بررسی عمق بهینه استقرار تونل در مسیر خط ۲ قطار شهری مشهد

*سلمه افشار: دانشگاه آزاد اسلامي، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه علوم پایه
محمد غفوری، غلامرضا لشکری پور: دانشگاه فردوسی مشهد
مهران آرین: دانشگاه آزاد علوم و تحقیقات تهران
سید محمد موسوی مداح: دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ: دریافت ۸۹/۱۲/۲۰ **پذیرش** ۹۱/۸/۱۴

چکیده

با توجه به توسعهٔ روزافزون سازه‌های زیرزمینی و هزینه‌های فراوان ساخت این سازه‌ها و نیز اهمیت آن‌ها در شبکه حمل و نقل بین‌شهری و داخل شهری لازم است که پایداری آن‌ها بررسی شود. در این تحقیق پایداری تونل‌های مسیر خط ۲ قطار شهری مشهد به‌طول حدود ۱۷ کیلومتر بررسی شده است. در ابتدا منشأ رسوب‌های دشت مشهد، و سپس با توجه به‌جنس رسوب‌ها در مسیر پژوهش، خصوصیات ژئوتکنیکی آن‌ها بررسی شده است. بررسی رسوب‌های مسیر نشان می‌دهد که خاک مسیر در ردهٔ خاک‌های متورم شونده قرار نمی‌گیرند. هم‌چنین پروفیل‌های تهیه شده تغییرات SPT نسبت به عمق در محیط نرم‌افزار روک ورک[1] ۲۰۰۶ حاکی از این است که خاک بسیار نرم و سست در مسیر وجود ندارد. نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی و XRD بیان‌گر این است که خاک غالب مسیر رس و با کانی غالب نوع ایلیت و کائولینیت است. در ادامه و با توجه به این‌که بیش‌تر مسیر از خاک‌های ریزدانه تشکیل شده است نشست زمین با استفاده از نرم‌افزار پلاکسیس[2] ورژن ۸ بررسی شده است. سپس با توجه به مدل‌سازی عددی و متغیر قرار دادن عمق تونل در هر پروفیل عمقی بهینه از لحاظ خصوصیات ژئوتکنیک برای استقرار تونل در لایه‌های خاک با خصوصیات ژئوتکنیکی مناسبت مشخص شده است.

واژه‌های کلیدی: خط ۲ قطار شهری مشهد، پایداری، خصوصیات ژئوتکنیکی، نشست، عمق بهینه.

*نویسندهٔ مسئول Salameh_1984@yahoo.com

۱. Rock work ۲. PLAXIS

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]

مقدمه

مشهد با وسعت حدود ۲۷۰ کیلومتر مربع، بیش از نیمی از جمعیت استان را در خود جای داده است. علاوه بر آن با توجه به جمعیت زیاد زائر حرم مطهر، سیستم حمل و نقل موجود در شهر پاسخ‌گوی نیازهای این شهر مقدس نیست. در این راستا ٤ خط حمل و نقل ریلی که از مسیرهای پر رفت و آمد شهر می‌گذرد در طرح توسعهٔ شهر در نظر گرفته شده است [۱] که مسیر خط ۲ قطار شهری در این مقاله بحث شده است. این خط از مسیری طولانی به مسافت حدود ۱۷ کیلومتر در امتداد شمال شرق به جنوب غرب از خیابان طبرسی تا خیابان کوه‌سنگی عبور می‌کند. تمام این مسیر به‌صورت تونل اجرا می‌گردد و تعداد ۱۱ ایستگاه برای آن در نظر گرفته شده است. با توجه به این‌که منشأ و نحوهٔ تشکیل خاک‌ها تأثیر بارزی بر ویژگی‌های مهندسی آن دارد، در این مقاله ابتدا پیرامون منشأ رسوب‌های دشت مشهد بحث شده، سپس با توجه به اطلاعات حاصل از گمانه‌ها در نقاط مختلف محدوده که به‌صورت دستی و ماشینی حفاری شده است، خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی رسوب‌های موجود در مسیر این خط بررسی شده است. با توجه به نقشهٔ بافت خاک شهر مشهد و تغییرات نوع خاک، مسیر مذکور به ۵ پروفیل تقسیم شده است. در انتها برای تعیین میزان نشست در مسیر تونل بر اساس خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح از نرم‌افزار پلاکسیس ورژن ۸ استفاده شده که در سال‌های اخیر در زمینهٔ نشست، بسیار مورد قرار گرفته است [۲]، [۳]، [٤]. در نهایت بیش‌ترین میزان نشست سطح زمین در ۵ پروفیل تفکیک شده مسیر به‌طور جداگانه محاسبه و بر اساس نتایج به‌دست آمده، عمقی بهینه برای استقرار تونل پیشنهاد شده است.

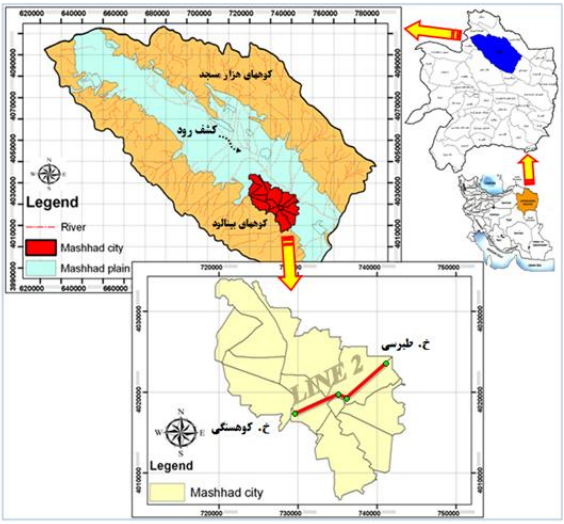
زمین‌شناسی منطقهٔ بررسی شده

دشت مشهد دشتی سیلابی متأثر از دو سیستم رسوب‌گذاری است. سیستم اول، رسوب‌گذاری به‌وسیلهٔ کشف‌رود است که زه‌کش اصلی دشت است. سیستم دوم رسوب‌گذاری در این دشت به‌وسیلهٔ آبراهه‌های فرعی ناشی از ارتفاعات هزارمسجد در شمال و ارتفاعات بینالود در جنوب است. رودخانهٔ کشف‌رود از ارتفاعات رادکان در شمال غرب و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]

در فاصلهٔ حدود ٦٠ کیلومتری شهر مشهد سرچشمه می‌گیرد. با در نظر گرفتن فاصلهٔ حمل و جنس سنگ منشأ، که عمدتاً رسوبی است، رسوب‌های برجا مانده این رودخانه به‌جز محدودهٔ بستر اصلی رودخانهٔ کشف‌رود، عمدتاً از نوع ریزدانه‌اند. رسوب‌های آبرفتی که از فرسایش و تخریب ارتفاعات جنوب مشهد حاصل شده، به‌علت فاصله کم حمل و جنس سنگ منشأ که از نوع آذرین و دگرگونی است عمدتاً از نوع درشت‌دانه است و شامل شن و ماسه هستند. با توجه به این‌که مشهد در بخش جنوبی رودخانهٔ کشف‌رود واقع است، رودخانه‌هایی که از بینالود سرچشمه گرفته‌اند، نقش بیش‌تری در شکل‌گیری آبرفت شهر مشهد داشته‌اند. به‌طورکلی در دشت مشهد از جنوب و جنوب‌غرب به طرف شمال شرق آن بافت خاک دانه‌ریزتر می‌شود. موقعیت دشت و شهر مشهد و هم‌چنین مسیر خط دو قطار شهری در شکل۱ نشان داده شده است.

