کاربرد آنالیز احتمال در تعیین عمق بهینه تونل قطار شهری مشهد

غلامرضا خانلری*؛ دانشگاه بوعلی سینا همدان، گروه زمین‌شناسی
محمد غفوری؛ دانشگاه فردوسی مشهد، گروه زمین‌شناسی
جواد احمدزاده؛ دانشگاه بوعلی سینا همدان، گروه زمین‌شناسی
سلمه افشار؛ دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ: دریافت ۹۲/۶/۹ **پذیرش** ۹۳/۲/۶

چکیده

این پژوهش روی خاک‌های واقع در امتداد خط دوم قطار شهری مشهد صورت گرفته است. اطلاعات حاصل از آزمون‌های نفوذ استاندارد و سایر تست‌های برجا و آزمایشگاهی به‌منظور دست‌یابی به عمق بهینهٔ تونل، استفاده شده‌اند که با تکیه بر آن‌ها می‌توان تراز استقرار دستگاه حفاری را تعیین کرد. بدین‌منظور، ابتدا محدوده‌های عددی برای هر کدام از متغیرهای معادلات مربوط به جابه‌جایی الاستیک، نشست و روان‌گرایی از داده‌های موجود تعیین شده و سپس این داده‌ها برای مدل هوشمند و مبتنی بر جست و جو موسوم به الگوریتم ژنتیک از نوع چندمنظوره تعریف شدند. جست و جو در فضای عددی معادلات مذکور منجر به تعیین چند نقطهٔ بهینه برای عمق تونل شده که موثق بودن آن‌ها با مدل عددی از نوع اجزای محدود بازبینی و تأیید شده است. نتایج حاکی از به‌دست آمدن عمق بهینه با روش الگوریتم ژنتیک در عمق‌های ۳۰ و ۳۱ متری و روش اجزای محدود در عمق ۲۹ متری است. ضمناً ضرایب اطمینان مستخرج از روش اجزای محدود نیز مورد آنالیز احتمال قرار گرفت و توزیع آن bimodal به‌دست آمد. این به معنی آن است که در مناطق دارای ضریب اطمینان زیاد، مصالح پیش تحکیم یافته‌اند و در مناطق دارای ضریب اطمینان کم‌تر احتمالاً از مواد ریزشی و دانه‌درشت هستند. نتایج آنالیز احتمال برای ضرایب اطمینان حاکی از کاهش آن از عمق ۲۹

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]

متر به پایین‌تر است. از این رو، عمق ۲۹ متر به‌عنوان عمق بهینه نهایی برای حفر تونل انتخاب و پیشنهاد شده است. نتایج حاکی از تطابق خروجی مدل هوشمند (الگوریتم ژنتیک) و مدل عددی (اجزای محدود) است به‌نحوی که می‌توان این روش‌ها را مکمل و جانشین یک‌دیگر در طراحی تونل‌ها منظور کرد.

واژه‌های کلیدی: نشست خاک، روان‌گرایی، الگوریتم ژنتیک چندمنظوره، ضریب اطمینان، آنالیز احتمال.

* **نویسنده مسئول** Khanlari_reza@yahoo.com

مقدمه

حضور آب زیرزمینی، پدیدهٔ روان‌گرایی، جابه‌جایی الاستیک به‌دلیل تغییر شکل اولیه تا نصب نگه‌دارنده و نشست در خاک‌های بالای تونل از جمله مشکلاتی هستند که ممکن است پایداری فضای زیرزمینی حفر شده را به مخاطره اندازند. سه مقوله انرژی، انتقال آب و حمل و نقل به‌عنوان دغدغه‌های بزرگ در جوامع صنعتی امروزی مطرح هستند که قویاً با مباحثی چون احداث فضاهای زیرزمینی در تعامل هستند. پژوهش در زمینهٔ شناخت رفتار خاک (قبل، حین و پس از اجرا) در طراحی و حفاری تونل‌های شهری، به‌منظور شناخت تأثیر اجرای پروژه روی سازه‌ها و در حالت کلی بر محیط اطراف و مصالح در برگیرنده تونل‌ها، در اولویت تحقیقات مهندسی قرار دارد. اولین هدف تحقیق حاضر که روی خاک‌های مسیر خط دوم قطار شهری شهر مشهد انجام گرفته، تعیین عمقی است که بتوان پایداری لازم برای یک تونل زیرسطحی شهری را در قالب کم‌ترین مقدار نشست، جابه‌جایی و روان‌گرایی در تودهٔ خاک تضمین کرده و به‌تبع آن عمق حفاری را بهینه کرد. دومین هدف از این پژوهش استفاده از روش‌های محاسباتی هوشمند و بحث در مورد کارایی آن‌ها در یافتن عمق بهینه تونل و آنالیز اعتمادپذیری آن‌ها با روش های عددی و آنالیز احتمال در تعیین ضریب اطمینان است. زیرا در روش‌های محاسباتی عددی، عدم قطعیت‌ها در محاسبهٔ ضریب ایمنی نقش پررنگی ندارند. در حال حاضر روش متعارف برای تعیین عمق اجرای تونل اتکا به عدد آزمون نفوذ استاندارد و ضرایب مقاومت برشی خاک (چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی) است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]

زمین‌شناسی مسیر طرح

مسیر خط دوم قطار شهری شهر مشهد مجموعاً با طول ۱۱ کیلومتر از شمال شرق در امتداد S45°W با خاک‌های ریزدانه چسبنده با طبقه‌بندی متحد CL شروع می‌شود. در این خاک‌ها، دانسیتهٔ خشک بین (KN/m^3) ۱۳/۲ و ۱۷/۵ و عدد نفوذ استاندارد اصلاح نشده (N_{SPT}) بین ۲۶ تا ۵۶ متغیر است. N_{SPT} کم مربوط به لایه‌های سست سطحی خاک و به‌دلیل وجود نداشتن روباره‌های قبلی و اعداد بزرگ‌تر مربوط به لایه‌های عمیق‌ترند. در لابلای این خاک‌ها، عدسی‌های ماسه‌ای با بافت SC-SM و SC به‌چشم می‌خورد که N_{SPT} در آن‌ها بیش‌تر است. با حرکت به‌سمت جنوب‌غربی لایه‌های سیلتی با بافت ML و سپس لایه‌های ماسه‌ای SM، SC-SM و SC ظاهر می‌شوند که مقدار N_{SPT} در آن‌ها افزایش می‌یابد. در این خاک‌ها، عدسی‌های رسی با بافت CL و عدسی‌های شنی با بافت GC، GC-GM و GM وجود داشته و N_{SPT} به‌طور موضعی در شن‌ها افزایش و در خاک‌های رسی کاهش می‌یابد. شکل ۱ نقشهٔ پراکندگی سطحی خاک‌های مختلف را در بستر شهر و مسیر خط ۲ قطار شهری و شکل ۲ مقطع زمین‌شناسی مسیر تونل خط ۲ قطار شهری مشهد را نشان می‌دهد که با توجه به اطلاعات گمانه‌های مسیر ترسیم شده است. شایان ذکر است که عمق اکثر گمانه‌ها بین ۴۰ تا ۴۷ متر است و فقط ٤ حلقه از آن‌ها عمقی کم‌تر از ۲۵ متر دارند. در گسترهٔ شهر مشهد و به‌طور عرضی با نزدیک‌تر شدن به رشته گرانیتی کوه سنگی (به‌سمت جنوب غرب) خاک‌ها دانه‌درشت‌تر می‌شوند. این [1]خاک‌ها در روند طولی تغییرات چندانی را نشان نمی‌دهند. جز آن‌که، در امتداد میدان شهدا تا ایستگاه پایانی خط دوم اختلاط سطحی خاک سیلتی با خاک رس به چشم می‌خورد. عموماً روند گسترش خاک‌ها از امتداد رودخانه کشف رود که در شمال شرقی دشت مشهد در جریان است، تبعیت می‌کند. افزایش ضخامت لنزهای ماسه‌ای و گاهی شنی به‌سمت کوه سنگی نیز چشم‌گیر است. برای بررسی‌های مربوط به آنالیز احتمال، اطلاعات ژئوتکنیکی حاصل از تست‌های آزمایشگاهی و برجا تا حد ممکن جمع آوری شده‌اند. پارامترهای ژئوتکنیکی مورد نیاز از تست‌های برجا مانند بارگذاری صفحه‌ای و لرزه‌نگاری گمانه‌ای[1] حاصل شده‌اند. این پارامترها شامل مدول الاستیسیته، چسبندگی زهکشی نشده خاک، زاویهٔ اصطکاک داخلی، چسبندگی مؤثر و سرعت موج لرزه‌ای برشی هستند که

