A_X ، V_{X_j} می‌تواند از اولین مشتق معادله ۱۸-۳ بدست آید [۱]:

$$\frac{dS_X(u)}{du} = S_X(\cdot) \frac{d \exp(u A_X)}{du} = S_X(\cdot) \exp(u A_X) A_X = S_X(u) A_X \quad 20-3$$

همچنان که u به سمت بینهایت میل می‌کند، $S_X(u)$ به بردار S_X میل کرده و بنابراین [۱]:

$$\frac{d}{du} S_X = S_X A_X \xrightarrow{S_X = \text{Constant}} \frac{d}{du} S_X = 0 \Rightarrow S_X A_X = 0 \quad 21-3$$

در نتیجه خواهیم داشت:

$$\begin{cases} V_{x_1} (-C_{x_1}) + V_{x_2} (C_{x_2} p_{x_2 1}) + \dots + V_{x_n} (C_{x_n} p_{x_n 1}) = 0 \\ V_{x_1} (C_{x_1} p_{x_1 2}) + V_{x_2} (-C_{x_2}) + \dots + V_{x_n} (C_{x_n} p_{x_n 2}) = 0 \\ \vdots \\ V_{x_1} (C_{x_1} p_{x_1 n}) + V_{x_2} (C_{x_2} p_{x_2 n}) + \dots + V_{x_n} (-C_{x_n}) = 0 \end{cases} \quad 22-3$$

همچنین می دانیم که جمع درایه های بردار سطری احتمالاتی برابر یک است [۱]:

$$V_{x_1} + V_{x_2} + \dots + V_{x_n} = 1 \quad 23-3$$

بنابراین با حل دو معادله ۲۲-۳ و ۲۳-۳، V_{x_j} زمانی که u به بینهایت میل کند می تواند بدست آید [۱].

اهمیت V_{x_j} این است که درصد نسبی وقوع حالت j را بدست می دهد. برای مثال اگر در یک سلول،

حالت j از پارامتر X در ۷۰ درصد زمان اتفاق بیفتد، آنگاه: $V_{x_j} = 0.7$. در چنین موقعیتی برای یک

تونل با طول L ، طول کل مورد انتظار حالت j برابر است با: $V_{x_j} = 0.7L$ [۱].

۳-۶-۲- اصول مدل سازی با مدل مارکوف

فضای حالت با توجه به متغیر مورد بررسی تعریف می شود. در این مطالعه، به مدل سازی متغیرها

با استفاده از حالت گسسته پرداخته خواهد شد. در صورتی که متغیر تصادفی باشد، از روش های دیگر

مارکوف به نام شبه-مارکوف جهت مدل سازی استفاده خواهد شد [۱۷].

در مدل سازی پارامترهای زمین شناسی، از مدل مارکوف مرتبه اول استفاده شده است. با توجه به

فرض مارکوف مرتبه اول، حالت پارامتر در مکان t_{n+1} بلافاصله به حالت پارامتر در مکان t_n وابسته

است و کمتر تحت تأثیر شرایط حالت های واقع در نقاط قبلی مانند t_{n-1} یا t_{n-2} و غیره می باشد. به

عبارتی ویژگی مارکوف برای فرایند مرتبه اول بیان می‌دارد که حالت پارامتر در مکان t_{n+1} فقط به حالت مشاهده شده در مکان t_n بستگی دارد [۱۲].

پارامتر زمین‌شناسی که دارای ویژگی مارکوف است، باید از دو شرط زیر پیروی کند [۱۲]:

$$P\{X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n\} = P\{X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_{n-m} = i_{n-m}\} \quad 24-3$$

برای هر n و به ازای هر i_1, i_2, \dots, i_{n+1} و $m = 0, 1, 2, \dots, n-1$:

$$P\{X_n = i_n, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_{n-m} = i_{n-m}\} > 0 \quad 25-3$$

برای شرط دوم، رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$P\{X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n\} = P\{X_{m+1} = i_{m+1} | X_m = i_m\} \quad 26-3$$

به ازای هر m و n :

$$P\{X_n = i_n\} > 0 \quad 27-3$$

به طوری که:

$$P\{X_{n+1} = j | X_n = i\} \quad 28-3$$

با توجه به شرط اول، حالت در مکان t_{n+1} فقط به حالت در مکان t_n بستگی دارد و نه به یک توالی از حالت‌ها که پیش از آن قرار گرفته شده است که همان ویژگی مارکوف از مرتبه اول می‌باشد. هم‌چنین با توجه به شرط دوم، احتمال انتقال فقط به تغییر حالت بین دو مکان پی‌درپی بستگی دارد و مستقل از قرار گرفتن در مکان خاصی است [۱۲]. بنابراین:

$$p_{ij} = P\{X_{n+1} = j | X_n = i\} \quad , \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad 29-3$$

p_{ij} در واقع بیانگر احتمال انتقال از حالت i به حالت j است.

بنابراین با توجه به مطالبی که تا اینجا گفته شده است، زنجیره مارکوف که از آن جهت نشان

دادن یک توالی از حالت‌های پارامتر زمین‌شناسی استفاده می‌شود، به طور معمول باید دارای ویژگی‌های

زیر باشد [۱۴]:

• تعداد حالت‌های مشاهده شده از پارامترها در فضای حالت محدود و در عمل، به ندرت بزرگ‌تر از ۵ یا ۶ باشد.

• هیچ‌گونه حالت جذبی وجود نداشته باشد. یعنی هیچ حالتی نباشد که انتقال از آن به دیگر حالت‌ها برابر با صفر و به خودش برابر با یک باشد. از این رو برای تمام i و j ها داریم:

$$P_{ij} < 1$$

• برای هر حالتی از پارامتر i که در مکان t_n قرار دارد، یک احتمال مثبت برای رفتن به حالت j در مکان t_{n+1} وجود دارد. از این رو برای هر i و j :

$$P_{ij} > 0$$

• زنجیره مارکوف باید منظم باشد؛ به این معنی که یک عدد صحیح مثبت N وجود داشته باشد به طوری که P^N دارای هیچ درایه صفری نباشد. این مسئله حاکی از آن است که تغییر انتقال از هر حالتی به هر حالت ممکن دیگر، در N انتقال امکان پذیر است.

• حالت پارامتر در نقطه اولیه (به صورت قطعی یا احتمالاتی) باید مشخص باشد.

تا اینجا به طور کلی چگونگی تعیین احتمال وقوع حالت‌های یک پارامتر در هر سلولی در طول تونل با استفاده از روش مارکوف ارائه شد. حال می‌خواهیم این پیش‌بینی‌ها را برای شرایط مختلف بسته به این که چه تعداد مشاهده از حالت‌های پارامتر مورد نظر در طول مسیر تونل در دسترس باشد، انجام دهیم. در بخش بعدی به بیان این موضوع پرداخته خواهد شد.

۳-۷- دست یابی به نمودار تغییر حالت پارامتر

یک نمودار تغییر حالت پارامتر، احتمال وقوع حالات پارامتر را در هر موقعیتی از تونل بدست می‌دهد. به منظور پیش‌بینی احتمال وقوع حالت‌های یک پارامتر معین (برای مثال پارامتر X با n حالت)

همواره باید موقعیتی در مسیر تونل باشد که احتمال وقوع حالات آن پارامتر در آن به صورت قطعی یا غیرقطعی مشخص باشد. در این پژوهش جهت دستیابی به احتمال وقوع حالات هر کدام از پارامترها در هر موقعیتی در مسیر تونل، ابتدا کل مسیر تونل به بخش‌های مساوی تقسیم می‌شود که به هر بخش یک سلول نیز می‌گویند. در مسیر تونل از میان تمام بخش‌ها (سلول‌ها)، سلول‌هایی هستند که احتمال وقوع حالات یک پارامتر معین در آن‌ها مشخص می‌باشد؛ برای مثال سلول‌های مربوط به موقعیت گمانه‌ها یا سلول‌های مربوط به موقعیت ورودی و خروجی تونل. سایر سلول‌ها نیز که احتمال وقوع حالات پارامترها در آن‌ها مشخص نیست، در این مطالعه تحت عنوان سلول‌های مجهول از آن‌ها اسم برده شده است. مدل مارکوف به کمک سلول یا سلول‌های مشاهده‌ای، احتمال وقوع هر حالت از پارامتر معینی را می‌تواند در موقعیت سلول‌های مجهول تخمین بزند. مدل مارکوف بسته به تعداد سلول‌های مشاهده‌ای در مسیر تونل و همچنین قطعی یا غیرقطعی بودن احتمال وقوع حالات یک پارامتر معین در داخل آن‌ها، از معادلات متفاوتی برای محاسبه احتمال وقوع حالات یک پارامتر معین در موقعیت سلول‌های مجهول استفاده می‌کند. این معادلات در سال ۱۹۸۱ توسط Chan ارائه شده‌اند (به منبع ۴ در این مطالعه مراجعه شود). از آنجایی که در فصل پنجم این مطالعه با توجه به شرایط موجود برای تونل راه همرو از حالت چند مشاهده‌ای غیرقطعی استفاده شده است، بنابراین در ادامه روش پیش‌بینی احتمال وقوع هر کدام از حالت‌های یک پارامتر معین در موقعیت سلول‌های مجهول برای چند مشاهده غیرقطعی به کمک مدل مارکوف بیان خواهد شد.

مطابق شکل ۳-۱۰، فرض می‌کنیم تونل به سلول‌های مساوی تقسیم شده است که شامل N سلول مجهول و S سلول مشاهده‌ای غیرقطعی می‌باشد. حال می‌خواهیم برای پارامتر X با n حالت، سلول‌ها را به کمک مدل مارکوف از حالت مجهول خارج کنیم. سلول‌های مجهول با L_i ($i = 0, 1, 2, \dots, N$) و سلول‌های مشاهده‌ای غیرقطعی با O_t ($t = 1, 2, \dots, S$) نشان داده شده‌اند. مدل مارکوف سلول‌های مجهول میان هر دو سلول مشاهده‌ای را از حالت مجهول خارج می‌کند. در همین راستا مطابق شکل ۳-

۱۰، ابتدا احتمال وقوع هر حالت از پارامتر معینی (احتمال وقوع هر کدام از n حالت پارامتر X) را در موقعیت سلول L_1 به کمک دو سلول O_1 و O_2 محاسبه می‌نماید. سپس برای دستیابی به احتمال وقوع هر کدام از حالات پارامتر X در سلول L_2 ، از سلول مشاهده‌ای L_1 و سلول مشاهده‌ای O_2 کمک می‌گیرد. همچنین از سلول L_3 و O_2 برای سلول مجهول L_4 استفاده می‌کند. به همین ترتیب احتمال هر کدام از n حالت پارامتر X را در تمام سلول‌های مجهول میان دو سلول O_1 و O_2 بدست می‌آورد. برای سلول‌های مجهول میان سلول‌های مشاهده‌ای دیگر نیز همین روند را تکرار می‌نماید تا اینکه احتمال تمام حالت‌های پارامتر X در موقعیت تمام سلول‌های مجهول در مسیر تونل بدست آید.

| | | | | | | | | | | |
|------|----------|----------|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|----------|
| سلول | $X(O_1)$ | $X(L_1)$ | $X(L_2)$ | ... | $X(O_2)$ | ... | $X(O_3)$ | ... | $X(L_N)$ | $X(O_s)$ |
| حالت | m | z | z_1 | ... | w | ... | k | ... | z_N | q |

شکل ۳-۱۰: پیش‌بینی احتمال وقوع حالت‌های پارامتر X در سلول‌های مجهول در صورتی که S مشاهده غیرقطعی داشته باشیم.

جهت یافتن احتمال وقوع هر کدام از حالت‌های پارامتر X در سلول‌های مجهول میان دو سلول

مشاهده‌ای O_{t-1} و O_t ($t = 1, 2, 3, \dots, S$)، معادله زیر بکار می‌رود [۱۰] و [۴]:

$$V_{X_m z}^{ns} (L_1 - O_{t-1}) = P[X(L_1) = z, | X(O_{t-1}) = m, X(O_t) = w] =$$

$$\sum_{m=1}^n P[X(O_{t-1}) = m] \sum_{w=1}^n P[X(O_t) = w] P[X(L_1) = z, | X(O_{t-1}) = m, X(O_t) = w] \quad 3-30$$

که $V_{X_m z}^{ns} (L_1 - O_{t-1})$ بیانگر احتمال وقوع حالت z از پارامتر X در سلول L_1 می‌باشد به شرط

این که حالت در O_{t-1} ، m و حالت در O_t ، w باشد (بالانویس ns معرف چند مشاهده غیرقطعی است).

که در معادله ۳-۳۰ برای $P[X(L_1) = z, | X(O_{t-1}) = m, X(O_t) = w]$ داریم [۱۲]:

$$P[X(L_1) = z, | X(O_{t-1}) = m, X(O_t) = w] = \frac{P[X(O_{t-1}) = m, X(L_1) = z, X(O_t) = w]}{P[X(O_{t-1}) = m, X(O_t) = w]}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{P[X(O_t) = w | X(O_{t-1}) = m, X(L.) = z.] P[X(O_{t-1}) = m, X(L.) = z.]}{P[X(O_{t-1}) = m, X(O_t) = w]} \\
 &= \frac{P[X(O_t) = w | X(L.) = z.] P[X(O_{t-1}) = m | X(L.) = z.]}{P[X(O_{t-1}) = m, X(O_t) = w]} \\
 &= \frac{P[X(O_t) = w | X(L.) = z.] P[X(L.) = z. | X(O_{t-1}) = m] P[X(O_{t-1}) = m]}{P[X(O_t) = w | X(O_{t-1}) = m] P[X(O_{t-1}) = m]} \\
 &= \frac{P[X(O_t) = w | X(L.) = z.] P[X(L.) = z. | X(O_{t-1}) = m]}{P[X(O_t) = w | X(O_{t-1}) = m]} \\
 &= \frac{V_{X_{z,w}}(O_t - L.) V_{X_{m,z}}(L. - O_{t-1})}{V_{X_{m,w}}(O_t - O_{t-1})} \quad 31-3
 \end{aligned}$$

بنابراین داریم [۱۰]:

$$\begin{aligned}
 &V_{X_{m,z}}^{ns}(L. - O_{t-1}) \\
 &= \sum_{m=1}^n P[X(O_{t-1}) = m] \sum_{w=1}^n P[X(O_t) = w] \frac{V_{X_{z,w}}(O_t - L.) V_{X_{m,z}}(L. - O_{t-1})}{V_{X_{m,w}}(O_t - O_{t-1})} \quad 32-3
 \end{aligned}$$

در این فرمول:

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

n : تعداد حالت‌های پارامتر مورد نظر.

$V_{X_{m,z}}^{ns}(L. - O_{t-1})$: احتمال وقوع حالت z از پارامتر X در سلول L به شرط این که حالت در سلول مشاهده‌ای O_{t-1} ، m باشد (بالانویس ns معرف چند مشاهده غیرقطعی است).

$P[X(O_{t-1}) = m]$: احتمال این که حالت پارامتر X در سلول مشاهده‌ای O_{t-1} ، m باشد (m)

برای هر پارامتر از ۱ تا n متغیر است.

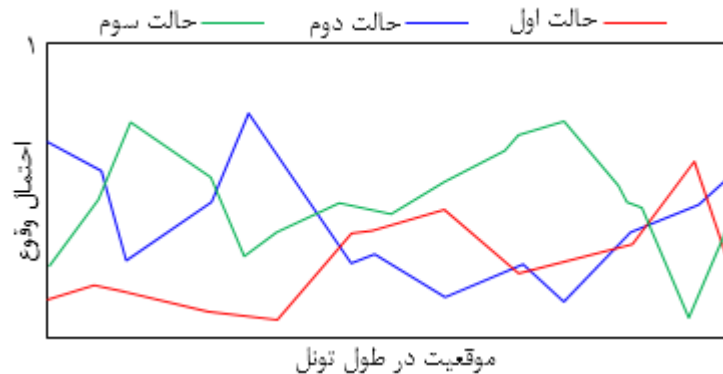
هر پارامتر از ۱ تا n متغیر است). $P[X(O_t) = w]$: احتمال این که حالت پارامتر X در سلول مشاهده‌ای O_t ، w باشد (w برای

حالت در سلول L_z ، باشد. $V_{Xz,w}(O_t - L_z)$: احتمال وقوع حالت w از پارامتر X در سلول مشاهده‌ای O_t به شرط این که

سلول مشاهده‌ای O_{t-1} ، L_m باشد. $V_{Xm,z}(L_m - O_{t-1})$: احتمال وقوع حالت z از پارامتر X در سلول L_m به شرط این که حالت در

حالت در سلول مشاهده‌ای O_{t-1} ، m باشد. $V_{Xmw}(O_t - O_{t-1})$: احتمال وقوع حالت w از پارامتر X در سلول مشاهده‌ای O_t به شرط این که

پس از بدست آوردن احتمال وقوع هر کدام از حالت‌های یک پارامتر در هر سلول در طول مسیر تونل، نمودار تغییر حالت پارامتر موردنظر مطابق شکل ۳-۱۱ بدست می‌آید که در هر موقعیتی در طول تونل، احتمال وقوع هر حالت از پارامتر را مشخص می‌کند [۱۰]. در نهایت بایستی برای هر کدام از پارامترهای موردنظر یک نمودار تغییر حالت بدست آید و با استفاده از آن‌ها نمودار تغییر حالت کلاس زمین را تشکیل داد. در بخش بعدی به بیان نمودار تغییر حالت کلاس زمین پرداخته خواهد شد.



شکل ۳-۱۱: نمودار تغییر حالت یک پارامتر معین با سه حالت در طول محور تونل [۵].

۳-۸- نمودار تغییر کلاس زمین

همان طور که در بخش قبلی اشاره شد، نمودار تغییر حالت کلاس زمین^۱ ترکیبی از نمودارهای تغییر حالت پارامترهای در نظر گرفته شده در طول مسیر تونل می باشد و هدف مدل زمین شناسی، دستیابی به نمودار تغییر حالت کلاس زمین است تا بعداً بتوان از آن در مدل ساخت جهت ارزیابی زمان و هزینه در هر موقعیتی در طول تونل و همچنین زمان و هزینه نهایی تونل استفاده کرد [۷].

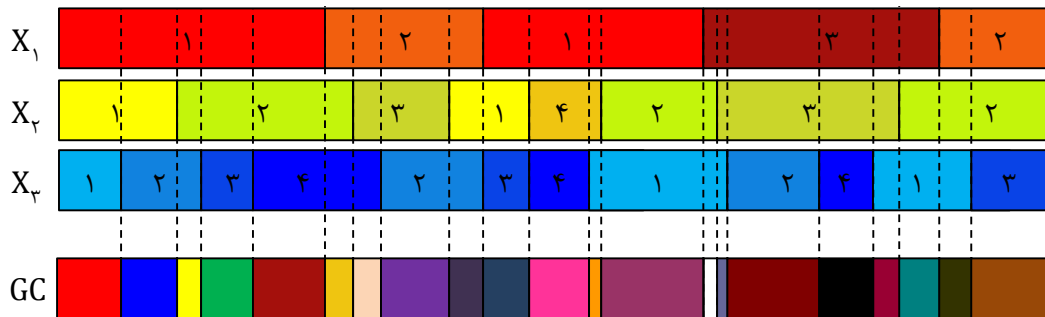
منظور از کلاس زمین، شرایطی از زمین است که با توجه به پروژه های قبلی و نظر افراد کارشناس، روش حفاری و سیستم نگهداری مخصوصی برای آن تعریف می شود. برای درک بهتر چگونگی تشکیل نمودار تغییر حالت کلاس زمین، مثالی را در نظر بگیرید که دارای سه پارامتر X_1 ، X_2 و X_3 باشد. فرض کنید این پارامترها به ترتیب دارای ۳، ۴ و ۴ حالت بوده و موقعیت وقوع هر کدام از حالت ها در طول پروفیل تغییر حالت پارامتر مربوطه به طور قطعی مطابق شکل ۳-۱۲ است. به منظور تشکیل پروفیل کلاس زمین، پروفیل سه پارامتر باهم ترکیب می شود به گونه ای که هر ترکیب شامل یک حالت از هر سه پارامتر خواهد بود. هر ترکیب از حالت های پارامتر با یک بردار نشان داده می شود که بردار پارامتر زمین شناسی نام دارد. برای مثال در شکل ۳-۱۲ در کل $(3 \times 4 \times 4) = 48$ بردار زمین شناسی می تواند تشکیل شود. بعد از مشخص نمودن بردارهای زمین شناسی، هر کدام از بردارها در کلاس زمین مربوطه قرار می گیرد و پروفیل کلاس زمین تشکیل می شود.

در شکل ۳-۱۲، پروفیل تغییر حالت کلاس زمین با GC نمایش داده شده است و در آن هر رنگ معرف یک ترکیب از حالت های سه پارامتر در نظر گرفته شده می باشد. بایستی توجه داشت که مثال شکل ۳-۱۲ به منظور نشان دادن شماتیکی از چگونگی تشکیل پروفیل کلاس زمین می باشد به گونه ای که در این مثال فرض شده که هر حالت از پارامتر که در بخش معینی اتفاق می افتد، به صورت قطعی می باشد در صورتی که در پیش بینی ها وقوع هر حالت از پارامتر مورد نظر در هر موقعیتی به صورت

^۱ Ground Class Profile

احتمالاتی خواهد بود و از این رو باید مطابق بخش قبلی پروفیل مربوط به هر پارامتر را با استفاده از یک نمودار به صورت احتمالاتی در طول تونل بدست آورد. در نهایت پروفیل کلاس زمین نیز در هر موقعیتی از تونل به صورت احتمالاتی بیان خواهد شد.

بنابراین اگر بخواهیم کلاس زمین را به صورت احتمالاتی بدست آوریم، فرض کنید مطابق جدول ۲-۳ چهار پارامتر با حالت‌های نشان داده شده داشته باشیم. در این صورت مطابق بخش قبلی، نمودار تغییر حالت احتمالاتی پارامترها برای پارامتر نوع سنگ و RQD به ترتیب در شکل ۳-۱۳ و شکل ۳-۱۴ آورده شده است. البته باید برای پارامتر درجه هوازدگی و وجود آب زیرزمینی نیز چنین نمودارهایی را تشکیل داد [۵].



شکل ۳-۱۲: شماتیکی از چگونگی تشکیل پروفیل کلاس زمین.

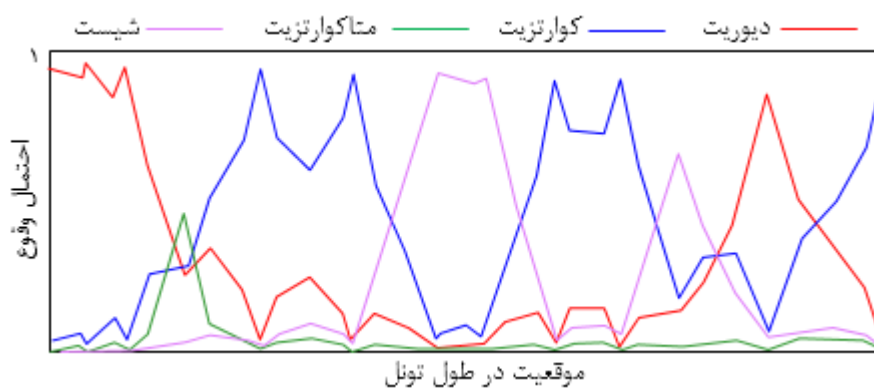
جدول ۲-۳: تعریف حالت‌های مربوط به چهار پارامتر زمین‌شناسی نوع سنگ، RQD، درجه هوازدگی و وجود آب [۵].

| پارامترهای زمین‌شناسی (N = ۴) | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------|-----------------|---------|--------------------------|------|------------------------------|-------|
| ۱. نوع سنگ X_1 | | ۲. RQD X_2 | | ۳. درجه هوازدگی X_3 | | ۴. وجود آب زیرزمینی X_4 | |
| i | حالت | i | حالت | i | حالت | i | حالت |
| ۱ | شیست | ۱ | ۷۵-۱۰۰٪ | ۱ | کم | ۱ | کم |
| ۲ | مٹاکوارتزیت | ۲ | ۲۵-۷۵٪ | ۲ | شدید | ۲ | متوسط |
| ۳ | دیوریت | ۳ | ۰-۲۵٪ | | | ۳ | زیاد |
| ۴ | کوارتزیت | | | | | | |
| $N_1 = 4$ | | $N_2 = 3$ | | $N_3 = 2$ | | $N_4 = 3$ | |

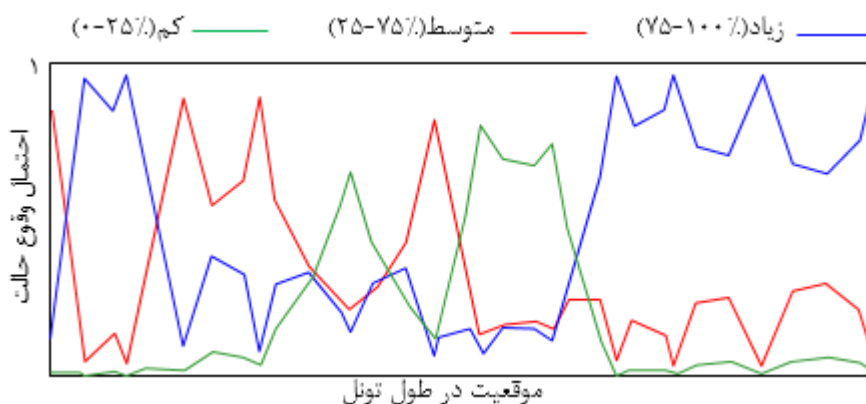
اجازه دهید $g(l)$ بردار پارامتر زمین‌شناسی در هر سلول l در طول تونل باشد [۱]:

$$g(l) = \{r(l), d(l), e(l), w(l), \dots\} \quad ۳۳-۳$$

که $r(l)$ ، $d(l)$ ، $e(l)$ و $w(l)$ ، به ترتیب حالت‌های نوع سنگ، RQD، درجه هوازدگی و وجود آب زیرزمینی می‌باشند. توجه داشته باشید که پارامتر وجود آب به جای پارامتر جریان آب می‌باشد زیرا جریان آب به داخل تونل نه تنها به شرایط زمین‌شناسی، بلکه به روش‌های حفاری و نگهداری نیز بستگی دارد. بنابراین، جریان آب یک پارامتر عملیاتی، و وجود آب یک پارامتر زمین‌شناسی است. حال با استفاده از $g(l)$ ، می‌توان کلاس زمین را معرفی کرد [۱۳].



شکل ۳-۱۳: نمودار تغییر حالت پارامتر نوع سنگ با چهار حالت شیست، دیوریت، کورتیزیت و متاکورتیزیت [۵].



شکل ۳-۱۴: نمودار تغییر حالت پارامتر RQD، با سه حالت کم، متوسط و زیاد [۵].

احتمال این‌که کلاس زمین در یک نقطه GC_1 باشد، به صورتی که در زیر نشان داده شده است

بیان می‌شود [۱]:

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

مطابق با طبقه‌بندی کلاس زمین، یک کلاس زمین شامل بردارهای زمین‌شناسی $g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{im}$ می‌باشد به‌گونه‌ای که [۱]:

$$g_{ij} = \{r_{ij}, d_{ij}, e_{ij}, w_{ij}, \dots\}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m$$

با توجه به حالت‌های چهار پارامتر در نظر گرفته‌شده، در این مثال $72 (= 4 \times 3 \times 2 \times 3)$ بردار زمین‌شناسی ممکن وجود دارد. در جدول ۳-۳، پنج کلاس زمین ($GC_1, GC_2, GC_3, GC_4, GC_5$) برای این مثال در نظر گرفته شده است. برای مثال می‌بینیم که کلاس GC_3 شامل دو بردار زمین‌شناسی زیر می‌باشد [۵]:

$$g_{11} = \{r_{11}, d_{11}, e_{11}, w_{11}, \dots\} = (4, 1, 1, 1), \quad g_{12} = \{r_{12}, d_{12}, e_{12}, w_{12}, \dots\} = (4, 1, 1, 2)$$

که در آن:

| | |
|---------|----------|
| $r = 4$ | کوارتزیت |
| $d = 1$ | زیاد |
| $e = 1$ | کم |
| $w = 1$ | متوسط |

پس احتمال اینکه در موقعیت l کلاس زمین GC_3 اتفاق بیفتد، عبارت است از [۵]:

$$\begin{aligned} P[g(l) \text{ belongs to } GC_3] &= P[g(l) = g_{11} \text{ or } g(l) = g_{12}] \\ &= P[g(l) = g_{11}] + P[g(l) = g_{12}] \\ &= P[r(l) = 4 \text{ and } d(l) = 1 \text{ and } e(l) = 1 \text{ and } w(l) = 1] \\ &\quad + P[r(l) = 4 \text{ and } d(l) = 1 \text{ and } e(l) = 1 \text{ and } w(l) = 2] \end{aligned}$$

با فرض مستقل بودن پارامترها از هم داریم:

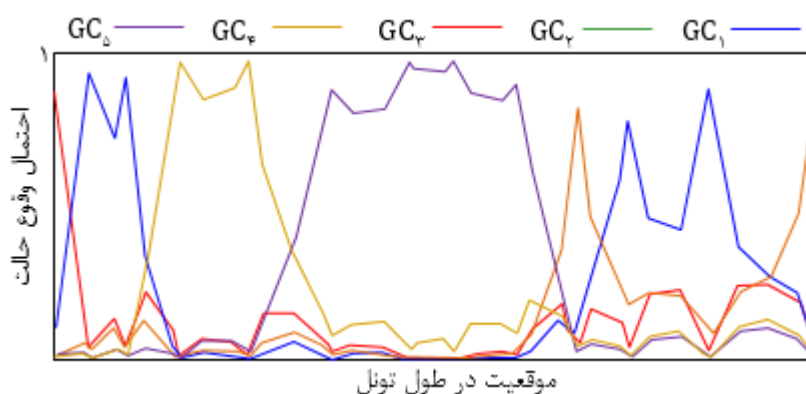
$$P[g(l) \text{ belongs to } GC_r] = P[r(l) = ۴] * P[d(l) = ۱] * P[e(l) = ۱] * P[w(l) = ۱] \\ + P[r(l) = ۴] * P[d(l) = ۱] * P[e(l) = ۱] * P[w(l) = ۲]$$

بنابراین با این روش می توان احتمال وقوع هر کدام از کلاس های زمین را در هر سلول در طول مسیر تونل محاسبه نمود. نمودار تغییر حالت نهایی کلاس زمین برای این مثال در شکل ۳-۱۵ نشان داده شده است.

