

## مقایسه روش‌های موجود برای تعیین ظرفیت باربری نهایی پی‌های سنگی و اعتبارسنجی آنها بر اساس ظرفیت واقعی اندازه‌گیری شده

محمد رضائی<sup>۱\*</sup>، شیما لطیفی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان

۲- دانش آموخته کارشناسی، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان

(دریافت: آذر ۱۳۹۵، پذیرش: دی ۱۳۹۷)

### چکیده

با افزایش نیاز به طراحی و ساخت بناهای سطحی نظیر سدها، پل‌ها و دیگر سازه‌های سنگی و بتنی، تعیین ظرفیت باربری نهایی شالوده از اهمیت قابل توجهی برای مهندسين معدن، مکانیک سنگ و ژئوتکنیک برخوردار است. با توجه به اینکه که بستر اکثر سازه‌های سطحی را توده‌های سنگ تشکیل می‌دهد لذا طراحی موفق یک شالوده به تخمین دقیق ظرفیت باربری توده‌سنگ زیر آن وابسته است. بر همین اساس، تعیین ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ با استفاده از روش‌های برجا، تحلیلی، عددی و تجربی توسط پژوهشگران مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف از تحقیق حاضر، انتخاب دقیق‌ترین روش از بین روش‌های موجود برای تعیین ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ است. بر اساس داده‌های واقعی گردآوری شده از منابع معتبر، ظرفیت باربری نهایی در هر کدام از روش‌های موجود محاسبه و نتایج حاصله با همدیگر مقایسه شده است. مقایسه و اعتبارسنجی روش‌های موجود با استفاده از شاخص‌های ارزیابی عملکرد شامل ضریب همبستگی، ضریب تصمیم‌گیری، جذر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق صورت گرفته است. بر اساس نتایج حاصل از این مقایسه، اولویت‌بندی روش‌های موجود بر مبنای کم‌ترین خطا و بیش‌ترین تطابق با مقادیر واقعی انجام و مناسب‌ترین روش‌ها برای تعیین ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ پیشنهاد شده است. از مهم‌ترین مزایای این پژوهش می‌توان به اعتبار سنجی روش‌های تخمین ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ و تعیین دقیق‌ترین روابط اشاره کرد که بر اساس شرایط حاکم بر مسئله در اختیار طراحان قرار گرفته و باعث صرفه‌جویی در هزینه و زمان می‌شود.

### کلید واژه‌ها

توده‌سنگ، شالوده، ظرفیت باربری نهایی، تحلیل مقایسه‌ای

\*عهده دار مکاتبات: m.rezaei@uok.ac.ir

## ۱- مقدمه

توده‌سنگ نادیده گرفته شده است. روش‌های تجربی و نیمه تجربی هم با استفاده از همبستگی بین ظرفیت باربری و ویژگی‌های توده‌سنگ و بر اساس مشاهده‌های تجربی و تست‌های آزمایشگاهی به دست آمده‌اند. در روش‌های تجربی ظرفیت باربری وابسته به ویژگی‌های کمی و کیفی توده‌سنگ بوده و هندسه شالوده و فاصله بین درزه‌ها در نظر گرفته نشده است [۸-۴]. روش‌های هوشمند روش‌هایی ساده و کم هزینه برای تخمین غیر مستقیم ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ هستند. با این حال، رابطه‌های منتج شده از این روش‌ها هم از عدم اعتماد کافی در ارتباط با کیفیت و دقت داده‌های مورد استفاده برخوردار هستند.

با توجه به اهمیت ظرفیت باربری توده‌سنگ و کاربرد آن در پروژه‌های مهم مانند معدنکاری، سد سازی، تونل‌سازی، ساختمان‌سازی و سایر موارد، در این مقاله مقایسه روش‌های موجود بر اساس یک سری داده‌های واقعی و شاخص‌های ارزیابی عملکرد، انجام شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، روش‌های موجود اعتبارسنجی و اولویت‌بندی شده و روش‌های دقیق‌تر و مناسب‌تر برای استفاده در پروژه‌های مهندسی پیشنهاد شده است.

## ۲- مروری بر منابع

بر اساس بررسی‌های انجام گرفته بر روی منابع مختلف، تاکنون روش‌های مختلفی به منظور تعیین ظرفیت باربری توده‌سنگ توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده است. عمده این روش‌ها به صورت تحلیلی، تجربی و نیمه تجربی و یا بر پایه سیستم‌های هوش مصنوعی هستند که نتیجه آنها در این پژوهش مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. از جمله روش‌های تجربی و نیمه تجربی می‌توان به روش باولز<sup>۱</sup> [۹] اشاره کرد که در آن تأثیر شاخص کیفیت سنگ<sup>۲</sup> (RQD) هم در نظر گرفته شده است. علاوه بر روش‌های تجربی، روابط تحلیلی متعددی برای تعیین ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ توسط پژوهشگران مختلف پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به روش‌های ارائه شده توسط ترزاقی<sup>۳</sup> [۱۰]، سوور<sup>۴</sup> [۱۱]، گودمن<sup>۵</sup> [۱۲]، پل<sup>۶</sup> [۱۳]، زینکویچ<sup>۷</sup> [۱۴] اشاره کرد. به منظور پوشش روش‌های سنتی، اخیراً از سیستم‌های هوشمند به منظور تعیین ظرفیت باربری توده‌سنگ استفاده شده است. تاجری و همکاران [۴] و علوی و صدرالسادات [۱۵] رابطه‌هایی را با

در طراحی سازه‌ها بر روی توده‌های سنگی، لازم است که توده‌سنگ ساختگاه از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرد. یکی از این جنبه‌ها تعیین مقدار ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ است که در بسیاری از موارد همانند سد سازی و سازه‌های سطحی دیگر از نیازهای اساسی است. شالوده‌های کم عمق بارهای وارده ناشی از سازه‌های سطحی را تحمل کرده و آن را در طول خاک یا سنگ زیر آن توزیع می‌کنند. به طور کلی، در طراحی یک شالوده باید دو معیار مهم برآورده شود که شامل به دست آوردن ظرفیت باربری مناسب لایه‌های زیرین به منظور جلوگیری از شکست و رسیدن به نشست قابل قبول تحت بارهای وارده است. هر چند که طراحی یک شالوده بر روی توده‌سنگ معمولاً توسط معیار نشست کنترل می‌شود اما به منظور ارزیابی پایداری سازه، ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ باید تعیین شود [۴-۱]. بنابراین، به منظور طراحی دقیق و مؤثر یک شالوده، تعیین ظرفیت باربری توده‌سنگ زیر آن مهم است به نحوی که باید تحمل بارهای وارده ناشی از سازه روی آن را داشته باشد.

