

مقاله پژوهشی

تخمین مقاومت برشی درزه های طبیعی با الگوریتم بیان ژنی

مسعود شمس الدین سعید^۱، سعید کریمی نسب^{۲*}، حسین جلالی فر^۳

۱. دانشجوی دکتری معدن - مکانیک سنگ، دانشگاه شهید باهنر کرمان، masoud_shams90@yahoo.com
۲. دانشیار، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، kariminasab@uk.ac.ir
۳. استاد، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه شهید باهنر کرمان، jalalifar@uk.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۵ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۷

چکیده

بررسی رفتار برشی درزه ها بدلیل اثر مهم آن بر پایداری سازه های روباز مانند شیروانی های سنگی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا کارهای مهم و ارزشمندی توسط محققین متعددی صورت پذیرفته است. به منظور پیش بینی مقاومت برشی اوج درزه ها مدل های تجربی و نظری گوناگونی ارائه شده است. هدف نهایی این مدل ها، پیش بینی مقاومت برشی اوج درزه ها از طریق پارامترهای شناخته شده و بدون انجام آزمایش می باشد. بدلیل کمبود و سختی اخذ نمونه های طبیعی، تحقیقات پیشین اکثراً بر روی نمونه های مصنوعی از جنس سیمان یا گچ با شکل هندسی منظم (مربع / مستطیل) انجام شده است. تحقیق حاضر به بررسی رفتار برشی درزه های طبیعی بدون پرشدگی حاصل از حفاری مغزه گیری می پردازد. بدین منظور عملیات فتوگرامتری بردکوتاه بر روی ۵۲ نمونه درزه طبیعی انجام و خواص مورفولوژی سطح آن ها برداشت شد. آزمون برش مستقیم تحت شرایط بار نرمال ثابت انجام شد و مقاومت برشی اوج درزه ها بدست آمد. برای تعیین رابطه پیش بینی کننده و تخمین مقاومت برشی درزه ها از الگوریتم برنامه سازی بیان ژنی که توانایی برقراری رابطه ضمنی بین پارامترهای ورودی و متغیر خروجی را دارد، استفاده شد. جهت مدل سازی، از ۷۰ درصد داده ها برای آموزش و ۳۰ درصد مابقی برای آزمایش مدل ها به صورت تصادفی، استفاده شده است. در مجموع چهار مدل اجرا و رابطه ریاضی بین پارامترها جهت پیش بینی مقاومت برشی اوج ارایه شد. برای ارزیابی کارایی مدل ها، از معیارهای معتبر مانند R^2 ، MSE، MAE، RSME و RSE استفاده شد. نتایج نشان داد الگوریتم برنامه سازی بیان ژنی از دقت مناسبی برای تخمین متغیر خروجی برخوردار است. مطالعه و دستیابی به این تعداد از درزه های طبیعی با سه نوع سنگ می تواند یک اتفاق خاص باشد که به راحتی قابلیت تکرار آن نیست.

کلمات کلیدی

مقاومت برشی، الگوریتم برنامه سازی بیان ژنی، درزه طبیعی، آزمون برش مستقیم، فتوگرامتری بردکوتاه.

۱- علائم اختصاری	
x_{imeas}	مقدار اندازه گیری شده
x_{ipred}	مقدار پیش بینی شده
σ_c	مقاومت فشاری سنگ بکر
σ_e	تنش نرمال موثر
σ_n	تنش نرمال / عمودی
σ_t	مقاومت کششی سنگ بکر
ϕ_b	زاویه اصطکاک پایه
$\Delta s, \alpha_s$	سطح موثر در برش
Δ_s	فاصله نمونه برداری
τ_p	مقاومت برشی اوج
θ_{max}	زاویه دندانها در جهت برش
θ^*_{max}	حداکثر زاویه دندانها در جهت برش
۲- مقدمه	
<p>نایبوستگی‌های سنگ ذاتاً دارای سطح زبری هستند که از یک توزیع تصادفی برخوردار است. این سطوح رفتار برشی توده سنگ را کنترل می‌کنند. بنابراین پیش‌بینی مقاومت برشی درزه‌های سنگی با سطوح ناهموار برای تجزیه و تحلیل پایداری و طراحی سیستم‌های نگهداری در سازه‌های مهندسی سنگ بسیار مهم است. وجود نایبوستگی‌ها در توده‌سنگ اثر قابل توجهی بر مقاومت و تغییرشکل‌پذیری آن دارد. در نتیجه توصیف نایبوستگی‌های طبیعی گامی بسیار مهم در طراحی مهندسی شیب‌ها و شالوده‌های بتنی است [۱-۳]. برای فهم پایداری توده‌سنگ‌های درزه‌دار نیاز است داده‌های هندسی نایبوستگی شامل شیب، جهت شیب، فاصله‌داری و غیره برداشت شود، اما درک رفتار مکانیکی آن‌ها نیز ضروری است. در بسیاری از پروژه‌های مهندسی، رفتار مکانیکی درزه‌های طبیعی در آزمایشگاه مورد مطالعه قرار نمی‌گیرد و فقط یک ضریب اصطکاک پایه حاصل از آزمون برش مستقیم بر روی نمونه‌های اره‌بر^۱ برای استفاده از معیار موهر-کولمب ارائه می‌شود [۴، ۵].</p> <p>مقاومت برشی درزه‌ها شامل سه مولفه زاویه اصطکاک داخلی، اتساع و مقاومت دندانها در برابر برش است. مولفه زاویه اصطکاک داخلی که معرف مقاومت اصطکاکی است معمولاً ثابت فرض می‌شود و رفتار برشی درزه در شرایط متغیر تنش نرمال تابع مولفه‌های اتساع و برش دندانها است. در تنش‌های نرمال پایین،</p>	
a, b, d, k	ضرایب برازش
A_0	سطح در تماس نمونه در جهت برش
C	توزیع زاویه دندانها
c	چسبندگی
D_1, D_2	مقادیر اصلی سختی برشی
ET	درخت بیان (Expression tree)
h	متوسط ارتفاع دندانها
h_0	ارتفاع دندانها
h	دنباله (Head)
i_p	اتساع اوج
Δ_ϕ	زبری
i_0	اتساع اولیه
JMC	ضریب جفت شدگی (Joint Matching Coefficient)
JCS	مقاومت فشاری درزه (Joint Compressive Strength)
JRC	ضریب زبری درزه (Joint Roughness Coefficient)
K, k_2	ضرایب تجربی
MAE	میانگین قدرمطلق خطا
MSE	میانگین مربعات خطا
n	تعداد آرگومان‌ها
P_N	فشار متوسط زاویه‌ای
PSS	مقاومت برشی اوج (Peak Shear Strength)
R^2	ضریب تعیین
RMSE	مجدور میانگین مربعات خطا
RSE	مربع خطای نسبی
s_r	مقاومت برشی دندانها
SRP	پارامتر زبری پایا (Stationary Roughness Parameter)
t	ورودی (Terminal)
W_t^p	انرژی تجمعی در حین برش
\bar{x}	مقدار میانگین پیش بینی شده

¹ Saw cut

تخمین مقاومت برشی درزه با در نظر گرفتن اتساع و برش ارائه شده است (جدول ۱). هدف نهایی از ارایه این مدلها، تخمین مقاومت برشی از طریق پارامترهای شناخته شده بدون انجام آزمایش، بجای استفاده از نتایج تجربی برای برآورد ضرایب ناشناخته است [۷].

