

الگوریتم جستجوی تابو برای تعیین پارامترهای ثابت معیارهای گسیختگی سنگ

الهه آذر (کارشناس ارشد)

محمود ناجی (کارشناس ارشد)

منصور پرویزی* (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه باسج

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۶ (۳۳-۲۵)
دوری ۲، شماره ۲/۲، ص. ۳۳-۲۵

روند ایجاد معیارهای شکست سنگ و نیز دقت آن‌ها در پیش‌بینی مقاومت سنگ تحت تنش‌های مختلف، نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب معیارهای موجود در ارزیابی ویژگی‌های مقاومتی سنگ است. عدم جواب‌گویی دقیق معیارهای تئوریک برای پیش‌بینی مقاومت سنگ برای اغلب سنگ‌ها به علت ماهیت طبیعی ذاتی سنگ‌ها به اثبات رسیده است. همچنین ارائه‌ی معیارهای تجربی نیز مستلزم انجام مطالعات و انجام آزمون‌های سه‌محوری بر روی سنگ‌های مختلف است. در نوشتار حاضر، معیارهای شکست مهم سنگ از جمله: هوک - براون، فرانکلین و بناوسکی، به عنوان معیارهای تجربی پرکاربرد در زمینه‌ی مهندسی سنگ انتخاب و سپس با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تابو ثابت‌های هر معیار تعیین شده است. نتایج مطالعه‌ی حاضر نشان می‌دهد که استفاده از بهینه‌سازی تابو در به دست آوردن پارامترهای انواع معیارها می‌تواند پوش گسیختگی بهتری را برای شکست سنگ ایجاد کند. همچنین اصلاح فرمولاسیون معیار گسیختگی فرانکلین نیز انجام شده است.

واژگان کلیدی: معیار شکست، معیارهای تجربی، مقاومت سنگ، برازش منحنی (رگرسیون)، بهینه‌سازی.

ezar111@gmail.com
mahmood.naji67@gmail.com
parvizi@yu.ac.ir

۱. مقدمه

معمولاً هدف از ایجاد محل یا محیطی برای تعیین خصوصیات کارهای زیرزمینی با ایجاد یک مدل سه‌بعدی جهت تعیین اطلاعات توپوگرافی، خاک، سنگ‌شناسی توده‌سنگ، زمین‌شناسی ساختاری، هیدرولوژی و اطلاعات مکانیکی، از جمله تنش توده‌سنگ احداث می‌شود.^[۱]

خواص فیزیکی - مکانیکی توده‌سنگ‌ها، پارامترهای مهمی در طبقه‌بندی آن‌ها و در طراحی عملیات مهندسی است. در فعالیت‌های مهندسی شناخت و تهیه‌ی اطلاعات دقیق از اندیس‌های مقاومتی و پارامترهای رفتاری توده‌سنگ بسیار ضروری و مهم است. جهت تحلیل پایداری یک فضای سنگی، تنش‌های اصلی اطراف آن با یک معیار گسیختگی مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

در مطالعه‌ی حاضر، معیارهای مهم مختلف شکست سنگ اعم از نظری و تجربی در نظر گرفته می‌شود. اگرچه معیارهای نظری و تئوریک از لحاظ درک بهتر موضوع ضروری و مهم هستند، ولی کاربرد آنها در عمل محدود است و در طراحی‌ها بیشتر از معیارهای تجربی استفاده می‌شود.

در یک طرح ژئوتکنیکی نیز شناخت و جمع‌آوری اطلاعات دقیق در ارتباط با تعیین پارامترهای توده‌سنگ که شاخص قدرت و رفتار است، لازم و حیاتی است. در زمینه‌های مهندسی، تنش‌هایی که به حد خودنهایی رسیده‌اند، تعیین‌کننده‌ی معیار شکست است.^[۲]

از جمله سؤال‌های اساسی که در بررسی عدم شکست سنگ‌ها مطرح می‌شود، این است که: آیا تنش‌های ایجاد شده در سنگ از مقدار مقاومت مجاز سنگ کمتر است؟ آیا کرنش‌های ایجاد شده در اثر تنش‌های مذکور برای سازه قابل قبول است و بهره‌برداری از آن را دچار مشکل نمی‌کند؟ برای پاسخ به دو سؤال مهم ذکر شده، شناخت رفتار سنگ و معیارهای خرابی و شکست آن لازم است. سنگ‌ها تحت بارهای فشاری، کششی، برشی و خمشی می‌توانند به شکست برسند. معمولاً تنش‌های ترکیبی به سنگ اعمال می‌شود و انواع شکست‌ها را در سنگ ایجاد می‌کنند.

به عنوان مثال، در سقف معادن و تونل‌ها، اگر سنگ‌ها لایه‌بی باشند، ممکن است شکست خمشی رخ دهد. در محدوده‌ی مذکور، ترک‌های کششی در اثر خمش در تارهای تحتانی گسترشی می‌یابند، تا جایی که به شکست خمشی منجر می‌شوند. در کناره‌های بازشدگی‌ها ممکن است شکست برشی رخ دهد. در هنگام حفاری سنگ‌ها، معمولاً آن‌ها تحت اثر فشار خرد و سپس با شکست برشی تکه‌های سنگ جدا می‌شوند، همچنین در شیب‌های سنگی ممکن است شکست کششی اتفاق بیفتد. با بزرگ‌شدن اندازه‌ی نمونه، میزان ترک‌ها افزایش و مقاومت توده‌ی سنگ کاهش می‌یابد.

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۴/۹/۱، پذیرش ۱۳۹۴/۱۰/۵.

متفاوت است. همچنین نتیجه‌گیری شده است که در بیشتر سنگ‌ها، مدل یادبر و همکاران پوش گسیختگی با خطای کمتری ارائه می‌دهد.^[۷] همچنین در سال ۲۰۱۲، یک مدل جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)^۱ ایجاد شده است، که با استفاده از تعمیم شبکه‌ی عصبی رگرسیون (GRNNs)^۲ آماده‌سازی شده و در نهایت این نتیجه به دست آمده است که GRNNs به خوبی می‌تواند مقاومت فشاری تک‌محوری را پیش‌بینی کند.^[۸] در سال ۲۰۱۲، نیز مطالعاتی جهت پیش‌بینی مدول کشسانی سنگ بکر از طریق شبکه‌ی عصبی مصنوعی انجام و از شبکه‌ی عصبی مصنوعی و ۱۹۵ داده‌ی آزمایشگاهی استفاده شده و نتیجه‌ی نهایی نشان داده است که این روش می‌تواند به صورت عملی مورد استفاده قرار گیرد.^[۹]

۳. معیارهای مهم گسیختگی سنگ

از دیرباز معیار شکست مصالح زمین‌شناسی به عنوان شاخصی مفید جهت ارزیابی ویژگی‌های مقاومتی سنگ شناخته شده و مورد استفاده و تحلیل قرار گرفته است. معیارهای شکست با نظریه‌ی کلمب در سال ۱۷۷۳ میلادی آغاز شده و نتیجه گرفته شده است که مقاومت برشی به چسبندگی و تنش نرمال بستگی دارد و بعد از ایشان موهر در سال ۱۸۸۲، یک روش گرافیکی برای نشان دادن حالت تنش در یک نقطه معرفی کرده است.^[۱۰] در ادامه، با ترکیب فرضیات کلمب و موهر، معیار معروف موهر-کلمب معرفی شده است، که این معیار هم برای خاک و هم برای سنگ مورد استفاده قرار گرفته است. در سال ۱۹۲۴، گریفیت نظریه‌ی برای اجسام شکننده معرفی و از دایره‌ی موهر برای معرفی معیار گسیختگی خود استفاده کرده است.^[۱۱] بعد از آن پژوهشگران بسیاری،^[۱۱] به اصلاح نظریه‌ی گریفیت پرداخته و معیارهای گسیختگی جدید خود را معرفی کرده‌اند. در ادامه، معیارهای تجربی با استفاده از نظریه‌های پیشین بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. پژوهشگران زیادی با انجام آزمایش‌های بسیاری بر روی سنگ بکر و درزه‌دار به معرفی معیارهای تجربی خود پرداخته‌اند، که معیارهای: فایره‌ارست،^[۱۱] هوک و براون،^[۱۲] فرانکلین،^[۱۳] بنیاوسکی،^[۱۴] و بالمر را می‌توان نام برد.