1. Downhole

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]

به‌ازای عمق آزمایش شده در جدول ۱ آورده شده‌اند. مقادیر مدول الاستیسیته در جدول ۱ با استفاده از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در چاهک‌های دستی و بقیه پارامترها از طریق آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوری حاصل شده‌اند. اطلاعات هر ردیف در جدول ۱، مربوط به یک تراز عمقی آزمایش شده و سرعت موج برشی با آزمایش لرزه‌نگاری گمانه‌ای تعیین شده است. به‌منظور کسب اعتبار علمی برای نتایج این تحقیق، اعداد N_{SPT} طبق رابطهٔ ۱ تصحیح شده‌اند که شامل ضرایب تصحیح سندان، انرژی، شدت ضربات چکش، فشار سربار، نمونه‌گیر، طول راد، قطر گمانه و آهنگ نواخت چکش در مقاطع آزمایشی مختلف هستند:

$$N_{60}= N_{SPT} \times (CA \times CE \times CC \times CN \times CS \times CR \times CB \times CBC) \quad (۱)$$

جدول ۱. اطلاعات حاصل از تست‌های آزمایشگاهی و برجا در گمانه‌های مسیر تونل

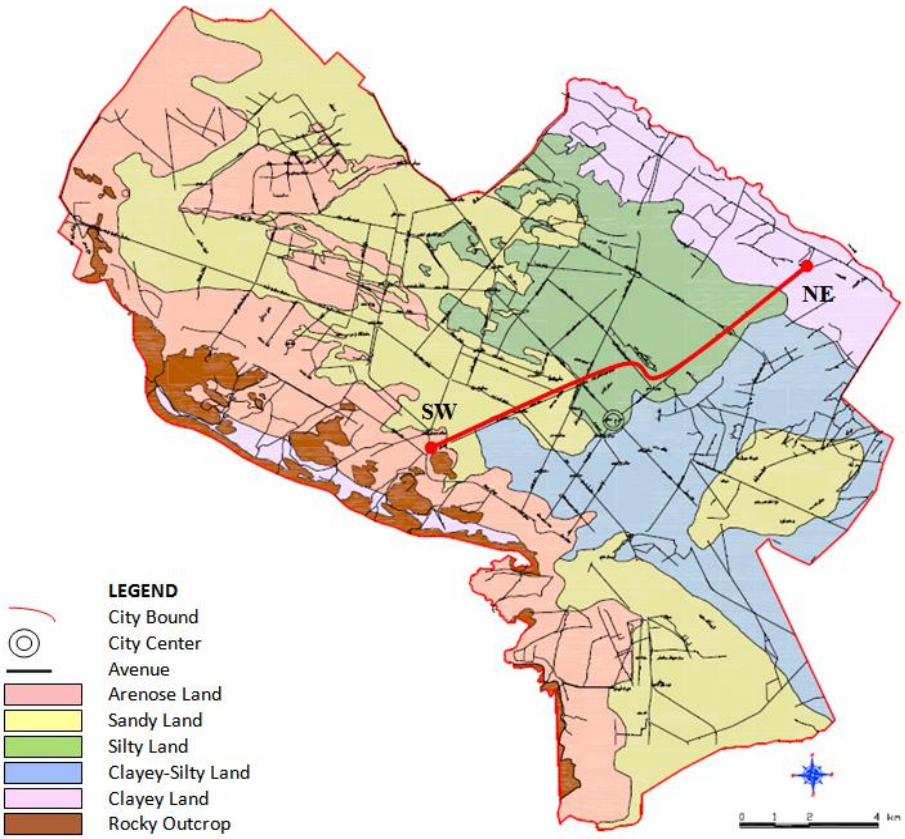
Soil type	Vs (m/s)	E (kg/cm^2)	Cu (kg/cm^2)	φ'(°)	C' (kg/cm^2)	عمق (m)
شن	٦٤٠	١٠٠	–	٣٠	٠/٣	٣٠
ماسه	٦٤٠	٨٠	–	٣٠	٠/٣٥	٣٠
رس	٣٥٠	٣٠	٠/٨	٢٨	٠/١٥	٢٥
رس	٥١٠	٣٠	–	٣٠	٠/٤	٣٧
رس	-	٣٠	٠/٦	٣٠	٠/٤٥	٣٥
رس	-	٣٠	٠/٦	٢٠	٠/٤٥	٣٥
رس	-	٣٠	٠/٦	٢٠	٠/٤٥	٣٠
رس	-	٣٠	١	٤١	٠/٥	٤٠
رس	-	٣٠	٠/٨	٣٠	٠/٣	٣٠
ماسه	-	٨٠	٠/٨	٢٧	٠/٣	٣٠
رس	-	٣٠	٠/٨	٢٥	٠/٣	٤٠
رس	-	٣٠	٠/٨	٢٥	٠/٤٥	٤٠
رس	-	٣٠	١	٢٧	٠/١	٤٠
رس	-	٣٠	١	٢٧	٠/٢	٤٠
رس	-	٣٠	–	٣٠	٠/١	٤٠
رس	٦٥٠	٣٠	٠/٦	٣٠	٠/٢	٣٥

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]

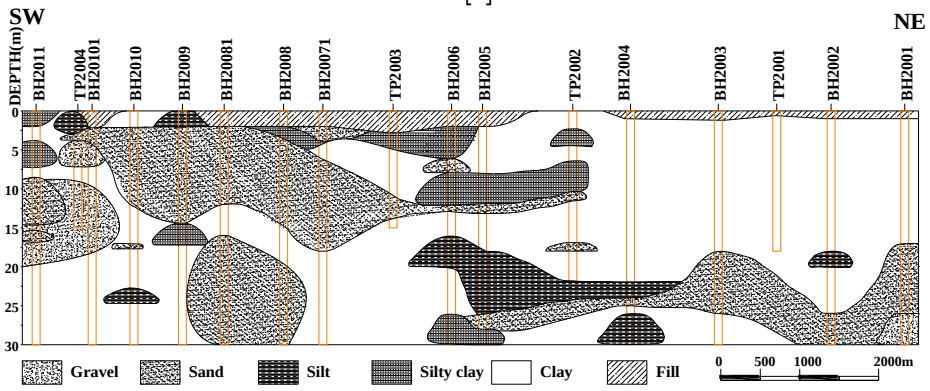
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]



شکل ۱. نقشهٔ پراکندگی سطحی خاک‌های مختلف در بستر شهر مشهد به‌همراه مسیر خط ۲، [۱]، [۲].