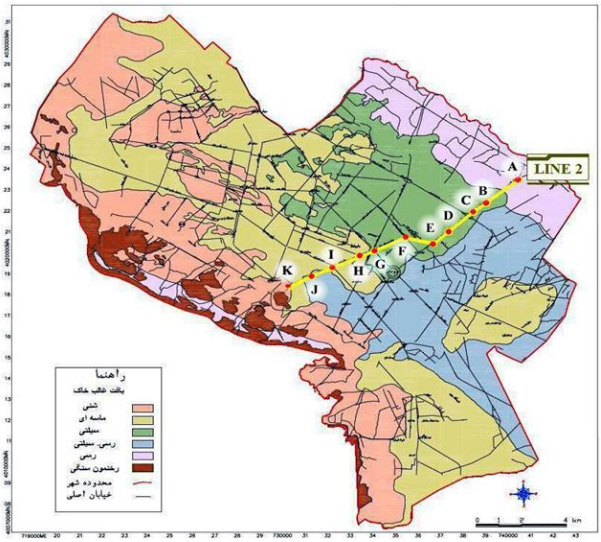


شکل ۱. موقعیت شهر مشهد در حوضهٔ آب‌ریز کشف‌رود و مسیر خط دو قطار شهری

نقشهٔ بافت خاک شهر مشهد [٥] که موقعیت خط ۲ قطار شهری به‌همراه ۱۱ ایستگاه A تا K بر روی آن مشخص شده، در شکل ۲ ارائه شده است. هم‌چنین در شکل ۳ نیم‌رخ طولی زیرسطحی ساخت‌گاه خط دو قطار شهری با توجه به اطلاعات به‌دست آمده از گمانه‌های حفر شده در مسیر ارائه شده است. با توجه به نقشهٔ بافت خاک (شکل۲) و هم‌چنین پروفیل تهیه شده (شکل ۳) ملاحظه می‌شود که خاک‌های درشت‌دانه شنی در حاشیهٔ جنوبی مجاور ارتفاعات و سمت غربی شهر گسترش بیش‌تری دارند. با عبور از خاک‌های شنی و حرکت به

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]

سمت نقاط مرکزی شهر و هم‌چنین در قسمت جنوب شرقی، خاک‌های ماسه‌ای وجود دارند. به طرف شمال شرق خاک‌های ماسه‌ای به خاک‌های ریزدانه سیلتی، رس سیلتی و سپس رسی تبدیل می‌شوند.



شکل ۲. نقشه بافت خاک سطحی در پهنهٔ شهر مشهد و موقعیت ایستگاه‌های A تا K در مسیر خط دو قطار شهری

گروه‌بندی خاک منطقه

با توجه به نقشهٔ بافت خاک شهر مشهد (شکل ۲) و تغییرات نوع خاک در مسیر خط دو قطار شهری می‌توان برای پژوهش‌های دقیق‌تر مسیر مذکور را از خیابان طبرسی تا کوه‌سنگی به ۵ بخش متفاوت تقسیم کرد که در شکل ۳ با عنوان پروفیل ۱ تا ۵ مشخص شده است و مشخصات هر بخش بدین شرح است:

بخش ۱ (پروفیل ۱): بافت رسی شامل ایستگاه A و گمانه‌های BH-۲۰۰۱ و BH-۲۰۰۲.

بخش ۲ (پروفیل ۲): بافت سیلتی شامل ایستگاه B, C, D, E, F,G و گمانه‌های BH-۲۰۰۳ و BH-۲۰۰٤ و BH-۲۰۰۵ و BH-۲۰۰٦.

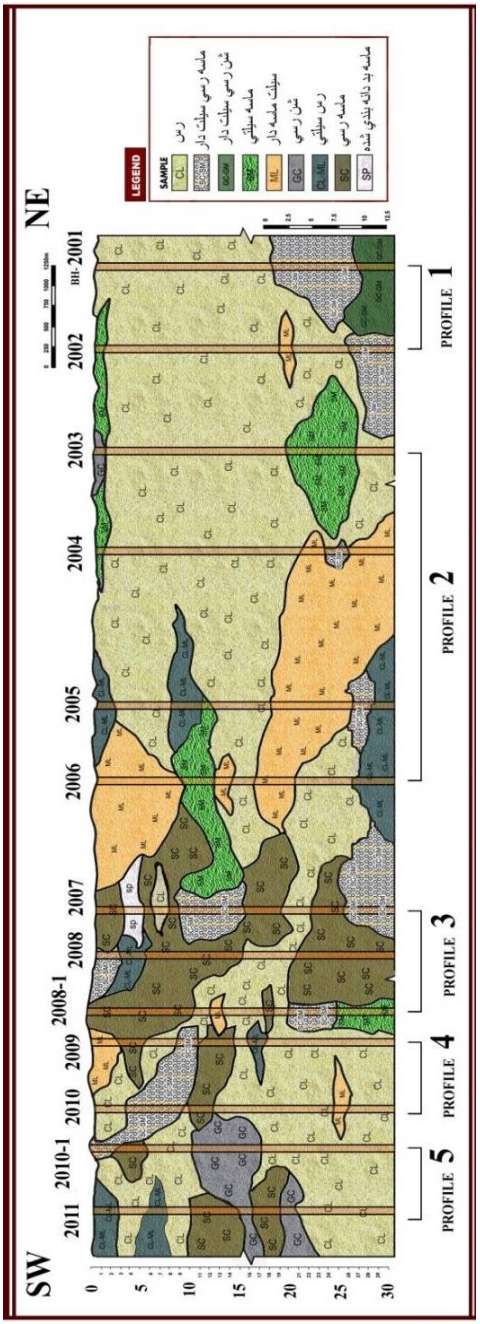
بخش ۳ (پروفیل ۳): بافت ماسه‌ای شامل ایستگاه H, I و گمانه‌های BH-۲۰۰۷-۱ و BH-۲۰۰۸ و BH-۲۰۰۸-۱.

بخش ٤ (پروفیل ٤): بافت رسی- سیلتی شامل ایستگاه J و گمانه‌های BH-۲۰۰۹ و BH-۲۰۱۰.

بخش ۵ (پروفیل ۵): بافت شنی شامل ایستگاه K و گمانه‌های BH-۲۰۱۰-۱ و BH -۲۰۱۱.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]



شکل ۳. نیمرخ طولی زیرسطحی ساخت گاه مسیر خط دو قطار شهری

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]

چنان‌که در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود، از ابتدای تا میانه‌های مسیر (پروفیل ۱و ۲) خاک غالب در منطقه بیش‌تر شامل رس با خاصیت خمیری کم (CL)، خاک‌های سیلتی با خاصیت خمیری کم (ML) و خاک‌های رسی سیلتی (CL-ML) است که لنزهای ماسه‌ای نیز در آن‌ها به چشم می‌خورند. در پروفیل (۳ و٤) خاک منطقه بیش‌تر ماسهٔ سیلتی (SM) و ماسهٔ رسی (SC) است که میان لایه‌های سیلتی و رسی آن‌ها را همراهی می‌کنند. در انتهای مسیر (پروفیل ۵) خاک غالبی را نمی‌توان در گمانه‌ها معرفی کرد ولی نکته قابل توجه در این مسیر حضور لنزهای بسیار درشت‌دانه شنی است.

با توجه به گمانه‌ها و مشاهدهٔ لنزهای فراوان در بین لایه‌ها، می‌توان گفت رسوب‌های مسیر بررسی شده در محیطی سیلابی ته‌نشین شده‌اند. با افزایش انرژی محیط رسوب‌گذاری و یا به‌طور موضعی افزایش شیب بستر، آبرفت‌های دانه درشت‌تری به محیط حمل شده است که به‌وسیلهٔ خاک‌های دانه‌ریزتر در بالا و جوانب احاطه شده است و لنز را تشکیل داده‌اند. به‌طور کلی از مشخصات آبرفت‌های شهر مشهد، تغییر زیاد رسوب‌گذاری در عمق و جوانب است که نشان‌دهندهٔ محیط رسوب‌گذاری سیلابی است.

خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح

خصوصیات ژئوتکنیکی بررسی شده در این تحقیق شامل خصوصیات فیزیکی و مکانیکی از قبیل خصوصیات خمیری، چسبندگی، اصطکاک داخلی و نتایج حاصل از آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) است.