جدول ۳-۳: پنج کلاس زمین شناسی برای مثال ارائه شده [۵].

| کلاس زمین | حالت های پارامتر زمین شناسی | | | |
|-----------|-----------------------------|--------------|-------|-----------|
| | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 |
| GC | | | | |
| GC_1 | ۱, ۲, ۳ | ۱ | ۱ | ۱, ۲ |
| GC_2 | ۴ | ۱ | ۱ | ۱, ۲ |
| GC_3 | ۱, ۲, ۳, ۴ | ۲ | ۱ | ۱, ۲ |
| GC_4 | ۱, ۲, ۳, ۴ ۱, ۲, ۳, ۴ | ۱, ۲, ۳ ۳ | ۱ | ۳ ۱, ۲ |
| GC_5 | ۱, ۲, ۳, ۴ | ۱, ۲, ۳ | ۲ | ۱, ۲, ۳ |

بعد از تشکیل نمودار تغییر حالت کلاس زمین، به کمک مدل ساخت می توان برای هر کلاس زمین، زمان و هزینه مورد انتظار را با تجربه از پروژه های قبلی و نظر افراد متخصص برآورد نموده و به پیش بینی زمان و هزینه کل تونل پرداخت که موضوع فصل بعدی می باشد.



شکل ۳-۱۵: نمودار تغییر حالت کلاس زمین برای مثال ارائه شده [۵].

۳-۹- خلاصه فصل

قبل از شروع به ساخت تونل، عدم قطعیت‌هایی در مورد پارامترهای زمین‌شناسی وجود دارد که باعث می‌شود در برنامه‌ریزی‌ها نتوان زمان و هزینه نهایی تونل را به‌طور مناسبی ارزیابی نمود. هر چه عدم قطعیت‌ها در مورد شرایط ناشناخته زمین در مسیر تونل کاهش یابد، می‌توان به نتایج دقیق‌تری در برنامه‌ریزی زمان و هزینه نهایی تونل دست یافت. از آنجایی که نمی‌توان به‌طور قطعی در مورد شرایط زمین‌شناسی مورد انتظار در مسیر تونل تصمیم‌گیری کرد، باید به‌طور احتمالاتی با استفاده از روش‌های آماری به بیان این شرایط پرداخت. داده‌هایی که می‌توان از آن‌ها در روش‌های آماری برای مدل پیش‌بینی استفاده کرد، داده‌های بدست‌آمده از حفاری مغزه، داده‌های ژئوفیزیکی، نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه، چاه نمودارها، داده‌های ژئوتکنیکی و سایر داده‌ها می‌باشد. با استفاده از این داده‌ها می‌توان ماتریس احتمال انتقال و ماتریس شدت انتقال را بدست آورد و به کمک مدل مارکوف به‌پیش‌بینی شرایط زمین‌شناسی در طول مسیر تونل پرداخت. مدل مارکوف دارای حافظه تک‌مرحله‌ای است به‌گونه‌ای که احتمال یک حالت در یک موقعیت معین را با استفاده از احتمال آن در موقعیت بلافاصله قبل از آن محاسبه می‌کند. همواره جهت پیش‌بینی حالت‌های یک پارامتر در مسیر موردنظر، باید احتمال وقوع آن حالت در شروع مسیر مشخص باشد. بعداً این که احتمال وقوع حالت‌های تمام پارامترهای موردنظر در مسیر تونل بدست آمد، می‌توان به کمک آن‌ها نمودار تغییر حالت مربوط به هر پارامتر و درنهایت از ترکیب این نمودارها، نمودار تغییر حالت کلاس زمین را بدست آورد. هدف مدل زمین‌شناسی، تشکیل نمودار تغییر حالت کلاس زمین است تا از آن بتوان در مدل ساخت جهت برآورد زمان و هزینه‌های هر کلاس در هر موقعیتی در طول تونل استفاده کرد. در فصل چهارم، مدل ساخت به‌صورت جزئی بیان خواهد شد.

فصل چهارم:

مدل ساخت

۴-۱- مقدمه

در پروژه‌های تونل سازی، اغلب به دلیل عدم قطعیت در مورد میزان زمان و هزینه مورد نیاز روش حفاری و سیستم نگهداری در نظر گرفته شده، پیش‌بینی زمان و هزینه نهایی بسیار مشکل خواهد بود و موجب می‌شود که در برنامه‌ریزی‌های اولیه نتوان به نتایج دقیقی در مورد آن دست یافت. مدل ساخت با در نظر گرفتن فرایند ساخت در طول تونل برای هر کلاس زمین، زمان و هزینه مورد انتظار را برآورد می‌کند. هر کلاس زمین دارای یک روش حفاری و سیستم نگهداری معینی است که در طول هر چرخه 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 چرخه از ساخت کلاس مورد نظر را با تجربه از پروژه‌های اجرا شده قبلی در شرایط مشابه و نظر افراد کارشناس برآورد نمود و از آن جهت پیش‌بینی زمان و هزینه نهایی ساخت تونل استفاده کرد.

با توجه به توضیحاتی که بیان شد، هدف این فصل، دستیابی به زمان و هزینه مورد نیاز هر کلاس زمین در هر چرخه حفاری و در نتیجه ارزیابی هزینه و زمان نهایی می‌باشد [۸].

۴-۲- چرخه (سیکل)

هر چرخه^۱ در طول تونل شامل تعداد فعالیت‌هایی است که در آن برای یک‌بار، فرایند ساخت (حفاری و نگهداری) در طول مشخصی به‌طور کامل انجام می‌شود.

۴-۳- شبکه فعالیت

یک شبکه فعالیت^۲ عبارت است از نمایش گرافیکی مجموعه‌ای از فعالیت‌های ساخت که به‌صورت کامل، ساخت بخش (سیکل) معینی از یک تونل را بیان می‌کند. هر شبکه فعالیت شامل سه جزء اصلی

^۱ Cycle

^۲ Activity Network

می باشد [۲۰] (شکل ۱-۴ و شکل ۲-۴):

۴-۳-۱- گره

هر فعالیت در شبکه با یک دایره نشان داده می شود که گره^۱ نام دارد [۱۸].

۴-۳-۲- خط جهت دار

ترتیب و توالی فعالیت ها در یک شبکه فعالیت با یک خط جهت دار نشان داده می شود. هر خط جهت دار بیان کننده شروع و پایان یک فعالیت مشخص می باشد که دارای زمان و هزینه معینی است [۱۸].

۴-۳-۳- خط چین جهت دار

خط چین جهت دار برای نشان دادن فعالیت هایی به کار می رود که هیچ زمان و هزینه ای در طول ساخت به آن ها تعلق نمی گیرد [۱۸].

به عنوان مثال در شبکه فعالیت نشان داده شده در شکل ۱-۴، دو فعالیت نقشه برداری^۲ و مشاهده^۳، شامل زمان و هزینه نمی باشند و همزمان با فعالیت باربرداری^۴ صورت گرفته اند.

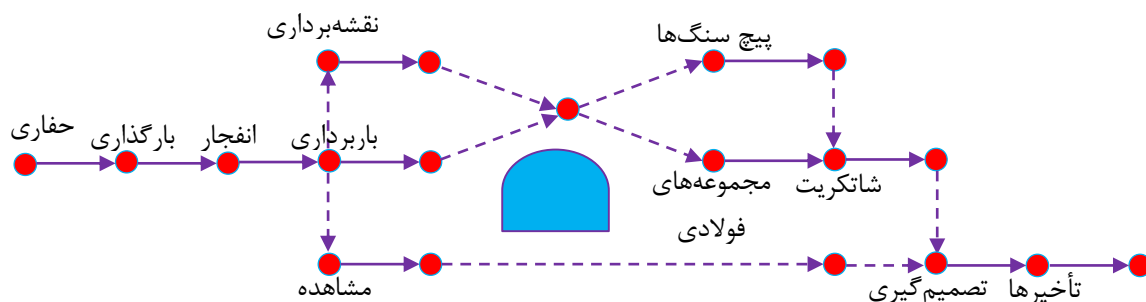
همان طور که در شکل ۱-۴ نشان داده شده، شبکه فعالیت مربوطه برای زمانی می باشد که کل مقطع تونل در یک مرحله حفاری شود. در صورتی که حفاری مقطع تونل در بیش تر از یک مرحله باشد (برای مثال حفاری تونل شکل ۲-۴ در دو مرحله (بخش ۱ و ۲) است)، برای هر مرحله باید یک شبکه فعالیت در نظر گرفته شود.

^۱ Node

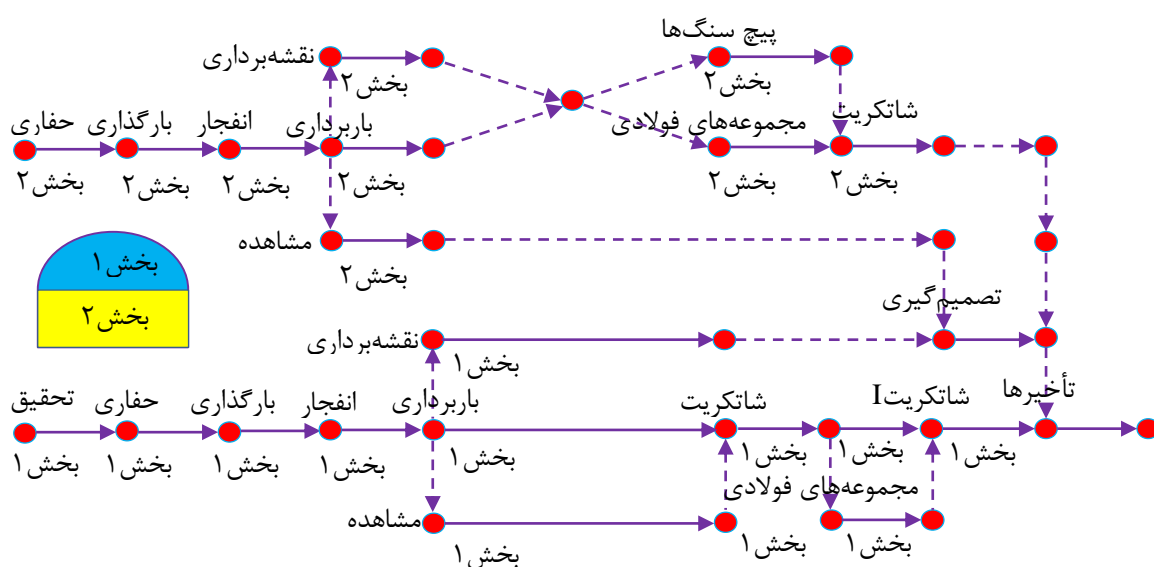
^۲ Mapping

^۳ Observation

^۴ Muck



شکل ۴-۱: شبکه فعالیت یک سیکل از تونل برای زمانی که کل مقطع تونل در یک مرحله حفاری شود.



شکل ۴-۲: شبکه فعالیت یک سیکل از تونل برای زمانی که مقطع تونل در دو مرحله مطابق شکل حفاری شود.

شبکه فعالیت فرایند ساخت برای یک کلاس زمین معین در طول کل تونل، از مجموع شبکه های فعالیت تمام چرخه های ساخت در طول تونل برای کلاس زمین مربوطه بدست می آید. بنابراین اگر هدف برآورد زمان و هزینه نهایی کل تونل برای فرایند ساخت یک کلاس زمین معین باشد، در این صورت زمان و هزینه مربوط به یک سیکل را بدست آورده و در تعداد سیکل های کلاس مربوطه ضرب می شود. به عنوان مثال اگر فرایند ساخت کل طول تونل برای کلاس زمین معینی مطابق شکل ۴-۳ در n سیکل به اتمام برسد، هزینه (C) یا زمان (t) مربوط به سیکل ۱ را با توجه به شبکه فعالیت مربوطه بدست آورده و در n ضرب می شود [۱۹].

| | | | |
|---|---|-----|---|
| ۱ | ۲ | ... | n |
|---|---|-----|---|

شکل ۳-۴: فرایند ساخت تونل در طول n چرخه.

$$c_T = c_1 \times n \quad 1-4$$

$$t_T = t_1 \times n \quad 2-4$$

که c_1 و t_1 به ترتیب هزینه و زمان مربوط به اولین چرخه از ساخت و همچنین c_T و t_T به ترتیب زمان و هزینه نهایی مربوط به فرایند ساخت در کل طول تونل می‌باشند.

تا اینجا شبکه‌های فعالیتی که تعریف شد تنها برای یک کلاس زمین معین بود. بدیهی است که در طول تونل کلاس‌های زمین متفاوتی می‌تواند بسته به شرایط زمین‌شناسی منطقه موردنظر، موجود باشد؛ در این صورت باید برای هر کدام از کلاس‌های زمین بدست‌آمده از مدل زمین‌شناسی، هزینه و زمان مربوط به هر سیکل بدست‌آید. در نهایت برای سیکل ساخت مربوط به هر کدام از کلاس‌های زمین، یک‌زمان و هزینه مشخص بدست می‌آید. بنابراین همچنان که در فصل قبلی، کلاس‌های زمین در طول تونل به صورت احتمالاتی بیان شدند، زمان و هزینه مربوط به هر کدام از سلول‌ها در طول تونل نیز با توجه به کلاس‌های زمین مختلف باید به صورت احتمالاتی بیان شود.

برای این‌که بتوان زمان و هزینه نهایی فرایند ساخت تونل را بدست آورد، باید برای هر کلاس زمین در هر سلول (تقسیم‌بندی مسیر تونل به قسمت‌های مساوی مطابق فصل قبلی)، زمان و هزینه را برآورد کرد. برای برآورد زمان و هزینه مربوط به هر کلاس زمین در هر سلول، ابتدا باید زمان و هزینه نهایی را برای هر کدام از کلاس‌های زمین با استفاده از سیکل ساخت و به کمک شبکه‌های فعالیت در طول تونل تخمین زد و سپس با تقسیم آن بر تعداد کل سلول‌ها در طول تونل، زمان و هزینه مربوط به هر سلول برای هر کلاس زمین معین بدست خواهد آمد. بنابراین در حالت کلی (زمانی که تمام کلاس‌های زمین در نظر گرفته شود)، زمان و هزینه مربوط به هر سلول عبارت است از زمان و هزینه مربوط به کلاس‌های زمین داخل آن سلول با احتمال بدست‌آمده برای آن در مدل زمین‌شناسی. به‌عنوان مثال

مطابق شکل ۴-۴ که در آن کل طول تونل به تعداد N سلول به طول برابر تقسیم شده است، باید زمان و هزینه نهایی برای هر کلاس زمین با استفاده از شبکه فعالیت در هر سیکل برای کل طول تونل به دست آید و سپس با تقسیم آن بر تعداد سلولها (N)، هزینه و زمان مربوط به هر کلاس زمین در هر سلول بدست خواهد آمد:

$$\begin{aligned} c_{GC_1} &= \frac{c_{T_1}}{N} & t_{GC_1} &= \frac{t_{T_1}}{N} & \text{کلاس ۱ (GC}_1\text{)} \\ c_{GC_2} &= \frac{c_{T_2}}{N} & t_{GC_2} &= \frac{t_{T_2}}{N} & \text{کلاس ۲ (GC}_2\text{)} \\ c_{GC_3} &= \frac{c_{T_3}}{N} & t_{GC_3} &= \frac{t_{T_3}}{N} & \text{کلاس ۳ (GC}_3\text{)} \end{aligned}$$

که در روابط بالا، N تعداد سلولها، c_{T_i} و t_{T_i} به ترتیب هزینه و زمان نهایی مربوط به کلاس زمین i و $c_{GC_{ij}}$ و $t_{GC_{ij}}$ ($i=1,2,3, j=1,2,\dots,n$) به ترتیب بیان کننده هزینه و زمان مربوط به کلاس i در سلول j می باشند.

حال اگر احتمال وقوع سه کلاس GC_1 ، GC_2 و GC_3 در سلول اول به ترتیب برابر p_1 ، p_2 و p_3 باشد ($p_1 + p_2 + p_3 = 1$)، آنگاه هزینه (c_{GC_1}) و زمان (t_{GC_1}) به ترتیب برای این سلول با احتمال p_1 برابر c_{GC_1} و t_{GC_1} ، با احتمال p_2 برابر c_{GC_2} و t_{GC_2} و با احتمال p_3 برابر c_{GC_3} و t_{GC_3} خواهد بود (شکل ۴-۵ و شکل ۴-۶).

| | | | |
|---------------------|---|-----|---|
| $P(c_{GC_1}) = p_1$ | | | |
| $P(c_{GC_2}) = p_2$ | ۲ | ... | N |
| $P(c_{GC_3}) = p_3$ | | | |

شکل ۴-۴: احتمال وقوع هزینه مربوط به هر کدام از کلاسهای زمین در سلول اول (برای کل سلولها در مدل زمین شناسی به این شکل احتمال وقوع هر کلاس زمین مشخص می گردد).

| | | | |
|---------------------------------|---|-----|---|
| $P(c_{GC_1}) = p_1 c_{GC_{11}}$ | ۲ | ... | N |
| $P(c_{GC_r}) = p_r c_{GC_{r1}}$ | | | |
| $P(c_{GC_r}) = p_r c_{GC_{r1}}$ | | | |

شکل ۴-۵: احتمال وقوع هزینه مربوط به هر کلاس زمین در سلول اول.

| | | | |
|---------------------------------|---|-----|---|
| $P(t_{GC_1}) = p_1 t_{GC_{11}}$ | ۲ | ... | N |
| $P(t_{GC_r}) = p_r t_{GC_{r1}}$ | | | |
| $P(t_{GC_r}) = p_r t_{GC_{r1}}$ | | | |

شکل ۴-۶: احتمال وقوع زمان مربوط به هر کلاس زمین در سلول اول.

بنابراین به این صورت زمان و هزینه مربوط به هر کلاس زمین به صورت احتمالاتی در هر سلول در طول تونل بدست می آید و در نهایت از مجموع آن‌ها می توان زمان و هزینه نهایی مربوط به فرایند ساخت کل طول تونل را به صورت احتمالاتی ارائه داد.

جهت دستیابی به زمان و هزینه نهایی ساخت تونل، با استفاده از روش مونت کارلو زمان و هزینه تمام سلول‌ها باهم جمع خواهند شد. در بخش بعدی روش شبیه سازی مونت کارلو بیان خواهد شد.

۴-۴- شبیه سازی مونت کارلو

تجزیه و تحلیل کمی ریسک نقش بسیار مهمی در ارزیابی ریسک و عدم قطعیت برای انجام تصمیم گیری‌ها بازی می کند. شبیه سازی مونت کارلو روشی قدرتمند و منعطف برای انجام این گونه تجزیه و تحلیل‌ها می باشد. این روش، به تحلیل گر این امکان را می دهد تا به کلیه اجزای عدم قطعی در مدل‌های ریاضی مسئله، یک توزیع احتمال تخصیص داده و سپس با استفاده از نمونه گیری تصادفی از این توزیع‌ها، توزیع کلیه خروجی‌های مختلف را که در نتیجه این عدم قطعیت‌ها رخ می دهد، شناسایی کند [۱۹].

۴-۴-۱- تاریخچه شبیه‌سازی مونت کارلو

نام شبیه‌سازی مونت کارلو از شهری به نام موناکو^۱ در جنوب فرانسه که قمار در آن از اهمیت زیادی برخوردار بوده، نشأت گرفته است. روش شبیه‌سازی مونت کارلو روشی بسیار ساده برای حل مسائل پیچیده می‌باشد. اولین استفاده مهم از شبیه‌سازی مونت کارلو، توسط برنده جایزه نوبل فیزیک، انریکو فرمی^۲ (پدر بمب اتم) در سال ۱۹۳۰ صورت گرفت. وی از این روش برای محاسبه مشخصات نوترون‌ها استفاده کرد. از این روش برای انجام شبیه‌سازی‌های موردنیاز در پروژه منهتن^۳ نیز استفاده شد. این پروژه مربوط به بمب هیدروژنی در سال ۱۹۵۰ می‌شد. امروزه از روش شبیه‌سازی مونت کارلو در زمینه‌های مختلفی نظیر مهندسی، فیزیک، تحقیق و توسعه، مالی و مدیریت پروژه استفاده می‌شود [۱۹].

امروزه با ظهور کامپیوترهای پیشرفته، انجام بسیاری از محاسبات پیچیده‌ای که تا پیش از این غیرممکن می‌نمود، میسر شده است. هم‌اکنون کامپیوترها این امکان را برای دانشمندان، مهندسان، آماردان‌ها و مدیران فراهم کرده‌اند تا به مدل‌سازی و شبیه‌سازی دنیای واقعی پرداخته و پیش‌بینی‌های لازم در خصوص نحوه عملکرد سیستم را در شرایط واقعی انجام دهند. با این کار، شرایط مختلفی که ممکن است در دنیای واقعی رخ دهد چندین و چند بار تکرار می‌شود. سپس نتایج این شبیه‌سازی تفسیر شده و برای تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش مونت کارلو بر این اساس کار می‌کند [۱۹].

در ساده‌ترین روش اجرای شبیه‌سازی مونت کارلو، از اعداد تصادفی برای انجام پیش‌بینی، تخمین و تجزیه و تحلیل ریسک استفاده می‌شود. در شبیه‌سازی مونت کارلو، سناریوهای مختلفی از یک مدل با انتخاب تصادفی مقادیری که دارای توزیع‌های از پیش تعریف شده هستند، تکرار می‌شود. هر یک از این مدل‌ها، وضعیتی از شرایط واقعی سیستم را شبیه‌سازی می‌کنند. بر اساس این مقادیر می‌توان پیش‌بینی

^۱ Monaco

^۲ Enrico Fermi

^۳ Manhattan Project

خوبی از احتمال دستیابی به شرایط خاص در دنیای واقعی را ارائه داد [۱۹].

۴-۴-۲- مدل‌سازی مونت کارلو

مدل‌سازی مونت کارلو برای تشریح ریاضی تأثیر ریسک و عدم قطعیت بر روی یک مسئله از مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی بهره می‌گیرد. در این روش هر عامل غیرقطعی توسط یک تابع توزیع احتمال بیان می‌شود. شکل و اندازه این توزیع، تعیین‌کننده مقادیری است که پارامترهای عدم قطعی با احتمال خاص می‌توانند اختیار کنند. سپس نرم‌افزار تجزیه و تحلیل ریسک مونت کارلو، به صورت تصادفی مقادیری را در توزیع احتمالی انتخاب کرده و این کار را صدها یا هزاران بار تکرار می‌کند. مقادیر محاسبه‌شده برای خروجی‌ها، برای هر تکرار (سناریو) ذخیره می‌شود. در انتهای فرایند شبیه‌سازی، مقادیر ثبت‌شده خروجی‌ها به منظور انجام ارزیابی عدم قطعیت خروجی‌های مدل، تجزیه و تحلیل می‌شود. نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو، توزیع احتمال این خروجی‌ها، آماره‌های توصیفی مرتبط و ارتباط بین عدم قطعیت ورودی‌ها و خروجی‌ها می‌باشد [۶].

در این مطالعه از نرم‌افزار Primavera Risk Analysis Ver. 8.7.0012 جهت انجام شبیه‌سازی‌های مونت کارلو استفاده شده است که در بخش بعدی توضیحاتی در مورد آن ذکر شده است.

۴-۴-۳- نرم‌افزار به کار گرفته‌شده جهت انجام شبیه‌سازی مونت کارلو

امروزه افزایش هزینه و پیچیدگی‌های موجود در پروژه‌ها از یک سو و افزایش عدم قطعیت و ریسک‌های موجود در محیط‌های تجاری از سوی دیگر باعث شده است که مدیران پروژه به منظور کاهش خطرپذیری و انحراف پروژه از اهداف تعیین‌شده، استفاده از مدیریت ریسک را در برنامه‌ریزی و کنترل پروژه‌ها، سرلوحه فعالیت‌های خود قرار دهند [۶].

نرم‌افزار Primavera Risk Analysis یکی از قدرتمندترین نرم‌افزارهای مدیریت پروژه می‌باشد که توسط شرکت Primavera توسعه داده شده است. این نرم‌افزار برای انجام آنالیز ریسک بر روی پروژه‌ها

از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌کند [۶].

در این نرم‌افزار علاوه بر قابلیت بهره‌گیری از ابزارهای مناسب جهت ورود ریسک و رتبه‌بندی آن در پروژه، امکان برنامه‌ریزی پروژه‌های PERT^۱ و GERT^۲ در شرایط عدم قطعیت نیز وجود دارد. این نرم‌افزار اطلاعات بسیار ارزشمندی از وضعیت پروژه در شرایط غیرقطعی در اختیار مدیران پروژه قرار می‌دهد تا به وسیله آن بتوانند تصمیم‌گیری‌های صحیح‌تری در مورد نحوه ادامه اجرای پروژه اتخاذ نمایند [۶].

علاوه بر این که این نرم‌افزار قابلیت برنامه‌ریزی کامل یک پروژه در شرایط قطعی یا غیرقطعی و اجرای آنالیز ریسک را دارد، از آن می‌توان به عنوان یک نرم‌افزار کمکی در کنار سایر نرم‌افزارهای مدیریت پروژه نظیر Primavera Risk Analysis یا Microsoft Office Project برای انجام آنالیز ریسک و انتقال اطلاعات بین آن‌ها استفاده کرد [۶].

در این مطالعه از نرم‌افزار Primavera Risk Analysis جهت برآورد زمان و هزینه نهایی پروژه ساخت تونل استفاده شده است. در بخش بعدی به طور مختصر توضیحاتی در مورد تفسیر نتایجی که در این مطالعه با استفاده از این نرم‌افزار بدست خواهد آمد، ارائه شده است.

