بررسی تأثیر نوع تابع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی در تحلیل احتمالاتی پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ

مجتبی ربیعی‌وزیری، سعید کریمی نسب*، حمید رضا محمدی؛
دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی و مهندسی

تاریخ: دریافت ۹۲/۷/۱۶ پذیرش ۹۳/۱۱/۲۷

چکیده

هوک و براون (۱۹۹۷) روشی را برای تخمین پارامترهای مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ‌ها پیشنهاد کردند. زمانی که این روش پیشنهاد گردید، در طراحی‌های مهندسی سنگ به‌طور گسترده استفاده شد. در طراحی‌ها اغلب از میانگین مقادیر پارامترهای هوک و براون استفاده می‌شود، با توجه به تغییرپذیری خواص تودهٔسنگ در دامنهٔ وسیعی از اعداد این عمل نمی‌تواند مناسب باشد. در چنین مواردی تحلیل احتمالاتی خواص توده‌سنگ اهمیت پیدا می‌کند. شاخص مقاومت زمین‌شناسی از مهم‌ترین پارامترهای موجود در روابط هوک و براون است که عدم قطعیت‌های موجود در تعیین آن بیش‌تر از سایر پارامترها است. در این مقاله بر اساس نتایج آزمایش‌های مکانیک‌سنگ روی نمونه‌های سنگی معدن گل‌گهر سیرجان و هم‌چنین برداشت‌های صحرایی مورد نیاز، به بررسی پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ پرداخته شد. سپس میزان حساسیت این پارامترها نسبت به تغییر نوع تابع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی، در زمان استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو بررسی شد. نتایج نشان داد که میزان حساسیت روابط هوک و براون برای تعیین پارامترهای مختلف ژئومکانیکی توده‌سنگ نسبت به تغییر نوع تابع توزیع

*نویسنده مسئول kariminasab@uk.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]

شاخص مقاومت زمین‌شناسی یک‌سان نیست. میزان حساسیت پارامترهای مختلف نسبت به تغییر نوع تابع توزیع شاخص مقاومت زمین‌شناسی برای زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و مقاومت کلی کم‌تر از ۵٪، مدول کم‌تر از ۱۰٪، و برای مقاومت فشاری تک‌محوره و مقاومت کششی کم‌تر از ۲۵٪، به‌دست آمد

واژه‌های کلیدی: خصوصیات توده‌سنگ، شاخص مقاومت زمین‌شناسی، شبیه‌سازی مونت کارلو، معدن آهن شماره یک گل‌گهر، معیار شکست هوک و براون.

مقدمه

اندازه‌گیری تغییرپذیری خواص مکانیکی توده‌های سنگی دشوار است. روش‌های مورد استفاده در مهندسی سنگ که برای محاسبه خصوصیات تودهٔ سنگ استفاده می‌شوند تنها بر جمع‌آوری تعداد محدودی داده مکانی استوار هستند.

مثلاً روش‌های عددی تنها نیازمند یک مقدار عددی خاص برای هر کدام از پارامترهای ورودی است، که حاصل عملیات روی آن‌ها مقداری برای پارامتر خروجی است. این‌گونه روش‌ها توزیع احتمالی پارامترهای ورودی را در محاسبه پارامترهای مربوط به تودهٔ سنگ در نظر نمی‌گیرند، بنابراین، این روش‌های تجربی ذاتاً در مقادیر خروجی که نتیجه می‌دهند دچار نامعینی و شک و تردید هستند [۱].

بررسی‌های مربوط به قابلیت اعتماد در تعیین خواص مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری تودهٔ سنگ از جمله موارد بسیار مهم در تعیین خواص تودهٔ سنگ با اطمینان زیاد هستند. مواد طبیعی نظیر خاک و سنگ به‌طور ذاتی ناهمگن هستند و تغییرپذیری زیادی در خواص آن‌ها وجود دارد، این تغییرپذیری به‌علت ماهیت ناهمگن در مورد سنگ‌ها بیش‌تر از خاک است. از این‌رو، ضروری است که قبل از طراحی به توصیف خصوصیات طبیعی و تصادفی تودهٔ سنگ پرداخته شود. طبیعت این خواص با عدم قطعیت همراه است و بسیار منطقی‌تر است که در محاسبات مربوط به طراحی به‌جای استفاده از یک مقدار قطعی که معمولاً میانگین مقادیر است، از بررسی‌های مربوط به عدم قطعیت در به‌دست آوردن این مقادیر استفاده شود. به هر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]

حال تخمین‌های آماری و احتمالاتی می‌توانند در ملاحظه کردن دامنۀ وسیعی از مقادیر به پارامترهای تصادفی موجود در مسئله مفید باشند. این موضوع می‌تواند با به‌دست آوردن فراوانی نسبی و توزیع احتمال مربوط به مقادیر به سهولت حاصل شود [۱].

هرکدام از روش‌های تجزیه و تحلیل عدم قطعیت، برای بررسی و تحلیل عدم قطعیت موجود در داده‌ها دارای روند محاسباتی خاصی هستند، برخی از آن‌ها شکل تابع توزیع آماری داده‌های ورودی را در نظر می‌گیرند اما برخی دیگر، این پارامتر را مورد توجه قرار نمی‌دهند.

از آن‌جاکه بسیاری از پدیده‌های طبیعی از توزیع و شکل حدی نرمال پیروی می‌کنند، در بررسی‌های احتمالاتی در بسیاری از موارد مانند مسائل ژئومکانیکی، توزیع اطلاعات ورودی به تحلیل را نرمال فرض می‌کنند. با این وجود در بعضی از موارد داده‌های موجود از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کنند و یا در شرایطی حتی نمی‌توان توزیع خاصی را بر آن‌ها برازش داد، در چنین مواردی این نکته مطرح است که شکل تابع توزیع آماری داده‌های ورودی به تحلیل چه میزان تغییر در خروجی‌های روش احتمالاتی مورد کاربرد ایجاد می‌کند.

از روش‌های پرکاربرد در تعیین خواص ژئومکانیکی تودەسنگ استفاده از روابط هوک و براون است. از جمله پارامترهای ورودی به این روابط شاخص مقاومت زمین‌شناسی[1] است. این شاخص از بررسی‌های صحرایی به‌دست می‌آید، از آن‌جاکه در برداشت‌های صحرایی محاسبه این شاخص با محدودیت‌های متعددی ناشی از عدم دسترسی کامل به تودۀ سنگ مواجه می‌شود، عدم قطعیت موجود در تعیین این پارامتر نسبت به سایر پارامترهای روابط هوک و براون بیش‌تر است. در حقیقت همه پارامترهای معیار هوک و براون اغلب دارای توزیعی آماری هستند. این توزیع‌های آماری می‌توانند محاسبات مربوط به طراحی را به‌شدت معنی‌دار کنند. این توزیع‌ها اغلب در بررسی قابلیت اعتماد در پایداری شیب‌ها و طراحی نگه‌داری تونل‌ها اهمیت دارند [۲].

پژوهش‌های معدودی در زمینۀ برآورد احتمالاتی خواص تودۀ سنگ با استفاده از روابط هوک و براون وجود دارد. هوک در سال ۱۹۹۸ روش تخمین نقطه‌ای[2] را برای تخمین پارامترهای موجود در رابطۀ هوک و براون به‌کار برد و فرض کرد که سه پارامتر GSI، σ_i و m_i

1. Geological Strength Index 2. Point estimation method

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]

دارای توزیع نرمال[1] هستند [۲]. ساری[2] درسال ۲۰۰۹ همانند روش هوک بررسی‌هایی را با تعداد محدودی داده آماری انجام داد [۳]. ساری در سال ۲۰۱۰ و در ادامه بررسی‌های قبلی و با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو[3] اقدام به شبیه‌سازی خواص توده‌سنگ کرد. وی تأثیر توزیع آماری عوامل تأثیرگذار بر تمامی پارامترهای ورودی معیار هوک و براون را هم در محاسبات خود اعمال کرد. هم‌چنین تأثیر توزیع‌های مربوط به پارامترهای سنگ بکر و نیز ناپیوستگی‌ها را که همان ورودی‌های سیستم طبقه‌بندی RMR بودند را در شبیه‌سازی اعمال کرد [۱]. آیدریس[4] و همکاران در سال ۲۰۱۱ و در بررسی‌های خود در زمینهٔ تحلیل عددی تغییرپذیری خواص توده‌سنگ توزیع پارامترهای ورودی رابطه هوک و براون را نرمال در نظر گرفتند [٤]. به هر حال در نظر گرفتن توزیع قرار دادی نرمال برای پارامترهای رابطه هوک و براون ممکن است صحیح نباشد و منطقی‌تر است که توزیع را همان توزیع مشاهده شده در هیستوگرام فراوانی داده‌ها در نظر گرفت [۱].