ظرفیت باربری شالوده قرار گرفته بر روی توده‌سنگ درزه‌دار معمولاً به هندسه آن، نسبت فاصله‌داری درزه‌ها به عرض و عمق شالوده و کیفیت توده‌سنگ مانند شرایط درزه‌ها (باز یا بسته)، نوع سنگ و مقاومت آن، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ و غیره بستگی دارد. روش‌های معمول مورد استفاده برای تعیین ظرفیت نهایی شالوده قرار گرفته بر روی توده‌سنگ شامل پنج روش کلی عددی، تحلیلی، تجربی، برجا و هوشمند است که هر کدام دارای مزیت‌ها و عیب‌های نسبی هستند. روش‌های کد نویسی معمولاً نتایج محافظه کارانه‌ای را برای ظرفیت باربری مجاز توده‌سنگ پیشنهاد می‌کنند. نتایج این روش‌ها از تجربه محلی و زمین‌شناسی یک محل خاص مشتق شده و باید از کاربردی بودن آن برای شرایط خاص مربوط به محل مورد نظر اطمینان حاصل کرد. روش‌های تحلیلی هم بر اساس تئوری ظرفیت باربری و با استفاده از یک سری فرضیات هستند. در این روش‌ها، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی توده‌سنگ و هندسه شالوده در نظر گرفته شده است اما نوع سنگ و پارامترهای طبقه بندی و کمی

بیشتر پژوهشگران در نظر گرفته شده است. این پارامترها با استفاده از رابطه‌های (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند [۱۶]:

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda} \times (1 + 0.1\lambda) \quad (1)$$

$$\text{or } RQD = 115 - 3.3J_V$$

$$RMR = UCS + RQD + J_s + J_c + J_w + J_o \quad (2)$$

که:  $\lambda$  تعداد درزه‌ها در واحد طول خط برداشت،  $J_V$  تعداد درزه‌های موجود در یک مترمکعب از سنگ، UCS مقاومت فشاری تک‌محوری توده‌سنگ،  $J_s$  فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها، شرایط ناپیوستگی‌ها،  $J_w$  شاخص آب زیرزمینی و  $J_o$  جهت و امتداد ناپیوستگی‌ها است.

استفاده از الگوریتم ژنتیک برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های کم عمق بر روی توده‌سنگ ارائه کرده‌اند که به ترتیب به برنامه‌ریزی ژنتیک خطی<sup>۱</sup> (LGP1) و برنامه‌ریزی ژنتیک خطی<sup>۲</sup> (LGP2) معروفند. در رابطه‌های حاصل از برنامه‌ریزی ژنتیک خطی، تأثیر پارامتر طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ (RMR) هم در نظر گرفته شده است. رابطه‌های موجود برای تعیین ظرفیت نهایی توده‌سنگ در جدول ۱ آورده شده است. همانطور که اشاره شد، پارامترهای RQD و RMR به عنوان متغیرهای تأثیرگذار در تعیین ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ توسط

جدول ۱: روابط و روش‌های موجود برای تعیین ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ

منبع	رابطه	توضیحات	روش
[۱۰]	$q_{ult} = CN_C + 0.5\gamma BN_\gamma + \gamma DN_q$	$N_\phi = \tan^2(45 + \phi/2)$ $N_C = 2N_\phi^{0.5}(N_\phi + 1), N_q = N_\phi^2$ $N_\gamma = N_\phi^{0.5}(N_\phi - 1)$	ترزاقی (۱۹۶۴)
[۱۱]	$q_{ult} = 2c \tan(45 + \phi/2)$	-	سوور (۱۹۷۹)
	$q_{ult} = q_u(N_\phi + 1)$	برای سنگ‌های شکسته شده	گودمن ۱ (۱۹۸۹)
[۱۲]	$q_{ult} = q_u \left[ \frac{1}{N_\phi - 1} \left[ N_\phi \left( \frac{S}{B} \right)^{(N_\phi - 1/N_\phi)} - 1 \right] \right]$ $N_\phi = \tan^2(45 + \phi/2)$	برای سنگ‌های سالم	گودمن ۲ (۱۹۸۹)
[۱۳]	$q_{ult} = CN_C + 0.5\gamma BN_\gamma + \gamma DN_q$	$N_\phi = \tan^2(45 + \phi/2)$ $N_C = 2N_\phi^2(N_\phi^2 + 1), N_q = N_\phi^2$ $N_\gamma = N_\phi^{0.5}(N_\phi^2 + 1)$	پل (۱۹۹۴)
[۱۴]	$q_{ult} = CN_C + q_u N_q + 0.5B\gamma N_\gamma$	$N_q = \tan^6(45 + \phi/2)$ $N_C = 5 \tan^4(45 + \phi/2)$ $N_\gamma = N_q + 1$ $q'_{ult} = q_{ult}(RQD)$	زینکویچ (۱۹۹۶)
[۹]	$q_{ult} = CN_C + q_u N_q + 0.5B\gamma N_\gamma$	$N_q = \tan^4(45 + \phi/2)$ $N_C = (N_q - 1) / \tan \phi$ $N_\gamma = \tan^5(45 + \phi/2)$	باولز (۱۹۹۷)
[۴]	$q_{ult} = 0.064 \sqrt{q_u \phi \frac{S}{B} \left( \frac{2S}{B} \sqrt{RMR} \sqrt{RMR q_u B \gamma D} + \gamma D \right)}$	$q_u$ و $q_{ult}$ بر حسب مگاپاسکال، $\phi$ درجه، $\gamma$ کیلونیوتن بر مترمکعب و $S$ ، $B$ و $D$ متر است.	برنامه ریزی ژنتیک خطی ۱
[۱۵]	$q_{ult} = 0.45(RMR + 2q_u) + 0.25 \frac{S}{B} (0.35q_u + \phi + (0.5q_u(0.2\phi - 6)^2))$	در این رابطه $q_u$ و $q_{ult}$ بر حسب $k.s.f$ ، $\phi$ درجه، و $S$ ، $B$ و $D$ متر است.	برنامه ریزی ژنتیک خطی ۲

که در آن  $q_{ult}$  ظرفیت باربری توده‌سنگ،  $C$  ضریب چسبندگی،  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ،  $\gamma$  وزن مخصوص توده‌سنگ،  $q_u$  مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ،  $S$  فاصله بین درزه‌ها،  $B$  و  $D$  عمق و عرض شالوده،  $RQD$  شاخص کیفیت سنگ و  $RMR$  رده‌بندی ژئومکانیکی سنگ است.