۴-۴-۴- نمایش و تفسیر نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار Primavera Risk

Analysis

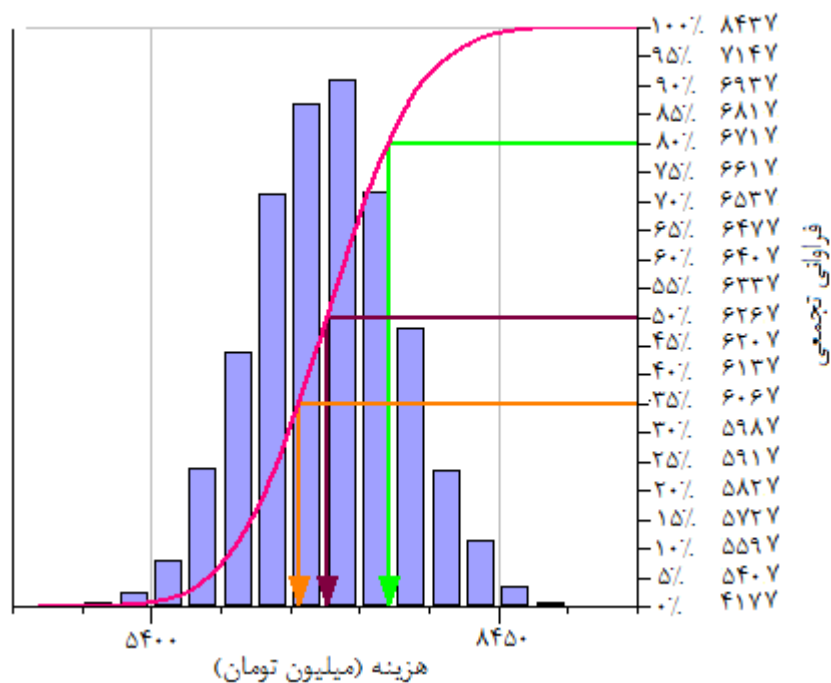
پس از مدل‌سازی مسئله و اجرای شبیه‌سازی بر روی آن، لازم است که نتایج شبیه‌سازی برای افراد تصمیم‌گیرنده به گونه‌ای ارائه گردد که به سادگی قابل فهم و استفاده باشد. خروجی‌های یک مدل شبیه‌سازی باید به گونه‌ای باشد که به خوبی بتواند به سؤالات مدنظر تصمیم‌گیران و مدیران پاسخ دهد. یکی از مفیدترین و پرکاربردترین ابزارهایی که در نتیجه شبیه‌سازی‌ها می‌تواند در اختیار کاربران قرار

^۱ Program Evaluation and Review Technique

^۲ Graphical Evaluation and Review Technique

گیرد، نمودارهای توزیع می‌باشد. با استفاده از این نمودارها می‌توان به سؤالاتی در مورد احتمال اتمام پروژه یا یک فعالیت در تاریخی خاص و یا با هزینه‌ای خاص پاسخ داد. همچنین می‌توان تعیین کرد که یک پروژه یا فعالیت با یک سطح اطمینان تعیین شده (صفر تا ۱۰۰٪)، تا چه تاریخ و با چه هزینه‌ای قابل انجام می‌باشد [۱۹].

با اجرای شبیه‌سازی مونت کارلو در نرم‌افزارهای مختلف می‌توان توزیع‌هایی از جمله توزیع تاریخ شروع و پایان، توزیع مدت‌زمان، توزیع هزینه و ... را نمایش داد. در شکل ۴-۷ یک نمونه نمودار ستونی که توزیع هزینه نهایی را نشان می‌دهد، ارائه شده است. به‌علاوه، نمودار تجمعی احتمال، ما را قادر می‌سازد تا احتمال دستیابی به مقادیر هدف موردنظر خود را به‌خوبی تعیین نماییم [۱۹]. برای مثال، شکل ۴-۸ نشان می‌دهد که با چه اطمینانی می‌توان پروژه را در تاریخ و هزینه مشخصی به پایان رساند.

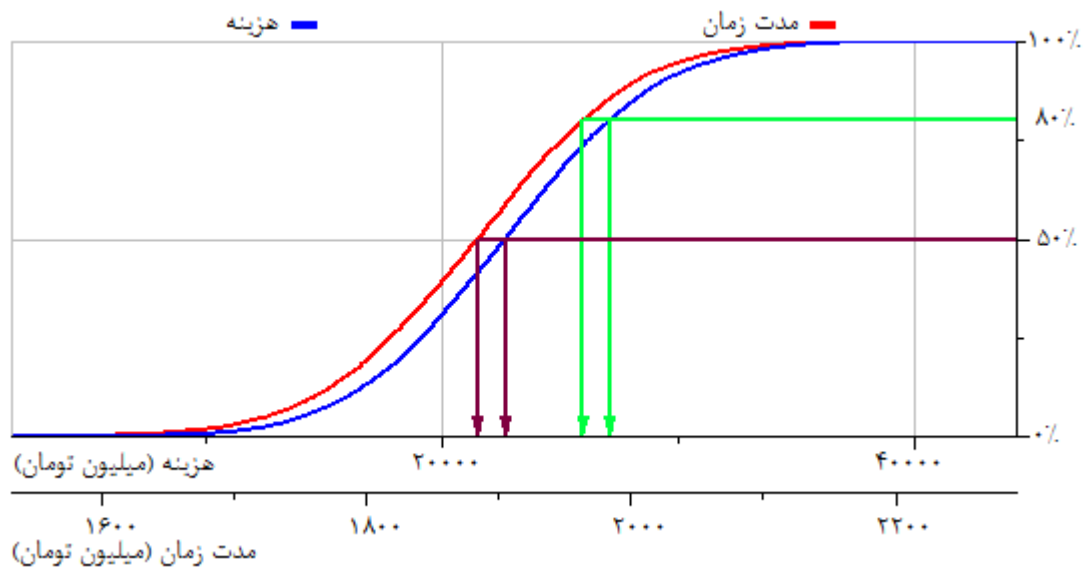


شکل ۴-۷: نمودار ستونی برای نمایش نحوه توزیع نتایج [۶].

برای بررسی ارتباط پیچیده بین دو جزء از مدل، می‌توان از نمودار پراکندگی استفاده کرد. همچنین می‌توان از این نمودار برای چک کردن این که آیا مدل نتایج واقعی ارائه می‌دهد یا نه، استفاده کرد. برای

مثال در شکل ۴-۹ ارتباط بین هزینه و زمان نهایی یک پروژه نشان داده شده است [۱۹].

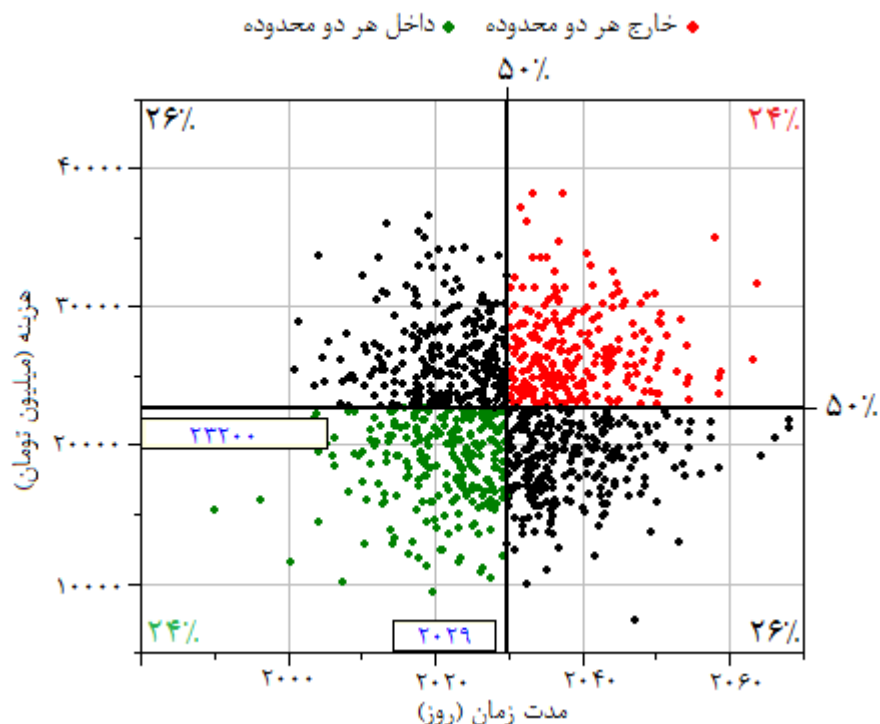
هر نقطه در نمودار پراکندگی، دو مقدار در یک تکرار از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. تعداد کل نقاط با تعداد تکرارهای انجام‌شده در تجزیه و تحلیل ریسک برابر است.



شکل ۴-۸: نمودار تجمعی برای نمایش احتمال دستیابی به مقادیر موردنظر [۶].

مطابق شکل ۴-۹، روی نمودار دو خط عمودی و افقی قرار گرفته‌اند که نمودار را به چهار قسمت تقسیم می‌کنند. این نشانگرها به خوبی نحوه تأثیرگذاری هزینه و زمان را بر روی یکدیگر و احتمال دستیابی به یک زمان و هزینه موردنظر در پروژه را نشان می‌دهند. درصد تکرارهای موجود در هر قسمت، در واقع احتمال قرار گرفتن پروژه در این قسمت‌ها را مشخص می‌کند. تکرارهای موجود در قسمت سمت چپ و پایین، نشان‌دهنده مقادیری کم‌تر از مقادیر انتخاب‌شده توسط هر دو نشانگر می‌باشد. لذا این نقاط نشان‌دهنده تکرارهای مطلوب بوده و با رنگ سبز نشان داده شده‌اند. همچنین، تکرارهای موجود در قسمت سمت راست و بالا، نشان‌دهنده مقادیری بیش‌تر از مقادیر انتخاب‌شده توسط هر دو نشانگر می‌باشند. لذا این نقاط نشان‌دهنده تکرارهای نامطلوب بوده و با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. مقادیری که در سمت چپ و بالا قرار گرفته‌اند، برای نشان‌گر مربوط به زمان، مطلوب و برای

نشان گر هزینه، نامطلوب می باشند و با رنگ مشکی نشان داده شده اند. همچنین مقادیری که در سمت راست و پایین قرار دارند، برای نشان گر هزینه، مطلوب و برای نشان گر زمان، نامطلوب می باشند [۶].



شکل ۴-۹: نمودار پراکندگی برای تعیین ارتباط بین دو متغیر [۶].

۴-۵- نتیجه گیری

در مدل ساخت با استفاده از نمودار تغییر حالت کلاس زمین می توان در هر کلاس زمین برای هر چرخه از ساخت، یک یا چند شبکه فعالیت بسته به این که مقطع عرضی تونل در یک یا چند بخش حفاری شود، بدست آورد. به کمک شبکه فعالیتی که توسط افراد کارشناس و با تجربه در نظر گرفته می شود، هزینه و زمان برای هر چرخه از فرایند ساخت بدست می آید و سپس با توجه به تعداد چرخه ها می توان زمان و هزینه نهایی را برای یک کلاس زمین معین در کل طول تونل بدست آورد. زمانی که چند کلاس زمین مختلف در طول تونل موجود باشد، در این صورت با توجه به نمودار تغییر حالت کلاس زمین که احتمال وقوع هر کلاس زمین را در هر کدام از سلول ها در طول مسیر تونل مشخص می سازد، می توان زمان و هزینه هر کلاس زمین را با احتمال مربوطه در هر کدام از سلول ها بدست آورد. در نهایت

با استفاده از مجموع زمان و هزینه‌های کلاس‌های مختلف زمین در تمام سلول‌ها، زمان و هزینه نهایی کل تونل به صورت احتمالاتی بدست خواهد آمد.

از آنجایی که هر کلاس زمین یک زمان و هزینه متفاوتی را دارد، بنابراین احتمال وقوع زمان و هزینه‌های مختلف در داخل هر بخش نیز موجود می‌باشد. سپس جهت دستیابی به زمان و هزینه نهایی ساخت تونل، با استفاده از روش مونت کارلو زمان و هزینه تمام بخش‌ها با هم جمع خواهند شد. روش مونت کارلو در هر بار شبیه‌سازی، برای هر بخش با توجه به احتمال وقوع کلاس زمین، یکی از زمان و هزینه‌ها را انتخاب می‌کند و هرکدام که احتمال وقوع بیش‌تری داشته باشد، در مجموع دوره‌های شبیه‌سازی، بیش‌تر تکرار خواهد شد. در نهایت نقاط زیادی در نمودار زمان-هزینه نشان داده می‌شود که هر نقطه مربوط به یک دور شبیه‌سازی می‌باشد و زمان و هزینه نهایی را به صورت احتمالاتی بیان می‌نماید.

در این فصل، مدل ساخت روش DAT به‌طور کامل همراه با روش شبیه‌سازی مونت کارلو جهت برآورد زمان و هزینه نهایی پروژه ارائه شد. با این توضیحاتی که از چند فصل قبلی تا اینجا بیان شد، می‌توان به کمک روش DAT زمان و هزینه نهایی ساخت تونل را قبل از شروع به ساخت تخمین زد. در فصل بعدی، از تونل جاده همرو به‌عنوان مطالعه موردی جهت ارزیابی زمان و هزینه نهایی ساخت استفاده شده است.

فصل پنجم:

برآورد زمان و هزینه نهایی ساخت تونل جاده همروبه

گام روش DAT

۵-۱- مقدمه

هدف این فصل، بررسی نتایج روش DAT در پیش بینی احتمالاتی زمان و هزینه ساخت کل تونل همرو (زمان و هزینه حفاری و نگهداری) به کمک داده های موجود قبل از شروع به ساخت تونل و مقایسه این نتایج با حالت واقعی (زمان و هزینه واقعی اجرای تونل) می باشد. در همین راستا، این فصل در دو قسمت اصلی تنظیم شده است.

در قسمت اول که مدل زمین شناسی روش DAT است، ابتدا به کمک مدل مارکوف که در نرم افزار MATLAB Ver. R2013a کدنویسی شده است، شرایط مسیر تونل برای پارامترهای در نظر گرفته شده بدست می آید و سپس از ترکیب شرایط بدست آمده برای هر کدام از پارامترها در مسیر تونل، شرایط زمین شناسی مورد انتظار به صورت احتمالاتی پیش بینی شده است. در مرحله بعد تعدادی از کلاس های زمین (هر کلاس زمین شامل روش حفاری و سیستم نگهداری مخصوص) در نظر گرفته می شود به گونه ای که در مجموع جوابگوی شرایط زمین شناسی پیش بینی شده در مسیر تونل باشند.

در قسمت دوم که مدل ساخت روش DAT است، ابتدا به هر کدام از کلاس های زمین در نظر گرفته شده در مدل زمین شناسی، زمان و هزینه مربوط به هر سیکل اجرای ساخت تونل اختصاص می یابد. سپس از مجموع زمان و هزینه های تمام موقعیت ها در مسیر تونل، زمان و هزینه کل ساخت تونل به کمک روش شبیه سازی مونت کارلو که در نرم افزار Primavera Risk Analysis اجرا می شود، به صورت احتمالاتی پیش بینی می شود. در نهایت به منظور اعتبار سنجی روش DAT جهت بکارگیری آن در پروژه های آتی، نتایج حاصل از آن با نتایج واقعی مقایسه می شود.

۵-۲- موقعیت جغرافیایی و راه های دسترسی به تونل همرو

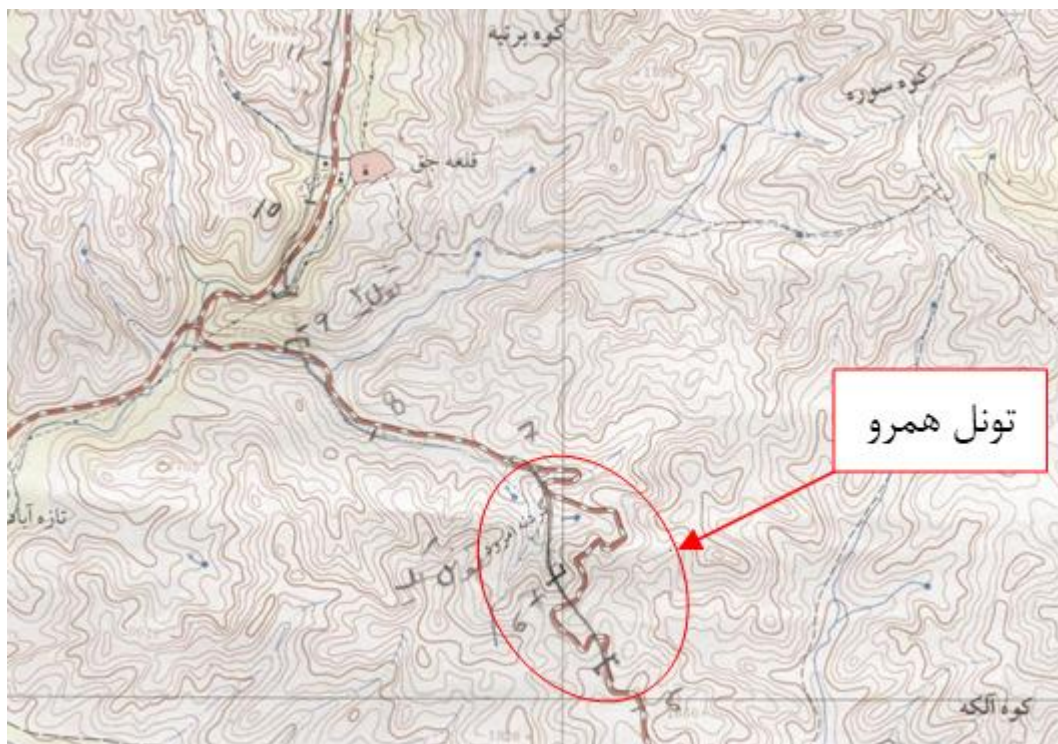
تونل همرو بخشی از جاده جدید در دست احداث سنندج - مریوان است که دارای طول حفاری ۱۳۱۰ متر می باشد. این تونل در مسیر جاده در حال احداث سنندج - مریوان در شرق استان کردستان،

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. دهانه ورودی و خروجی تونل مذکور به ترتیب در ۹۲۰ + ۴ و ۲۳۰ + ۶ قرار دارد [۲].

در شکل ۵-۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به این تونل نشان داده شده است. همچنین در شکل ۵-۲ موقعیت تقریبی آن بر روی نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ نشان داده شده است [۲]. برای دسترسی به این تونل می‌توان از جاده خاکی دسترسی به روستای تیزتیز که در امتداد جاده در حال احداث می‌باشد و از جاده آسفالتی موجود (جاده سنندج - مریوان) منشعب می‌شود، استفاده نمود. بعد از طی مسافتی در حدود ۵ تا ۶ کیلومتر در این جاده، تونل همرو قابل دسترسی خواهد بود [۲].



شکل ۵-۱: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به تونل همرو [۲].



شکل ۵-۲: موقعیت تقریبی تونل همرو در پلان ۱/۵۰۰۰۰ [۲].

در بکارگیری روش DAT برای تونل جاده همرو، در مراحل مختلفی از مدل زمین‌شناسی و مدل ساخت که در بخش‌های بعدی بیان شده است، به‌منظور دستیابی دقیق‌تر به داده‌های ورودی، نظرات افراد کارشناس تونل‌سازی از طریق پرسشنامه (مطابق پیوست الف) بکار گرفته شد که مشخصات مربوط به این افراد و نوع پرسشنامه‌ها در ادامه آورده شده است.

برای تکمیل پرسشنامه‌ها از نظرات ۱۰ نفر کارشناس مطلع و باتجربه در تونل‌سازی با در اختیار گذاشتن داده‌های اولیه موجود بهره گرفته شد. این افراد دارای تحصیلات کارشناسی ارشد به بالا در زمینه‌های مهندسی عمران، مهندسی مکانیک سنگ و مهندسی زمین‌شناسی باتجربه حداقل ۵ سال تجربه کاری تونل‌های جاده‌ای بودند.

پرسشنامه‌های تهیه‌شده حالت سؤالی داشتند. برای مثال به‌منظور دستیابی به ماتریس احتمال انتقال هر کدام از پارامترها، از افراد کارشناس سؤال شد، که پرسش‌ها عبارت بودند از:

با چه احتمالی انتقال از هر حالت یک پارامتر به حالت دیگر همان پارامتر صورت می‌گیرد؟

یا برای دستیابی به کلاس‌های زمین سؤال شد:

با توجه به تعداد شرایط زمین‌شناسی پیش‌بینی‌شده در این مطالعه، چند کلاس زمین پیشنهاد می‌دهید که مجموعاً جوابگوی تمامی این شرایط باشند؟ مشخصات کلاس‌های زمین را بیان فرمائید.

همچنین برای دستیابی به زمان و هزینه هر سیکل از اجرای تونل سؤال شد:

به هر کدام از کلاس‌های زمین چه زمان و هزینه‌ای را برای هر سیکل از ساخت با توجه به داده‌های

موجود در مورد تونل و تجربه پروژه‌های اجراشده قبلی در شرایط مشابه پیشنهاد می‌دهید؟

بنابراین در هر مرحله، میانگین نظرات افراد کارشناس تونل سازی که از طریق پرسشنامه بدست آمد

به‌عنوان داده‌های ورودی مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۵- مدل زمین‌شناسی تونل همرو

۳-۵-۱- اطلاعات اولیه زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی تونل همرو

منطقه مورد مطالعه مربوط به زون سنندج - سیرجان بوده و گسترده‌ترین واحد چینه‌شناسی تفکیک‌شده 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 منطقه مورد مطالعه رخنمون دارند می‌توان به واحد چینه‌شناسی مربوط به کرتاسه بالایی - پالئوسن اشاره کرد که از نظر لیتولوژی شامل شیل خاکستری و قرمز رنگ، آهک با رنگ‌های خاکستری، زرد و قرمز و هم‌چنین لایه‌های ماسه‌سنگ می‌شود. هم‌چنین می‌توان به رخنمون‌های پراکنده‌ای از واحد سنگ - چینه‌ای در بخش‌های شمالی منطقه در نزدیکی روستای قلعه شیخان اشاره نمود که از نظر لیتولوژیکی از آهک‌های ماسه‌ای نومولیت

دار تشکیل شده‌اند [۲].

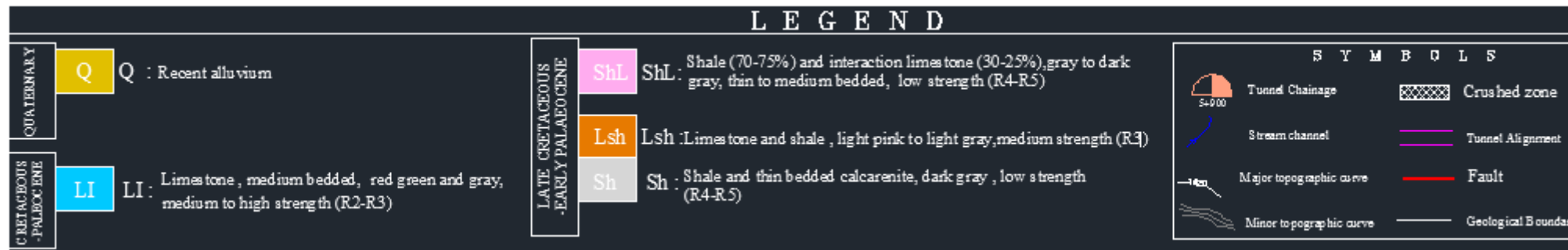
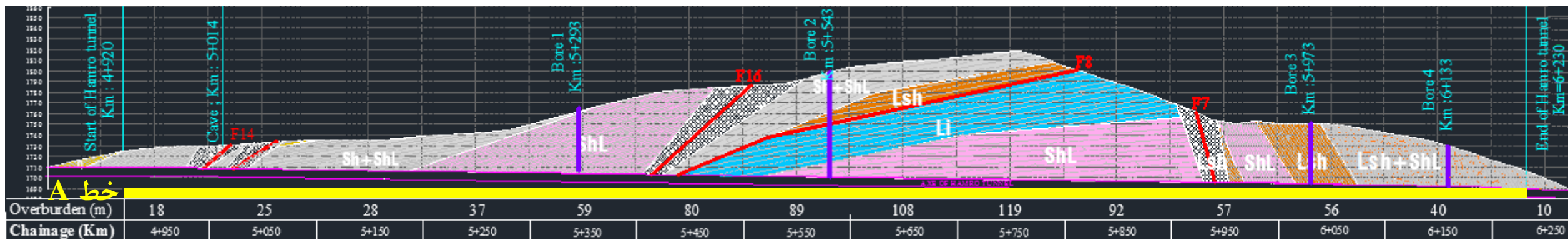
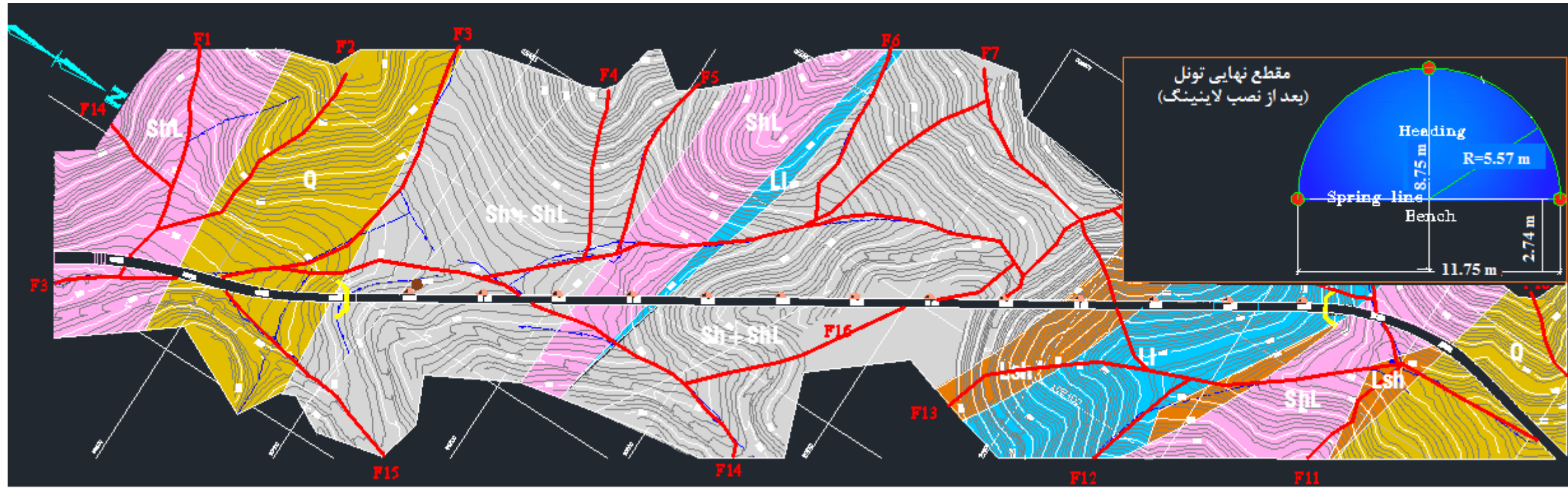
بر اساس بررسی‌های انجام‌شده در بازدیدهای زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی صورت گرفته از منطقه، در مجموع چهار گونه زمین‌شناسی مهندسی در مسیر تونل قابل‌شناسایی و تفکیک از یکدیگر می‌باشند. این گونه‌های زمین‌شناسی مهندسی عبارت‌اند از آهک^۱ (Li)، شیل^۲ (SH)، تناوب شیل‌های ماسه‌ای و آهک‌های شیلی^۳ (SHL) و تناوب آهک و شیل (LSH) [۲].

در شکل ۳-۵ پروفیل طولی و در شکل ۴-۵ اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مسیر تونل همرو نشان داده شده است.

^۱ Limestone

^۲ Shale

^۳ Shale and interaction Limestone



شکل ۵-۳: پروفیل طولی تونل همرو [۲۴].

| Overburden (m) | | 18 | 25 | 28 | 37 | 59 |
|-----------------------------|--------------------------|---------|--------------------|-------|-------|----------------|
| SURVEY & CONSTRUCTION PHASE | Chainage (Km) | 4+950 | 5+050 | 5+150 | 5+250 | 5+350 |
| | Lithology of units | | Sh + ShL | | | ShL |
| | Dip Direction/Dip | | 65-70/150-160 | | | 70-75/120-130 |
| | BRMR (TRMR) | | 20-25 (15-20) | | | 30-35 (25-30) |
| | CLASS | | Very poor rock (V) | | | Poor rock (IV) |
| | Q-SYSTEM | | 0.004 - 0.01 | | | 0.03-0.08 |
| | CLASS | | Exceptionally poor | | | Extremely poor |
| | GSI | | 25-32 | | | 30-35 |
| | %RQD | | 5-25 | | | 5-25 |
| | C (KPa) | | 94-150 | | | 91-163 |
| | ϕ (deg) | | 37-44 | | | 35-42 |
| | E (Gpa) | | 1.3-1.4 | | | 1.3-1.4 |
| | μ_s | | 0.75-0.96 | | | 0.7-0.9 |
| Water Condition | | 300 m | | 320 m | | |
| Rock mass types | VERY UNCOMPACT ROCKS | 350 m | | | | |
| | UNCOMPACT ROCKS | | | | | |
| | COMPACT ROCKS | | | | | |
| | TYPE OF ROCK MASS BLOCKS | BLOCK C | | | | |

ادامه

| 80 | 89 | 108 | 119 | 92 | 57 | 56 | 40 |
|-----------------------------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|----------------|----------------|
| 5+450 | 5+550 | 5+650 | 5+750 | 5+850 | 5+950 | 6+050 | 6+150 |
| LI | | ShL | | | Lsh+ShL | | Lsh |
| 50-65/175-210 | | 50-55/160-170 | | | 50-55/160-170 | 70-80/135-150 | 65-70/120-130 |
| 40-45 (35-40) | | < 20 | | | < 20 | 30-40 (25-35) | < 20 |
| Poor rock to fair (IV, III) | | Very Poor rock (V) | | | Very Poor rock (V) | Poor rock (IV) | Poor rock (IV) |
| 0.21-0.56 | | 0.001-0.01 | | | 0.001-0.01 | 0.1-1 | 0.001-0.01 |
| Very poor | | Exceptionally poor | | | Exceptionally poor | Very poor | Extremely poor |
| 30-35 | | 15-20 | | | 15-20 | 25-32 < 20 | 15-25 |
| 25-50 | | ~0 | | | 25-50 | 5-25 | 5-25 |
| 416-428 | | 157-176 | | | 157-176 | 94-150 | 70-50 |
| 45-47 | | 27-29 | | | 27-29 | 37-44 | 45-50 |
| 2.5-2.6 | | 0.7-0.8 | | | 0.7-0.8 | 1.3-1.4 | 0.8-0.9 |
| 1-1.07 | | 1-2 | | | 2-3 | 0.75-0.96 | 1-1.91 |
| | | 380 m | | | 312 m | | |
| | 588 m | | | | | | |
| | | | | 100 m | 39 m | 39 m | 128 m |
| | | | | | 37 m | | |
| | | | | | BLOCK B | BLOCK C | BLOCK C |
| | | | | | BLOCK B | BLOCK C | BLOCK B |
| | | | | | BLOCK C | BLOCK C | BLOCK C |

Water Condition: High Medium Low

| Block | RQD | BRMR | TRMR | Class | GSI | Q-Sys | Class | C(Kpa) | ϕ (Deg) | E(Gpa) | μ_s |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|-----------------|---------|--------------|---------|-----------|
| B | 25-50 | 25-45 | 21-40 | IV | 25-25 | 0.1-1 | خیلی ضعیف | 200-400 | 25-45 | 0.8-0.9 | 0.7-1 |
| C | <25 | <25 | <20 | V | 15-20 | 0.01-0.1 | فوق العاده ضعیف | 75-150 | 25-22 | 0.6-0.8 | 0.46-0.62 |

شکل ۴-۵: اطلاعات زمین شناسی و ژئوتکنیکی مسیر تونل همرو [۲۴].