با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان به این نکته اشاره کرد که تاکنون در هیچ‌کدام از پژوهش‌های انجام شده به حساسیت پارامترهای ژئومکانیکی تودهٔ سنگ نسبت به تغییر نوع تابع توزیع آماری پارامترهای ورودی به تحلیل احتمالاتی توجه نشده است، بر این اساس در این مقاله به بررسی اثر نوع تابع توزیع آماری پارامتر شاخص مقاومت زمین‌شناسی در برآورد احتمالاتی خواص تودهٔ سنگ با استفاده از رابطهٔ هوک و براون و با روش شبیه‌سازی مونت کارلو پرداخته شده است. علاوه بر آن، به مقدار تغییرات در پارامترهای ژئومکانیکی تودهٔ سنگ با تغییر نوع تابع توزیع آماری حاکم بر پارامتر شاخص مقاومت زمین‌شناسی نیز توجه شده است.

روش شبیه‌سازی مونت کارلو

اغلب پارامترهایی که در بررسی‌های ژئومکانیکی و ژئوتکنیکی وجود دارند، دارای عدم قطعیت‌هایی هستند که طراح قادر به پیش‌بینی آن‌ها نیست. به‌عبارت دیگر پارامترهای مختلف در مکان و یا زمان‌های گوناگون دارای فراوانی‌های متفاوتی است و بنابراین خروجی‌های چندگانه و بدون هیچ الگوی مشخصی با عباراتی مانند شانس و یا احتمال بیان می‌شوند.

1. Normal 2. Sari 3. Monte Carlo Simulation method 4. Idris

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]

بنابراین روش‌هایی که عدم قطعیت‌ها و برآیند آن‌ها را در نظر بگیرند، می‌توانند بسیار با ارزش باشند. این روش‌ها به‌نام روش‌های تعیین قابلیت اعتماد[1] مشهور ند. روش‌های بررسی قابلیت اعتماد به سه دسته تقسیم می‌شوند. الف) روش‌های تحلیلی مانند روش ترکیب توزیع متغیرها[2] [۵]، ب) روش‌های تقریبی مانند تخمین نقطه‌ای، و مرتبه اول ممان دوم[3] و ت) روش‌های شبیه‌سازی مانند روش مونت کارلو [٦]. که در این میان روش مونت کارلو با توجه به سهولت در کاربری و دقت در جواب‌های به‌دست آمده بیش از سایر روش‌ها استفاده شده است[۷].

روش شبیه‌سازی مونت کارلو روشی است که با استفاده از یک سری اعداد تصادفی از توزیع احتمالی متغیرها، تابع نهایی را شبیه‌سازی می‌کند. امروزه روش مونت کارلو در مسائل بسیار پیچیده که دارای ماهیتی غیرقطعی هستند، کاربرد بسیاری دارد. شیوهٔ نمونه‌گیری در روش مونت کارلو کاملاً تصادفی است به این معنی که هر نمونه به شکل کاملاً تصادفی از بازهٔ توزیع داده‌های ورودی انتخاب می‌شود [۸].

مراحل مختلف این روش بدین شرح هستند:

الف) اخذ نمونه‌های محدودی از پارامترهای ورودی مورد نظر و تجزیه و تحلیل اطلاعات خام به‌دست آمده.

ب) تعیین نوع توزیع آماری حاکم بر نمونه‌ها (پارامترهای ورودی) و به‌دست آوردن خصوصیات آماری آن.

ج) تولید مقادیر تصادفی برحسب نوع توزیع تعیین شده و محاسبه خصوصیات جدید آماری توزیع مربوط

د) تخمین پارامترهای ژئومکانیکی تودهٔ سنگ با استفاده از مقادیر تصادفی تولید شده در مرحله قبل

تولید مقادیر تصادفی بر اساس نوع توزیع، که در مرحله ج، ذکر شده است طبق این وش صورت می‌گیرد:

1. Reliability 2. Jointed distribution method 3. First Order Second Moment

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]

۱. پارامتر اولیهٔ ورودی مورد نظر را به‌عنوان تابع توزیع تجمعی احتمال[1] رسم یا جدول‌بندی کرده و به نحوی که مقادیر متغیر روی بعد افقی یا محور xها و احتمال‌های مربوط از ۰ تا ۱ روی بعد عمودی یا محور yها باشند.

۲. به‌وسیله یک مولد اعداد تصادفی، یک عدد اعشاری تصادفی بین ۰ تا ۱ (تا هر رقم اعشار) انتخاب می‌شود.

۳. از نقطه‌ای روی محور yها که متناظر با این عدد اعشاری تصادفی است، خطی به موازات محور xها رسم کرده تا منحنی توزیع تجمعی را قطع کند.

٤. از نقطه برخورد فوق خطی عمود بر محور xها رسم می‌شود.

۵. مقدار متغیر x متناظر با این نقطه تقاطع یادداشت شده و این مقدار x به‌عنوان یک مقدار نمونه اختیار می‌شود.

٦. مراحل ۲ الی ۵ را تکرار کرده تا این‌که آن تعداد از متغیرهای تصادفی که مورد نیاز است، شبیه‌سازی گردند.

تابع توزیع متغیرهای تصادفی

پدیده‌هایی که از موردی به مورد دیگر به‌صورت تصادفی تغییر کنند را متغیر تصادفی می‌نامند. متغیرهای تصادفی را می‌توان به دو دسته متغیرهای تصادفی گسسته[2] و متغیرهای تصادفی پیوسته[3] تقسیم‌بندی کرد [۹]. پارامترهای بررسی شده در این پژوهش در دسته متغیرهای تصادفی پیوسته قرار می‌گیرند.

در این مقاله آزمون اندرسون دارلینگ[4] و کم‌ترین مقدار خطای نوع اول که منجر به رد شدن فرض صفر می‌شود[5] توزیع خاصی را برای برازش بر داده‌های شاخص مقاومت زمین‌شناسی مناسب ارزیابی نکردند. با توجه به این نکته و کاربرد گسترده‌ای که توزیع‌های نرمال، لاگ نرمال[6]، گاما[7] و وایبل[8] نسبت به سایر توزیع‌ها دارند و هم‌چنین شباهت هیستوگرام فراوانی داده‌ها در این بررسی به این توزیع‌ها، از این توزیع‌ها برای برازش بر داده‌های شاخص مقاومت زمین‌شناسی استفاده شد.

1. Cumulative Distribution Function 2. Discrete random variable
3. Continuous random variable 4. Anderson Darling 5. P Value
6. Lognormal 7. Gamma 8. Weibull

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]

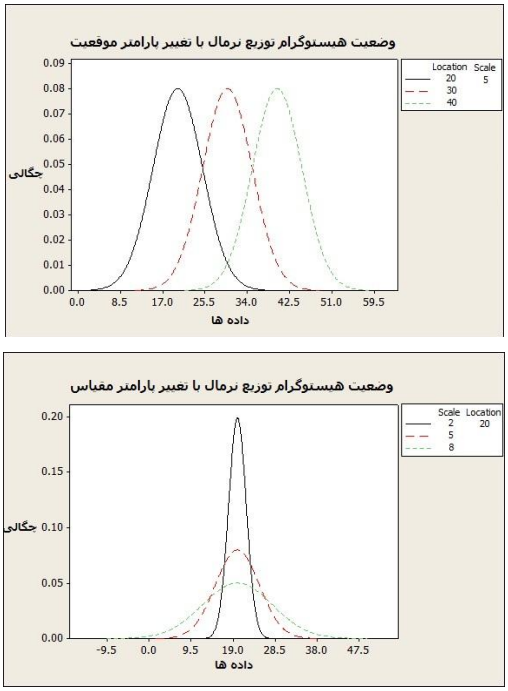
در این بخش به‌طور مختصر به معرفی این توزیع‌ها پرداخته می‌شود:

توزیع نرمال: مهم‌ترین توزیع پیوسته توزیع نرمال است. این توزیع به‌طور گسترده در علم آمار استفاده می‌شود، به‌این علت که از یک سو بسیاری از پدیده‌های طبیعی از این توزیع پیروی می‌کنند و از سوی دیگر شکل حدی بسیاری از توزیع‌های دیگر نیز نرمال است. تابع چگالی احتمال توزیع نرمال به شکل زیر است [۱۰]، [۱۱]:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2} \qquad -\infty < x < +\infty \qquad (۱)$$

در رابطهٔ (۱) x متغیر تصادفی پیوسته، μ پارامتر موقعیت[1] و σ پارامتر مقیاس[2] هستند. لازم به ذکر است که در توزیع نرمال μ و σ به‌ترتیب همان میانگین و انحراف معیار متغیر تصادفی مورد نظر محسوب می‌شوند.

