

بررسی تعیین ظرفیت باربری جداری شمع‌های درجای مستقر در سنگ

سامیه رضازاده (دانشجوی دکتری)

ابوالفضل اسلامی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه امیرکبیر

عطا جعفری (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرانزلی، گیلان

مهندسی عمران شریفیه، (پاییز ۱۳۹۳)
دوره‌ی ۲-۳، شماره‌ی ۳، ص. ۵۱-۶۳

شمع‌های مستقر در سنگ، به دلیل توان باربری بالا و نشست‌پذیری کم، بهترین گزینه برای شالوده‌ی سازه‌های بسیار سنگین و حساس به نشست هستند. در این راستا، پایگاه اطلاعاتی شامل ۶۳ مورد آزمایش بارگذاری اجراشده روی شمع‌های مستقر در سنگ‌های با مقاومت فشاری مشخص (q_u) تشکیل شد. در این نوشتار، ابتدا روابط پژوهشگران مختلف در مورد تعیین ظرفیت باربری جداری با نتایج آزمایش‌های بارگذاری به تفکیک برای هر سنگ باربر توسط یک کار آماری مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است. سپس روابط پیشنهادی به شکل مجزا برای هر نوع سنگ و همچنین برای حالتی که نوع سنگ مشخص نبوده و یا خارج از شمول انواع مورد بررسی در این پژوهش است، یک رابطه‌ی کلی جهت تعیین ظرفیت باربری جداری ارائه شده است. در پایان نیز جهت لحاظ اثرات مشخصات توده‌ی سنگ، ضریب اصلاحی برای مقاومت فشاری براساس RMR^۱ پیشنهاد شده و توسط ۵ مورد عملی، دقت روابط ارائه‌شده مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: ظرفیت باربری جداری، شمع مستقر در سنگ، بانک اطلاعاتی، آزمایش بارگذاری.

smh_rezazadeh@yahoo.com
afeslami@aut.ac.ir
a.jafary@bandaranzaliia.u.ac.ir

۱. مقدمه

استقرار شمع بر روی سنگ یا درون آن، روشی کارآمد در استفاده‌ی مؤثرتر از شمع‌های درجاست. از ویژگی‌های بارز شمع‌های درجای متکی بر سنگ، ظرفیت باربری بسیار بالا و کنترل ایمن نشست است. مهندس طراح باید پس از طرح مقدماتی با توجه به ۳ مورد اصلی کارایی، هزینه، و قابلیت‌های اجرایی با در نظر گرفتن این موضوع که آیا واقعاً بردن شمع به درون سنگ یا میان لایه‌های سنگ و خاک با توجه به مشکلات ضروری است، طرح نهایی را ارائه کند. استقرار شمع‌ها درون سنگ به‌طور کلی سبب افزایش هزینه‌ها، بهبود عملکرد بار - نشست، افزایش قابل توجه توان باربری و در پاره‌ی موارد چالش‌پذیری بیشتر روند اجرا می‌شود.

به منظور تعیین ظرفیت باربری محوری شمع‌های متکی بر سنگ که مانند سایر انواع شمع‌ها مجموع مقاومت کف و جداری را در بر می‌گیرد، تلاش‌های زیادی انجام گرفته و روش‌های تحلیلی و تجربی بسیاری با توجه به عوامل تأثیرگذار در ظرفیت باربری این نوع از شمع‌ها توسط پژوهشگران مختلف مطرح شده است. در مورد ظرفیت باربری جداری، عوامل مهمی از قبیل مقاومت فشاری

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۵/۴، اصلاحیه ۱۳۹۱/۱۱/۴، پذیرش ۱۳۹۱/۱۲/۱۲.

محدودنشده‌ی سنگ، زبری دیواره‌ی سنگی در تماس با شمع و ناپیوستگی‌های توده‌ی سنگ مورد ملاحظه قرار می‌گیرد، همچنین در خصوص ظرفیت باربری کف، با در نظر گرفتن عواملی از قبیل مدهای گسیختگی سنگ در کف شمع، شاخص کیفی (RQD)، شاخص‌های طبقه‌بندی توده‌ی سنگ (GSI و RMR)، نتایج حاصل از آزمایش‌های درجا مانند پرسیمتر، و مقاومت فشاری محدودنشده‌ی سنگ، روابط متنوعی پیشنهاد شده است.^[۱] در این پژوهش از مقاومت فشاری محدودنشده‌ی سنگ با توجه به دشواری‌های تعیین عوامل مؤثر دیگر و دقت و سهولت بیشتر، تعیین این پارامتر جهت مطالعه روی ظرفیت باربری شمع‌های متکی بر سنگ استفاده شده است. مقاومت فشاری برای نوع سنگ مشخص به پارامترهایی چون پوکی، سیمانی‌شدن، درجه‌ی هوازدگی، ناهمگنی ترکیب، گوشه‌داربودن اندازه‌های دانه‌ی، و درجه‌ی قفل و بست دانه‌های معدنی بستگی دارد. از مقاومت فشاری همچنین به عنوان شاخص اولیه برای تشخیص سنگ سالم استفاده می‌شود.^[۲]

یک مدل از رفتار انتقال بار شمع‌های متکی بر سنگ (شکل ۱)، توسط منحنی بار محوری - جابجایی، ارائه شده است. بار فشاری وارد بر سر شمع، از طریق تنش برشی توسعه یافته در سطح مشترک سنگ و بتن روی جداری شمع، و تنش قائم فشاری در سطح تماس بین کف شمع و زیر آن به زمین منتقل می‌شود. در بارگذاری اولیه،

جدول ۱. مقادیر پیشنهادی برای b . [5]

مرجع	ملاحظات	مقادیر پیشنهادی b
[6]	مورد استفاده در طراحی به روش تنش مجاز	۱٫۴۱
[۷]	مورد استفاده در تنش‌های بهره‌برداری	۰٫۶۳-۰٫۹۴
[۸]	مقدار کمیته به صورت محافظه کارانه	۰٫۶۳

۱. یک رابطه‌ی تقریبی برای محاسبه‌ی مقاومت جداری شمع با توجه به مقاومت فشاری سنگ است: [5]

$$\frac{q_s}{p_a} = b \left(\frac{q_u}{p_a} \right)^{0.5} \quad (1)$$

که در آن، q_s مقاومت اصطکاک جداری در واحد طول شمع؛ q_u مقاومت فشاری تک محوری سنگ؛ b ضریب تجربی که بر اساس جدول ۱ تعیین می‌شود؛ P_a فشار اتمسفر.

ایجاد شیار در دیواره‌ی شمع‌های درون سنگ باعث افزایش زبری در سطح تماس بتن و سنگ می‌شود و مقاومت جداری را افزایش می‌دهد. برای شمع‌های حفاری شده در سنگ با شیارهایی به عمق و عرض بیشتر از 1° میلی‌متر و فواصل حدود 5° تا 20° میلی‌متر، مقدار ضریب b برابر 1.9 پیشنهاد می‌شود. [6] هرواوت و کنی (۱۹۷۹) رابطه‌ی ۲ را مابین مقاومت جداری و مقاومت فشاری مطرح کرده‌اند: [۷]

$$f_{su} = b \sqrt{q_u} \quad (2)$$

که در آن، f_{su} مقاومت نهایی واحد جداری؛ q_u مقاومت فشاری مصالح ضعیف‌تر (بتن یا سنگ)؛ b ضریب متغیر در محدوده‌ی 0.2 تا 0.3 برای سطوح زبر.

رابطه‌ی ۲ می‌تواند به صورت نرمالیزه‌شده از تقسیم مقاومت واحد جداری و مقاومت فشاری سنگ بر فشار اتمسفر ($P_a = 0.1013 \text{ MPa}$) بیان شود. نتیجه‌ی حاصل برای $b = 0.2$ به صورت رابطه‌ی ۳ است:

$$\frac{f_{su}}{p_a} = 0.65 \sqrt{\frac{q_u}{p_a}} \quad (3)$$

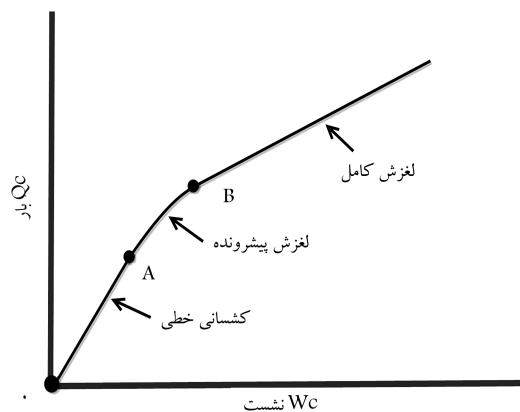
هرواوت و همکاران (۱۹۸۳) [۷] نیز روابط اصلاح‌شده‌ی برای محاسبه‌ی شمع‌هایی که به شکل مصنوعی در سطح تماس در جدار، آجدار شده‌اند، به صورت روابط ۴ و ۵ پیشنهاد کرده‌اند: [۷]

$$f_{su} = 0.8 [RF]^{0.45} q_u \quad (4)$$

$$RF = \frac{\Delta r_h}{r_s} \frac{L_t}{L_s} \quad (5)$$

که در آن‌ها، RF ضریب زبری؛ Δr_h میانگین ارتفاع زبری‌ها؛ r_s شعاع اسمی جدار مشترک؛ L_s طول اسمی جدار مشترک؛ L_t طول کلی در امتداد جدار مشترک. راهنمای شمع‌های درجا FHWA [9] و مشخصات طراحی پل به روش LRFD، روابط مذکور را به عنوان یک روش توصیه‌شده در طراحی مقاومت جدار شمع‌های مستقر در سنگ پذیرفته‌اند.