علاوه بر این، معیار موهر - کلمب در مقاومت کششی تک‌محوری توده‌سنگ طبق رابطه‌ی ۱ مورد استفاده قرار می‌گیرد:^[۱۴]

$$\sigma_1 = \sigma_{cm} + K\sigma_2 \quad (1)$$

که در آن، σ_{cm} مقاومت تراکمی تک‌محوری توده‌سنگ، و K شیب خط نمودار σ_1 نسبت به σ_2 است. معیار فون میسس جزء معیارهای سه‌بعدی برای شکست سنگ است، که روابط ۲ الی ۵ مربوط به آن است.^[۱۵]

$$J_2 = \frac{\sigma_1^2}{3} \quad (2)$$

$$J_2 = \frac{1}{3} \left[(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2) = \frac{1}{3} \left[(\sigma_1 - S)^2 + (\sigma_2 - S)^2 + (\sigma_3 - S)^2 \right] \right] \quad (3)$$

$$S = \sigma_{ocr} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (4)$$

$$\sigma_1' = \sigma_1 / \sigma_c \quad (5)$$

که در آن‌ها، $\sigma_{1,2,3}$ تنش‌های اصلی، S_1 و S_2 تنش‌های انحرافی کمینه و بیشینه، J_2 ثابت دوم تنش انحرافی و σ_3 تنش فون میسس است.

در طول ۵ دهه‌ی گذشته، به منظور شبیه‌سازی رفتار سه‌محوری نمونه‌های سنگ، چندین معیار تجربی ارائه شده است که فقط تعداد محدودی از آنها عمومیت یافته‌اند. شکل تابع در معیارهای مذکور متفاوت بوده و در هر کدام، ثابت‌های جداگانه‌ی برای برآورد مقاومت هر نوع سنگ تعریف شده است. ساختار نوشتار حاضر این گونه طراحی شده است که ابتدا پیشینه‌ی پژوهش در بخش ۲ ارائه شده است. در بخش ۳ به معرفی معیارهای مورد استفاده پرداخته شده است. بخش ۴، به معرفی روش جستجوی تابو و نحوه‌ی عملکرد آن و کارهای انجام‌شده با روش تابو پرداخته است. در بخش ۵، داده‌های مربوط به رفتار توده‌سنگ‌های استفاده‌شده در پژوهش حاضر ارائه شده است. در بخش ۶، پارامترهای معیارهای گسیختگی با الگوریتم جستجوی تابو تعیین شده است. در بخش‌های ۷ و ۸، به بررسی نتایج و تحلیل آن پرداخته شده است. در نوشتار حاضر، با توجه به روندی که به آن اشاره شده است، با استفاده از روش بهینه‌سازی تابو به تعیین پارامترهای معیارهای مهم گسیختگی سنگ و مقایسه‌ی آن با روش رگرسیون پرداخته شده است.

روش بهینه‌سازی تابو، به دلیل انعطاف‌پذیری مطلوب و سرعت بالای آن در حل مسائل مختلف مهندسی ژئوتکنیک قابل استفاده است، که البته تاکنون در مهندسی ژئوتکنیک استفاده نشده و پژوهش حاضر، کاربرد آن را برای اولین بار در زمینه‌ی مکانیک سنگ بررسی کرده است.

۲. پیشینه‌ی پژوهش

تاکنون در زمینه‌ی معیارهای گسیختگی، مطالعات زیادی انجام شده است، اما تعداد مطالعات خیلی کمی در رابطه با بهینه‌سازی آن‌ها انجام شده است. مطالعات انجام‌شده عبارت‌اند از: مطالعاتی در سال ۱۳۸۶، که به مقایسه‌ی کارایی معیارهای تجربی شکست بر مبنای تحلیل مقدار عدم قطعیت ثابت‌های هر معیار پرداخته و با محاسبه‌ی فواصل اطمینان، ثابت‌های دو معیار بنیاوسکی و هوک و براون اصلاح و معیار جدیدی برای مقایسه‌ی کارایی معیارهای مذکور ارائه شده است.^[۲] در سال ۱۳۷۸، نیز به مقایسه‌ی دقت معیارهای تجربی موهر-کلمب، هوک و براون، و بنیاوسکی در بررسی شکست سنگ و همچنین ارائه‌ی یک مدل جدید غیرخطی به روش تقریب کمینه‌ی مربعات پرداخته شده و این نتیجه به دست آمده است که یک چندجمله‌ی درجه دوم با داشتن ۳ مجهول، بهترین تطابق را با داده‌های آزمایشگاهی خواهد داشت.^[۳] در سال ۱۳۸۹، نیز از شبکه‌ی عصبی برای تخمین پارامتر S در معیار هوک و براون برای سنگ‌های غیرهمسان برای اجتناب از انجام آزمایش و محاسبات استفاده شده و نتایج بررسی‌های ایشان نشان داده است که میزان خطای شبکه‌ی عصبی قابل قبول است.^[۵]

همچنین در سال ۲۰۰۲، پژوهشی با عنوان ارزیابی آماری معیار شکست سنگ بکر با آزمایش چندمحوره برای چند نوع سنگ مختلف، ۷ معیار تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته و این نتیجه به دست آمده است که اگر داده‌های آزمایش سه‌محوری در دسترس باشد، می‌توان اثر σ_2 را در گسیختگی چندمحوره در نظر گرفت. نتایج دو نوع از ۳ نوع سنگی که به شیوه‌ی مذکور مورد بررسی قرار گرفته است، امیدوارکننده بوده است.^[۶]

در سال ۲۰۰۹، نیز به مقایسه‌ی معیارهای گسیختگی سنگ بکر با استفاده از روش‌های مختلف آماری پرداخته شده و ۴ معیار گسیختگی سنگ با ۳ روش آماری مختلف مورد مقایسه قرار گرفته و این نتیجه به دست آمده است که با استفاده از روش‌های مختلف آماری مورد استفاده، پارامترهای به دست آمده از هر روش با یکدیگر

۴. روش جستجوی تابو (TS)

همواره در دانش مهندسی، مسائل بهینه‌سازی و تصمیم‌گیری‌های پیچیده‌ی پدیدار می‌شوند، که حل آنها با استفاده از روش‌های کلاسیک ریاضی دشوار و در پاره‌یی موارد ناممکن است. مجموعه‌ی عظیمی از روش‌های بهینه‌سازی توسط پژوهشگران بسیاری در زمینه‌های متفاوت پیشنهاد شده‌اند، که تمامی آن‌ها از یک سری ایده‌های ساده نشأت می‌گیرند (گاهی از طبیعت) و براساس اندکی ویژگی خاص از هم تفکیک می‌شوند. در این میان، روش‌های بهینه‌سازی عددی مبتنی بر تکرار، کاربرد فراوان دارد و در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی، مؤثرترین روش حل محسوب می‌شوند. در عمل برای بسیاری از مسائل بهینه‌سازی مهندسی، یک روش عمومی مشخص جهت دست‌یابی مستقیم به پاسخ بهینه وجود ندارد. به همین دلیل است که شیوه‌های بهینه‌سازی زیادی تاکنون معرفی شده و هم‌چنان در حال توسعه‌اند. از این بین، روش‌هایی که انعطاف‌پذیری بیشتری در مقابل طیف وسیعی از مسائل بهینه‌سازی داشته باشند، اهمیت ویژه‌ی دارند.