مولفه اتساع حاکم بر رفتار برشی درزه است زیرا که دندانه‌ها با آسیب ناچیز بر روی هم می‌لغزند. با افزایش تنش نرمال، تخریب دندانه‌ها بیشتر و اثر اتساع بر مقاومت برشی درزه کمتر می‌شود [۶]. بسیاری از مدل‌های تجربی و تئوری صریح یا ضمنی، برای

جدول ۱: مدل‌های تخمین مقاومت برشی درزه‌ها.

مرجع	مدل مقاومت برشی	اتساع	معادله
[۱]	$\tau_\rho = \sigma_n \tan(\phi_b + i_0)$ and $\tau_\rho = \sigma_n \tan \phi_b + c$	$i_\rho = i_0$ and $i_\rho = 0$	(۱)
[۲]	$\tau_\rho = \frac{\sigma_n(1 - a_s)(i + \tan \phi_b) + a_s(\sigma_n \tan \phi_0 + c)}{1 - (1 - a_s)i \cdot \tan \phi_f}$	$\tan i_\rho = (1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_t})^{k_2} \cdot \tan i_0$	(۲)
[۸]	$\tau = a(1 - e^{-b\sigma_n}) + \sigma_n \tan \phi_b$	-	(۳)
[۳]	$\tau_\rho = \sigma_n \tan \left[\phi_b + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right]$	$i_\rho = \frac{1}{2} JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)$	(۴)
[۹]	$\tau_\rho = \sigma_n \tan \left[\phi_b + \tan^{-1} \frac{h_0 e^{-k \sigma_n}}{\Delta s} \right]$	$i_\rho = \tan^{-1} \left[\frac{h_0 e^{-k \sigma_n}}{\Delta s} \right]$	(۵)
[۱۰]	$\tau_\rho = \sigma_n \tan \left[\phi_b + i_0 e^{-DW_t^P} \right]$	$i_\rho = i_0 e^{-DW_t^P}$	(۶)
[۱۱]	$\tau_\rho = \sigma_n \tan(\phi_b + i_\rho)(1 - a_s) + a_s s_r$	$\tan i_\rho = (1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_t})^{k_2} \cdot \tan i_0$	(۷)
[۱۲]	$\tau_\rho = \sigma_n \tan \left[\phi_b + i_0 \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_c} \right) k_2 \right]$	$i_\rho = i_0 e^{-DW_t^P}$	(۸)
[۱۳]	$\tau_\rho = \sigma_n \tan \left[\phi_b + \Delta \phi \left(1 + \frac{\sigma_n}{P_N} \right) \right]$	$i_\rho = \frac{6\Delta\phi(\log_{10} P_N / \sigma_n)^2}{\Delta\phi/2 + 8.4 \log_{10}(10P_N / \sigma_n)}$	(۹)
[۴]	$\tau_\rho = \sigma_n \tan \left[\phi_b + a(SRP)^b \left[\log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right]^d + I \right]$	-	(۱۰)
[۵]	$\tau_\rho = \sigma_n \left[\phi_b + JRC * JMC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right]$	-	(۱۱)
[۱۴]	$\tau_\rho = \sigma_n \tan[\phi_b + 2\theta_s^0 e^{-b\sigma_n}]$	$i_\rho = i_0 e^{-a\sigma_n}$	(۱۲)
[۱۵]	$\tau_\rho = \sigma_n \tan \left[\phi_b + i_0 e^{-D_1 W_t^P} \right] + \alpha_0 e^{-D_2 W_t^P}$	$i_\rho = i_0 e^{-D_1 W_t^P} + \alpha_0 e^{-D_2 W_t^P}$	(۱۳)
[۱۶]	$\tau_\rho = \sigma_n \tan \left[\phi_b + \left(\frac{\theta_{max}^*}{c} \right)^{1.18 \cos a} \left(1 + e^{-\frac{\theta_{max}^* \sigma_n}{9A0C \sigma_t}} \right) \right]$	-	(۱۴)
[۱۷]	$\tau_\rho = \sigma_n \tan \left[\phi_b + \left(\frac{\theta_{max}^*}{c+1} \right)^{1.18 \cos a} \left(1 + e^{-\frac{\theta_{max}^* \sigma_n}{9A0(C+1) \sigma_t}} \right) \right]$	-	(۱۵)
[۱۸]	$\tau_\rho = \sigma_n \tan(\phi_b + i_\rho)(1 - a_s) + a_s(\sigma_n \tan \phi_0 + c)$	$i_\rho = \left(\frac{\theta_{max}^*}{(c+1)} \right)^S \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_c} \right)^{k_2}$	(۱۶)
[۱۹]	$\tau_\rho = \sigma_n \tan \left[\phi_b + a \frac{\sigma_t / \sigma_n}{1 + (\sigma_t / \sigma_n)} \right]$	$i_\rho = a \frac{\sigma_t / \sigma_n}{1 + (\sigma_t / \sigma_n)}$	(۱۷)
[۲۰]	$\tau_\rho = \sigma_n \tan \left[\phi_b + \frac{4A_0 \theta_{max}^*}{c+1} \left(1 + e^{-\frac{\theta_{max}^* \sigma_n}{9A0(c+1) \sigma_t}} \right) \right]$	$i_\rho = \frac{4A_0 \theta_{max}^*}{(c+1)} \left(1 + e^{-\frac{\theta_{max}^* \sigma_n}{9A0(c+1) \sigma_t}} \right)$	(۱۸)
[۲۱]	$\tau_\rho = \sigma_n \tan \left[\phi_b + 0.017(JRC)^{0.89} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)^{0.42} \right]$	-	(۱۹)
[۲۲]	$\tau_\rho = \sigma_n \tan \left[\phi_b + \frac{1}{1 + 8A_0 \theta_{max}^* / (1+c) \cdot R} \cdot \frac{4A_0 \theta_{max}^*}{1+c} \left[1 + e^{-\frac{\theta_{max}^* \sigma_n}{4A0(c+1) \sigma_t}} \right] \right]$	-	(۲۰)
[۲۳]	$\tau_\rho = \sigma_n \tan \left\{ \phi_b + \frac{\theta_{max}^*}{C^{0.45}} e^{-\frac{\sigma_n}{JCS}} C^{0.75} \right\}$	-	(۲۱)

معادله	اتساع	مدل مقاومت برشی	مرجع
(۲۲)	-	$\tau_{cat} = \sigma_n \tan \left[\phi_b + \theta_A \exp \left[-(\theta_{max})^{0.89} \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_c} \right) \right] + (\theta_{max})^{1.07} \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_c} \right)^{0.42} \ln \left[(\theta_{max})^{1.07} \right] - 1.33 \right]$	[۲۴]
(۲۳)	-	$\tau_\rho = \sigma_n \tan \left[\phi_b + \left(\frac{\theta^*}{n} \right)^{1.05} \cdot h^{0.4} \log_{10} \left(\frac{2.1JCS}{\sigma_n} \right) \right]$	[۲۵]
(۲۴)	$i_\rho = \frac{160\dot{C}^{-0.44}}{\sigma_n/\sigma_t + 2}$	$\tau_\rho = \sigma_n \tan \left[\phi_b + \frac{160\dot{C}^{-0.44}}{\sigma_n/\sigma_t + 2} \right]$	[۲۶]
(۲۵)	$\tan i_\rho = \left[1 - \sin \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_T^n} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \right] \tan i_0$ $\tan i_0 = \tan \left[\frac{2A_0 \theta_{max}^*}{c + 1} \right]$	$\tau_\rho = \sigma_n \tan (\phi_b + i_\rho) (1 - a_s)^{\cos \alpha} + a_s \sigma_T^s$ $a_s = \sin \left[\frac{\sigma_n}{\sigma_T^n} \cdot \frac{\pi}{2} \right]$ $\sigma_T^s = \sigma_T^n \tan(\phi_b)$	[۷]
(۲۶)	-	$\tau_\rho = \sigma_n \tan \phi_b = \sigma_n \tan \left[FRC \cdot \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right]$	[۲۷]