در شکل۱، تغییر وضعیت توزیع نرمال با تغییر در پارامترهای توزیع نشان داده شده است.



شکل ۱. تغییر وضعیت **توزیع نرمال با تغییر پارامترهای توزیع**

1. Location parameter 2. Scale parameter

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]

توزیع لاگ نرمال: در بعضی از موارد متغیر تصادفی پیوسته x از توزیع نرمال پیروی نمی‌کند اما لگاریتم $(x-\theta)$ دارای توزیع نرمال است، در این شرایط متغیر تصادفی پیوسته x دارای توزیع لاگ نرمال است. تابع چگالی احتمال توزیع لاگ نرمال بدین‌صورت است [۱۱]:

$$f_x(x)=\frac{\exp\left\{-\left[\log(x-\theta)-\xi\right]^2/\left(2\omega^2\right)\right\}}{\omega(x-\theta)\sqrt{2\pi}} \qquad x>\theta\,,\,\omega>0 \qquad (۲)$$

در رابطهٔ (۲)، x متغیر تصادفی پیوسته، ω پارامتر موقعیت، ξ پارامتر مقیاس و θ پارامتر آستانه[1] هستند. شکل۲، نشان‌دهندهٔ نحوهٔ تغییر وضعیت توزیع لاگ نرمال با تغییر پارامترهای توزیع است.

توزیع گاما: ریاضی‌دان معروف به نام اولر[2] تابع گاما را وارد آنالیز ریاضی کرد و انتگرال نوع دوم اولر نیز نامیده می‌شود. اگر تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی پیوسته x دارای وضعیت زیر باشد توزیع گاما نامیده می‌شود [۱۱]:

$$f_x(x)=\frac{(x-c)^{a-1}\left(e^{-(x-c)/b}\right)}{\Gamma(a)b^a} \qquad x>c\,,\,a>0\,,b>0 \qquad (۳)$$

در رابطهٔ (۳)، x متغیر تصادفی پیوسته، a پارامتر شکل[3]، b پارامتر مقیاس، c پارامتر آستانه و Γ تابع گاما هستند. شکل۳، تغییر وضعیت توزیع گاما را با تغییر در پارامترهای توزیع نشان می‌دهد.

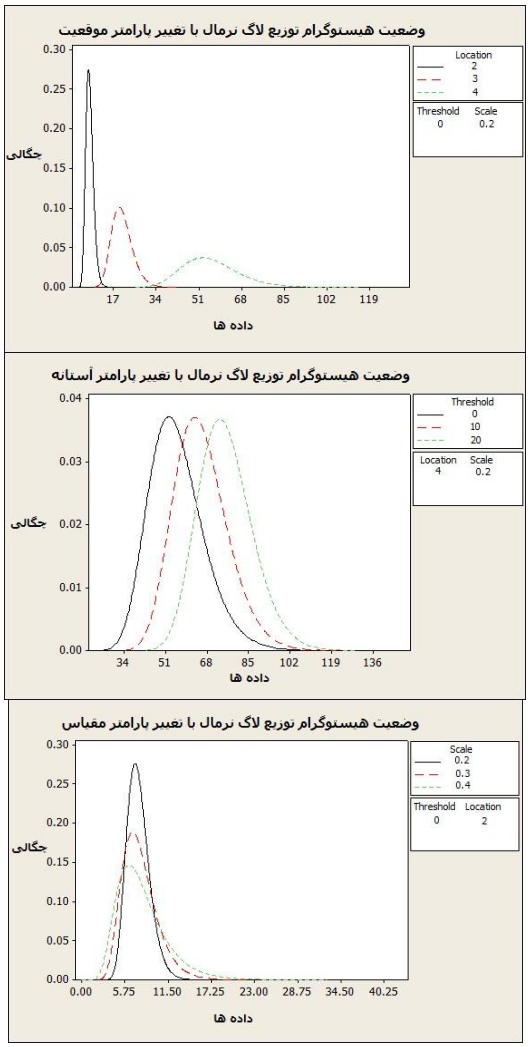
توزیع وایبل: اگر متغیر تصادفی پیوسته x با پارامترهای آلفا و بتای مثبت دارای تابع چگالی احتمالی به‌صورت (٤) باشد آن‌گاه متغیر پیوسته x دارای توزیع وایبل یا وایبول است و داریم [۱۱]:

$$f_x(x)=\frac{\beta(x-\lambda)^{\beta-1}}{\alpha^\beta}\exp\left[-\left((x-\lambda)/\alpha\right)^\beta\right] \qquad \alpha>0\,,\beta>0 \qquad (٤)$$

در رابطهٔ (٤)، x متغیر تصادفی پیوسته، α پارامتر مقیاس، β پارامتر شکل و λ پارامتر آستانه هستند. در شکل٤، تغییر وضعیت توزیع وایبل با تغییر در پارامترهای توزیع نشان داده شده است.

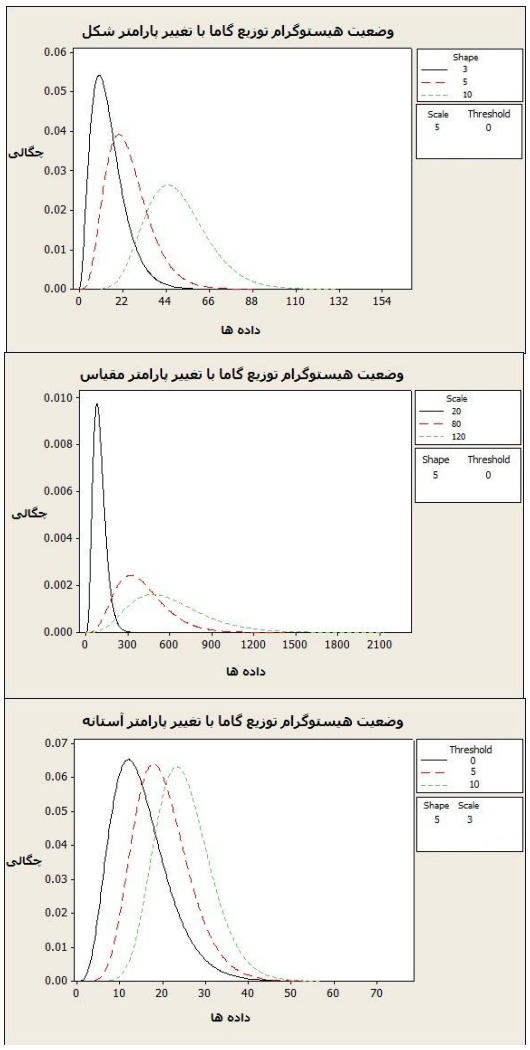
1. Threshold parameter 2. Euler 3. Shape parameter

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]



شکل ۲. تغییر وضعیت توزیع لاگ نرمال با تغییر پارامترهای توزیع

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]