شکل ۲. مقطع زمین‌شناسی مسیر خط ۲ قطار شهری مشهد به‌همراه جانمایی گمانه‌ها

ضرایب تصحیح در رابطهٔ ۱ از چپ به راست به‌ترتیب ضرایب اصلاحی سندان (CA)، انرژی (CE)، شدت ضربات چکش (CC)، فشار سربار (CN)، نمونه گیر (CS)، طول راد (CR)، قطر گمانه و آهنگ نواخت چکش هستند. به‌دلیل نبودن آب زیرزمینی در مسیر پژوهش و عمق زیاد تراز آب، صرفاً به تصحیح تنش روباره طبق رابطهٔ ۲ اکتفا شده است که برای خاک‌های تحکیم نیافته و سست مانند مسیر بررسی شده اختصاص دارد [۳]:

$$\frac{2}{1+\sigma_v'} \qquad (۲)$$

بهینه‌یابی

برای محاسبه کم‌ترین مقادیر جابه‌جایی الاستیک، روان‌گرایی و نشست در ارتباط با عمق و قطر تونل و به‌تبع آن، مناسب‌ترین عمق برای تونل، از الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده شد. دو مزیت عمده، GA را از روش‌های بهینه‌یابی عددی استاندارد متمایز می‌سازد:

الف) ایجاد جمعیتی از نقاط داده‌ای به‌جای ایجاد یک نقطه در هر دور جستجو یا هر نسل که متعاقباً به‌جای جستجو و تعیین نقطه پاسخ بهینه از چند نقطه معدود، پاسخ مسئله از جمعیتی از داده‌ها جستجو و تعیین می‌شود.

ب) به‌جای انتخاب یک پاسخ بهینه در هر دور و آن هم به‌روش محاسبه جبری، جمعیتی از پاسخ‌ها یا افراد بهینه را با محاسباتی مبتنی بر انتخاب تصادفی[1]، انتخاب کرده و مورد ارزیابی شایستگی قرار می‌دهد. پژوهش‌ها و بررسی‌هایی در زمینه بهینه‌سازی در تونل‌ها انجام شده است که از جمله آن‌ها انتخاب سیستم نگه‌دارنده بهینه برای تونل انتقال آب قمرود (دلارام و دیگران، ۱۳۸۵) [٤] و تعیین حداقل عمق مجاز یکی از خطوط متروی تهران با هدف کم‌ترین آسیب به سازه‌های مجاور به‌روش اجزای محدود، که ۱۰ متر تعیین شده است (عظیمی و دیگران، ۱۳۸٦) [۵] اما در زمینه کاربرد GA در مبحث تونلرنی با هدف کاستن انواع ریسک‌ها در تونل، کم است و تنها بررسی درزمینهٔ بهینه‌یابی تراز کم‌ترین جابه‌جایی در حفاری تونل‌ها، مقالهٔ گوان[2] و همکاران (۲۰۰۹) [٦] است. که در آن با استفاده از الگوریتم عصبی- ژنتیکی، مقادیر بهینه فاکتورهای تغییر شکل تودهٔ سنگ به‌خصوص مدول تغییرشکل آن، در دراز مدت، پیش‌بینی شده است.

1. Random Choice 2. Guan

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]

به‌منظور یافتن عمق بهینه در ارتباط با کم‌ترین مقادیر نشست، پتانسیل روان‌گرایی و جابه‌جایی الاستیک محیط تونل، روابط ذیل به‌عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده و سپس با الگوریتم ژنتیک چندمنظوره با بهینه‌یابی محدود شده (مقید) [۷]، به موازات هم حداقل‌یابی شده‌اند:

الف) رابطهٔ پک[1] در سال ۱۹۶۹ [۸]، در ارتباط با برآورد نشست:

$$\frac{S}{S_{\max}} = \exp(-\frac{x^2}{2i^2}) \qquad (۳)$$

که در آن S مقدار نشست سطح زمین در محلی با فاصله x از محور تونل، S_{max} حداکثر نشست ایجاد شده و پارامتر "i" فاصله نقطه عطف نمودار نشست تا محور تونل است، روابط کلود[2] و اسمیت[3] در سال ۱۹۸۱ [۹]، به‌دلیل کامل‌تر بودن (داشتن هر دو متغیر عمق و شعاع تونل) و اتکینسون[4] و پوتس[5] در سال ۱۹۷۷ [۱۰] که برای بررسی تونل‌های شهری کشور انگلستان و برای ماسه‌های سست پیشنهاد کرده‌اند، از بین سایر روابط پیشنهاد شده برای "i"، به‌منظور تعیین تابع هدف مسئله نشست انتخاب شده‌اند (جدول۲).

جدول ۲. روابط مختلف پیشنهاد شده برای فاکتور "i" [۱۰]

فرمول " i"	مشاهدات
$\frac{i}{R} = \frac{Z_0}{2R}$	تونل‌های انگلستان
$\frac{i}{R} = (\frac{Z_0}{2R})^{0.8}$	تونل‌های انگلستان

در جدول ۲ مقادیر Z_0 و R به‌ترتیب عمق محور تونل از سطح زمین برحسب متر و R شعاع حقیقی تونل بر حسب متر است. ضمناً عبارت $Z_0/2R$ بدین معنی است که نشست در صورت رخ‌داد، در مقطع عرضی تونل، همواره به‌فاصله حداقلی دو برابر قطر تونل در پیرامون تونل روی می‌دهد.

ب) رابطهٔ هوک[6] و همکاران در سال ۱۹۹۵ [۱۱] و هم‌چنین چن[7] و همکاران در سال ۱۹۹۹

1. Peck 2. Clough 3. Schmidth 4. Atkinson
5. Potts 6. Hoek 7. Chen

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]

[۱۲]، در ارتباط با برآورد جابه‌جایی الاستیک به‌صورت رابطهٔ ۳ بیان می‌شود:

$$U = 1 + \frac{(1+\upsilon)}{E}(\sigma_0 - P_i)\frac{R^2}{r} \qquad (۳)$$

که درآن U درصد جابه‌جایی الاستیک، υ نسبت پواسون مصالح میزبان، E مدول یانگ مصالح بر حسب مگاپاسکال، r شعاع داخلی تونل بعد از نصب نگه‌دارنده بر حسب متر، σ_0 تنش برجا بر حسب نیوتن بر متر مربع، Pi ظرفیت نگه‌دارنده تونل بر حسب نیوتن بر متر مربع است.

ج) ضریب اطمینان که جها[1] وسوزوکی[2] پیشنهاد کردند [۱۳]، در ارتباط با تعیین پتانسیل وقوع روان‌گرایی:

$$FS_{design} = \frac{FS}{FS_{\min}} \qquad (٤)$$

که در آن FS و FS_{min} ضرایب اطمینان حداکثر و حداقل است و به‌ترتیب از روابط (۵) و (٦) دست می‌آیند:

$$FS = \frac{CRR_{7.5}}{CSRN} K_a K_\alpha \qquad (۵)$$

$$FS_{\min} = \exp\left[\beta_{\min}\sqrt{\ln[(V_{CSR}^2+1)(V_{CRR}^2+1)]} + \ln\sqrt{\frac{V_{CRR}^2+1}{V_{CSR}^2+1}}\right] \qquad (٦)$$

که در آن $CRR_{7.5}$ نسبت مقاومت سیکلی زمین برای زمین لرزه‌ای به‌بزرگی ۷/۵ ریش‌تر است و از رابطهٔ (۷) به‌دست می‌آید، CSRN، نسبت تنش چرخه‌ای نرمال شده برای زمین لرزه‌ای به بزرگی ۷/۵ است که از رابطهٔ (۸) به‌دست می‌آید. $K\sigma$ و $K\alpha$ به‌ترتیب ضرایب تصحیح تنش مؤثر روباره و شیب زمین هستند. V_{CSR} و V_{CRR} به‌ترتیب واریانس‌های تنش تناوبی نرمال شده و نسبت مقاومت برشی تناوبی هستند. β_{min} حداقل مقدار اندیس اطمینان برای یک سطح ریسک مشخص و با حداکثر ۱ است. یزدانفر در سال ۱۳۸٦، شتاب افقی زلزله را برای دشت مشهد، ۰/۳۵ به‌دست آورده است [۱٤]:

1. Jha 2. Suzuki

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34-(N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{\left[10(N_1)_{60}+45\right]^2} - \frac{1}{200} \quad (۷)$$

$$CSRN = \frac{CSR}{MSF} \quad (۷)$$

که در آن $(N_1)_{60}$ عدد SPT اصلاح شده، MSF یک عامل مقیاس‌دهی به بزرگی زمین‌لرزه است و مقادیر حداقل و حداکثر آن به‌ترتیب برابر با $MSF = \frac{10^{2.24}}{M_W^{2.56}}$ و $MSF = (\frac{M_W}{7.5})^{3.3}$ هستند که M_W بزرگی لحظه‌ای زمین‌لرزه است [۱۳]. حداقل‌یابی رابطهٔ (٤) به‌نحو مطلوبی عمق دارای پتانسیل روان‌گرایی را می‌تواند در ارتباط با کم‌ترین ضریب ایمنی در زمین لرزه‌ای به‌بزرگی ۷/۵ در اختیار قرار دهد. عکس قضیه نیز صادق است. می‌توان با حداکثریابی رابطهٔ ضریب ایمنی طراحی، مناسب‌ترین عمق را برای تونل محاسبه کرد. جدول ۳ مقادیر به‌دست آمده از محل طرح را برای متغیرهای مرتبط با روان‌گرایی نشان می‌دهد.