روی و آرمیتاژ (۱۹۸۷)، داده‌های موجود مقاومت جدار شمع‌ها در سنگ، شامل داده‌های حاصل از پژوهش‌های ویلیامز و همکاران (۱۹۸۰)، ویلیامز و پلز (۱۹۸۱) و هرواوت (۱۹۸۲)، خلاصه کرده‌اند. [6] رابطه‌ی پیشنهادی برای شمع‌های تمیز، که در کلاس‌های زبری R_1 ، R_2 ، R_3 مطابق جدول ۲ تعریف شده‌اند، برابر



شکل ۱. منحنی بار-جابجایی شمع مستقر در سنگ تحت بار محوری. [۲]

تنش‌های برشی در امتداد سطح تماس قائم شمع و سنگ توسعه می‌یابند. برای یک بار نسبی کوچک، جابجایی‌ها کوچک و رفتار تنش- کرنش خطی است (ناحیه‌ی OA در شکل ۱)، و هیچ لغزشی در سطح مشترک بین بتن جدار و اطراف آن مشاهده نشده است و رفتار می‌تواند به شکل کشسان خطی مدل شود. با افزایش بارگذاری، تنش‌های برشی از حد مجاز خارج و گسیختگی لغزشی بین جدار شمع و سنگ اطراف آغاز می‌شود. منحنی بار-جابجایی غیرخطی می‌شود و لغزش گسترش می‌یابد و سهم عمده‌ی بار به کف منتقل می‌شود (خط AB). در تعدادی از نقاط، ظرفیت نهایی جدار بسیج شده است (شرایط لغزش کامل) و یک بخش بزرگ‌تر از بار وارده به کف شمع منتقل می‌شود (دورتر از نقطه‌ی B). اگر بارگذاری ادامه یابد، در مقاومت فشاری بیشینه، توده‌ی سنگ کف به گسیختگی می‌رسد. [۲]

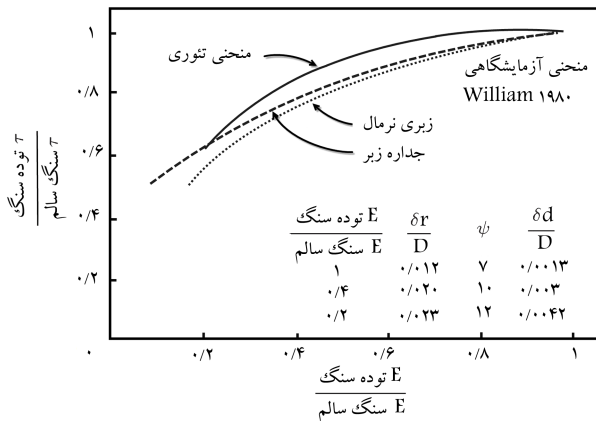
۲. روش‌های محاسبه‌ی ظرفیت جداری شمع در سنگ

آنالیز مطالعات و نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری بر روی شمع‌های حفاری شده در سنگ بستر، سهم بالای اصطکاک جداری را در ظرفیت باربری شمع نشان می‌دهد. مقاومت نهایی جداری شمع متکی بر سنگ، برابر با مجموع تنش‌های برشی بیشینه روی سطح مشترک جدار است. مکانیزم مقاومت جداری شمع پیچیده است. این مقاومت به اصطکاک و چسبندگی در سطح تماس بتن و سنگ و تغییرات تنش قائم در سطح تماس بستگی دارد. تغییرات ایجادشده در تنش قائم در سطح تماس، خود به اتساع ناشی از لغزش در سطح تماس و یا اثر نسبت پواسون بستگی دارد؛ در نتیجه استفاده از داده‌های تجربی در محاسبه‌ی مقاومت برشی سطح تماس بتن و سنگ امری ضروری است. [۲] به‌طور کلی، پارامترهای اصلی کنترل‌کننده‌ی اندرکنش جدار شمع و سنگ عبارت‌اند از: [۲]

- مقاومت مصالح سنگ؛
 - ساختار توده‌ی سنگ (ناپوستگی‌ها)؛
 - نسبت مدول بتن به سنگ؛
 - مقاومت برشی بسیج‌شده از طریق اتساع؛
 - تنش‌های احاطه‌کننده؛
 - ضرایب متناسب با ساخت، شامل زبری سطح مشترک.
- مقاومت جداری در شمع‌های درجا با فرض یک سطح تماس صاف و هموار بین بتن و سنگ با استفاده از روش‌های متعارف تعیین می‌شود. رابطه‌ی تجربی

جدول ۲. طبقه‌بندی زبری جدار. [۲]

توصیف	کلاس زبری
جداره‌های صاف، مستقیم؛ شیارها و فرورفتگی‌های با عمق کم‌تر از ۱mm	R_1
شیارهای به عمق فواصل ۱-۴mm، عرض $< 2mm$ ، فواصل $20^\circ - 50^\circ$	R_2
شیارهای به عمق فواصل ۱-۴mm، عرض $< 5mm$ ، فواصل $20^\circ - 50^\circ$	R_3
شیارها یا زبری با عمق $< 1mm$ ، عرض $< 1mm$ ، فواصل $20^\circ - 50^\circ$	R_4



شکل ۲. تأثیر مدول توده‌ی سنگ در مقاومت واحد جدار میانگین. [۶]

جدول ۳. کاهش مقاومت جدار بر اساس کاهش مدول. [۲]

E_M/E_R	$\alpha = f_{des}/f_{du}$
۱	۱
۰/۵	۰/۸
۰/۳	۰/۷
۰/۱	۰/۵۵
۰/۰۵	۰/۴۵

جدول ۴. تخمین نسبت مدول با استفاده از RQD. [۱]

درصد RQD	E_M/E_R	
	درزهای باز	درزهای بسته
۱۰۰	۰/۶	۱
۷۰	۰/۱	۰/۷
۵۰	۰/۱	۰/۱۵
۲۰	۰/۰۵	۰/۰۵

شبه احتمالات دربرگیرنده‌ی هندسه‌ی شکست، جهت تخمین توزیع و مشخصات زبری‌ها، مدل شده است. نتایج مدل سطح مشترک و تست سختی قائم ثابت آزمایشگاهی به‌عنوان ورودی به برنامه‌ی رایانه‌ی ROCKET جهت تخمین منحنی بار - جابجایی محوری، وارد می‌شود. در ادامه‌ی این کار، سیدل و کولینگ‌وود (۲۰۰۱) پیشنهاد کردند که یک پارامتر بدون بُعد، که به‌عنوان ضریب مقاومت جدار (SRC) تعریف شده است، جهت در نظر گرفتن عوامل مؤثر در مقاومت جدار، به

است با (رابطه‌ی ۶): [۲]

$$f_{su} = 0.45 \sqrt{q_u} \quad (6)$$

برای در نظر گرفتن زبری جداره مطابق کلاس R_2 ، مقاومت جداره افزایش یافته و به صورت رابطه‌ی ۷ ارائه شده است:

$$f_{su} = 0.6 \sqrt{q_u} \quad (7)$$

کولهای و فون (۱۹۹۳) [۸] با تلفیق داده‌های بانک اطلاعات گردآوری شده توسط روی و آرمیتاژ (۱۹۸۷) شامل بیش از 8° تست بارگذاری در 30° سایت مختلف با داده‌های بلوم‌کوئیست و تانسند (۱۹۹۱) و مک‌وای و همکاران (۱۹۹۲) شامل انجام ۴۷ آزمایش بارگذاری تا گسیختگی در ۱۳ سایت سنگ آهکی مختلف، تابع نمایی در رابطه‌ی ۸ را به عنوان بهترین برازش مقاومت جداره نرمالیزه شده در برابر مقاومت فشاری نرمالیزه شده از داده‌های موجود سنگ‌ها پیشنهاد کردند: [۲]

$$\frac{f_{su}}{p_a} = c \sqrt{\frac{q_u}{2p_a}} \quad (8)$$

که در آن $C = 1$ مربوط به حد پایینی، $C = 2$ حالت متوسط، و $C = 3$ حد بالایی شمع‌های با زبری مصنوعی است. با جای‌گذاری $C = 2$ در معادله‌ی ۸، رابطه‌ی ۶ برای شمع‌های با جداره صاف، و $C = 2.7$ رابطه‌ی ۷ برای شمع‌های با جداره زبر حاصل می‌شود.

۱.۲. روش‌هایی براساس پارامترهای اضافی توده‌ی سنگ

طبق تحقیقات روی و آرمیتاژ (۱۹۸۷) مقاومت واحد جداره، که توسط روابط تجربی وابسته به مقاومت فشاری تک محوری تعیین شده است، به شکل صریح درجه‌ی ناپیوستگی در توده‌ی سنگ را لحاظ نمی‌کند. در شکل ۲، پتانسیل تأثیر ناپیوستگی‌ها بر حسب نسبت مدول توده‌ی سنگ به مدول سنگ سالم بر روی مقاومت جداره متوسط (T) نشان داده شده است. هر دو دسته‌ی منحنی‌های تجربی و تئوری، اساساً مقاومت جداره کاهش یافته را برای سنگی سالم با مقاومت و سختی بالا، ولی مدول توده‌ی پایین نشان می‌دهند. [۱۰]

AASHTO (۲۰۰۶) جهت در نظر گرفتن رفتار توده‌ی سنگ بر حسب RQD، نسبت مدول (E_M/E_R) و شرایط ناپیوستگی در طراحی پل‌ها به روش LRFD، شیوه‌ی پیشنهادی هرواث و کنی (۱۹۹۷) را با اصلاحات ارائه شده‌ی آنیل و ریزه (۱۹۹۹) پذیرفته است. [۹] این اصلاح شامل اعمال ضریب α در روابط پیشنهادی توسط پژوهشگران مختلف است. در جدول ۳، f_{des} مقاومت جداره کاهش یافته توصیه شده جهت طراحی و در جدول ۴ نسبت E_M/E_R براساس RQD آمده است.