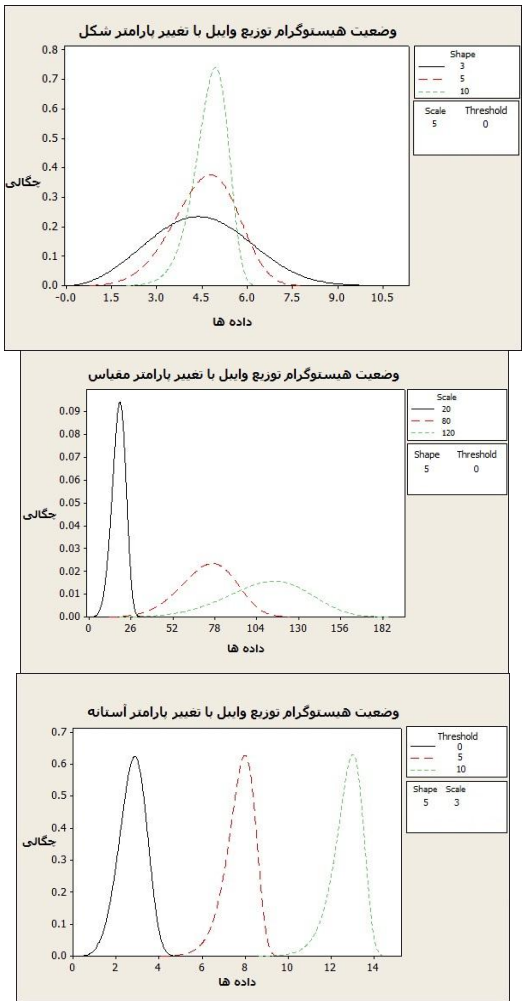


شکل ۳. تغییر وضعیت توزیع گاما با تغییر پارامترهای توزیع

متغیرهایی که در توزیع‌های مذکور تحت عنوان پارامترهای توزیع معرفی شده‌اند، صرفاً کنترل‌کننده وضعیت توزیع هستند. که به‌وسیله آن‌ها نرم‌افزار می‌تواند وضعیت و شکل توزیع تعیین شده را تشخیص داده و نمونه‌گیری تصادفی را انجام دهد. برای این کار نرم‌افزار بعد تشخیص این‌که داده‌های ورودی چه نوع توزیعی دارند یک سری پارامتر را که نشان‌دهندهٔ وضعیت قرارگیری توزیع مورد نظر روی نمودار هستند را ارائه می‌دهد، که به‌وسیله این

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]

پارامترها می‌توان در مرحله نمونه‌گیری تصادفی ویژگی‌های توزیع را به نرم‌افزار داد تا نمونه‌گیری را انجام دهد. لازم به ذکر است که شرکت ارائه دهنده نرم‌افزار، پارامترهای نشان‌دهندۀ وضعیت توزیع را تعیین کرده‌اند و برای هر نوع توزیع آماری ویژگی منحصر به فردی را دارند. نحوۀ اثرگذاری پارامترهای هر توزیع بر وضعیت توزیع مورد نظر در شکل‌های ۱ تا ٤ نشان داده شده است.



شکل ٤. تغییر وضعیت توزیع وایبل با تغییر پارامترهای توزیع

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]

معیار شکست هوک و براون

برای تخمین خواص ژئومکانیکی توده‌سنگ در این مقاله از معیار شکست هوک و براون استفاده شد. صورت کلی این معیار بدین‌صورت است:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci}\,(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + S)^a \qquad (۵)$$

$$m_b = m_i \ \exp(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}) \qquad (۶)$$

$$S = \exp(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}) \qquad (۷)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}}) \qquad (۸)$$

در روابط مذکور σ'_1 تنش مؤثر اصلی حداکثر، σ'_3 تنش مؤثر اصلی حداقل، σ_{ci} مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر، GSI شاخص مقاومت زمین‌شناسی، D فاکتور اغتشاش و m_i ثابت سنگ بکر هستند. مقدار m_i را می‌توان با توجه به جنس سنگ و وضعیت کانی‌شناسی و بافت‌شناسی از جدولی که به این منظور طراحی شده است به‌دست آورد. m_b ثابت کاهش یافته ثابت ماده‌سنگ (m_i) است، هم‌چنین S و a پارامترهایی هستند که مطابق روابط مذکور محاسبه می‌شوند [۱۲].

شاخص مقاومت زمین‌شناسی

معمولاً زمین‌شناسان و مهندسان با تجربه به طبقه‌بندی‌های ساده، سریع و قابل اطمینان علاقه‌مند هستند که بر مبنای بررسی وضعیت زمین‌شناسی از طریق مشاهده استوار باشند. از طرفی استفاده روز افزون از مدل‌سازی‌های کامپیوتری باعث نیاز مبرم به سیستم طبقه‌بندی شده است که با شبیه‌سازی سازه‌های سنگی به‌کمک کامپیوتر سازگار باشد. به‌همین دلیل هوک و براون ضمن معرفی پارامتر شاخص مقاومت زمین‌شناسی جدول‌های ساده‌ای برای تخمین مقدار این پارامتر تهیه کردند [۱۳].

از آن‌جاکه به‌علت کمبود پارامترهای قابل اندازه‌گیری برای ساختار توده‌سنگ و شرایط ناپیوستگی‌ها، برای افراد مختلف (خصوصاً افراد کم تجربه) تخمین مقادیر متفاوت GSI از نمودار برای یک توده‌سنگ واحد، امکان‌پذیر است، محققان برای ایجاد مقیاس‌های کمّی برای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]

ساختار توده‌سنگ و شرایط سطح درزه‌ها، تلاش کرده‌اند، تا این تفاوت در مقادیر قرائت شده به حداقل برسد [۱٤].

سونمز[1] و اولوسی[2] (۱۹۹۹) روشی کمّی برای تعیین GSI را ارائه کرد، تا اختلاف در تعیین مقادیر تعیین شده برای GSI به‌وسیلهٔافراد مختلف به خصوص افراد کم تجربه کاهش یابد [۱۵]. این چارت سپس به‌وسیلهٔ موارد تحقیقاتی بیش‌تر سونمز و اولوسی (در سال۲۰۰۲) اصلاح شد [۱٦]. در این پژوهش از این چارت اصلاح شده برای محاسبه پارامتر شاخص مقاومت زمین‌شناسی استفاده شد. هم‌چنین در این بررسی GSI از روی مغزه‌های حاصل از حفاری‌های ژئوتکنیکی در دیواره‌های معدن برداشت شد، به این ترتیب که دو پارامتر امتیاز ساختاری توده‌سنگ و امتیاز شرایط سطح درزه با روابط (۹) و (۱۰) تعیین شد، و با استفاده از این دو پارامتر، GSI مربوطه از روی چارت کمّی اصلاح شده قرائت گردید.

$$SR = -17.5\ln\left(J_V\right) + 79.8 \qquad (۹)$$

$$SCR = R_w + R_r + R_f \qquad (۱۰)$$

در روابط مذکور SR، امتیاز ساختاری توده‌سنگ، SCR، امتیاز شرایط سطح درزه، R_r، امتیاز زبری، R_w، امتیاز هوازدگی، R_f، امتیاز پرکننده و J_V، تعداد درزه در واحد حجم هستند.

با توجه به اینکه در این مطالعه GSI از روی مغزه‌های حاصل از حفاری‌های ژئوتکنیکی در دیواره‌های معدن برداشت گردید، برای تعیین J_V از رابطه ۱۱، که به تعیین J_V از روی مغزه‌ها اختصاص دارد استفاده شد.

$$J_V = 35 - \left(\frac{RQD}{3.3}\right) \qquad (۱۱)$$

در رابطهٔ (۱۱) J_V، تعداد درزه در واحد حجم و RQD، شاخص کیفیت سنگ هستند.

تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ توسط معیار هوک و براون

یکی از روش‌های متداول برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ، استفاده از معیار شکست هوک و براون است. مقاومت فشاری تک‌محوره توده‌سنگ در معیار هوک و براون از رابطهٔ (۱۲) به‌دست می‌آید [۱۲]:

1. Sonmes 2. Ulusay

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a \quad (۱۲)$$

و مقاومت کششی برابر است با:

$$\sigma_t = -\frac{s\sigma_{ci}}{m_b} \quad (۱۳)$$

طبق پیشنهاد هوک و براون مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ از روابط (۱٤ الف و ب) به‌دست می‌آید:

$$E_m(GPa) = \left(1-\frac{D}{2}\right)\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{((GSI-10)/40)} \quad (۱٤ \text{ الف})$$

$$E_m(GPa) = \left(1-\frac{D}{2}\right) \cdot 10^{((GSI-10)/40)} \quad (۱٤ \text{ ب})$$

رابطهٔ (۱٤ الف) برای سنگ‌ها با مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر کوچک‌تر یا مساوی ۱۰۰ مگا پاسکال و رابطهٔ (۱٤ ب) برای سنگ‌ها با مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر بزرگ‌تر از۱۰۰ مگا پاسکال است [۱۲]. هم‌چنین روابط زیر برای محاسبهٔ زاویه اصطکاک ϕ' و مقاومت چسبندگی c' ارائه شده است:

$$\phi' = \sin^{-1}\left[\frac{6am_b\left(s+m_b\sigma'_{3n}\right)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b\left(s+m_b\sigma'_{3n}\right)^{a-1}}\right] \quad (۱۵)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}\left[(1+2a)s+(1-a)m_b\sigma'_{3n}\right]\left(s+m_b\sigma'_{3n}\right)^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+\left(6am_b\left(s+m_b\sigma'_{3n}\right)^{a-1}\right)/\left((1+a)(2+a)\right)}} \quad (۱٦)$$

$$\sigma'_{3n} = \frac{\sigma'_{3\max}}{\sigma_{ci}} \quad (۱۷)$$

که مقدار $\sigma'_{3\max}$ حد بالای تنش محصور کننده است، برای شیب‌ها، $\sigma'_{3\max}$ از رابطهٔ (۱۸) محاسبه می‌شود:

$$\frac{\sigma'_{3\max}}{\sigma'_{cm}} = 0.72\left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H}\right)^{-0.91} \quad (۱۸)$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]

که σ'_{cm} مقاومت کلی توده‌سنگ، γ وزن مخصوص توده‌سنگ و H عمق از سطح زمین است. در مواردی که تنش افقی از تنش قائم بیش‌تر است، مقدار تنش افقی باید به جای γH استفاده شود [۱۲].

مقاومت کلی توده‌سنگ نیز از رابطهٔ (۱۹) محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \frac{\left(m_b + 4s - a\left(m_b - 8s\right)\right)\left(m_b / 4 + s\right)^{a-1}}{2\left(1+a\right)\left(2+a\right)} \qquad (۱۹)$$

تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو

این مورد بررسی شده بر توده‌سنگ‌های کوارتزشیست، گنایس و مگنتیت موجود در محدودهٔ معدن سنگ آهن شماره یک گل‌گهر انجام شد.

پارامترهای ورودی برای تخمین خواص توده‌سنگ با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو همان پارامترهای ورودی روابط هوک و براون هستند.

از جمله این پارامترها شاخص مقاومت زمین‌شناسی است. این پارامتر ورودی بر اساس چارت کمّی اصلاح شده GSI و با تعیین دو امتیاز شرایط ساختاری توده‌سنگ و شرایط سطح درزه‌ها تعیین شد [۱٦].

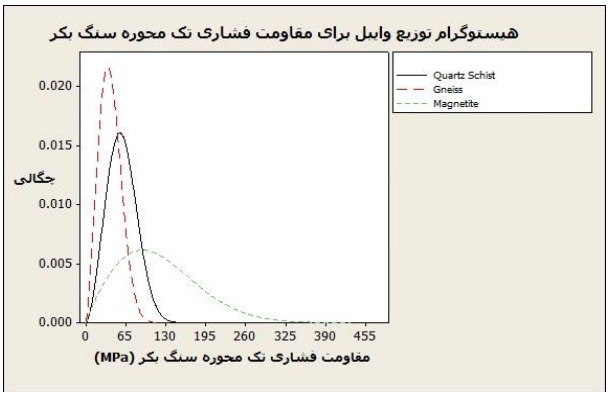
مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر از ورودی‌های دیگر رابطهٔ هوک و براون محسوب می‌شود. این پارامتر بر اساس نتایج آزمون تک‌محوره ماده‌سنگ تعیین شد (شکل ۵).

یکی دیگر از این پارامترهای ورودی، ثابت وابسته به کانی‌شناسی و بافت سنگ است. مقدار این پارامتر از جدول ارائه شدهٔ هوک و براون استخراج شد.

هوک و براون در سال ۲۰۰۲ فاکتور اغتشاش را نیز در محاسبات خود لحاظ کردند. در این تحقیق به‌دلیل انجام انفجارهای استخراجی در معدن آهن شمارهٔ یک گل‌گهر فاکتور اغتشاش برابر یک ($D=1$) در نظر گرفته شد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]

پارامتر γH، از دیگر ورودی‌های مورد نیاز به روابط است، این پارامتر با توجه به انواع سنگ‌های موجود در شیب مورد نظر و وزن مخصوص طبیعی و ارتفاع هر کدام از آن‌ها محاسبه می‌شود. برای محاسبه این پارامتر برای هر سازه سنگی چه سطحی و چه زیرسطحی ابتدا باید لایه‌های مختلف سنگی که در بالای توده‌سنگ مورد نظر قرار دارند شناسایی شود، با مشخص شدن ارتفاع هر کدام از لایه‌های سنگی و وزن مخصوص آن‌ها، برای هر لایه پارامتر γH محاسبه می‌شود. در نهایت مجموع γHهای مربوط به لایه‌های مختلف γH نهایی را نتیجه می‌دهد(جدول ۱).



شکل ۵. توزیع وایبل شناسایی شده برای مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر

جدول۱. پارامترهای ورودی ثابت موجود در محاسبات

توده‌سنگ	مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر(توزیع وایبل)		m_i	γH(MPa)
	پارامتر شکل	پارامتر مقیاس		
کوارتزشیست	۲/٦٦٦	٦٦/۲۷	۱۵	٦/۲۸
گنایس	۲/۳۸۳	٤۵/۰٦	۲۳	٤/٦۹
مگنتیت	۱/۹۱۸	۱۳۵/۹۰	۱۷	۵/٦۳

چنان‌که از شکل ۵ و جدول ۱، مشاهده می‌شود برای پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر توزیع وایبل با پارامتر آستانه صفر شناسایی شد. لازم به ذکر است که پارامترهای شکل، مقیاس و آستانه در توزیع وایبل، کنترل کننده وضعیت و نحوهٔ قرارگیری توزیع آماری روی نمودار چگالی احتمال داده‌ها هستند، که پیش از این نحوهٔ اثرگذاری آن‌ها بر وضعیت توزیع وایبل در شکل٤، نشان داده شد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]

اولین گام در تخمین خواص ژئومکانیکی توده‌سنگ با استفاده از روش مونت کارلو، تعیین بهترین تابع توزیع آماری منطبق شده بر پارامترهای متغیر ورودی است. در این پژوهش برای بررسی تأثیر نوع تابع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی در برآورد پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ، همه پارامترهای ورودی به‌جز شاخص مقاومت زمین‌شناسی ثابت در نظر گرفته شد. و با تغییر نوع تابع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی اثر این تغییر در برآورد پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ بررسی شد. در این مرحله چهار تابع توزیع نرمال، لاگ نرمال، گاما و وایبل برای برازش بر داده‌های شاخص مقاومت زمین‌شناسی انتخاب شد. اطلاعات مربوط به این توابع در جدول ۲، آورده شده است. لازم به ذکر است که در تمامی توزیع‌های شناسایی شده پارامتر آستانه صفر تشخیص داده شد.