خلاصه تحقیقات بالا نشان می دهد که بررسی رفتار برشی درزه‌ها بدلیل اثر مهم آن بر پایداری سازه‌های روباز مانند شیروانی‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا تحقیقات مهم و ارزشمندی توسط محققین زیادی انجام شده است. اکثر تحقیقات انجام شده بر روی نمونه درزه‌های تولید شده در آزمایشگاه و با در نظر گرفتن ضریب انطباق درزه (JMC) برابر با یک انجام شده است. محدوده پارامتر JMC از صفر تا یک است و بیانگر میزان جفت شدگی سطح درزه است. زمانیکه سطوح درزه در تماس کامل باهم یا کاملاً جفت شده باشند، مقدار JMC برابر

با یک و مقدار صفر برای حالت حداکثر جفت‌نشده‌گی است. از آنجایی که مطالعات پایداری شیب یا سازه‌های زیرزمینی با انجام حفاری‌های مغزه‌گیری انجام می‌شود و آزمون برش مستقیم بایستی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای (مغزه) انجام شود، هنگامی که نمونه‌ها بصورت مغزه‌های استوانه‌ای باشند سطح برش در این نوع نمونه‌ها بصورت دایره و یا بیضی است. داده‌های مطالعات پیشین که توسط محققین مختلف بر روی نمونه‌های مصنوعی (تهیه شده از گچ/سیمان) و تولیدی (شکستن نمونه مکعبی) انجام شده‌اند در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- نتایج و دامنه تغییرات پارامترهای استفاده شده در مطالعات پیشین و تحقیق حاضر.

محقق	تعداد نمونه‌ها	θ_{max} (°)	A_0	C	ϕ_b (°)	σ_t (MPa)	σ_c (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
[۱۶]	۳۰	۳۹-۸۹	۰٫۴۳-۰٫۵۷	۴٫۴-۱۳٫۳	۳۴-۳۹	۰٫۶-۹٫۲	۱۰-۱۷۳	۰٫۹-۴٫۱	۱٫۲-۶٫۴
[۲۵]	۲۰	۷۹-۸۴	۰٫۴۴-۰٫۶۱	۷٫۶-۱۱٫۲	۲۸-۳۴	۲٫۶-۸٫۸	۶۵-۱۶۱	۰٫۳-۸	۰٫۷-۱۲٫۷
[۲۰]	۱۵	۵۹-۷۰	۰٫۵-۰٫۷	۷٫۵-۱۰٫۵	۳۵	۱٫۵	۲۷٫۵	۰٫۵-۳	۰٫۸-۴٫۲
[۱۷]	۱۸	۴۱-۷۰	۰٫۴۷۵	۳٫۲-۵٫۸	۳۲	۱٫۴	۱۹٫۵	۰٫۱-۰٫۹	۰٫۴-۱٫۶
[۲۴]	۱۵	۴۴-۷۹	۰٫۵-۰٫۷	۷٫۵-۱۰٫۵	۲۵-۳۵	۰٫۷-۱٫۵	۴٫۷-۲۷٫۵	۰٫۲-۳	۰٫۱۵-۴٫۲
تحقیق حاضر	۵۲	۴۵-۸۷	۰٫۴۱-۰٫۶۶	۳-۱۴	۲۳-۲۸	۳٫۹-۷٫۶	۲۳٫۳-۳۹٫۸	۱٫۱-۷٫۳	۱-۶

۳- روش انجام کار

۳-۱- آماده سازی نمونه‌ها

تعداد ۵۲ نمونه درزه طبیعی از معدن گل گهر سیرجان شامل سه لیتولوژی تحت آزمون برش مستقیم در شرایط بار نرمال ثابت (CNL) قرار گرفتند. نمونه‌ها بصورت مغزه و در حین حفاری ژئوتکنیکی از اعماق مختلف می باشند. بزرگترین

تحقیق حاضر به بررسی رفتار برشی درزه‌های طبیعی بدون پرشدگی حاصل از حفاری مغزه‌گیری می پردازد و با استفاده از الگوریتم برنامه سازی بیان ژنی^۱ (GEP) مدلی برای پیش بینی مقاومت برشی درزه‌های طبیعی ارائه می‌کند. اگر سطح ناپیوستگی و محور حفاری عمود برهم باشند، سطح برش به صورت دایره و اگر زاویه‌دار باشد بصورت بیضی خواهد بود (شکل ۱).

² Constant Normal Load

¹ Gene Expression Programming

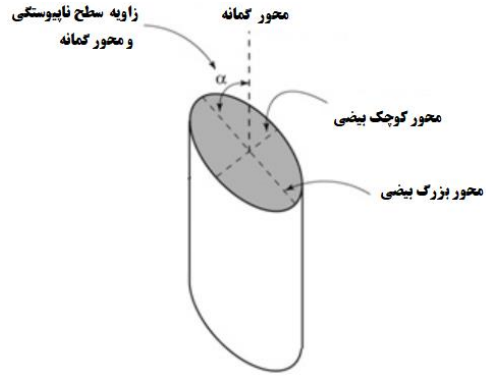
شیب ناپیوستگی ها به ترتیب ۱۲۸ و ۴۵ میلیمتر است.

مشخصات نمونه ها در جدول ۳ ارائه شده است. برای هر نمونه از منظر سنگ شناسی مقادیر میانگین خواص ژئومکانیکی در نظر گرفته شده است. مقاومت فشاری نمونه ها با استفاده از چکش اشमित و زاویه اصطکاک پایه با انجام آزمون برش مستقیم بر روی نمونه های اره بر بدست آمده است.

هیستوگرام نتایج مقاومت برشی اوج و نسبت (σ_n/σ_c) مطالعات پیشین و تحقیق حاضر طی اشکال ۲ و ۳ همراه با میانگین و انحراف استاندارد داده های هر تحقیق به تفکیک و بصورت یکجا نشان داده شده است.

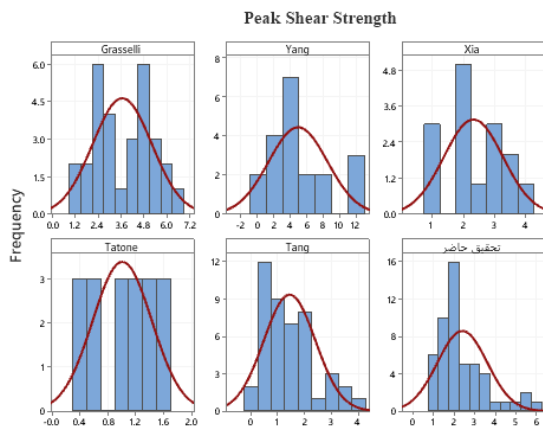
جدول ۳: خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه درزه های طبیعی.

