نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)
tuse.shahroodut.
دوره‌ی ۱۴- شماره‌ی ۲/زمستان ۱۴۰۴

پیش بینی سازندهای خاک در مسیر حفاری TBM با استفاده از مدلسازی داده‌های گمانه‌های ژئوتکنیک

(مطالعه موردی خط ۲ متروی تبریز)

مقاله پژوهشی

علی کلانتری مزرعه نو[۱]؛ عنایت الله رنجینه خجسته [۲*]؛ حمید چاکری[۳]؛ علیرضا طالبی نژاد[۴]

۱- دانشجوی دکتری تخصصی؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، alikalantari.iut@gmail.com

۲- استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، khojasteh@sut.ac.ir

۳- دانشیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، Chakeri@sut.ac.ir

۴- سرپرست نظارت خط ۲ متروی تبریز؛ دانش‌آموخته‌ی دکتری تخصصی مهندسی مکانیک سنگ، a_talebinejad@yahoo.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۴/۰۳/۲۲؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۴/۰۶/۲۴

شماره صفحات: ۱۹۷ تا ۲۱۰

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2025.16391.1503

واژگان کلیدی

دستگاه *TBM*

پارامترهای ژئوتکنیک

مدل سازی

کریجینگ

چکیده

زمین‌شناسی و پارامترهای ژئوتکنیک همیشه یکی از مسائل مهم و موثر در اجرای پروژه‌های زیر زمینی به ویژه در تونل‌سازی به حساب می‌آید. این پژوهش به منظور توسعه یک روش سیستماتیک برای پیش‌بینی دقیق توزیع سازندهای خاکی در مسیر حفاری تونل با ماشین حفار تمام مقطع (*TBM*) انجام شد. مطالعه موردی بر روی خط ۲ متروی تبریز با طول حدود ۲۲ کیلومتر متمرکز بود که از سازندهای خاکی متنوعی عبور می‌کند. در این تحقیق، از داده‌های ژئوتکنیکی ۶ گمانه شامل جنس لایه‌ها در عمق‌های مختلف گمانه‌ها بود استفاده شد.روش اصلی به کار گرفته شده، کریجینگ شاخص (*Indicator Kriging*) بود که به عنوان یک تکنیک زمین‌آماری پیشرفته برای مدلسازی سه‌بعدی تغییرات مکانی لایه‌های خاکی مورد استفاده قرار گرفت. مراحل تحقیق شامل: ۱) دسته‌بندی لایه‌ها به سه گروه اصلی (رس، شن و ماسه، سیلت) بر اساس اندازه ذرات، ۲) منظم‌سازی داده‌ها با ایجاد نقاط مجازی در فواصل یک متری در طول گمانه‌ها، ۳) تحلیل ساختار فضایی داده‌ها با استفاده از واریوگرام‌های افقی و قائم برای هر گروه، و ۴) اعتبارسنجی مدل با روش *Cross-Validation* بود. نتایج نشان داد که مدل توسعه یافته با اعتبار ۸۰٪ قادر به پیش‌بینی توزیع لایه‌ها در نقاط نمونه‌برداری نشده می‌باشد. این روش می‌تواند به عنوان ابزاری قدرتمند برای کاهش عدم قطعیت در پروژه‌های تونل‌زنی، بهینه‌سازی مسیر حفاری و مدیریت ریسک‌های ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار گیرد.

۱- مقدمه

بررسی و پیش‌بینی پارامترهای ژئوتکنیکی در پروژه‌های تونل‌سازی همواره یکی از چالش‌های اصلی مهندسین در این حوزه می‌باشد. به همین دلیل روش‌های عملی در ترکیب با روش‌های مدل‌سازی و آماری جهت پیش‌بینی هر چه بهتر شرایط همواره مورد توجه پژوهشگران این حوزه می‌باشد. ژنگ و همکاران یک روش جدید برای طبقه‌بندی بلوک‌های سنگی در تونل‌های حفاری با دستگاه *TBM (Tunnel Boring Machine)* ارائه می‌دهد. بلوک‌ها به دو دسته مؤثر و غیر

* تبریز؛ شهر جدید سهند؛ دانشگاه صنعتی تبریز؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن؛ کدپستی: ۵۳۳۱۸۱۷۶۳۴؛ شماره‌ی تلفن: ۰۴۱۳۳۴۴۳۸۰۱/۹؛ دورنگار: ۰۴۱۳۳۲۲۴۹۵۰

موثر تقسیم می‌شوند. بلوک‌های مؤثر نیز به بحرانی و غیر بحرانی تقسیم می‌گردند. بلوک‌های بحرانی بر اساس موقعیتشان (جلویی، گوشه‌ای، عقبی) می‌توانند باعث انسداد کاترهد یا گیرکردن سپر (*Shield*) *TBM* شوند (*Zhang et al., 2017*). آقای ژو و همکاران در سال راهکارهای پیشگیری و کنترل گیرکردن دستگاه حفار تمام مقطع به عنوان یکی از مخاطرات مهم زمین‌شناسی مهندسی پرداخته‌اند و با بررسی ها معین می شودکه شرایط زمین‌شناسی نامساعد پیش‌نیاز اصلی گیرکردن دستگاه حفار محسوب می‌شود و بررسی‌های دقیق تر چهار دسته از شرایط زمین‌شناسی مخاطره‌آمیز شامل مناطق شکسته‌شده، تنش‌های زمینی بالا، سنگ‌های ضعیف و مناطق کارستی را شناسایی کرده‌اند که مناطق شکسته‌شده بیشترین سهم را در ایجاد این مشکل داشته و وجود آب زیرزمینی معمولاً به عنوان عامل تشدیدکننده عمل می‌کند (*Xu et al., 2021*) و همچنین روشی ترکیبی برای شناسایی گسل‌ها در حفاری تونل ارائه می‌دهند که بر پایه تحلیل‌های ریزساختاری، ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی سنگ‌هاست. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات شدید در گرانیت‌های میگماتیتی به دلیل تنش‌های تکتونیکی و نفوذ سیالات اسیدی، همراه با وجود مواد رسی و گرافیت، منجر به تضعیف مکانیکی سنگ‌ها و گیرکردن دستگاه حفاری شده است. راهکارهای پیشنهادی شامل تزریق دوغاب، تقویت پیش‌گیرانه سینه کار و کاهش سرعت حفاری برای جلوگیری از تکرار چنین حوادثی می‌باشد (*Xu et al., 2022*) آقای فو و همکاران یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری برای شناسایی خودکار طبقات سنگ‌های اطراف و بهینه‌سازی پارامترهای حفاری *TBM* با استفاده از الگوریتم‌های بهبودیافته ارائه می‌دهد که با تخمین چگالی کرنل، دقت طبقه‌بندی سنگ‌ها را افزایش داد با استراتژی یادگیری معکوس و توالی، بهینه‌سازی پارامترهای حفاری تحت شرایط مختلف را ممکن ساخت. نتایج نشان داد که سیستم پیشنهادی می‌تواند کارایی و ایمنی دستگاه حفاری را با ارائه راهنمایی‌های کمی به اپراتورها بهبود بخشد (*Fu et al., 2024*).