۵-۳-۲- پارامترهای در نظر گرفته شده در مدل زمین شناسی تونل همرو

از جمله مهم ترین پارامترهایی که بر روی تونل زنی اثر می گذارند، عبارت اند از: نوع سنگ، RQD، جهت درزه داری، ترک های اصلی، جریان آب، سختی، مقاومت فشاری و شیب استوژیته [۴]. در این مطالعه، از میان پارامترهای فوق سه پارامتر نوع سنگ، RQD و آب زیرزمینی در نظر گرفته شد. دلیل استفاده نکردن از تعداد پارامترهای بیش تر این بود که یا داده های مربوط به سایر پارامترها در موقعیت گمانه ها موجود نبودند و یا این که بیش تر بر مبنای داده سازی بودند. پس بنا به پیشنهاد مهندسین شرکت گمانه کاو که تعداد چهار گمانه را در مسیر تونل همرو حفاری کرده بودند و همچنین مهندسین طراح این تونل، پارامترهایی که نسبت به سایر پارامترها با دقت بیشتری بر روی آن ها کار شده بود، سه پارامتر نوع سنگ، RQD و آب زیرزمینی بود. همچنین به کمک پروفیل زمین شناسی موجود در مسیر تونل و داده های حاصل از گمانه ها، حالت های مختلفی از این پارامترها در مسیر تونل بدست آمدند به طوری که برای پارامترهای نوع سنگ، RQD و آب زیرزمینی به ترتیب چهار، سه و سه حالت همان طور که در ادامه بیان شده اند، در نظر گرفته شد.

۱- پارامتر نوع سنگ با چهار حالت (حالت ۱: آهک^۱ (Li)، حالت ۲: شیل^۲ (Sh)، حالت ۳: تناوب

شیل های ماسه ای و آهک های شیلی^۳ (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)

در بخش های بعدی، داده های مورد نیاز در مورد این پارامترها و حالت های آن ها جهت تشکیل نمودار تغییر حالت پارامتر، بدست خواهد آمد. لازم به ذکر است که در مراحل مختلفی از مدل

^۱ Limestone

^۲ Shale

^۳ Shale and interaction Limestone

زمین‌شناسی و مدل ساخت به‌منظور دستیابی دقیق‌تر به داده‌های ورودی، نظرات افراد کارشناس تونل سازی از طریق پرسشنامه بکار گرفته شده است که مشخصات مربوط به این افراد و نوع پرسشنامه‌ها در ادامه آورده شده است.

پرسشنامه‌های تهیه‌شده مطابق پیوست (الف) سؤالی دارند. برای مثال به‌منظور دستیابی به ماتریس احتمال انتقال هرکدام از پارامترها، از افراد کارشناس سؤال شده که:

با چه احتمالی انتقال از هر حالت یک پارامتر به حالت دیگر همان پارامتر صورت می‌گیرد؟

یا برای دستیابی به کلاس‌های زمین:

با توجه به تعداد شرایط زمین‌شناسی پیش‌بینی‌شده در این مطالعه، چند کلاس زمین پیشنهاد می‌دهید که مجموعاً جوابگوی تمامی این شرایط باشند؟ مشخصات کلاس‌های زمین را بیان فرمایید.

همچنین برای دستیابی به زمان و هزینه هر سیکل از اجرای تونل:

به هرکدام از کلاس‌های زمین چه زمان و هزینه‌ای را برای هر سیکل از ساخت با توجه به داده‌های موجود در مورد تونل و تجربه پروژه‌های اجراشده قبلی در شرایط مشابه پیشنهاد می‌دهید؟

بنابراین در هر مرحله، میانگین نظرات افراد کارشناس تونل سازی که از طریق پرسشنامه بدست آمد به‌عنوان داده‌های ورودی مورد استفاده قرار گرفت.

۵-۳-۳- ماتریس احتمال انتقال

در مدل مارکوف برای نشان دادن احتمال انتقال از یک حالت i به حالت دیگر j ، از ماتریسی به نام ماتریس احتمال انتقال استفاده می‌شود که در این مطالعه با P نمایش داده شده است. ابتدا برای هرکدام از پارامترها، یک ماتریس انتقال p از مرتبه n بدست آمد که n تعداد حالت‌های آن پارامتر است. بعداً آنکه ماتریس p بدست آمد، هرکدام از درایه‌های سطرهای آن بر مجموع درایه‌های همان

سطر (فرمول ۱-۵) تقسیم شد و منجر به تشکیل ماتریس احتمال انتقال P گردید.

$$p_{ij} = \frac{T_{ij}}{\sum_{k=1}^n T_{ik}} \quad 1-5$$

در این فرمول، p_{ij} بیانگر احتمال انتقال از حالت i به حالت j، T_{ij} تعداد انتقالها از حالت i به

حالت j و $\sum_{k=1}^n T_{ik}$ مجموع انتقالها از حالت i به سایر حالت‌های پارامتر مربوطه است (n تعداد کل حالت‌های پارامتر موردنظر).

دو روش فراوانی و قضاوت برای بدست آوردن ماتریس احتمال انتقال وجود دارد. در ادامه، ابتدا روش فراوانی بکار برده شده و از آنجایی که شرط استفاده از این روش برقرار نبود، روش قضاوت مورد استفاده قرار گرفت. دلیل این که از همان ابتدای کار از روش قضاوت استفاده نشد، این بود که در صورت مهیا بودن شرط بکارگیری روش فراوانی، دیگر نیازی به نظر افراد کارشناس و صرف زمان دنبال این نظرات و تهیه پرسشنامه‌ها نبود.

الف- روش فراوانی: شرط استفاده از روش فراوانی این است که تعداد انتقال‌هایی که از حالتی i به حالت دیگر j یک پارامتر بدست می‌آید نباید کمتر از $(n-1) \cdot 10$ (n تعداد کل حالت‌های پارامتر موردنظر) باشد. بنابراین شرط استفاده از روش فراوانی به منظور دستیابی به بهترین تخمین ماتریس احتمال انتقال باید به صورت فرمول ۲-۵ باشد:

$$p_{x_{i1}} + p_{x_{i2}} + \dots + p_{x_{in}} \geq 10 \cdot (n-1) \quad 2-5$$

پس با این شرط، هیچ کدام از درایه‌های ماتریس انتقال بجز درایه‌های روی قطر اصلی برابر صفر نخواهد شد؛ یعنی همواره باید در هر موقعیتی یک احتمالی از یک حالت به حالت‌های دیگر پارامتر موردنظر موجود باشد.

بهترین داده‌ها برای استفاده در روش فراوانی، داده‌های مربوط به منطقه موردنظر و در راستای مسیر تونل هستند. بنابراین در این مطالعه، در پروفیل زمین‌شناسی تونل، خطی (خط A) در راستای مسیر تونل مطابق شکل ۳-۵ در نظر گرفته شد. با توجه به این خط بایستی مطابق فرمول ۲-۵، برای هر کدام از پارامترها شرایط زیر برقرار باشد تا بتوان روش فراوانی را در مورد آن‌ها به کار برد.

پارامتر نوع سنگ: $30 = (4-1) \times 10 \geq$ تعداد انتقال‌ها از یک حالت به سایر حالت‌ها

پارامتر RQD: $20 = (3-1) \times 10 \geq$ تعداد انتقال‌ها از یک حالت به سایر حالت‌ها

پارامتر آب زیرزمینی: $20 = (3-1) \times 10 \geq$ تعداد انتقال‌ها از یک حالت به سایر حالت‌ها

با توجه به شکل ۳-۵ و شکل ۴-۵، هیچ‌کدام از شرایط بالا برقرار نبود زیرا باید برای هر کدام از پارامترهای نوع سنگ، RQD و آب زیرزمینی، به ترتیب حداقل ۳۰، ۲۰ و ۲۰ انتقال از هر حالت به سایر حالت‌ها در مسیر خط در نظر گرفته شده موجود باشد که نه تنها چنین چیزی برقرار نبود، بلکه تعداد انتقال‌ها در مسیر این خط از یک حالت به سایر حالت‌ها بسیار کم‌تر از این مقادیر بود. بنابراین در تخمین ماتریس احتمال انتقال از روش قضاوت به کمک افراد باتجربه بهره گرفته شد که در ادامه توضیح داده شده است.

ب- روش قضاوت: در این روش از دانش کارشناسان که آشنا با زمین‌شناسی ناحیه تونل بودند (تعداد ۱۰ نفر)، بهره گرفته شد. روش کار به شیوه‌ای بود که مطابق پیوست (الف)، احتمال انتقال میان حالت‌های هر پارامتر از افراد کارشناس با در اختیار دادن پروفیل طولی تونل، سؤال شد و در نهایت از میانگین‌گیری نظر آن‌ها، ماتریس‌های احتمال انتقال برای هر پارامتر به صورتی که در ادامه آورده شده‌اند، بدست آمد. چون مجموع درایه‌های هر سطر از ماتریس احتمال انتقال باید برابر ۱ باشد، بنابراین در هر سطر درایه‌ها باهم جمع شدند و هر درایه آن سطر بر مجموع درایه‌های خود همان سطر تقسیم شد. هر درایه از ماتریس‌های احتمال، بیان‌کننده احتمال انتقال از یک حالت (حالت‌هایی که در سمت

چپ ماتریس نشان داده شده اند) به حالت دیگر (حالت هایی که در سمت بالای ماتریس نشان داده شده اند) می باشد. برای مثال در ماتریس احتمال انتقال پارامتر نوع سنگ که در ادامه آورده شده است، درایه دوم از سطر اول که برابر ۰/۲۴ می باشد بیان کننده احتمال انتقال از حالت ۱ به حالت ۲ است.

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

ماتریس احتمال انتقال پارامتر نوع سنگ

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

ماتریس احتمال انتقال پارامتر RQD

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

ماتریس احتمال انتقال پارامتر آب زیرزمینی

بعد از تشکیل ماتریس احتمال انتقال با یکی از روش های بیان شده، نوبت به ماتریسی می رسد که ماتریس شدت انتقال نام دارد و در بخش بعدی به صورت کامل توصیف می شود.

۵-۳-۴- ماتریس شدت انتقال

پس از تشکیل ماتریس احتمال انتقال در بخش قبلی، نوبت به تشکیل ماتریسی تحت عنوان ماتریس شدت انتقال رسید که جهت پیش بینی حالت های یک پارامتر در نقاط بعدی لازم بود. در ادامه چگونگی دستیابی به این ماتریس بیان شده است.

در این مطالعه، ماتریس شدت انتقال پارامتر X با A_X نمایش داده شده و فرمول محاسبه آن برای

هرکدام از پارامترهای نوع سنگ (r)، RQD (d) و آب زیرزمینی (w) در ادامه آورده شده است:

$$A_r = \begin{bmatrix} -C_{r_1} & C_{r_1}P_{r_{12}} & C_{r_1}P_{r_{13}} & C_{r_1}P_{r_{14}} \\ C_{r_2}P_{r_{21}} & -C_{r_2} & C_{r_2}P_{r_{23}} & C_{r_2}P_{r_{24}} \\ C_{r_3}P_{r_{31}} & C_{r_3}P_{r_{32}} & -C_{r_3} & C_{r_3}P_{r_{34}} \\ C_{r_4}P_{r_{41}} & C_{r_4}P_{r_{42}} & C_{r_4}P_{r_{43}} & -C_{r_4} \end{bmatrix} \quad \text{ماتریس شدت انتقال پارامتر نوع سنگ}$$

$$A_d = \begin{bmatrix} -C_{d_1} & C_{d_1}P_{d_{12}} & C_{d_1}P_{d_{13}} \\ C_{d_2}P_{d_{21}} & -C_{d_2} & C_{d_2}P_{d_{23}} \\ C_{d_3}P_{d_{31}} & C_{d_3}P_{d_{32}} & -C_{d_3} \end{bmatrix} \quad \text{ماتریس شدت انتقال پارامتر RQD}$$

$$A_w = \begin{bmatrix} -C_{w_1} & C_{w_1}P_{w_{12}} & C_{w_1}P_{w_{13}} \\ C_{w_2}P_{w_{21}} & -C_{w_2} & C_{w_2}P_{w_{23}} \\ C_{w_3}P_{w_{31}} & C_{w_3}P_{w_{32}} & -C_{w_3} \end{bmatrix} \quad \text{ماتریس شدت انتقال پارامتر آب زیرزمینی}$$

مشاهده می‌شود که ماتریس A_X از دو جزء C_{X_i} و $P_{X_{ij}}$ تشکیل شده است؛ که C_{X_i} ضریب شدت

انتقال حالت i و $P_{X_{ij}}$ احتمال انتقال از حالت i به حالت j پارامتر X می‌باشد. n تعداد حالت‌های پارامتر

X است. ضریب شدت انتقال حالت i (C_{X_i})، عبارت است از معکوس وسعت (طول) مورد انتظار حالت

i (H_{X_i}) در طول مسیر تونل، یعنی:

$$\text{ضریب شدت انتقال حالت } i = \frac{1}{\text{طول میانگین حالت } i}$$

بنابراین برای بدست آوردن ضریب شدت انتقال حالت i از پارامتر X (C_{X_i})، نیاز به وسعت حالت

i این پارامتر (H_{X_i}) در طول تونل است. در این مطالعه برای بدست آوردن H_{X_i} نیز مانند $P_{X_{ij}}$ که در

بخش قبلی بیان شد، دو روش فراوانی و روش قضاوت موردبررسی قرار گرفتند که در ادامه بیان شده‌اند.

الف- روش فراوانی: همانند روش فراوانی که برای محاسبه $P_{X_{ij}}$ در بخش قبلی بیان شد، در اینجا هم

برای هرکدام از سه پارامتر زمین‌شناسی با استفاده از خط در نظر گرفته‌شده در مسیر تونل (خط A در

شکل ۵-۳)، نمودار تغییر حالت تغییر حالت پارامترها مورد بررسی قرار گرفت.

شرط استفاده از روش فراوانی برای برآورد وسعت حالت‌های یک پارامتر، این است که در نمودار تغییر حالت تغییر حالت هر پارامتر در مسیر در نظر گرفته شده (در این مطالعه خط A)، حداقل ۱۰ طول برای هر حالت در موقعیت‌های متفاوتی موجود باشد. به دلیل ارضا نمودن این شرط، ارزیابی وسعت حالت‌های این پارامترها با استفاده از روش فراوانی صورت نگرفت و در نتیجه روش قضاوت بکار گرفته شد.

ب- روش قضاوت: در این روش به منظور برآورد وسعت‌های هر کدام از حالت‌های پارامترها، از دانش کارشناسان (قضاوت) که آشنا با زمین‌شناسی ناحیه تونل بودند، استفاده شد. برای این کار، پرسشنامه‌هایی مطابق پیوست (الف) همراه با داده‌های مربوط به پارامترها در مسیر خط A (شکل ۵-۳) در اختیار چند فرد کارشناس (۱۰ نفر) در این زمینه قرار داده شد و از هر کدام میزان حداقل، متوسط و حداکثر وسعت هر حالت این پارامترها سؤال شد و در نهایت از میانگین جواب‌های حاصل از این پرسشنامه‌ها استفاده شد و جدولی به شکل جدول ۵-۱ بدست آمد. در این جدول، برای هر حالت با توجه به وسعت میانگین بدست آمده برای آن، ضریب شدت انتقال نیز محاسبه شده است. سپس به کمک این جدول ماتریس شدت انتقال برای هر کدام از پارامترها به صورتی که در ادامه آورده شده است، بدست آمد.

جدول ۵-۱: 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 | آهک (Li) | ۳۲۰ | ۰/۰۰۳۱ |
| | شیل (SH) | ۱۲۰ | ۰/۰۰۸۳ |
| | تناوب شیل های ماسه‌ای و آهک‌های شیلی (SHL) | ۷۸۰ | ۰/۰۰۱۲ |
| | تناوب آهک و شیل (LSH) | ۹۰ | ۰/۰۱۱۱ |
| RQD | کمتر از ۵ | ۲۸۰ | ۰/۰۰۳۵ |
| | ۵ تا ۲۵ | ۶۵۰ | ۰/۰۰۱۵ |

| | | | |
|-------------|----------|-----|--------|
| | ۲۵ تا ۵۰ | ۳۸۰ | ۰/۰۰۲۶ |
| آب زیرزمینی | کم | ۶۲۰ | ۰/۰۰۱۶ |
| | متوسط | ۲۶۰ | ۰/۰۰۳۸ |
| | زیاد | ۴۳۰ | ۰/۰۰۲۳ |

$$A_r = \begin{matrix} & \begin{matrix} ۱ & ۲ & ۳ & ۴ \end{matrix} \\ \begin{matrix} ۱ \\ ۲ \\ ۳ \\ ۴ \end{matrix} & \begin{bmatrix} -۰/۰۰۳۱ & ۰/۰۰۰۷ & ۰/۰۰۲۲ & ۰/۰۰۰۲ \\ ۰/۰۰۳۹ & -۰/۰۰۸۳ & ۰/۰۰۳۹ & ۰/۰۰۰۵ \\ ۰/۰۰۰۳ & ۰/۰۰۰۳ & -۰/۰۰۱۲ & ۰/۰۰۰۶ \\ ۰/۰۰۰۱۵ & ۰/۰۰۰۱۵ & ۰/۰۱۰۸ & -۰/۰۱۱۱ \end{bmatrix} \end{matrix}$$

ماتریس شدت انتقال پارامتر نوع سنگ

$$A_d = \begin{matrix} & \begin{matrix} ۱ & ۲ & ۳ \end{matrix} \\ \begin{matrix} ۱ \\ ۲ \\ ۳ \end{matrix} & \begin{bmatrix} -۰/۰۰۳۵ & ۰/۰۰۰۳ & ۰/۰۰۳۲ \\ ۰/۰۰۰۱ & -۰/۰۰۱۵ & ۰/۰۰۱۴ \\ ۰/۰۰۰۸ & ۰/۰۰۱۸ & -۰/۰۰۲۶ \end{bmatrix} \end{matrix}$$

ماتریس شدت انتقال پارامتر RQD

$$A_w = \begin{matrix} & \begin{matrix} ۱ & ۲ & ۳ \end{matrix} \\ \begin{matrix} ۱ \\ ۲ \\ ۳ \end{matrix} & \begin{bmatrix} -۰/۰۰۱۶ & ۰/۰۰۱۱۵ & ۰/۰۰۰۴۵ \\ ۰/۰۰۱۹ & -۰/۰۰۳۸ & ۰/۰۰۱۹ \\ ۰/۰۰۰۶ & ۰/۰۰۱۷ & -۰/۰۰۲۳ \end{bmatrix} \end{matrix}$$

ماتریس شدت انتقال پارامتر آب زیرزمینی

۵-۳-۵- نمودار تغییر حالت پارامتر

در این پژوهش به منظور دستیابی به احتمال وقوع حالات هرکدام از پارامترها در مسیر تونل (نمودارهای تغییر حالت پارامتر)، ابتدا کل مسیر تونل مطابق شکل ۵-۵ به بخش‌های مساوی تقسیم شد که از هر بخش به‌عنوان یک سلول نام برده شده است. طول هرکدام از سلول‌ها برابر ۱۰ متر انتخاب شد و از آنجایی که کل طول تونل برابر ۱۳۱۰ متر بود، بنابراین تونل به ۱۳۱ بخش (سلول) ۱۰ متری تقسیم شد. از میان این ۱۳۱ سلول، ۲ سلول مربوط به موقعیت ورودی و خروجی تونل (سلول‌های شماره ۱ و شماره ۱۳۱) و چهار سلول هم مربوط به موقعیت چهار گمانه موجود در مسیر تونل (سلول‌های

شماره ۳۶، ۶۱، ۱۰۴ و ۱۲۰) بودند. از آنجایی که احتمال وقوع حالات هرکدام از سه پارامتر در نظر گرفته‌شده در این پژوهش در موقعیت این ۶ سلول معلوم هست، بنابراین سلول‌های مشاهده‌ای نامیده می‌شوند. بقیه ۱۲۵ سلول نیز سلول‌های مجهول هستند که به کمک مدل مارکوف احتمال وقوع هرکدام از حالات پارامترها در آن‌ها بدست خواهد آمد. مدل مارکوف به کمک سلول‌های مشاهده‌ای می‌تواند حالات پارامترها را در سلول‌های مجهول به صورت احتمالاتی پیش‌بینی نماید. همان‌طور که در فصل سوم به صورت کامل توضیح داده شد، بسته به تعداد و نوع سلول‌های مشاهده‌ای در مسیر تونل، معادله مدل مارکوف به منظور پیش‌بینی حالات پارامترها در سلول‌های مجهول، متفاوت خواهد بود. اگر احتمال وقوع حالات پارامترها در سلول‌های مشاهده‌ای به صورت غیرقطعی باشد، در این صورت مدل مارکوف از حالت مشاهده‌ای قطعی برای پیش‌بینی حالات پارامترها در سلول‌های مجهول استفاده خواهد کرد و بسته به تعداد مشاهده‌ها می‌تواند حالت یک مشاهده قطعی یا چند مشاهده قطعی را بکاربرد. اما اگر احتمال وقوع حالات پارامترها در سلول‌های مجهول به صورت غیرقطعی باشد، برای پیش‌بینی حالات پارامترها در سلول‌های مجهول از روش یک یا چند مشاهده غیرقطعی استفاده خواهد کرد. در این پژوهش ۶ سلول مشاهده‌ای مربوط به موقعیت ۴ گمانه و موقعیت‌های ورودی و خروجی تونل موجود بود. از آنجایی که داده‌های موجود برای پارامترها مربوط به زمانی است که هنوز فاصله حدود ۲۰۰ متر از پرتال ورودی و خروجی تونل خاکبرداری نشده است، بنابراین از نظر افراد کارشناس تونل‌سازی (۱۰ نفر) از طریق پرسشنامه به منظور دستیابی به احتمال وقوع حالات پارامترها در سلول‌های مشاهده‌ای ورودی و خروجی تونل بهره‌گرفته شد و نتایج مطابق جدول ۵-۲ بدست آمد. چون احتمال وقوع حالات پارامترها به صورت غیرقطعی در داخل این سلول‌ها بدست آمد، بنابراین سلول‌های مشاهده‌ای غیرقطعی نامیده شدند. همچنین به دلیل موجود بودن داده‌های ناقصی از پارامترها در موقعیت گمانه‌ها، چهار سلول مربوط به موقعیت گمانه‌ها نیز به عنوان سلول‌های مشاهده‌ای غیرقطعی انتخاب شدند و احتمالات مربوط به حالات هرکدام از پارامترها در داخل آن‌ها از طریق پرسشنامه به کمک افراد کارشناس تونل‌سازی (۱۰ نفر) با در اختیار گذاشتن داده‌های موجود برای پارامترها قبل از شروع به ساخت تونل نیز

مطابق جدول ۲-۵ بدست آمد.

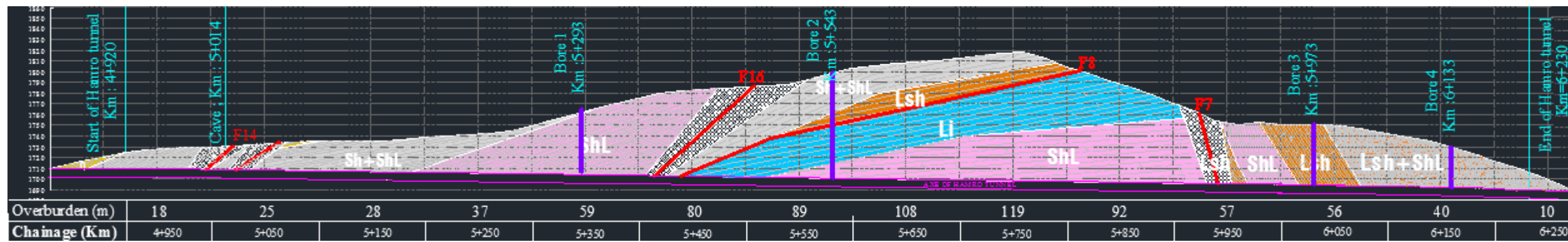
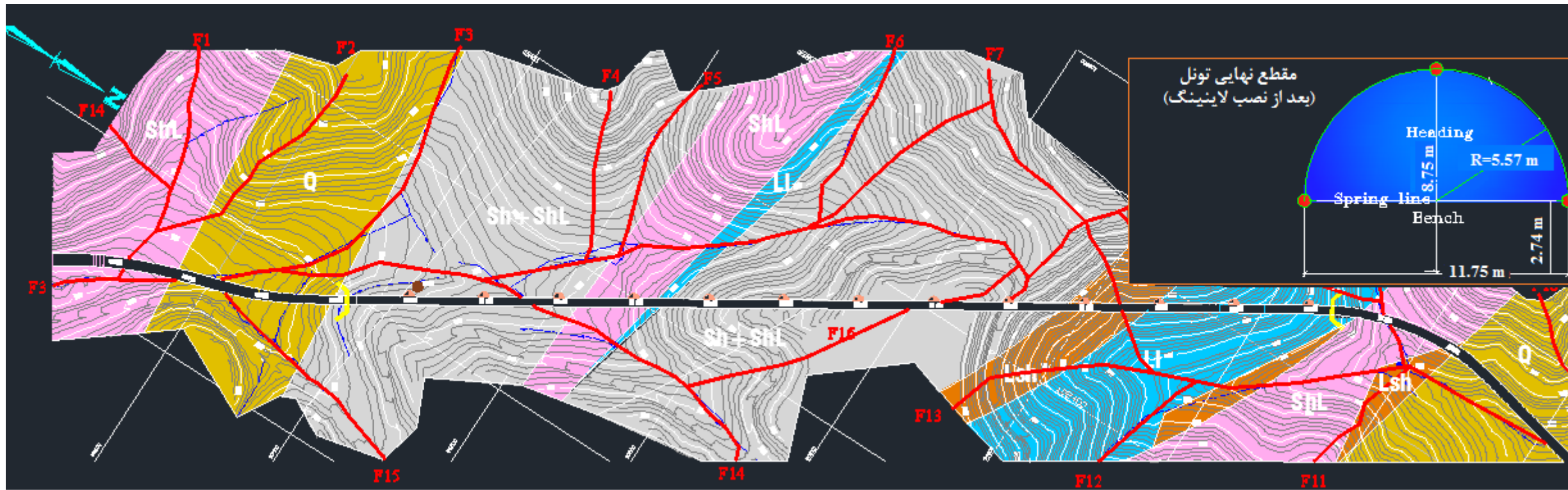
جدول ۲-۵: احتمال وقوع هر حالت از هر پارامتر در موقعیت سلول‌های مشاهده‌ای.

| سلول مشاهده‌ای | ورودی | گمانه ۱ | گمانه ۲ | گمانه ۳ | گمانه ۴ | خروجی | |
|---------------------|--------|---------|---------|---------|---------|-------|------|
| موقعیت (کیلومتر) | ۴+۹۲۰ | ۵ + ۲۹۳ | ۵ + ۵۴۳ | ۵ + ۹۷۳ | ۶ + ۱۳۳ | ۶+۲۳۰ | |
| پارامتر نوع سنگ | حالت ۱ | ٪ ۹۰ | ٪ ۸۰ | ٪ ۵ | ٪ ۵ | ٪ ۱ | ٪ ۳ |
| | حالت ۲ | ٪ ۵ | ٪ ۱۰ | ٪ ۹ | ٪ ۵۴ | ٪ ۳ | ٪ ۲ |
| | حالت ۳ | ٪ ۴ | ٪ ۶ | ٪ ۸۵ | ٪ ۴۰ | ٪ ۹۵ | ٪ ۱۰ |
| | حالت ۴ | ٪ ۱ | ٪ ۴ | ٪ ۱ | ٪ ۱ | ٪ ۱ | ٪ ۸۵ |
| پارامتر RQD | حالت ۱ | ٪ ۳ | ٪ ۹ | ٪ ۹۵ | ٪ ۱۵ | ٪ ۵ | ٪ ۱ |
| | حالت ۲ | ٪ ۹۵ | ٪ ۹۰ | ٪ ۴ | ٪ ۸۰ | ٪ ۱۵ | ٪ ۹۰ |
| | حالت ۳ | ٪ ۲ | ٪ ۱ | ٪ ۱ | ٪ ۵ | ٪ ۸۰ | ٪ ۹ |
| پارامتر آب زیرزمینی | حالت ۱ | ٪ ۲ | ٪ ۲ | ٪ ۴ | ٪ ۸۵ | ٪ ۸۰ | ٪ ۳ |
| | حالت ۲ | ٪ ۸ | ٪ ۸ | ٪ ۹۵ | ٪ ۱۰ | ٪ ۱۵ | ٪ ۷ |
| | حالت ۳ | ٪ ۹۰ | ٪ ۹۰ | ٪ ۱ | ٪ ۵ | ٪ ۵ | ٪ ۹۰ |

بنابراین در کل مسیر تونل تعداد ۶ سلول مشاهده‌ای غیرقطعی وجود دارد و در نتیجه معادله

مارکوف مربوط به چند مشاهده غیرقطعی که در نرم‌افزار متلب ([۲۰]) کد نویسی شد، مطابق فرمول

۳-۵ می‌باشد.



| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|----------------|---------------------|
| سلول ۱ (ورودی) | ... | سلول ۳۶ (گمانه ۱) | ... | سلول ۶۱ (گمانه ۲) | ... | سلول ۱۰۴ (گمانه ۳) | ... | سلول ۱۲۰ (گمانه ۴) | ... | سلول ۱۳۱ (خروجی) |
| ۱۰ m | ۳۶ سلول ۱۰ متری | ۱۰ m | ۲۴ سلول ۱۰ متری | ۱۰ m | ۴۲ سلول ۱۰ متری | ۱۰ m | ۱۵ سلول ۱۰ متری | ۱۰ m | ۸ سلول ۱۰ متری | ۱۰ m |

شکل ۵-۵: تعداد و موقعیت سلول‌های مشاهده‌ای در مسیر تونل همرو.

$$V_{X_{mz}}^{ns}(L, -O_{t-1}) = \sum_{m=1}^n P[X(O_{t-1}) = m] \sum_{w=1}^n P[X(O_t) = w] \frac{V_{X_{zw}}(O_t - L) V_{X_{mz}}(L, -O_{t-1})}{V_{X_{mw}}(O_t - O_{t-1})} \quad 3-5$$

$$(O_{t-1} \leq L, < O_t, \quad t = 2, 3, \dots, 6)$$

در این فرمول:

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

n : تعداد حالت‌های پارامتر موردنظر.