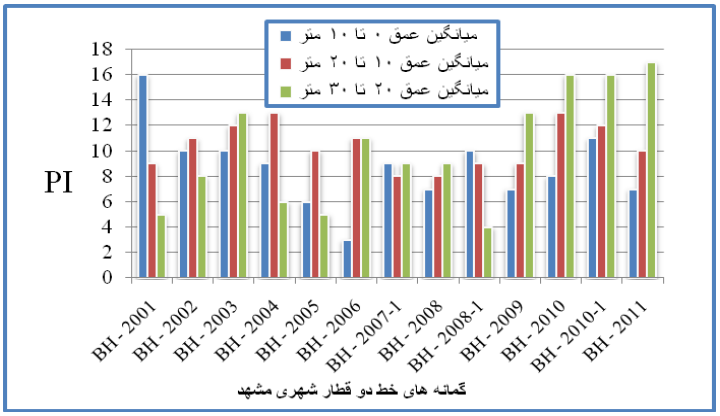
خصوصیات خمیری

به‌طورکلی حالت خمیری (پلاستیسیته) از خصوصیات مهم خاک‌های ریزدانه محسوب می‌شود و این حالت ناشی از وجود مواد رسی یا مواد آلی در خاک است. ویژگی خمیری مقدار قابلیت خاک را برای تغییر شکل غیرقابل برگشت نشان می‌دهد. تغییرات شاخص خمیری و حد روانی مسیر نسبت به عمق، به‌ترتیب در شکل‌های ٤ و ۵ نشان داده شده است. تغییرات (LL) و (PI) نشان می‌دهد که به‌طرف انتهای مسیر و تا عمق ۲۰ متری کیفیت

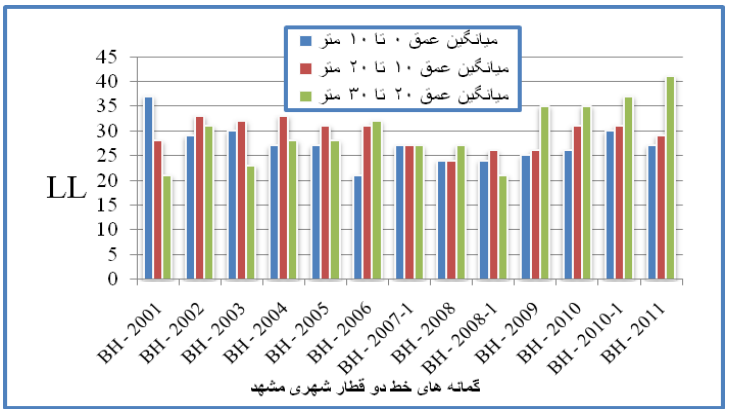
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]

مصالح افزایش یافته و تمایل خاک به تغییر حجم در مقابل رطوبت کم‌تر می‌گردد. ولی از عمق ۲۰ متر تا ۳۰ متری به‌طرف جنوب غرب با توجه به اطلاعات حاصل از گمانه‌های BH-۲۰۰۹ تا BH-۲۰۱۱ (پروفیل ٤ و ٥) به‌علت غالب بودن خاک‌های رسی نسبت به پروفیل‌های ۱ تا ۳، حد روانی (LL) و شاخص خمیری (PI) افزایش یافته است که در نتیجه افزایش این شاخص‌ها باعث کاهش کیفیت مصالح گشته است.



شکل ٤. نمودار تغییرات PI نسبت به عمق در مسیر خط ۲

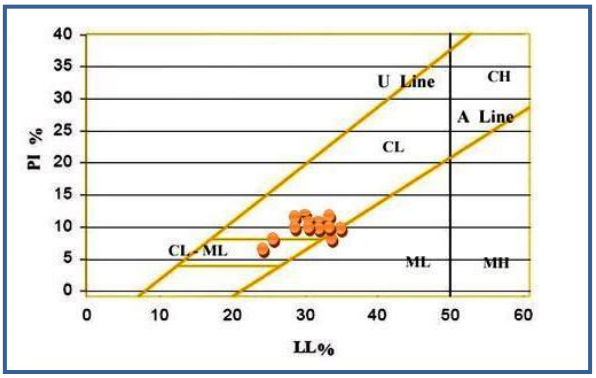


شکل ٥. نمودار تغییرات LL نسبت به عمق در مسیر خط ۲

از آن‌جا که نوع خاک ریزدانه در مسائل مهندسی نقش مهم و به‌سزایی دارد، به‌منظور تشخیص نوع خاک ریزدانه در طول مسیر، پراکندگی حدود آتربرگ بر روی نمودار کاساگراند منطبق و نتایج در شکل ٦ ارائه شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

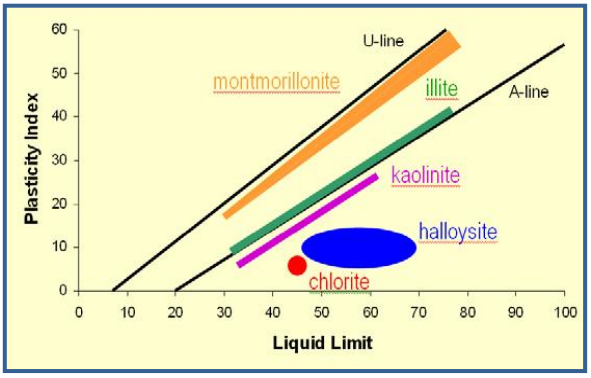
[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]



شکل ٦. نمودار پراکندگی حدود آتربرگ

هم‌چنین محدودهٔ کانی‌های رسی در نمودار کاساگراند در شکل ۷ نشان داده شده است. مقایسهٔ دو نمودار اشکال ٦ و ۷ نشان می‌دهد که خاک‌های رسی مسیر به‌طور غالب در محدودهٔ کانی ایلیت و به مقدار کم‌تری کانی کائولینیت قرار می‌گیرند. در کانی ایلیت به‌علت وجود پتاسیم جذب آب کم‌تر است و در نتیجه مشکلات تورم و تحکیم آن کم‌تر است.

با توجه به این‌که برای تشخیص نوع کانی رسی تنها به نمودار کاساگراند نمی‌توان اکتفا کرد، بر روی نمونه‌هایی از ابتدای مسیر در شمال شرق و انتهای مسیر در جنوب غرب آزمایش XRD انجام شد که نتایج آن‌ها در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است.



شکل ۷. محدودهٔ کانی‌ها در نمودار کاساگراند [٦] خاک‌های ریزدانه مسیر خط ۲ قطار شهری مشهد

نتایج آزمایش XRD در شکل‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهد که کانی‌های رسی در گمانه‌های منتخب از ابتدا و انتهای مسیر، از نوع Illite و خانواده میکا هستند. با توجه به خواص این گروه از کانی‌های رسی مانند پیوند هیدروژنی قوی و سطح ویژهٔ کم، خاک‌های رسی موجود در مسیر بررسی شده دارای تورم‌پذیری کم هستند. نتایج آزمایش XRD مشابه نتایج حدود

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]

آتربرگ است. هر دو آزمایش نشان می‌دهد که خاک رس مسیر قطار شهری اغلب از نوع ایلیت است. با توجه به گسترش سنگ‌های آذرین و دگرگونی در قسمت جنوبی مشهد، خاک‌های رسی حاصل از هوازدگی اغلب از نوع کائولینیت و ایلیت است.