جدول۲. خصوصیات توزیع‌های آماری اولیه برای شاخص مقاومت زمین‌شناسی

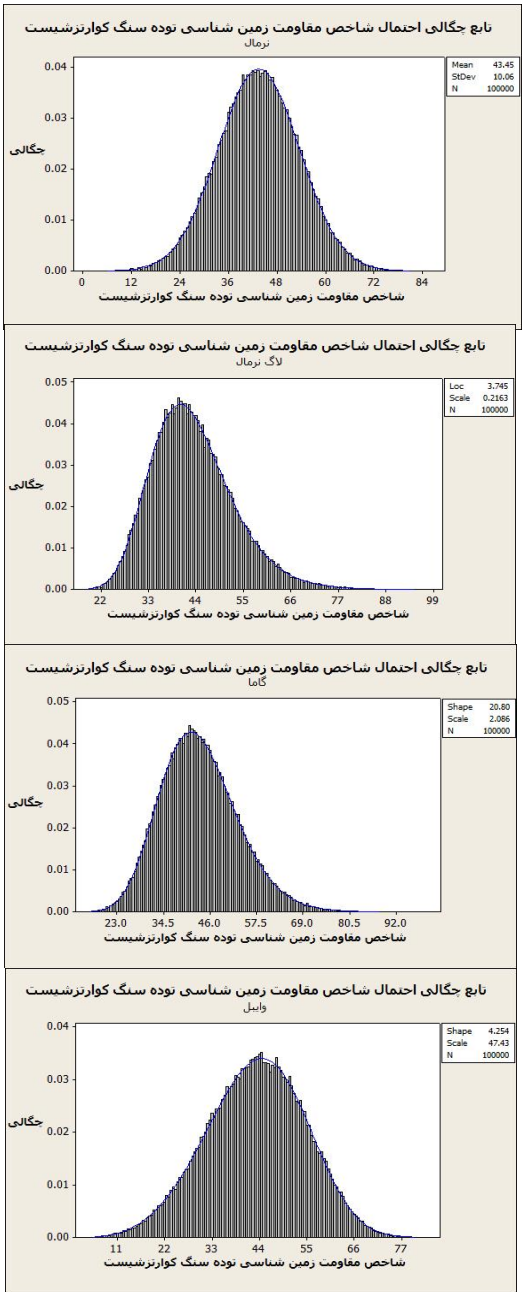
توده‌سنگ	توزیع نرمال		توزیع لاگ نرمال		توزیع گاما		توزیع وایبل	
	پارامتر موقعیت	پارامتر مقیاس	پارامتر موقعیت	پارامتر مقیاس	پارامتر شکل	پارامتر مقیاس	پارامتر شکل	پارامتر مقیاس
کوارتزشیست	٤٣/٤٠	١٠/٠٤	٣/٧٤٦	٠/٢١٧٠	٢٠/٧٢	٢/٠٩٥	٤/٢٥٨	٤٧/٤٤
گنایس	٤٠/٤٤	٥/٨٦٣	٣/٦٨٩	٠/١٥٥٢	٤٤/١٩	٠/٩١٥٢	٨/٥٩٤	٤٢/٨٨
مگنتیت	٥٢/٨٥	٨/٦٠٠	٣/٩٥٢	٠/١٨٠٥	٣٣/٣٧	١/٥٨٤	٧/٣٩١	٥٦/٣٥

در گام بعدی اقدام به تولید 10^5، داده تصادفی از تابع توزیع‌های در نظر گرفته شده گردید (شکل‌های ٦، ٧ و ٨). تعداد نمونه‌گیری از تابع توزیع (N) باید به تعدادی باشد که ضمن حفظ دقت محاسبات، زمان پردازش اطلاعات نیز افزایش پیدا نکند، در نتیجه بعد از بررسی‌های صورت گرفته تعداد نمونه‌گیری تصادفی 10^5، داده مناسب ارزیابی شد.

بعد از تولید اعداد تصادفی از روی تابع توزیع شناسایی شده، با توجه به روابط ارائه شدهٔ هوک و براون، اقدام به تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو گردید. بدین‌منظور داده‌های شبیه‌سازی شده در مرحله قبل، به‌عنوان ورودی‌های روابط ارائه شده هوک و براون استفاده شد و سپس خروجی‌های این روابط محاسبه شد.

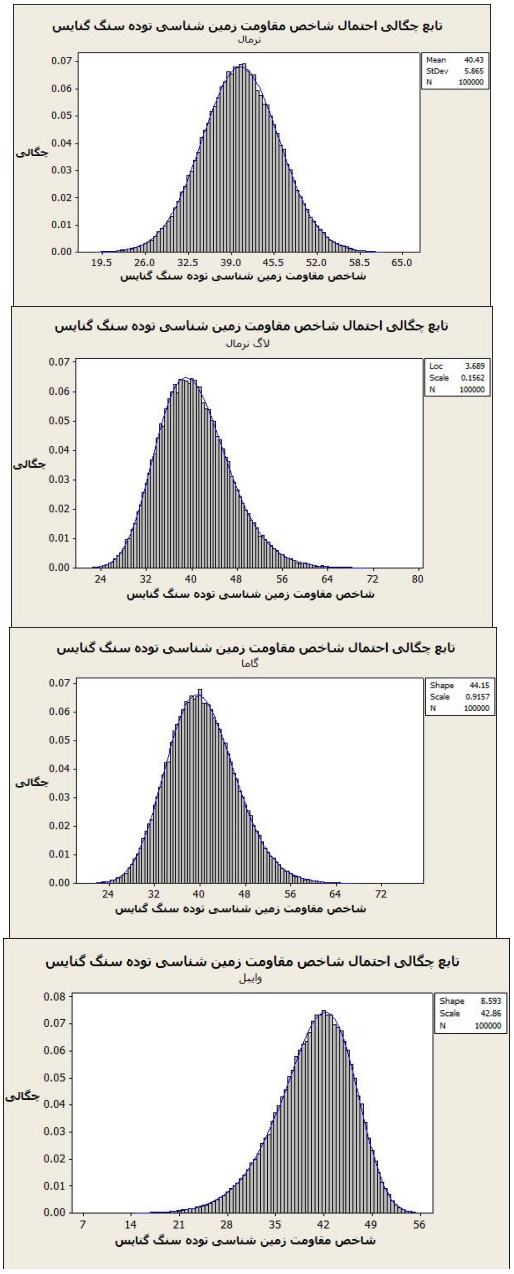
نتایج شبیه‌سازی پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ بر اساس سطح اطمینان ۹۵٪ در جداول ۳ آورده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]



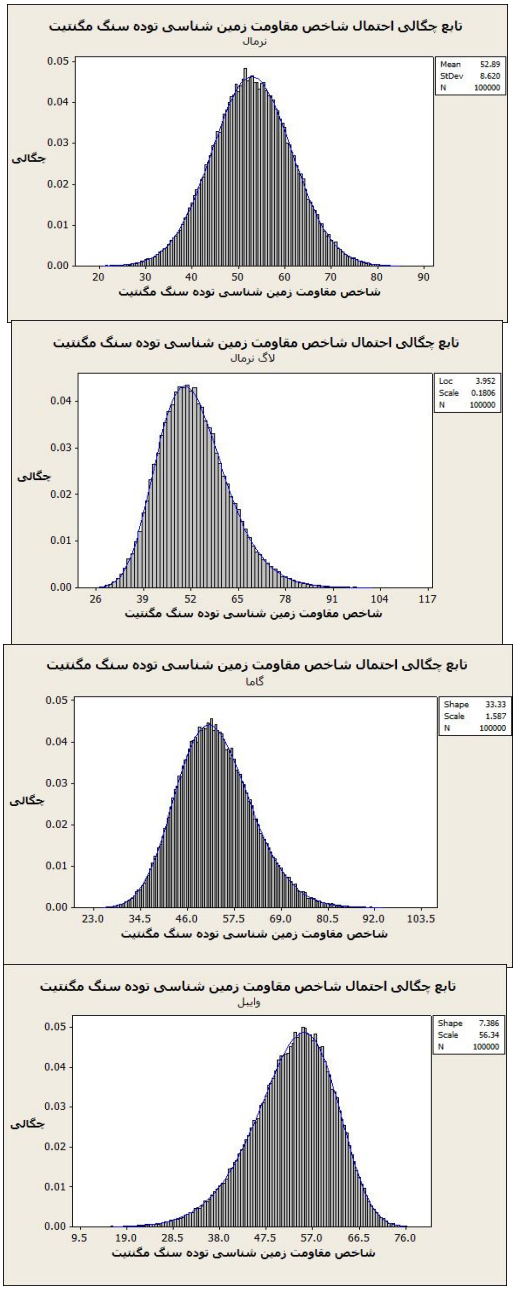
شکل ٦. تابع چگالی احتمال حاصل از شبیه‌سازی پارامتر شاخص مقاومت زمین‌شناسی توده‌سنگ کوارتزشیست