آقای طریق ازلی و همکاران به بررسی روش‌های مهندسی ژئوتکنیک و خطرات زمین‌شناسی در تونل‌زنی مکانیزه در خاک‌های نرم، با مطالعه موردی خط ۷ متروی تهران می‌پردازد. پژوهش نشان می‌دهد که شناسایی کامل ویژگی‌های زمین و خطرات ژئوتکنیکی برای انتخاب مناسب ماشین حفاری *EPB(Earth Pressure Balance)TBM* و دستیابی به عملکرد بهینه ضروری است. در این مطالعه، خاک‌های مسیر تونل به چهار گروه بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و مهندسی تقسیم‌بندی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه شرایط زمین‌شناسی برای استفاده از دستگاه حفاری *EPB-TBM* مناسب است، اما چسبندگی خاک‌های ریزدانه، ساینده‌گی خاک‌های درشت‌دانه، وجود خاک‌های درشت‌دانه با محتوای ریزدانه کم و نوسانات سطح آب زیرزمینی از مهم‌ترین چالش‌ها در این پروژه هستند. این مطالعه بر اهمیت بررسی‌های دقیق زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی برای کاهش ریسک‌های احتمالی در پروژه‌های تونل‌زنی تأکید می‌کند (*Tarigh Azali et al., 2013*).

آقای نیومن و همکاران به بررسی عملکرد ماشین حفاری تمام مقطع در پروژه تونلی لی در لندن می‌پردازد که برای ذخیره آب طوفان طراحی شده است. تونل لی با طول ۶٫۹ کیلومتر و قطر ۷٫۲ متر، در عمق ۸۰ متری زمین و در لایه‌های گچی سازند سافورد حفاری شده است. مطالعه نشان می‌دهد که مدل‌سازی دقیق زمین‌شناسی قبل از ساخت، از جمله شناسایی لایه‌های فلینت و ساختارهای زمین‌شناسی مانند گسل گرینویچ و گرابن پلیستو، نقش کلیدی در انتخاب ماشین حفاری دوغابی *(Slurry TBM)* و برنامه‌ریزی برای بازرسی‌های چهره تونل داشت (*Newman et al., 2016*).

داده‌های عملکرد دستگاه حفار نشان داد که این ماشین توانایی انطباق با تغییرات کیفیت توده سنگ ناشی از ساختارهای زمین‌شناسی و ویژگی‌های غیرمنتظره مانند پینگو (حفره‌های یخچالی پر شده) را دارد. همچنین، وجود فلینت‌های بزرگ در لایه‌های گچی باعث کاهش سرعت پیشروی و افزایش سایش ابزارهای برش شد. این مطالعه بر اهمیت مدل‌سازی زمین‌شناسی و نظارت مستمر بر عملکرد *TBM* برای مدیریت ریسک‌های احتمالی و بهینه‌سازی فرآیند ساخت تأکید می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که *TBM* دوغابی به‌خاطر انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات زمین‌شناسی و فشارهای هیدروژئولوژیکی، گزینه مناسبی برای این پروژه بوده است (*Newman et al., 2016*).

ونگ به بررسی شرایط زمین‌شناسی و مسائل کلیدی مکانیک سنگ در پروژه انتقال آب از جنوب به شمال (مسیر

غربی) در چین می‌پردازد. این پروژه شامل تونل‌های طولانی با عمق زیاد است که از سازندهای ماسه‌سنگ و شیست عبور می‌کنند. مطالعه نشان می‌دهد که طبقه‌بندی سنگ‌های اطراف تونل بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی، از جمله مقاومت فشاری، ویژگی‌های ساختاری و زاویه لایه‌بندی، برای انتخاب روش ساخت و طراحی پوشش تونل حیاتی است. نتایج نشان می‌دهد که تونل‌زنی با ماشین حفاری تونل (*TBM*) در این شرایط زمین‌شناسی امکان‌پذیر است، اما چالش‌هایی مانند تغییر شکل سنگ‌های اطراف، نفوذ آب و پایداری بلندمدت تونل‌ها باید به دقت مدیریت شوند. همچنین، مدل‌سازی سه‌بعدی برای تحلیل رفتار سنگ‌های لایه‌ای و طراحی پوشش تونل ارائه شده است. این پژوهش بر اهمیت درک عمیق شرایط زمین‌شناسی و مکانیک سنگ برای موفقیت پروژه‌های بزرگ زیرزمینی تأکید می‌کند (*Wang, 2011*).

خجسته با استفاده از داده‌های ژئوتکنیکی منطقه گوتینگن آلمان، به مدل‌سازی سه‌بعدی لایه‌های رسوبی ناپیوسته (طبقه‌بندی شده بر اساس استاندارد *DIN 18196*) با روش‌های زمین‌آماری پرداخت. روش‌های مورد استفاده شامل کریجینگ شاخص و شبیه‌سازی‌های مبتنی بر زنجیره مارکوف (*TP/MC*) و شبیه‌سازی ترتیبی شاخص (*SISIM*) بودند که در نهایت روش *TP/MC* به‌عنوان گزینه برتر برای نمایش تغییرات مکانی و کاهش عدم قطعیت معرفی شد. نتایج این پژوهش می‌تواند پایه‌ای برای توسعه کدهای کامپیوتری و کاربردهای عملی در حوزه‌های ژئوتکنیک، هیدروژئولوژی و اکتشاف معادن و نفت باشد (*Ranjineh Khojasteh, 2013*).

محمودی و همکاران با هدف ارزیابی قابلیت‌های روش‌های زمین‌آماری در ساخت یک مدل دوبعدی زیرسطحی از رده‌های خاک (با رویکرد ژئوتکنیکی) در بخشی از خط ۲ متروی تبریز، استان آذربایجان شرقی در ایران، با استفاده از سه روش زمین‌آماری انجام شده است. در این پژوهش، روش‌های کریجینگ شاخص، شبیه‌سازی ترتیبی شاخص (*SIS*) و زنجیره مارکوف همراه تعمیم یافته (*GCMC*) برای پیش‌بینی رده‌های زمین‌شناسی در نقاط نمونه‌برداری‌نشده به کار گرفته شدند. این مدل‌ها پس از آن برای پیش‌بینی رده‌های ژئوتکنیکی در نقاط نمونه‌برداری‌نشده و ارزیابی عدم قطعیت فضایی مدل به کار رفتند. در نهایت، بازتولید واریوگرام‌های شاخص و نسبت‌ها و همچنین معقول‌بودن زمین‌شناسی نتایج مورد بررسی قرار گرفت (*Mahmoudi et al., 2019*).

محمودی و همکاران همچنین با استفاده از سه روش زمین‌آماری (*GCMC*، *SIS* و روش جدید *CGCMC*) به پیش‌بینی توزیع رخساره‌های یک مخزن هیدروکربوری در ایران پرداخت. روش پیشنهادی *CGCMC* با ترکیب زنجیره مارکوف و احتمالات انتقال، توانست با سرعت و دقت بالاتری نسبت‌های رخساره‌ها و ساختار فضایی را مدل‌سازی کند. نتایج نشان داد این روش در مقایسه با روش‌های مرسوم، قابلیت بهتری در ادغام داده‌ها و کاهش عدم قطعیت‌های مدل دارد (*Mahmoudi et al., 2022*).

سائو و همکاران در یک مطالعه موردی به بررسی گرفتگی ماشین‌های حفاری تونل در سنگ‌های نرم رسی-سیلت‌دار زیر رودخانه گانجیانگ می‌پردازد. گرفتگی ناشی از شرایط زمین‌شناسی خاص، عملکرد ماشین‌های حفاری را تحت تأثیر قرار داد و باعث کاهش سرعت پیشروی و افزایش گشتاور شد. راهکارهایی مانند بهینه‌سازی سیستم شستشو، استفاده از سیستم پشتیبانی ترکیبی (هوا و دوغاب)، و بهبود ابزارهای برش برای کاهش گرفتگی پیشنهاد و اجرا شد که نتایج مثبتی در بهبود عملکرد ماشین‌ها داشت (*Cao et al., 2023*).