## ۳- اصول و تئوری کار

به منظور انجام پژوهش حاضر، ابتدا روش‌های موجود در این زمینه مورد بررسی قرار گرفته و پایگاه داده مناسب شامل ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ و متغیرهای تأثیرگذار بر آن از منابع معتبر [۴، ۱۵] جمع‌آوری شد. سپس، رابطه‌های بالا با استفاده از شاخص‌های آماری ارزیابی عملکرد در محیط نرم‌افزارهای اکسل<sup>۹</sup> و اسپاس<sup>۱۰</sup> مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت با استفاده از شاخص‌های ارزیابی عملکرد مانند ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق، رابطه‌های موجود اعتبارسنجی و اولویت‌بندی شده است.

## ۳-۱- روش‌های مورد ارزیابی

همانطور که در بخش دوم (مروری بر منابع) تشریح شد روش‌های مختلفی برای تعیین باربری نهایی توده‌سنگ وجود توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده است که نیازمند اعتبارسنجی واقعی برای کاربرد در عمل هستند. با توجه به تفرق رابطه‌های موجود و عدم پوشش برخی از آنها با استفاده از داده‌های موجود، در این پژوهش صرفاً به بررسی ۹ روش مهم برای تعیین ظرفیت باربری توده‌سنگ پرداخته شده که جزئیات مربوطه در جدول ۱ آمده است.

## ۳-۲- داده‌های ارزیابی

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل ۱۰۲ سری داده اندازه‌گیری شده مستخرج از منابع معتبر است [۴، ۱۵]. با در نظر گرفتن فرم کلی معادله‌های موجود برای تخمین غیرمستقیم ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ، پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده در پایگاه داده تهیه

شده برای تعیین این پارامتر شامل RMR، وزن مخصوص، عمق شالوده، عرض شالوده، مقاومت فشاری تک‌محوری، نسبت فاصله‌داری درزه به عرض شالوده و زاویه اصطکاک داخلی سنگ است. از میان داده‌های جمع‌آوری شده، ۴۹ سری به وسیله آزمایش شمع سنگی، ۴۰ سری از طریق آزمایش بارگذاری صفحه‌ای و ۱۳ سری هم با استفاده از آزمایش بارگذاری بر روی پایه‌های مقیاس شده (با اندازه‌های مختلف و به شکل دایره‌ای) اندازه‌گیری شده است. تمام شمع‌های سنگی مورد استفاده به شکل دایره‌ای بوده که در آن ظرفیت باربری نهایی (مقاومت اوج) را می‌توان به صورت متمایز از مقاومت محور آنها محاسبه کرد. لازم به ذکر است که تمام مقادیر ظرفیت باربری در پایگاه داده همان ظرفیت محوری هستند که از تفسیر نتایج آزمایش بارگذاری حاصل شده‌اند. نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری به صورت منحنی‌هایی نشان داده می‌شوند که نشان دهنده جابجایی پی سنگی به عنوان تابعی از بارگذاری اعمال شده است. در داده‌های جمع‌آوری شده، مقادیر ظرفیت باربری نهایی (qult) از منحنی‌های بار-جابجایی و با استفاده از روش برازش به دست آمده‌اند [۱۷]. بخش‌های مختلفی از داده‌های به کار رفته در پژوهش حاضر پیشتر توسط پژوهشگران مختلف برای طراحی و توسعه مدل‌های جدید و یا مدلسازی ظرفیت باربری پی‌های قرار گرفته بر روی توده‌سنگ مورد استفاده قرار گرفته است [۲۰-۱۸]. داده‌های ورودی و خروجی به همراه ویژگی‌های آماری و علائم آنها در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین، در جدول ۳ تعداد ۱۰ نمونه از داده‌های مورد استفاده در این پژوهش برای ارزیابی و اعتبارسنجی روش‌های موجود آورده شده است.

جدول ۲: خصوصیات آماری داده‌های مورد استفاده

نوع	پارامتر	نماد	بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار	واریانس
شاخص ژئومکانیکی سنگ (-)	RMR		۱۰۰	۱۵	۱۹/۳۹	۲۴/۲۴	۵۹۹۶۹/۹۶
وزن مخصوص (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	$\gamma$		۲۸/۳	۱۶/۸۲	۲۱/۵۶	۲/۴۱	۵۹۵/۴۷
عمق شالوده زیر سطح زمین (متر)	D		۲۰/۷۳	۰	۴/۵۸	۴/۹۵	۲۵۰۰/۰۹۸
عرض شالوده (متر)	B		۲/۴۷	۰/۰۵	۰/۵۷	۰/۵۰۳۶	۲۵/۸۷
مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)	$q_u$		۵۵	۰/۲۴	۴/۳۲	۸/۱۳	۶۷۴۸/۷۹
نسبت فاصله داری درزه به عرض شالوده (-)	S/B		۳۶/۶۹	۰/۳۵	۵/۷۴	۷/۲۹	۵۴۲۰/۹۱
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	$\phi$		۴۵	۲۰	۳۰/۹۳	۴/۹۰۲	۲۴۵۱/۹۸
ظرفیت باربری نهایی (مگاپاسکال)	qult		۷۵/۶	۰/۲۵	۱۰/۰۷۶	۱۲/۷۷	۱۶۶۵۹/۰۲

جدول ۳: تعداد ۱۰ نمونه از داده‌های مورد استفاده

شماره	RMR	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	D (m)	B(m)	$q_u$ (MPa)	S/B	$\phi$ (°)	$q_{ult}$ (MPa)
۱	۷۰	۱۹/۸۹	۴/۹۱	۱/۰۷	۰/۶۳	۱/۸۶	۲۹/۳	۲/۶۳
۲	۷۰	۱۹/۸۹	۴/۲۷	۱/۲۲	۰/۸	۱/۶۲	۲۹/۳	۲/۵۴
۳	۷۰	۱۹/۸۹	۹/۱۷	۱/۳۷	۱۰/۴۹	۲	۲۹/۳	۱۵/۲۳
۴	۸۲	۱۹/۰۱	۶/۱	۱/۲۲	۲۲/۹۸	۱/۷۵	۲۵	۲۶/۳۳
۵	۷۰	۲۱/۲۷	۱/۱	۰/۷۹	۱/۲۱	۳/۴۶	۳۰	۶/۹۴
۶	۷۰	۱۹/۸۹	۱/۵۲	۰/۷۶	۰/۴۸	۳/۲	۳۰	۲/۲۵
۷	۷۰	۱۸/۸۶	۱۸/۲۹	۱/۲۸	۱/۳۸	۲/۳۸	۳۵	۵/۸۴
۸	۶۸	۱۷/۴۵	۲۰/۷۳	۱/۹۲	۰/۵۷	۱/۰۳	۳۵	۲/۲۹
۹	۸۰	۲۰/۲۸	۱۸/۲۹	۰/۷۶	۱/۱۱	۲/۴	۳۵	۴/۷۹
۱۰	۵۵	۱۹/۲۵	۹/۱۴	۰/۱۴	۰/۸۲	۲/۱۸	۳۰	۱

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - t_i)}{n} \quad (5)$$

که در آن  $h_i$  و  $t_i$  به ترتیب  $i$  امین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده،  $\bar{h}_i$  و  $\bar{t}_i$  به ترتیب  $i$  امین مقادیر میانگین اندازه‌گیری شده و میانگین پیش‌بینی شده و  $n$  تعداد سری‌های داده است.