چسبندگی و اصطکاک داخلی مصالح

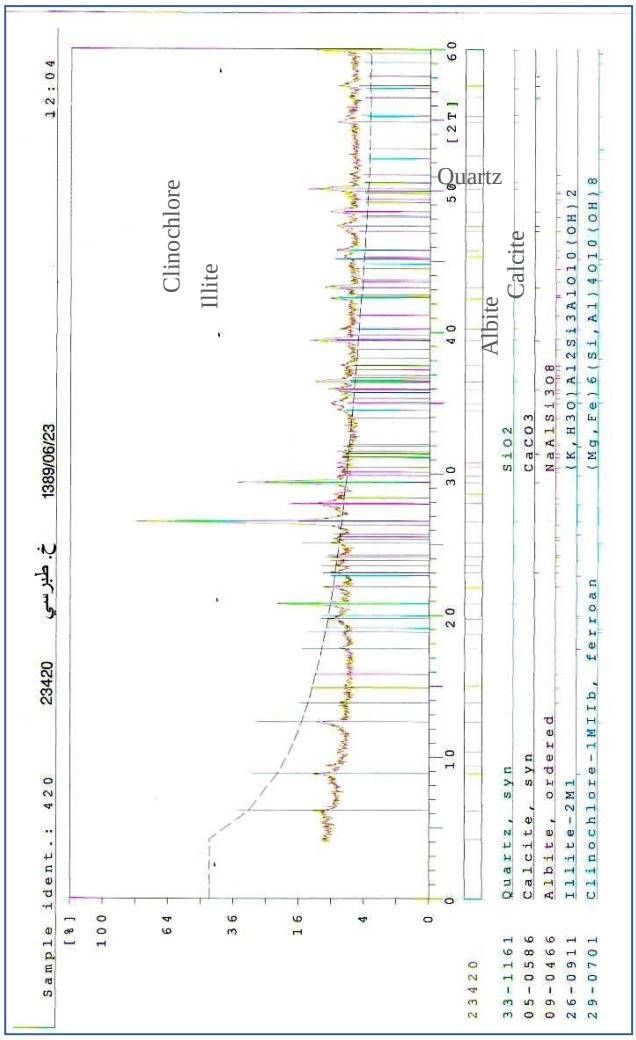
مقاومت خاک‌ها در برابر گسیختگی ناشی از اصطکاک و چسبندگی آن‌هاست. بنا بر این می‌توان گفت خاک‌هایی که دارای φ بالا و c قابل قبولی هستند می‌توانند مصالح مناسبی برای پروژه‌های عمرانی محسوب شوند.

به‌منظور تعیین خصوصیات مکانیکی خاک‌های مسیر خط ۲ قطار شهری، آزمایش برش مستقیم و سه‌محوری بر روی نمونه‌های برداشت شده در حین حفاری گمانه‌ها انجام شده است که متوسط مقادیر به‌دست آمده از c و φ حاصل از نتایج آزمایش‌ها، در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. با درنظر گرفتن اهمیت این پارامترها، تغییرات آن‌ها در مسیر پژوهش در شکل‌های زیر با یک‌دیگر مقایسه شده است.

از آن‌جا که در خاک‌های ریزدانه، چسبندگی و در خاک‌های درشت‌دانه اصطکاک داخلی بیش‌تر است با توجه به تغییرات نوع خاک، انتظار می‌رود در طول مسیر c و φ متفاوتی وجود داشته باشد. با توجه به پروفیل زیر سطحی مسیر، به سمت انتهای مسیر (پروفیل ٤ و ٥) خاک درشت‌دانه‌تر شده و در نتیجه زاویهٔ اصطکاک داخلی افزایش می‌یابد. بنا بر این چنان‌که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود، به‌طورکلی در طی مسیر و به سمت انتها (جنوب‌غرب)، با کاهش چسبندگی و افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی مصالح، به‌سمت جنوب‌غرب (انتهای مسیر) کیفیت مصالح نسبت به پروفیل‌های ۱ تا ۳ افزایش می‌یابد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

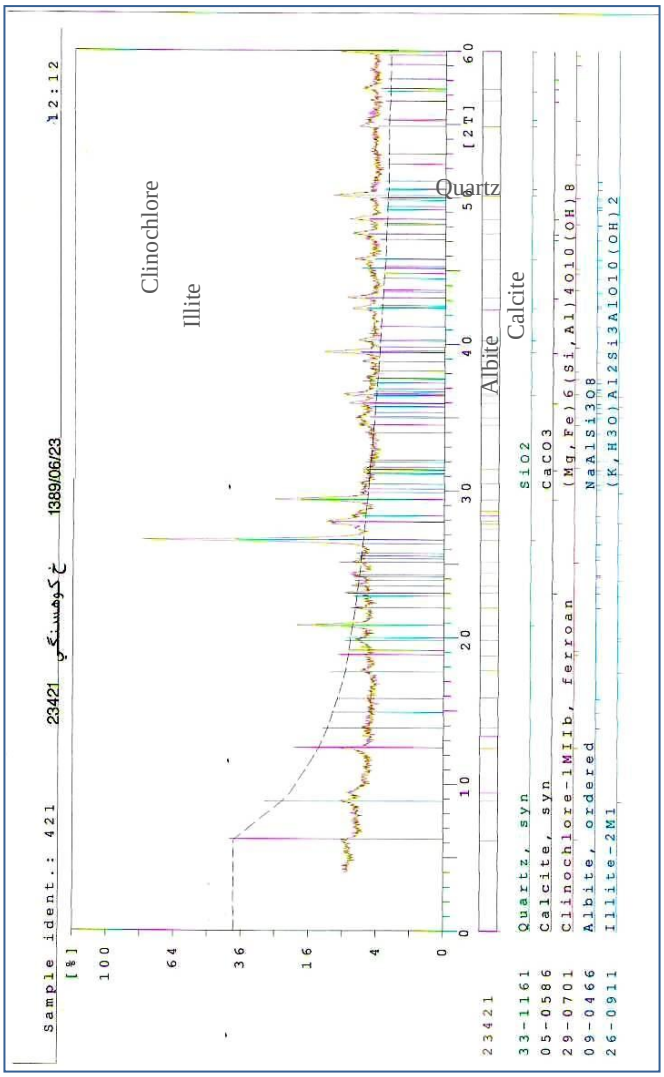
[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]



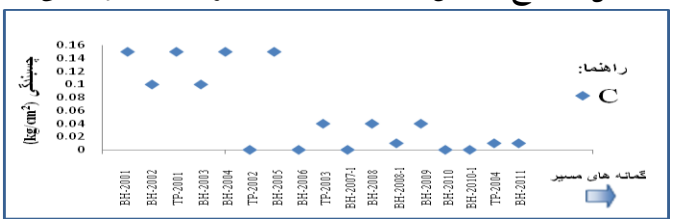
شکل ۸. نتایج آزمایش XRD از ابتدای مسیر (خیابان طبرسی)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]



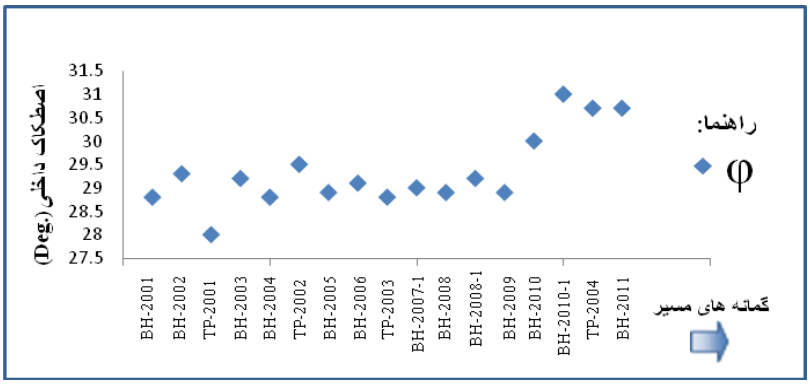
شکل ۹. نتایج آزمایش XRD از انتهای مسیر (خیابان کوه‌سنگی)



شکل ۱۰. تغییرات چسبندگی در طول مسیر خط ۲

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]



شکل ۱۱. تغییرات زاویهٔ اصطکاک داخلی در طول مسیر خط ۲

آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)

اندازه‌گیری مقاومت خاک به‌صورت‌های گوناگونی امکان‌پذیر است. آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) از آزمون‌های برجا برای تعیین مقاومت خاک است. این آزمایش هر چند ابتدایی است ولی آزمایش مفیدی برای روند تغییرات مقاومت خاک‌ها در عمق‌های مختلف است.