جدول۳. ضرایب ثابت استفاده شده در بررسی پتانسیل روان‌گرایی

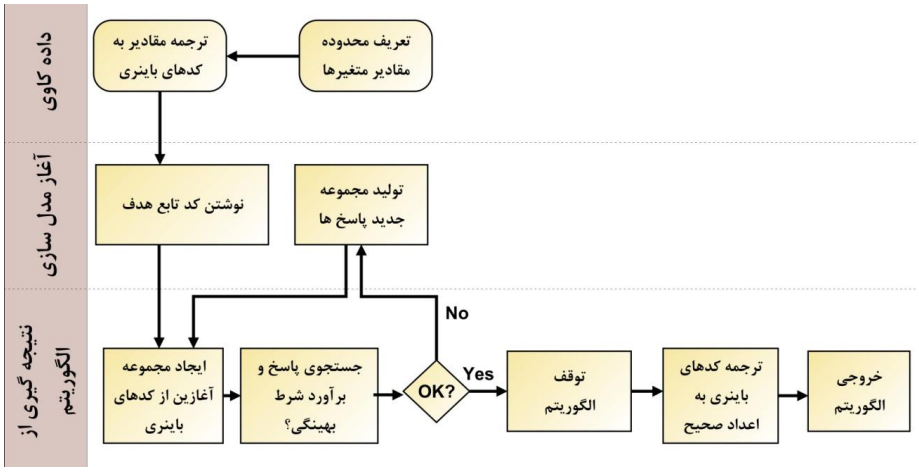
متغیر	α	g (m/sec^2)	β
مقدار	۰/۳۵	۹/۸	۱/۲۵

در ادامه برای انتخاب مناسب‌ترین ساختار برای الگوریتم ژنتیک، ابتدا الگوریتم مورد نظر با تابع هدف[۲] در جعبه ابزار بهینه‌سازی در نرم‌افزار متلب[۱] تست شده تا ضرایب جهش و تلفیق از قبل به‌خوبی تنظیم شده و از کارایی مطلوب آن اطمینان حاصل شود [۷]. سپس بازه‌های عددی ورودی‌های الگوریتم یا حدود متغیرهای توابع هدف نشست، جابه‌جایی الاستیک و روان‌گرایی با توجه به اطلاعات برداشت شده از منطقه برای روابط ۲ (جدول ٤)، ۳ (جدول ۵) و ٤ (جدول ٦) تعیین شده‌اند. به‌عبارت دیگر مقادیر حداقل نشست و جابه‌جایی و پتانسیل روان‌گرایی در ارتباط با عمق بهینه برای حفاری تونل به‌دست آمده‌اند. شکل ۳ نمودار مراحل پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک چندمنظوره را نشان می‌دهد. بهینه‌یابی موازی کل توابع هدف استفاده شده تاکنون با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندمنظوره در نرم‌افزار متلب ۲۰۱۰ انجام گرفت. بدین‌صورت که ابتدا محدوده‌های عددی همه متغیرهای هر سه تابع هدف نشست، جابه‌جایی الاستیک و روان‌گرایی برای الگوریتم تعریف شده و سپس توابع در یک اسکریپت

1. MATLAB 2. Rastrigins

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]

نوشته شده و به حافظهٔ نرم‌افزار سپرده شده‌اند. بهینه‌یابی با ضرایب جهش و تلفیق به‌ترتیب ۰/۰۰۱ و ۰/۸ و بدون تعریف محدودیت زمانی جست و جو، آغاز و نتایج در قالب نمودار شکل ٤ به‌صورت خروجی الگوریتم نمایش داده شده‌اند. زیرنمودارهای (a)، (b) و (c) مقادیر تغییرات محاسبه شده را به‌ترتیب برای جابه‌جایی الاستیک، نشست و روان‌گرایی با گذشت زمان (و تولید نسل‌ها یا مجموعه‌های پاسخ‌ها) نشان می‌دهند که دال بر هم‌گرایی الگوریتم به سمت پاسخ بهینه است. هم‌چنین این زیرنمودارها شرایط توقف الگوریتم را نشان می‌دهند. چنان‌که مشاهده می‌شود، شرط بهینگی تونل برای بررسی جابه‌جایی الاستیک، نشست و روان‌گرایی به‌ترتیب در نسل‌های دوم، بیست و هشتم و نهم برآورده شده است. چنان‌که قبلاً ذکر شد برای توقف الگوریتم، محدودیت زمانی تعیین نشده است. زیر نمودارهای مقابل هر کدام از نمودارهای قبل، مقادیر عددی بهینه محاسبه شده با الگوریتم برای هر کدام از متغیرهای مؤثر در موضوع مربوط را نشان می‌دهند.

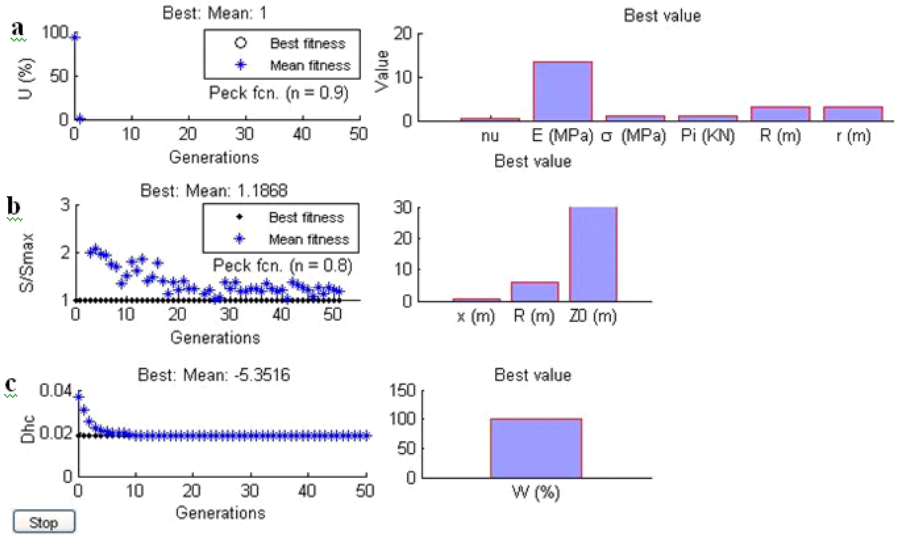


شکل ۳. نمودار مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک چندمنظوره

جدول‌های ٤ و ٥ به‌ترتیب اعداد بهینه به‌دست آمده برای متغیرهای تابع مسئله نشست سطح زمین و جابه‌جایی الاستیک تونل را نشان می‌دهند. در مسئله نشست بازه‌های جست و جو شده ۱۳ تا ٤٥ متر در نظر گرفته شده که پس از بهینه‌یابی مقدار آن ۳۱ متر به‌دست آمده است. برای شعاع خارجی تونل (بدون نگه‌دارنده) بازهٔ عددی ۳ الی ٦ متر در نظر گرفته شد و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]

بهینه آن ۳/٦ متر به‌دست آمد. شعاع داخلی تونل نیز از ۲/۸ تا ۵/۵ متر در نظر گرفته شد و مقدار بهینه آن ۳/۵ متر به‌دست آمد که به عدد ۳/٦ متر نزدیک است. با جست و جوی بهینه‌یابی، حداکثر فاصلهٔ جانبی از محور تونل که در آن میزان نشست به حداقل می‌رسد ۱/۰۰۷ متر به‌دست آمد که در مرکز همین مسافت مقدار نسبت نشیت بهینه ۰/۰٦ به‌دست می‌آید که بیان‌گر تغییرات کم نشست در مسیر خط دو و احتمالاً همگن بودن نسبی بافت خاک است. در مسئله جابه‌جایی الاستیک نیز می‌توان با انتخاب شعاع ٤/٦ متر برای تونل به حداقل جابه‌جایی امیدوار بود. جدول ٦ نیز مقادیر و بازه‌های عددی جست و جو شده را برای تابع هدف روان‌گرایی به‌همراه ضریب اطمینان طراحی بهینه‌یابی شده و عمق مربوط به آن، نشان می‌دهد.