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]



شکل ۷. تابع چگالی احتمال حاصل از شبیه‌سازی پارامتر شاخص مقاومت زمین‌شناسی توده‌سنگ گنایس

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]



شکل ۸. تابع چگالی احتمال حاصل از شبیه‌سازی پارامتر شاخص مقاومت زمین‌شناسی توده‌سنگ مگنتیت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]

جدول۳. فاصلهٔ اطمینان پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ کوارتزشیست با سطح اطمینان ۹۵٪

پارامتر ژئومکانیکی توده-سنگ کوارتزشیست	مشخصات GSI محدوده: ۷۵-۲۵ میانگین۴۳، انحراف معیار۱۰	توزیع نرمال	توزیع لاگ نرمال	توزیع گاما	توزیع وایبل
چسبندگی (MPa)		۰/۶۷۳-۰/۶۷۶	۰/۶۷۲-۰/۶۷۶	۰/۶۷۱-۰/۶۷۵	۰/۶۷۳-۰/۶۷۷
مدول (GPa)		۳/۰۱۸-۳/۰۴۴	۳/۰۰۱-۳/۰۳۱	۲/۹۹۴-۳/۰۲۲	۳/۰۹۰-۳/۱۱۸
مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)		۰/۷۰۵-۰/۷۱۵	۰/۷۱۷-۰/۷۳۳	۰/۷۰۳-۰/۷۱۶	۰/۷۴۶-۰/۷۵۷
مقاومت کلی (MPa)		۴/۱۰۹-۴/۱۴۰	۴/۰۸۹-۴/۱۲۲	۴/۰۹۰-۴/۱۲۲	۴/۱۳۳-۴/۱۶۷
مقاومت کششی (MPa)		-۰/۰۲۸۷۱ ۰/۰۲۸۲۲	-۰/۰۳۰۲۲ ۰/۰۲۹۳۴	-۰/۰۲۹۰۷ ۰/۰۲۸۴۲	-۰/۰۳۰۷۶ ۰/۰۳۰۲۲
زاویهٔ اصطکاک داخلی (Deg)		۲۴/۶-۲۴/۷	۲۴/۵-۲۴/۶	۲۴/۵-۲۴/۶	۲۴/۴-۲۴/۵

جدول۴. فاصلهٔ اطمینان پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ گنایس با سطح اطمینان ۹۵٪

پارامتر ژئومکانیکی توده-سنگ گنایس	مشخصات GSI محدوده: ۵۰-۲۵ میانگین۴۰، انحراف معیار۶	توزیع نرمال	توزیع لاگ نرمال	توزیع گاما	توزیع وایبل
چسبندگی (MPa)		۰/۴۹۵-۰/۴۹۷	۰/۴۹۷-۰/۴۹۹	۰/۴۹۵-۰/۴۹۷	۰/۴۹۵-۰/۴۹۷
مدول (GPa)		۱/۸۷۰-۱/۸۸۰	۱/۹۰۱-۱/۹۱۲	۱/۸۸۳-۱/۸۹۳	۱/۸۶۴-۱/۸۷۳
مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)		۰/۲۸۴-۰/۲۸۷	۰/۲۹۵-۰/۲۹۹	۰/۲۸۹-۰/۲۹۲	۰/۲۸۰-۰/۲۸۲
مقاومت کلی (MPa)		۲/۹۲۱-۲/۹۴۰	۲/۹۴۱-۲/۹۶۰	۲/۹۲۹-۲/۹۴۹	۲/۹۲۳-۲/۹۴۱
مقاومت کششی (MPa)		-۰/۰۰۷۰۱ ۰/۰۰۶۹۴	-۰/۰۰۷۳۸ ۰/۰۰۷۲۹	-۰/۰۰۷۱۸ ۰/۰۰۷۱۰	-۰/۰۰۶۸۷ ۰/۰۰۶۸۱
زاویهٔ اصطکاک داخلی (Deg)		۲۵/۲-۲۵/۳	۲۵/۳-۲۵/۴	۲۵/۲-۲۵/۳	۲۵/۳-۲۵/۴

حدود فاصله‌های اطمینان تعیین شده برای زاویهٔ اصطکاک داخلی توده‌سنگ تا یک رقم اعشار گرد شده‌اند. چنان‌که از جدول‌های ۱ تا ۵ مشاهده می‌شود با تغییر نوع تابع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی، مقادیر تعیین شده برای پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ نیز تغییر می‌کنند. این تغییر برای پارامترهای مختلف یک‌سان نیست. با در نظر گرفتن میانه فاصلهٔ اطمینان برای هر یک از چهار فاصلهٔ اطمینان محاسبه شده برای هر کدام از پارامترهای ژئومکانیکی و با مشخص کردن اختلاف بین دو میانه که از بین چهار میانه محاسبه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]

شده بیش‌ترین اختلاف را با یک‌دیگر دارند، می‌توان بیش‌ترین اختلاف در مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ با تغییر نوع تابع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی را تعیین کرد. لازم به ذکر است که در فاصله‌های اطمینان مذکور، میانه فاصلهٔ اطمینان همان میانگین داده‌ها است.

جدول۵. فاصلهٔ اطمینان پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ مگنتیت با سطح اطمینان ۹۵٪

پارامتر ژئومکانیکی توده-سنگ مگنتیت	مشخصات GSI محدوده: ۷۰-۲۵ میانگین۵۳، انحراف معیار۹	توزیع نرمال	توزیع لاگ نرمال	توزیع گاما	توزیع وایبل
چسبندگی (MPa)		۱/۲۰۳-۱/۲۱۰	۱/۲٤٥-۱/۲٥٦	۱/۲۲٤-۱/۲۳۳	۱/۱۹۰-۱/۱۹٦
مدول (GPa)		٥/۹۸۹-٦/۰۳۱	٦/۲۷۰-٦/۳۳۱	٦/۱٤٥-٦/۱۹۷	٥/۸۹۹-٥/۹۳٥
مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)		۲/۹٦۷-۳/۰۰۸	۳/۳٤٥-۳/٤۲۲	۳/۱٥۷-۳/۲۱٥	۲/۸٤۸-۲/۸۸۲
مقاومت کلی (MPa)		-۱۲/۸٤۹ ۱۲/۷٤۲	-۱۳/۱٦۲ ۱۳/۰۳٥	-۱۳/۰۰۳ ۱۲/۸۸۷	-۱۲/۷٤۷ ۱۲/٦٤٥
مقاومت کششی (MPa)		-۰/۱۱۲٤۸ ۰/۱۱۰۷٤	-۰/۱۳٤۷۰ ۰/۱۳۰٦۰	-۰/۱۲۳٤۰ ۰/۱۲۰٦۰	-۰/۱۰٦۱۳ ۰/۱۰٤۸۰
زاویهٔ اصطکاک داخلی (Deg)		۳٦/۲-۳٦/۳	۳٦/۲-۳٦/۳	۳٦/۲-۳٦/۳	۳٦/۲-۳٦/۳

بیش‌ترین اختلاف در مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ با تغییر نوع تابع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی در جدول ٦، آورده شده است.