در این بخش با توجه به‌جنس لایه‌های خاک مسیر و پروفیل‌های تعیین شده از نیم‌رخ طولی مسیر (شکل ۳)، پروفیل تغییرات SPT آن‌ها نسبت به‌عمق رسم شده است (اشکال ۱۲ تا ۱٦). از آن‌جاکه آزمایش نفوذ استاندارد به‌عنوان شاخصی برای تعیین مقاومت خاک در خاک‌های درشت دانه استفاده می‌شود و از طرفی مسیر مذکور ترکیبی از خاک‌های غیرچسبنده و رسی است، لذا عدد SPT در خاک‌های رسی به‌عنوان شاخص سختی در نظر گرفته شده و تغییرات کیفیت SPT به‌طورکلی بررسی شده است. به‌همین منظور برای رسم پروفیل تغییرات SPT مسیر در نرم‌افزار (روک ورک[1] ۲۰۰٦)، جدول ۱ تعریف شده و به‌طورکلی تغییرات کیفیت SPT در کل مسیر به ۵ گروه تفکیک شده است.

به‌منظور امتیازدهی در نرم‌افزار، خاک‌های بسیار نرم و بسیار سست با امتیاز ۱ و با کیفیت SPT بسیار ضعیف، خاک‌های نرم و سست امتیاز ۲ و کیفیت ضعیف، خاک‌های رسی متوسط و خاک‌های با تراکم متوسط امتیاز ۳ و کیفیت متوسط، خاک‌های سفت و متراکم با امتیاز ٤ و کیفیت خوب و برای خاک‌های بسیار سفت و سخت و هم‌چنین خاک‌های بسیار متراکم امتیاز ۵ و کیفیت بسیار خوب در نظر گرفته شده است.

۱. Rockwork

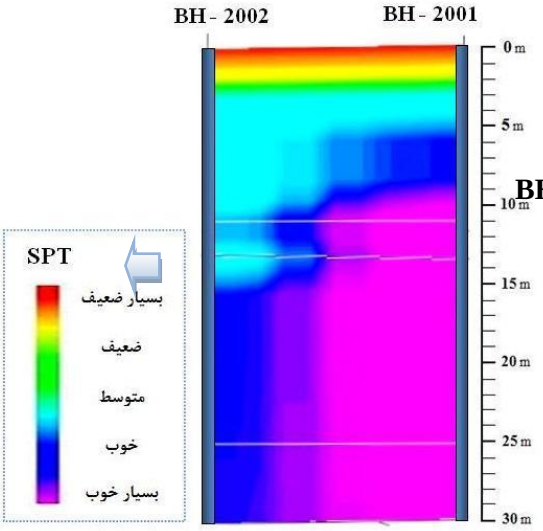
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]

اصلاحات لازم بر روی اعداد SPT بر اساس تغییرات عمق انجام شد، لذا با توجه به مقایسهٔ تغییرات کیفیت SPT در ۵ گروه بسیار ضعیف تا بسیار خوب، اصلاحات عدد SPT تغییرات چشم‌گیری بر کیفیت SPT در ۵ گروه مذکور نشان نداد.

جدول ۱. امتیازدهی در نرم افزار (روک ورک ۲۰۰۶) برای ترسیم تغییرات SPT در مسیر خط ۲

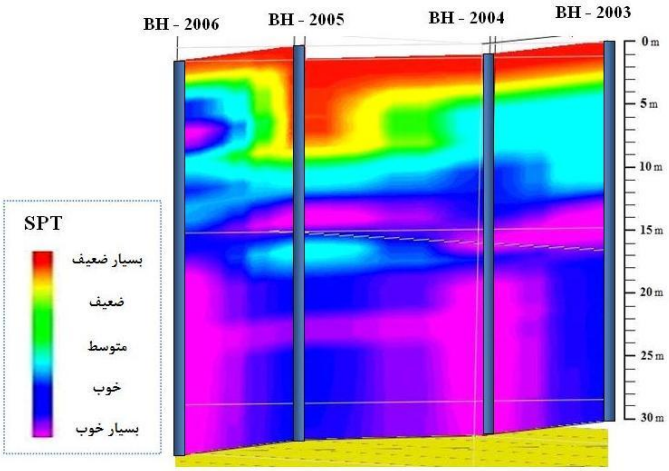
SPT	در خاک‌های رسی [7]	۲> بسیار نرم	۲ -٤ نرم	٤ – ۸ متوسط	۸ -۱٦ سفت	۱٦ – ۳۲ بسیار سفت	۳۲< سخت
	در خاک‌های بدون چسبندگی [۸]	٤> بسیار سست	٤ -۱۰ سست	۱۰ – ۳۰ تراکم متوسط	۳۰ – ۵۰ متراکم	۵۰< بسیار متراکم	
	امتیازدهی در نرم‌افزار Rock Work 2006	(۱) بسیار ضعیف	(۲) ضعیف	(۳) متوسط	(٤) خوب	(۵) بسیار خوب	



شکل ۱۲. پروفیل تغییرات SPT نسبت به عمق در گمانه‌های BH-۲۰۰۱ و BH-۲۰۰۲ (پروفیل ۱)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]



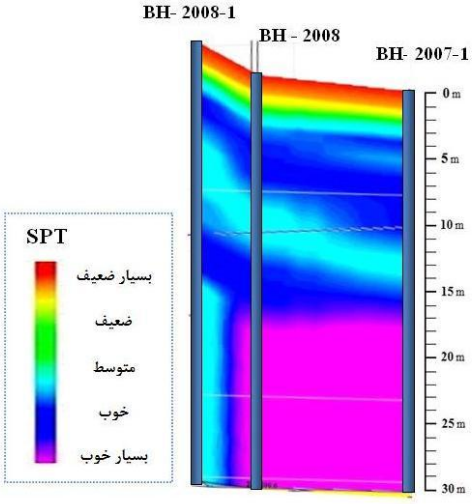
شکل ۱۳. پروفیل تغییرات SPT نسبت به عمق در گمانه‌های BH-۲۰۰۳ تا BH-۲۰۰٦ (پروفیل۲)

مقایسهٔ شکل‌های ۱۲ تا ۱٦ با پروفیل‌های طولی نشان می‌دهد در بخش‌هایی از مسیر که خاک‌ها ریزدانه هستند، افت مقادیر N مشاهده می‌شود. در صورتی‌که در قسمت‌هایی از مسیر که خاک‌ها درشت دانه‌تر می‌شوند مقدار N نیز افزایش می‌یابد.

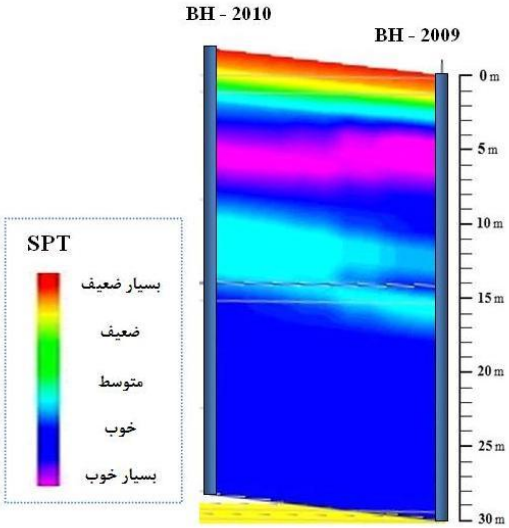
به‌طورکلی در طول مسیر و با توجه به تقسیم‌بندی جدول ۱ کیفیت خاک‌های بدون چسبندگی با توجه به نتایج SPT خوب و بسیار خوب است که گویای خاکی متراکم و یا بسیار متراکم است و نشان می‌دهد که خاک‌های درشت‌دانه مسیر به‌طورکلی از تراکم زیادی برخوردارند. در خاک‌های رسی نیز کیفیت خوب و بسیار خوب به‌دست آمده نشان‌دهندهٔ خاک‌های سفت و سخت در مسیر است. براساس اطلاعات به‌دست آمده از گمانه‌ها، خاک مسیر در اکثر گمانه‌ها تا عمق حدود ۲ متری (و بعضاً ٤ متر) دست‌ریز است که نرم بودن لایه‌های سطحی مسیر تا عمق حدود ٤ متری و کیفیت نامناسب آن‌ها برطبق پروفیل‌های فوق به‌همین دلیل است. وجود عدسی‌های ماسه‌ای در بین لایه‌های خاک باعث افزایش میزان SPT در آن‌ها شده است. هم‌چنین چنان‌که در ابتدای بحث ذکر شد، به‌دلیل ته‌نشینی رسوب‌های در محیطی سیلابی، عدسی‌های رسی و شنی در طول مسیر به چشم می‌خورد که میزان عدد SPT به‌طور موضعی در رس‌ها پایین و در شن‌ها بالا می‌رود. مقایسهٔ N (SPT) در اعماق مختلف