شکل٤. نمودارهای خروجی الگوریتم ژنتیک چندمنظوره برای سه مسئله جابه‌جایی الاستیک (a)، نشست (b) و روان‌گرایی (c) [۷]

جدول٤. نتایج بهینهٔ به‌دست آمده برای متغیرهای تابع نشست

متغیرها	Z_0 (m)	R (m)	r (m)	x (m)	نسبت نشست
حداقل	۱۳	۳	۲/۸	۰	۱
حداکثر	٤۵	٦	۵/۵	۳۰	۰/۰۵
مقدار بهینه	۳۱	۳/٦	۳/۵	۱/۰۰۷	۰/۰٦

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]

جدول۵. نتایج بهینهٔ به‌دست آمده برای متغیرهای تابع جابه‌جایی الاستیک

پارامتر	U_{min} (%)	P_i (MPa)	σ_0 (MPa)	E (MPa)	υ	r (m)
مقدار بهینه	۰/۱۳۰	۲	۲	۱۵	۰/۲	٤/٦۰۳

جدول٦. حدود مقادیر استفاده شده در محاسبه ضریب اطمینان طراحی تونل به‌همراه عمق بهینه برای روان‌گرایی حداقل

نتایج		نسبت مقاومت سیکلی		وزن حجمی خشک (gr/cm^3)		$(N_1)_{60}$		گمانه
عمق مناسب (متر)	$(FS_{design})_{max}$	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	
۳۰	۳/۲۲	۰/۰٦٥	۰/۰٥٦	۰/۹۸	۰/٤٤	۳/۹۷	۲/٥۳	BH-2001
۳۰	۳/۲۱	۰/۰۷٤	۰/۰٥	۰/۹۸	۰/٤٤	٥/۲۲	۱/۳۱	BH-2002
۳۰	۳/۲۲	۰/۰٦۹	۰/۰٥۳	۰/۹۸	۰/٤٤	٤/٦	۲/۱۲	BH-2003
۳۰	۳/۰۹	۰/۰۷۲	۰/۰٥۲	۰/۹۸	۰/٤٤	٤/۹٦	۱/٦۹	BH-2004
۳۰	۲/۹۰	۰/۰٦۰	۰/۰٥	۰/۹۸	۰/٤٤	۳/۲٥	۱/۲٤	BH-2005
۳۰	۲/۸۰	۰/۰۸٦	۰/۰٥۲	۰/۹۸	۰/٤٤	٦/۷٤	۱/۸٥	BH-2006
۳۰	۲/۷٦	۰/۰٦۸	۰/۰٥۲	۰/۹۸	۰/٤٤	٤/۳۸	۱/۸۲	BH-2007-1
۳۰	۲/٦٦	۰/۰۸٥	۰/۰٥۲	۰/۹۸	۰/٤٤	٦/۷۳	۱/۷۷	BH-2008
۳۰	۲/٤۳	۰/۰٦٤	۰/۰٥۱	۰/۹۸	۰/٤٤	۳/۸۱	۱/٦۳	BH-2008-1
۳۰	۲/۲۸	۰/۰۸۳	۰/۰٤۹	۰/۹۸	۰/٤٤	٦/٤۸	۰/٦۷	BH-2010-1
۳۰	۲/۱۳	۰/۰٥۲	۰/۰٥۱	۰/۹۸	۰/٤٤	۱/۷۹	۱/٥	BH-2011

صحت‌سنجی نتایج با مدل عددی

در این بخش سعی بر این است تا تنش‌های برجا نیز در محاسبات لحاظ شوند. بدین‌منظور از نرم‌افزار اجزای محدود Phase2 بهره گرفته شده است. اطلاعات به‌دست آمده از آزمایش‌های

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]

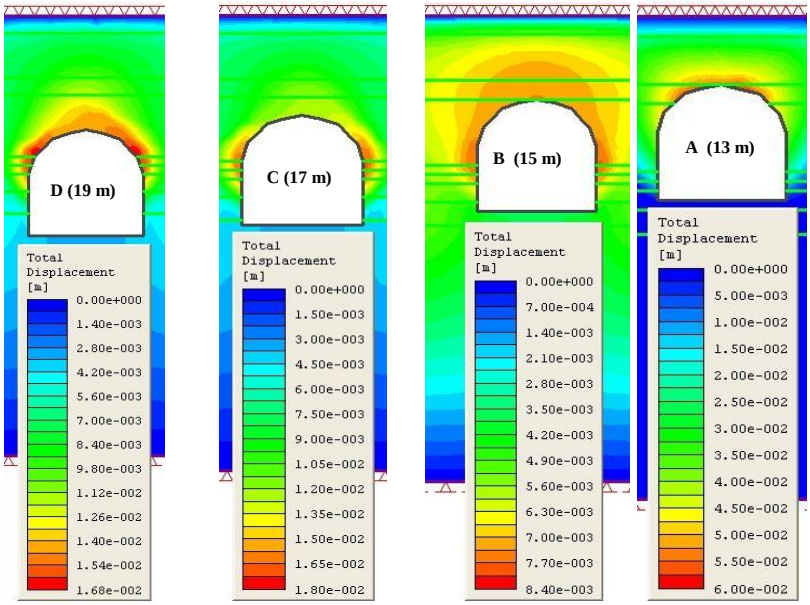
برجا و سه‌محوری آزمایشگاهی (جدول ۱)، اساس آنالیزهای عددی است و این داده‌ها به‌عنوان ورودی برنامه‌های آنالیز اجزای محدود به‌کار گرفته شده‌اند. نتیجه آنالیز اجزای محدود، تعیین ضریب اطمینان، جابه‌جایی‌های دهانه تونل بدون نگه‌دارنده، و در صورت نیاز انواع تنش‌های برجا در یک پروفیل عمودی است که در آن محور مرکزی تونل از عمق ۱۳ متری سطح زمین تا ٤٥ متری جابه‌جا و مدل‌سازی شده است (با در نظر گرفتن حداقل عمق ۷ متر برای سقف تونل به‌دلیل وجود سازه‌های سطحی) (شکل٤). لازم به ذکر است که در حالت کلی، هرگونه آنالیز اجزای محدود باید با توجه ویژه به مقطع زمین‌شناسی آن ناحیه صورت گیرد (شکل۲). با توجه به این‌که کم ضخامت‌ترین لایه خاک موجود در مسیر تونل ۲ متر است، تناوب تغییر محور تونل در مدل‌ها، ۲ متر انتخاب شده است. هم‌چنین فرض شده است که در تمامی مدل‌ها، تونل با شعاع ٦ متر حفاری شده و کف تونل برای تردد و استقرار تجهیزات، مسطح در نظر گرفته شده است. بعد از تطبیق تغییرات جنس خاک با مقاطع گمانه‌ای اطلاعات عددی لازم وارد نرم‌افزار شده و با لحاظ کردن معیار شکست موهر- کولمب برای رفتار تودهٔ خاک، تحلیل عددی حفاری تونل در ١٦ عمق متفاوت انجام شده است. نتایج حاکی از کم‌ترین میزان جابه‌جایی کلی (افقی و عمودی) در محدوده‌های عمقی ۲۷ الی ۲۹ و ۳۹ الی ٤۳ متری است (شکل ٥). با دقت در مقادیر محدوده‌های جابه‌جایی مختلف، مشاهده می‌شود که کم‌ترین جابه‌جایی‌ها برای ترازهای پایین‌تر از ۲۷ متر و بیش‌ترین آن‌ها به‌ترتیب مربوط به ترازهای ۱۳، ۲۳ و ۲٥ متر هستند (شکل ٥).