۲- مطالعه موردی

خط ۲ متروی تبریز، با طولی حدود ۲۲ کیلومتر، به عنوان طولانی‌ترین مسیر مترو در این شهر شناخته می‌شود. این مسیر از سازندهای خاکی متنوعی عبور می‌کند که با توجه به تغییرات پیچیده زمین‌شناسی در منطقه، نیازمند طراحی و اجرای دقیق مهندسی است تا ایمنی و پایداری تونل‌ها در طولانی مدت تضمین شود. گمانه‌های ژئوتکنیکی حفر شده در مسیر پروژه، داده‌های ارزشمندی از جمله جنس خاک، لایه‌بندی، مقاومت برشی، نفوذ پذیری و ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی را در اختیار مهندسان قرار داده‌اند. این اطلاعات برای طراحی سیستم‌های نگهدارنده تونل، پیش‌بینی نشست‌های احتمالی و انتخاب ماشین‌آلات حفاری مناسب حیاتی هستند. با این حال، چالش اصلی در این پروژه، تغییرات

ناگهانی در ساختارهای زمین‌شناسی از یک گمانه به گمانه دیگر است. این تغییرات ممکن است شامل گذار از لایه‌های سست رسی به طبقات سخت سنگی، وجود آب‌های زیرزمینی تحت فشار یا حتی گسل‌های پنهان باشد که مدیریت ریسک و انعطاف‌پذیری در روش‌های حفاری را ضروری می‌سازد.

در این مطالعه از داده‌های ژئوتکنیک حدود ۶ گمانه استفاده گردیده است که از روش زمین آماری کریجینگ شاخص برای تخمین جنس لایه‌ها استفاده گردیده است.

۲-۱- روش کریجینگ

کریجینگ یک روش زمین‌آماری *(Geostatistical)* برای تخمین مقادیر نامعلوم بر اساس داده‌های نقطه‌ای نمونه‌برداری شده است. این روش که توسط دانشمند آفریقای جنوبی، دانی کریگ ابداع شد، نه تنها مقدار یک پارامتر را در نقاط نمونه‌برداری نشده پیش‌بینی می‌کند، بلکه میزان عدم قطعیت (واریانس تخمین) را نیز محاسبه می‌نماید. در پروژه‌های تونلسازی، داده‌های ژئوتکنیکی (مانند مقاومت خاک، درصد رطوبت، تراکم لایه‌ها و ...) معمولاً به صورت نقطه‌ای و پراکنده از طریق گمانه‌زنی یا آزمایش‌های محلی به دست می‌آیند. اما رفتار زمین بین این نقاط ناپیوسته و متغیر است. کریجینگ با مدل‌سازی ساختار فضایی داده‌ها، به مهندسان کمک می‌کند تا پروفیل زمین‌شناسی بین گمانه‌ها را با دقت بالا، مناطق پرریسک (مانند زون‌های ضعیف، گسل‌ها یا آب زیرزمینی) پیش‌بینی و شناسایی کنند تا بهینه‌ترین مسیر حفاری را با کمترین عدم قطعیت انتخاب نمایند. وضعیت و تغییرات حرکت آبهای زیرزمینی تحت تاثیر نوع لایه هاست و با توجه به تمرکز این مطالعه بر مدل سازی ناهمگنی های زیرزمینی بر حسب نوع لایه ها، بررسی و مدلسازی آبهای زیرزمینی مورد مطالعه نبوده است.

۲-۲- مراحل اجرای کریجینگ در تونل‌سازی

الف) تحلیل ساختار فضایی داده‌ها *(Variogram Analysis)*

- واریوگرام رابطه بین فاصله نقاط نمونه‌برداری و تفاوت مقادیر پارامتر مورد نظر را نشان می‌دهد. به کمک آن، میزان تغییرات مکانی پارامترهای خاک/سنگ (مانند نفوذپذیری یا مقاومت فشاری) مدل می‌شود.

ب) درونیابی *(Interpolation)* با روش‌های مختلف کریجینگ

- کریجینگ معمولی *(Ordinary Kriging)*: برای داده‌های با میانگین ثابت اما نامعلوم.

- کریجینگ ساده *(Simple Kriging)*: زمانی که میانگین جامعه مشخص باشد.

- کریجینگ گوسی *(Gaussian Process Kriging)*: برای داده‌های پیچیده با توزیع نرمال.

- کریجینگ شاخص *(Indicator Kriging)*: برای پیش‌بینی احتمال وجود یک خاصیت (مثل احتمال حضور آب زیرزمینی).

ج) اعتبارسنجی و بهینه‌سازی مدل

-روش اعتبارسنجی متقابل *(Cross Validation)* برای بررسی دقت پیش‌بینی‌ها.

۳- روش تحقیق

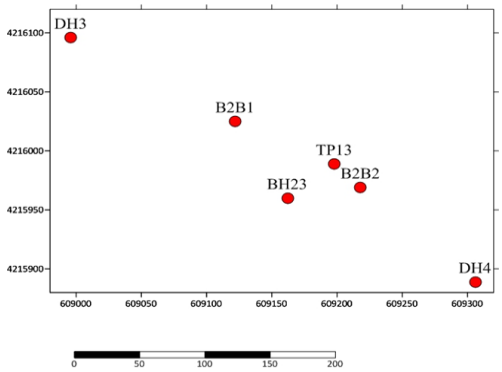
در این تحقیق روش زمین آماری کریجینگ شاخص برای تخمین جنس لایه‌ها در نظر گرفته شده است. برای این منظور از داده‌های شش گمانه استفاده شده است. عمق هرکدام از گمانه‌ها در **جدول ۱**، ارائه شده است. در این گمانه‌ها جنس لایه‌های مختلف در عمق‌های مختلف گمانه‌ها مشخص گردیده است.

جدول ۱- مشخصات گمانه‌ها

گمانه	عمق	زاویه	آزیموت
DH4	۳۱/۲۳	۹۰	-
B2B2	۳۵/۰۸	۹۰	-
B2B1	۳۰/۸۴	۹۰	-
DH3	۹۶,۲۹	۹۰	-
BH23	۳۰	۹۰	-
TP13	۱۲	۹۰	-

مختصات ۶ گمانه از گمانه‌های اشاره شده در نقشه **شکل ۱**، نمایش داده شده است. انواع جنس لایه‌ها و ضخامت هرکدام مطابق نمودار **شکل ۲**، در نمونه‌های گمانه‌ای مورد بررسی، مجموعاً ۱۶ نوع جنس لایه مختلف شناسایی شده است. اگرچه این تنوع نشان‌دهنده پیچیدگی زمین‌شناسی مسیر مورد مطالعه است، اما استفاده مستقیم از این تعداد کلاس در مدل‌سازی کریجینگ شاخص با توجه به محدودیت تعداد داده‌های نمونه‌ای، منجر به کاهش اعتبار تخمین برای هر کلاس به‌صورت مجزا خواهد شد. به‌منظور افزایش پایداری آماری مدل و ارتقای دقت نتایج، در این پژوهش دسته‌بندی

مجددی بر پایه‌ی اندازه ذرات لایه‌ها صورت گرفت. این دسته‌بندی که در **جدول ۲**، ارائه شده، کلیه لایه‌های شناسایی‌شده را در قالب سه گروه عمده شامل رس، سیلت، و شن‌وماسه طبقه‌بندی می‌کند. در نتیجه، متغیر مورد مطالعه در مدل کریجینگ شاخص به‌صورت یک متغیر گسسته سه‌کلاسه تعریف شده است.