سیدل و هابرفیلد (۱۹۹۴) یک مدل تئوری از زبری سطح مشترک با در نظر گرفتن سختی قائم ثابت در سطح مشترک جداره را توسعه دادند. زبری با استفاده از یک روش

جدول ۵. ضرایب کاهش شیوه‌ی ساخت η_c . [۲]

η_c	روش ساخت
	ساخت بدون گل حفاری
۱/۰	• بهترین تجربه و سطح کنترل بالای اجرا (برای مثال، دیواره‌ی شمع عاری از آلودگی و دست‌خوردگی سنگ)؛
۰/۹-۰/۳	• تجربه‌ی ضعیف و سطح کنترل کیفیتی پایین اجرا (برای مثال، دیواره شمع آلوده و سنگ دست‌خورده).
	ساخت تحت گل بنتونیتی
۰/۹-۰/۷	• بهترین تجربه و سطح کنترل بالای اجرا (برای مثال، دیواره‌ی شمع عاری از آلودگی و دست‌خوردگی سنگ)؛
۰/۶-۰/۳	• تجربه ضعیف و سطح کنترل کیفیتی پایین اجرا (برای مثال، دیواره‌ی شمع آلوده و سنگ دست‌خورده).
	ساخت تحت گل پلیمری
۱/۰-۰/۹	• بهترین تجربه و سطح کنترل بالای اجرا (برای مثال، دیواره‌ی شمع عاری از آلودگی و دست‌خوردگی سنگ)؛
۰/۸	• تجربه‌ی ضعیف و سطح کنترل کیفیتی پایین اجرا (برای مثال، دیواره شمع آلوده و سنگ دست‌خورده).

این نسبت به تدریج از سهم باربری کف شمع کاسته و به سهم باربری جدار افزوده می‌شود. در شکل ۴، این روند به خوبی مشخص است.

در شرایطی که مدول سختی سنگ بالاتر از مدول شمع است، تقریباً تمام بار وارده، وقتی طول شمع از ۴ برابر قطر آن بزرگ‌تر باشد، از طریق مقاومت جداره تأمین می‌شود. وقتی این نسبت به ۵ می‌رسد، مقاومت کف به شدت کاهش می‌یابد

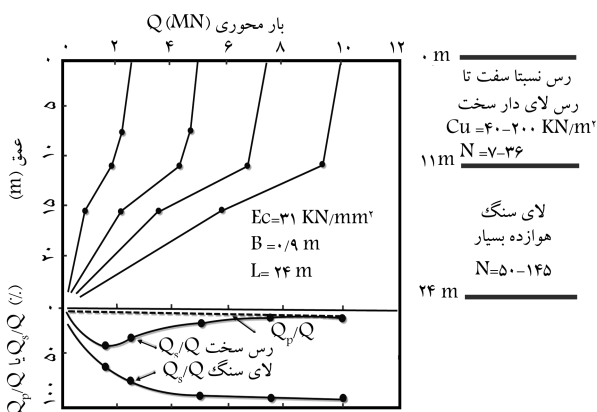
صورت روابط ۹ و ۱۰ تعیین شود: [۱۱]

$$SRC = \eta_c \frac{n}{1+v} \frac{\Delta r}{d_s} \quad (9)$$

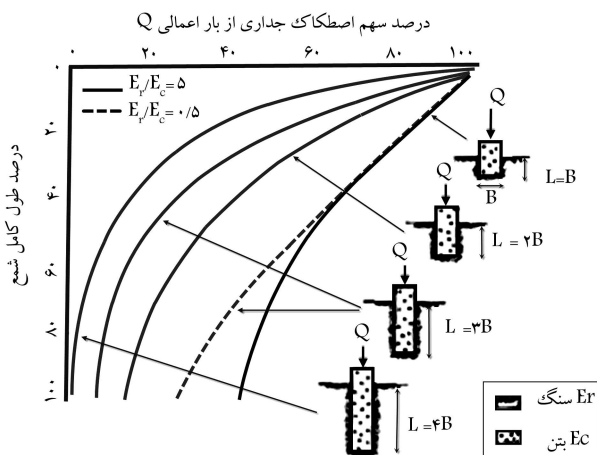
$$q_s = (SRC)q_u \quad (10)$$

η_c ضریب کاهش شیوه‌ی ساخت، مطابق جدول ۵؛ n نسبت مدول توده‌ی سنگ به مقاومت فشاری تک محوری سنگ سالم، (E_M/q_u) ؛ v نسبت پواسون؛ Δr ارتفاع متوسط زبری‌ها؛ d_s قطر شمع مستقر در سنگ.

به‌کاربردن SRC در طراحی، نیازمند تخمینی از زبری شمع بر حسب Δr است. همان‌طور که برخی پژوهشگران اشاره کرده‌اند، اندازه‌گیری معتبر و قابل قبولی از زبری‌ها در طراحی‌های معمول، ممکن نیست. با این وجود ضریب SRC، پارامترهای مهم تأثیرگذاری همچون مدول توده‌ی سنگ، نسبت پواسون و مقاومت سنگ سالم را در مقاومت جداره در نظر گرفته است و چارچوبی را برای لحاظ کردن زبری جداره و اثرات ساخت فراهم می‌کند. [۱۲] اونیل و همکاران (۱۹۹۶) [۹] نیز اشاره داشته‌اند که زبری می‌تواند به شکل تقریبی با استفاده از کولیس‌های الکترونیکی یا مکانیکی گمانه‌ها تعیین شود.



شکل ۳. نمونه‌ی از توزیع نیرو در جداره و نوک شمع مستقر در سنگ. [۱۳]



شکل ۴. توزیع تنش در کف شمع و رابطه‌ی آن با نسبت طول به قطر. [۱۴]

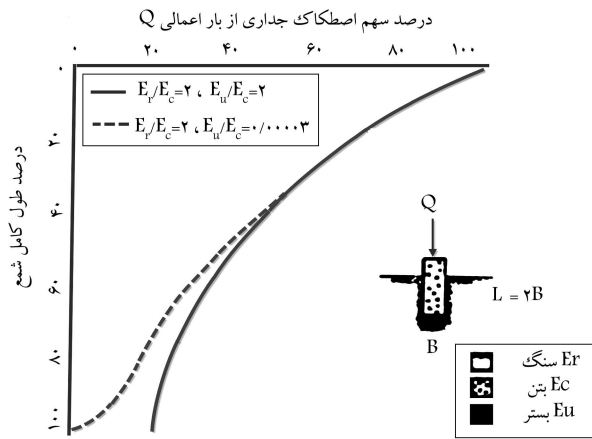
۲.۲. عوامل مؤثر در ظرفیت باربری شمع

شکل ۳، نتایج بارگذاری تعدادی از شمع‌های اجراشده در سنگ را نشان می‌دهد. این شمع‌ها از سنگ‌های سیلتی - رسی سخت عبور کرده و در یک سنگ سیلتی بسیار هوازده فرو رفته‌اند. این نتایج، عملکرد کلی شمع‌های اجراشده در سنگ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور، توزیع غیرخطی بار به وضوح دیده می‌شود و قسمت اعظمی از بار توسط سنگ سخت‌تر تحمل می‌شود. نکته‌ی قابل توجه دیگر سهم اندک ظرفیت نوک شمع در مقدار باربری آن است. [۱۳]

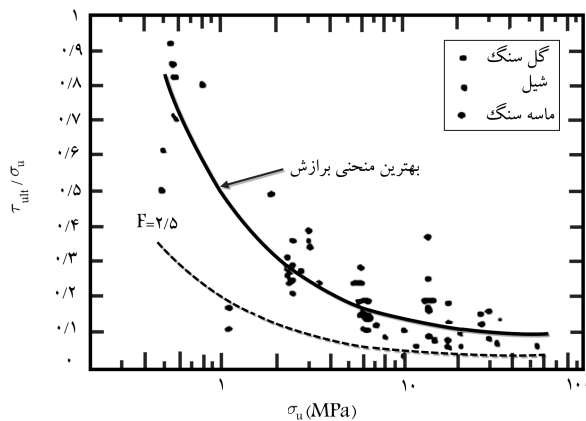
عملکرد شمع‌های اجراشده در سنگ توسط مطالعات آزمایشگاهی، کارهای عددی و همچنین آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس بررسی شده است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که این فاکتورها تأثیر باربری در ظرفیت باربری و میزان نشست شمع‌ها دارند. [۱]

۱.۲.۲. هندسه‌ی شمع

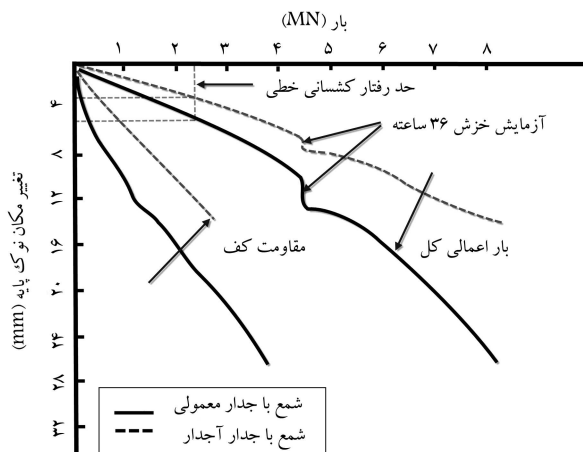
نسبت طول به قطر شمع، به‌عنوان هندسه‌ی شمع تعریف می‌شود. هندسه‌ی شمع اجراشده در سنگ تأثیر مشخصی در ظرفیت باربری شمع خواهد داشت. با افزایش



شکل ۵. تأثیر مدول سنگ کف شمع در توزیع تنش در کف. [۱۴]



شکل ۶. رابطه‌ی بین مقاومت فشاری سنگ و مقاومت جداری شمع. [۱۴]



شکل ۷. نمودار بار - جابجایی برای شمع با شرایط جداری سنگی صاف و جداری شیاردار. [۷]

شمع در محدوده‌ی کشسان، به علت ایجاد شیارها نشان می‌دهد. اما کاهش عمده در جابجایی نهایی واضح است. به‌طور کلی، تأثیر شیارها در کاهش گسیختگی ترد است. [۱۶]

از دیگر آثار مشخص در مقاومت برشی جداری شمع، وجود مواد سست باقیمانده و گل بتونیت در دیواره‌های شمع است. باقیمانده‌های سست حفاری را

و هنگامی که این نسبت به ۸ می‌رسد، مقاومت کف نزدیک به صفر می‌شود. ولی با کاهش نسبت طول به قطر شمع، سهم باربری اصطکاک جداری نیز کاهش می‌یابد. عمق استقرار بهینه‌ی شمع درون سنگ، ۳ برابر قطر شمع معرفی شده است. [۱۴]

۲.۲.۲. مدول سختی سنگ

همان‌طور که گفته شد، مقاومت جداری شمع مستقر در سنگ به مقدار تنش عمودی اعمال شده بر سطح جانبی شمع وابسته است. بزرگی این نیروی عمودی نیز مستقیماً تحت تأثیر سختی سنگ اطراف شمع قرار دارد. شکل ۴، توزیع برش در جداری شمع را نشان می‌دهد. هنگامی که سنگ مدول بالاتری نسبت به بتن دارد ($E_r/E_c = 5$)، تنش قائم زیادی بر روی جداری شمع وارد می‌شود و شمع کاملاً تحت فشار همه‌جانبه قرار می‌گیرد، بنابراین سهم زیادی از بار توسط قسمت بالایی شمع تحمل می‌شود. بر عکس، زمانی که مدول سختی بتن بالاتر از مدول سختی سنگ باشد ($E_r/E_c = 0.5$)، تنش قائم بر روی جداری شمع کاهش و سهم قسمت جداری از ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. [۱۵]

همچنین، توزیع تنش در طول شمع تحت تأثیر سنگ بستری قرار دارد، که نوک شمع بر آن متکی است. اگر سنگ بستری دارای مدول سختی پایینی باشد، آن‌گاه بخش بسیار اندک و ناچیزی از باربری را به عهده خواهد داشت. در شکل ۵، توزیع تنش در شمع برای دو نسبت مدول متفاوت در حالت سنگ بستر ضعیف، نشان داده شده است.