$V_{X_{mz}}^{ns}(L, -O_{t-1})$: احتمال وقوع حالت z از پارامتر X در سلول L به شرط این که حالت در

سلول مشاهده‌ای O_{t-1} ، m باشد (بالانویس ns معرف چند مشاهده غیرقطعی است).

$P[X(O_{t-1}) = m]$: احتمال این که حالت پارامتر X در سلول مشاهده‌ای O_{t-1} ، m باشد (m)

برای هر پارامتر از ۱ تا n متغیر است).

$P[X(O_t) = w]$: احتمال این که حالت پارامتر X در سلول مشاهده‌ای O_t ، w باشد (w برای

هر پارامتر از ۱ تا n متغیر است).

$V_{X_{zw}}(O_t - L)$: احتمال وقوع حالت w از پارامتر X در سلول مشاهده‌ای O_t به شرط این که

حالت در سلول L ، z باشد.

$V_{X_{mz}}(L, -O_{t-1})$: احتمال وقوع حالت z از پارامتر X در سلول L به شرط این که حالت در

سلول مشاهده‌ای O_{t-1} ، m باشد.

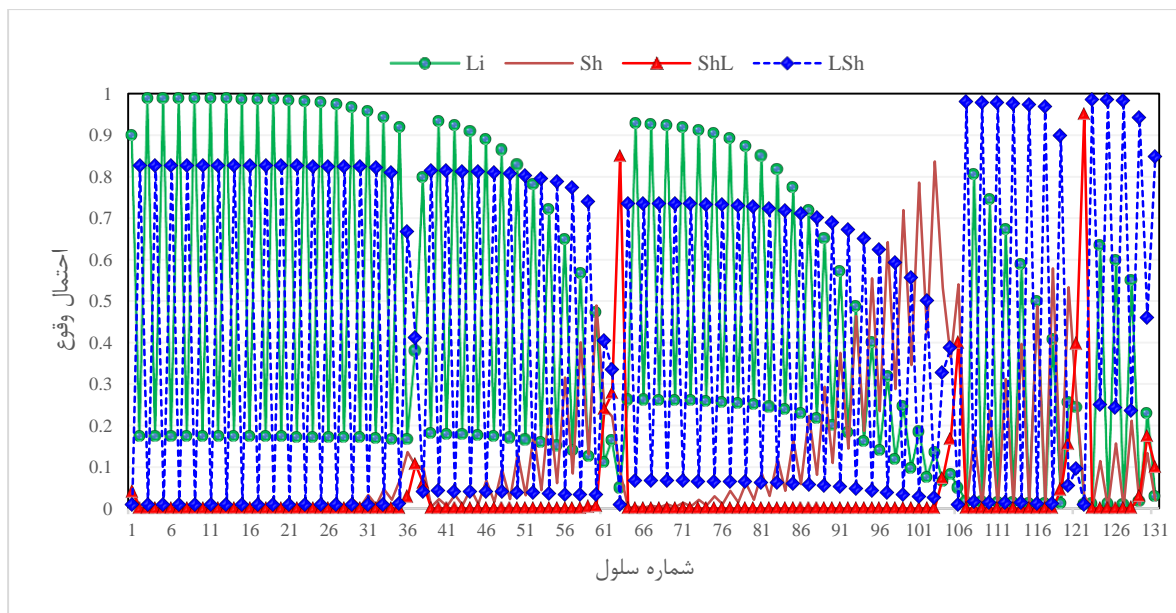
$V_{X_{mw}}(O_t - O_{t-1})$: احتمال وقوع حالت w از پارامتر X در سلول مشاهده‌ای O_t به شرط این که

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

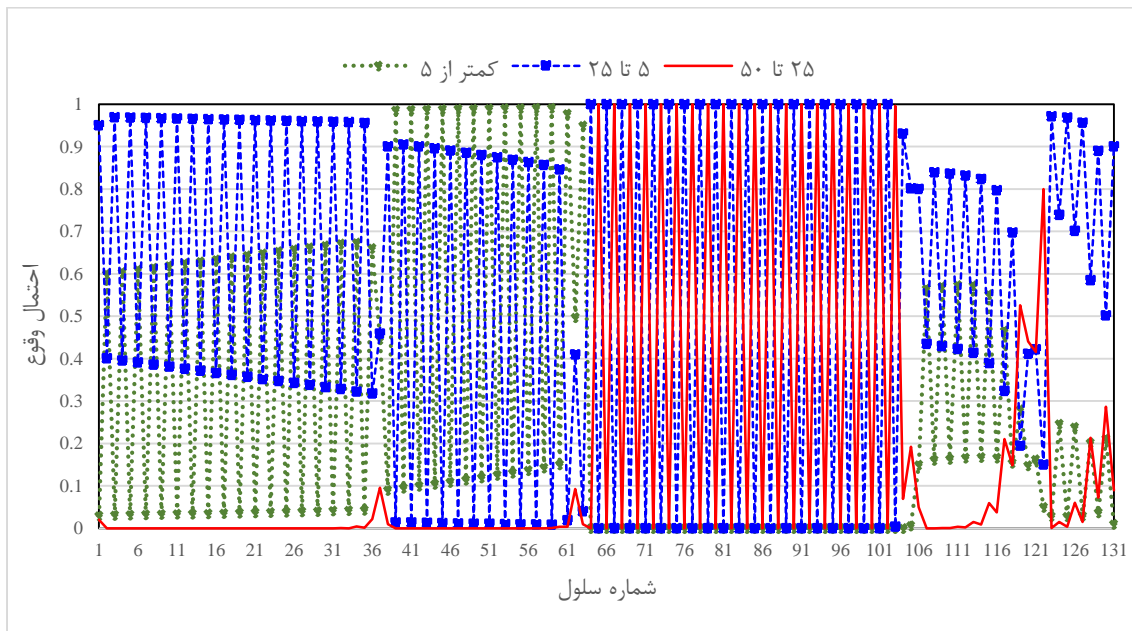
به‌منظور بیان شیوه کار فرمول ۳-۵ در این مطالعه، مطابق شکل ۵-۶ فاصله میان هر دو سلول مشاهده‌ای به تعداد سلول‌هایی تقسیم شد. باید احتمال وقوع حالات هر کدام از پارامترها در سلول‌های مجهول میان هر دو سلول مشاهده‌ای بدست آید. برای مثال جهت مشخص نمودن احتمال حالات در سلول‌های مجهول میان سلول مشاهده‌ای ورودی و سلول مشاهده‌ای گمانه $(O_1 \text{ و } O_2)$ ، در فرمول ۳-۵ جایگزین O_{t-1} و O_2 جایگزین O_t خواهد شد. در مرحله اول بایستی احتمال وقوع هر کدام از حالات یک پارامتر معین را در اولین سلول مجهول میان O_1 و O_2 (سلول L) بدست آورد. در مرحله بعد که احتمال هر کدام از حالات در سلول L بدست آمد، برای دستیابی به احتمال وقوع حالات در سلول مجهول بعدی (سلول L_1) بایستی در فرمول ۳-۵ این بار سلول L جایگزین سلول O_{t-1} شود. در نتیجه احتمال وقوع حالات در سلول L_2 هم بدست خواهد آمد. به همین ترتیب می‌توان به کمک فرمول ۳-۵ احتمال وقوع حالات هر پارامتر را در تمام سلول‌های میان دو سلول مشاهده‌ای بدست آورد. پس زمانی که برای هر کدام از پارامترها در مسیر تونل به کمک فرمول ۳-۵ احتمال وقوع حالات در تمام سلول‌های مجهول بدست آمد، برای هر پارامتر نموداری تحت عنوان نمودار تغییر حالت پارامتر شکل خواهد گرفت که در این مطالعه برای سه پارامتر نوع سنگ، RQD و آب زیرزمینی به ترتیب مطابق شکل ۵-۷، شکل ۵-۸ و شکل ۵-۹ بدست آمد. بدلیل اینکه مدل مارکوف برای پیش‌بینی احتمال وقوع حالات یک پارامتر در سلول‌های بعدی به کمک سلول قبلی و سلول مشاهده‌ای و همچنین ماتریس شدت انتقال حالت پارامتر مربوطه همزمان با هم تصمیم می‌گیرد، بنابراین در فاصله‌ی میان دو سلول مشاهده‌ای در اکثر موارد یک حالت نوسانی در احتمال وقوع حالات پارامتر اتفاق می‌افتد.

| | | | | | | |
|------|----------|--------------|--------------|-----|--------------|----------|
| سلول | $X(O_1)$ | $X(L_1)$ | $X(L_1)$ | ... | $X(L_{35})$ | $X(O_3)$ |
| حالت | m | z_1 | z_1 | ... | z_{35} | w |
| سلول | $X(O_3)$ | $X(L_{37})$ | $X(L_{38})$ | ... | $X(L_{60})$ | $X(O_3)$ |
| حالت | m | z_{37} | z_{38} | ... | z_{60} | w |
| سلول | $X(O_3)$ | $X(L_{62})$ | $X(L_{63})$ | ... | $X(L_{103})$ | $X(O_3)$ |
| حالت | m | z_{62} | z_{63} | ... | z_{103} | w |
| سلول | $X(O_3)$ | $X(L_{105})$ | $X(L_{106})$ | ... | $X(L_{119})$ | $X(O_5)$ |
| 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 |

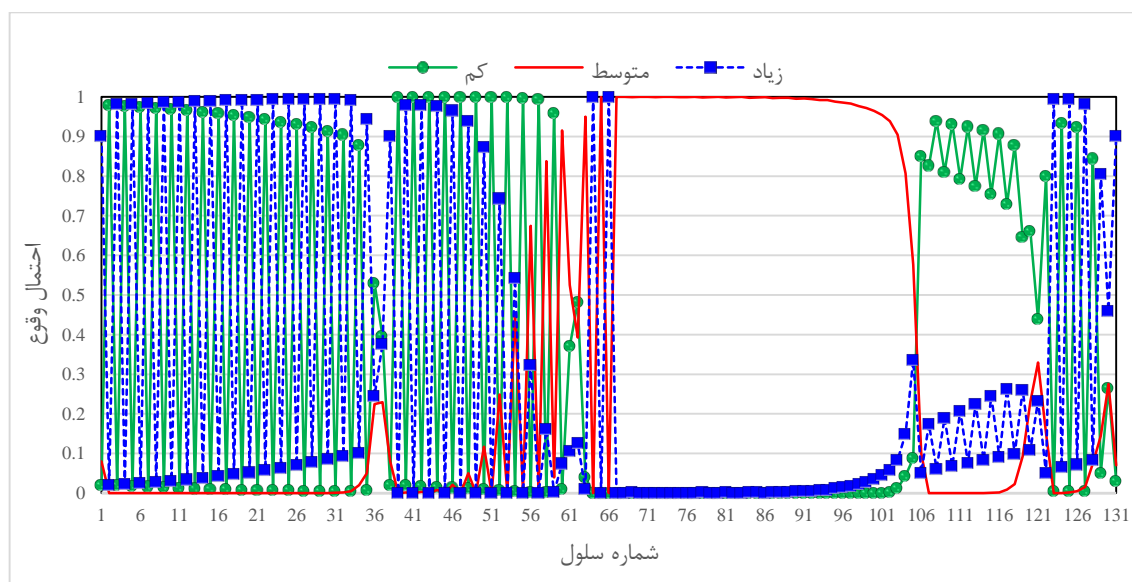
شکل ۵-۶: روش پیش‌بینی احتمال وقوع هر کدام از حالت‌های پارامترها در داخل سلول‌های مجهول میان هر دو سلول مشاهده‌ای.



شکل ۵-۷: نمودار تغییر حالت پارامتر نوع سنگ.



شکل ۵-۸: نمودار تغییر حالت پارامتر RQD.



شکل ۵-۹: نمودار تغییر حالت پارامتر شرایط آب زیرزمینی.

در این بخش، نمودار تغییر حالت پارامترها بدست آمد که از ترکیب آن‌ها می‌توان نموداری تحت عنوان نمودار تغییر حالت کلاس زمین تشکیل داد. در بخش بعدی به بیان چگونگی دست‌یابی به نمودار تغییر حالت کلاس زمین در این مطالعه، پرداخته شده است.

۵-۳-۶- نمودار تغییر حالت کلاس زمین (روش حفاری و سیستم نگهداری)

با توجه به پارامترها و حالت‌های در نظر گرفته شده برای آن‌ها، در کل $(3 \times 3 \times 4) = 36$ شرایط (بردار) مختلف زمین‌شناسی می‌تواند در طول مسیر تونل اتفاق بیفتد. بدیهی است که نمی‌توان برای هر کدام از این شرایط یک روش حفاری و سیستم نگهداری در نظر گرفت بلکه چند روش حفاری و سیستم نگهداری (در این مطالعه ۵ تا) می‌توان در نظر گرفت که هر کدام برای تعدادی از این بردارهای زمین‌شناسی مناسب باشند. این بردارهای زمین‌شناسی بنا به نظر افراد کارشناس، مطابق پرسشنامه پیوست (الف) در تعداد ۵ کلاس مطابق جدول ۵-۳ جای گرفتند که مشخصات مربوط به روش حفاری و سیستم نگهداری هر کدام از کلاس‌های زمین در نظر گرفته شده در جدول ۵-۴ آمده است.

جدول ۵-۳: معرفی بردارهای زمین‌شناسی مربوط به هر کدام از کلاس‌های زمین در نظر گرفته شده.

| شماره کلاس زمین | حالت پارامتر نوع سنگ | حالت پارامتر RQD | حالت پارامتر آب زیرزمینی |
|-----------------|----------------------|------------------|--------------------------|
| ۱ | ۱،۲،۳،۴ | ۱ | ۱،۲،۳ |
| | ۲ | ۲ | ۲،۳ |
| ۲ | ۲ | ۲ | ۱ |
| | ۱،۴ | ۲ | ۱،۲،۳ |
| ۳ | ۱،۳ | ۳ | ۳ |
| | ۱،۲،۳ | ۳ | ۲ |
| ۴ | ۲،۴ | ۳ | ۳ |
| | ۳ | ۲ | ۱،۲،۳ |
| | ۱،۲،۳،۴ | ۳ | ۱ |
| ۵ | ۴ | ۳ | ۲ |

جدول ۴-۵: مشخصات مربوط به روش حفاری و سیستم نگهداری هر کدام از کلاس‌های زمین.

| شماره کلاس زمین | مشخصات روش حفاری و سیستم نگهداری |
|-------------------|--|
| ۱ (خیلی ضعیف) | روش تونل‌های جانبی - نگهداری: IPE 180، فاصله داری ۰/۷۵ - ۰/۵ متر و ۲۰ سانتی متر شاتکریت تقویت شده به وسیله دو لایه مش $\phi 8@100 \times 100$ mm |
| ۲ (ضعیف) | روش دیافراگم مرکزی - نگهداری: IPE 180، فاصله داری ۱ - ۰/۷۵ متر و ۲۰ سانتی متر شاتکریت تقویت شده به وسیله دو لایه مش $\phi 6@100 \times 100$ mm |
| ۳ (ضعیف تا متوسط) | روش طاق و پطاق - نگهداری: IPE 180، فاصله داری ۱/۲ - ۱ متر و ۲۰ سانتی متر شاتکریت تقویت شده به وسیله دو لایه مش $\phi 8@100 \times 100$ mm |
| ۴ (متوسط) | روش طاق و پطاق - نگهداری: IPE 180، راک بولت تمام تزریقی، $\phi 25$ mm, L : 4-6, m فاصله داری ۲ × ۲ و ۱۵ سانتی متر شاتکریت تقویت شده به وسیله دو لایه مش $\phi 6@100 \times 100$ mm |
| ۵ (متوسط تا خوب) | روش طاق و پطاق - نگهداری: IPE 180، راک بولت تمام تزریقی، $\phi 25$ mm, L : 4-6, m فاصله داری ۲ × ۲ و ۱۰ سانتی متر شاتکریت تقویت شده به وسیله یک لایه مش $\phi 6@100 \times 100$ mm |

برای تشکیل نمودار تغییر حالت کلاس زمین، از بردارهای زمین‌شناسی مربوط به هر پارامتر در جدول ۳-۵ و داده‌های بدست‌آمده برای احتمال وقوع حالت‌های هر پارامتر استفاده شد. برای این کار، ابتدا داده‌های بدست‌آمده برای تشکیل نمودارهای تغییر حالت پارامتر در نرم‌افزار Excell 2013 وارد شدند. سپس با توجه به جدول ۳-۵ که بردار یا بردارهای زمین‌شناسی هر کلاس زمین را معرفی می‌نماید، احتمال وقوع هر کدام از کلاس‌های زمین در داخل هر سلول به کمک نرم‌افزار Excell 2013 بدست آمد.

به‌منظور بیان شیوه کار در نرم‌افزار Excell 2013 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 ۳-۵ شامل ۸ بردار زمین‌شناسی زیر است:

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

در این مطالعه اگر هر کدام از بردارها را به صورت (i,j,k) در نظر بگیریم، i و k به ترتیب بیان کننده 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 RQD) و حالت k از پارامتر آب زیرزمینی (k یکی از سه حالت پارامتر آب زیرزمینی) با احتمال مشخصی اتفاق می افتد. 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 زمین شناسی 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 بدست آید.

حال با توجه به مطالب ارائه شده، برای پیدا کردن احتمال وقوع کلاس زمین ۳ در داخل سلول l ,

به شکل زیر عمل شد:

$$P[g(l) \text{ belongs to } GC_3]$$

$$= P \left[\begin{array}{l} g(l) = g_{31} \text{ or } g(l) = g_{32} \text{ or } g(l) = g_{33} \text{ or } g(l) = g_{34} \\ g(l) = g_{35} \text{ or } g(l) = g_{36} \text{ or } g(l) = g_{37} \text{ or } g(l) = g_{38} \end{array} \right]$$

$$= P[g(l) = g_{31}] + P[g(l) = g_{32}] + P[g(l) = g_{33}] + P[g(l) = g_{34}]$$

$$+ P[g(l) = g_{35}] + P[g(l) = g_{36}] + P[g(l) = g_{37}] + P[g(l) = g_{38}]$$

$$= P[r(l) = 1 \text{ and } d(l) = 2 \text{ and } w(l) = 1]$$

$$+ P[r(l) = 1 \text{ and } d(l) = 2 \text{ and } w(l) = 2]$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$P[g(l) \text{ belongs to } GC_r]$: 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 این که حالت پارامتر نوع سنگ در سلول l ، i باشد.

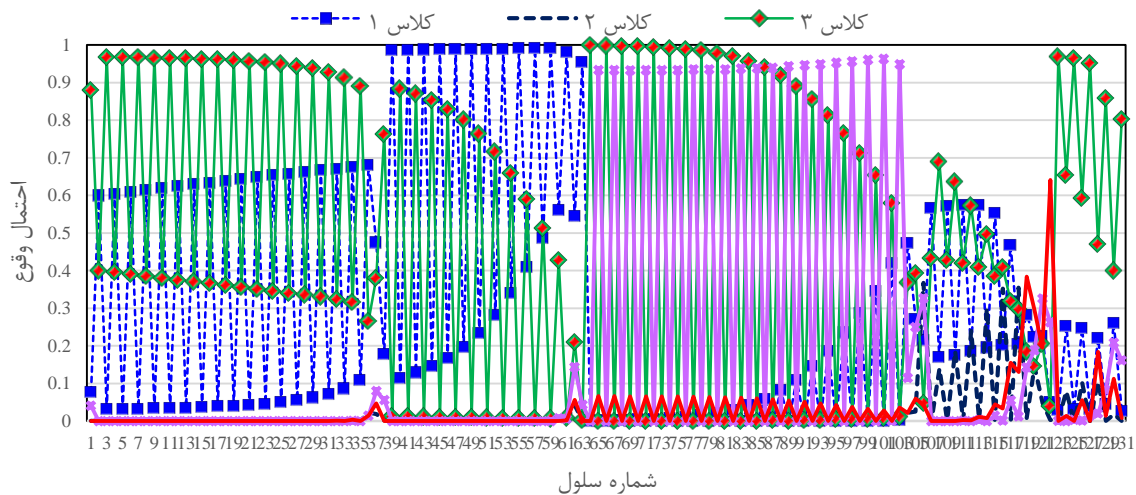
$P[d(l) = j]$: احتمال این که حالت پارامتر RQD در سلول l ، j باشد.

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

بنابراین به این صورت احتمال وقوع کلاس زمین ۳ در داخل هر سلول بدست آمد و برای سایر کلاس‌های زمین نیز به این صورت عمل شد که محاسبات مربوط به آن‌ها و همچنین نتایج بدست آمده برای احتمال وقوع هر کدام از کلاس‌ها در پیوست (ب) آورده شده است. در نهایت با استفاده از نتایج بدست آمده برای هر کلاس زمین، نموداری مطابق شکل ۵-۱۰ بدست آمد. این نمودار، احتمال وقوع هر کدام از کلاس‌های زمین را در داخل تمام سلول‌ها بدست می‌دهد و تحت عنوان نمودار تغییر حالت کلاس زمین خوانده می‌شود.

با توجه به مطالب ارائه شده، مدل مارکوف جهت دستیابی به نمودار تغییر حالت کلاس زمین از داده‌های مربوط به موقعیت سلول‌های مشاهده‌ای و ماتریس‌های شدت انتقال استفاده می‌کند که تمام این داده‌ها در این مطالعه از طریق پرسشنامه به کمک افراد کارشناس تونل سازی بدست آمده‌اند. طبیعی است هر چه داده‌های موجود در موقعیت سلول‌های مشاهده‌ای دقیق‌تر باشند و پرسشنامه‌ها با دقت بیشتری جواب داده شوند، نمودار تغییر حالت کلاس زمین بدست آمده شباهت بیشتری با نمودار تغییر حالت واقعی زمین خواهد داشت.

هدف مدل زمین‌شناسی، دستیابی به نمودار تغییر حالت کلاس زمین است تا بتوان از آن به‌عنوان ورودی مدل ساخت استفاده نمود. در بخش بعدی، مدل ساخت به‌صورت کامل برای تونل همرو توضیح داده شده است.



شکل ۵-۱۰: نمودار تغییر حالت کلاس زمین.

۵-۴- مدل ساخت

در مدل ساخت، زمان و هزینه اجرای تونل در هر سلول برای هر کلاس زمین بدست می‌آید. به‌منظور برآورد زمان و هزینه برای هر سلول (۱۰ متر) در تونل همرو، مطابق پرسشنامه (الف)، از افراد کارشناس (۱۰ نفر) خواسته شد که ابتدا برای هرکدام از کلاس‌های زمین، یک شبکه فعالیت در نظر بگیرند که یک سیکل ساخت (حفاری و نگهداری) را از کلاس زمین موردنظر کامل نماید؛ سپس به کمک این شبکه فعالیت، میزان زمان و هزینه حداقل، متوسط و حداکثر مربوط به هر فعالیت (برای سال ۱۳۹۴)، میان پایان یک فعالیت و شروع فعالیت جدید، تأخیرها، خرابی ماشین‌آلات و ... را با تجربه از پروژه‌های اجراشده قبلی در شرایط زمین‌شناسی مشابه تقریب زده و درنهایت این زمان و هزینه‌ها را باهم جمع نمایند تا زمان و هزینه حداقل، متوسط و حداکثر برای هر سیکل ساخت از کلاس‌های زمین بدست آید. از آنجایی که طول سیکل ساخت در نظر گرفته‌شده به‌وسیله افراد کارشناس باهم برابر نبود، ابتدا میزان زمان و هزینه برآورد شده برای هر سیکل ساخت توسط هر کارشناس، به زمان و هزینه ساخت هر متر از کلاس‌ها تبدیل شد به‌طوری‌که زمان و هزینه حداقل، متوسط و حداکثر توسط هر کارشناس برای هرکدام از پنج کلاس زمین مشخص گردید. سپس از میانگین‌گیری نظرهای ارائه‌شده به‌وسیله افراد کارشناس مختلف (۱۰ نفر) برای هر کلاس زمین، زمان و هزینه حداقل، متوسط و حداکثر

به ازای هر متر ساخت مطابق جدول ۵-۵ بدست آمد. همچنین از آنجایی که هزینه ساخت سال به سال در حال افزایش است، بنابراین، میزان حداقل، متوسط و حداکثر افزایش درصدی هزینه‌ها به صورت سالیانه توسط افراد کارشناس نیز جدول ۵-۵ بدست آمد.

با توجه به این که در این مطالعه طول هر سلول برابر ده متر در نظر گرفته شده است، بنابراین نتایج مربوط به زمان و هزینه‌های هر متر از کلاس‌های زمین، ده برابر شد و در نتیجه جدول ۵-۶ بدست آمد که زمان و هزینه ساخت ده متر از هر کلاس زمین را نشان می‌دهد. نکته‌ای که بایستی در این مطالعه مدنظر قرار گیرد، این است که در پرسشنامه (پیوست (الف))، 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 دست‌آمده برای زمان و هزینه‌های ساخت نیز برای این فرض می‌باشد. همچنین در برآورد زمان و هزینه‌ها، تنها حفاری و نگهداری تونل در نظر گرفته شده است.

حال بعد از دستیابی به زمان و هزینه‌های اجرای ساخت هر سلول (ده متر) برای هر کلاس زمین، نوبت به تخمین زمان و هزینه نهایی ساخت کل تونل می‌رسد. به منظور برآورد زمان و هزینه کل ساخت تونل، باید زمان و هزینه تمام سلول‌ها (۱۳۱ سلول) را باهم جمع نمود. از آنجایی که در داخل هر سلول، هر کدام از کلاس‌های زمین با احتمال مشخصی اتفاق می‌افتد (نمودار تغییر حالت کلاس زمین)، بایستی برای ارزیابی زمان و هزینه نهایی ساخت کل تونل، روش شبیه‌سازی مونت کارلو را بکار برد.