لیتولوژی	قطر مغزه (میلی متر)	ϕ_b (°)	σ_n (MPa)	τ_{max} (MPa)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)
گنایس	۴۷-۶۳	۲۲٫۷	۱٫۱-۴٫۷	۱-۴٫۳	۳۰	۴٫۲
شیست	۴۵-۶۳	۲۸	۱٫۸-۵٫۹	۱-۳٫۷	۲۴	۴
کوارتزیت	۴۵-۶۳	۲۵	۲٫۴-۷٫۳	۲-۶٫۶	۴۰	۸

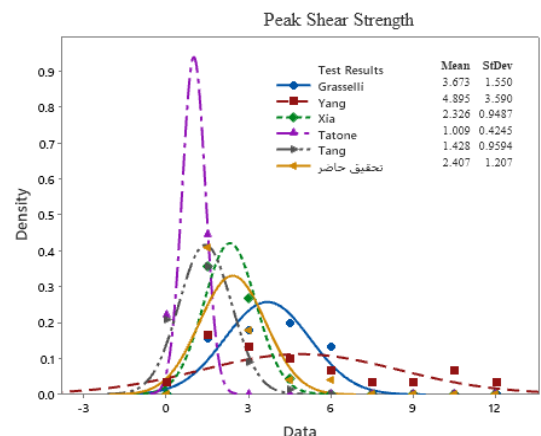


شکل ۱: تشکیل سطح بیضی شکل درزه طبیعی بر روی مغزه.

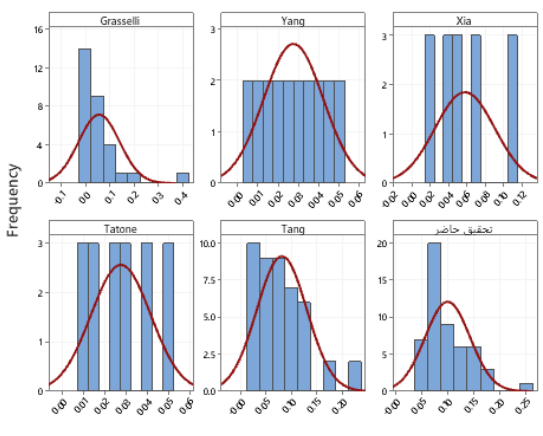
و کوچکترین قطر سطح درزه در مغزه های حفاری با توجه به



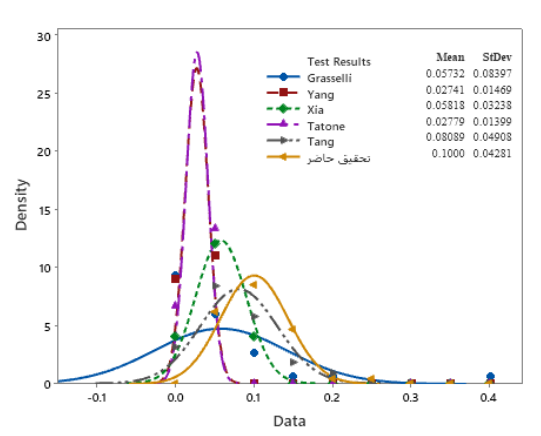
Grasselli	Mean 3.673	StDev 1.550
Yang	Mean 4.895	StDev 3.590
Xia	Mean 2.326	StDev 0.9487
Tatone	Mean 1.009	StDev 0.4245
Tang	Mean 1.428	StDev 0.9594
تحقیق حاضر	Mean 2.407	StDev 1.207



شکل ۲: هیستوگرام نتایج مقاومت برشی اوج مربوط به کارهای پیشین و تحقیق حاضر (راست: کلی، چپ: به تفکیک).



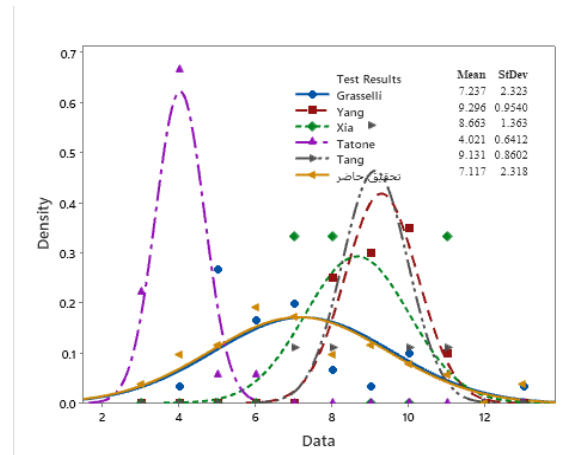
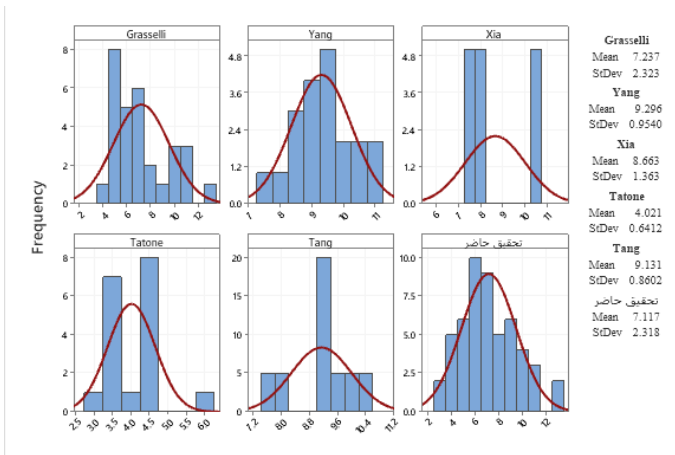
Grasselli	Mean 0.05732	StDev 0.08397
Yang	Mean 0.02741	StDev 0.01469
Xia	Mean 0.05818	StDev 0.03238
Tatone	Mean 0.02779	StDev 0.01399
Tang	Mean 0.08089	StDev 0.04908
تحقیق حاضر	Mean 0.1000	StDev 0.04281



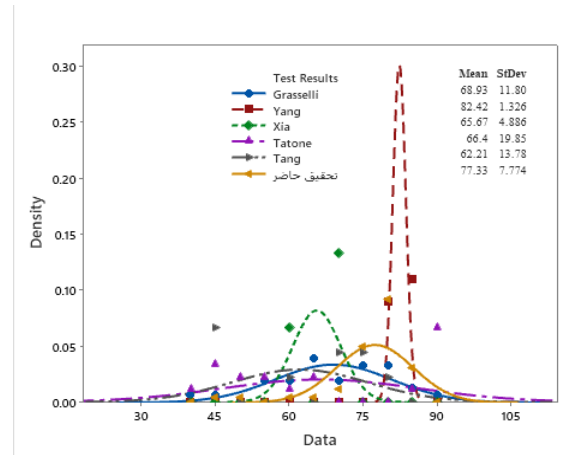
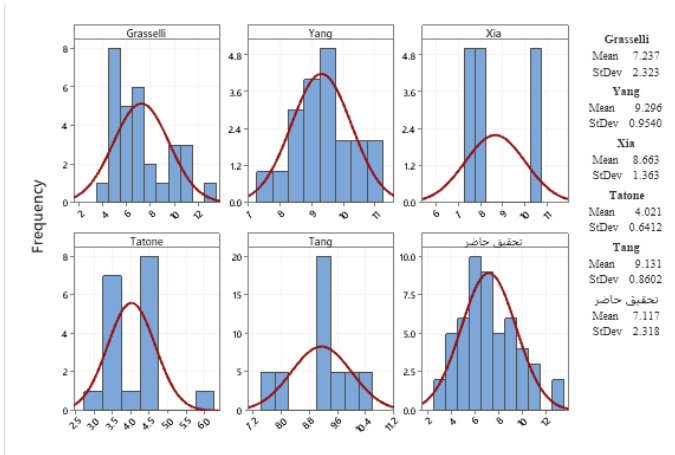
شکل ۳: هیستوگرام نسبت تنش نرمال به مقاومت فشاری مربوط به کارهای پیشین و تحقیق حاضر (راست: کلی، چپ: به تفکیک).