شکل ۱- نقشه موقعیت گمانه‌ها

سه لایه اصلی مورد مطالعه همانطور که از جدول شماره ۲ مشخص است در سه دسته یا طبقه دسته بندی شده که هرکدام با یک عدد صحیح کدگذاری شده است.عبارتند از: ۱- رس، ۲-شن و ماسه و۳- سیلت.

برای شروع مطالعه زمین آماری گام اول منظم‌سازی داده‌ها است؛ با توجه به اینکه ضخامت لایه‌ها متفاوت می باشد در طول گمانه‌ها و به فاصله یک متر نقاط مشخص شده و جنس لایه در آن نقطه تعیین و شاخص مربوطه اختصاص می‌یابد. با این کار تعداد نقاط موجود افزایش می‌یابد و به عبارتی با افزایش داده‌های نمونه‌ای مورد مطالعه دقت و اعتبار تخمین افزایش یافته و نتایج حاصل قابل اعتماد می‌شود. بعد از منظم سازی داده‌ها تعداد نقاط حاوی داده نمونه‌ای به ۱۷۱ داده رسید.

پس از منظم‌سازی داده‌ها گام دوم رسم واریوگرام‌های مورد نیاز برای تخمین است. هدف از رسم واریوگرام‌ها بدست آوردن ساختار فضایی تغییرات متغیر بوده و در حالت کلی در تخمین کریجینگ شاخص پارامترهای بدست آمده از واریوگرام‌ها به طور مستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرند که شامل: اثر قطعه‌ای، شعاع تأثیر و مقدار سقف واریوگرام است. همچنین این پارامترها در تعیین برخی دیگر از متغیرهای ورودی برای تخمین به طور غیر مستقیم استفاده می‌شوند این متغیرها شامل: تعیین ابعاد بیضوی ناهمسانگردی، و زاویه مربوط به شعاع جست و جو است.

در حالت کلی عملیات واریوگرافی در سه مرحله انجام گرفته است، مرحله اول رسم واریوگرام تجربی با استفاده از داده‌های نمونه‌ای که پس از منظم‌سازی و تخصیص شاخص‌های در نظر گرفته شده مطابق **جدول ۲**، انجام گرفته است. برای هر دسته در دو راستا واریوگرام رسم شده است. یکی در راستای افقی و دیگری در راستای قائم. واریوگرام مربوط به راستای افقی به صورت تمام جهتی است. واریوگرام قائم نیز در جهت شیب برای گمانه‌ها که همگی ۹۰ درجه است، رسم گردید.

جدول ۲- دسته‌بندی لایه‌های مورد مطالعه و شاخص‌های هرکدام

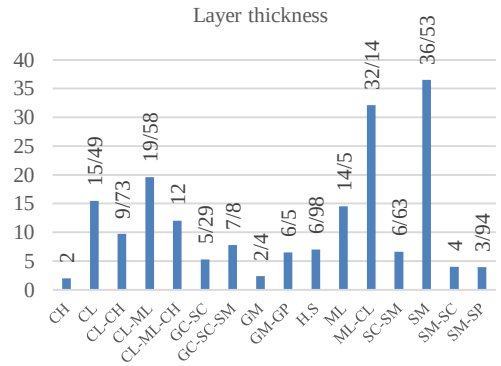
نوع لایه	شاخص اختصاص یافته
CH	۱
CL	
CL-CH	
CL-ML	
CL-ML-CH	
GC-SC	۲
GC-SC-SM	
GM	
GM-GP	
SC-SM	
SM	
SM-SC	
SM-SP	
H.S	۳
ML	
ML-CL	

پس از ترسیم واریوگرام‌های تجربی برای هر یک از سه گروه خاکی، فرآیند برازش مدل تئوریک مناسب بر روی این واریوگرام‌ها انجام شد. مدل واریوگرامی که بیشترین انطباق را با داده‌های تجربی داشت، به‌عنوان مدل نهایی برای تخمین مقادیر شاخص انتخاب گردید. این مرحله به‌عنوان گام دوم تحلیل واریوگرافی شناخته می‌شود. این مرحله، دومین گام کلیدی در فرآیند تحلیل واریوگرافی محسوب می‌شود که طی آن، یک مدل تئوریک (مانند مدل کروی، نمایی یا گوسی) بر روی واریوگرام تجربی برازش داده می‌شود. هدف از این کار،

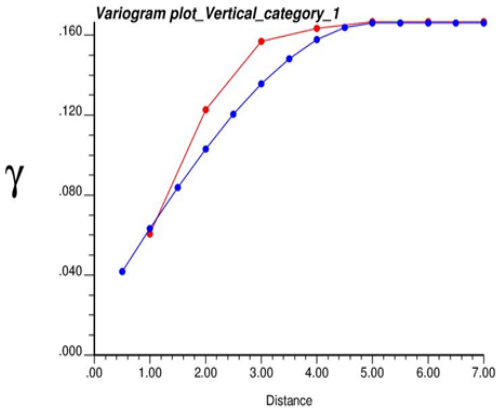
دستیابی به توصیفی ریاضی از ساختار فضایی داده‌هاست که بتوان از آن در محاسبات بعدی، مانند تخمین مقدار شاخص در نقاط نامعلوم، استفاده کرد. کیفیت این برازش تأثیر مستقیمی بر دقت پیش‌بینی نهایی مدل دارد.

در گام سوم، واریوگرام‌های تجربی به‌صورت جداگانه در راستاهای افقی و قائم محاسبه شدند و سپس با ترکیب این دو، مدل سه‌بعدی واریوگرام برای هر یک از سه دسته خاک (رس، سیلت، شن‌وماسه) تولید شد. این مدل ترکیبی، ساختار فضایی تغییرات شاخص را به‌طور هم‌زمان در دو جهت افقی و قائم نمایش می‌دهد.

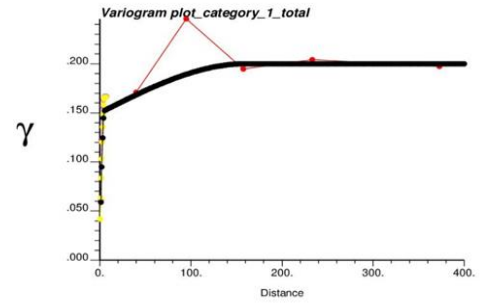
استفاده از واریوگرام سه‌بعدی به مدل اجازه می‌دهد تا وابستگی فضایی داده‌ها را در تمامی جهات به‌طور دقیق‌تری لحاظ کند؛ مسئله‌ای که در مدل‌سازی پدیده‌های زمین‌شناسی ناهمگن مانند لایه‌های خاک، نقش کلیدی در افزایش دقت پیش‌بینی ایفا می‌کند. همچنین، انتخاب واریوگرام‌های مجزا در دو راستا کمک می‌کند تا آنیزوتروپی (ناهمسانگردی) موجود در داده‌ها به‌درستی در مدل لحاظ شود. نمودارهای حاصل از واریوگرام‌های افقی، قائم و مدل نهایی تلفیقی، در **شکل ۳** تا **شکل ۹**، برای هر یک از گروه‌های خاکی نمایش داده شده‌اند.