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]

نیز بیان‌گر تراکم بیش‌تر و مقاومت بالاتر خاک در عمق‌های بیش‌تر است. طبق این نمودارها در بیش‌تر مسیر با افزایش عمق، SPT نیز افزایش یافته که به‌دلیل اضافه شدن روباره نیز است.



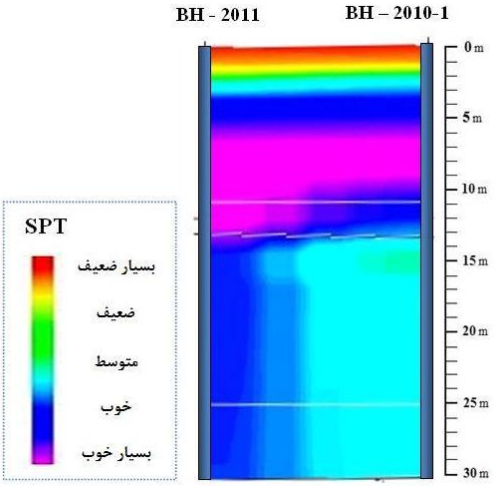
شکل ١٤. پروفیل تغییرات SPT نسبت به عمق در گمانه‌های ۱-۲۰۰۷-BH تا ۱-۲۰۰۸-BH (پروفیل ۳)



شکل ۱۵. پروفیل تغییرات SPT نسبت به عمق در گمانه‌های ۲۰۰۹-BH و ۲۰۱۰-BH (پروفیل ٤)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]



شکل ۱٦. پروفیل تغییرات SPT نسبت به عمق در گمانه‌های ۱-۲۰۱۰ -BH و BH-۲۰۱۱ (پروفیل ۵)

نشست سطحی زمین بر اثر حفر تونل

روش تئوری

محققان، همواره نشست سطحی زمین ناشی از حفر تونل را با توجه به اهمیتی که داشته است بررسی کرده‌اند تا با اتخاذ شیوه‌های مناسب میزان آن را قبل از شروع عملیات ساخت برآورد کنند [۹]. پیک[۱] (۱۹٦۹) اولین فردی بود که نشان داد منحنی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل دارای توزیع نرمال است [۱۰]. سپس رابطه‌ای بدین‌صورت برای پروفیل نشست سطحی ارائه کرد:

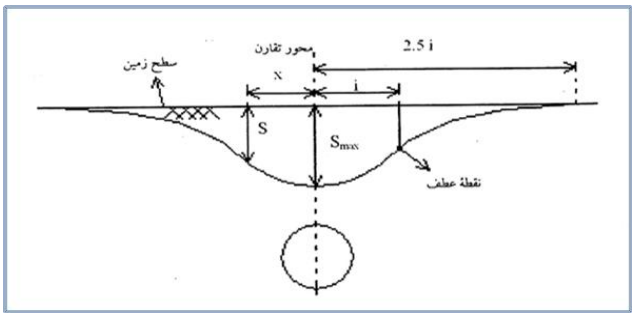
$$S = S_{max} \, e^{\left[-\frac{x^2}{2i^2}\right]} \qquad (۱)$$

در رابطهٔ (۱) دو پارامتر (i) و (S_{max}) تعیین کننده‌اند (شکل ۱۷) و تحقیقات بسیاری برای تعیین این مقادیر صورت گرفته است و پیشنهادهای مختلفی به‌منظور محاسبهٔ مقدار آن‌ها داده شده است [۱۱]، [۱۲].

هم‌چنین در دههٔ اخیر تحقیقاتی در زمینهٔ نشست خاک در اثر تونلبری به‌کمک شبکهٔ عصبی مصنوعی انجام شده است که پایه و اساس این تحقیقات نیز رابطهٔ پیک است [۱۳]، [۱٤].

۱. Peck

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]



شکل ۱۷. منحنی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل

روش عددی

با توجه به اهمیت مقدار S_{max} (بیش‌ترین مقدار نشست سطح زمین)، در روش عددی نیز به محاسبهٔ این پارامتر در مسیر خط دو قطار شهری مشهد پرداخته شده است. بدین‌منظور از نرم‌افزار پلکسیس ورژن ۸[۱] برای محاسبات استفاده شده است. در ابتدا با توجه به پارامترهای موجود از آزمایش‌های مکانیک خاک بر روی نمونه‌های مسیر، از مدل موهر-کولمب استفاده شده است که این مدل دارای ۵ پارامتر اصلی: مدول الاستیسیته (E)، ضریب پوآسون (υ)، زاویهٔ اصطکاک داخلی (φ)، چسبندگی (C) و زاویهٔ اتساع (ψ) است [۱۵]. سپس با توجه به طول زیاد و چشم‌گیر تونل نسبت به سطح مقطع آن، از تحلیل به روش کرنش مسطح استفاده گردید.

در ادامه با متغیر قرار دادن عمق قرارگیری تونلی با قطر ۸/۵ متر در طول مسیر، بهترین عمق برای قرارگیری تونل از لحاظ ژئوتکنیک پیشنهاد شده است. با توجه به این‌که در طول مسیر لایه‌های خاک تنوع زیادی دارند و یکنواخت نیستند، لذا در مدل‌سازی عددی نیز از ۵ پروفیل مجزا شده مشابه شکل ۳ استفاده شده و برای هر پروفیل به‌طور جداگانه موقعیت تونل از عمق ۱۰ متری تا ۲٤ متری هر یک متر تغییر کرده و S_{max} برای هر عمق محاسبه شده است. سپس عمقی که کم‌ترین مقدار S_{max} را داشته در هر پروفیل تعیین شده است (شکل‌های ۱۸ تا ۲۲). جدول‌های۲ تا ٦ بیان‌گر پارامترهای به‌کار برده شده در مدل موهر ـ کولمب هستند. لازم به ذکر است که با توجه به نقشه‌ها و منحنی‌های هم عمق دشت مشهد که سطح آب زیرزمینی را بین اعماق ۳۰ تا ۱۰۰ متر نشان می‌دهد [۱٦]، سطح آب در گمانه‌ها در عمق ۳۰ متر در نظر گرفته شده است.

