

## ارتباط تخلخل و چگالی بر مقاومت کششی (برزیلی) سنگ آهن مگنتیت

### (مطالعه موردی: معدن سرویان)

شیر ارشدنژاد\*، استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد محلات، ایران

محمد جواد عرب، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی استخراج معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد محلات، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [s\\_arshadnejad@yahoo.com](mailto:s_arshadnejad@yahoo.com)

دریافت: ۹۶/۱۱/۲۰ - پذیرش: ۹۷/۰۴/۲۰

صفحه ۱۵۹-۱۵۱

### چکیده

یکی از پارامترهای مهم در تحلیل پایداری شیپها و یا تونل‌ها، پارامتر مقاومتی سنگ بکر نظیر مقاومت کششی می‌باشد. خواص فیزیکی سنگ مانند تخلخل و چگالی به‌عنوان پارامترهای فیزیکی در سنگ و تأثیرگذار بر مقاومت آن از اهمیت زیادی برخوردارند. از این رو بر قراری رابطه ریاضی میان خواص فیزیکی و مقاومتی سنگ می‌تواند راهکاری ابتکاری و آسان جهت تخمین مقاومت مکانیکی سنگ‌ها در فعالیتهای میدانی و یا تخمین‌های اولیه باشد. در این مقاله سعی شده با انجام آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی و بر قراری رابطه میان آنها فرمولهایی ارائه شوند که انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی پر هزینه و وقت گیر که گاهی در صحرای ممکن نیست با آزمایش‌های ساده با دقت معقول جایگزین گردد. این آزمایش‌ها بر روی تعدادی نمونه سنگ آهن مگنتیت با چگالی‌های متفاوت از معدن سرویان دلچجان انجام شده‌اند. پس از انجام این آزمایش‌ها، هر یک از پارامترهای مورد بررسی به صورت دو به دو با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته و دو مدل تجربی با ضرایب همبستگی ۰/۷۴ و ۰/۶۵ بدست آمد. علاوه بر مدل‌های یاد شده، مدلی تکامل یافته و دو پارامتری با ضریب همبستگی ۰/۷۴ نیز پیشنهاد شدند که از کارایی بالاتری برخوردارند.

واژه‌های کلیدی: تخلخل، چگالی، مقاومت کششی (برزیلی)، سنگ آهن مگنتیت

### ۱- مقدمه

فشار عمل می‌کنند. بدین ترتیب علت وقوع اکثر گسیختگی‌ها و ریزش‌ها در معادن، تونل‌ها و مغارها، ایجاد تنش‌های کششی در آنها می‌باشد. این پدیده‌ها اهمیت شناخت مکانیزم‌های گسیختگی کششی و نحوه تحلیل و مقابله با آنها را به‌خوبی آشکار می‌سازند. روش‌های متنوعی برای اندازه‌گیری مقاومت کششی سنگ‌ها ابداع شده‌اند که به‌طور کلی می‌توان آنها را به‌خوبی آشکار می‌سازند. روش‌های متنوعی و آزمایش‌های کششی غیرمستقیم، تقسیم نمود. برای فائق آمدن بر پدیده اثر اندازه و تمرکز تنش و شکست ناخواسته،

اطلاع از رفتار سنگ‌ها در کشش و میزان مقاومت کششی آنها، در تحلیل پایداری سقف و کف فضاهای زیرزمینی، بررسی پایداری سنگ‌ها در زون‌های کششی و همچنین حفاری و آتشیاری اهمیت بسیاری دارد. به‌طور کلی آگاهی از مقاومت کششی سنگ‌ها یکی از پیش شرط‌های مهم موفقیت در طراحی معادن، تونل‌ها، شیروانی‌ها و کنترل مؤثر لایه‌ها و طبقات زمین می‌باشد و کمک شایانی به درک مکانیزم‌های خرابی در چنین حالاتی است. سنگ‌ها و به‌طور کلی تمامی مواد شکننده، ذاتاً در کشش بسیار ضعیف‌تر از

دلیجان به سلفچگان واقع شده است. جهت دسترسی به معدن پس از طی مسیر ۱۰ کیلومتر از جاده آسفالتی دلیجان به سلفچگان، حد فاصل روستای جاسب و راونج، روبروی سد ۱۵ خرداد یک جاده فرعی خاکی به سمت شمال شرق منشعب شده و پس از طی ۱۸ کیلومتر جاده خاکی و عبور از یک روستا به معدن می‌رسد. بهره‌برداری از معدن با ذخیره ۷۰۰ هزار تن و عیار آهن ۶۳ درصد (علی آبادی و خدای، ۱۳۹۰) آغاز شده است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی معدن را نشان می‌دهد.

تلاش‌های زیادی توسط محققین مختلف صورت گرفته و روش‌های گوناگونی نیز ارائه شده است (فهیمی فر، ۱۳۸۰). در این روش‌ها اشکال مختلفی از نمونه مورد بررسی قرار گرفته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به نمونه‌های بریکتی، دمبلی شکل، استوانه‌ای و استخوان سگی اشاره نمود.