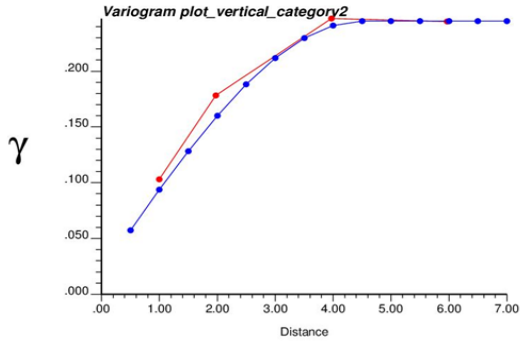
شکل ۲- نمودار فراوانی ضخامت انواع لایه‌ها



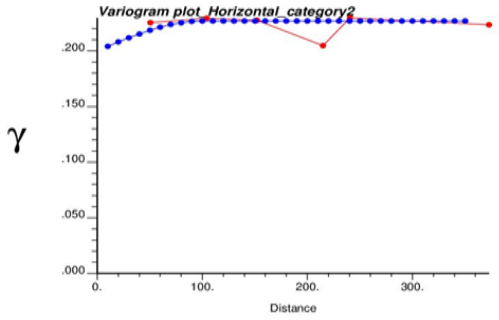
شکل ۳- واریوگرام قائم دسته ۱



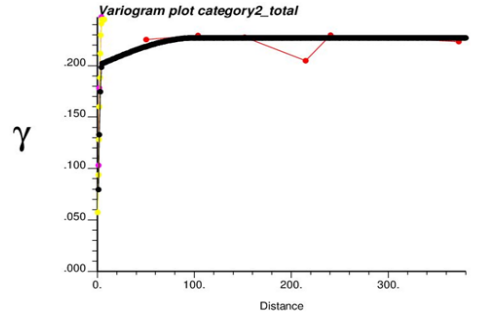
شکل ۴- تلفیق واریوگرام‌های افقی و قائم برای دسته ۱



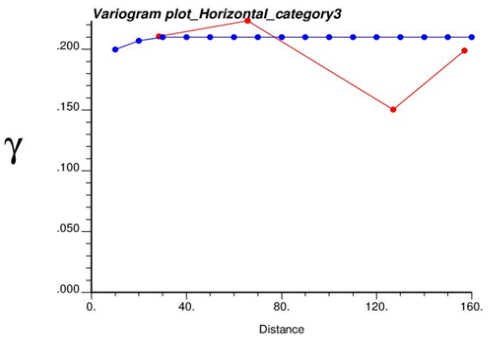
شکل ۵- واریوگرام قائم دسته ۲



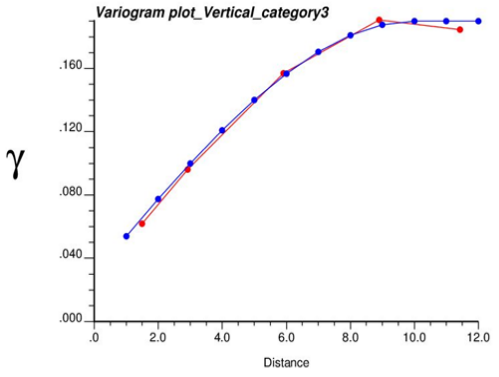
شکل ۶- واریوگرام تمام جهتی افقی برای دسته ۲



شکل ۷- تلفیق واریوگرام های افقی و قائم دسته ۲



شکل ۸- واریوگرام تمام جهتی افقی دسته ۳



شکل ۹- واریوگرام قائم دسته ۳

اعتبار سنجی واریوگرام‌ها: قبل از انجام تخمین کریجینگ شاخص بایستی مدل‌های سه بعدی که برای هر دسته بدست آمده و پارامترهای آن مدل واریوگرام در تخمین کریجینگ استفاده خواهد شد؛ در این پژوهش، برای اعتبار سنجی مدل کریجینگ از روش *Cross-validation* به‌صورت حذف تک‌نقطه‌ای *(Leave-One-Out)* برای اعتبارسنجی مدل کریجینگ شاخص استفاده شده است. به این ترتیب که مقدار شاخص در هر یک از نقاط نمونه‌ای (در مجموع ۱۷۱ نقطه)، به‌طور جداگانه حذف گردیده و با استفاده از مقادیر نقاط باقی‌مانده و واریوگرام مربوط به کلاس مورد نظر، مقدار شاخص در نقطه حذف‌شده تخمین زده شده است. سپس مقدار پیش‌بینی‌شده با مقدار واقعی مقایسه گردیده و نرخ تطابق محاسبه شده است. این تحلیل برای تمام نقاط تکرار شده و میزان موفقیت مدل حدود ۸۰ درصد برآورد گردید. روش *Cross-validation* به‌دلیل استقلال نسبی از تقسیم‌بندی اولیه داده‌ها، و نیز مناسب بودن برای داده‌های محدود، یکی از روش‌های متداول و قابل اطمینان در ارزیابی عملکرد مدل‌های زمین‌آماری محسوب می‌شود. در این مطالعه با توجه به اینکه تعداد داده‌ها بعد از منظم‌سازی ۱۷۱عدد است. نتیجه تخمین هر نقطه به صورت دستی کنترل گردید، که از تعداد ۱۷۱ نمونه ۱۳۸ مورد به درستی تخمین زده شده و در ۳۳ مورد تخمین اشتباه صورت پذیرفت. در نتیجه با توجه به اینکه ۸۰ درصد نقاط به دستی تخمین زده شده است بنابراین واریوگرام‌ها معتبر بوده و می‌توان برای تخمین کریجینگ شاخص در کل منطقه به کار برد.

با توجه به اینکه در روش *Cross-validation*در واقع بخشی از نقاط در اعتبار سنجی حذف می‌شوند ولی در تخمین واقعی چنین حذفی صورت نمی‌گیرد بنابراین تخمین‌ها با میزان دقت بالاتری حاصل خواهد شد؛ و ۸۰ درصد تخمین درست نقاط برای نوع لایه‌ها دقت خوبی است. همچنین این مقدار از دقت تخمین بیانگر ۲۰ درصد خطا نیست و در تخمین واقعی مقدار دقت از این هم بالاتر خواهد بود. بنابراین نتیجه اعتبار سنجی نشانگر ۲۰ درصد خطا در تخمین‌ها نیست بلکه نشانگر معتبر بودن واریوگرام‌ها است نه خطای بالا در تخمین‌ها.