جدول٦. بیشترین اختلاف در مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی با تغییر نوع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی(٪)

پارامتر ژئومکانیکی توده‌سنگ	کوارتزشیست مشخصات GSI محدوده: ۷٥-۲٥ میانگین٤۳، انحراف معیار۱۰	گنایس مشخصات GSI محدوده: ٥۰-۲٥ میانگین٤۰، انحراف معیار٦	مگنتیت مشخصات GSI محدوده: ۷۰-۲٥ میانگین٥۳، انحراف معیار۹
چسبندگی	٪ ۰/۳	٪ ۰/٤	٪ ٤/٦
مدول	٪ ۳/۱	٪ ۲	٪ ٦/۱
مقاومت فشاری تک‌محوره	٪ ٥/٦	٪ ٥/٤	٪ ۱٥/۳
مقاومت کلی	٪ ۱/۱	٪ ۰/٦	٪ ۳
مقاومت کششی	٪ ٦/٦	٪ ٦/۷	٪ ۲۰/٥
زاویهٔ اصطکاک داخلی	٪ ۰/٦	٪ ۰/۲	٪ ۰/۱

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]

وجود روابط غیرخطی در محاسبهٔ پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ سبب می‌شود که خروجی این روابط تحت تأثیر مقدار و هم‌چنین مشخصات آماری پارامترهای ورودی به روابط قرار گیرد. در این زمین] تحقیقاتی بررسی‌ها بر روی سه توده‌سنگ کوارتزشیست، گنایس و مگنتیت انجام شد، با وجود این‌که برای بررسی تأثیر نوع تابع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی در تحلیل احتمالاتی پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ تمامی پارامترهای ورودی به تحلیل ثابت در نظر گرفته شد اما نتایج تا حدودی تحت اثر مقادیر متفاوت شاخص مقاومت زمین‌شناسی تعیین شده برای هر یک از توده‌سنگ‌های بررسی شد، به‌طوری‌که بیش‌ترین اختلاف در مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ با تغییر نوع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی علاوه بر نوع توزیع آماری تحت اثر مقدار و خصوصیات آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی توده‌سنگ مورد نظر هم قرار گرفت (جدول٦).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تأثیر نوع تابع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی در تحلیل احتمالاتی پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ پرداخته شد. به‌عبارت دیگر حساسیت هر یک از پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ نسبت به تغییر نوع تابع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی بررسی شد.

نتایج این بررسی نشان داد که مقدار حساسیت پارامترهای مختلف ژئومکانیکی توده‌سنگ نسبت به تغییر نوع تابع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی یک‌سان نیست و با تغییر نوع توزیع آماری و مقدار شاخص مقاومت زمین‌شناسی تغییر می‌کند.

در این پژوهش بیش‌ترین حساسیت نسبت به تغییر نوع تابع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی برای توده‌سنگ کوارتزشیست با میانگین شاخص مقاومت زمین‌شناسی ٤٣ و انحراف معیار ١٠ به‌ترتیب مربوط به پارامترهای ژئومکانیکی مقاومت کششی، مقاومت فشاری تک‌محوره، مدول، مقاومت کلی، زاویهٔ اصطکاک داخلی و چسبندگی توده‌سنگ است.

بیش‌ترین حساسیت نسبت به تغییر نوع تابع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی برای توده‌سنگ گنایس با میانگین شاخص مقاومت زمین‌شناسی ٤٠ و انحراف معیار ٦ به‌ترتیب

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]

مربوط به پارامترهای ژئومکانیکی مقاومت کششی، مقاومت فشاری تک‌محوره، مدول، مقاومت کلی، چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی توده‌سنگ است.

هم‌چنین بیش‌ترین حساسیت نسبت به تغییر نوع تابع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی برای توده‌سنگ مگنتیت با میانگین شاخص مقاومت زمین‌شناسی ۵۳ و انحراف معیار ۹ به‌ترتیب مربوط به پارامترهای ژئومکانیکی مقاومت کششی، مقاومت فشاری تک‌محوره، مدول، چسبندگی، مقاومت کلی و زاویهٔ اصطکاک داخلی توده‌سنگ است.

چنان‌که از جدول ٦ مشاهده می‌شود، به‌طورکلی میزان تغییر در پارامترهای زاویهٔ اصطکاک داخلی، چسبندگی، مقاومت کلی و مدول توده‌سنگ با تغییر نوع تابع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی کم‌ترین مقدار است. به‌طوری‌که پارامترهای زاویهٔ اصطکاک داخلی، چسبندگی و مقاومت کلی توده‌سنگ بیش از ۹۵٪ و هم‌چنین پارامتر مدول توده‌سنگ بیش از ۹۰٪ مطابقت در مقادیر تعیین شده را با تغییر نوع تابع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی از خود نشان می‌دهند. اما میزان تغییر در پارامترهای مقاومت فشاری تک‌محوره و مقاومت کششی توده‌سنگ با تغییر نوع تابع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی بیش‌ترین مقدار است. به‌طوری که این دو پارامتر مطابقت بیش از ۷۵٪ را با تغییر در نوع تابع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی از خود نشان می‌دهند.

بررسی‌های صورت گرفته نشان داد که پارامترهای مقاومت کششی، مقاومت فشاری تک‌محوره و مدول توده‌سنگ، به‌ترتیب بیش‌ترین حساسیت را نسبت به تغییر نوع تابع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی از خود نشان می‌دهند و در صورتی که در تعیین تابع توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی در محاسبات مربوط به این پارامترها دقت مناسب صورت نگیرد، یا تابع توزیع آماری به‌صورت فرضی در محاسبات لحاظ شود، خطای ظاهر شده در مقادیر حاصل از تحلیل احتمالاتی این پارامترها، نسب به پارامترهای زاویهٔ اصطکاک داخلی، چسبندگی و مقاومت کلی توده‌سنگ قابل توجه است.

در نهایت توصیه می‌شود که در هر زمینه تحقیقاتی که طراح در تعیین نوع تابع توزیع آماری ورودی‌های تحلیل با تردید روبه‌رو است، در هنگام استفاده از روش‌های آماری و احتمالاتی در تحلیل و تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ، حساسیت این پارامترها

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]

نسبت به تغییر نوع تابع توزیع آماری پارامترهای ورودی به تحلیل بررسی شود تا از خطای ایجاد شده در خروجی تحلیل جلوگیری شود.

منابع

1. Sari M., Karpuz C., Ayday C., "Estimating rock mass properties using Monte Carlo simulation: Ankara andesites", Computers & Geosciences, Vol. 36 (2010) 959-969.
2. Hoek E., "Reliability of the Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 35 (1998) 63-68.
3. Sari M., "The stochastic assessment of strength and deformability characteristics for a pyroclastic rock mass", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 46 (2009) 613-626.
4. Idris M.A., Saiang D., Nordlund E., "Numerical analyses of the effects of rock mass property variability on open stope stability", American Rock Mechanics Association (2011).
5. Hoel P.G., Port S.C., Stone C.J., "Introduction to probability theory", Houghton Mifflin Company (1971).
6. Baecher G.B., christen J.T., "Reliability and statistic in geotechnical engineering", John Wiley (2003).
7. Tobutt D., "Monte Carlo simulation methods for slope stability", Computers & Geosciences, Vol. 8 (1982) 199-208.
8. Robert C., Casella, "Monte Carlo statistical methods", 2nd ed G. Springer-verlag, New York (2004).

۹. زارعی ا.، *آمار کاربردی*، انتشارات دانش پرور، تهران (۱۳۸۳).

۱۰ .فروند جان، *آمار ریاضی*، ترجمه: علی عمیدی، محمد قاسم وحیدی اصل. مرکز نشر دانشگاهی، چاپ هشتم، تهران (۱۳۸٤).

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]

11. Minitab web site و "Tutorials of Minitab 16.2.2", Product licensed to: Hewlett-Packard corporation, Minitab web site (http://www.minitab.com) (2010).

12. Hoek E., Carranza-Torres C.T., Corkum B., "Hoek-Brown failure criterion-2002 edition", In: Proceedings of the fifth North American rock mechanics symposium, Toronto, Canada, Vol. 1 (www.Rockscience.com) (2002) 267-273..

13. Singh B., Goel R.K., "Rock mass classification, a practical approach in civil engineering", Elsevier Science Ltd (1999).

14. Zhang L., "Engineering properties of rocks, Elsevier Geo-Engineering Book Series Volume 4", Elsevier Science Ltd (2005).

15. Sonmez H., Ulusay R., "Modification to the Geological Strength Index (GSI) and their applicability to stability of slopes", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 36 (1999) 743-760.

16. Sonmez H., Ulusay R., "A discussion on the Hoek- Brown failure criterion and suggested modification to the criterion verified by slope stability case studies", Yerbilimleri (Earth sciences), Vol. 26 (2002) 77-99.

17. Hack R., Price D., Rengers N., "A new approach to rock slope stability-a probability classification (SSPC)", Bull Eng Geol Environ, Vol. 62 (2003) 167-184.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.6.6]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3325]