#### ۴-۱-۴ اعتبارسنجی روش‌های موجود برای تعیین ظرفیت باربری نهایی

بر اساس داده‌های موجود، ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ با استفاده از روش‌های مورد بررسی تعیین و در ادامه، عملکرد این روش‌ها با استفاده از شاخص‌های ارزیابی مورد بررسی قرار گرفته و اعتبارسنجی می‌شوند. همانطور که در جدول‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود داده‌های موجود فاقد پارامتر چسبندگی (C) هستند در حالی که در برخی از رابطه‌های مورد بررسی، این پارامتر برای تعیین ظرفیت باربری نهایی در نظر گرفته شده است. بنابراین، از رابطه (۶) برای محاسبه این پارامتر در فرمول‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر استفاده شده است.

$$C = \frac{q(1 + \sin \phi)}{2 \cos \phi} \quad (6)$$

#### ۴-۱-۴-۱ تعیین ظرفیت باربری نهایی

با محاسبه پارامتر چسبندگی و تکمیل داده‌ها، ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ با استفاده از ۹ روش ارائه شده در جدول ۱ محاسبه شد. میزان ارتباط بین مقادیر واقعی و

#### ۳-۳-۳ شاخص‌های ارزیابی

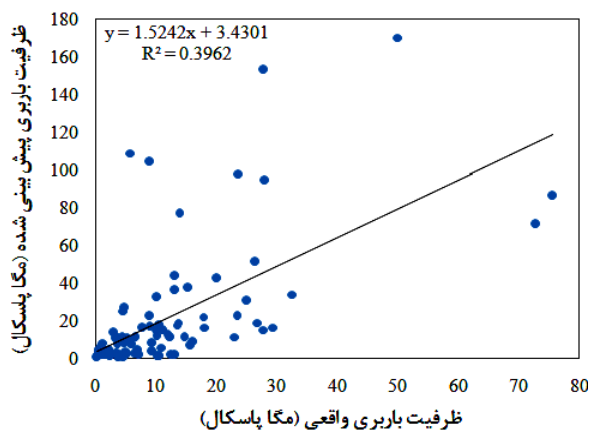
در این پژوهش از سه شاخص آماری مهم به منظور ارزیابی عملکرد روش‌های موجود برای تعیین ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ استفاده شده که شامل ضریب همبستگی<sup>۱۱</sup> (R)، جذر میانگین مربعات خطا<sup>۱۲</sup> (RMSE) و میانگین خطای مطلق<sup>۱۳</sup> (MAE) است. ضریب همبستگی یکی از شاخص‌های آماری برای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌ها است که هر چه مقدار آن به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده دقت بالای مدل و انطباق قوی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده حاصل از آن است. یکی دیگر از شاخص‌های اعتبارسنجی، روش میانگین جذر مربعات خطا است که هر چه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد نشانه دقت بالای مدل و اعتبار بیشتر آن است. علاوه بر دو شاخص بالا، برای تعیین قابلیت اعتماد روش‌ها و مدل‌های مختلف می‌توان از روش میانگین خطای مطلق نیز استفاده نمود. هر چه میانگین خطای مطلق یک مدل کمتر باشد نشان دهنده دقت بیشتر و در نتیجه اعتبار بیشتر مدل است. شاخص‌های بالا با استفاده از رابطه‌های (۳) تا (۵) محاسبه می‌شوند [۴]:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h}_i)(t_i - \bar{t}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h}_i)^2 \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t}_i)^2}} \quad (3)$$

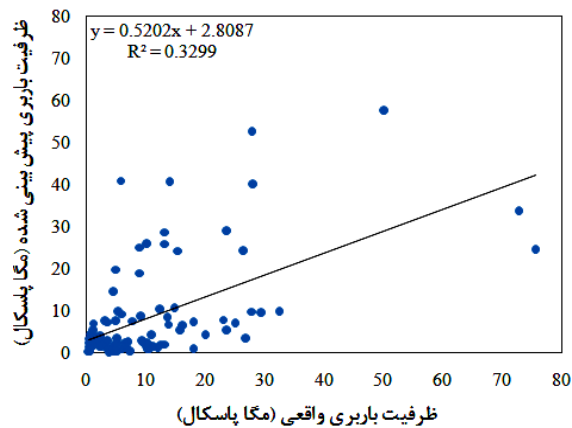
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - t_i)^2}{n}} \quad (4)$$

به عنوان مبنایی برای ارزیابی، اعتبارسنجی و اولویت‌بندی نهایی روش‌های موجود برای تعیین ظرفیت باربری توده‌سنگ مورد استفاده قرار گرفته است که در بخش بعدی به آن پرداخته شده است.

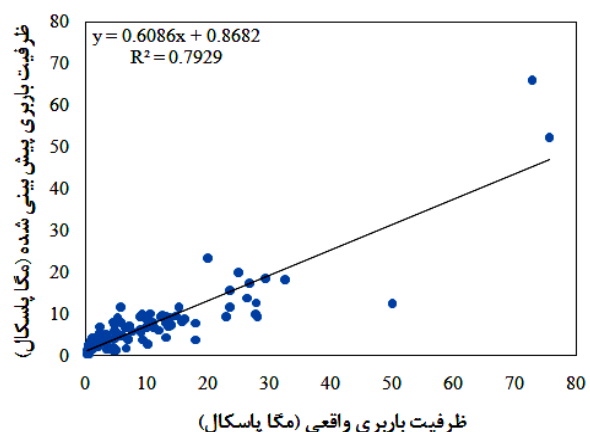
مقادیر حاصل از روش‌های مورد بررسی در این پژوهش در شکل‌های ۱ تا ۹ نشان داده شده است. همچنین، شکل‌های ۱۱ تا ۱۸ میزان انطباق خروجی حاصل از روش‌های بالا با مقادیر واقعی را نشان می‌دهند. نمودارهای به دست آمده