جستجوی تابو (TS)، با توجه به ویژگی‌های قابل توجهی که دارد، قادر است به‌عنوان ابزار قدرتمندی در بهینه‌سازی مسائل دشوار به‌کار رود. اگرچه همچون بسیاری از روش‌های کاوشی و فراکاوشی، راه مشخصی جهت اثبات هم‌گرایی فرایند حل وجود ندارد، اما موفقیت‌های چشم‌گیری که از کاربرد این روش در مسائل بهینه‌سازی مختلف حاصل شده است، پژوهشگران را به استفاده و توسعه‌ی بیشتر این روش تشویق می‌کنند.

روش جستجوی تابو از توسعه‌ی روش‌های ساده‌ی جستجوی محلی (همسایگی) به‌منظور فرار از دام اکستریم‌های محلی به‌وجود می‌آید. روش‌های جستجوی همسایگی طی یک فرایند تکراری به شناسایی و ارزیابی نقاط همسایگی یک حل اولیه (جوابی که در ابتدا کاربر را در روند بهینه‌سازی قرار می‌دهد) می‌پردازند و سپس با انتخاب یک نقطه‌ی مناسب‌تر در همسایگی، فرایند بهینه‌سازی را به‌پیش می‌برند. انتخاب نقطه‌ی مناسب در همسایگی می‌تواند محدود به یک جهت مشخص در هر تکرار باشد، به این معنی که در هر تکرار تعداد نقاط محدودی در همسایگی تولید و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (Direct search) و یا بررسی همسایگی نقطه مورد نظر به صورت کامل انجام می‌پذیرد (Decent search)، که این مورد حالت کامل‌تری از جستجو را فراهم می‌آورد و نوع اول را نیز در برمی‌گیرد. انتخاب هر یک از این دو روش در هسته‌ی مرکزی جستجوی تابو، تابعی از مشخصات و ابعاد مسئله و البته سلیقه‌ی کاربر است. در شکل ۱، روند کاوش توسط الگوریتم جستجوی تابو نشان داده می‌شود.

در پژوهش حاضر، با استفاده از روش جستجوی تابو (TS) به بهینه‌سازی معیارهای گسیختگی مذکور پرداخته شده است. برای استفاده از روش جستجوی تابو در این پژوهش، الگوریتم آن در نرم‌افزار متلب نوشته شده است. در روش ذکرشده، ابتدا تابع هدف که معادله‌ی یکی از معیارهاست، به تابو داده شده و ثابت‌ها به‌عنوان متغیر در تابع هدف تعریف شده است. سپس با وارد کردن داده‌های آزمایشگاهی به الگوریتم تابو، بهترین ثابت‌ها به‌عنوان خروجی برای بهترین برآزش به‌دست آمده است. در ادامه، الگوریتم جستجوی تابو توسعه‌یافته از جستجوی محلی تشریح شده است.

گام ۱. یک جواب اولیه‌ی امکان‌پذیر در فضای امکان‌پذیر مسئله انتخاب و قرار داده می‌شود.

گام ۲. شمارنده افزایش می‌یابد. یک همسایگی برای جواب اولیه تعیین و سپس یک زیرمجموعه از جواب‌ها تولید می‌شود. نکته‌ی قابل توجه در تعریف همسایگی

معیار دراکر - پراگر معیارهای سه‌بعدی برای شکست سنگ است که روابط ۶ الی ۱۰ مربوط به آن است.^[۱۶]

$$J_p^{1/2} = a + bJ_1 \quad (۶)$$

$$J_1 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (۷)$$

$$a = \frac{\sqrt{3}\sigma_c}{q + 2} \quad (۸)$$

$$b = \frac{\sqrt{3}(q - 1)}{q + 2} \quad (۹)$$

$$q = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (۱۰)$$

در پژوهش حاضر، ۳ معیار گسیختگی تجربی فرانکلین، هوک و براون، و بنیواسکی به‌عنوان سه معیار پراگربرد در مکانیک سنگ جهت بهینه‌سازی و تعیین ثابت‌های آنها انتخاب شده‌اند.

معیار فرانکلین با برآزش منحنی و آزمایش تجربی بر روی ۵۰۰ نمونه‌ی سنگ بکر ارائه شده و با ۷ معیار گسیختگی گوناگون برای سنگ‌های بکر و درزه‌دار مورد مقایسه قرار گرفته است. در ارائه‌ی معیار مذکور، به بهترین منحنی و سادگی معادله‌ی معیار توجه شده است.^[۱۱] رابطه‌ی معیار گسیختگی فرانکلین مطابق معادله‌ی ۱۱ است:

$$\sigma_1 = \sigma_2 + \sigma_c^{1-\beta}(\sigma_1 + \sigma_2)^\beta \quad (۱۱)$$

معیار هوک براون (۱۹۸۰) با استفاده از کاربرد نظریه‌ی گریفت و برآزش منحنی تجربی برای توده‌سنگ‌های بکر و بسیار درزه‌دار بررسی و پس از آن در چندین نوبت توسط هوک و همکارانش اصلاح شده است، که می‌توان به اصلاح معیار ذکرشده در سال‌های ۱۹۸۰، ۱۹۸۸، ۱۹۹۲ و ۲۰۰۲ اشاره کرد. اما برای سنگ‌های بکر، معیار مذکور دست‌نخورده باقی مانده است.^[۱۰] رابطه‌ی ۱۲، رابطه‌ی مربوط به معیار هوک براون را نشان می‌دهد:

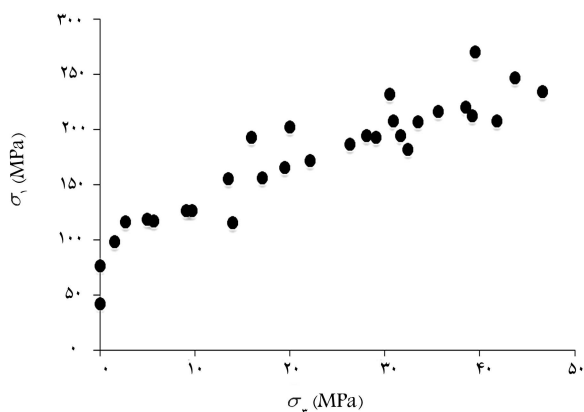
$$\sigma_1 = \sigma_2 + (m \cdot \sigma_c \cdot \sigma_2 + s \cdot \sigma_c^2)^{1/2} \quad (۱۲)$$

معیار بنیواسکی (۱۹۷۴) که ابتدا توسط بنیواسکی ارائه و سپس اصلاح شده و به شکل کنونی درآمده است، با برآزش منحنی تجربی برای ۷۰۰ نمونه توده‌سنگ بکر و بسیار درزه‌دار تعیین شده است. رابطه‌ی ۱۳ معیار گسیختگی بنیواسکی را نشان می‌دهد:

$$\sigma_1/\sigma_c = a + b(\sigma_1/\sigma_c)^a \quad (۱۳)$$

که در آن، σ_1 تنش بیشینه در آزمایش سه محوری، σ_2 تنش کمینه در آزمایش سه محوری، σ_c مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر، β ثابت معیار فرانکلین، m و s ثابت‌های معیار هوک - براون، a ، b و α ثابت‌های معیار بنیواسکی است.