کریجینگ شاخص: یکی از روش‌های زمین‌آماری غیرخطی است که برای مدل‌سازی متغیرهای طبقه‌بندی‌شده

(گسسته) مانند جنس لایه‌های خاکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، متغیر کیفی در قالب یک شاخص دودویی تعریف می‌گردد؛ به‌گونه‌ای که در نقاطی که کلاس مورد نظر وجود دارد، مقدار شاخص برابر با ۱ و در سایر نقاط برابر با صفر قرار می‌گیرد. سپس با استفاده از واریوگرام این شاخص، ساختار فضایی آن تحلیل شده و مقدار شاخص در نقاط نامعلوم با استفاده از ترکیب خطی وزن‌دار مقادیر شاخص در نقاط معلوم تخمین زده می‌شود:

$$\lambda_i I(u_i) \sum_{i=1}^{n} = (_0u)\hat{I}$$

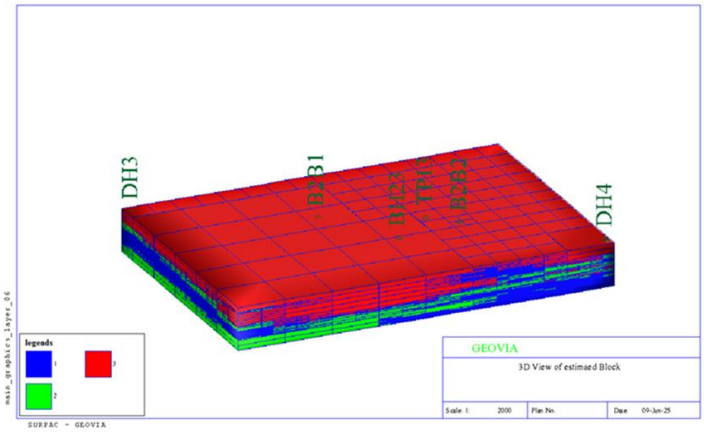
که در آن λ_i وزن‌های کریجینگ و $I(u_i)$ مقدار شاخص در نقطه معلوم u_i است. این مقدار تخمینی، نمایانگر احتمال حضور آن کلاس در نقطه u_0 می‌باشد. در این مطالعه، سه شاخص مستقل شامل رس، سیلت، و شن‌وماسه تعریف و برای هر یک به‌صورت جداگانه مدل‌سازی انجام شده است. در نهایت، در هر سلول از شبکه، کلاسی با بالاترین احتمال به‌عنوان شاخص نهایی آن سلول انتخاب شده است.در نتیجه، برای هر سلول در شبکه سه‌بعدی مدل، سه عدد احتمالاتی بین صفر تا یک محاسبه شده است و شاخص با بالاترین احتمال به آن سلول اختصاص یافته است.

برای اجرای مدل، محدوده مورد مطالعه به‌صورت بلوک‌های سه‌بعدی با ابعاد ۱*۱۰*۱۰ متر در راستاهای x، y و zشبکه‌بندی شد. به عبارتی فاصله نقاط در راستای افقی (x,y) ۱۰ متر بوده و در راستای z که همان راستای گمانه‌ها است ۱متر در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی با در نظر گرفتن ساختار فضایی ناهمسانگرد انجام گرفت؛ به‌طوری‌که شعاع جست‌وجوی مدل به‌صورت بیضوی با ابعاد ۳۲۰ متر در افق و ۲۰ متر در قائم تنظیم شد. این ابعاد با توجه به دامنه تأثیر واریوگرام‌های افقی و قائم برای هر کلاس تعیین گردیدند. در فرآیند تخمین هر سلول نامعلوم، از حداقل ۴ و حداکثر ۸ نقطه معلوم در اطراف سلول استفاده شد تا تعادل بین دقت و پایداری مدل حفظ شود.

نتایج نهایی حاصل از مدل‌سازی کریجینگ شاخص در قالب یک مدل بلوکی سه‌بعدی در **شکل ۱۰**، نمایش داده شده است. این مدل، بر اساس ترکیب اطلاعات حاصل از گمانه‌های ژئوتکنیکی و تحلیل ساختار فضایی شاخص‌ها، توزیع احتمالی سه نوع خاک (رس، سیلت و شن‌وماسه) را در طول مسیر حفاری نشان می‌دهد. در این نمایش، هر سلول از بلوک مدل به رنگی منسوب شده که بیانگر کلاسی از خاک است که در آن نقطه دارای بیشترین احتمال حضور می‌باشد. سلول‌های آبی نشان‌دهنده نواحی با احتمال غالب حضور رس‌ها، سلول‌های قرمز معرف مناطقی با حضور عمده سیلت و خاک دستی، و سلول‌های سبز مشخص‌کننده مناطق غالباً تشکیل‌شده از شن و ماسه هستند.

همچنین موقعیت مکانی شش گمانه اولیه در این مدل لحاظ شده است تا امکان مقایسه مستقیم بین داده‌های واقعی و نتایج مدل فراهم گردد. مقایسه مدل سه‌بعدی با اطلاعات گمانه‌ها نشان می‌دهد که ساختار فضایی پیش‌بینی‌شده با واقعیت زمین‌شناسی منطقه در تطابق قابل قبولی قرار دارد، به‌ویژه در مناطقی که تغییرات جنس لایه‌ها به‌صورت ناگهانی یا با شیب زیاد رخ داده‌اند.

این مدل بلوکی سه‌بعدی، ابزاری ارزشمند برای تحلیل رفتار چینه شناسی و لایه بندی مسیر تونل محسوب می‌شود و می‌تواند در مراحل طراحی و اجرای پروژه‌های حفاری مکانیزه مورد استفاده قرار گیرد. از جمله کاربردهای آن می‌توان به شناسایی نواحی مستعد ناپایداری سینه‌کار، تخمین مناطق پرریسک از نظر نشست سطحی، و تشخیص زون‌هایی با تغییرات ناگهانی جنس خاک اشاره کرد. این اطلاعات، با فراهم‌کردن درک بهتری از شرایط زیرسطحی، به تصمیم‌گیری‌های فنی نظیر انتخاب سیستم نگهداری موقت، تنظیم پارامترهای عملکردی حفاری مکانیزه تونل، و مدیریت ریسک ژئوتکنیکی کمک می‌کنند.



شکل ۱۰- نمای سه بعدی از بلوک تخمین زده شده

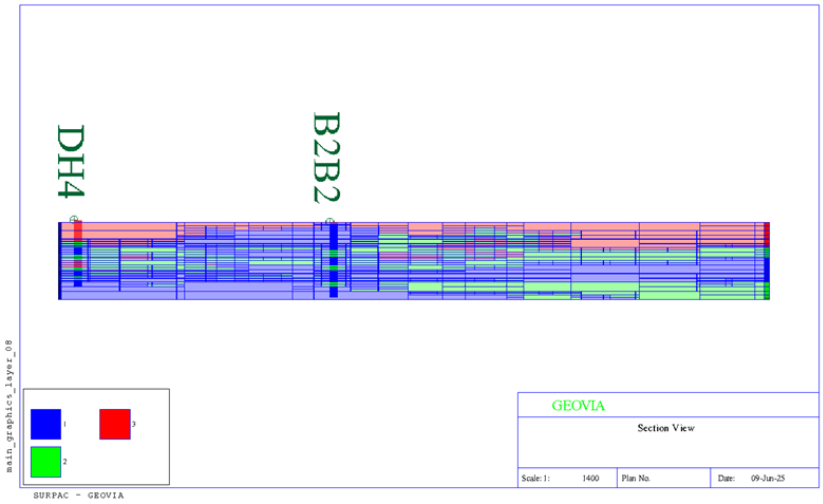
۴- بحث و بررسی

این مطالعه با استفاده از روش کریجینگ شاخص، گامی مهم در جهت بهبود پیش‌بینی توزیع سازندهای خاکی در مسیر حفاری *TBM* برداشته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که مدل‌سازی سه‌بعدی با دقت ۸۰ درصد می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت ریسک‌های ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار گیرد. یکی از نقاط قوت این پژوهش، دسته‌بندی لایه‌های خاک به سه گروه اصلی (رس، شن و ماسه، و سیلت) است که با کاهش پیچیدگی داده‌ها، دقت مدل را افزایش داده است. همچنین، استفاده از واریوگرام‌های ناهمسانگرد در تحلیل ساختار فضایی داده‌ها، امکان پیش‌بینی دقیق‌تر تغییرات مکانی لایه‌ها را فراهم کرده است. با این حال، برخی محدودیت‌ها در این مطالعه وجود دارد که باید در نظر گرفته شود. برای مثال، دقت مدل به شدت وابسته به کیفیت و تراکم داده‌های ورودی است و در مناطق فاقد داده‌های کافی ممکن است کارایی کمتری داشته باشد. علاوه بر این، مدل حاضر تنها بر اساس پارامترهای ایستای خاک توسعه یافته و اثرات دینامیکی ناشی از فرآیند حفاری را در نظر نمی‌گیرد. این موضوع می‌تواند در پروژه‌هایی با شرایط زمین‌شناسی بسیار پیچیده یا حضور آب زیرزمینی تحت فشار، چالش‌هایی ایجاد کند.