برای انجام روش شبیه‌سازی مونت کارلو، نرم‌افزار Primavera Risk Analysis مورد استفاده قرار گرفت که در بخش بعدی چگونگی به‌کارگیری این نرم‌افزار برای این مطالعه و نتایج بدست‌آمده از آن برای زمان و هزینه نهایی ساخت تونل همرو به صورت کامل بحث شده است.

جدول ۵-۵: زمان و هزینه مربوط به هر متر از کلاس زمین موردنظر.

| شماره کلاس زمین | زمان به ازای هر متر حفاری (روز) | | | هزینه به ازای هر متر حفاری (میلیون تومان) | | | افزایش هزینه برای هر متر حفاری به صورت سالیانه (درصد) | | |
|-----------------|---------------------------------|-------|--------|---|--------|--------|---|-------|--------|
| | حداقل | متوسط | حداکثر | حداقل | متوسط | حداکثر | حداقل | متوسط | حداکثر |
| ۱ | ۱/۳۴ | ۱/۶۷ | ۲ | ۳۵ | ۳۸/۵۶۳ | ۴۲/۴۴۵ | ۵-۱۰ | ۱۵-۲۰ | ۲۵-۳۰ |
| ۲ | ۱/۱۷ | ۱/۴۲ | ۱/۶۷ | ۳۱/۸۳۵ | ۳۵ | ۳۸/۵۶۳ | ۵-۱۰ | ۱۵-۲۰ | ۲۵-۳۰ |
| ۳ | ۱ | ۱/۱۷ | ۱/۴۲ | ۲۷/۶۷۸ | ۳۱/۸۳۵ | ۳۵ | ۵-۱۰ | ۱۵-۲۰ | ۲۵-۳۰ |
| ۴ | ۰/۸۴ | ۱ | ۱/۱۷ | ۲۳/۶۲۰ | ۲۷/۶۷۸ | ۳۱/۸۳۵ | ۵-۱۰ | ۱۵-۲۰ | ۲۵-۳۰ |
| ۵ | ۰/۶۳ | ۰/۸۴ | ۱ | ۱۷/۲۹۶ | ۲۳/۶۲۰ | ۲۷/۶۷۸ | ۵-۱۰ | ۱۵-۲۰ | ۲۵-۳۰ |

جدول ۵-۶: زمان و هزینه مربوط به هر سلول (۱۰ متر) از کلاس زمین موردنظر.

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

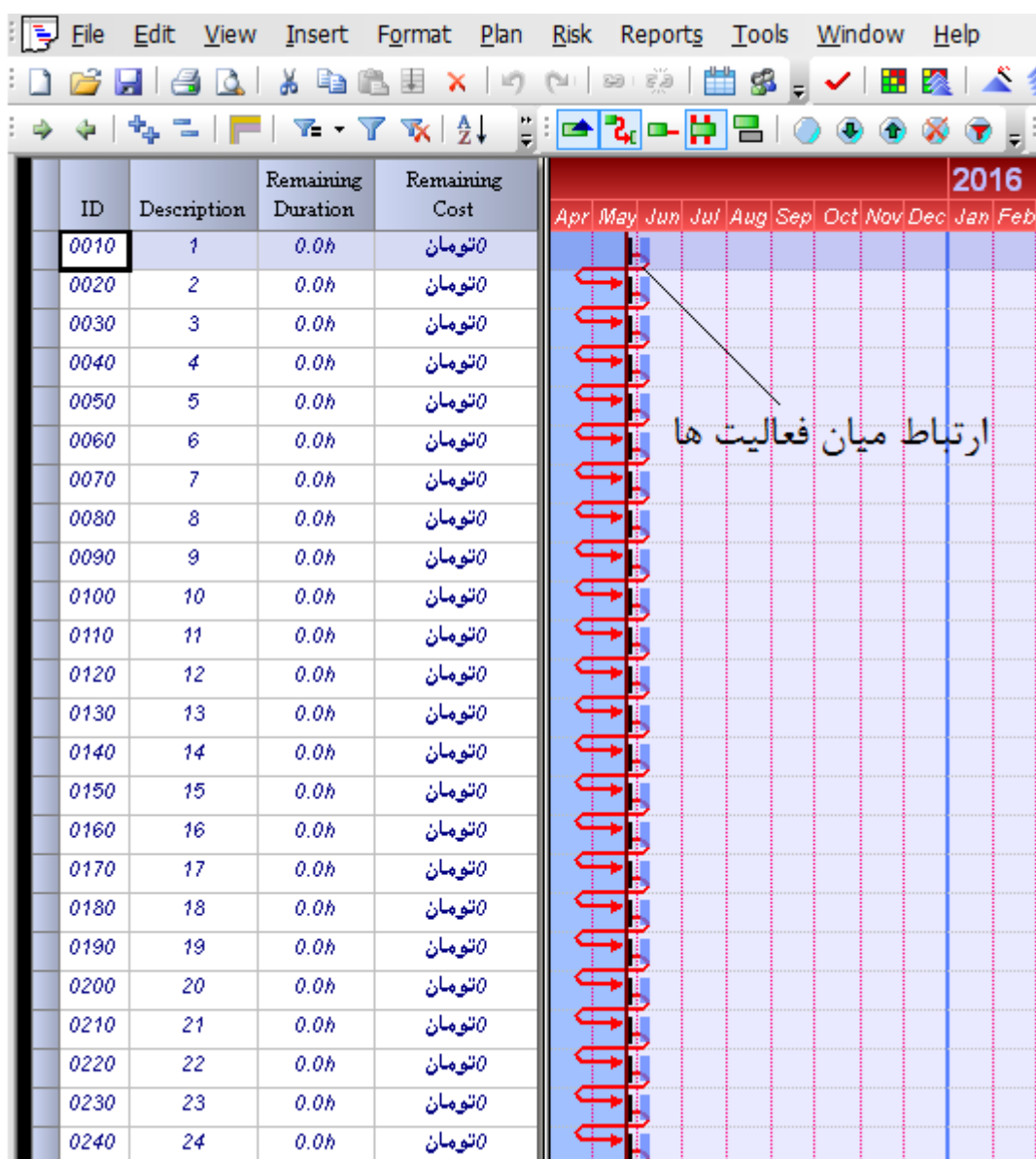
۵-۴-۱- ایجاد فهرست فعالیت‌های پروژه در نرم‌افزار Primavera Risk Analysis

در نرم‌افزار Primavera Risk Analysis، فعالیت مهم‌ترین عنصر برنامه است که کارها در قالب آن انجام می‌شود و معمولاً زمان بر است. فعالیت‌ها، اقدامات پروژه را در قالب توالی انجام آن‌ها، مدت‌زمان و منابع موردنیاز آن‌ها بیان می‌کنند.

در این مطالعه، هر سلول به‌عنوان یک فعالیت در نظر گرفته شد و در کل ۱۳۱ فعالیت مطابق شکل ۵-۱۱ در این نرم‌افزار تعریف شد. زمان و هزینه‌های مربوط به هر فعالیت (هر سلول)، به منابع این فعالیت‌ها اختصاص داده شد که در بخش‌های بعدی راجع به آن بحث می‌شود.

۵-۴-۲- ارتباط میان فعالیت‌ها (سلول‌ها)

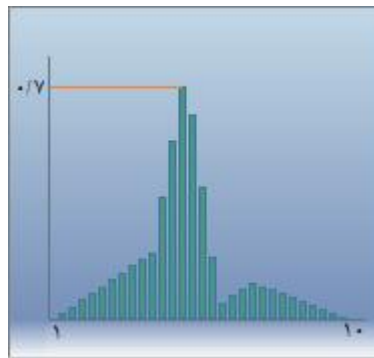
فعالیت‌ها با ارتباط بین شروع و پایان آن‌ها با یکدیگر مرتبط می‌شوند. در این مطالعه چون هر سلول به صورت یک فعالیت تعریف شد، بنابراین نوع ارتباط فعالیت‌ها، پایان به آغاز در نظر گرفته شد زیرا ابتدا بایستی حفاری سلول اول پایان یابد تا حفاری سلول دوم شروع شود و به همین ترتیب تا به سلول آخر می‌رسد. در شکل ۵-۱۱ چگونگی ارتباط میان تعدادی از فعالیت‌ها در قسمت سمت راست با فلش نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۱: نمایش ۲۴ سلول (فعالیت) و ارتباط میان آن‌ها در نرم‌افزار Primavera Risk Analysis.

۵-۴-۳- تعریف منابع پروژه در Primavera Risk Analysis

برای این که فعالیتی تکمیل شود، معمولاً نیاز به منبع دارد. در Primavera Risk Analysis، افراد، تجهیزات، مواد و هزینه‌های ثابت همه به‌عنوان منبع شناخته می‌شوند. در این مطالعه، برای هر سلول (فعالیت)، یک منبع در نظر گرفته شد و از آنجایی که هر منبع زمان و هزینه‌ای به‌صورت احتمالاتی دارد (زمان و هزینه هر کلاس زمین در داخل هر سلول)، بنابراین در وارد نمودن زمان و هزینه‌های هر منبع، تابع توزیع عمومی بکار برده شد. تابع توزیع عمومی^۱ منعطف‌ترین توزیع در میان توابع توزیع است. این توزیع، به تحلیل‌گر این امکان را می‌دهد که تا حد امکان شکل توزیع را به‌گونه‌ای تعیین کند که به بهترین شکل نمایش‌دهنده نظرات کارشناسان باشد. این توزیع به‌صورت $General(\{x_i\}, \{p_i\}, Minimum, Maximum)$ تعریف می‌شود که در آن $\{x_i\}$ آرایه‌ای از مقادیر x با وزن $\{p_i\}$ می‌باشد. بازه توزیع بین دو مقدار کمینه و بیشینه تعریف می‌شود. در شکل ۵-۱۲ نمونه‌ای از این توزیع نشان داده شده است [۱۱].



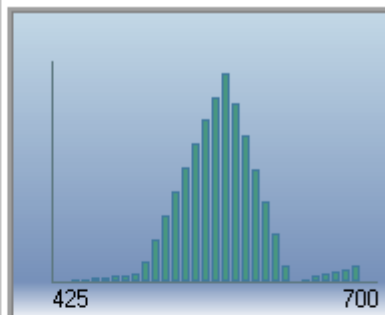
شکل ۵-۱۲: تابع توزیع عمومی [۶].

علت انتخاب تابع توزیع عمومی این بود که نسبت به سایر توابع توزیع، دارای انعطاف‌پذیری بیشتری است به‌گونه‌ای که می‌توان میان دو مقدار حداکثر و حداقل، به‌دلخواه نظرهای متفاوتی را با وزن‌های مختلف وارد نمود. در این مطالعه ابتدا برای زمان و هزینه، دو مقدار حداقل و حداکثر هر کدام با وزن صفر در نظر گرفته شد و سپس میان آن‌ها احتمال وقوع هر کدام از پنج کلاس زمین که قبلاً در

^۱ General Distribution

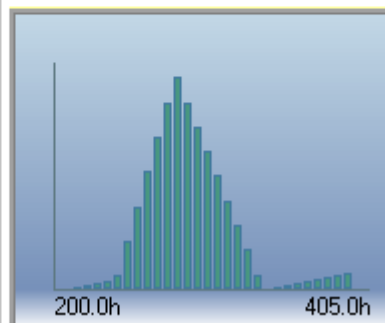
مدل زمین‌شناسی بدست آمد، وارد شد. بنابراین همان‌طور که در شکل ۵-۱۳ برای سلول شماره ۲۰ نشان داده شده است، برای هر کدام از ۱۳۱ سلول (فعالیت)، مطابق پروفیل زمین‌شناسی، زمان و هزینه به صورت احتمالاتی (با تابع توزیع عمومی) وارد شد و حال می‌توان با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو، زمان و هزینه نهایی ساخت کل تونل را به صورت احتمالاتی بدست آورد که در بخش بعدی بیان خواهد شد.

| Distribution | General |
|--------------|-----------|
| Value | Weighting |
| 200.0h | 0 |
| 202.0h | 0.000416 |
| 240.0h | 0.040664 |
| 281.0h | 0.88142 |
| 341.0h | 0.00095 |
| 401.0h | 0.07655 |
| 405.0h | 0 |



توزیع هزینه منابع
برای سلول شماره
۲۰ تونل همرو

| Distribution | General |
|--------------|-----------|
| Value | Weighting |
| 200.0h | 0 |
| 202.0h | 0.000416 |
| 240.0h | 0.040664 |
| 281.0h | 0.88142 |
| 341.0h | 0.00095 |
| 401.0h | 0.07655 |
| 405.0h | 0 |



توزیع مدت زمان
منابع برای سلول
شماره ۲۰ تونل
همرو

شکل ۵-۱۳: توزیع زمان و هزینه منابع برای سلول (فعالیت) شماره ۲۰ تونل همرو.

۵-۴-۴- اجرای روش شبیه‌سازی مونت کارلو در نرم‌افزار Primavera Risk Analysis

پس از وارد نمودن داده‌ها در نرم‌افزار، می‌توان نسبت به اجرای شبیه‌سازی مونت کارلو اقدام نمود. در خلال اجرای شبیه‌سازی، برنامه 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 اطلاعات واردشده به صورت تصادفی تعیین می‌گردند. نرم‌افزار Primavera Risk Analysis در انتهای هر تکرار، میزان زمان و هزینه

نهایی را در خود ذخیره‌سازی می‌نماید. پس از اتمام کلیه تکرارها، از این مقادیر برای رسم نمودارهای موردنظر و نیز تهیه تابع احتمالی مربوط به اجرای هر یک از این موارد استفاده می‌شود.

در بخش بعدی نمودارهای دست‌آمده از اجرای روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای ۱۰۰۰۰ بار تکرار همراه با تفسیر آن‌ها ارائه خواهد شد.

۵-۴-۵- نتایج حاصل از شبیه‌سازی مونت کارلو برای زمان و هزینه نهایی تونل

همرو در نرم‌افزار Primavera Risk Analysis

پس از اجرای شبیه‌سازی مونت کارلو، داده‌های ثبت‌شده در خلال شبیه‌سازی در قالب نمودار و داده‌های عددی قابل‌نمایش می‌باشند. با استفاده از این داده‌ها می‌توان پیش‌بینی‌های خوبی از روند اجرای پروژه در آینده با توجه به داده‌های ریسک واردشده بدست آورد.

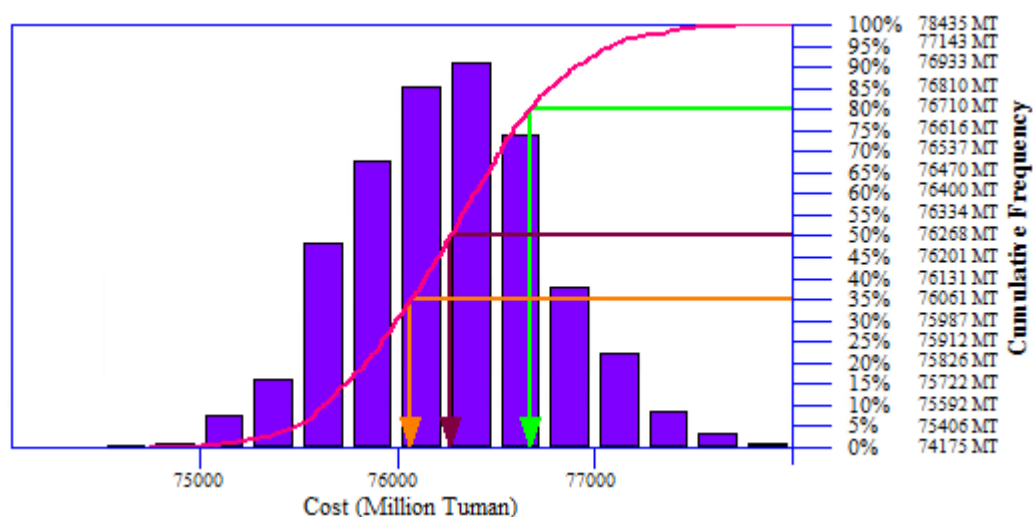
یکی از مفیدترین و پرکاربردترین ابزارهایی که نرم‌افزار Primavera Risk Analysis برای نمایش و تجزیه و تحلیل داده‌های شبیه‌سازی در اختیار کاربران قرار می‌دهد، نمودارهای توزیع می‌باشد. با استفاده از این نمودارها می‌توان سؤالاتی در مورد احتمال اتمام پروژه یا یک فعالیت در تاریخی خاص و یا با هزینه‌ای خاص پاسخ داد. همچنین می‌توان تعیین کرد که یک پروژه یا فعالیت، با یک سطح اطمینان تعیین‌شده، در چه زمان و با چه هزینه‌ای قابل انجام می‌باشد.

در ادامه سه نوع نمودار ستونی، تجمعی و پراکندگی حاصل از شبیه‌سازی مونت کارلو برای زمان و هزینه نهایی تونل همرو همراه با تفسیر آن‌ها ارائه شده است.

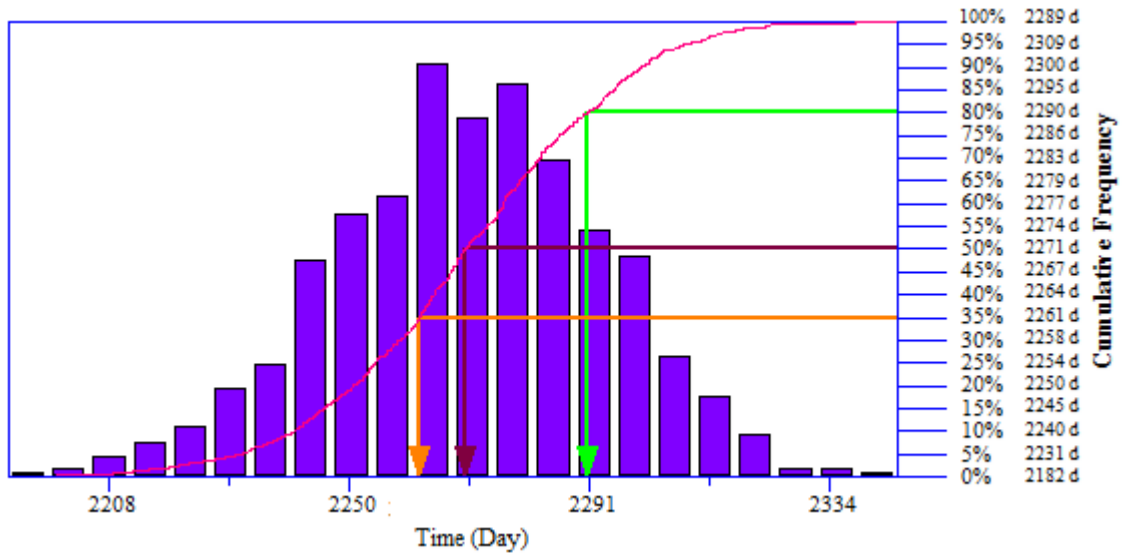
- نمودار ستونی

شکل ۵-۱۴ و شکل ۵-۱۵ به ترتیب نمودار ستونی مربوط به هزینه نهایی و مدت‌زمان نهایی تونل همرو را نشان می‌دهند. این نمودارها نحوه توزیع نتایج هزینه و مدت‌زمان نهایی پروژه همرو را بیان

می‌کنند. برای سطح اطمینان‌های متفاوتی از صفر تا ۱۰۰ درصد، نتایج متفاوتی برای زمان و هزینه‌ها بدست آمده است. هر چه سطح اطمینان به ۱۰۰٪ نزدیک‌تر باشد، یعنی این‌که با احتمال بالاتری پروژه در زمان و هزینه بدست‌آمده به اتمام خواهد رسید و در نتیجه عدم قطعیت‌ها کم‌تر خواهد شد. هر چه درصد سطح اطمینان به صفر نزدیک‌تر می‌گردد، این حالت برعکس خواهد شد و در نتیجه عدم قطعیت‌ها افزایش می‌یابد. به‌عنوان یک حالت بهینه می‌توان سطح اطمینان هر کدام از زمان و هزینه نهایی را برابر ۵۰ درصد در نظر گرفت. البته بسته به شرایط اقتصادی جامعه و نوع پروژه این احتمال می‌تواند بالای ۵۰ درصد و یا کم‌تر از ۵۰ درصد در نظر گرفته شود. اگر برای مطالعه حاضر سطح اطمینان ۵۰ درصد را در نظر بگیریم، همان‌طور که از نمودارهای شکل ۵-۱۴ و شکل ۵-۱۵ مشخص است، پروژه حداکثر با هزینه نهایی حدود ۷۶۳۳۴۰۰۰۰۰۰ تومان و زمان نهایی ۲۲۷۱ روز به اتمام می‌رسد. البته باید توجه داشت که این زمان و هزینه نهایی برای وقتی است که تونل تنها از یک‌طرف (ورودی یا خروجی) حفاری شود، زیرا در پرسشنامه خواسته‌شده که زمان و هزینه‌ها طوری تخمین زده شوند که فرض شود تونل تنها از یک طرف حفاری خواهد شد. زمانی که فرض بر این باشد که تونل از دو طرف حفاری شود، زمان نهایی نصف زمان بدست‌آمده برای یک‌طرف و هزینه آن نیز کاهش می‌یابد زیرا برای زمان کم‌تر، هزینه نیز کم‌تر تحت تأثیر افزایش هزینه‌های سالیانه قرار خواهد گرفت.



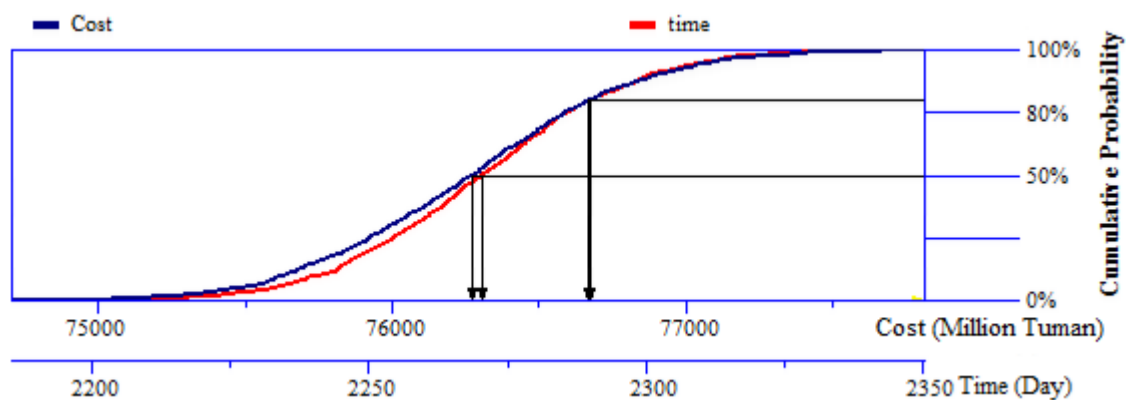
شکل ۵-۱۴: نمودار ستونی برای نمایش نحوه توزیع نتایج مربوط به هزینه نهایی پروژه تونل همرو.



شکل ۵-۱۵: نمودار ستونی برای نمایش نحوه توزیع نتایج مربوط به مدت زمان نهایی پروژه تونل همرو.

– نمودار تجمعی

شکل ۵-۱۶ نمودار تجمعی مدت زمان نهایی و هزینه نهایی پروژه تونل همرو را نشان می دهد. به کمک این نمودار می توان احتمال دستیابی به مقادیر متفاوتی از مدت زمان نهایی و هزینه نهایی پروژه را مشخص ساخت. در این نمودار دو مقدار مختلف زمان و هزینه نهایی پروژه تونل همرو با سطح اطمینان های ۵۰٪ و ۸۰٪ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۶: نمودار تجمعی برای نمایش مدت زمان و هزینه نهایی پروژه با سطوح اطمینان متفاوت.

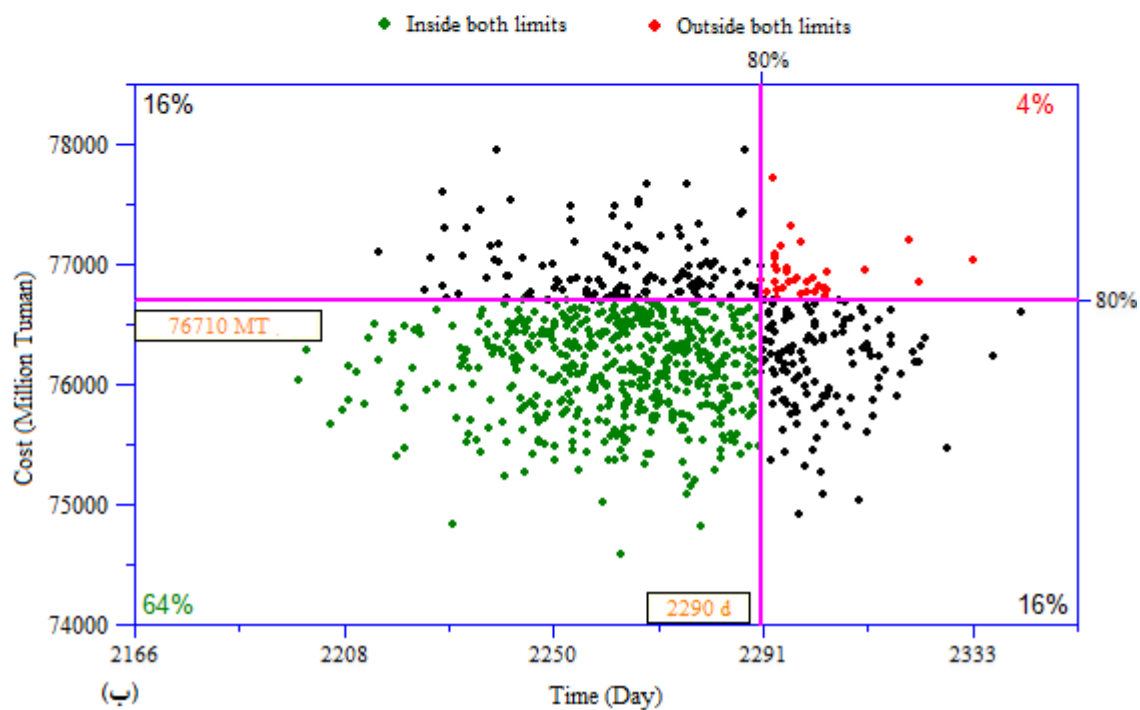
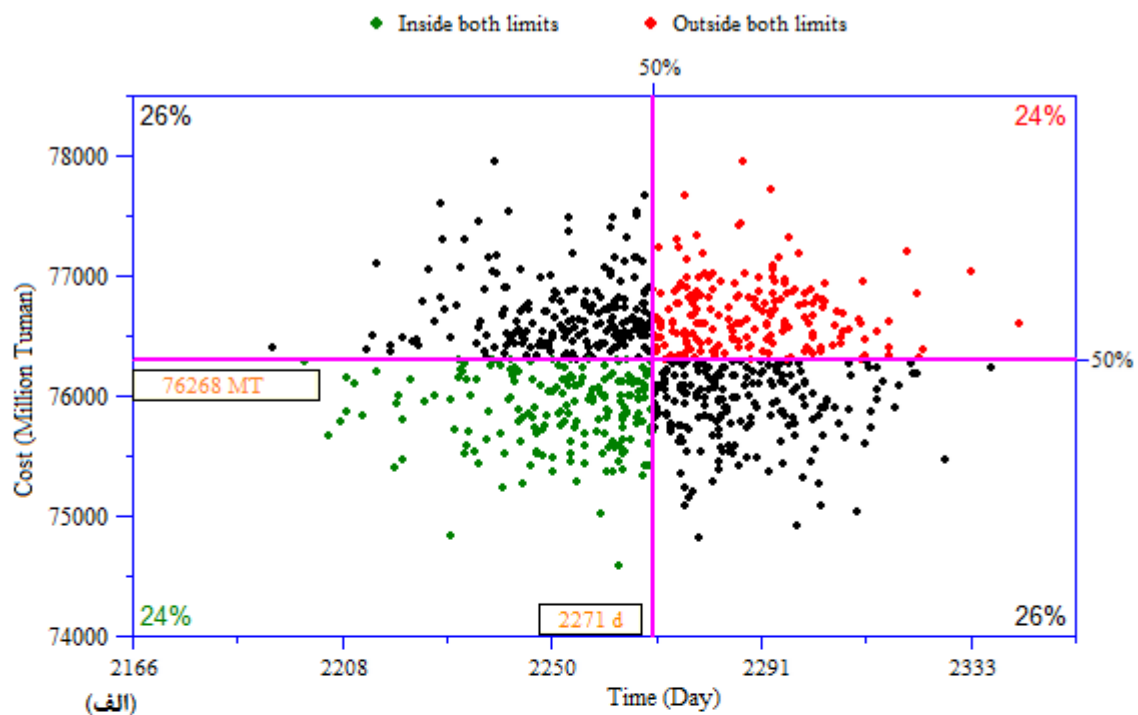
- نمودار پراکندگی

برای نشان دادن ارتباط میان دو متغیر مدت زمان نهایی و هزینه نهایی پروژه تونل همرو، از نمودار پراکندگی مطابق شکل ۵-۱۷ استفاده شده است. این نمودار برای مثال تعیین می کند که با سطح اطمینان معینی چه زمان و چه هزینه‌ای برای پروژه نیاز می باشد. در شکل ۵-۱۷ (الف)، مدت زمان نهایی و هزینه نهایی برای پروژه تونل همرو با سطح اطمینان ۵۰ درصد نشان داده شده است. همان طور که از این نمودار مشخص است، نقاط با سه رنگ متفاوت نشان داده شده اند. خط افقی و عمودی واقع در چهارچوب نمودار به ترتیب بیان کننده وقوع هزینه نهایی و مدت زمان نهایی پروژه با سطح اطمینان مشخصی می باشند. برای مثال سطح اطمینان ۵۰٪ برای هزینه نهایی به این معنی است که نصف نقاط شبیه سازی بالای خط افقی و نصف آن ها پایین این خط واقع هستند. همچنین سطح اطمینان ۵۰٪ برای مدت زمان نهایی به این معنی است که نصف نقاط شبیه سازی در سمت چپ خط عمودی و نصف آن ها در سمت راست این خط می باشند. نقاط سبز معرف نقاطی هستند که پایین خط افقی (برای هزینه) و در سمت چپ خط عمودی (برای مدت زمان) واقع هستند. این نقاط سبزرنگ به این معنی هستند که زمان و هزینه نهایی مربوط به آن ها با سطح اطمینان کم تر از سطح اطمینان مشخص شده به ترتیب به وسیله خط عمودی و افقی می باشد و هر چه سطح اطمینان در نظر گرفته شده به وسیله دو خط افقی و عمودی بیش تر باشد، این نقاط سبزرنگ بیش تر بوده و عدم قطعیت کم تر خواهد شد. نقاط قرمز رنگ عکس نقاط سبزرنگ هستند و با افزایش سطح اطمینان در نظر گرفته شده به وسیله دو خط افقی و عمودی، تعداد آن ها کم تر شده و عدم قطعیت کاهش خواهد یافت. نقاط سیاه، نقاطی هستند که برای یکی از خط های افقی و عمودی سبز بوده و برای دیگری قرمز هستند. هر چه سطح اطمینان در نظر گرفته شده به وسیله دو خط عمودی و افقی بیش تر باشد، تعداد نقاط سیاه رنگ کم تر شده و در نتیجه عدم قطعیت کاهش خواهد یافت (شکل ۵-۱۷ (ب)).