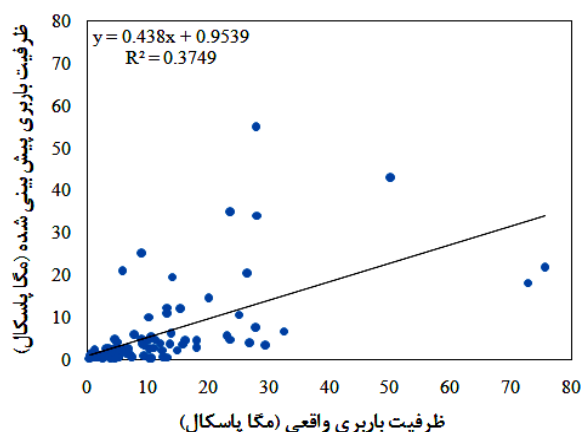
شکل ۲: ارتباط بین مقادیر حاصل از روش بل و مقادیر واقعی



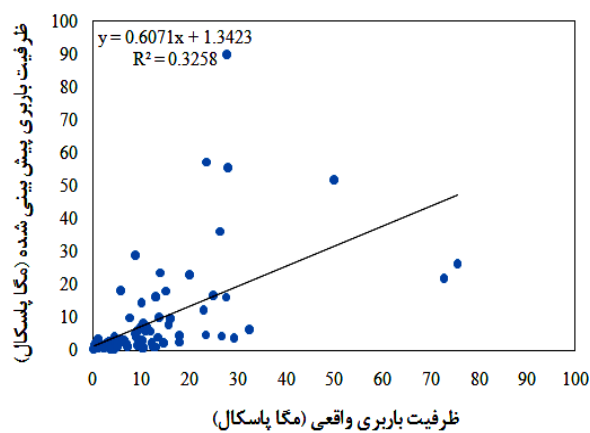
شکل ۱: ارتباط بین مقادیر حاصل از روش ترزاقی و مقادیر واقعی



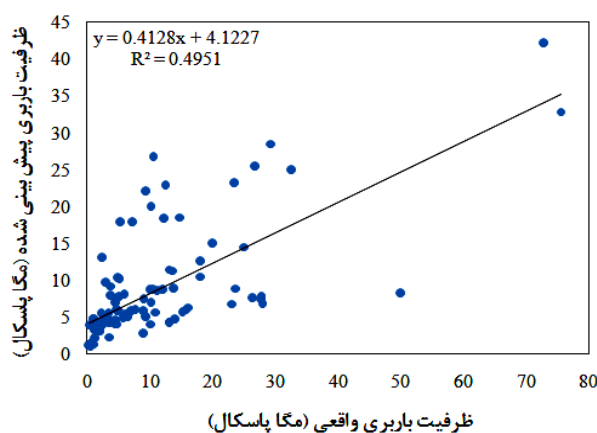
شکل ۴: ارتباط بین مقادیر حاصل از روش برنامه ریزی ژنتیک خطی ۱ و مقادیر واقعی



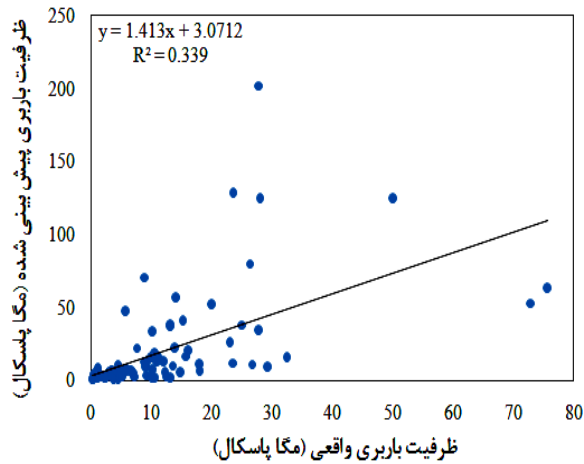
شکل ۳: ارتباط بین مقادیر حاصل از روش بولز و مقادیر واقعی



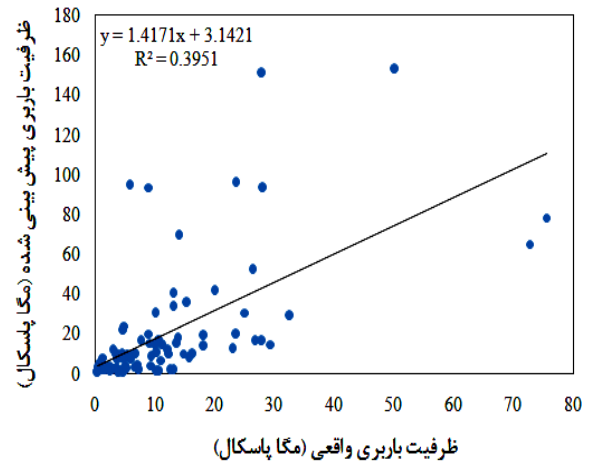
شکل ۶: ارتباط بین مقادیر حاصل از روش سوور و مقادیر واقعی



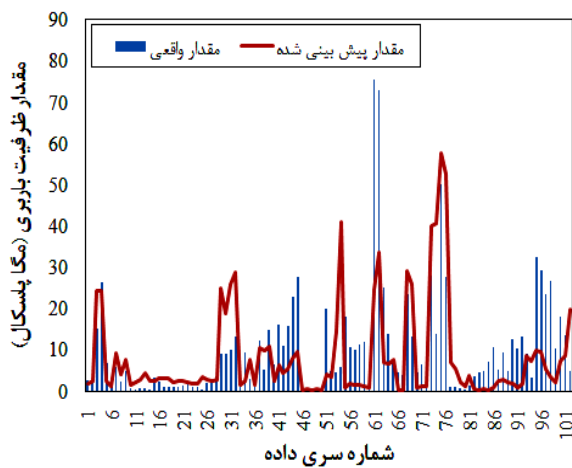
شکل ۵: ارتباط بین مقادیر حاصل از روش برنامه ریزی ژنتیک خطی ۲ و مقادیر واقعی



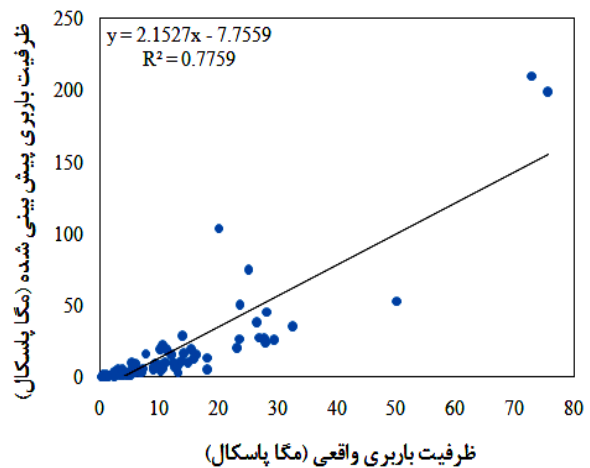
شکل ۸: ارتباط بین مقادیر حاصل از روش گودمن ۱ و مقادیر واقعی