درزه‌ها نسبت تنش نرمال به مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌باشد که هیستوگرام آن برای تمامی داده‌های فوق‌الذکر در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق با هیستوگرام شکل ۳ کمترین و بیشترین انحراف استاندارد به ترتیب مربوطه به تحقیق تاتن ۲۰۰۹ و گراسلی ۲۰۰۱ می‌باشد. این مقدار برای تحقیق حاضر کمتر از تحقیقات تانگ و گراسلی و بیشتر از سایر محققین است. در ادامه هیستوگرام مربوط به پارامترهای مورفولوژی سطح درزه‌ها (C , θ_{max}) برای مطالعات پیشین و تحقیق حاضر نیز طی اشکال ۴ و ۵ ارائه شده است.

مطابق شکل ۲ کمترین و بیشترین میزان انحراف استاندارد نتایج مقاومت برشی اوج به ترتیب مربوط به تحقیق تاتن ۲۰۰۹ و یانگ ۲۰۱۶ می‌باشد. دلیل این امر استفاده تاتن از نمونه‌های با خواص مقاومتی یکسان و استفاده یانگ از نمونه‌های با خواص مقاومتی متفاوت در تحقیق‌شان می‌باشد. انحراف استاندارد نتایج تحقیق حاضر نیز بدلیل استفاده از نمونه‌های طبیعی با خواص مقاومتی و تنش‌های نرمال متفاوت، کمتر از مطالعات گراسلی و یانگ و بیشتر از سایر محققین است. از پارامترهای مهم و اثرگذار دیگر بر مقاومت برشی اوج



شکل ۴: هیستوگرام پارامتر مورفولوژی سطح (C) برای کارهای پیشین و تحقیق حاضر (راست: کلی، چپ: به تفکیک).



شکل ۵: هیستوگرام پارامتر مورفولوژی سطح (θ_{max}) برای کارهای پیشین و تحقیق حاضر (راست: کلی، چپ: به تفکیک).

۳-۲- فتوگرامتری برد کوتاه

بررسی سه بعدی تغییرات زبری نمونه‌ها نیاز به تهیه وضعیت زبری سطح ناپیوستگی قبل و بعد از برش دارد، بدین منظور از روش فتوگرامتری برد کوتاه (CRP)^۱ استفاده می‌شود. فتوگرامتری برد کوتاه شاخه‌ای از علم فتوگرامتری است که با استفاده از تحلیل تصاویر اخذ شده از فاصله

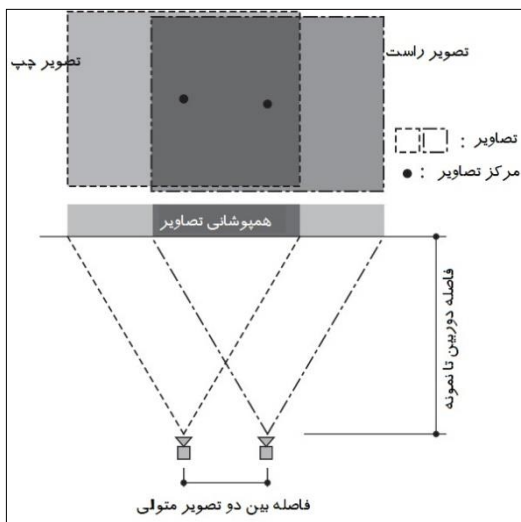
مطابق هیستوگرام‌های اشکال ۴ و ۵ ملاحظه می‌شود که توزیع پارامترهای مورفولوژیکی سطح بدست آمده در این تحقیق در دامنه تغییرات مطالعات پیشین قرار دارد. دامنه گسترده‌تر پارامتر مورفولوژیکی سطح (C) برای این تحقیق، بدلیل استفاده از درزه‌های طبیعی متفاوت با لیتولوژی متنوع می‌باشد. با استفاده از توضیحات بالا می‌توان نتیجه گرفت بازه تغییرات پارامترهای بدست آمده در این تحقیق در دامنه معقول و مورد اطمینان قرار دارند.

¹ Close Range Photogrammetry

توسعه‌ی برنامه‌های کامپیوتری و مدلسازی ریاضیاتی براساس محاسبات تکاملی و با الهام از تکامل طبیعی است. این روش توسط فریرا^۲ در سال ۱۹۹۹ ابداع و به طور رسمی در سال ۲۰۰۱ معرفی شد [۲۹].

۴-۱- ساختار الگوریتم GEP در تابع یابی

وجود ارتباط منطقی میان چند متغیر ممکن است به صورت یک تابع باشد. در این تابع ممکن است عملگرهای جبری^۳ (+, -, *, /)، عملگرهای منطق بولی^۴ (مانند AND, OR, IF) و یا انواع توابع جبری مانند مثلثاتی، نمایی، درجه‌ی دو و سه و مانند آن‌ها ایفای نقش کنند. البته امکان حضور این عملگرها و توابع باید با مدل مورد نظر هماهنگ باشد. برای کشف مدل توصیف کننده‌ی ارتباط متغیرهای a و b با استفاده از الگوریتم GEP، در ابتدا بایستی یک جمعیت از کروموزوم‌های خطی^۵ تشکیل شود که می‌توانند تک ژنی یا چند ژنی طراحی شوند (شکل ۹).



شکل ۹: نمایی شماتیک از چیدمان عملیات فتوگرامتری.

جدول ۴: مشخصات دوربین مورد استفاده فتوگرامتری.

مقدار	مشخصات
Canon EOS 1300D	مدل دوربین
f/5.6	F-Stop
1/125 sec.	Shutter Speed
ISO 800	ISO Speed
35 mm	Focal Length

نزدیک، به اندازه‌گیری، برداشت و مدلسازی اجسام و محوطه‌ها می‌پردازد. در سالهای اخیر استفاده از فتوگرامتری برد کوتاه در زمینه‌های مهندسی معدن و عمران جهت بررسی و شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی و انتشار ترک و مقاصد مهندسی رو به افزایش است. پیشرفت تجهیزات عکس‌برداری، استفاده از این روش برای به دست آوردن دقیق داده‌های ژئومورفولوژی از تصاویر سه بعدی فتوگرامتری برد کوتاه را بیشتر کرده است. دقت این روش به عواملی مانند وضوح تصاویر، فاصله دوربین از نمونه و زاویه قرارگیری دوربین نسبت به نمونه بستگی دارد. از مهمترین مزایای روش فتوگرامتری برد کوتاه می‌توان به ساده بودن، سرعت و دقت مناسب و نیز مقرون به صرفه بودن آن اشاره کرد. زمان برد کردن پردازش تصاویر جهت اخذ داده‌های هندسی از مهمترین معایب این روش می‌باشد [۲۸].

در این تحقیق نمونه‌ها در یک قالب قرار گرفته و با دوربین Canon EOS 1300D مجهز به لنز ۳۵ میلی‌متری که در فاصله یک متری از آن می‌باشد عملیات فتوگرامتری برد کوتاه انجام شد (شکل ۶). مشخصات دوربین مورد استفاده در جدول ۴ آورده شده است. نحوه اخذ تصاویر و چیدمان دوربین و نمونه مطابق با کار [۲۸] انجام شده است. روند پردازش داده‌ها و ساخت فایل داده‌های شبکه بندی در شکل ۷ نشان داده شده است. میزان تراکم ابر نقاط بدست آمده از عملیات فتوگرامتری برد کوتاه در حد بالا و برابر با ۸۵ میکرون بدست آمد. در نهایت برای استخراج ویژگی‌های زبری سطح درزه، مدل مش سه بعدی سطح درزه با فاصله برداری ۰.۵ mm و با استفاده از نرم افزار Agisoft ساخته شد.