۳.۲.۲. مقاومت سنگ

اصطکاک جداری شمع مستقر در سنگ و همچنین باربری نوک شمع به مقاومت سنگ وابسته است. با افزایش مقاومت سنگ، جداری شمع قادر خواهد بود که نیروی بیشتری را تحمل کند. زمانی که مقاومت سنگ از مقاومت بتن بیشتر باشد، مقاومت برشی بتن تعیین‌کننده خواهد بود. در شکل ۶، نتایج بارگذاری یک شمع در مقیاس واقعی آورده شده است. در این نمودار خط پر، رابطه‌ی بین متوسط تنش برشی نهایی (τ_{ult}) ایجاد شده در دیواره‌های پیرامونی و مقاومت تک‌محوری سنگ (q_u) را نشان می‌دهد و خط چین همان رابطه را با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۲/۵ رسم کرده است. به‌طور کلی، ظرفیت باربری نوک شمع علاوه بر مقاومت سنگ به وضعیت قرارگیری نوک شمع نیز وابسته است. برای مثال اگر انتهای شمع بر سطح زمین قرار گیرد، آن‌گاه خرابی در اثر ایجاد گسیختگی در گوشه‌ی شمع و در نتیجه، چرخش سازه خواهد بود. در صورتی که عمق مدفون شمع بیش از ۲ برابر قطر باشد، گسیختگی سوراخ‌کننده محتمل‌تر خواهد بود. [۱]

۴.۲.۲. شرایط جداری‌های پیرامونی

مطالعات آزمایشگاهی در مورد رفتار برشی سنگ و بتن در تقابل با یکدیگر حاکی از آن است که ایجاد شیارهایی بر روی سطح سنگ، منجر به مقاومت بیشینه و همچنین مقاومت نهایی بالاتر در مقایسه با جدار با سطح صاف می‌شود. نتایج مشابهی را می‌توان در آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس که توسط هرواث (۱۹۸۳) انجام شده است، مشاهده کرد (شکل ۷). این آزمایش در یک گل سنگ بسیار ضعیف با مقاومت تک‌محوری در حدود ۷ مگاپاسکال و مقدار RQD در محدوده‌ی ۲۹٪ تا ۸۸٪ اجرا شد. در این آزمایش لایه‌های رسی به ضخامت ۳۷ میلی‌متر وجود داشت. قطر شمع مورد آزمایش ۷۱ میلی‌متر و طول آن ۱۳۷ میلی‌متر است. حفاری در سنگ به وسیله‌ی مته انجام شده است، تا سطحی صاف و نرم در دیواره ایجاد شود. در نیمی از آزمایش‌ها شیارهایی با عمق ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متر و طولی در حدود ۳۰ میلی‌متر در راستای محوری ایجاد شده است. نمودار بار - جابجایی این آزمایش‌ها در شکل ۷ رسم شده است. نمودارها کاهش اندکی را در جابجایی

می‌توان با استفاده از جت آب شستشو داد، ولی از بین بردن گل حفاری بسیار مشکل است. هنگامی که برای پایداری جداره‌ها از گل حفاری استفاده شود، این گل به‌طور مشخص در لایه‌های بین دیواره‌های سنگی و بتن قرار خواهد گرفت. در یک آزمایش انجام شده بر روی گل سنگ، ضخامت گل حفاری در حدود ۴۰ میلی‌متر دیده شده است. ولی در دیگر موارد، معمولاً یک لایه‌ی نازک گل بین دیواره‌های سنگی و بتن قرار دارد که اثر آن قابل صرف‌نظر کردن است.^[۱۷]

۳. اطلاعات موارد عملی

به منظور تحلیل، بررسی و سنجش کفایت و دامنه‌ی اعتبار روابط ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف جهت تعیین ظرفیت باربری جداره‌ی شمع‌های متکی بر سنگ و ارائه‌ی رابطه‌ی پیشنهادی مناسب، و با توجه به اهمیت و کارایی آزمایش‌های بارگذاری و کمک آن‌ها به پیشرفت و تکامل هرچه بیشتر روابط تحلیلی و تجربی و نیز استفاده از آن‌ها در طراحی‌ها و پایین آوردن هزینه‌ها، در این پژوهش با گردآوری موارد عملی متعدد و متفاوت، یک بانک اطلاعاتی تشکیل شده است. در این بانک اطلاعات از منابع مختلف، تعداد ۶۳ مورد شمع درجای متکی بر سنگ، که بر روی آن‌ها آزمایش‌های بارگذاری استاتیکی در دهه‌های گذشته و سال‌های اخیر در کشورهای مختلف انجام شده و پارامتر مقاومت فشاری محدود نشده‌ی سنگ باربر در آن‌ها موجود است، جمع‌آوری و براساس نوع سنگ باربر، تفکیک و تدوین شده است. سنگ‌های باربر این شمع‌ها از انواع سنگ آهک، لای سنگ، گل سنگ، شیل، ماسه سنگ، گرانیت، دیاباز، گرانودیورایت، سنگ آهک سفید و برشا هستند که در این میان تعداد ۳۰ مورد سنگ آهک، ۸ مورد لای سنگ، ۷ مورد گل سنگ، ۶ مورد شیل، ۷ مورد گرانیت و ۵ مورد سنگ‌های دیگر است. خلاصه‌ی مشخصات موارد عملی شامل مقاومت جدار حاصل از آزمایش بارگذاری، عمق استقرار درون سنگ و مقاومت فشاری محدود نشده با توجه به نوع سنگ در جدول ۶، و اطلاعات مربوط به ۵ مورد عملی دیگر با معلوم بودن شاخص RMR، جهت مطالعه‌ی آثار توده‌ی سنگ در ظرفیت جدار در جدول ۷ ارائه شده است.

۴. بررسی تحلیلی و آماری روابط پژوهشگران مختلف در

تعیین ظرفیت جداره‌ی شمع‌ها به کمک موارد عملی

روابط خطی و توانی مطرح شده توسط برخی پژوهشگران مختلف، که مقاومت جدار را به مقاومت فشاری محدود نشده‌ی سنگ مرتبط می‌سازد، به طور خلاصه در جدول ۸ ارائه شده است. این روابط به‌طور مجزا برای سنگ‌هایی که براساس بانک اطلاعات تفکیک شده‌اند، با بردن بر روی نمودار و مقایسه‌ی نتایج حاصل از این روابط با نتایج حاصل از آزمایش‌های بارگذاری، مطابق شکل‌های ۸ الی ۱۲، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. با توجه به شکل ۸، در سنگ‌های آهکی از میان روابط توانی، رابطه‌ی پیشنهادی هروث و کنی (۱۹۷۹) به‌طور مناسب و اندکی دست‌پایین و رابطه‌ی ویلیامز و همکاران (۱۹۸۰) اندکی دست بالا، و همچنین رابطه‌ی میغ و وُلشی (۱۹۷۹) برای سنگ‌های با مقاومت فشاری محدود نشده کم‌تر از ۱۰ مگاپاسکال، سازگاری بهتری را با واقعیت نشان داده‌اند. اما در خصوص روابط خطی، هیچ‌کدام از روابط با واقعیت سازگار نیستند و نتایج بسیار دست‌بالایی را ارائه می‌دهند. در نهایت، رابطه‌ی پیشنهادی این نوشتار برای سنگ‌های آهکی با استفاده از داده‌های

حاصل از آزمایش‌های بارگذاری درجا و برآزش مناسب‌ترین منحنی از آنها به صورت $r_s = 0.7407 q_u^{0.27}$ تعیین شده است.

با مراجعه به شکل ۹ در لای سنگ، رابطه‌ی هروث و کنی (۱۹۷۹) کمی دست‌پایین، اما بسیار نزدیک به واقعیت و رابطه‌ی میغ و وُلشی (۱۹۷۹) نیز دست‌بالاست؛ در حالی‌که هیچ‌یک از روابط خطی روند مناسبی را نشان نداده‌اند. رابطه‌ی پیشنهادی این پژوهش با استفاده از داده‌های آزمایش بارگذاری، به صورت $r_s = 0.7244 q_u^{0.46}$ به دست آمد. همان‌طور که از شکل ۱۰ مشخص است، در مورد گل سنگ نیز روابط توانی نسبت به روابط خطی مناسب‌تر است و در میان این روابط نیز، رابطه‌ی هروث و کنی (۱۹۷۹) و پس از آن میغ و وُلشی (۱۹۷۹) به واقعیت نزدیک‌تر است، بهترین رابطه‌ی پیشنهادی در گل سنگ $r_s = 0.7184 q_u^{0.61}$ است. با رجوع به شکل‌های ۱۱ و ۱۲، نیز مناسب‌ترین رابطه برای شیل و به ویژه گرانیت، مربوط به هروث و کنی (۱۹۷۹) است و از برآزش بهترین منحنی بر داده‌های تست بارگذاری، رابطه‌ی پیشنهادی $r_s = 0.7069 q_u^{0.57}$ برای شیل و $r_s = 0.7214 q_u^{0.53}$ برای گرانیت حاصل شده است.