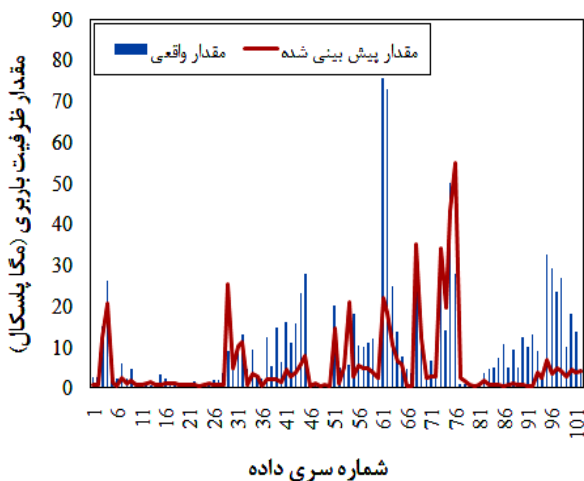
شکل ۷: ارتباط بین مقادیر حاصل از روش زینکویچ و مقادیر واقعی



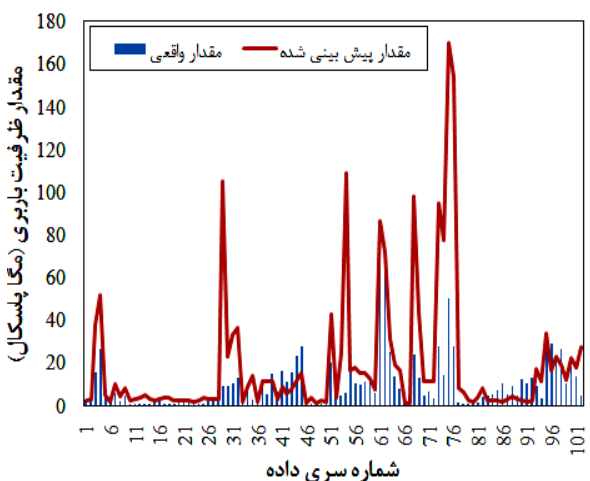
شکل ۱۰: مقایسه خروجی حاصل از روش ترزاقی با مقادیر واقعی



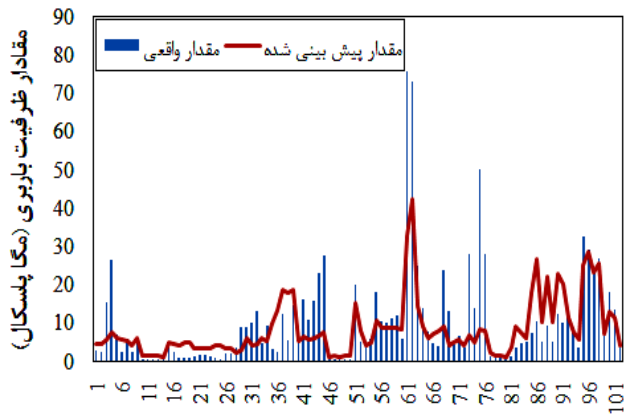
شکل ۹: ارتباط بین مقادیر حاصل از روش گودمن ۲ و مقادیر واقعی



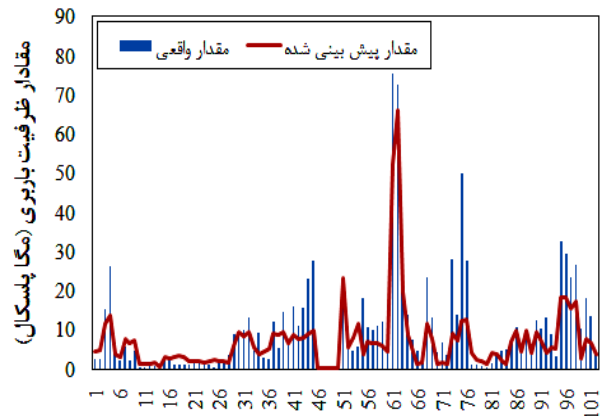
شکل ۱۲: مقایسه خروجی حاصل از روش باولز با مقادیر واقعی



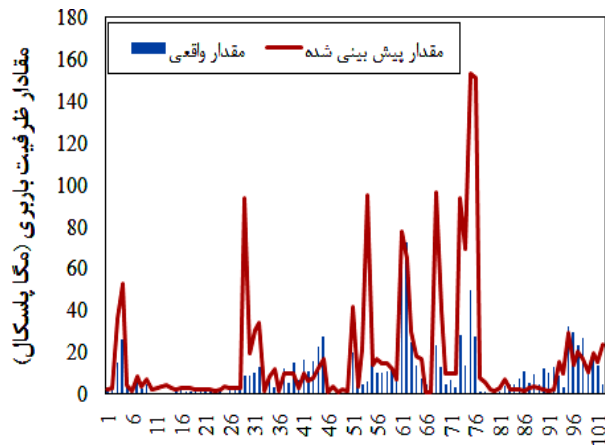
شکل ۱۱: مقایسه خروجی حاصل از روش بل با مقادیر واقعی



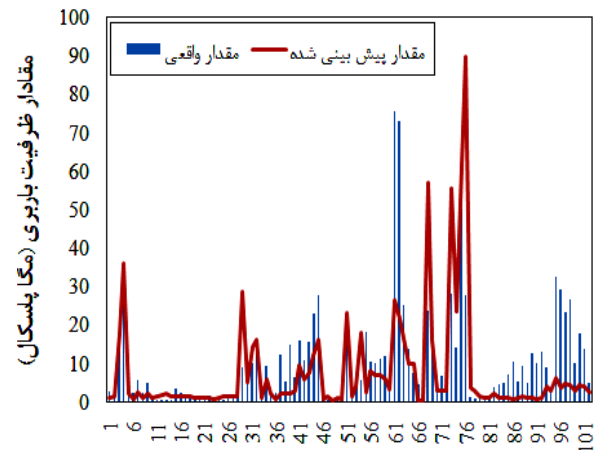
شماره سری داده  
 شکل ۱۴: مقایسه خروجی حاصل از روش برنامه ریزی ژنتیک خطی  
 ۲ با مقادیر واقعی