روش کریجینگ شاخص به خوبی توانسته ، در شرایطی که ماهیت داده ها به صورت گسسته باشند، در سطح اطمینان بالایی مدلسازی را انجام دهد. پژوهش‌های انجام‌شده در پروژه‌های متروی تهران و تونل لی لندن نیز بر اهمیت مدل‌سازی دقیق زمین‌شناسی برای کاهش ریسک‌های حفاری تأکید کرده‌اند. با این تفاوت که در این مطالعه، تمرکز اصلی بر روی خاک‌های نرم و تغییرات ناگهانی در جنس لایه‌ها بوده است. یکی از یافته‌های کلیدی این تحقیق، توانایی مدل در شناسایی مناطق مستعد ریزش و تغییرات ناگهانی در جنس خاک است. این قابلیت می‌تواند به مهندسان در انتخاب مسیر بهینه حفاری و طراحی سیستم‌های نگهدارنده تونل کمک شایانی کند. همچنین، نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند به عنوان مبنایی برای توسعه مدل‌های پویاتر در آینده مورد استفاده قرار گیرد. در پایان، می‌توان گفت که این پژوهش نه‌تنها به بهبود فرآیند تصمیم‌گیری در پروژه‌های تونل‌زنی کمک می‌کند، بلکه زمینه را برای توسعه روش‌های ترکیبی با استفاده از یادگیری ماشین و داده‌های ژئوفیزیکی فراهم می‌سازد. چنین پیشرفت‌هایی می‌تواند دقت و کارایی مدل‌های پیش‌بینی را در آینده به‌طور چشمگیری افزایش دهد.

در **شکل ۱۱**، یک مقطع قائم از مدل بلوکی سه‌بعدی نمایش داده شده است که حدفاصل دو گمانه *DH4* و *B2B2* را در امتداد مسیر تونل پوشش می‌دهد. این مقطع به‌منظور تحلیل عینی‌تر عملکرد مدل کریجینگ شاخص در بازسازی ساختار زیرسطحی منطقه بین گمانه‌ها طراحی شده است. هر سلول در این برش، نشان‌دهنده کلاس خاکی با بالاترین احتمال حضور در آن نقطه است که بر اساس تخمین حاصل از مدل در نظر گرفته شده و با یکی از سه رنگ معرف گروه‌های رس، سیلت و شن‌وماسه نمایش داده می‌شود.

همان‌گونه که از تصویر قابل مشاهده است، مدل توانسته روند کلی تغییرات در جنس لایه‌ها را بین دو گمانه با دقت نسبی بازسازی کند. در برخی نواحی، لایه‌های هم‌جنس با پیوستگی قابل قبولی امتداد یافته‌اند که نشانه‌ای از تطابق ساختار مدل با داده‌های واقعی است. در مقابل، در برخی عمق‌ها و موقعیت‌های جانبی، تغییرات ناگهانی در کلاس خاک مشاهده می‌شود که می‌تواند بیانگر تغییرات طبیعی زمین‌شناسی یا تأثیر محدود بودن داده‌های نمونه‌ای باشد. این مقطع امکان ارزیابی کیفی و بصری عملکرد مدل را فراهم می‌سازد و به‌ویژه در طراحی مسیر حفاری مکانیزه، ابزاری مفید برای شناسایی نواحی با پتانسیل ناپایداری سینه‌کار یا رفتار غیرقابل پیش‌بینی در جبهه حفاری محسوب می‌شود. علاوه‌براین، بررسی تغییرات در لایه‌های ریزدانه یا درشت‌دانه در امتداد این مقطع می‌تواند به پیش‌بینی نواحی با پتانسیل نشست سطحی، واگرایی خاک یا تراوش احتمالی کمک نماید. به‌طور کلی، برش‌های مقطعی نظیر این تصویر، نقش مؤثری در ارزیابی قابلیت اعتماد مدل و هدایت تصمیم‌های فنی در مراحل طراحی و اجرای پروژه ایفا می‌کنند.



شکل ۱۱- یک برش از مدل بلوکی حد فاصل گمانه‌های B2B2، DH4

۵- نتیجه‌گیری

این مطالعه با به کارگیری روش کریجینگ شاخص، مدلی سه‌بعدی برای پیش‌بینی توزیع سازندهای خاکی در مسیر حفاری *TBM* ارائه کرده است. نتایج نشان می‌دهد که با دسته‌بندی لایه‌های خاک به سه گروه اصلی و استفاده از واریوگرام‌های ناهمسانگرد، می‌توان دقت مدل‌سازی را به میزان قابل توجهی افزایش داد. اعتبارسنجی مدل با روش *Cross-Validation* حاکی از آن است که تخمین‌های انجام شده در ۸۰ درصد موارد با داده‌های واقعی مطابقت دارند، که این سطح از دقت برای تصمیم‌گیری‌های مهندسی در پروژه‌های تونل‌زنی کافی به نظر می‌رسد.

مدل توسعه‌یافته در این تحقیق می‌تواند به مهندسان در پیش‌بینی شرایط زمین‌شناسی بین گمانه‌ها کمک کند، به‌ویژه در شناسایی مناطق مستعد ریزش و تغییرات ناگهانی در جنس خاک. این امر می‌تواند در انتخاب مسیر حفاری و کاهش ریسک‌های احتمالی مفید باشد. با این حال، دقت مدل به کیفیت و کمیت داده‌های ورودی وابسته است و در شرایط پیچیده‌تر (مانند حضور آب زیرزمینی تحت فشار یا لایه‌های ناهمگن شدید) نیاز به بررسی‌های تکمیلی دارد.

کاربرد این روش در پروژه متروی تبریز نشان‌دهنده پتانسیل آن برای استفاده در پروژه‌های مشابه است در پروژه‌های مشابه، بررسی امکان افزایش تراکم گمانه‌ها در نواحی با تغییرات شدید زمین‌شناسی، می‌تواند به بهبود کیفیت مدل زمین‌آماری کمک کند استفاده از داده‌های مکمل مانند مشاهدات ژئوفیزیکی یا نتایج سایر روش‌های غیرمستقیم، می‌تواند دقت تحلیل ساختار فضایی را افزایش دهد. با توجه به ماهیت احتمالاتی روش کریجینگ شاخص، به‌کارگیری روش‌های شبیه‌سازی آماری نیز ممکن است در تحلیل عدم‌قطعیت نتایج مؤثر باشد.

تحلیل نتایج به‌دست‌آمده در ارتباط با طراحی مسیر

حفاری مکانیزه و تصمیم‌گیری‌های مهندسی، می‌تواند در فازهای بعدی پروژه مورد ارزیابی دقیق‌تر قرار گیردهرچند برای تعمیم نتایج به شرایط زمین‌شناسی بسیار پیچیده، توسعه مدل با ادغام روش‌های یادگیری ماشین و استفاده از داده‌های پویا پیشنهاد می‌شود. در نهایت، این پژوهش با کاربرد روش کریجینگ، گامی عملی درجهت تسهیل فرآیند تصمیم‌گیری در پروژه‌های تونل‌زنی برداشته و می‌تواند به عنوان مبنایی برای مطالعات آینده در این حوزه مورد استفاده قرار گیرد.