در مجموع روابط توانی در مقایسه با روابط خطی نتایج مناسب‌تری داشته است، و روابط خطی در حالت کلی نشان‌دهنده‌ی تخمین‌های دست‌بالایی از مقاومت جداره‌ی شمع‌ها هستند. همچنین از میان همه‌ی روابط مربوط به پژوهشگران مختلف، رابطه‌ی هروث و کنی (۱۹۸۳)^[۱۷] در مورد تمامی سنگ‌ها سازگاری بهتری را با واقعیت نشان می‌دهد و نسبت به روابط سایرین، پاسخ نزدیک‌تری را ارائه می‌کند. روابط پیشنهادی در این پژوهش برای انواع سنگ‌های مورد بررسی جهت تعیین ظرفیت باربری جدار شمع‌های متکی بر سنگ با توجه به نمودارهای حاصل در جدول ۹ خلاصه شده است.

در ادامه، برای بررسی بیشتر روابط پژوهشگران مختلف بر مبنای ۵۸ مورد عملی، یک کار آماری صورت گرفته است، که در آن نتایج حاصل از تعیین مقاومت جدار موارد عملی توسط روابط عنوان شده نسبت به مقاومت جدار واقعی اندازه‌گیری شده از تست‌های بارگذاری مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته و نمودارهای حاصل در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

در این نمودارها، خط قطری نشان‌دهنده‌ی بهترین تخمین و مهم‌ترین میزان تمایل به مرکزیت نمونه یا همان میانگین نمونه است. خطوط نقطه‌چین نشان‌دهنده‌ی محدوده‌ی خطایی به میزان $\pm 20\%$ است. مقدار میانگین در واقع یک شاخص اولیه برای شناسایی تمایل روش مورد نظر به تخمین دست‌بالا یا دست‌پایین است. ممکن است مقدار میانگین دو دسته از داده‌ها با یکدیگر برابر باشد، اما محدوده‌ی تغییرات آنها بسیار با هم متفاوت باشد؛ به همین دلیل از انحراف معیار به عنوان شاخصی از میزان پراکندگی یا گسترش داده‌ها استفاده می‌شود. انحراف معیار در واقع نشان‌دهنده‌ی میزان پراکندگی موجود در تخمین‌ها نسبت به مقدار میانگین است.

با مراجعه به شکل ۱۳ و نتایج به دست آمده، از مقاومت جدار موارد عملی با استفاده از رابطه‌ی توانی ارائه شده‌ی هروث و کنی (۱۹۷۹) در قیاس با مقاومت جدار واقعی از آزمایش‌های بارگذاری، مقدار میانگین برابر ۰/۹۲ و پراکندگی ۰/۴۵ حاصل شد که نشان‌دهنده‌ی این است که این رابطه، تخمینی مناسب با نتایج قابل قبول و سازگار با واقعیت ارائه می‌کند. نتایج مقاومت جدار پیش‌بینی شده به کمک رابطه‌ی ویلیامز و همکاران (۱۹۸۰) در مقایسه با مقاومت جدار واقعی با مقدار میانگین ۱/۳۳ و پراکندگی ۰/۶۳ و همچنین رابطه‌ی توانی میغ و وُلشی (۱۹۷۹) با میانگین ۱/۳۳ و انحراف معیار ۰/۶۹ در مقام دوم قرار گرفته است و تخمین کمی دست‌بالا ارائه می‌دهند. با استفاده از روابط رزینرگ و ژورنیوکس (۱۹۷۶) با میانگین ۱/۵۷ و انحراف معیار ۰/۷۷ و رو و آرمیتاز (۱۹۸۴) با میانگین ۲/۰۲ و

جدول ۶. خلاصه‌ی مشخصات موارد عملی [۳]

شماره‌ی مورد گردآوری‌شده	نوع سنگ	مقاومت فشاری محدود نشده سنگ (MPa)	عمق استقرار درون سنگ (m)	مقاومت واحد جدار حاصل از تست بارگذاری (MPa)
۱	[۱۸]	۲,۳	۲,۴۵	۰,۳۹
۲	[۱۸]	۶,۷۱	۱	۱,۲
۳	[۱۸]	۴,۴۱	۱,۲	۰,۷۱
۴	[۱۸]	۱,۷۲	۱,۱	۰,۴۸
۵	[۱۸]	۳,۵۵	۳,۱	۰,۶۹
۶	[۱۸]	۴,۵۵	۳,۷	۰,۸۲
۷	[۱۸]	۲,۵	۲,۵	۰,۴
۸	[۱۸]	۴۳,۶	۵	۲,۳۴۳
۹	[۱۸]	۴۷,۲	۵	۰,۹۱۶
۱۰	[۱۸]	۴۷,۲	۵	۲,۲۷۸
۱۱	[۱۸]	۲۵	۲,۸	۰,۷۵
۱۲	[۱۸]	۵۴	۲,۸	۱,۵
۱۳	[۱۸]	۲۹	۲,۳	۱
۱۴	[۱۸]	۵۴	۲,۳	۱,۸۸
۱۵	[۱۸]	۵۱	۳,۳	۱,۹۲
۱۶	[۱۸]	۵۰	۲	۱,۴۵۵
۱۷	[۱۸]	۵۱	۲,۷	۱,۶۲
۱۸	[۱۸]	۵۱	۳,۱۵	۱,۲۷
۱۹	[۱۸]	۵۰	۲	۱,۹۵
۲۰	[۱۸]	۵۱	۱,۷۵	۱,۶۷
۲۱	[۱۸]	۵۰	۲,۱	۰,۵
۲۲	[۱۸]	۵۰	۰,۲	۲
۲۳	[۱۸]	۵۰	۱,۶	۱,۳
۲۴	[۱۸]	۱۶	۳	۰,۹۱
۲۵	[۱۸]	۱۶	۳	۰,۹۷۵
۲۶	[۱۸]	۲۵	۳	۰,۹۹۵
۲۷	[۱۸]	۲۵	۳	۰,۹۹۵
۲۸	[۱۸]	۴۰	۰,۵	۳
۲۹	[۱۸]	۵۰	۰,۵	۱,۵
۳۰	[۱۸]	۷,۵	۵,۲۵	۱,۲۴
۳۱	[۱۸]	۶,۵	۵,۸	۰,۸۵۵
۳۲	[۱۸]	۶	۱۰	۰,۵۶
۳۳	[۱۸]	۷	۶,۸	۰,۶
۳۴	[۱۸]	۹	۱۱,۵	۰,۸
۳۵	[۱۸]	۹	۷,۳	۰,۷
۳۶	[۱۸]	۳,۵	۲,۵	۰,۳۹
۳۷	[۱۸]	۶,۵	۳	۰,۶۲
۳۸	[۱۸]	۲۰	۲,۴۱	۰,۹۷۷
۳۹	[۱۸]	۶,۵	۵,۸	۰,۸۵۵
۴۰	[۱۸]	۱۶	۳	۰,۹۱
۴۱	[۱۸]	۱۶	۳	۰,۹۷۵
۴۲	[۱۸]	۲۵	۳	۰,۹۹۵
۴۳	[۱۸]	۲۵	۳	۰,۹۹۵
۴۴	[۱۸]	۴۰	۰,۵	۳
۴۵	[۱۸]	۱,۱	۱	۰,۱۸۴

ادامه جدول ۶.

شماره‌ی مورد گردآوری شده	نوع سنگ	مرجع	مقاومت فشاری محدود نشده سنگ (MPa)	عمق استقرار درون سنگ (m)	مقاومت واحد جدار حاصل از تست بارگذاری (MPa)
۴۶	Shale	[۱۸]	۲۱٫۱	۰٫۹۱	۱٫۷۲
۴۷		[۷]	۱۱٫۱	۱٫۴	۱٫۱۱
۴۸		[۷]	۱۰٫۴	۱٫۴	۱٫۰۹
۴۹		[۷]	۱۵٫۲	۰٫۹	۰٫۸۳
۵۰		[۱۸]	۲۱	۱٫۳	۱٫۲۶
۵۱		[۱۸]	۱۲٫۲	۳٫۳۵	۰٫۲۴۲
۵۲	Granite	[۱۸]	۵۰	۱٫۵	۲٫۰۱۵
۵۳		[۱۸]	۵۰	۱٫۲	۱٫۷
۵۴		[۱۸]	۱۰	۳٫۶	۰٫۶۱
۵۵		[۱۸]	۲۸٫۸	۲٫۵	۰٫۹۶
۵۶		[۱۸]	۳۸	۳	۱٫۲۱
۵۷		[۱۸]	۷	۰٫۸	۰٫۶۹۵
۵۸		[۱۸]	۱۲٫۵	۱	۰٫۸

جدول ۷. موارد عملی جهت مطالعه اثرات توده‌ی سنگ روی ظرفیت جدار. [۳]

شماره‌ی مورد گردآوری شده	نوع سنگ	مرجع	مقاومت فشاری محدود نشده سنگ (MPa)	عمق استقرار درون سنگ (m)	RMR	مقاومت جدار حاصل از تست بارگذاری (MPa)
۵۹	Diabase	[۱۸]	۴۰	۲	۴۵	۰٫۸۹
۶۰	Breccia	[۱۸]	۱۵	۲٫۵	۱۰	۰٫۴۹
۶۱	Chalk	[۱۸]	۱٫۱	۸	۲۰	۰٫۱۹
۶۲	Granodiorite	[۱۸]	۶	۲٫۱	۶۵	۰٫۴۸
۶۳	Sandstone	[۱۸]	۱۱	۲٫۱۳	۸۵	۰٫۷۵۶

جدول ۸. خلاصه‌ی روابط توانی و خطی پژوهشگران مختلف.