در پژوهش حاضر، معادله‌ی معیار فرانکلین و هوک - براون با دو روش بهینه‌سازی با الگوریتم تابو و نیز با روش رگرسیون غیرخطی بررسی شده و نتایج آن در قسمت مدل‌سازی و نتیجه‌گیری مورد مقایسه قرار گرفته است. از آنجایی که به‌دست آوردن پارامترهای معیار بنیواسکی با روش رگرسیون غیرخطی بسیار پیچیده است و ممکن نیست، لذا ضرایب این معیار با روش بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم تابو برای ۳ نمونه سنگ مذکور مشخص شده است. پوش گسیختگی با توجه به ثابت‌های به‌دست آمده برای هر معیار رسم شده است. درنهایت، پیش‌بینی پوش گسیختگی برای هر ۳ نمونه سنگ با یکدیگر مقایسه شده و صحت هر معیار برای هر نمونه سنگ با توجه به اعداد به‌دست آمده از طریق روش تابو و مقایسه‌ی آن با روش رگرسیون، عملکرد روش تابو در فضای پیوسته مورد سنجش قرار گرفته است.

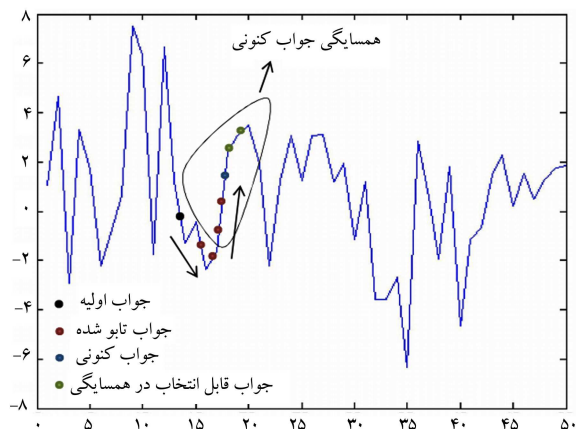


شکل ۲. پراکندگی داده‌های آزمایش سه محوری برای نمونه‌ی سنگ آهک (Lim-stone).

الف) نمونه‌ی سنگ اول (Limestone): پراکندگی داده‌های آزمایش سه محوری مربوط به این نمونه سنگ در شکل ۲ نشان داده شده است. [۱۷] ضریب همبستگی شاخصی است که میزان رابطه‌ی بین متغیرها را نشان می‌دهد. یک ملاک مناسب برای تعیین همبستگی دو متغیر کمی ضریب همبستگی پیرسون است، که در نمونه آن را با r_{xy} نشان می‌دهند. با به توان ۲ رساندن ضریب همبستگی، مقدار ضریب تعیین (R^2) بین دو متغیر به دست می‌آید. ضریب تعیین نشان می‌دهد که چند درصد تغییرات متغیر وابسته توسط متغیر مستقل تبیین می‌شود. این ضریب در رگرسیون کاربرد زیادی دارد. برای نمونه‌ی سنگ آهک (Limestone)، $r_{xy} = 0.92$ ضریب همبستگی هر چه به ۱ نزدیک تر باشد، قوی تر است، که در نمونه مذکور نزدیک به ۱ است. ضریب تعیین نشان می‌دهد که چند درصد تغییرات متغیر وابسته توسط متغیر مستقل تبیین می‌شود. یعنی حدود ۸۵٪ از داده‌ها با مدل تبیین شده است. پوش گسیختگی به دست آمده از ضرایب مربوط به نمونه‌ی سنگ اول در شکل ۳ ارائه شده است. در نمونه‌ی سنگ اول، ضرایب ثابت معیار گسیختگی فرانکلین $\beta = 0.67$ و $\sigma_c = 190$ و پارامترهای ثابت معیار بناوسکی به ترتیب: $\alpha = 0.974$ ، $b = 3.454$ ، $\alpha = 0.974$ ، $\sigma_c = 95$.

ب) ضرایب ثابت معیار هوک - براون به ترتیب $m = 7.222$ و $s = 0.936$ به دست می‌آید. نمونه‌ی سنگ دوم (Sandstone): پراکندگی داده‌های آزمایش سه محوری مربوط به این نمونه سنگ در شکل ۴ نشان داده شده است. [۱۷] پوش گسیختگی به دست آمده از ضرایب مربوط به نمونه‌ی سنگ دوم در شکل ۵ ارائه شده است. برای نمونه‌ی سنگ دوم آهک (Sandstone)، $r_{xy} \approx 1$ است. ضریب همبستگی هر چه به ۱ نزدیک تر باشد قوی تر است، که در این نمونه نزدیک به ۱ است. ضریب تعیین نشان می‌دهد که چند درصد تغییرات متغیر وابسته توسط متغیر مستقل تبیین می‌شود. $R^2 \approx 1$ نشان می‌دهد که تقریباً ۱۰۰٪ از داده‌ها با مدل تبیین شده است. در نمونه‌ی سنگ دوم، ضرایب ثابت معیار گسیختگی فرانکلین $\beta = 0.8$ و $\sigma_c = 190$ و پارامترهای ثابت معیار بناوسکی به ترتیب: $a = 1.804$ ، $b = 4.0963$ و $\alpha = 0.86802$ هستند و ضرایب ثابت معیار هوک - براون به ترتیب $m = 12.871$ ، $s = 4.124$ و $\sigma_c = 190$ به دست آمده است.

ج) نمونه‌ی سنگ سوم (مطالعه‌ی موردی): پراکندگی داده‌های آزمایش سه محوری مربوط به این نمونه سنگ در شکل ۶ نشان داده شده است. پوش گسیختگی به دست آمده از ضرایب مربوط به نمونه‌ی سنگ سوم در شکل ۷ ارائه شده است.



شکل ۱. روند کاوش توسط الگوریتم جستجوی تابو.

لیست حل‌های تابو است و عبارت است از تعداد محدودی از آخرین جواب‌های ملاقات شده (حافظه‌ی کوتاه مدت) و با کلیدی جواب‌های تکرارهای قبلی (حافظه‌ی بلندمدت).

گام ۳. بهترین جواب به گونه‌ی یافت می‌شود که به ازاء هر جواب، شرط $f(j) \leq f(k)$ برقرار باشد. سپس جواب در لیست تابو قرار می‌گیرد.

گام ۴. اگر یکی از شروط هم‌گرایی (قابل تعریف توسط کاربر) رخ دهد، جستجو متوقف و در غیر این صورت به گام ۲ باز می‌گردد.

با توجه به مفهوم الگوریتم جستجوی تابو، که قبلاً به آن اشاره شده است، این نکته قابل ذکر است که در زمینه‌ی مهندسی ژئوتکنیک، تاکنون از این روش بهینه‌سازی استفاده نشده است.