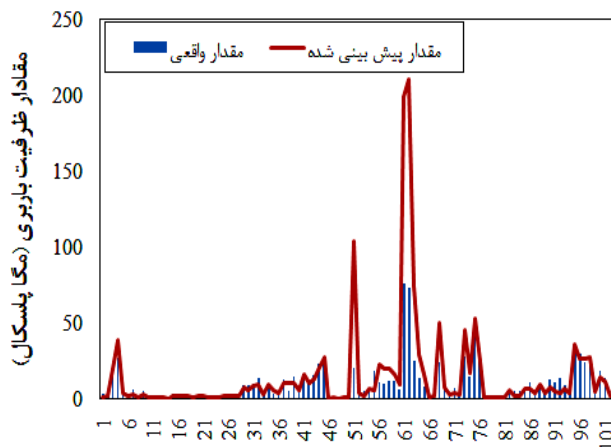
شماره سری داده  
 شکل ۱۳: مقایسه خروجی حاصل از روش برنامه ریزی ژنتیک  
 خطی ۱ با مقادیر واقعی



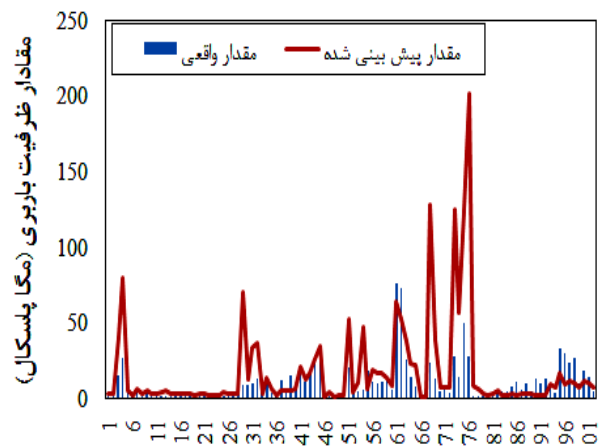
شماره سری داده  
 شکل ۱۶: مقایسه خروجی حاصل از روش زینکویچ با مقادیر واقعی



شماره سری داده  
 شکل ۱۵: مقایسه خروجی حاصل از روش سوور با مقادیر واقعی



شماره سری داده  
 شکل ۱۸: مقایسه خروجی حاصل از روش گودمن ۲ با مقادیر واقعی



شماره سری داده  
 شکل ۱۷: مقایسه خروجی حاصل از روش گودمن ۱ با مقادیر  
 واقعی



۴-۲- اعتبارسنجی روش‌های موجود

تصمیم‌گیری ( $R^2$ ) به دست آمده از شکل‌های ۱ تا ۹ در جدول ۴ نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصل از جدول شماره ۴، اعتبارسنجی و اولویت‌بندی روش‌های تعیین ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ انجام شد که نتایج به دست آمده در جدول‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده است.

به منظور اعتبارسنجی روش‌های موجود برای تعیین ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ، شاخص‌های ارزیابی عملکرد اشاره شده در بخش ۳ برای همه روش‌های مورد بررسی محاسبه شد. نتایج حاصله به علاوه ضریب

جدول ۴: نتایج اعتبارسنجی آماری روش‌های تعیین ظرفیت باربری

روش شاخص	تررزاقی	گودمن ۱	گودمن ۲	سوور	پل	زینکویچ	باولز	برنامه ریزی ژنتیک خطی ۱	برنامه ریزی ژنتیک خطی ۲
ضریب تصمیم‌گیری	۰/۳۲۹	۰/۳۳۹	۰/۷۷۵	۰/۳۲۵	۰/۳۹۶	۰/۳۹۵	۰/۳۷۴	۰/۷۹۲	۰/۴۹۵
ضریب همبستگی	۰/۵۷۴	۰/۵۸۲	۰/۸۸۰	۰/۵۷۰	۰/۶۲۹	۰/۶۲۸	۰/۶۱۲	۰/۸۹۰	۰/۷۰۳
جذر میانگین مربعات خطا	۱۱/۴۶	۲۶/۷۵	۲۱/۲۲	۱۲/۵۱	۲۶/۴۳	۲۴/۱۷	۱۱/۲۲	۷/۰۹	۹/۳۷
میانگین خطای مطلق	۴/۰۵	۷/۲۳	۳/۸۵	۲/۶۱	۸/۷۱	۷/۳۴	۴/۷	۳/۰۷	۱/۷۹

جدول ۵: اعتبارسنجی روش‌های تعیین ظرفیت باربری بر اساس شاخص‌های ضرایب همبستگی و تصمیم‌گیری

اولویت پیشنهادی	روش تعیین ظرفیت باربری توده‌سنگ
۱	برنامه ریزی ژنتیک خطی ۱
۲	گودمن ۲
۳	برنامه ریزی ژنتیک خطی ۲
۴	پل
۵	زینکویچ
۶	باولز
۷	گودمن ۱
۸	تررزاقی
۹	سوور

جدول ۶: اعتبارسنجی روش‌های تعیین ظرفیت باربری بر اساس جذر میانگین مربعات خطا

اولویت پیشنهادی	روش تعیین ظرفیت باربری توده‌سنگ
۱	برنامه ریزی ژنتیک خطی ۱
۲	برنامه ریزی ژنتیک خطی ۲
۳	باولز
۴	تررزاقی
۵	سوور
۶	گودمن ۲
۷	زینکویچ
۸	پل
۹	گودمن ۱

جدول ۷: اعتبار سنجی روش‌های تعیین ظرفیت باربری بر اساس شاخص میانگین خطای مطلق

اولویت پیشنهادی	روش تعیین ظرفیت باربری توده‌سنگ
۱	برنامه ریزی ژنتیک خطی ۲
۲	سوور
۳	برنامه ریزی ژنتیک خطی ۱
۴	گودمن ۲
۵	ترزاقی
۶	باولز
۷	گودمن ۱
۸	زینکوچ
۹	بل