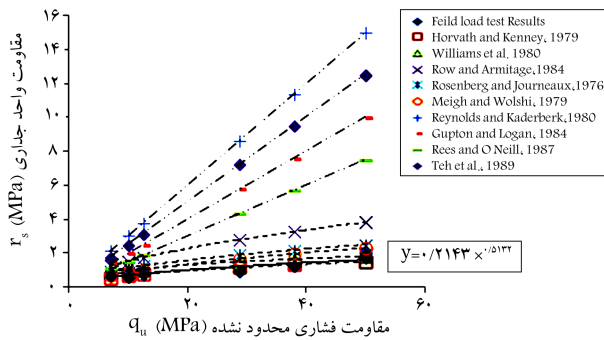
شیوه‌ی طراحی	روابط توانی ارائه شده
[۷]	$r_s = 0.21 q_u^{0.5}$
[۱۴]	$r_s = 0.44 q_u^{0.26}$
[۶]	$r_s = 0.41 q_u^{0.57}$
[۱۸]	$r_s = 0.34 q_u^{0.51}$
[۱۸]	$r_s = 0.22 q_u^{0.60}$
شیوه‌ی طراحی	روابط خطی ارائه شده
[۱۸]	$r_s = 0.30 q_u$
[۱۸]	$r_s = 0.20 q_u$
[۹]	$r_s = 0.15 q_u$
[۱۸]	$r_s = 0.25 q_u$

r_s : مقاومت واحد جدار شمع متکی بر سنگ (MPa)
 q_u : مقاومت فشاری محدود نشده سنگ (MPa)

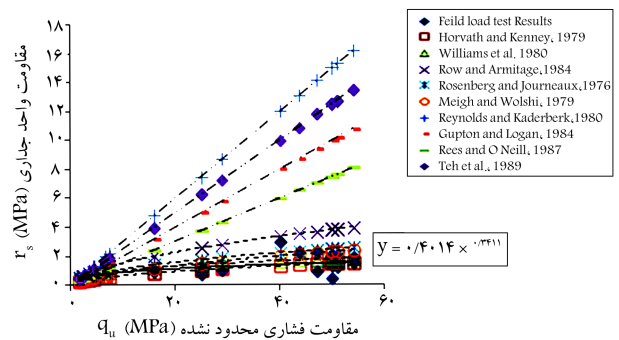
جدول ۹. خلاصه‌ی روابط پیشنهادی.

رابطه‌ی پیشنهادی	نوع سنگ	مقاومت جدار
$r_s = 0.407 q_u^{0.327}$	سنگ آهک	
$r_s = 0.244 q_u^{0.496}$	لای سنگ	
$r_s = 0.184 q_u^{0.621}$	گل سنگ	مقاومت جدار
$r_s = 0.069 q_u^{0.957}$	شیل	
$r_s = 0.214 q_u^{0.513}$	گرانیت	

r_s : مقاومت واحد جدار شمع متکی بر سنگ (MPa)
 q_u : مقاومت فشاری محدود نشده سنگ (MPa)

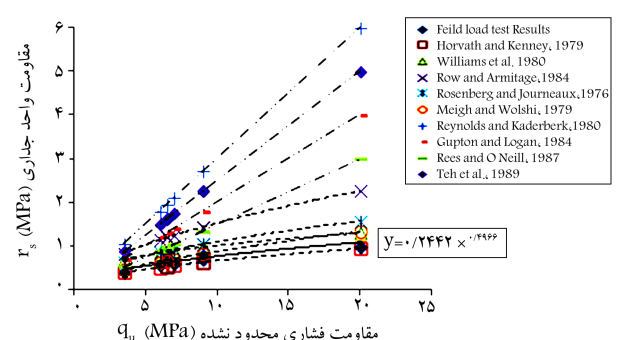


شکل ۸. بررسی روابط توانی و خطی ظرفیت جداري شمع در برابر مقاومت فشاري محدود نشده ي سنگ آهک.



شکل ۹. بررسی روابط توانی و خطی ظرفیت جداري شمع در برابر مقاومت فشاري محدود نشده ي لای سنگ.

انحراف معیار ۰٫۹۸، مقاومت‌های جداري دست بالا تخمین زده می‌شوند. به همین ترتیب روابط خطی ریز و اونیبل (۱۹۸۷) و گاپتون و لوگان (۱۹۸۴) و توه و همکاران (۱۹۸۹) به ترتیب با مقادیر میانگین ۳٫۱۹ و ۴٫۲۵ و ۵٫۳۲ و انحراف معیار ۲٫۳۶ و ۳٫۱۵ و ۳٫۹۴، و در مجموع رابطه‌ی رینولدز و کادربرک (۱۹۸۰) با بیشترین مقدار میانگین و پراکندگی داده‌ها به ترتیب برابر ۶٫۳۸ و ۴٫۳۷ پیش‌بینی‌های بسیار دست بالا و خلاف واقع فراهم کرده است و نامناسب هستند. با توجه به نتایج حاصل از کارهای آماری و نمودارهای مرتبط و مقایسه‌ی آنها، همان‌طور که گفته شد، به نظر می‌رسد به دلیل کم‌تر بودن مقدار میانگین نسبت مقاومت جدار تخمینی به مقاومت جدار واقعی از تست بارگذاری و همچنین پراکندگی (SD) آن، رابطه‌ی ارائه‌شده‌ی هرواث و کنی (۱۹۷۹) نسبت به سایر روابط بررسی‌شده پاسخ مناسب‌تری ارائه می‌دهد و دارای اعتبار بیشتری است.



شکل ۱۰. بررسی روابط توانی و خطی ظرفیت جداري شمع در برابر مقاومت فشاري محدود نشده ي لای سنگ.

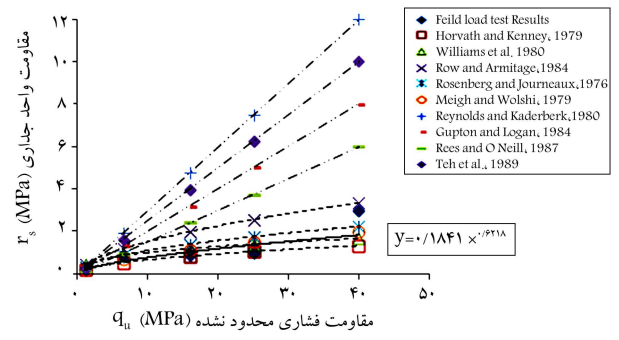
۵. رابطه‌ی پیشنهادی

به‌منظور به‌دست‌آوردن یک رابطه‌ی کلی بدون در نظر داشتن نوع سنگ‌های باربر و تفکیک آنها، با استفاده از کل داده‌های جمع‌آوری‌شده‌ی مقاومت جداري شمع‌ها حاصل از تست‌های بارگذاری انجام‌شده روی شمع‌های متکی بر سنگ، یک رابطه‌ی تجربی جهت تعیین مقاومت جدار بر حسب مقاومت فشاري محدود نشده‌ی سنگ ارائه شده است. این رابطه در مواردی که فقط پارامتر مقاومت فشاري محدود نشده‌ی سنگ باربر مشخص است و مطالعات زمین‌شناسی جهت تعیین نوع سنگ موجود نیست یا ناقص و با تردید همراه است، که می‌تواند در تخمین اولیه‌ی ظرفیت باربری جدار شمع متکی بر سنگ تأثیرگذار باشد. در شکل ۱۴، نمودار مقاومت جدار شمع بر حسب مقاومت فشاري محدود نشده از داده‌های بانک اطلاعات ترسیم شده است. با برآزش مناسب‌ترین منحنی از این داده‌ها، رابطه‌ی توانی ۱۱ برای مقاومت جدار شمع‌های متکی بر سنگ حاصل شده است.

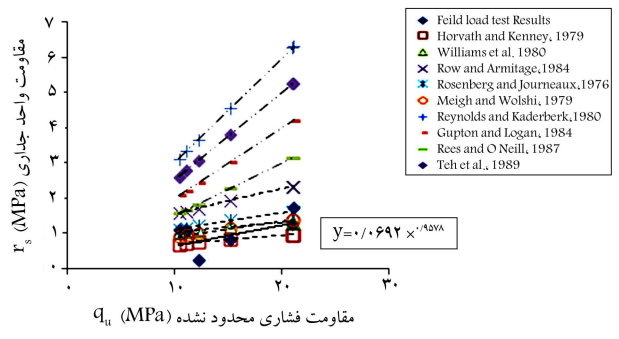
$$r_s = 0.31 q_u^{0.21} \quad (11)$$

که در آن، r_s مقاومت واحد جدار شمع متکی بر سنگ (MPa)؛ q_u مقاومت فشاري محدود نشده‌ی سنگ (MPa).