۵. داده‌های ژئوتکنیکی توده‌های سنگ انتخاب شده در

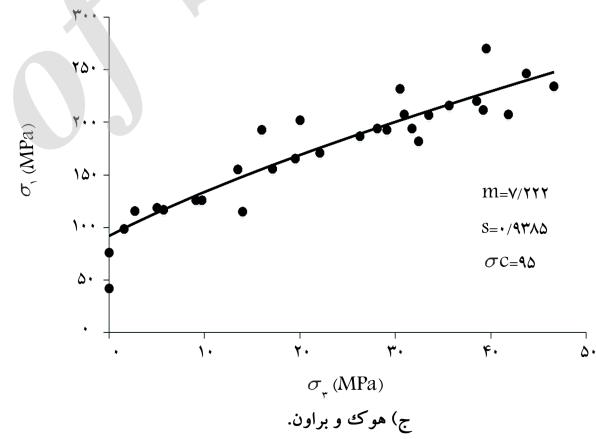
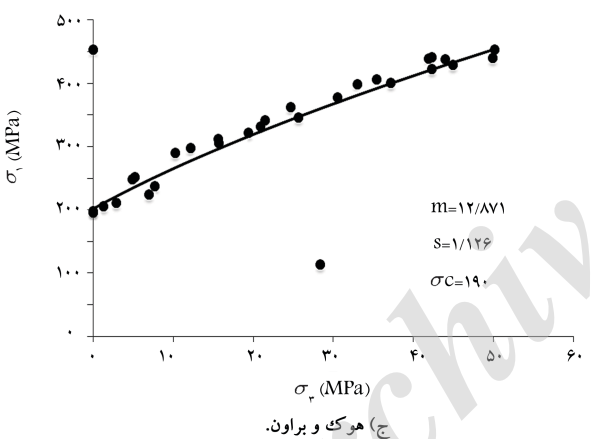
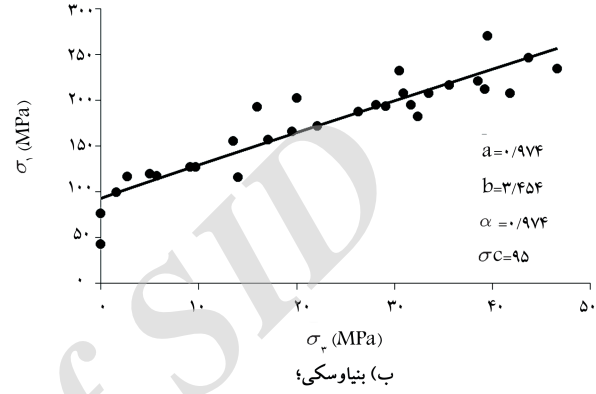
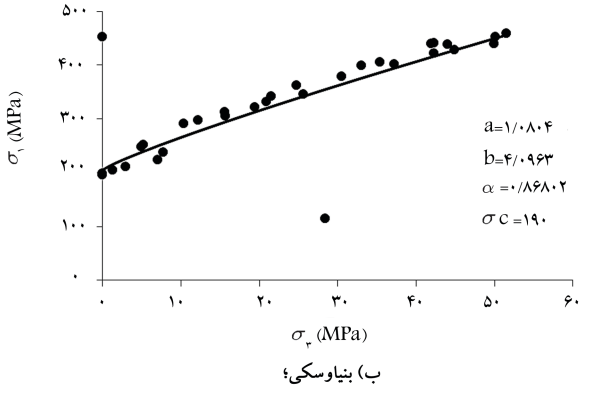
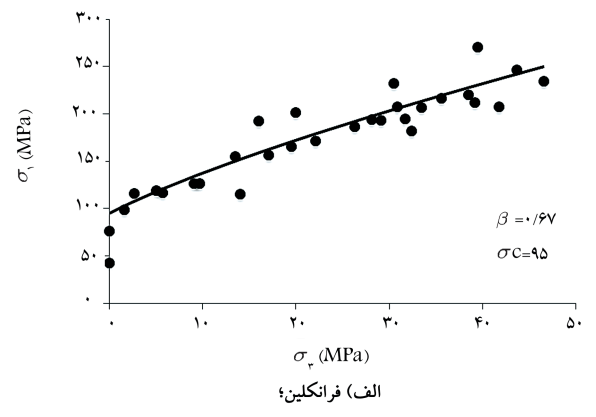
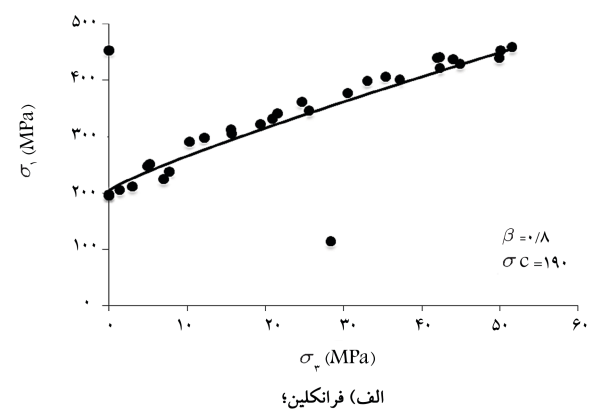
پژوهش

در پژوهش حاضر از نتایج آزمایش سه محوری ۳ نمونه‌ی سنگ استفاده می‌شود. سنگ اول، از جنس Limestone (سنگ آهک) که از ۳۰ داده مربوط به σ_1 و σ_3 با $\sigma_c = 95 \text{ Mpa}$ استفاده شده است، نمونه‌ی سنگ دوم، از جنس Sandstone (سنگ ماسه) است، که شامل ۳۱ داده مربوط به σ_1 و σ_3 با $\sigma_c = 190 \text{ Mpa}$ است. [۱۵] نمونه‌ی سنگ سوم، داده‌های آزمایشگاهی مربوط به تونل انتقال آب سبزکوه - چغاخور در ۷۰ کیلومتری جنوب شهرکرد در استان چهارمحال بختیاری از جنس سنگ‌های آهک و شیل و مارن است. ۷۰ داده مربوط به σ_1 و σ_3 و $\sigma_c = 60.7 \text{ Mpa}$ برای نمونه‌ی سنگ سوم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۶. الگوریتم جستجوی تابو جهت تعیین پارامترهای

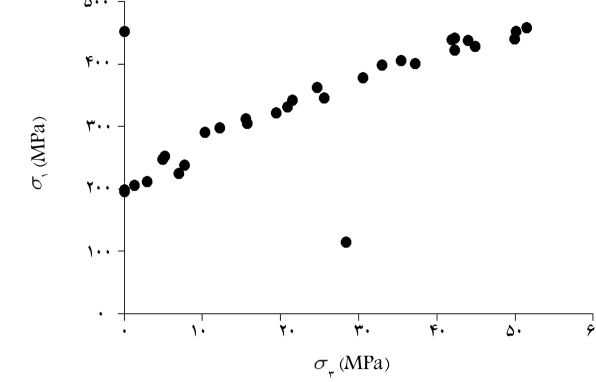
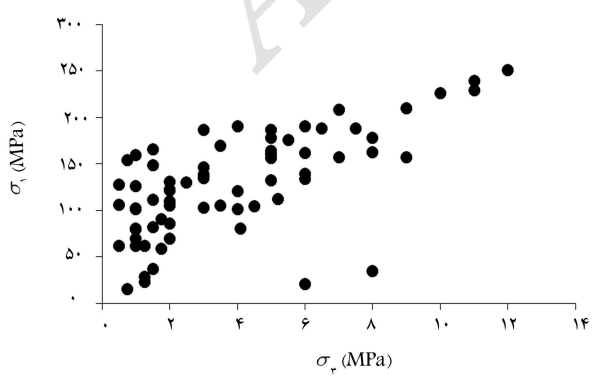
معیارهای گسیختگی

در این بخش برای داده‌های موجود ۳ نمونه‌ی سنگ ذکر شده، ابتدا پراکندگی داده‌های آزمایش ۳ محوری ترسیم و سپس با استفاده از الگوریتم تابو، که جزئیات آن ارائه شده است، ثابت‌های ۳ معیار گسیختگی معرفی شده به دست آمده است.



شکل ۵. پوش گسیختگی به دست آمده از روش بهینه سازی تابو برای نمونه‌ی ماسه سنگ (Sandstone).

شکل ۳. پوش گسیختگی به دست آمده از روش بهینه سازی تابو برای نمونه‌ی سنگ آهک (Limestone).



جدول ۱. ثابت‌های هر معیار به دست آمده با روش جستجوی تابو.

معیار	ثابت‌ها	نمونه‌ی	
		اول	دوم
هوک و براون	M	۷,۲۲۲۲	۱۲,۸۷۱
	S	۰,۹۳۸۵	۱,۵۲۷۳
فرانکلین	B	۰,۶۶۸۶۱	۰,۷۹۹۳۱
	σ_c	۹۵	۱۹۰
بنيائوسکی	A	۰,۹۷۴	۱,۰۸۰۴
	B	۳,۴۵۴	۴,۰۹۶۳
	A	۰,۹۷۴	۰,۸۶۸۰۱

جدول ۲. مقایسه‌ی MSE در روش رگرسیون و جستجوی تابو.