تصمیم‌گیری قطعی برای بهینگی با آنالیز احتمال

فاکتور مقاومت یا به‌عبارت دیگر ضریب ایمنی در حفریات زیرزمینی به‌صورت نسبت مقاومت خاک (بسته به نوع معیار شکست استفاده شده) بر تنش القایی ایجاد شده در هر نقطه دل‌خواه از اطراف فضای حفاری شده تعریف می‌شود. با توجه به این که هر سه تنش σ_1، σ_3 و σ_z یا تنش ثقلی بر عامل مقاومت تأثیر دارند. از این رو، می‌توان این فاکتور را نماینده ضریب اطمینان پایداری تونل در حالت سه‌بعدی در نظر گرفت [۱٥]. به‌منظور انتخاب عمق نهایی بهینه، ضرایب ایمنی پایداری تونل فقط برای ترازهای عمقی و بهینه ۳۰ و ۳۱ متر حاصل از روش الگوریتم ژنتیک چندمنظوره و ۲۷ تا ۲۹ متری و ۳۹ تا ٤۳ متری حاصل از روش اجزای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]

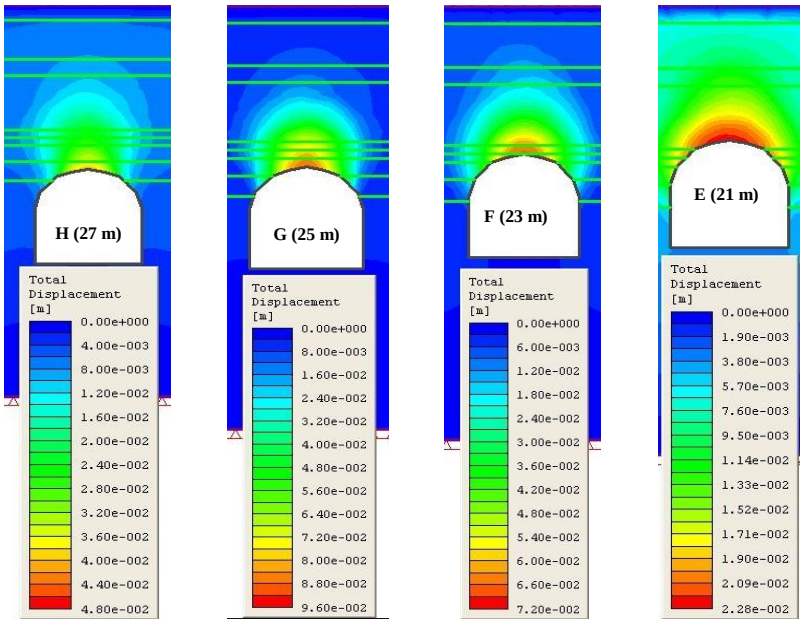
محدود تعیین شده است. بدین‌صورت که مقادیر ضریب ایمنی در هر نقطه مماس بر مرز تونل حفاری شده به‌روش آنالیز عددی اجزای محدود در نرم‌افزار فیس[1] ۲ تعیین شده‌اند (شکل‌های ۵ و ٦). سپس این ضرایب از نرم‌افزار استخراج شده و برای تعیین نوع توزیع عددی، توزیع احتمال آن‌ها بررسی شده است (شکل ۷). در شکل ٦ نمودار توزیع احتمال مقادیر ضریب ایمنی به‌همراه هیستوگرام مربوط در مقایسه با توزیع نرمال نمونه، ترسیم شده‌اند. با وجود یک‌سان بودن وضعیت ضرایب ایمنی، در این شکل مقادیر ضرایب ایمنی به‌دست آمده برای ترازهای عمقی ۲۷ و ۲۹ متر نسبت به سایر ترازهای عمقی شباهت و سازگاری بیش‌تری با توزیع نرمال نشان می‌دهند و قطعیت بیش‌تری داشته و قابل اعتمادترند. دو عمق مزبور بیش‌ترین میانگین را برای مقادیر ضرایب ایمنی دارند. این مقادیر در شکل ۸ به‌همراه تغییرات میانگین، تفریق میانگین و انحراف معیار ضرایب ایمنی نشان داده شده‌اند. چنان‌که ملاحظه می‌شود از عمق ۲۹ متر به پایین، ضرایب ایمنی تمایل به کاهش نشان می‌دهند.

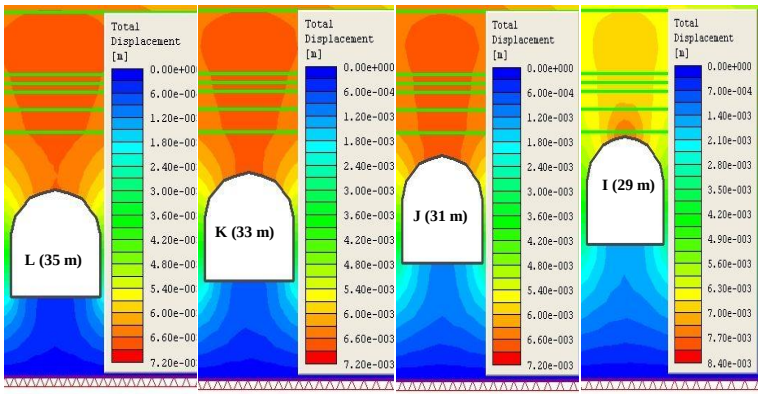


شکل ۵. نتایج آنالیز عددی میزان جابه‌جایی الاستیک از عمق ۱۳ الی ٤۳ متری.

1. Phase2

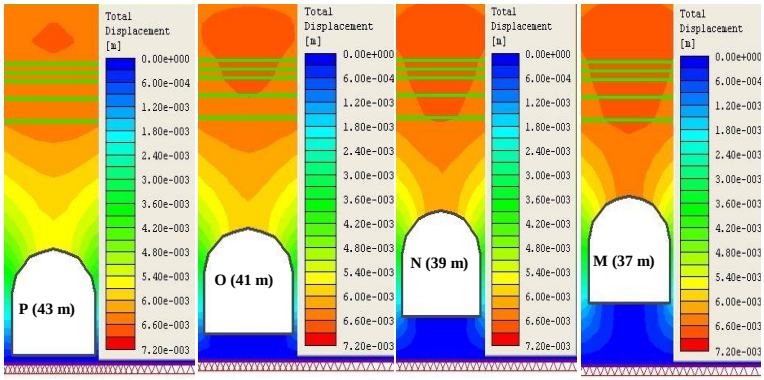
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]



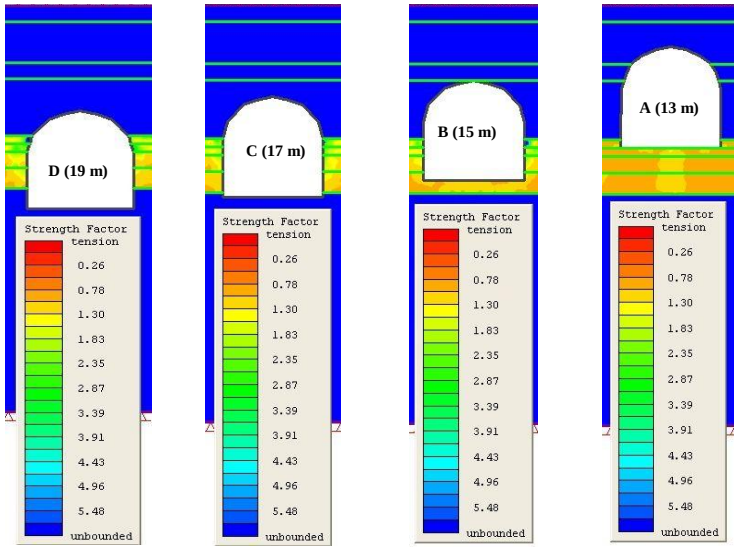


ادامه شکل ۵. نتایج آنالیز عددی میزان جابه‌جایی الاستیک از عمق ۱۳ الی ٤۳ متری.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]