۳-۳- آزمون برش

در مجموع ۵۲ آزمون برش مستقیم با تنش های نرمال متفاوت از یک تا هفت مگاپاسکال و تحت شرایط CNL انجام شد. بدین منظور از دستگاه برش خودکار استفاده شد. ابعاد جعبه دستگاه برش ۱۴۰×۱۴۰×۱۰۰ میلی‌متر، بار سلول عمودی و برشی هر کدام ۵۰ کیلو نیوتن، بازه اندازه‌گیری LVDT^۱ ها ±۵۰ میلی‌متر با دقت ۰.۰۰۱ میلی‌متر، و نرخ برش ۰.۲ میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد (شکل ۸).

۴- برنامه سازی بیان ژن

الگوریتم برنامه سازی بیان ژنی (GEP) روشی برای

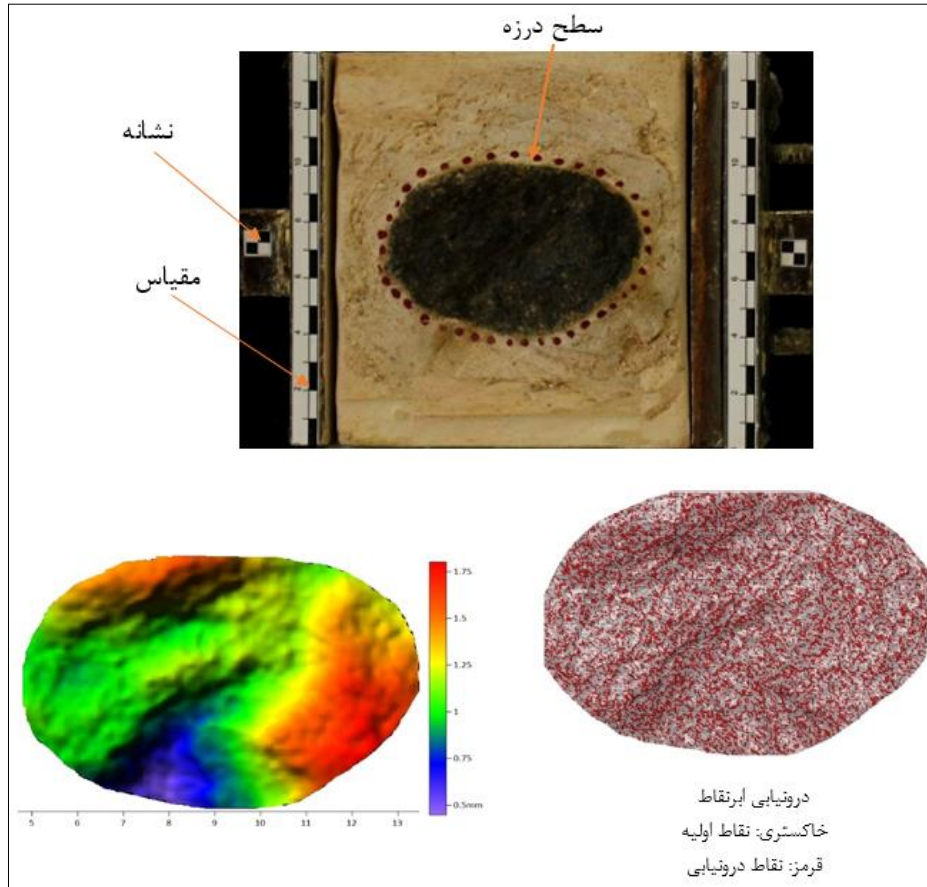
^۱ Linear Variable Differential Transformer

^۲ Ferreira

^۳ Algebra operators

^۴ Boolean logic operators

^۵ Linear Chromosomes



شکل ۷: عملیات فتوگرامتری برد کوتاه و اخذ داده های ابرنقاط از سطوح درزه ها.

در هر موقعیت از ژن های این کروموزوم ها ممکن است یکی از متغیرها یا یکی از توابع یا عملگرهایی که در نظر گرفته شده است، قرار گیرد. فرض کنید که عملگرهای (*، +، -، /) به عنوان محتمل ترین سازندگان ارتباط میان متغیرها در نظر گرفته شده است. برای انتخاب طول ژن و نحوه ی قرارگیری این متغیرها قواعدی توسط ابداع کننده وضع شده است:

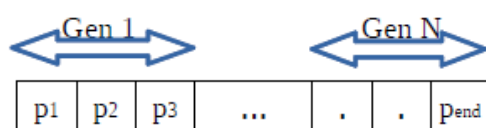
- هر ژن یک بخش سر و یک بخش دنباله دارد که در بخش دنباله امکان قرارگیری توابع نیست؛
- طول بخش سر (h) را کاربر مشخص می کند و طول بخش دنباله (t) براساس حداکثر تعداد آرگومان های توابع مورد استفاده (n) و نیز طول سر محاسبه می شود:

$$t = h(n-1) + 1 \quad (30)$$

تعداد آرگومان های تابع به معنی تعداد متغیرهایی است که تابع برای کار خود نیاز دارد. برای نمونه، تابع $\sin(x)$ یک آرگومان و تابع $IF(x,y,z)$ سه آرگومان دارد. حال اگر توابع در نظر گرفته شده در یک الگوریتم شامل این دو تابع باشد، مقدار n برابر با بیشترین آرگومان ممکن یعنی سه خواهد بود.



شکل ۸: دستگاه آزمون برش مستقیم.



شکل ۹: نمونه ای از یک کروموزوم نمادین با تعداد N ژن به طول ۳.

۴-۲- مراحل طراحی و اجرای الگوریتم GEP در تابع یابی

بعد از اجرای ساختار الگوریتم GEP، پنج گام اصلی طراحی آن به شرح زیر انجام شده است:

- ۱- تعریف تابع برازندگی؛
- ۲- تعریف ورودی‌ها و توابع؛
- ۳- تعیین ساختار کروموزوم‌ها (تعداد در نسل، طول ژن‌ها و تعداد آن‌ها)؛
- ۴- تعیین تابع اتصال ژن‌ها؛
- ۵- تعیین مشخصات عملگرها و در نهایت اجرای الگوریتم.

الگوریتم اجرایی GEP بر اساس نظر فریرا در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

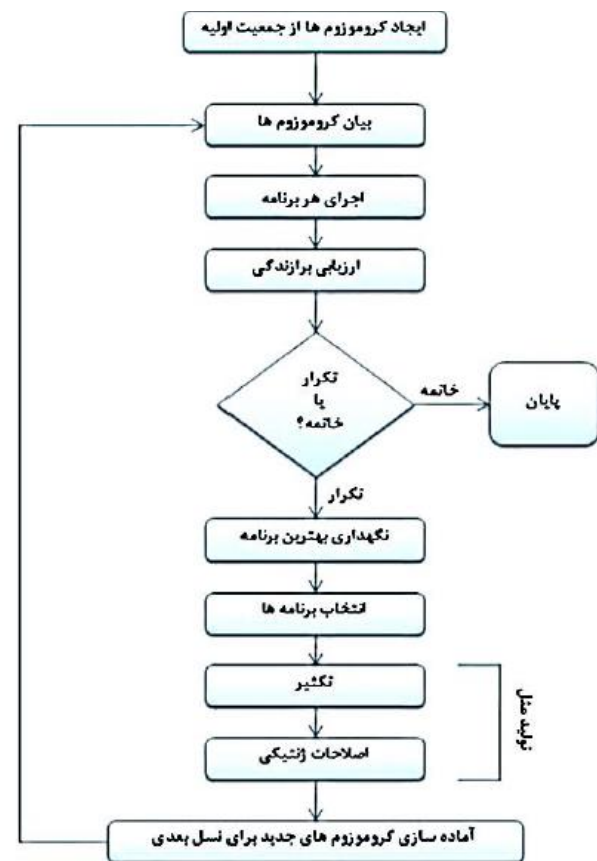
معیار	رابطه
ضریب تعیین	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{imeas} - x_{ipred})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{imeas} - \bar{x})^2}$
میانگین مربعات خطا	$MSE = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n [(x_{imeas} - x_{ipred})^2]$
مجذور میانگین مربعات خطا	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n [(x_{imeas} - x_{ipred})^2]}$
میانگین قدر مطلق خطا	$MAE = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_{imeas} - x_{ipred} $
مربع خطای نسبی	$RSE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ipred} - x_{imeas})^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_{meas} - x_{imeas})^2}$

که در این روابط x_{imeas} , x_{ipred} , \bar{x} , n به ترتیب برابر با تعداد متغیر اندازه‌گیری شده، مقدار متغیر اندازه‌گیری شده، مقدار میانگین متغیر پیش‌بینی شده و مقدار متغیر اندازه‌گیری شده می‌باشد.