MSE		
مدل	نمونه‌ی سنگ	روش
هوک و براون	اول	تابو ۳۷۷,۴۹
	دوم	رگرسیون ۶۴۹۸,۰۲
	سوم	۲۶۶۸,۳۴
فرانکلین	اول	تابو ۲۰۲۴,۷۶
		رگرسیون ۴۹۱۱,۹۹

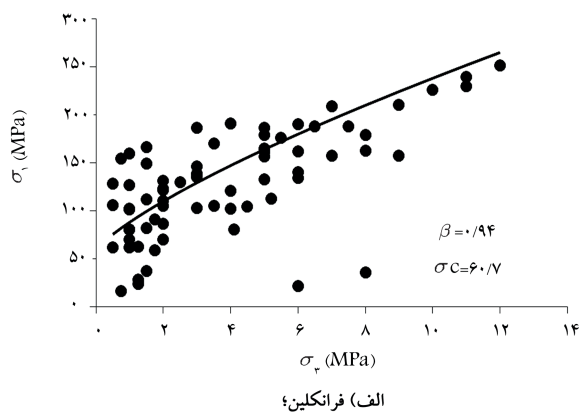
۷. تجزیه و تحلیل

بر اساس نتایج حاصل از الگوریتم تابو، داده‌های آزمایش ۳ محوری سه نمونه سنگ بهینه‌سازی شدند و پارامترهای ۳ معیار گسیختگی هوک و براون، فرانکلین و بنیائوسکی به دست آمده‌اند. ثابت‌های به دست آمده برای هر معیار و برای هر نمونه سنگ می‌تواند به عنوان خواص هر نوع سنگ بیان شود، که این ثابت‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. در ادامه، ثابت‌های معیار هوک برای هر ۳ نمونه و معیار فرانکلین نمونه سوم به روش رگرسیون نیز تعیین و در نهایت، پوشش به دست آمده به کمک روش بهینه‌سازی تابو با روش رگرسیون در شکل‌های ۸ تا ۱۱ ترسیم شده‌اند. سپس با استفاده از روش‌های ریاضی مجموع مربعات خطا (SSE) و میانگین مجموع مربعات خطا (MSE)، صحت هر معیار برای هر نمونه‌ی سنگ مورد سنجش قرار گرفته و در پایان نیز با توجه به مقادیر به دست آمده از روش‌های ریاضی، معیار مناسب‌تر برای هر نمونه‌ی سنگ از روابط ۱۴ و ۱۵ مقادیر خطا برای هر معیار به دست آمده است.

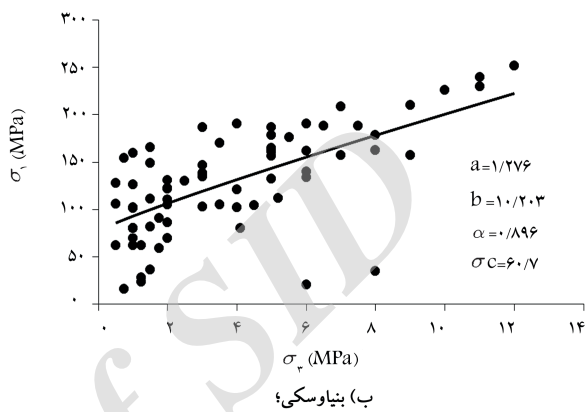
$$SSE = [EER(f)] = \sum_{j=1}^{j=n} (\sigma_{Experimental} - \sigma_{Predicted})^2 \quad (14)$$

$$MSE = [EER(f)] = \frac{SSE}{n} \quad (15)$$

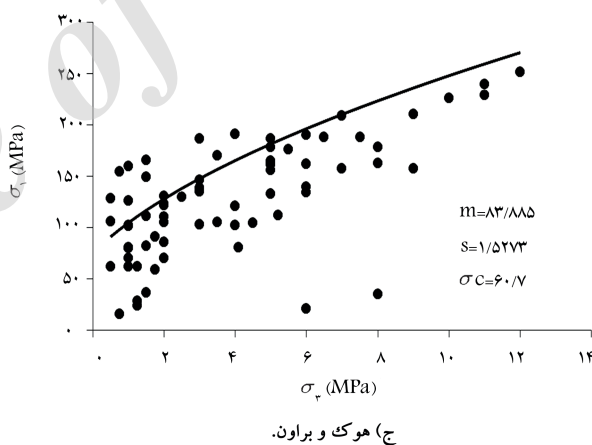
از شکل‌های ارائه شده و نیز جدول ۲، می‌توان به توانایی روش‌های بهینه‌سازی و به ویژه روش تابو پی برد که با استفاده از روش تابو در زمان بسیار کوتاه، می‌توان پوش گسیختگی شکست سنگ را با کمترین خطا نسبت به روش‌های ریاضی و به خصوص روش متداول رگرسیون تعیین کرد، که این موضوع می‌تواند مهندس طراح را در زمینه‌ی سنگ مورد مطالعه، بسیار یاری دهد و نیز می‌تواند با توجه به پارامترهای به دست آمده در هر معیار و پوش گسیختگی بهتر، رفتار سنگ و دیگر



الف) فرانکلین؛



ب) بنيائوسکی؛



ج) هوک و براون.

شکل ۷. پوش گسیختگی به دست آمده از روش بهینه‌سازی تابو برای نمونه‌ی سنگ سوم برای معیارهای تجزیه و تحلیل.

برای نمونه‌ی مطالعه‌ی موردی $r_{xy} = 0.85$ ضریب همبستگی هر چه به ۱ نزدیک‌تر باشد، قوی‌تر است، که در این نمونه نزدیک به ۱ است. $R^2 = 0.72$ ، ضریب تعیین نشان می‌دهد که چند درصد تغییرات متغیر وابسته توسط متغیر مستقل تبیین می‌شود و در اینجا نشان می‌دهد که حدود ۷۲٪ از داده‌ها با مدل تبیین شده‌اند. در نمونه‌ی سنگ سوم، ضرایب ثابت معیار گسیختگی فرانکلین: $\beta = 0.94$ و $\sigma_c = 60.7$ و پارامترهای ثابت معیار بنیائوسکی به ترتیب $a = 1/276$ ، $b = 10/203$ ، $\alpha = 0.896$ ، $m = 83/885$ ، $s = 60.7$ و ضرایب ثابت معیار هوک - براون به ترتیب $\sigma_c = 83/885$ ، $\sigma_c = 1/5273$ و $\alpha = 60.7$ می‌آید. [۱۸]

جدول ۳. مقادیر MSE در معیارهای شکست.

معیار	نمونه‌ی MSE		
	اول	دوم	سوم
هوک و براون	۳۷۷,۴۹	۴۳۴۳,۲۴	۲۶۶۸,۳۴
فرانکلین	۳۹۵,۲۱	۴۷۲۶,۰۹	۲۰۲۴,۷۶
بنيواسکی	۴۱۳,۸۱	۴۳۲۴	۱۶۸۵,۹۳

جدول ۴. کمینه‌ی مقادیر MSE و معیار مناسب.