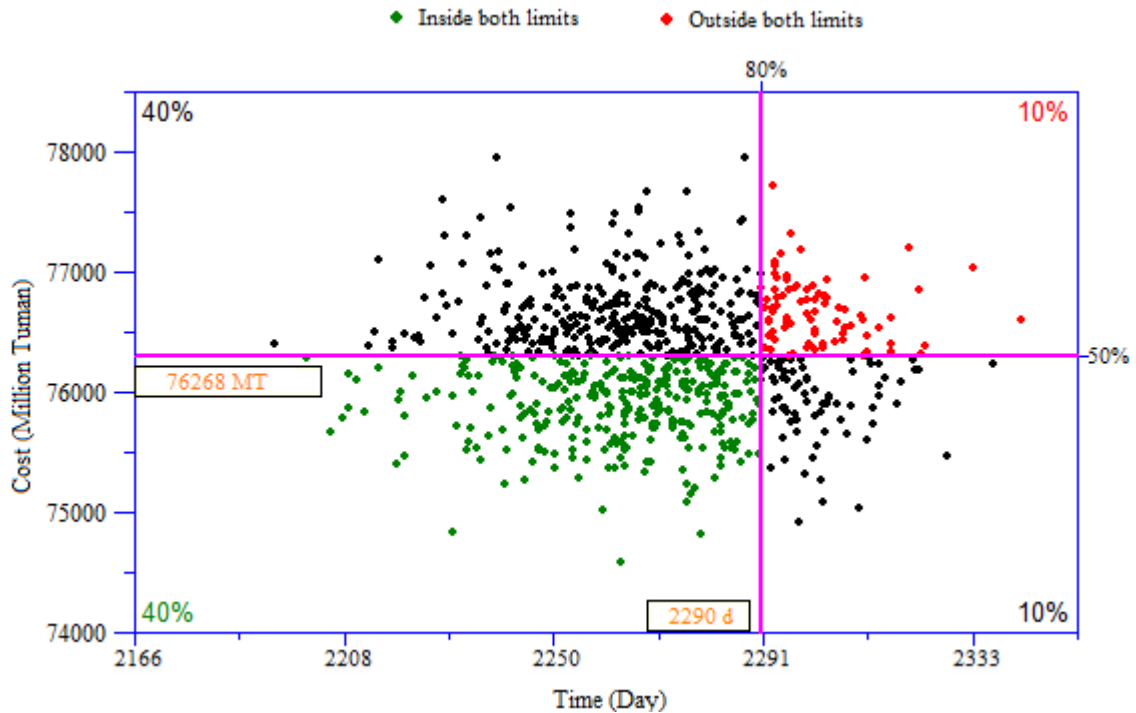
گاهی اوقات شرایط به گونه ای است که ایجاب می کند عدم قطعیت یکی از متغیرها (زمان و هزینه)

کم تر یا بیش تر از یکی دیگر باشد. زمانی که برای مثال مطابق شکل ۵-۱۸ می خواهیم در مورد مدت زمان پروژه عدم قطعیت کم تری داشته باشیم (یعنی مدت زمان انجام پروژه مهم تر باشد)، در این صورت سطح اطمینان در نظر گرفته شده به وسیله خط عمودی (برای مدت زمان) باید بیش تر از خط افقی (برای هزینه) باشد؛ به این معنی که نقاط سبز رنگ برای خط عمودی بیش تر از خط افقی باشد.

بنابراین بسته به شرایط اقتصادی جامعه، نوع پروژه و سایر موارد که می توانند تأثیرگذار باشند، عدم قطعیت می تواند برای زمان و هزینه نهایی تونل متفاوت در نظر گرفته شود و در برنامه ریزی های اولیه از آن استفاده کرد.



شکل ۵-۱۷: نمودار پراکندگی برای بیان ارتباط میان دو متغیر مدت زمان و هزینه نهایی پروژه تونل همرو. (الف) نسبت به (ب) دارای عدم قطعیت بیش تری می باشد.



شکل ۵-۱۸: نمودار پراکندگی زمان-هزینه پروژه همرو وقتی که عدم قطعیت کمتری در مورد مدت زمان انجام پروژه در نظر گرفته شود.

نتایجی که تا اینجا برای مدت زمان و هزینه ساخت کل تونل همرو به صورت احتمالاتی بدست آمد، با استفاده از روش DAT به کمک داده‌های قبل از شروع به ساخت تونل بود. با توجه به این که داده‌های بعد از ساخت تونل همرو نیز در دسترس بود، بنابراین برای اعتبارسنجی مدل DAT جهت بکارگیری در پروژه‌های آتی، در این مطالعه با استفاده از داده‌های بدست آمده بعد از ساخت تونل (داده‌های واقعی)، زمان و هزینه ساخت کل تونل همرو بدست آمد و با نتایج بدست آمده از داده‌های قبل از ساخت مقایسه شد. در بخش بعدی، این مسئله مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۴-۶- اعتبارسنجی مدل DAT به کمک داده‌های بعد از ساخت

بعد از این که مدت زمان و هزینه کل ساخت تونل همرو به کمک روش DAT با بکارگیری داده‌های قبل از شروع به ساخت بدست آمد، تصمیم بر آن شد تا این نتایج با نتایج بدست آمده برای مدت زمان و هزینه تونل همرو به کمک داده‌های بعد از ساخت (داده‌های واقعی) مقایسه گردد و به عبارتی روش

DAT جهت بکارگیری آن در پروژه‌های آتی، اعتبارسنجی شود. با بررسی داده‌های بعد از ساخت تونل که توسط شرکت راهیاب‌ملل بدست آمد، مشخص شد که در حالت واقعی مدت‌زمان نهایی و هزینه نهایی پروژه تونل همرو با فرض این که سال شروع ساخت سال ۱۳۹۴ باشد (در حالت واقعی سال شروع ساخت تونل همرو ۱۳۸۹ بوده و قبل از سال ۱۳۹۴ به اتمام رسیده است) و تونل تنها از طرف ورودی یا خروجی حفاری شود، به ترتیب برابر ۲۲۵۶ روز (۶/۳۳۷ سال) و ۷۶۵۶۰۸۷۹۰۰۰ تومان می‌باشد. دلیل فرض نمودن حفاری تونل تنها از یک طرف این بود که چون در روش DAT همزمان از دو طرف ورودی و خروجی تونل پیش‌بینی‌ها انجام نشده بود و فرض شد تونل از یک طرف حفاری شود، بنابراین برای حالت واقعی، زمان و هزینه کل تونل به حالتی تبدیل شده که فرض شود تونل تنها از یک طرف حفاری شود.

مدت‌زمان و هزینه بدست‌آمده برای اجرای تونل همرو به کمک داده‌های بعد از ساخت، به ترتیب با سطح اطمینان ۲۷٪ و ۷۲٪ در نمودارهای بدست‌آمده قبلی با استفاده از روش DAT اتفاق می‌افتند. از آنجایی که در این مقاله سطح اطمینان ۵۰٪ به‌عنوان یک حالت بهینه در نظر گرفته شد، می‌توان گفت ۱۵ روز بیش‌تر برای زمان و حدود ۳۰۰ میلیون کم‌تر برای هزینه‌ها نسبت به حالت واقعی در نظر گرفته شده است و در این صورت تفاوت چندانی با حالت واقعی ندارد. بنابراین، مشخص شد که نتایج بدست‌آمده برای مدت‌زمان و هزینه ساخت کل تونل همرو به کمک داده‌های بعد از ساخت، مطابقت زیادی با زمان و هزینه نهایی بدست‌آمده با روش DAT (با سطح اطمینان ۵۰٪) به کمک داده‌های قبل از شروع به ساخت دارد. از این‌رو می‌توان در برآورد مدت‌زمان و هزینه‌های ساخت تونل برای پروژه‌های آتی، از روش DAT قبل از شروع به ساخت استفاده کرد و عدم قطعیت‌ها را به‌طور قابل‌توجهی به‌منظور کاهش ریسک تصمیم‌گیری مدت‌زمان و هزینه‌ها در مرحله برنامه‌ریزی‌های اولیه کاهش داد.

۵-۵- نتیجه‌گیری

در این فصل از تونل همرو به‌عنوان مطالعه موردی جهت بدست آوردن زمان و هزینه نهایی ساخت به کمک روش DAT استفاده شد. برای دستیابی به بسیاری از داده‌ها، از نظر ۱۰ نفر کارشناس تونل سازی با در اختیار دادن پرسشنامه‌هایی، بهره گرفته شد. در پایان به کمک مدل مارکوف، مدل زمین‌شناسی برای سه پارامتر نوع سنگ، RQD و آب زیرزمینی اجرا شد و در نهایت نمودار تغییر حالت کلاس زمین بدست آمد. در مدل ساخت به کمک نمودار تغییر حالت کلاس زمین و با توجه به نظر افراد کارشناس، برای هر کلاس زمین، روش حفاری و سیستم نگهداری همراه با زمان و هزینه مربوط به اجرای هر سیکل از این کلاس‌ها بدست آمد و سپس جهت دستیابی به مدت‌زمان نهایی و هزینه نهایی، از روش شبیه‌سازی مونت کارلو به کمک نرم‌افزار Primavera Risk Analysis استفاده شد و در نهایت از نمودارهای ستونی، تجمعی و پراکندگی برای نشان دادن زمان و هزینه نهایی ساخت تونل همرو با سطح اطمینان‌های مشخصی بهره گرفته شد.

در این مطالعه از سطح اطمینان ۵۰٪ برای زمان و هزینه نهایی ساخت استفاده شد که بر این اساس ساخت پروژه تونل می‌تواند در حداکثر هزینه نهایی حدود ۷۶۳۳۴۰۰۰۰۰۰ تومان و زمان نهایی ۲۲۷۱ روز به اتمام برسد. البته باید توجه داشت که این زمان و هزینه نهایی برای وقتی است که تونل تنها از یک‌طرف (ورودی یا خروجی) حفاری شود، زیرا در پرسشنامه خواسته شده که زمان و هزینه‌ها طوری تخمین زده شوند که فرض شود تونل تنها از یک طرف حفاری خواهد شد. زمانی که فرض بر این باشد که تونل از دو طرف حفاری شود، زمان نهایی نصف زمان بدست‌آمده برای یک‌طرف و هزینه آن نیز کاهش می‌یابد زیرا برای زمان کم‌تر، هزینه نیز کم‌تر تحت تأثیر افزایش هزینه‌های سالیانه قرار خواهد گرفت.

در حالت واقعی مدت‌زمان نهایی و هزینه نهایی پروژه تونل همرو با فرض این که سال شروع ساخت سال ۱۳۹۴ باشد و تونل تنها از طرف ورودی یا خروجی حفاری شود، به ترتیب برابر ۲۲۵۶ روز (۶/۳۳۷)

سال) و ۷۶۵۶۰۸۷۹۰۰۰ تومان بدست آمد. بنابراین مشخص شد که این مدت‌زمان و هزینه بدست‌آمده برای اجرای تونل همرو در حالت واقعی، به ترتیب با سطح اطمینان ۲۷٪ و ۷۱٪ در نمودارهای بدست‌آمده با استفاده از روش DAT اتفاق می‌افتند. از آنجایی که در این مقاله سطح اطمینان ۵۰٪ به‌عنوان یک حالت بهینه در نظر گرفته شد، حدود ۱۵ روز بیش‌تر برای زمان و ۳۰۰ میلیون کم‌تر برای هزینه‌ها نسبت به حالت واقعی تخمین زده شده بود و مشخص شد که این نتایج تفاوت چندانی با حالت واقعی ندارند. بنابراین نتیجه شد که می‌توان در برآورد مدت‌زمان و هزینه‌های ساخت تونل برای پروژه‌های آتی، روش DAT را قبل از شروع به ساخت بکار برد و عدم قطعیت‌ها را به‌طور قابل‌توجهی به‌منظور کاهش ریسک تصمیم‌گیری مدت‌زمان و هزینه‌ها در مرحله برنامه‌ریزی‌های اولیه کاهش داد.

فصل هشتم:

نتیجہ گیری و پیشہ اداوات

۶-۱- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، روش DAT جهت دستیابی به زمان و هزینه کل تونل راه همرو (زمان و هزینه مربوط به حفاری و نگهداری) به کمک داده‌های موجود قبل از شروع به ساخت تونل بکار گرفته شد.

روش DAT در مدل زمین‌شناسی احتمال وقوع هر حالت از پارامترهای در نظر گرفته‌شده را در مسیر تونل به کمک مدل مارکوف پیش‌بینی می‌کند. در این پژوهش به‌منظور دستیابی به احتمال وقوع حالات پارامترها در مسیر تونل، ابتدا کل مسیر تونل به بخش‌های مساوی تقسیم شد که از هر بخش به‌عنوان یک سلول نام برده شده است. از میان این سلول‌ها، ۲ سلول مربوط به موقعیت ورودی و خروجی تونل و چهار سلول هم مربوط به موقعیت چهار گمانه بودند که با توجه به در دسترس بودن داده‌های زمین‌شناسی در مورد آن‌ها به‌عنوان سلول‌های مشاهده‌ای در نظر گرفته شدند. بقیه نیز سلول‌های مجهول بودند. مدل مارکوف به کمک سلول‌های مشاهده‌ای می‌تواند احتمالات وقوع حالات پارامترها را در سلول‌های مجهول پیش‌بینی نماید. بسته به تعداد و نوع سلول‌های مشاهده‌ای در مسیر تونل، معادله مدل مارکوف به‌منظور پیش‌بینی حالات پارامترها در سلول‌های مجهول، متفاوت خواهد بود. در این پژوهش در کل مسیر تونل تعداد ۶ سلول مشاهده‌ای غیرقطعی موجود بود و در نتیجه معادله مارکوف مربوط به چند مشاهده غیرقطعی در نرم‌افزار متلب کد نویسی شد. برای دستیابی به داده‌های ورودی این معادله از نظر کارشناسان تونل سازی استفاده شد. در نهایت در نرم‌افزار متلب برای هر پارامتر (نوع سنگ، RQD و آب زیرزمینی) نموداری تحت عنوان نمودار تغییر حالت پارامتر بدست آمد که احتمال وقوع هر حالت از هر پارامتر را در داخل هر سلول بدست می‌داد. بعد از این مرحله، از ترکیب حالت‌های مربوط به سه پارامتر نوع سنگ، RQD و آب زیرزمینی، ۳۶ شرایط زمین‌شناسی متفاوت بدست آمد. توسط افراد کارشناس تونل سازی پنج کلاس زمین (هر کدام شامل روش حفاری و سیستم نگهداری معین) تعریف شد که هر کدام از این کلاس‌ها برای تعدادی از شرایط زمین‌شناسی (از میان ۳۶ شرایط بدست آمده) جوابگو بودند. سپس احتمال وقوع هر کدام از کلاس‌های زمین به کمک نمودارهای

تغییر حالت پارامتر و شرایط زمین‌شناسی مربوط به هر کلاس زمین، در داخل هر سلول بدست آمد. بنابراین نموداری شکل گرفت که احتمال وقوع هر کدام از ۵ کلاس زمین را در داخل هر سلول در مسیر تونل مشخص می‌ساخت که تحت عنوان نمودار تغییر حالت کلاس زمین در این پژوهش از آن اسم برده شده است. هدف مدل زمین‌شناسی دستیابی به نمودار تغییر حالت کلاس زمین است تا بتوان در فاز بعدی پژوهش که مدل ساخت می‌باشد از آن به‌عنوان یک ورودی استفاده نمود.

در مدل ساخت ابتدا برای هر کدام از ۵ کلاس زمین توسط ۱۰ نفر کارشناس تونل سازی میزان زمان و هزینه حداقل، متوسط و حداکثر مربوط به حفاری و نگهداری یک سیکل بدست آمد. سپس میزان زمان و هزینه‌های بدست آمده برای اجرای هر سیکل از کلاس‌های زمین، به زمان و هزینه اجرای هر سلول (۱۰ متر) تبدیل شد. با توجه به این‌که در نمودار تغییر حالت کلاس زمین احتمال وقوع هر کلاس در داخل هر سلول موجود است، بنابراین احتمال وقوع زمان و هزینه مربوط به هر کلاس نیز در داخل هر سلول موجود می‌باشد و به‌منظور دستیابی به زمان و هزینه نهایی ساخت تونل باید زمان و هزینه در تمام سلول‌ها با هم جمع شود؛ به همین منظور نرم‌افزار Primavera Risk Analysis بکار گرفته شد که شبیه‌سازی‌ها را بر مبنای روش مونت کارلو انجام می‌دهد. در این نرم‌افزار ابتدا ۱۳۱ سلول تعریف شد. به کمک تابع توزیع عمومی، در داخل هر سلول زمان و هزینه به‌صورت احتمالاتی وارد شد و سپس شبیه‌سازی‌ها برای ۱۰۰۰۰ بار اجرا شد. روش مونت کارلو در هر بار شبیه‌سازی در داخل هر سلول یک زمان و هزینه را انتخاب می‌کند و سپس زمان و هزینه تمام سلول‌ها را در هر بار شبیه‌سازی با هم جمع می‌کند که در واقع همان زمان و هزینه کل تونل برای هر بار شبیه‌سازی می‌باشد. در نهایت زمان و هزینه‌های متفاوتی با سطوح اطمینان مختلفی برای تونل همرو با طول ۱۳۱۰ متر و سطح مقطع ۹۷ مترمربع بدست آمد.

در این مطالعه از سطح اطمینان ۵۰٪ برای زمان و هزینه نهایی ساخت استفاده شد که بر این اساس ساخت پروژه تونل می‌تواند در حداکثر هزینه نهایی حدود ۷۶۳۳۴۰۰۰۰۰۰ تومان و زمان نهایی

۲۲۷۱ روز به اتمام برسد. البته باید توجه داشت که این زمان و هزینه نهایی برای وقتی است که تونل تنها از یک طرف (ورودی یا خروجی) حفاری شود، زیرا در پرسشنامه خواسته شده که زمان و هزینه‌ها طوری تخمین زده شوند که فرض شود تونل تنها از یک طرف حفاری خواهد شد. زمانی که فرض بر این باشد که تونل از دو طرف حفاری شود، زمان نهایی نصف زمان بدست آمده برای یک طرف و هزینه آن نیز کاهش می‌یابد زیرا برای زمان کمتر، هزینه نیز کمتر تحت تأثیر افزایش هزینه‌های سالیانه قرار خواهد گرفت.

در حالت واقعی مدت زمان نهایی و هزینه نهایی پروژه تونل همرو با فرض این که سال شروع ساخت سال ۱۳۹۴ باشد و تونل تنها از طرف ورودی یا خروجی حفاری شود، به ترتیب برابر ۲۲۵۶ روز (۶/۳۳۷ سال) و ۷۶۵۶۰۸۷۹۰۰۰ تومان بدست آمد. بنابراین مشخص شد که این مدت زمان و هزینه بدست آمده برای اجرای تونل همرو در حالت واقعی، به ترتیب با سطح اطمینان ۲۷٪ و ۷۱٪ در نمودارهای بدست آمده با استفاده از روش DAT اتفاق می‌افتند. از آنجایی که در این مقاله سطح اطمینان ۵۰٪ به عنوان یک حالت بهینه در نظر گرفته شد، حدود ۱۵ روز بیش‌تر برای زمان و ۳۰۰ میلیون کم‌تر برای هزینه‌ها نسبت به حالت واقعی تخمین زده شده بود و مشخص شد که این نتایج تفاوت چندانی با حالت واقعی ندارند. بنابراین نتیجه شد که می‌توان در برآورد مدت زمان و هزینه‌های ساخت تونل برای پروژه‌های آتی، روش DAT را قبل از شروع به ساخت بکار برد و عدم قطعیت‌ها را به‌طور قابل توجهی به‌منظور کاهش ریسک تصمیم‌گیری مدت زمان و هزینه‌ها در مرحله برنامه‌ریزی‌های اولیه کاهش داد.

۶-۲- پیشنهادات

روش DAT، یکی از روش‌های توانمند جهت برآورد زمان و هزینه نهایی فرایند ساخت یک تونل قبل از شروع به ساخت آن می‌باشد. با تکیه به مطالب ارائه شده در فصل‌های قبل، موارد زیر به‌عنوان پیشنهادها این مطالعه می‌تواند ارائه شود:

۱- مدل‌های ارائه شده برای ابزار DAT، شامل دو مدل زمین‌شناسی و مدل ساخت می‌باشد. علاوه

بر این دو مدل، می‌توان یک مدل دیگر تحت عنوان مدل منابع نیز جهت ارزیابی زمان و هزینه در نظر گرفت. مدل منابع شامل تمام منابع موردنیاز جهت ساخت تونل و همچنین تمام منابع خارج‌شده از تونل از جمله مواد حفاری می‌باشد. بدون شک این مواد برای ورود و خروج آن‌ها، زمان و هزینه‌هایی لازم است که بایستی در نظر گرفته شود.

۲- جهت ارزیابی عدم قطعیت‌ها در نرم‌افزار DAT، از روش‌های آماری و احتمالاتی مختلفی استفاده می‌شود و جهت استفاده از آن‌ها باید نرم‌افزارهای مختلفی را بکار برد که این کار را پیچیده خواهد کرد. جهت برآورد عدم قطعیت‌ها در پروژه‌های مختلف برای این که هر بار لازم نباشد کل مراحل را انجام داد و زمان زیادی را صرف آن نمود، بهتر است نرم‌افزاری در این زمینه تهیه شود و مخصوص ابزار DAT باشد.

۳- روش DAT، تا حالا تنها در تونل‌ها استفاده شده است. می‌توان با توسعه آن، آن را در سایر پروژه‌های عمرانی و معدنی نیز بکار برد.

۴- برای گسترش کاربرد مدل مارکوف در مدل‌سازی پارامترهای مختلف در حیطه علوم زمین می‌توان از روش مدل مخفی مارکوف نیز استفاده کرد و نتایج آن را با مدل مارکوف مقایسه کرد. از این رو با توجه به دقت مدل‌سازی با مدل‌های مختلف مارکوف، می‌توان در خصوص تخمین و مدل‌سازی پارامترهای متفاوت، از روش مناسب جهت دستیابی به دقت بالا استفاده کرد.

۵- همان‌طور که می‌دانیم، اطلاعات مربوط به گمانه‌ها در برخی از نقاط عمقی به دلایل مختلف از جمله ریزش چاه و غیره از کیفیت قابل قبولی برخوردار نمی‌باشد که این امر خود موجب نقصان در تخمین حالت‌های هر کدام از پارامترهای در نظر گرفته شده در موقعیت گمانه‌ها می‌شود. به‌عنوان مطالعه موردی پیشنهاد می‌شود از مدل زمین‌شناسی روش DAT در تخمین گمانه‌ها برای حالاتی که این اطلاعات دچار کمبود و یا عدم کیفیت کافی هستند، استفاده شود.

مراجع

مراجع

- [1] Chan. M. H. C. (1981), PhD. thesis "A Geological Prediction and Updating Model in Tunneling", MIT., 236 p.
- [۲] مهندسين مشاور ره آور (۱۳۸۸) " گزارش مطالعات تونل‌های محور تيز تيز گاران - تونل همرو"، مرحله دوم، ۱۵۷ صفحه.
- [3] Christoph, Haas. (2000), PhD. thesis "Updating in the Decision Aids for Tunneling", MIT, 374 p.
- [4] S. Y. Min, H. H. Einstein, J. S. Lee, T.K. Kim (2003) "Application of Decision Aids for Tunneling (DAT) to a Drill and Tunnel", KSCE J.of.Civil Engineering, vol. 7, No. 5, pp. 619-628.
- [5] G. Ioannou, A. M. ASCE. (1989) "A Geological Prediction Model for Tunneling" Vol. 115, American Society of Civil Engineers, No. 3, pp. 339-356.
- [6] Primavera Software, 2009. Primavera Risk Analysis Ver. 8.7.0012.
- [7] Christoph. H (2000), PhD. thesis "Updating in the Decision Aids for Tunneling", MIT., 374 p.
- [8] Moret. Y (2011), PhD. thesis "Modeling Cost and Time Uncertainty in Rail Line Construction", MIT., 443 p.
- [9] K. Yost, A. Valentin, H. H. Einstein (2015) "Estimating Cost and Time of Well Bore Drilling for Engineered Geothermal Systems (EGS)-Considering Uncertainties", Geothermics Journal, vol. 5, pp. 85-99.
- [10] Photios G. Ioannou (1984), PhD. thesis "The Economic Value of Geologic Exploration as a Risk Reduction Strategy", MIT., 465 p.
- [۱۱] نیکوکار، مسعود، عربزاده، بهمن (۱۳۸۶) " آمار و احتمالات کاربردی"، چاپ اول، انتشارات آزاده، ۳۶۸ صفحه.
- [۱۲] نیکوگفتار، هانیه (۱۳۹۱) " استفاده از زنجیره مارکوف جهت مدل‌سازی رخساره‌های سنگی دریکی از مخازن نفتی جنوب غرب ایران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران.
- [13] Iosifescu, M (2007) "Finite Markov Processes and Their Applications", Dover Ed edition, 17, 207-224.
- [14] Ross. S. M (2009) "Introduction to Probability Models", Academic Press, 10 edition, 30, 452-482., 801 p.

- [۱۵] رضایی، فرهاد (۱۳۸۸) " نقشه اتوکد حفاری و ساخت تونل گذر دره"، شرکت مهندسی راهیاب، حفاری/۱.
- [16] Norris. J (2011) "Markov Chains", The Material Mainly Comes from Books of Norris, Grimmett & Stirzaker, Ross, Aldous & Fill, and Grinstead & Snell., 61 p.
- [17] Pinsky. M, Karlin. S (2010) "An Introduction to Stochastic Modeling", Academic Press, 4 edition, 40, 170-210., 149 p.
- [18] Vijaya. B. H (1995), PhD. thesis "Resource Modeling for DAT", MIT., 358 p.
- [۱۹] روزبهی، صادق، جدا، خدیجه (۱۳۸۷) " مدیریت ریسک پروژه با استفاده از Pertmaster"، چاپ اول، انتشارات کیان رایانه، ۶۴۰ صفحه.
- [۲۰] مهندسی مشاور راه یاب کردستان (۱۳۹۱) "نقشه زمین شناسی و ژئوتکنیکی تونل همرو"، فایل اتوکد.
- [21] MATLAB Software Ver. R2013a (8.1.0.604)

پوست ما

پیوست (الف)

نمونه پرسشنامه

هدف از این پرسشنامه، بکارگیری نظرات افراد متفحص و باتجربه در زمینه تونل سازی جهت پیش بینی ماتریس‌های احتمال انتقال برای پارامترهای موردنظر، کلاس‌های زمین (شامل روش حفاری و سیستم نگهداری) و زمان و هزینه هر چرخه از سافت کلاس مربوطه، و ... به کمک اطلاعات اولیه تونل است که قبل از سافت موجود می‌باشد.