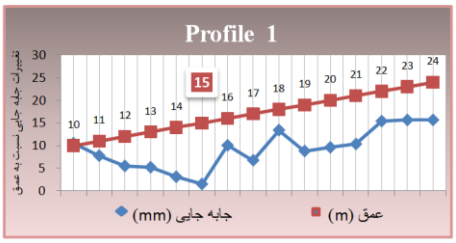
۱. Plaxis Version 8

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]

جدول ۲. پارامترهای به‌کار برده شده در مدل موهر_ کولمب، نرم‌افزار پلکسیس **V8** (پروفیل ۱)

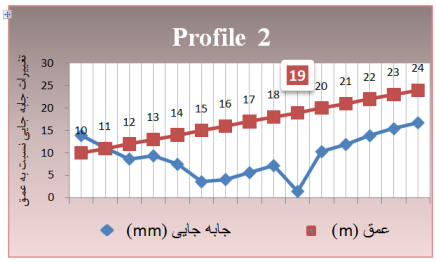
Name	**Layers**	
	0 – 21 m CL , ML	21 – 30 m SC – SM, GC-GM
E (kN/m^2)	1E + 04	2E + 04
υ	0.35	0.25
φ(^{o})	28	29
c (kN/m^2)	6	2
ψ(^{o})	0	0



شکل ۱۸. نمودار تغییرات جابه‌جایی سطح زمین نسبت به عمق قرارگیری تونل(پروفیل ۱)

جدول ۳. پارامترهای به‌کار برده شده در مدل موهر_ کولمب، نرم افزار پلکسیس **V8** (پروفیل ۲)

Name	Layers		
	0 – 17 m CL , ML, CL - ML	17 – 26 m SM , SC – SM	26 – 30 m CL, ML, CL - ML
E (kN/m^2)	1E + 04	1E + 04	1.2 E + 04
υ	0.35	0.35	0.3
φ (^{o})	28	29	28.8
c (kN/m^2)	6	5	6
ψ (^{o})	0	0	0

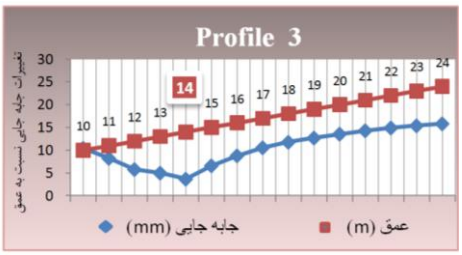


شکل ۱۹. نمودار تغییرات جابه‌جایی سطح زمین نسبت به عمق قرارگیری تونل (پروفیل ۲)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]

جدول ٤. پارامترهای به‌کار برده شده در مدل موهر_ کولمب، نرم‌افزار پلکسیس V8 (پروفیل ۳)

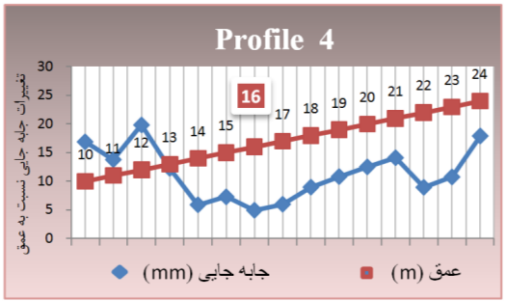
Name	Layers		
	0 – 11 m SC, SP, SC - SM	11–20 m CL , ML	20 – 30 m SC, SM, SC - SM
E (kN/m^2)	2E + 04	1.2 E + 04	2E + 04
υ	0.25	0.3	0.25
φ (^{o})	29.5	28.9	29.1
c (kN/m^2)	2	6	2
ψ (^{o})	0	0	0



شکل ۲۰. نمودار تغییرات جابه‌جایی سطح زمین نسبت به عمق قرارگیری تونل (پروفیل ۳)

جدول ٥:. پارامترهای به‌کار برده شده در مدل موهر_ کولمب، نرم‌افزار پلکسیس V8 (پروفیل ٤)

Name	Layers		
	0 – 3 m CL , ML	3 – 14 m SC , SC - SM	14 – 30 m CL , CL - ML
E (kN/m^2)	1E + 04	1E + 04	1E + 04
υ	0.35	0.25	0.35
φ (^{o})	28.8	29	28.9
c (kN/m^2)	5	2	5
ψ (^{o})	0	0	0



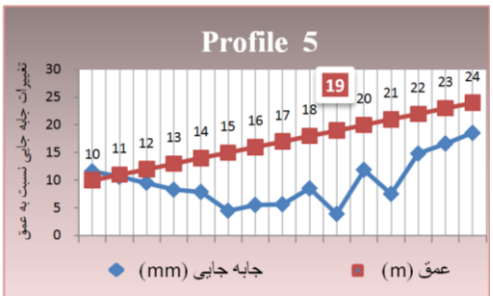
شکل ۲۱. نمودار تغییرات جابه‌جایی سطح زمین نسبت به عمق قرارگیری تونل (پروفیل ٤)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]

جدول ٦. پارامترهای به‌کار برده شده در مدل موهر_ کولمب، نرم‌افزار پلکسیس V8 (پروفیل ٥)

Name	Layers			
	0 – 10 m CL , ML, CL - ML	10 – 16 m SC	16 – 20 m GC	20 – 30 m CL
E (kN/m^2)	1.2 E + 04	2E + 04	2E + 04	1.2 E + 04
υ	0.3	0.25	0.25	0.3
φ (^{o})	28.9	36	30.7	30
c (kN/m^2)	6	0	2	4
ψ (^{o})	0	0	0	0



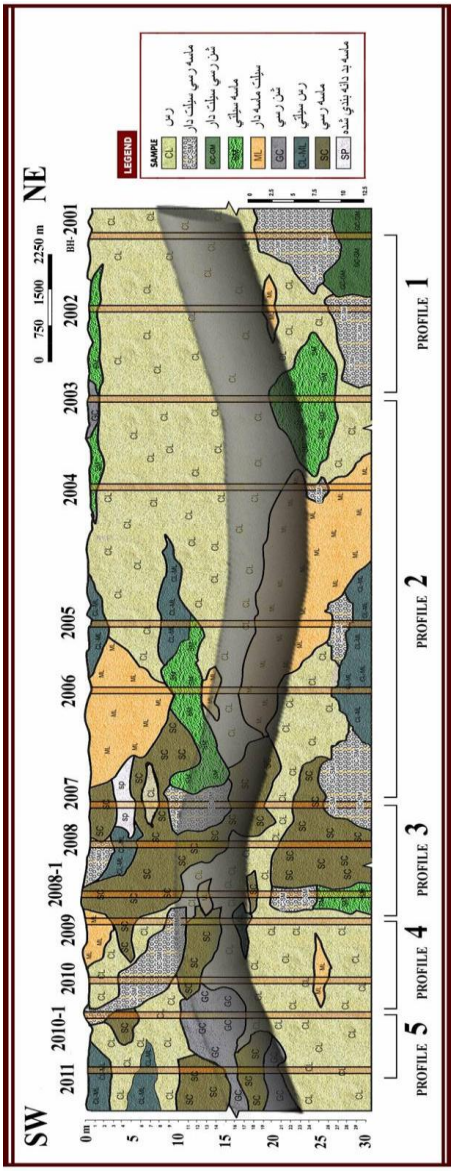
شکل ۲۲. نمودار تغییرات جابه‌جایی سطح زمین نسبت به عمق قرارگیری تونل (پروفیل ٥)

با توجه به مقادیر به‌دست آمده از S_{max} در پروفیل‌های (۱) تا (٥) (شکل‌های ۱۸ تا ۲۲) مشاهده می‌شود که در هر پروفیل عمقی وجود دارد که در آن مقدار S_{max} به‌حداقل می‌رسد. این عمق در پروفیل (۱) ۱٥ متری، پروفیل (۲) ۱۹ متری، پروفیل (۳) ۱٤ متری، پروفیل (٤) ۱٦ متری و پروفیل (٥) ۱۹ متری است. با توجه به عمق‌های به‌دست آمده می‌توان عمقی بهینه برای استقرار تونل را تعریف کرد (شکل ۲۳). با توجه به شکل ۲۳ می‌توان مشاهده کرد که بیش‌ترین تغییر عمق از پروفیل ۲ به ۳ و به‌مقدار ٥ متر است که با توجه به مقیاس، این تغییر در طول حدود ٦ کیلومتر صورت گرفته است. بدین‌ترتیب می‌توان بیش‌ترین مقدار جابه‌جایی را ۰/۸ در طول یک متر در نظر گرفت که این میزان برای تونل منطقی به‌نظر می‌رسد. این نکته نیز لازم به یادآوری است که انتخاب عمق‌های مذکور از نظر خصوصیات ژئوتکنیکی است. از آن‌جا که تنها توجه به S_{max} معیار طراحی مسیر تونل‌ها نیست، لازم است سایر پارامترهای ژئوتکنیکی نیز در زمان اجرا مورد توجه واقع شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]

شکل ۲۳ نشان می‌دهد که بهترین عمق قرارگیری تونل در جایی است که حتی‌الامکان در لایه‌های ریزدانه نباشد. به‌استثنای پروفیل (۱) و (۲) که بیش‌تر مسیر را خاک‌های ریزدانه و رسی



شکل ۲۳. عمق بهینه پیشنهادی استقرار تونل در مسیر خط دو قطار شهری مشهد با استفاده از محاسبات عددی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]

تشکیل می‌دهند، در ادامهٔ مسیر شاهد قرارگیری تونل در لایه‌های درشت‌دانه‌تر و با کیفیت بهتر هستیم. بدین‌ترتیب به‌نظر می‌رسد که ابتدای مسیر (پروفیل ۱ و ۲) به‌دلیل فراوانی خاک‌های ریزدانه و بالاخص رس به به‌سازی نیاز داشته باشد.