نمونه	معیار مناسب	کمینه‌ی MSE
اول	هوک و براون	۳۷۷,۴۹
دوم	بنيواسکی	۴۳۲۴
سوم		۱۶۸۵,۹۳

پارامترهای مقاومتی سنگ را با درصد خطای بسیار کمتری تخمین زد. در نتیجه می‌توان چنین گفت که روش جستجوی تابو هم از نظر دقت و هم از نظر زمان برای استفاده در کارهای مهندسی ژئوتکنیک می‌تواند بسیار برکارد باشد. پارامترها و نمودارهای پوش گسیختگی به‌دست آمده حاکی از این امر است که بهینه‌سازی به روش تابو می‌تواند در فضای پیوسته نیز بسیار کاربردی و مفید باشد؛ همچنین پژوهش حاضر نشان می‌دهد که روش بهینه‌سازی تابو، که تاکنون در زمینه‌های ژئوتکنیک و مکانیک سنگ استفاده نشده است، می‌تواند به‌عنوان ابزار قدرت‌مندی در حل مسائل مختلف مربوط به ژئوتکنیک مورد استفاده قرار گیرد.

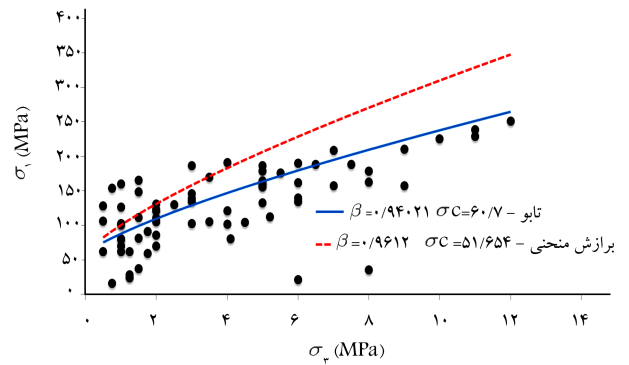
طی بررسی‌های انجام‌شده با توجه به جدول ۳ و در نهایت جدول ۴، کمترین خطا برای هر معیار و در نتیجه بهترین معیار برای هر نمونه سنگ تعیین شده است. در هر نمونه‌ی سنگ، نتایج بدین شرح است:

- در نمونه‌ی سنگ آهک (limestone)، معیار هوک و براون نسبت به دیگر معیارها پیش‌بینی بهتری به‌دست داده است.
- در نمونه‌ی ماسه‌سنگ (sandstone)، معیار بنیواسکی نسبت به دیگر معیارها پیش‌بینی بهتری به‌دست داده است.
- در نمونه‌ی سنگ سوم (مطالعه‌ی موردی)، نیز معیار بنیواسکی نسبت به دیگر معیارها پیش‌بینی بهتری به‌دست داده است.

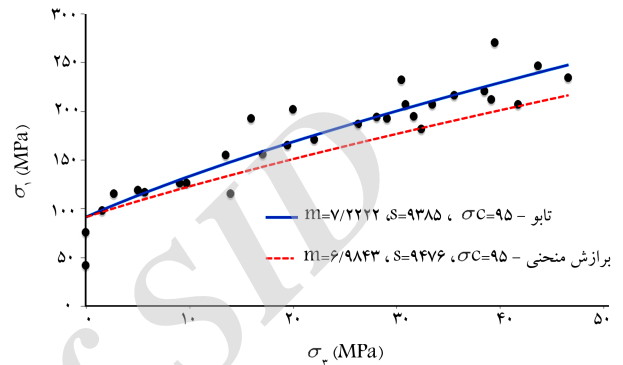
در مجموع مشاهده می‌شود که معیار بنیواسکی از نظر درستی و به‌دست دادن پوش گسیختگی از دو معیار فرانکلین و هوک و براون، نتایج بهتری حاصل شده است که عمده‌ی دلیل آن شکل معادله‌ی اصلی، سه پارامتری بودن آن و داشتن پارامتر توانی در این معیار شکست است. در این معیار، به‌دلیل پیچیدگی در حل آن به روش رگرسیون، ثابت a برابر ۱ قرار داده می‌شود، اما با توجه به نتایج به‌دست آمده در پژوهش حاضر، مشاهده می‌شود که ثابت a برای هر سنگ عددی منحصر‌به‌فرد است و برابر ۱ نیست.

۸. معیار گسیختگی فرانکلین اصلاح شده

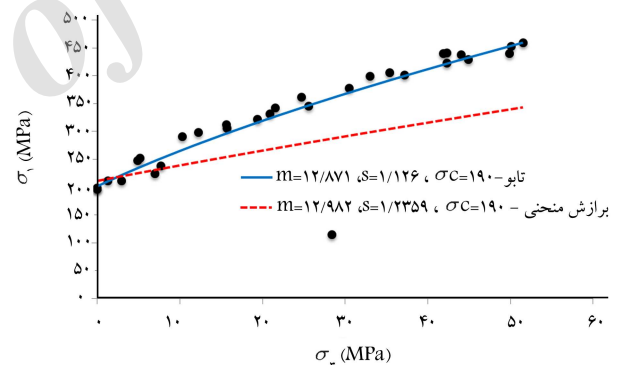
معیار فرانکلین، که براساس رابطه‌ی ۱ تعریف شده است، بخش مهمی از پژوهش حاضر است. رابطه‌ی ۱، تک پارامتری است و طی بررسی‌های انجام‌شده، اضافه شدن



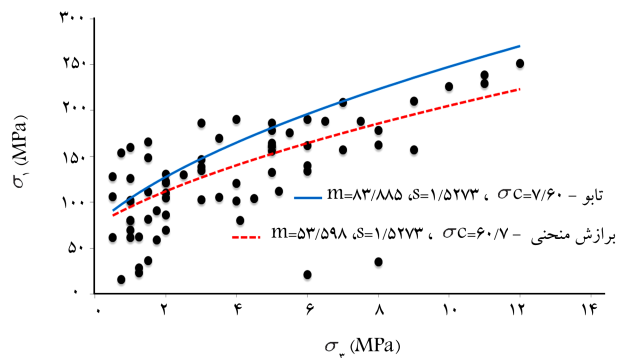
شکل ۸. مقایسه‌ی نتایج رگرسیون و تابو برای مدل فرانکلین (نمونه‌ی سنگ سوم).



شکل ۹. مقایسه‌ی نتایج رگرسیون و تابو برای مدل هوک و براون (نمونه‌ی سنگ اول).



شکل ۱۰. مقایسه‌ی نتایج رگرسیون و تابو برای مدل هوک و براون (نمونه‌ی سنگ دوم).



شکل ۱۱. مقایسه‌ی نتایج رگرسیون و تابو برای مدل هوک و براون (نمونه‌ی سنگ سوم).

$$\sigma_1 = \sigma_r + (\alpha \sigma_c)^{1-\beta} (\sigma_1 + \sigma_r)^\beta \quad (16)$$

با به دست آوردن پارامترهای مربوط به فرم جدید معیار فرانکلین، جواب‌های بسیار مناسب‌تری برای پوش گسیختگی به دست آمده است. برای حصول اطمینان از عملکرد این معادله‌ی جدید، نمونه‌ی سنگ اول و نمونه‌ی سنگ سوم مورد بررسی قرار گرفته است، که با توجه به خطای به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که از رابطه‌ی جدید به دست آمده از معیار فرانکلین، پوش گسیختگی بهتری با خطای کمتری حاصل می‌شود. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، می‌توان تفاوت این فرم جدید و فرم اصلی معیار فرانکلین را برای نمونه‌ی سنگ اول و سوم مشاهده کرد. در جدول ۵، نیز خطای به دست آمده در فرم جدید و فرم اصلی مورد مقایسه قرار گرفته است. پارامتر α در فرم جدید ارائه شده، ضریب تصحیح مقاومت فشاری در معیار فرانکلین نامگذاری شده است، که با محاسبات انجام شده، مقدار آن برای سنگ نمونه‌ی اول (limestone) $0.68/80^\circ$ و برای سنگ نمونه‌ی سوم (مطالعه‌ی موردی) برابر $0.85/80^\circ$ به دست آمده است.