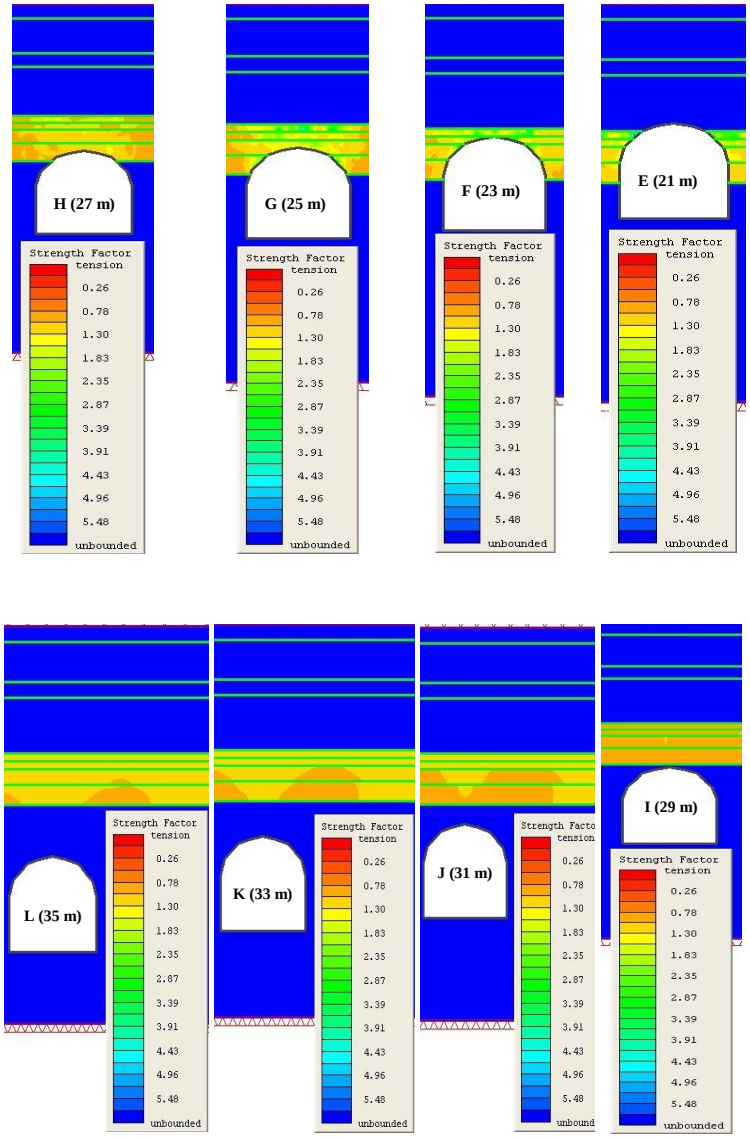


ادامه شکل ۵. نتایج آنالیز عددی میزان جابه‌جایی الاستیک از عمق ۱۳ الی ٤۳ متری.



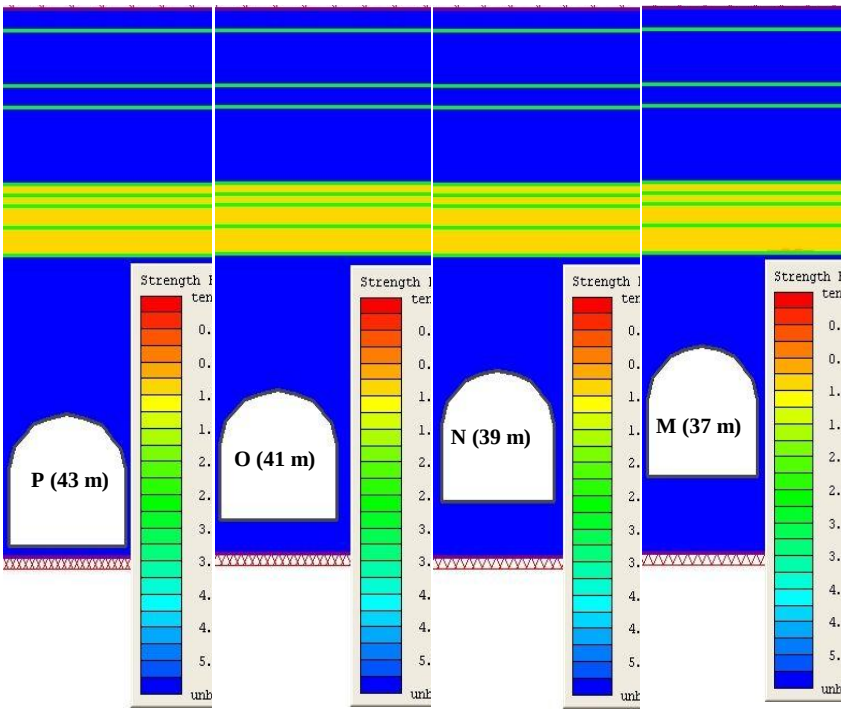
شکل ٦. آنالیز گسترش مقادیر ضریب ایمنی از عمق ۱۳ الی ٤۳ متری

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]

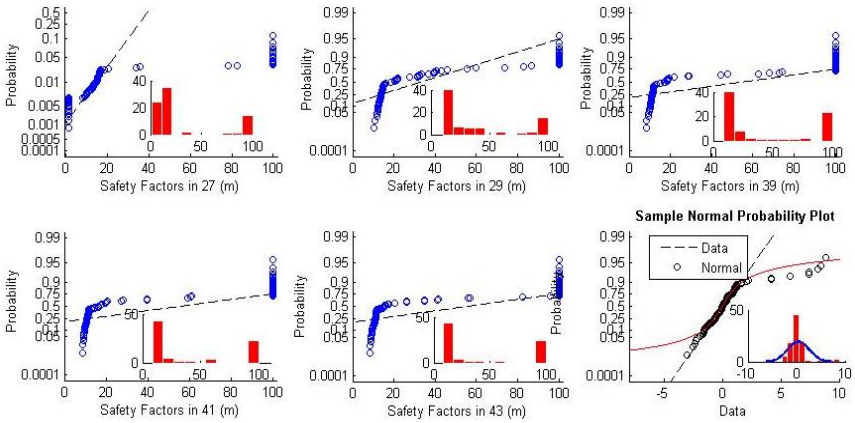


ادامه شکل ٦. آنالیز گسترش مقادیر ضریب ایمنی از عمق ۱۳ الی ٤۳ متری

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]

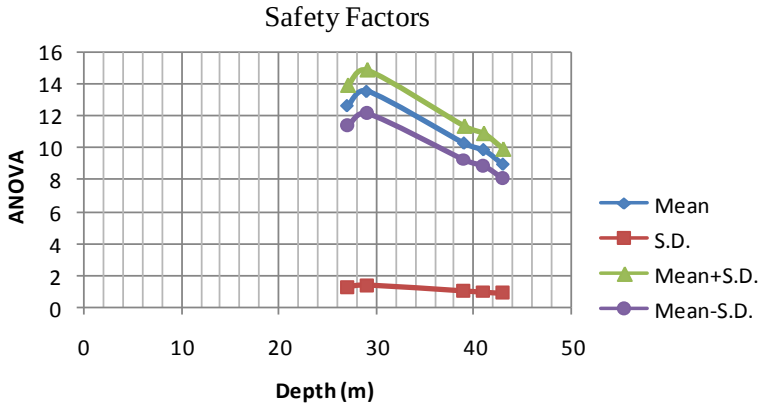


ادامه شکل ٦. آنالیز گسترش مقادیر ضریب ایمنی از عمق ۱۳ الی ٤۳ متری



شکل ۷. نمودارهای ستونی توزیع Bimodal مقادیر ضریب ایمنی به‌دست آمده از آنالیز احتمال برای عمق‌های ۲۷، ۲۹، ۳۹، ٤۱ و ٤۳ متر و مقایسه آن‌ها با توزیع نرمال نمونه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]