۶- سیاهه‌ی نمادها

جدول ۳: سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح
C	*KPa*	چسبندگی
φ	°	زاویه اصطکاک داخلی
E	*MPa*	مدول الاستیسته
γ_{dry}	*gr/cm3*	وزن مخصوص خشک

۷- مراجع

Cao, C., Chen, X., Shi, C., Fu, Y., Gong, C., & Wang, Z. (2023). Clogging of slurry-shield tunnel-boring machine drives in sedimentary soft rock: A case study. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 17(10), 1502-1516. Retrieved from https://doi.org/10.1007/s1170

Fu, K., Qiu, D., Xue, Y., Shao, T., & Lan, G. (2024). TBM tunneling strata automatic identification and working conditions decision support. Automation in Construction, 163, 105425. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.10542 ۵

Mahmoudi, M., Khojasteh, E. R., & Sharghi, Y. (2019). Geostatistical modelling of the subsurface geological-geotechnical heterogeneities in the Tabriz Subway, East Azarbayjan Province, Iran. Journal of Applied & Regional Geology/Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (ZDGG), 170. (2)

Mahmoudi, M., Ranjineh Khojasteh, E., & Sharghi, Y. (2022). Facies modelling for hydrocarbon reservoirs using a combined Markov chain method. Geocarto International, 37(25), 10659-10680 .

Newman, T ,.Bellhouse, M., Corcoran, J., Sutherden, R., & Karaouzene, R. (2016). TBM performance through the engineering geology of the Lee Tunnel. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 169(3), 299-313. https://doi.org/10.1680/jgeen.15.00133

Ranjineh Khojasteh, E. (2013). Geostatistical three-dimensional modeling of the subsurface unconsolidated materials in the Göttingen area. Main dissertation. Gottingen (Sweden): Georg-August-University .

Tarigh Azali, S., Ghafoori, M., Lashkaripour, G. R., & Hassanpour, J. (2013). Engineering geological investigations of mechanized tunneling in soft ground: A case study, East–West lot of line 7, Tehran Metro, Iran. Engineering Geology, 166, 170-185. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.07.012

Wang, X. (2011). Geological conditions and key rock mechanics issues in the Western Route of South-to-North Water Transfer Project. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 3(3), 234-243. Retrieved from https://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2011.00234

Xu, Z., Yu, T., Lin, P., Wang, W., & Shao, R. (2022). Integrated geochemical, mineralogical, and

microstructural identification of faults in tunnels and its application to TBM jamming analysis. Tunnelling and Underground Space Technology, 128, 104650 .

Xu, Z. H., Wang, W. Y., Lin, P., Nie, L. C., Wu, J., & Li, Z. M. (2021). Hard-rock TBM jamming subject to adverse geological conditions: Influencing factor, hazard mode and a case study of Gaoligongshan Tunnel. Tunnelling and Underground Space Technology, 108, 103683. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103683

Zhang, Z. X., Wang, S. F., Huang, X., & Kwok, C. Y. (2017). TBM–Block Interaction during TBM Tunneling in Rock Masses: Block Classification and Identification. *International Journal of Geomechanics*, *17*(5), E4016001. Retrieved from https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000640

Tunneling & Underground Space Engineering

(TUSE)

tuse.shahroodut.ac.ir

Volume 14-Issue 2\Winter 2026

نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

Prediction of soil formations along a TBM tunneling route using data modeling (a case study of Tabriz Metro Line 2)

A. Kalantari[1]; E. Ranjine Kojasteh[2*]; H. Chakeri[3]; A. Talebinejad[4]

1. PhD Student; Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, alikalantari.iut@gmail.com
2. Assistant Professor; Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, khojasteh@sut.ac.ir
3. Assistant Professor; Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Chakeri@sut.ac.ir
4. PhD in Rock Mechanics; Supervisor of Tabriz Metro Line 2, a_talebinejad@yahoo.com

Received: 12 Jun 2025; Accepted: 15 Sep 2025
DOI: 10.22044/tuse.2025.16391.1503

Keywords

TBM
Geotechnical parameters
Indicator kriging
3D geological modeling
Risk management

Extended Abstract

Summary

This study presents a systematic geostatistical framework for predicting the spatial distribution of soil formations along a tunnel boring machine (TBM) driven tunneling route to address a critical need for mitigating geological risks in underground construction. The research focuses on Tabriz Metro Line 2, which traverses complex and varied soil sequences. Utilizing geotechnical data from six boreholes, sixteen identified soil layer types were strategically reclassified into three main categories —clay, sand & gravel, and silt— to enhance model stability. The core methodology employed indicator kriging that is an ideal non-linear geostatistical technique for categorical data. The process involved data regularization by generating virtual points at one-meter intervals along boreholes, spatial structural analysis through computing and modeling horizontal and vertical experimental variograms for each soil category, and subsequent three-dimensional (3D) interpolation to estimate soil class probabilities at unsampled locations. Rigorous validation via leave-one-out cross-validation (LOOCV) demonstrated a high predictive accuracy of 80%. The resulting 3D block model effectively visualized the subsurface stratigraphy, identifying zones of potential instability and abrupt changes in soil consistency. This model provided a powerful decision-support tool for optimizing tunneling route selection, guiding support system design, and enhancing overall risk management strategies. This study concludes that indicator kriging, supported by strategic data classification, offers a highly effective and reliable methodology for reducing geological uncertainty in mechanized tunneling projects, with significant practical applications for planning and safety.

Introduction

Prediction of the spatial distribution of soil formations along a tunnel boring machine (TBM) tunneling route is necessary for mitigating geological risks in building underground structures. In this regard, Tabriz Metro Line 2, which traverses complex and varied soil sequences, is investigated as a case study. Indicator kriging geostatistical method is employed for modeling data obtained from boreholes drilled in the studied area. As a result, zones of potential instability and abrupt changes in soil consistency were

identified. The modeling results can effectively be used to reduce geological uncertainty in mechanized tunneling projects, with significant practical applications for planning and safety. Thus, the results of this study can be used as a decision-support tool for optimizing tunneling route selection.

Methodology and Approaches

Geotechnical data from six boreholes along the tunnel alignment were analyzed. Sixteen identified soil layers were reclassified into three main categories. The methodology involved: 1) data regularization by generating virtual points at 1-meter intervals, 2) spatial structural analysis using horizontal and vertical experimental variograms for each soil category, 3) modeling the variograms to define spatial correlation parameters; and 4) applying indicator kriging to estimate the probability of each soil class at unsampled locations within a three-dimensional (3D) grid. Model validation was performed via leave-one-out cross-validation (LOOCV).

Results and Conclusions

The cross-validation results demonstrated a high prediction accuracy of 80%. The resulting 3D block model effectively visualizes the spatial continuity and sudden changes between the three soil classes. Key conclusions are:

1. Indicator kriging is a powerful tool for modeling categorical geotechnical data in tunneling projects.
2. Strategic data classification enhances model stability and accuracy.
3. The generated model is highly effective for identifying potential instability zones and planning optimal excavation routes.
4. This methodology provides a practical and reliable foundation for risk management in similar mechanized tunneling projects.