۶- نتایج

۶-۱- تعیین رابطه پیش‌بینی

تعداد ژن‌ها و کروموزوم‌ها، به منظور اجرای مدل برنامه ریزی بیان ژن، بایستی تعیین گردند. با توجه به مطالعات فریرا، پاسخ بهینه با انتخاب دو یا سه ژن حاصل می‌گردد. همچنین، وی در مطالعاتش نشان داد که بهترین جمعیت، از ۳۰ تا ۵۰ کروموزوم تشکیل می‌شود. لذا در پژوهش حاضر، از سه ژن و پنجاه کروموزوم استفاده گردید. به منظور ارزیابی برازندگی کروموزوم‌ها، تابع برازندگی نیز RMSE تعیین شد. همچنین لیست توابع انتخاب شده مطابق جدول ۵ می‌باشد. از ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش و مابقی برای آزمایش مدل استفاده گردید. در مجموع چهار مدل GEP براساس حالت‌های مختلف ترکیب متغیرهای ورودی مطابق جدول ۶، اجرا و نتایج آنها به شرح جدول ۷ می‌باشد.



شکل ۱۰: الگوریتم پایه GEP [۲۹].

۵- آماده‌سازی و تحلیل داده‌ها

برای ایجاد ارتباط بین چند متغیر و نیز پیش‌بینی یک متغیر وابسته بر اساس یک یا چند متغیر مستقل، از روش‌های مختلفی می‌توان بهره‌گیری کرد، برخی از این روش‌ها شامل رگرسیون خطی، شبکه عصبی، سامانه‌های استنتاج فازی و سامانه‌های استنتاج عصبی فازی تطبیقی می‌باشد. در این پژوهش قابلیت روش برنامه‌سازی بیان ژن در پیش‌بینی ارائه

جدول ۶: مدل‌های GEP در حالت‌های مختلف.

مدل	متغیرهای ورودی به مدل			
اول	A_0	θ_{\max}/C	σ_n/σ_t	ϕ_b
دوم	A_0	$\theta_{\max}/1+C$	σ_n/σ_t	ϕ_b
سوم	A_0	θ_{\max}/C	σ_n/σ_c	ϕ_b
چهارم	A_0	$\theta_{\max}/1+C$	σ_n/σ_c	ϕ_b

جدول ۷: نتایج اجرای مدل‌های GEP در حالت‌های مختلف.

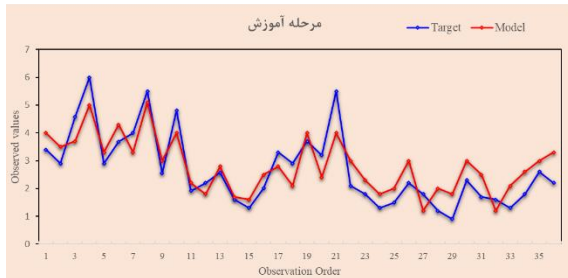
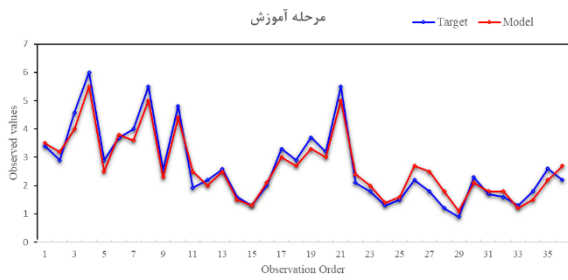
مدل	مرحله برازش	R^2	MSE	RSME	MAE	RSE	تابع برازش
اول	آموزش	۰٫۹۱۱	۰٫۲۰۷	۰٫۴۶۳	۰٫۳۵۵	۰٫۱	۶۸۲٫۲
	آزمایش	۰٫۸۳۳	۰٫۱۹۵	۰٫۴۴۴	۰٫۳۰۳	۰٫۱۶۳	۶۸۸٫۵
دوم	آموزش	۰٫۸۷۷	۰٫۱۹۵	۰٫۴۳۷	۰٫۲۸۴	۰٫۱۱۸	۶۹۷٫۷
	آزمایش	۰٫۷۹۵	۰٫۴۱۳	۰٫۶۷۷	۰٫۵۲۳	۰٫۲۴۷	۶۱۷٫۸
سوم	آموزش	۰٫۹۰۸	۰٫۱۷۱	۰٫۴۲۸	۰٫۲۹۹	۰٫۱۱۱	۷۱۷٫۳
	آزمایش	۰٫۵۴۶	۰٫۶۱۵	۰٫۷۳۵	۰٫۶۱۸	۰٫۶۸۸	۵۵۱٫۵
چهارم	آموزش	۰٫۸۳۸	۰٫۱۸۵	۰٫۴۴۱	۰٫۳۴۳	۰٫۱۵۷	۶۸۸٫۸
	آزمایش	۰٫۸۶۱	۰٫۷۱۱	۰٫۷۸۱	۰٫۵۷۲	۰٫۲۴۷	۵۶۷٫۵

مطابق نتایج بدست آمده، مدل‌های اول و چهارم دارای بیشترین دقت پیش‌بینی می‌باشند. شکل ۱۱ میزان تطبیق و سازگاری مربوط به مقادیر مشاهداتی (محور عمودی) و پیش‌بینی شده (محور افقی) متغیر هدف (τ) در مرحله آموزش و آزمایش توسط مدل GEP برای مدل‌های اول و چهارم را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۱۱، مشخص است که مدل‌های اول و چهارم در تخمین مقادیر هدف (τ) با دقت بالا عمل کرده است، به طوری که این مقادیر بسیار نزدیک به مقدار واقعی آنها تخمین زده شده است. بنابراین تنها نتایج مدل‌های اول و چهارم مناسب است و در ادامه تنها معادلات این دو مدل ارائه شده است.

یکی از توانایی‌های روش GEP در مقایسه با دیگر روش‌های هوشمند، توانایی برقراری رابطه ضمنی بین پارامترهای ورودی و متغیر خروجی مدل می‌باشد. در ادامه رابطه ریاضی بدست آمده از روش GEP به منظور پیش‌بینی متغیر خروجی (τ) برای مدل‌های اول و چهارم در جدول ۸ ارائه شده است.

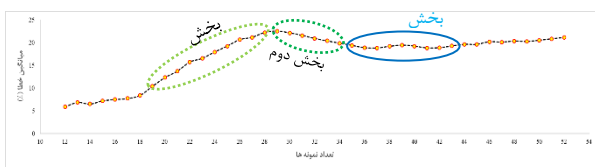
در ادامه به منظور میزان کفایت داده‌ها، تحلیل حساسیت میانگین خطای پیش‌بینی مدل به تعداد داده‌ها انجام شد (شکل ۱۲).