هر کدام از روش‌های گفته شده محاسبه گردید. در نهایت با استفاده از شاخص‌های ارزیابی عملکرد، میزان دقت و خطای هر کدام از روش‌ها محاسبه شد. نتایج به دست آمده نشان داد که بر اساس شاخص‌های ضریب همبستگی و ضریب تصمیم‌گیری، روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک خطی ۱، گودمن ۲ و برنامه‌ریزی ژنتیک خطی ۲ جزو سه اولویت اول برای تعیین ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ هستند. همچنین بر اساس میانگین جذر مربعات خطا، روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک خطی ۱، برنامه‌ریزی ژنتیک خطی ۲ و باولز و بر اساس میانگین خطای مطلق، روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک خطی ۲، سوور و برنامه‌ریزی ژنتیک خطی ۱ در اولویت‌های اول تا سوم قرار می‌گیرند. همانطور که ملاحظه می‌شود در هر سه نوع ارزیابی، روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک خطی ۱ و برنامه‌ریزی ژنتیک خطی ۲ جزو سه اولویت اول هستند. لذا به نظر می‌رسد این دو روش دارای اعتبار بهتری برای تعیین ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ بوده و لذا برای استفاده در پروژه‌های مهندسی پیشنهاد می‌شوند. از مزیت‌های مهم اعتبارسنجی صورت گرفته در این پژوهش، اولویت‌بندی روش‌های موجود برای تعیین ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ و پیشنهاد روش‌های با دقت بیشتر و خطای کم‌تر به منظور استفاده در پروژه‌های عملی است. بنابراین، نتایج به دست آمده هم برای استفاده در صنعت و هم برای توسعه و رفع کاستی‌های روابط موجود در پژوهش‌های آتی حائز اهمیت است.

## مراجع

[1] Das, B. M., (1995), Principles of foundation engineering, 3rd edition, Boston: PWS Publishing.

همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود همبستگی نتایج حاصل از روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک خطی ۱، گودمن ۲ و برنامه‌ریزی ژنتیک خطی ۲ با مقادیر واقعی از بقیه روش‌ها بالاتر بوده و با دقت بهتری قادر به پیش‌بینی ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ هستند. از جدول ۶ می‌توان نتیجه گرفت که بر اساس شاخص جذر میانگین مربعات خطا، روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک خطی ۱، برنامه‌ریزی ژنتیک خطی ۲ و باولز عملکرد بهتری نسبت به بقیه روش‌ها دارند. در نهایت، جدول ۷ نشان می‌دهد که روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک خطی ۲، سوور و برنامه‌ریزی ژنتیک خطی ۲ دارای میانگین خطای مطلق کم‌تری در پیش‌بینی ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ هستند. با توجه به پراکندگی پایین نتایج حاصل از روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک خطی ۱ و برنامه‌ریزی ژنتیک خطی ۲ و قابل قبول بودن نتایج آنها بر اساس هر کدام از چهار شاخص ارزیابی عملکرد مورد استفاده، می‌توان نتیجه گرفت که قابلیت بالاتری نسبت به بقیه روش‌های موجود داشته و با اطمینان بالایی می‌توان در پروژه‌های عملی از آنها استفاده نمود.

## ۵- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت تخمین ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ در شاخه‌های مختلف مهندسی مانند معدن، مکانیک سنگ و عمران، در پژوهش حاضر از شاخص‌های آماری ارزیابی عملکرد به منظور اعتبارسنجی و اولویت‌بندی روش‌های موجود در این زمینه استفاده شده است. بدین منظور، ابتدا ۹ روش مهم و کاربردی موجود برای تعیین ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ در نظر گرفته شد. سپس بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده، ظرفیت باربری نهایی در

- [17] Hirany, A., Kulhawy, F. H., (1988), Conduct and interpretation of load tests on drilled shaft foundations: detailed guidelines, Palo Alto: Electric Power Research Institute.
- [18] Zhang, L., Einstein, H., (1988), End bearing capacity of drilled shafts in rock, *J Geotech Geoenviron Eng.* 124, pp. 574–584.
- [19] Ziaee, S. A., Sadrossadat, E., Alavi, A., Mohammadzadeh Shadmehri, D., (2014), Explicit formulation of bearing capacity of shallow foundations on rock masses using artificial neural networks: application and supplementary studies, *Environ Earth Sci.* pp. 1–15.
- [20] Prakoso, W. A., (2002), Reliability-based design of foundations on rock masses for transmission line and similar structures, Cornell University.
- [2] Chen, W., & Duan, L., (1999), *Bridge engineering handbook*, New York: CRC Press.
- [3] Lo, K. Y., & Hefny, A. M., (2001), Foundations on rock, In: Rowe RK, editor. *Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook*, Berlin Heidelberg: Springer, pp. 305–332.
- [4] Tajeri, S., Sadrossadat, E., & Bolouri Bazaz, J., (2015), Indirect estimation of the ultimate bearing capacity of shallow foundations resting on rock masses, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 80, pp. 107–117.
- [5] Becker, D. E., & Moorel, D., (2006), *Canadian Foundation Engineering Manual*, 4th Ed. Canadian Geotechnical Society.
- [6] Look, B. G., (2007), *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*, London: Taylor and Francis.
- [7] Kulhawy, F. H., & Goodman, R. E., (1980), Design of foundations on discontinuous rock, In *Proceedings of the International Conference on Structural Foundations on Rock*, International Society for Rock Mechanics, pp. 209–220.
- [8] Zhang, L., & Einstein, H., (1998), End bearing capacity of drilled shafts in rock, *J Geotech Geoenviron Eng.* 124, pp.574–584.
- [9] Bowles, J. E., (1997), *Foundation analysis and design*, 5th Ed. New York: McGraw-Hill.
- [10] Terzaghi, K., (1946), Rock defects and loads on tunnel supports, In: Proctor RV, White TL, editors, *Rock tunneling with steel supports*, Youngstown, OH: Commercial Shearing and Stamping Co, pp. 17-99.
- [11] Sowers, G. F., (1979), *Introductory soil mechanic sand foundations: geotechnical engineering*, 4th Ed. New York: Macmillan.
- [12] Goodman, R. E., (1989), *Introduction to rock mechanics*, 2nd Ed. New York: Wiley.
- [13] Bell, F. G., (1994), *Engineering in Rock Masses*, New York: Butterworth-Heinemann.
- [14] Vafaeian, M., (2011), *Engineering Properties of Rocks*, 3th Ed. Arkan Danesh publisher, pp. 446 (In Persian).
- [15] Alavi, A. H., & Sadrossadat, E., (2016), New design equations for estimation of ultimate bearing capacity of shallow foundations resting on rock masses, *Geoscience Frontiers* 7, pp. 91-99.
- [16] Bieniawski, Z. T., (1989), *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*, New York: Wiley.

- 
- 1- Bowles
  - 2 - Rock Quality Designation
  - 3 - Terzaghi
  - 4 - Sower
  - 5 - Goodman
  - 6 - Bell
  - 7 - Zinkvich
  - 8 - Linear Genetic Programming
  - 9 - Excel
  - 10 - SPSS
  - 11 - Correlation Coefficient
  - 12 - Root Mean Square Error
  - 13 - Mean Absolute Error