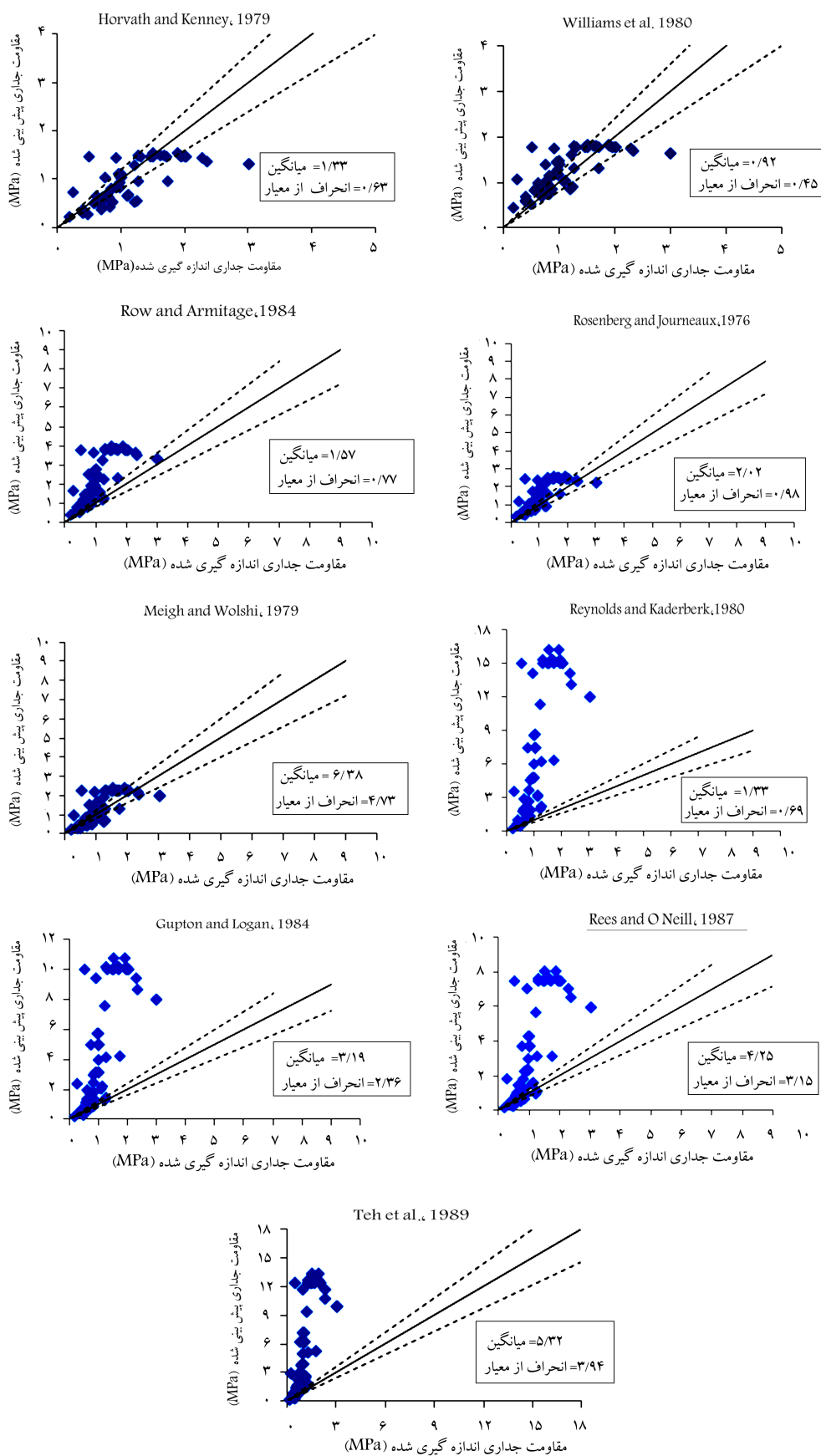
از آنجایی که شمع‌های متکی بر سنگ بر روی توده‌ی سنگ (مجموعه‌ی بلوک‌های سنگ سالم، که توسط ناپیوستگی‌هایی در کنار هم قرار دارند) و نه فقط روی سنگ سالم قرار دارند، بنابراین نمی‌توان فقط از خواص سنگ سالم جهت تعیین ظرفیت باربری جدار استفاده کرد و باید تأثیر ناپیوستگی و خواص توده‌ی سنگ را



شکل ۱۱. بررسی روابط توانی و خطی ظرفیت جداري شمع در برابر مقاومت فشاري محدود نشده ي گل سنگ.



شکل ۱۲. بررسی روابط توانی و خطی ظرفیت جداري شمع در برابر مقاومت فشاري محدود نشده ي شیل.



شکل ۱۳. نمودارهای بررسی آماری روابط تعیین ظرفیت جدار.

که در آن، E_M مدول معادل توده‌ی سنگ؛ E_R مدول سنگ سالم است.

براساس مطالعات انجام‌شده توسط پژوهشگران مکانیک سنگ و مهندسی سنگ، در مورد استفاده از ضریب کاهش مدول کسسان برای تخمین ضریب کاهش مقاومت فشاری محدودنشده، ارتباطی مابین نسبت مقاومت‌های فشاری محدودنشده‌ی توده‌ی سنگ به سنگ سالم و نسبت مدول‌های کسسان توده‌ی سنگ به سنگ سالم به شکل معادله‌ی ۱۵ عنوان می‌شود:^[۱]

$$\frac{q_u(Modified)}{q_u} = \left(\frac{E_M}{E_R}\right)^n = (\alpha_E)^n \quad (15)$$

توان n از ۰/۵ تا ۱/۰ متغیر است و در بیشتر موارد مابین ۰/۶۱ تا ۰/۷۴ قرار دارد. در صورت استفاده از مقدار میانگین $n = ۰/۷$ ، مقاومت فشاری محدودنشده‌ی اصلاح‌شده به صورت رابطه‌ی ۱۶ قابل تعیین است:

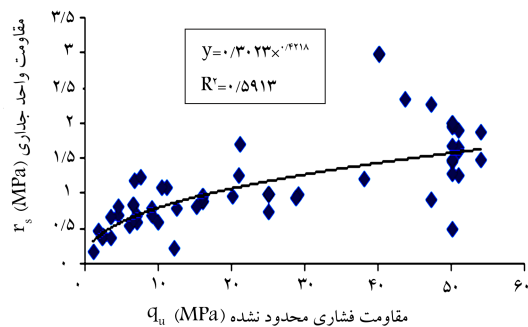
$$q_u(Modified) = (\alpha_E)^{0.7} \cdot q_u \quad (16)$$

که در آن، عبارت $(\alpha_E)^{0.7}$ همان ضریب اصلاح مقاومت فشاری محدودنشده‌ی R_f در رابطه‌ی ۱۳، جهت لحاظ‌کردن اثرات خصوصیات توده‌ی سنگ در تعیین ظرفیت‌های باربری است و پارامتر α_E نیز مطابق کولهاوی (۱۹۷۸) به صورت رابطه‌ی ۱۷ مشخص می‌شود:^[۱۷]

$$\alpha_E = 0.1 + \frac{RMR}{1150 - 11.4RMR}, \quad 0 < RMR < 92 \quad (17)$$

به منظور بررسی دقت ناشی از اعمال ضریب اصلاحی پیشنهادی این پژوهش، برای مقاومت فشاری محدودنشده‌ی سنگ، که جهت لحاظ‌کردن خصوصیات توده‌ی سنگ در تعیین ظرفیت باربری جدار شمع‌های متکی بر سنگ در نظر گرفته شده است، از تعداد ۵ عدد مورد عملی که در آن‌ها شمع‌های متکی بر سنگ تحت تست بارگذاری درجا با اندازه‌گیری مقاومت‌های جدار قرار گرفته و پارامتر تعیین‌کننده‌ی RMR از توده‌ی سنگ در آن‌ها گزارش شده است، استفاده شده است. اطلاعات این ۵ مورد در جدول ۷ بانک اطلاعات آورده شده است. ابتدا توسط روابط پیشنهادی این پژوهش ظرفیت‌های باربری جدار بدون در نظر گرفتن شاخص RMR و سپس با احتساب ضریب اصلاح و شاخص RMR محاسبه و نتایج حاصل با ظرفیت باربری جدار اندازه‌گیری‌شده از آزمایش بارگذاری درجا مطابق جدول ۱۰ مقایسه شده است. با توجه به جدول ۱۰، مقادیر حاصل از ظرفیت‌های جدار محاسبه‌شده بدون احتساب RMR، به علت در نظر نگرفتن تأثیر ناپیوستگی‌ها در توده‌ی سنگی نسبت به سنگ سالم و عدم کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ، تخمین‌های دست بالایی ارائه می‌دهند؛ در حالی که مقادیر به‌دست‌آمده با احتساب RMR برای همه‌ی سنگ‌های بانک اطلاعات شامل دیاباز، برشا، گچ، گرانودیوریت و ماسه سنگ، به مقدار ناچیزی دست پایین، اما بسیار نزدیک به واقعیت، که به کمک اندازه‌گیری‌های آزمایش بارگذاری حاصل شده است، می‌باشد. به طور خلاصه می‌توان گفت با توجه به اینکه رفتار مهندسی بسیاری از توده‌های سنگی تحت بارگذاری عمدتاً توسط ناپیوستگی‌ها، شکستگی‌ها، درزه‌ها، ترک‌ها، و صفحات ضعیف تعیین می‌شود، لزوم در نظرگیری اثرات توده‌ی سنگ، به علت لحاظ‌کردن شرایط واقعی و تأثیر آنها در مقاومت فشاری و نهایتاً در ظرفیت جداری، به منظور تخمین‌های دقیق و نزدیک به واقعیت واضح و میرهن است.

نتایج آزمایش بارگذاری



شکل ۱۴. نمودار مقاومت فشاری محدودنشده‌ی سنگ در مقابل مقاومت واحد جدار برای کل سنگ‌ها.

روی آن لحاظ کرد. اگر چه تأثیر خواص توده‌ی سنگ، تلویحاً و به شکل جزئی در روابط تجربی حاصل از داده‌های تست‌های بارگذاری درجا آورده شده است، ولی نمی‌توان در این روابط میزان تأثیر این عوامل را به دلیل اینکه به شکل غیرمستقیم وارد رابطه شده‌اند، به طور مشخص تعیین کرد. در نتیجه نیاز به مشارکت پارامتری است که بیان‌کننده‌ی مشخصات توده‌ی سنگ است و تفاوت‌های بین سنگ سالم و توده‌ی سنگ را مستقیماً در روابط تجربی لحاظ کند و پاسخ نزدیک به واقع‌تری حاصل از این روابط را نتیجه دهد.