شکل ۱۱: مقادیر متغیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل GEP؛ بالا: حالت اول، پایین: حالت چهارم.

جدول ۸: روابط بدست آمده از اجرای مدل‌های GEP.

حالت	رابطه ریاضی
اول	$\tau = ET_1 + ET_2 + ET_3 = \left(\sqrt{\tan(\sigma_n / \sigma_t) + A_0} \right) / C + \left(\sqrt{\tan(\sigma_n / \sigma_t) \cdot \theta_{\max} / C} + (\sigma_n / \sigma_t) \cdot \sqrt{(\theta_{\max} / C) / A_0} \cdot \tan(\phi_b) \right)$
چهارم	$\tau = ET_1 + ET_2 + ET_3 = \ln(\tan(\sigma_n / \sigma_t)) + 6 - \frac{(A_0 \theta_{\max} / 1 + C) \times \sigma_n / \sigma_c}{5.7} + \frac{\cos\left(\tan\left(\frac{e^{\phi_b}}{6.5}\right)\right)}{1 + A_0}$



شکل ۱۲: تحلیل حساسیت میانگین خطای پیش‌بینی به تعداد داده‌ها.

1973. 7(4): p. 287-332.
4. Kulatilake, P., et al. *New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints*. in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1995. Elsevier.
 5. Zhao, J., *Joint surface matching and shear strength part A: joint matching coefficient (JMC)*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997. 34(2): p. 173-178.
 6. Barton, N. *Shear strength investigations for surface mining*. in *Proceedings of the 23rd US Rock Mechanics Symposium*. 1982.
 7. Li, Y., et al., *A new shear strength criterion of three-dimensional rock joints*. 2020. 53(3): p. 1477-1483.
 8. Jaeger, J.J.G., *Friction of rocks and stability of rock slopes*. 1971. 21(2): p. 97-134.
 9. Schneider, H.J.R.M., *The friction and deformation behaviour of rock joints*. 1976. 8(3): p. 169-184.
 10. Plesha, M.E.J.I.f.n. and a.m.i. geomechanics, *Constitutive models for rock discontinuities with dilatancy and surface degradation*. 1987. 11(4): p. 345-362.
 11. Saeb, S. and B. Amadei. *Modelling rock joints under shear and normal loading*. in *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*. 1992. Elsevier.
 12. Jing, L., E. Nordlund, and O. Stephansson. *An experimental study on the anisotropy and stress-dependency of the strength and deformability of rock joints*. in *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*. 1992. Elsevier.
 13. Maksimović, M. *The shear strength components of a rough rock joint*. in *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*. 1996. Elsevier.
 14. Homand, F., et al., *Friction and degradation of rock joint surfaces under shear loads*. 2001. 25(10): p. 973-999.
 15. Lee, H., et al., *Influence of asperity degradation on the mechanical behavior of rough rock joints under cyclic shear loading*. 2001. 38(7): p. 967-980.

مطابق نمودار، در بخش اول با افزایش تعداد نمونه‌ها، میانگین خطای پیش‌بینی افزایش می‌یابد. در بخش دوم این روند برعکس و در بخش سوم نمودار روند تغییرات خطای پیش‌بینی تقریباً ثابت و از یک حد آستانه به بعد، افزایش تعداد داده‌ها تغییرات کمی در کاهش یا افزایش خطا دارد. بنابراین مقدار داده بهینه برای ارائه مدل پیش‌بینی در این تحقیق، ۳۶ عدد نمونه بدست آمد.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با بهره‌گیری از روش فتوگرامتری برد کوتاه، داده‌های هندسی ۵۲ عدد ناپیوستگی حاصل از حفاری مغزه‌گیری بدست آمد. سپس آزمون برش مستقیم تحت شرایط بار نرمال ثابت (CNL) انجام و مقاومت برشی اوج درزه‌ها بدست آمد. به منظور پیش‌بینی و تعیین رابطه بین پارامترهای موثر بر مقاومت برشی اوج درزه‌ها، از الگوریتم برنامه‌سازی بیان ژنی (GEP) استفاده شد. در مجموع چهار مدل اجرا و روابط پیش‌بینی‌کننده آنها ارائه شد. جهت مدل‌سازی با روش برنامه‌سازی بیان ژنی، از ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد مابقی برای آزمایش مدل‌ها به صورت تصادفی، استفاده گردید. ترکیب متغیرهای ورودی برای اعمال به مدل براساس اهمیت و تاثیر آنها و مطابق با مدل‌های پیشین ارائه شده در نظر گرفته شد. به منظور ارزیابی کارایی مدل‌ها، از معیارهای معتبر مانند R^2 ، MSE، MAE، RSME و RSE استفاده شد. در پایان رابطه ریاضی مربوط به هر مدل ارائه شد. نتایج نشان داد الگوریتم برنامه‌سازی بیان ژنی با دقت قابل قبولی قادر به تخمین مقاومت برشی درزه های طبیعی است. شایان ذکر است تحقیق حاضر تنها بر روی نمونه درزه‌های طبیعی معدن گل‌گهر سیرجان انجام شده‌است و ارزیابی توانایی روش GEP در حل چنین مسائلی با استفاده از داده‌های دیگر پیشنهاد می‌شود.

منابع

1. Patton, F.D. *Multiple modes of shear failure in rock*. in *1st ISRM Congress*. 1966. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
2. Ladanyi, B. and G. Archambault. *Simulation of shear behavior of a jointed rock mass*. in *The 11th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. 1969. American Rock Mechanics Association.
3. Barton, N., *Review of a new shear-strength criterion for rock joints*. Engineering geology,

- shear strength criterion for rock joints*. 2016. 49(3): p. 821-835.
24. Kumar, R. and A.K. Verma, *Anisotropic shear behavior of rock joint replicas*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016. 90: p. 62-73.
 25. Liu, Q., et al., *Updates to JRC-JCS model for estimating the peak shear strength of rock joints based on quantified surface description*. Engineering geology, 2017. 228: p. 282-300.
 26. Tian, Y., et al., *Updates to grasselli's peak shear strength model*. 2018. 51(7): p. 2115-2133.
 27. Zhao, Y., et al., *Shear-related roughness classification and strength model of natural rock joint based on fuzzy comprehensive evaluation*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020: p. 104550.
 28. Kim, D.H., et al., *Improvement of photogrammetric JRC data distributions based on parabolic error models*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015. 80: p. 19-30.
 29. Ferreira, C., *Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems*. arXiv preprint cs/0102027, 2001.
 16. Grasselli, G. and P. Egger, *Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003. 40(1): p. 25-40.
 17. Tatone, B.S., *Quantitative characterization of natural rock discontinuity roughness in-situ and in the laboratory*. 2009: University of Toronto Toronto, Canada.
 18. Cottrell, B., B. Tatone, and G. Grasselli. *Joint replica shear testing and roughness degradation measurement*. in *Proceedings of Eurock*. 2010.
 19. Ghazvinian, A., et al., *Importance of tensile strength on the shear behavior of discontinuities*. 2012. 45(3): p. 349-359.
 20. Xia, C.-C., et al., *New peak shear strength criterion of rock joints based on quantified surface description*. 2014. 47(2): p. 387-400.
 21. Lee, Y.-K., et al., *Model for the shear behavior of rock joints under CNL and CNS conditions*. 2014. 70: p. 252-263.
 22. Tang, Z.C., L.N.Y.J.R.M. Wong, and R. Engineering, *New criterion for evaluating the peak shear strength of rock joints under different contact states*. 2016. 49(4): p. 1191-1199.
 23. Yang, J., et al., *Experimental study on peak*