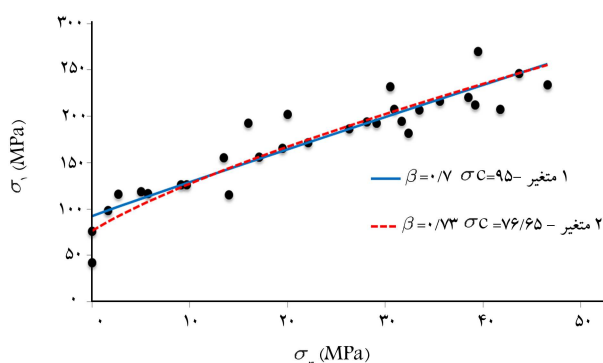
۹. نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، در مقایسه با برازش منحنی (رگرسیون) می‌تواند پوش گسیختگی را برای سنگ‌های متفاوت به طور قابل ملاحظه‌ی بهتری پیش‌بینی کند، که سبب شناخت رفتار توده‌سنگ مورد مطالعه و نیز کمک به تصمیم‌گیری بهتر مهندسان طراح در برخورد با این توده‌سنگ‌ها می‌شود. به دست آوردن دقیق پارامترهای هر معیار و به دست آوردن بهترین پوش گسیختگی هر معیار، پژوهشگران را در استخراج پارامترهای دیگر سنگ از قبیل تنش کششی، تنش فشاری محدود نشده، و پیش‌بینی مدول کشسانی سنگ یاری می‌کند.

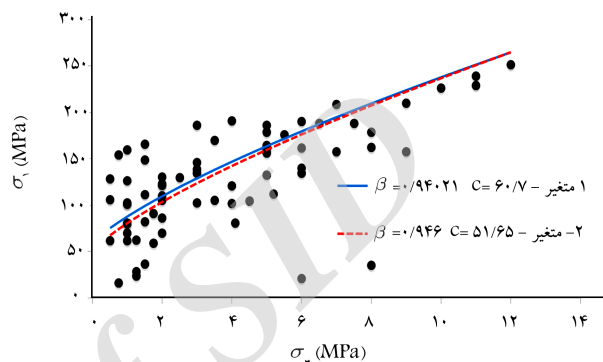
همچنین با در نظر گرفتن پارامتر جدید در معیار فرانکلین، نتایج حاصل بسیار قابل قبول‌تر است. با توجه به تعیین پوش گسیختگی در هر ۳ معیار مورد مطالعه در پژوهش حاضر مشاهده می‌شود که معیار بنیواسکی در پیش‌بینی پوش گسیختگی، خطای کمتری نسبت به دیگر معیارها داشته است و همچنین روش جستجوی تابو (TS) در به دست آوردن ثابت‌های هر معیار می‌تواند به عنوان ابزاری قدرتمند مورد استفاده قرار گیرد. همچنین می‌توان از روش بهینه‌سازی مذکور، به دلیل انعطاف‌پذیری مطلوب و سرعت بالای آن در حل مسائل مختلف مهندسی ژئوتکنیک بهره گرفت. قابل ذکر است تاکنون در مهندسی ژئوتکنیک از این روش استفاده نشده است.

پانویس‌ها

1. unconfined compressive strength
2. generalized regression neural networks



شکل ۱۲. نتایج بررسی معیار فرانکلین (نمونه‌ی اول).



شکل ۱۳. نتایج بررسی معیار فرانکلین (نمونه‌ی سوم).

جدول ۵. مقادیر MSE در معیارهای شکست.

معیار فرانکلین	نمونه‌ی (MSE)	
	سوم	اول
۱ متغیر	۲۰۲۴/۷۶	۳۹۵/۲۱
۲ متغیر	۱۹۸۷/۸۲	۳۷۸/۲۰

پارامتری دیگر در معادله‌ی مذکور، خطای مربوط به این معیار را کمتر می‌کند. با بررسی چند معیار دیگر، این نتیجه حاصل شده است که این پارامتر جدید باید عدد مربوط به σ_c را اصلاح کند. در نهایت با در نظر گرفتن چند حالت مختلف ریاضی برای معادله‌ی مذکور، معیار فرانکلین به شکل معادله‌ی ۱۶ بازنویسی شده است:

منابع (References)

1. Stephansson, O. and Zang, A. "ISRM suggested methods for rock stress estimation", *Rock Mech. Rock Eng*, **45**(6), pp. 955-969 (2012).
2. Haimson, B. and Bobet, A. "Introduction to suggested methods for failure criteria", *Rock Mech. Rock Eng*, **45**(6), pp. 973-974 (2012).

3. Khandan, K.H., Hussain, M.F., and Parsley, A. "Comparison of experimental failure criteria based on an analysis of each criterion fixed amount of uncertainty", *3rd Conference of Rock Mechanics, Amirkabir University of Technology*, Tehran (24-26 October 2008).
4. Ghasemzadeh, H. and Jahangir, M.H. "Comparison of experimental measurements Mvhrkvmb, Hoek and Brown and Bnyavsky in rock failure to investigate and present a new model using a nonlinear least-squares approximation", *4th National Congress on Civil Engineering*, Tehran University (May 2009).
5. Hakimi pour, R., Norozzade, A. and Bagheri, A.M.H. "Estimation of S Hoek-Brown criterion for anisotropic rocks using artificial neural networks", *5th National Congress on Civil Engineering*, Ferdowsi University of Mashhad (14-16 May 2011).
6. Colmenares, L.B. and Zoback, M.D. "A statistical evaluation of intact rock failure criteria constrained by polyaxial test data for five different rocks", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **39**(6), pp. 695-729 (2002).
7. Das, S.K. and Basudhar, P.K. "Comparison of intact rock failure criteria using various statistical methods", *Acta Geotechnica*, **4**(3), pp. 223-231 (2009).
8. Ceryan, N., Okkan, U. and Kesimal, A. "Application of generalized regression neural networks in predicting the unconfined compressive strength of carbonate rocks", *Rock Mech. Rock Eng*, **45**(6), pp. 1055-1072 (2012)
9. Ocak, I. and Seker, S.E. "Estimation of elastic modulus of intact rocks by artificial neural network", *Rock Mech. Rock Eng*, **45**(6), pp. 1047-1054 (2012).
10. Griffith, A.A. "The theory of rupture in: Biezeno CB, burgers JM (eds), *Proceedings of the 1st International Congress for Applied Mechanics*, Delft. J. Waltman Jr., Delft, pp. 55-63 (1924).
11. Franklin, J.A. and Hoek, E. "Development in triaxial testing technique", *Rock Mechanics*, **2**(4), pp. 223-228 (1970).
12. Hoek, E. and Brown, E.T. "Empirical strength criterion for rock masses", *Geotechnical Engineering Division*, **106**(9), pp. 1013-1035 (1980).
13. Bieniawski, Z.T. "Estimating the strength of rock materials", South Africa Institute of Mining and Metallurgy, pp. 312-320 (1974).
14. Hoek, E. and Brown, E.T. "Empirical strength criterion for rock masses", *Geotechnical Engineering Division*, **106**(9), pp. 1013-1035 (1980).
15. Baudard, B.D. and Cazacu, O. "Role of the plastic flow of the matrix on yielding and void evolution of porous solids: Comparison between the theoretical response of porous solids with Tresca and von Mises matrices", *Mechanics Research Communications*, **56**, pp. 69-75 (2014).
16. Drucker, D. and Prager, W. "Soil mechanics and plastic analysis or limit Design", *Quarterly of Appl. Math*, **10**(2), pp. 157-165 (1952).
17. Hoek, E. and Brown, E.T., *Underground Excavation in Rock*, Institute of Mining and Metallurgy, London (1980).
18. Mirzaai, M., "Water conveyance tunnel Sabzkoh-Choghakhor", Mahab Qods Consulting Engineers (2012).