مهم‌ترین شاخص طبقه‌بندی توده‌های سنگی، RMR، است که کامل‌ترین و بهترین شاخص در مشخص کردن کیفیت توده‌ی سنگ است و به منظور لحاظ‌کردن اثرات توده‌ی سنگ در مقابل سنگ سالم در روابط تجربی برای تعیین ظرفیت باربری جدار مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیستم طبقه‌بندی توده‌ی سنگ، ۵ پارامتر اساسی برای طبقه‌بندی و پارامتر ششم که بیشتر در ارزیابی موضوع پایداری جهت مسائل خاص مطرح است، را در بر می‌گیرد. این پارامترها عبارت‌اند از: مقاومت فشاری تک محوری، شاخص کیفی سنگ (RQD)، فواصل ناپیوستگی‌ها، شرایط نقاط ناپیوستگی‌ها، شرایط آب‌های زیرزمینی، و پارامتر ششم جهت ناپیوستگی‌هاست. درجه‌بندی انجام‌شده از جمع‌زدن مقادیر اختصاص یافته برای ۵ پارامتر اساسی به دست آمده است (رابطه‌ی ۱۲). درجه‌بندی RMR عددی بین ۰ و ۱۰۰ را به توده‌ی سنگ اختصاص می‌دهد.^[۱۷]

$$RMR = \sum_{i=1}^5 R_i \quad (12)$$

با توجه به موارد بالا، می‌توان برای دخیل‌کردن خصوصیات توده‌ی سنگ در روابط تجربی که بر اساس مقاومت فشاری محدودنشده‌ی سنگ است، از یک ضریب کاهش در مقاومت فشاری محدودنشده استفاده کرد. در نتیجه پارامتر مقاومت فشاری اصلاح‌شده به شکل کلی رابطه‌ی ۱۳ قابل تعیین است:

$$q_u(Modified) = R_f \cdot q_u \quad (13)$$

که در آن، $q_u(Modified)$ مقاومت فشاری محدودنشده‌ی اصلاح‌شده؛ q_u مقاومت فشاری محدودنشده‌ی سنگ سالم؛ R_f ضریب کاهش است.

در تعیین ضریب کاهش که پارامتر RMR در آن لحاظ شده باشد، رابطه‌ی ۱۴ توسط کولهاوی (۱۹۷۸) برای به دست آوردن مدول تغییرشکل (کسسان) توده‌ی سنگ مطرح شده است:

$$E_M = \left[0.1 + \frac{RMR}{1150 - 11.4RMR} \right] \cdot E_R \quad (14)$$

جدول ۱۰. مقایسه‌ی نتایج حاصل از تعیین ظرفیت باربری جدار با احتساب تأثیرات توده‌ی سنگ و بدون آن.

نوع سنگ	مرجع RMR	q_u مقاومت فشاری محدود نشده سنگ (MPa)	q_u مقاومت فشاری محدود نشده اصلاح شده سنگ (MPa)	ظرفیت محاسباتی جدار بدون احتساب	ظرفیت محاسباتی جدار با احتساب	مقاومت جدار حاصل از تست بارگذاری (MPa)
Diabase	[۱۸]	۴۰	۱۲,۳۲	۱,۴۱	۰,۸۴۷	۰,۸۹
Breccia	[۱۸]	۱۵	۳,۴۶	۰,۹۴	۰,۴۹۹	۰,۵۱
Chalk	[۱۸]	۱,۱	۰,۵۳	۰,۳۲	۰,۱۷۶	۰,۱۹
Granodiorite	[۱۸]	۶	۱,۶۴	۰,۶۵	۰,۴۳۹	۰,۴۸
Sandstone	[۱۸]	۱۱	۳,۳۹	۰,۸۳	۰,۷۰۵	۰,۷۶

۶. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، با گردآوری موارد عملی متعدد، و با استفاده از داده‌های حاصل از آنها به بررسی و تحلیل روابط ارائه‌شده‌ی پژوهشگران مختلف در تعیین ظرفیت باربری جداره‌ی شمع‌های مستقر در سنگ پرداخته شده و دامنه‌ی اعتبار آنها مورد سنجش قرار گرفته است. پارامترهای متعددی از قبیل مقاومت مصالح سنگ، ناپیوستگی‌ها، نسبت مدول بتن به سنگ، مقاومت برشی بسیج شده به وسیله‌ی اتساع، تنش‌های محصورکننده، و زبری سطح مشترک بر ظرفیت جداره‌ی شمع در سنگ تأثیرگذار هستند. در ادامه، رابطه‌ی پیشنهادی برای انواع سنگ به صورت تفکیک شده و در حالت کلی برای هر نوع سنگ بر حسب مقاومت فشاری ارائه شده است. با توجه به اینکه عملاً شمع‌ها بر توده‌ی سنگ و نه سنگ سالم مستقر هستند، یک ضریب اصلاح برای مقاومت فشاری محدود نشده به منظور لحاظ کردن تأثیر ناپیوستگی‌ها و خواص توده‌ی سنگ بر اساس پارامتر شاخص توده‌های سنگی، RMR، پیشنهاد شده است. خلاصه‌ی نتایج حاصل از این پژوهش عبارت است از:

۱. برای بررسی روابط پژوهشگران مختلف جهت تعیین ظرفیت باربری جدار شمع‌های متکی بر سنگ بر مبنای ۵۸ مورد عملی، یک کار آماری صورت گرفته است، که در آن نتایج حاصل از تعیین مقاومت جداره‌ی شمع‌ها بر توده‌ی سنگ و نه سنگ سالم مستقر هستند، با توجه به نتایج حاصل از کارهای آماری

و نمودارهای مرتبط، رابطه‌ی ارائه‌شده‌ی توسط هروث و کنی (۱۹۷۹) به دلیل کم‌تر بودن مقدار میانگین نسبت مقاومت جداره‌ی شمع‌ها به مقاومت جداره‌ی واقعی حاصل از آزمایش بارگذاری و همچنین پراکندگی (SD) آن، با مقدار میانگین ۰,۹۲ و پراکندگی ۰,۴۵، نسبت به سایر روابط بررسی شده، پاسخ مناسب‌تری ارائه داده است و اعتبار بیشتری دارد.

۲. روابط پیشنهادی این پژوهش جهت تعیین ظرفیت باربری جداره‌ی شمع‌های متکی بر سنگ برای انواع سنگ‌های مورد بررسی شامل سنگ آهک، لای سنگ، گل سنگ، شیل، و گرانیت و سپس برای حالت کلی که در آن نوع سنگ مشخص نیست، ارائه شده است. این روابط به صورت توانی و بر حسب مقاومت فشاری تک‌محوری، q_u ، و بدون لحاظ کردن تأثیر ناپیوستگی‌های توده‌ی سنگ حاصل شده است.

۳. به منظور در نظر گرفتن مشخصات توده‌ی سنگ در روابط ارائه‌شده جهت تعیین ظرفیت باربری جداره‌ی شمع‌ها، یک ضریب اصلاح کاهش‌دهنده برای مقاومت فشاری محدود نشده بر اساس پارامتر RMR تعریف شده است و توسط ۵ مورد عملی، مقایسه‌ی بین نتایج ظرفیت‌های باربری محاسبه‌شده، با احتساب و بدون احتساب RMR، انجام شده است. نتایج حاصل از احتساب RMR، به شکل قابل ملاحظه‌ی نزدیک‌تر به واقعیت است و این مطلب لزوم لحاظ کردن اثرات توده‌ی سنگ و ناپیوستگی‌ها را در محاسبه‌ی ظرفیت‌های باربری جداره‌ی شمع‌های متکی بر سنگ، هرچه بیشتر روشن تر می‌سازد.

پانویس‌ها

1. rock mass rating
2. shaft resistance coefficient

منابع (References)

1. Zhang, L. "Predicting the end bearing capacity of rock socketed shafts", *33rd Annual & 11th International Conference on Deep Foundations*, Deep Foundations Insti-

- tute, DFI, Hilton, New York (October 2008).
2. NCHRP SYNTHESIS 360, *Rock-Socketed Shafts for Highway Structure Foundations*, Washington D.C. (2006).
 3. Serrano, A. and Olalla, C. "Shaft resistance of a pile embedded in rock", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **41**(1), pp. 21-35 (2004).
 4. Seol, H., Jeong, S., Cho, C. and You, K. "Shear load transfer for rock-socketed drilled shafts based on borehole roughness and geological strength index(GSI)", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **45**(6), pp. 848-861 (2008).
 5. CFEM, *Canadian Doudation Engineering Manual*, Bitech Publishers Ltd. British Colombia (2006).
 6. Rowe, R.K. and Armitage, H.H. "A design method for drilled piers in soft rock", *Canadian Geotechnical Journal*, **24**(1), pp. 126-142 (1987).
 7. Horvath, R.G., Kenney, T.C. and Kosicki, P. "Method of improving performance of drilled piers in weak rock", *Canadian Geotechnical*, **20**(4), pp. 758-772 (1983).
 8. Kulhaway, F.H. and Carter, J.P., *Socketed Foundation in Rock Masses*, In Bell, F.G.(Ed) Engineering in Rock Masses, Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 509-529 (1992).
 9. O'Neill, M.W. and Reese, L.C., *Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods*, Report FHWA-IF-99-025, FEDERAL Highway Administration, Washington D.C., 758 pp. (1999).
 10. Huang, Z., *Studies of Load Transfer Mechanism for Rock-Socketed Pile*, ISRM 2003-Technology Roadmap for Rock Mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy (2003).
 11. Seidel, J.P. and Collingwood, B. "A new socket roughness factor for prediction of rock socket shaft resistance", *Canadian Geotechnical Journal*, **38**(1), pp. 138-153 (2001).
 12. Zhang, L., *Drilled Shafts in Rock (Analysis and Design)*, Taylor & Francis Group Plc, London, U.K. (2004).
 13. Chang, M.F. and Wong, I.H., *Shaft Friction on Rock Mech*, Montreal, ISRM, pp. 313-318 (1987).
 14. Osterberg, J.O. and Gill, S.A. "Load transfer mechanisms for piers socketed in hard soil or rock", *Proc. 9th Canadian Sym. On rock Mech.*, Montral, pp. 235-262 (1973).
 15. Bouafia, A. "Load-settlement behavior of socketed piles in sandstone", *Geotechnical and Geological Engineering*, **21**(4), pp. 389-398 (2003).
 16. Omer, J.R., Delpak, R. and Robinson, R.B. "Instrumented load tests in mudstone: Pile capacity and settlement prediction", *Canadian Geotechnical Journal*, **39**(6), pp. 1254-1272 (2002).
 17. Williams, A.F. and Pells, P.J.N. "Side resistance rock sockets in sandstone, mudstone and shale", *Canadian Geotechnical Journal*, **18**(4), pp. 502-51 (1981).
 18. Abdesonboli, A., "Investigation of bearing capacity for rock socketed pile", M.Sc Thesis, Faculty of Engineering University of Guilan (in Persain)(2001).