شکل ۸. نمودار آنالیز واریانس برای مقادیر ضریب اطمینان

ماتریس ضرایب اطمینان که به‌طور تصادفی و فقط از عمق‌های بهینه به‌دست آمده در ترازهای ۲۸، ۲۹، ۳۹، ٤۱ و ٤۳ متری نمونه‌گیری شده بودند از لحاظ واریانس و انحراف معیار بررسی شدند. با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که مقادیر میانگین، انحراف معیار و جمع و تفریق انحراف معیار از میانگین همگی از عمق ۲۹ متر به پایین‌تر تمایل به کاهش نشان می‌دهند. به‌عبارت دیگر از ۲۹ متر به پایین‌تر با کاهش کلی در مقادیر ضریب اطمینان مواجه هستیم. هر چند ممکن است این ضریب به‌طور موضعی در یک تراز بالاتر رود، اما روند کلی آن تا ۲۹ متر افزایشی و از ۲۹ متر به پایین‌تر کاهشی است.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش حاکی از به‌دست آمدن عمق بهینه مرتبط با پایداری با روش الگوریتم ژنتیک در عمق ۲٤/۸٦ متری و روش اجزای محدود در ۲۷ الی ۲۹ و ۳۹ الی ٤٥ متری هستند. در الگوریتم ژنتیک، شعاع پایدارترین تونل برای اجتناب از خطر روان‌گرایی ٤/٦ متر و برای خطر نشست ٦ متر به‌دست آمدند و در آنالیز اجزای محدود از آنالیز شعاعی بیش‌تر صرف نظر شده است. تراز بهینه حفاری با TBM در روش اجزای محدود دارای دامنه تغییراتی است و برای تغییرات در طراحی، محدودیتی در عمق کم‌تر از ۲۹ متر وجود ندارد. اما در ترازهای پایین‌تر از ۲۹ متر به‌دلیل امکان تورم خاک رس توده‌ای در حین حفاری و هم‌چنین

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]

اقتصادی نبودن انتخاب عمق زیاد برای تمهیدات بعدی تونل، حفاری پیشنهاد نمی‌شود. عمق بهینه به‌دست آمده با دو روش مذکور به‌هم نزدیک است (بین ۲۵ الی ۲۷ متر) و می‌توان این دو روش را مکمل نسبی هم در نظر گرفت. برای نیل به نتیجهٔ مطمئن طراحی در پروژه‌های مشابه، کاربرد هر دو روش پیشنهاد می‌شود. نهایتاً نتایج آنالیز احتمال برای ضرایب اطمینان حاکی از کاهش آن از ۲۹ متر به پایین‌تر است. حال آن‌که ضریب اطمینان تا عمق ۲۹ متری، با افزایش مواجه است. در نتیجه عمق ۲۹ متر برای تراز نهایی حفاری تونل پیشنهاد می‌شود.

محاسبه ضرایب اطمینان در روش عددی در ارتباط با شبیه‌سازی تنش برشی حاکم بر محیط لایه‌های خاک و با روش کاهش C-φ صورت گرفته است. با توجه به موضوع تنش برشی در خاک، لایه‌های رسی در ترازهای عمقی بالای ۲۵ متر به‌دلیل همگنی ساختاری بیش‌تر، مقادیر ضریب اطمینان بیش‌تری را در اختیار قرار می دهند اما در ترازهای عمیق‌تر از ۳۵ متر به‌نظر می‌رسد به‌دلیل حاکم بودن شرایط تنش ثقلی بیش‌تر نسبت به اعماق کم، به‌نظر می‌رسد احتمال هم‌گرایی خاک برای تونل داشته باشد و از این رو، ضرایب اطمینان کم‌تری را شاهد هستیم. لایه‌هایی از خاک نیز که کم‌تر از ۲۰ متر عمق دارند به‌دلیل داشتن فابریک سست و نداشتن تراکم ساختاری ضرایب کم‌تری دارند. ضمناً توزیع Bimodal ضرایب می‌تواند نشان از تحکیم یافتگی موضعی خاک در ترازهای عمیق‌تر باشد که مقادیر زیاد مربوط به زون‌های بیش تحکیم یافته و تک رقمی مربوط به زون‌های سست‌تر هستند.

قدردانی

از شرکت‌های جهدآزمای مشهد و رهاب برای مساعدت در تدارک و تهیه اطلاعات زمین‌شناسی مهندسی مسیر و آزمایش‌های برجا، تشکر و قدردانی می‌کنیم.

منابع

۱. حافظی‌مقدس ن، قزی ا، *پهنه‌بندی ژئوتکنیکی و ارزیابی ظرفیت باربری مجاز شهر مشهد*، پنجمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی ومحیط زیست ایران، صفحات ۵۳۰-۵۲۳ (۱۳۸٦).

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]

۲. واحدی سارا، *بررسی زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی مسیر خط ۳ قطار شهری مشهد*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی گرایش مهندسی. دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۸۸).

3. ASTM. "Standard method for penetration tests and split barrel sampling of soils (D1586-84)", ASTM, Philadelphia, sect. 4, V. 4 (8) (1991) 232-236.

٤. دلارام ا.، حسنی ر.، رسلی و.، *انتخاب محیط معادل بهینه در تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگه‌داری تونل انتقال آب قمرود*، هفتمین کنفرانس تونل ایران، دانشگاه صنعتی شریف (۱۳۸۵) ٦٦٧-٦٧٧.

۵. عظیمی ی.، بخت‌آور ع.، عظیمی ع.، *تعیین حداقل عمق مجاز تونل‌های شهری بر اساس تأثیر متقابل تونل‌سازی و ساختمان‌ها به‌روش عددی*، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران (۱۳۸٦).

6. Guan Z., Jiang Y., Tanabashi Y., "Rheological parameter estimation for the prediction of long-term deformations in conventional tunneling", Tunnelling and Underground Space Technology. 24, (2009) 250-259.

7. Mathworks Inc., "Global Optimization Toolbox for MATLAB", User's Guide", USA. (2010).

8. Peck R.B., "Deep excavation and tunneling in soft ground: State-of-the-art report", Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico (1969) 225-290.

9. Clough G.W., Schmidt B., "Excavation and tunneling: soft clay engineering", Chapter 8, edited by E.W., Brand and R.P., Brenner, Elsevier (1981).

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]

10. Atkinson J.H., Potts D.M., "Subsidence above shallow circular tunnels in soft ground", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103 (GT4) (1977) 307-325.

11. Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F., "Support of underground excavations in hard rock", Rotterdam, Balkema (1995).

12. Chen X., Tan C.P., Haberfild C.M., "Solutions for The Deformations and Stability of Elastoplastic Hollow Cylinders Subjected to Boundary Pressures", Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 23 (1999) 779-800.

13. Jha S.K., Suzuki k., "Reliability analysis of soil liquefaction based on standard penetration test", Computers and Geotechnics Vol. 36 (2009) 589- 596.

۱٤. یزدانفر روزبه، *ارزیابی اثر پاسخ ساختگاهی به امواج لرزه‌ای به‌روش ناکامورا*، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد زمین‌شناسی گرایش مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۸٦).

15. Rocscience Inc., "Phase 2 User Manual", USA. (2006).

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.4.4]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3287]