از نتایجی که در این پرسشنامه بدست می‌آید؛ در پایان‌نامه کارشناسی ارشد آقای ارسلان محمودزاده دانشجوی رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی شاهرود با راهنمای دکتر شکراله زارع و مشاوره مهندس رحمان دارای بهره گرفته خواهد شد. از افراد باتجربه، اساتید دانشگاهی و صنعتگران عزیز خواهشمندیم که با ارائه نظرات خود در این پرسشنامه با توجه به توضیحات ذکرشده، در دست یافتن به نظری هر چه بهتر و دقیق‌تر در سؤالات، ما را کمک فرمایند.

نام و نام خانوادگی متفحص:

تفحص اصلی:

آخرین مدرک تحصیلی:

رتبه دانشگاهی:

محل خدمت:

سابقه کار در زمینه تونل سازی: سال

تاریخ تکمیل پرسشنامه:

در ادامه با توجه به نقشه اتوکد از پروفیل طولی تونل، به سؤالات جواب دهید. در هر سؤال یک پارامتر زمین‌شناسی یا ژئوتکنیکی با حالت‌های در نظر گرفته شده برای آن بیان می‌شود. اگر پارامتر موردنظر، n حالت داشته باشد، یک ماتریس مربعی $n \times n$ خواهیم داشت که باید با قضاوت مهندسی درایه‌های آن به دست آید. برای مثال در جدول ۱ اگر پارامتر نوع سنگ دارای سه حالت شیست، گرانیت و متاکوارتزیت باشد، درایه $1 \rightarrow 2$ به این معنی است که احتمال این‌که بعد از حالت ۱ (شیست)، حالت ۲ (گرانیت) در طول مسیر تونل اتفاق بیفتد، چقدر خواهد بود. درایه $2 \rightarrow 2$ احتمال این‌که حالت ۲ در ادامه همان حالت ۲ اتفاق بیفتد. همچنین درایه $2 \rightarrow 3$ به این معنی است که احتمال این‌که در ادامه حالت ۲ حالت ۳ اتفاق بیفتد، چقدر می‌باشد. برای سایر درایه‌ها نیز به همین شکل. توجه شود که مجموع احتمالات در هر سطر برابر با یک باشد و انتقال از یک حالت به خودش برابر صفر خواهد بود زیرا زمانی می‌گوییم انتقال صورت گرفته که حالت عوض شود.

مثال: پارامتر نوع سنگ با سه حالت شیست، گرانیت و متاکوارتزیت

جدول ۱: نمایش ماتریسی انتقال از یک حالت به خودش یا به حالت دیگری از پارامتر نوع سنگ.

| حالت | حالت ۱ (شیست) | حالت ۲ (گرانیت) | حالت ۳ (متاکوارتزیت) |
|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| حالت ۱ (شیست) | $1 \rightarrow 1$ | $1 \rightarrow 2$ | $1 \rightarrow 3$ |
| حالت ۲ (گرانیت) | $2 \rightarrow 1$ | $2 \rightarrow 2$ | $2 \rightarrow 3$ |
| حالت ۳ (متاکوارتزیت) | $3 \rightarrow 1$ | $3 \rightarrow 2$ | $3 \rightarrow 3$ |

لطفاً با توجه به توضیحات ارائه‌شده، با استفاده از نقشه اتوکد که شامل کلیه داده‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی قبل از شروع به ساخت تونل می‌باشد، درایه‌های مربوط به هرکدام از ماتریس‌های زیر را تخمین بزنید.

- ۱- پارامتر نوع سنگ با پنج حالت (جدول ۲): حالت ۱: آهک (Li) حالت ۲: شیل (SH)
حالت ۳: تناوب شیل های ماسه‌ای و آهک‌های شیلی (SHL) حالت ۴: تناوب آهک و شیل (LSH)

جدول ۲: ماتریس احتمال انتقال پارامتر نوع سنگ

| حالت | حالت ۱ | حالت ۲ | حالت ۳ | حالت ۴ |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| حالت ۱ | ۰ | | | |
| حالت ۲ | | ۰ | | |
| حالت ۳ | | | ۰ | |
| حالت ۴ | | | | ۰ |

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

جدول ۳: ماتریس احتمال انتقال پارامتر RQD

| حالت | حالت ۱ | حالت ۲ | حالت ۳ |
|--------|--------|--------|--------|
| حالت ۱ | ۰ | | |
| حالت ۲ | | ۰ | |
| حالت ۳ | | | ۰ |

۳- پارامتر آب زیرزمینی با ۳ حالت (جدول ۴): حالت ۱: کم حالت ۲: متوسط
حالت ۳: زیاد

جدول ۴: ماتریس احتمال انتقال پارامتر آب زیرزمینی

| حالت | حالت ۱ | حالت ۲ | حالت ۳ |
|--------|--------|--------|--------|
| حالت ۱ | ۰ | | |
| حالت ۲ | | ۰ | |
| حالت ۳ | | | ۰ |

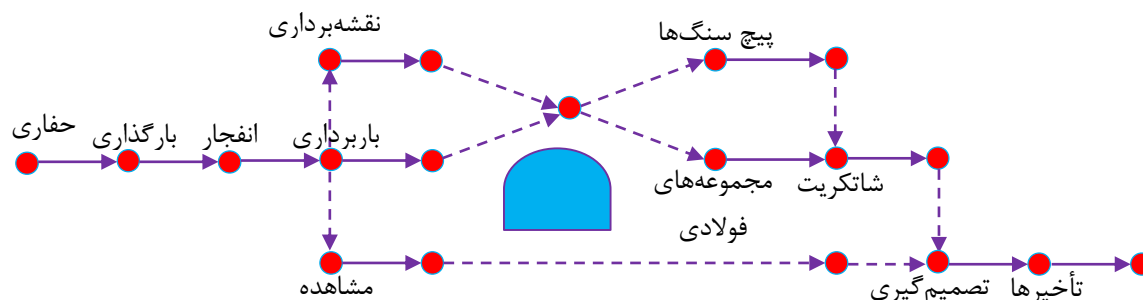
حال با توجه به پارامترها و حالت‌های در نظر گرفته شده برای آن‌ها، در کل $(3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81)$ شرایط مختلف زمین‌شناسی می‌تواند در طول مسیر تونل اتفاق بیفتد. بدیهی است که نمی‌توان برای هر کدام از این شرایط یک روش حفاری و سیستم نگهداری در نظر گرفت بلکه چند سیستم نگهداری (مثلاً ۴ تا) می‌تواند در نظر گرفت که هر کدام برای تعدادی از این شرایط مناسب باشند.

در جدول ۵، میزان وسعت (طول) میانگین هر حالت از هر پارامتر داده شده را به کمک نقشه زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی منطقه در مسیر خط A تخمین بزنید.

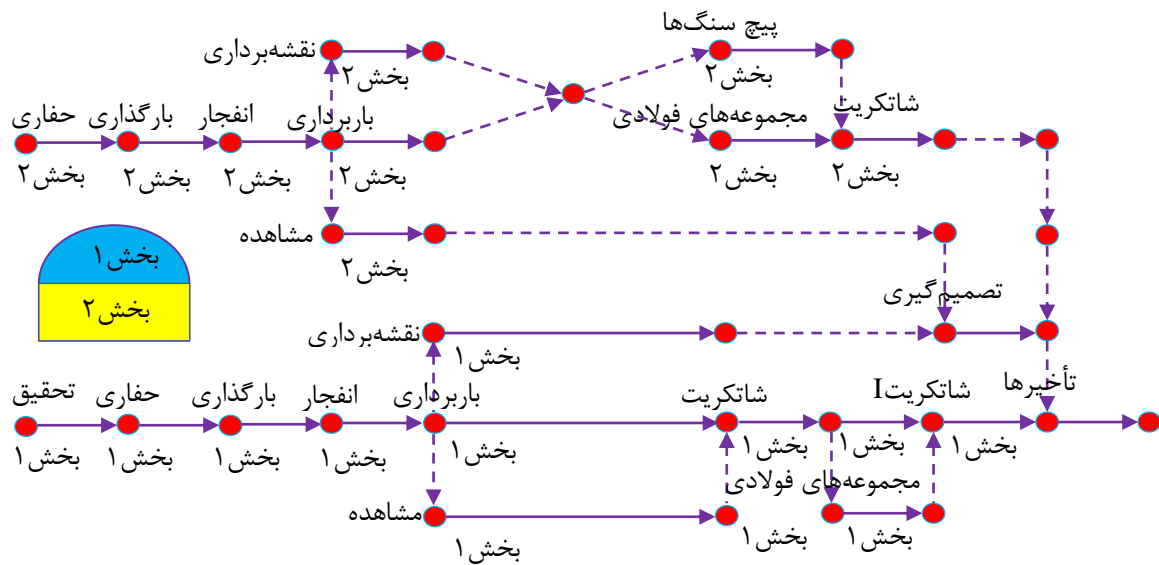
در ارزیابی زمان و هزینه یک چرخه (گام حفاری) برای کلاس زمین (روش حفاری و سیستم نگهداری) معین، بایستی شبکه فعالیت که شامل کلیه فعالیت‌ها از شروع تا اتمام ساخت چرخه موردنظر می‌باشد، در نظر گرفته شود. در شکل ۱ و شکل ۲ برای زمانی که مقطع عرضی تونل به ترتیب در یک بخش و در دو بخش با فعالیت‌هایی مربوط به کلاس زمین معینی حفاری شود، چرخه فعالیت نشان داده شده است. چرخه فعالیت برای هر کلاس زمین با توجه به نوع، تعداد و ترتیب اجرای فعالیت‌ها، متفاوت می‌باشد و بنابراین زمان و هزینه‌های مربوط به ساخت هر چرخه از کلاس‌های زمین باهم متفاوت خواهد بود.

جدول ۵: تخمین طول هر حالت از هر پارامتر در طول مسیر تونل

| نوع پارامتر | حالت پارامتر | طول میانگین حالت (متر) | | |
|-------------|--|------------------------|-------|--------|
| | | حداقل | متوسط | حداکثر |
| نوع سنگ | آهک (Li) | | | |
| | شیل (SH) | | | |
| | تناوب شیل های ماسه‌ای و آهک‌های شیلی (SHL) | | | |
| | تناوب آهک و شیل (LSH) | | | |
| RQD | کمتر از ۵ | | | |
| | ۵ تا ۲۵ | | | |
| | ۲۵ تا ۵۰ | | | |
| آب زیرزمینی | کم | | | |
| | متوسط | | | |
| | زیاد | | | |



شکل ۱: شبکه فعالیت یک چرخه از تونل برای زمانی که کل مقطع تونل در یک مرحله حفاری شود.



شکل ۲: شبکه فعالیت یک چرخه از تونل برای زمانی که مقطع تونل در دو مرحله مطابق شکل حفاری شود.

در جدول ۶ تعداد چند کلاس زمین که برای شرایط مختلف در طول تونل می‌تواند جوابگو باشد، انتخاب شده و برای هر کدام از این کلاس‌ها زمان و هزینه به ازای هر چرخه ساخت تخمین زده شود. در زمان و هزینه مربوط به هر کلاس زمین، زمان و هزینه مربوط به فعالیت‌ها و همچنین فاصله میان فعالیت‌های مختلف در یک چرخه ساخت (مثلاً زمان و هزینه مربوط به فاصله میان پایان فعالیت انفجار و شروع فعالیت باربرداری) مانند شکل ۱ و ۲ نیز بایستی به حساب آید. همچنین در تخمین زمان و هزینه باید با تجربه از پروژه‌های قبلی، خرابی ماشین‌آلات و سایر فعالیت‌ها (از جمله ورود و خروج مواد) که می‌توانند بر زمان و هزینه تأثیرگذار باشند، نیز در نظر گرفته شود.

در تخمین زمان و هزینه‌ها برای هر چرخه از کلاس زمین معین بایستی توجه داشت که این زمان و هزینه‌ها برای هنگامی است که تونل تنها از ورودی یا تنها از خروجی در حال حفاری باشد؛ یعنی این که برای کلاس زمین معینی چه مقدار زمان و هزینه لازم است تا از ورودی یا از خروجی یک متر ساخت تونل به صورت کامل اجرا شود.

با توجه به این گفته‌ها، در ادامه جدول ۶، چند نمودار درختی ارائه شده است و از کارشناسان محترم تقاضا می‌شود که در جلوی هر شاخه از نمودار درختی که دارای شرایط مختلفی می‌باشد، شماره

کلاس زمین مربوطه را با توجه به جدول ۶ در ستون مربوطه وارد نماید.

جدول ۶: تعریف چند کلاس زمین به گونه‌ای که بتواند برای شرایط مختلفی از تونل مورد نظر جوابگو باشد همراه با زمان و هزینه مربوط به هر گام حفاری از کلاس مربوطه

| شماره کلاس زمین | نوع روش حفاری و سیستم نگهداری (کلاس زمین) (شامل سیستم نگهداری، روش حفاری، تعداد بخش‌هایی که مقطع عرضی باید حفاری شود مثلاً در دو بخش هد و بنج، گام حفاری) | زمان به ازای هر گام حفاری (روز) | | | هزینه به ازای هر گام حفاری (تومان) | | | افزایش درصدی هزینه برای هر گام حفاری به صورت ماهیانه | | |
|-----------------|---|---------------------------------|-------|--------|------------------------------------|-------|--------|--|-------|--------|
| | | حداقل | متوسط | حداکثر | حداقل | متوسط | حداکثر | حداقل | متوسط | حداکثر |
| ۱ | | | | | | | | | | |
| ۲ | | | | | | | | | | |
| ۳ | ... | | | | | | | | | |

| نوع سنگ | RQD | آب زیر زمینی | شماره کلاس زمین |
|----------|-------|--------------|-----------------|
| آهک (Li) | <5 | کم | |
| | | متوسط | |
| | | زیاد | |
| | 5-25 | کم | |
| | | متوسط | |
| | | زیاد | |
| | | کم | |
| | 25-50 | متوسط | |
| | | زیاد | |
| | | کم | |

| نوع سنگ | RQD | آب زیر زمینی | شماره کلاس زمین |
|----------|-------|--------------|-----------------|
| شیل (SH) | <5 | کم | |
| | | متوسط | |
| | | زیاد | |
| | 5-25 | کم | |
| | | متوسط | |
| | | زیاد | |
| | | کم | |
| | 25-50 | متوسط | |
| | | زیاد | |
| | | کم | |

| نوع سنگ | RQD | آب زیر زمینی | شماره کلاس زمین |
|---|-------|--------------|-----------------|
| تناوب شیل های ماسه ای و آهک های شیلی (SHL) | <5 | کم | |
| | | متوسط | |
| | | زیاد | |
| | 5-25 | کم | |
| | | متوسط | |
| | | زیاد | |
| | | کم | |
| | 25-50 | متوسط | |
| | | زیاد | |
| | | کم | |

| نوع سنگ | RQD | آب زیر زمینی | شماره کلاس زمین |
|--------------------------|-------|--------------|-----------------|
| تناوب آهک و شیل (LSH) | <5 | کم | |
| | | متوسط | |
| | | زیاد | |
| | 5-25 | کم | |
| | | متوسط | |
| | | زیاد | |
| | | کم | |
| | 25-50 | متوسط | |
| | | زیاد | |
| | | کم | |

پیوست (ب)

محاسبات مربوط به احتمال وقوع کلاس زمین ۱ در موقعیت سلول l

بردارهای زمین‌شناسی

$$\begin{array}{cccc}
 g_{11} = (1, 1, 1) & g_{12} = (1, 1, 2) & g_{13} = (1, 1, 3) & g_{14} = (2, 1, 1) \\
 g_{15} = (2, 1, 2) & g_{16} = (2, 1, 3) & g_{17} = (3, 1, 1) & g_{18} = (3, 1, 2) \\
 g_{19} = (3, 1, 3) & g_{110} = (4, 1, 1) & g_{111} = (4, 1, 2) & g_{112} = (4, 1, 3) \\
 g_{113} = (2, 2, 2) & & g_{114} = (2, 2, 3) &
 \end{array}$$

 $P[g(l) \text{ belongs to } GC_1]$

$$= P \left[\begin{array}{l}
 g(l) = g_{11} \text{ or } g(l) = g_{12} \text{ or } g(l) = g_{13} \text{ or } g(l) = g_{14} \\
 g(l) = g_{15} \text{ or } g(l) = g_{16} \text{ or } g(l) = g_{17} \text{ or } g(l) = g_{18} \\
 g(l) = g_{19} \text{ or } g(l) = g_{110} \text{ or } g(l) = g_{111} \text{ or } g(l) = g_{112} \\
 g(l) = g_{113} \text{ or } g(l) = g_{114}
 \end{array} \right]$$

$$\begin{aligned}
 &= P[g(l) = g_{11}] + P[g(l) = g_{12}] + P[g(l) = g_{13}] + P[g(l) = g_{14}] \\
 &+ P[g(l) = g_{15}] + P[g(l) = g_{16}] + P[g(l) = g_{17}] + P[g(l) = g_{18}] \\
 &+ P[g(l) = g_{19}] + P[g(l) = g_{110}] + P[g(l) = g_{111}] + P[g(l) = g_{112}] \\
 &+ P[g(l) = g_{113}] + P[g(l) = g_{114}]
 \end{aligned}$$

| | |
|---|---|
| $= P[r(l) = 1 \text{ and } d(l) = 1 \text{ and } w(l) = 1]$ $+ P[r(l) = 1 \text{ and } d(l) = 1 \text{ and } w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 1 \text{ and } d(l) = 1 \text{ and } w(l) = 3]$ $+ P[r(l) = 2 \text{ and } d(l) = 1 \text{ and } w(l) = 1]$ $+ P[r(l) = 2 \text{ and } d(l) = 1 \text{ and } w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 2 \text{ and } d(l) = 1 \text{ and } w(l) = 3]$ $+ P[r(l) = 3 \text{ and } d(l) = 1 \text{ and } w(l) = 1]$ $+ P[r(l) = 3 \text{ and } d(l) = 1 \text{ and } w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 3 \text{ and } d(l) = 1 \text{ and } w(l) = 3]$ $+ P[r(l) = 4 \text{ and } d(l) = 1 \text{ and } w(l) = 1]$ $+ P[r(l) = 4 \text{ and } d(l) = 1 \text{ and } w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 4 \text{ and } d(l) = 1 \text{ and } w(l) = 3]$ $+ P[r(l) = 2 \text{ and } d(l) = 2 \text{ and } w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 2 \text{ and } d(l) = 2 \text{ and } w(l) = 3]$ | $P[g(l) \text{ belongs to GC}_1]$ $= P[r(l) = 1] * P[d(l) = 1] * P[w(l) = 1]$ $+ P[r(l) = 1] * P[d(l) = 1] * P[w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 1] * P[d(l) = 1] * P[w(l) = 3]$ $+ P[r(l) = 2] * P[d(l) = 1] * P[w(l) = 1]$ $+ P[r(l) = 2] * P[d(l) = 1] * P[w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 2] * P[d(l) = 1] * P[w(l) = 3]$ $+ P[r(l) = 3] * P[d(l) = 1] * P[w(l) = 1]$ $+ P[r(l) = 3] * P[d(l) = 1] * P[w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 3] * P[d(l) = 1] * P[w(l) = 3]$ $+ P[r(l) = 4] * P[d(l) = 1] * P[w(l) = 1]$ $+ P[r(l) = 4] * P[d(l) = 1] * P[w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 4] * P[d(l) = 1] * P[w(l) = 3]$ $+ P[r(l) = 2] * P[d(l) = 2] * P[w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 2] * P[d(l) = 2] * P[w(l) = 3]$ |
|---|---|

محاسبات مربوط به احتمال وقوع کلاس زمین ۲ در موقعیت سلول l

بردار زمین‌شناسی

$$g_{11} = (2, 2, 1)$$

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

$$= P[g(l) = g_{11}]$$

$$= P[r(l) = 2 \text{ and } d(l) = 2 \text{ and } w(l) = 1]$$

$$= P[r(l) = 2] * P[d(l) = 2] * P[w(l) = 1]$$

محاسبات مربوط به احتمال وقوع کلاس زمین ۳ در موقعیت سلول l

بردارهای زمین‌شناسی

$$g_{31} = (1, 2, 1)$$

$$g_{32} = (1, 2, 2)$$

$$g_{33} = (1, 2, 3)$$

$$g_{34} = (4, 2, 1)$$

$$g_{35} = (4, 2, 2)$$

$$g_{36} = (4, 2, 3)$$

$$g_{37} = (1, 3, 3)$$

$$g_{38} = (3, 3, 3)$$

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

$$= P \left[\begin{array}{l} g(l) = g_{31} \text{ or } g(l) = g_{32} \text{ or } g(l) = g_{33} \text{ or } g(l) = g_{34} \\ g(l) = g_{35} \text{ or } g(l) = g_{36} \text{ or } g(l) = g_{37} \text{ or } g(l) = g_{38} \end{array} \right]$$

$$= P[g(l) = g_{31}] + P[g(l) = g_{32}] + P[g(l) = g_{33}] + P[g(l) = g_{34}]$$

$$+ P[g(l) = g_{35}] + P[g(l) = g_{36}] + P[g(l) = g_{37}] + P[g(l) = g_{38}]$$

| | |
|--|--|
| $P[g(l) \text{ belongs to } GC_r]$ $= P[r(l) = 1 \text{ and } d(l) = 2 \text{ and } w(l) = 1]$ $+ P[r(l) = 1 \text{ and } d(l) = 2 \text{ and } w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 1 \text{ and } d(l) = 2 \text{ and } w(l) = 3]$ $+ P[r(l) = 4 \text{ and } d(l) = 2 \text{ and } w(l) = 1]$ $+ P[r(l) = 4 \text{ and } d(l) = 2 \text{ and } w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 4 \text{ and } d(l) = 2 \text{ and } w(l) = 3]$ $+ P[r(l) = 1 \text{ and } d(l) = 3 \text{ and } w(l) = 3]$ $+ P[r(l) = 3 \text{ and } d(l) = 3 \text{ and } w(l) = 3]$ | $P[g(l) \text{ belongs to } GC_r]$ $= P[r(l) = 1] * P[d(l) = 2] * P[w(l) = 1]$ $+ P[r(l) = 1] * P[d(l) = 2] * P[w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 1] * P[d(l) = 2] * P[w(l) = 3]$ $+ P[r(l) = 4] * P[d(l) = 2] * P[w(l) = 1]$ $+ P[r(l) = 4] * P[d(l) = 2] * P[w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 4] * P[d(l) = 2] * P[w(l) = 3]$ $+ P[r(l) = 1] * P[d(l) = 3] * P[w(l) = 3]$ $+ P[r(l) = 3] * P[d(l) = 3] * P[w(l) = 3]$ |
|--|--|

محاسبات مربوط به احتمال وقوع کلاس زمین ۴ در موقعیت سلول l

بردارهای زمین شناسی

| | | | |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $g_{f1} = (1, 3, 2)$ | $g_{f2} = (2, 3, 2)$ | $g_{f3} = (3, 3, 2)$ | $g_{f4} = (2, 3, 3)$ |
| $g_{f5} = (4, 3, 3)$ | $g_{f6} = (3, 2, 1)$ | $g_{f7} = (3, 2, 2)$ | $g_{f8} = (3, 2, 3)$ |

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

$$= P \left[\begin{array}{l} g(l) = g_{f1} \text{ or } g(l) = g_{f2} \text{ or } g(l) = g_{f3} \text{ or } g(l) = g_{f4} \\ g(l) = g_{f5} \text{ or } g(l) = g_{f6} \text{ or } g(l) = g_{f7} \text{ or } g(l) = g_{f8} \end{array} \right]$$

$$= P[g(l) = g_{f1}] + P[g(l) = g_{f2}] + P[g(l) = g_{f3}] + P[g(l) = g_{f4}]$$

$$+ P[g(l) = g_{f5}] + P[g(l) = g_{f6}] + P[g(l) = g_{f7}] + P[g(l) = g_{f8}]$$

| | |
|---|---|
| $P[g(l) \text{ belongs to } GC_{\neq}]$ $= P[r(l) = 1 \text{ and } d(l) = 3 \text{ and } w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 2 \text{ and } d(l) = 3 \text{ and } w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 3 \text{ and } d(l) = 3 \text{ and } w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 2 \text{ and } d(l) = 3 \text{ and } w(l) = 3]$ $+ P[r(l) = 4 \text{ and } d(l) = 3 \text{ and } w(l) = 3]$ $+ P[r(l) = 3 \text{ and } d(l) = 2 \text{ and } w(l) = 1]$ $+ P[r(l) = 3 \text{ and } d(l) = 2 \text{ and } w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 3 \text{ and } d(l) = 2 \text{ and } w(l) = 3]$ | $P[g(l) \text{ belongs to } GC_{\neq}]$ $= P[r(l) = 1] * P[d(l) = 3] * P[w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 2] * P[d(l) = 3] * P[w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 3] * P[d(l) = 3] * P[w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 2] * P[d(l) = 3] * P[w(l) = 3]$ $+ P[r(l) = 4] * P[d(l) = 3] * P[w(l) = 3]$ $+ P[r(l) = 3] * P[d(l) = 2] * P[w(l) = 1]$ $+ P[r(l) = 3] * P[d(l) = 2] * P[w(l) = 2]$ $+ P[r(l) = 3] * P[d(l) = 2] * P[w(l) = 3]$ |
|---|---|

محاسبات مربوط به احتمال وقوع کلاس زمین ۵ در موقعیت سلول l

بردارهای زمین‌شناسی

$$g_{\Delta 1} = (1, 3, 1) \quad g_{\Delta 2} = (2, 3, 1) \quad g_{\Delta 3} = (3, 3, 1) \quad g_{\Delta 4} = (4, 3, 1)$$

$$g_{\Delta 5} = (4, 3, 2)$$

$$P[g(l) \text{ belongs to } GC_{\Delta}]$$

$$= P[g(l) = g_{\Delta 1} \text{ or } g(l) = g_{\Delta 2} \text{ or } g(l) = g_{\Delta 3} \text{ or } g(l) = g_{\Delta 4} \text{ or } g(l) = g_{\Delta 5}]$$

$$= P[g(l) = g_{\Delta 1}] + P[g(l) = g_{\Delta 2}] + P[g(l) = g_{\Delta 3}] + P[g(l) = g_{\Delta 4}] + P[g(l) = g_{\Delta 5}]$$

$$P[g(l) \text{ belongs to } GC_{\delta}]$$

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

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

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

$$+ P[r(l) = ۴ \text{ and } d(l) = ۳ \text{ and } w(l) = ۱]$$

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

$$P[g(l) \text{ belongs to } GC_{\delta}]$$

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

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

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

$$+ P[r(l) = ۴] * P[d(l) = ۳] * P[w(l) = ۱]$$

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

Abstract

Reducing the tunnels 'pre-construction uncertainties ,especially concerning the final time and cost of the tunnel can be useful in initial planning and can reduce the decision making risks to an acceptable level .DAT is a statistical method which probabilistically predicts the time and cost required for tunnel execution before the actual start of building operations. In this paper, using the DAT method and considering the pre-construction data of Hamro tunnel, the probabilistic time and construction cost of the entire tunnel was predicted. The new features presented in this study include the use of DAT method, using tunneling experts 'views through questionnaire to access the input data of DAT method, indecisive application of data relevant to the tunnel input and output and boring locations, coding of Markov model in MATLAB software to execute the geological model of DAT method, using Primavera Risk Analysis software in the construction model for implementing Monte Carlo simulation. Also comparison of the time and cost obtained from DAT method using the tunnel pre-construction data and the actual costs of tunnel execution and validation of the method to be used for the future projects are among the other advantages of the proposed method. Accordingly involving the above new features in the DAT method, the obtained results indicated high similarity with the actual results, confirming the validity of DAT method for decreasing the time and final cost uncertainties in execution of future projects.

Keywords :DAT, Uncertainty, Geological model, Construction model, Hamro road tunnel.



دانشگاه صنعتی شاهرود

Shahrood University of Technology
Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

**The Application of DAT Method in Tunneling - Case Study: Hamro
Road Tunnel**

Arsalan Mahmoodzadeh

Supervisor:
Dr. Shokrollah Zare

Advisor:
Rahman Darai

January 2016