از آن‌جا که تونل‌زنی در مسیر مورد نظر با ماشین‌های حفار تونل (TBM) صورت خواهد گرفت و سرعت پیش‌روی با ماشین‌های حفار بسیار زیاد است، باید از قبل زمین به‌خوبی شناسایی شده و بخش‌های نامساعد آن به‌سازی گردد. با توجه به این موضوع به‌نظر می‌رسد برای مسیری به‌طول حدود ۱۷ کیلومتر، تعداد ۱۷ گمانه برای شناسایی دقیق زمین کافی نیست و مسیر نیاز به بررسی بیش‌تری از لحاظ وضعیت زمین‌شناسی دارد.

نتیجه‌گیری

- به‌طورکلی خاک غالب مسیر خط ۲ قطار شهری مشهد را خاک‌های ریزدانه سیلتی و رسی و خاک‌های درشت‌دانه ماسه‌ای تشکیل می‌دهد. با توجه به جنس خاک‌ها، از ابتدای مسیر (بلوار طبرسی) تا میدان شهدا به‌علت وجود خاک‌های ریزدانه، با خصوصیات ژئوتکنیکی ضعیف‌تری روبه‌رو هستیم ولی از میدان شهدا به‌سمت انتهای مسیر (کوه‌سنگی) به‌علت وجود خاک‌های درشت‌دانه، خصوصیات ژئوتکنیکی افزایش می‌یابد.
- افزایش اندازهٔ ذرات به‌سمت انتهای مسیر، موجب افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی مصالح و کاهش چسبندگی مصالح به سمت جنوب غرب (انتهای مسیر) می‌شود.
- در طول مسیر از ابتدا به‌طرف انتها و تا عمق ۲۰ متری شاخص‌های LL و PI کاهش می‌یابند. بنا بر این به‌طرف انتهای مسیر و تا عمق ۲۰ متری، بهتر شدن کیفیت مصالح مشاهده می‌گردد؛ ولی از عمق ۲۰ متر تا ۳۰ متری و از گمانه BH-۲۰۰۹ تا انتهای مسیر شاخص‌های LL وPI افزایش می‌یابند که موجب کاهش کیفیت مصالح در این عمق می‌شود.
- نتایج آزمایش XRD نشان می‌دهد که کانی رسی غالب در مسیر از نوع ایلیت است. در این کانی به‌دلیل وجود پتاسیم، جذب آب کم‌تر از سایر کانی‌های رسی است و در نتیجه مشکلات تورم و تحکیم کم‌تری دارد. نتایج آزمایش حدود آتربرگ نیز مؤید این مسئله است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]

- برای رسم پروفیل تغییرات SPT در نرم‌افزار روک ورک ۲۰۰٦، اعداد SPT به گروه‌های کلی در ۵ بازه بسیار خوب تا بسیار ضعیف تفکیک گردیدند. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که خاک‌های نرم، بسیار نرم، سست و بسیار سست در محدودهٔ پژوهش وجود نداشته و با افزایش عمق، مقادیر SPT افزایش می‌یابد که بیان‌گر تراکم بیش‌تر و افزایش مقاومت خاک در اعماق است.
- نتایج حاصل از محاسبات عددی نشان می‌دهد که از لحاظ خصوصیات ژئوتکنیکی و با توجه به‌نوع خاک می‌توان عمقی بهینه برای استقرار تونل تعریف کرد که این عمق از لایه‌های خاک با خصوصیات ژئوتکنیکی مناسب‌تر عبور می‌کند.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از مسئولان و کارشناسان محترم قطار شهری مشهد و شرکت مهندسین مشاور جهد آزما برای در اختیار گذاشتن اطلاعات و منابع لازم قدردانی می‌شود.

منابع

۱. یوسفی، عفت، *بررسی زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک مسیر خط۱ قطار شهری مشهد*، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۸۳).

2. Addenbrooke T. I., Potts D. M., Puzrin A. M., "The influence of prefailure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction", Geotechnique Vol. 47 (1997) 693-712.

3. Lee C. J., Bolton M. D., Al-Tabbaa A., "Numerical modeling of group effects on the distribution of dragloads in pile foundations", Geotechnique Vol. 52 (2002) 325-335.

4. Cheng C. Y., Dasari G. R., Chow Y. K., Leung C. F., "Finite element analysis of tunnel–soil–pile interaction using displacement controlled model", Tunnelling and Underground Space Technology Vol. 22 (2007) 450-466.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]

۵. حافظی‌مقدس، ناصر، قزی، اعظم، *پهنه‌بندی ژئوتکنیکی و ارزیابی ظرفیت باربری مجاز شهر مشهد*، پنجمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، (۱۳۸٦) ۵۳۰-۵۲۳.

6. Raymond G. P., "Soil fines- clay minerals, Geotechnical Engineering", (1997) 25-34.

7. Kaniraj S., "Design aids in soil mechanics and foundation engineering", 3rd reprint, Indian Institute of Technology, Delhi (1998).

۸. معماریان، حسین، *زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک*، انتشارات دانشگاه تهران (۱۳۸۸).

۹. پاکباز، محمد، حیدری‌زاده، یوسف، *بررسی نشست خاک در اثر حفر تونل شهری اهواز*، چهارمین کنگرهٔ ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران (۱۳۸۷) ۸-۱.

10. Peck R., "Deep excavation and tunnelling in soft ground", Proceeding of 7 th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng (1969) 225-290.

11. Mair R. J. Tailor R. N., "Theme Lecture: Bored Tunneling in the Urban Environment", Proceeding of the fourteenth Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Vol. 1 (1997) 2353-2385.

12. Chou, Wei-I, Bobet A., "Predictions of Ground Deformation in Shallow Tunnels in Clay", Tunneling and Underground space Technology, Vol. 17 (2002) 3-19.

13.Kim C. Y. Bae G. J. Hong S. W. Park C. H. Moon H. K. Shin H. S., "Neural Network Based Prediction of Ground Surface Settlements due to Tunneling", Computers and Geotechnics, Vol. 28 (2001) 517-547.

14. Neaupane K. M. Adhikari N. R., "Prediction of Tunneling-induced Ground Movement with the Multi-layer Perceptron", Tunneling and Underground Space Technology Vol. 21 (2006) 151-159.

۱۵. نعمتی، علی، *تحلیل عددی تأثیر عمق حفاری روی رفتار یک توده خاک ماسه‌ای رس‌دار به روش اجزاء محدود*، فصلنامهٔ علمی ترویجی ژئوتکنیک و مقاومت مصالح، شماره ۱۰۳ (۱۳۸٤) ۳٦-۲۷.

۱٦. شرکت زمین‌ساخت مشهد، *گزارش منابع آب زیرزمینی دشت مشهد*، (۱۳۸۸) صفحه ۲٦.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1391.6.1.2.4]