## ۲- منطقه مورد مطالعه

معدن سنگ آهن سرویان در استان مرکزی و در فاصله ۲۸ کیلومتری شمال شرقی دلیجان و حد فاصل جاده ارتباطی



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی معدن (عرب، ۱۳۹۵)

نیامد. وی با انجام پاره‌ای تصحیحات نتایج کاملاً رضایت بخشی گرفت. بزرگ‌ترین مشکل این روش آماده‌سازی نمونه‌هاست که بسیار وقت‌گیر و پرهزینه می‌باشد. فرهارست (۱۹۶۱)، برای چسباندن نمونه‌های استوانه‌ای به دستگاه کشتش مستقیم، استفاده از چسب اپوکسی با مقاومت کشتش تقریبی ۲۰/۷ تا ۲۷/۵ مگاپاسکال را پیشنهاد نمود. این چسب اتصال بسیار خوبی بین نمونه‌ها و میله‌های فلزی هم قطرشان برقرار می‌نماید. این روش را می‌توان بر روی نمونه‌های منشوری و مکعبی نیز بدون هیچ مشکلی به کار برد. بدین

## ۳- تاریخچه بررسی مقاومت کشتی سنگ‌ها

ابرت و همکاران (۱۹۴۶)، پس از انجام آزمایش‌های متعدد روی مرمیت، سنگ آهک، گرانیت، ماسه سنگ و غیره گزارش کردند که روش آزمایش کشتش مستقیم برای نمونه‌هایی با مقاومت کشتی بالاتر از ۸/۲۷ مگاپاسکال مناسب نمی‌باشد. نتایج این روش پراکندگی زیادی نشان داد. ورکر (۱۹۵۵)، از نمونه‌های بریکتی برای آزمایش کشتش مستقیم استفاده نمود. در ابتدا به دلیل ایجاد تمرکز تنش زیاد در انحنای نمونه و در نزدیکی گیره‌ها، نتایج مطلوبی به دست

۲- ناهمسانی مقاومتی با درجه دگرگونی (تورق) سنگ رابطه مستقیم دارد به طوری که با افزایش شیب شیب شیب شیب سنگ ناهمسانی مقاومتی به علت تفاوت فاحش مقاومت‌ها در دو حالت  $B=0$  و  $B=90$  افزایش نشان می‌دهد.

منظور لازم است که شکل و ابعاد مقطع کلاهک‌ها با نمونه یکی باشد. این روش نتایج رضایت بخشی داشته و نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی مناسب‌تر به نظر می‌رسد. روش‌های ارائه شده توسط ISRM و ASTM نیز بر همین اساس طراحی شده‌اند.

هوک (۱۹۶۴)، در بخش مکانیک سنگ انستیتو ملی تحقیقات مهندسی مکانیک آفریقای جنوبی طی مطالعاتی که انجام داد، نمونه‌هایی مشابه آنچه در آزمایش کشش مستقیم فلزات استفاده می‌شود را به کاربرد. این نمونه‌ها دارای یک قسمت مرکزی استوانه‌ای به طول  $4/32$  و قطر  $2/16$  سانتیمتر بودند. شعاع انحناء برابر  $5/1$  و قطر قسمت‌های انتهایی  $4/1$  سانتیمتر در نظر گرفته شد. نمونه‌ها با گیره‌های لبه‌دار معمولی آزمایش شدند و نتایج رضایت بخشی به دست آمد. تاون هیل-ریوستون (۱۹۸۵)، در تلاش برای برطرف کردن مشکل آماده‌سازی نمونه، نمونه‌هایی با شکل استخوان سگی را پیشنهاد نمودند (شکل ۲-۴ ت). در ابداع این شکل، از نمونه‌های خشتی که به صورت سنتی برای سنجش مقاومت کششی مستقیم سیمان پرتلند استفاده می‌شوند اقتباس گردیده است. نمونه‌های استخوان سگی در مقایسه با نمونه‌های دمبلی و استوانه‌ای دارای مزایای زیر است:

## ۴- آزمایش‌های انجام شده بر روی سنگ آهن

### سرویان

#### ۴-۱- تهیه نمونه‌ها

آزمایش تعیین تخلخل و چگالی معمولاً برای نمونه‌هایی به کار برده می‌شود که اشکال هندسی منظمی دارند (مثل مغزه‌های استوانه‌ای یا نمونه‌های منشوری راست گوشه یا مکعبی). نمونه معرف این آزمایش شامل حداقل ۳ قطعه سنگ با جرم تقریبی ۵۰ گرم و یا ابعادی حداقل ۱۰ برابر قطر بزرگ‌ترین دانه سنگ می‌باشد (فهیمی فر، ۱۳۸۰). تعداد ۱۵ نمونه برای این آزمایش آماده گردید که تنها ۱۲ نمونه تا آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلی) باقی ماند (عرب، ۱۳۹۵). شکل ۲ نحوه تهیه نمونه جهت انجام آزمایش برزیلی می‌باشد.

آزمایش کششی غیر مستقیم (برزیلی) دارای استانداردهای مختلفی از جمله ISRM، ASTM D3967 و GOST21153 می‌باشد. این استانداردها در برخی موارد دارای تفاوت‌هایی هستند. اما با توجه به اینکه در روش پیشنهادی ISRM (آزمایش برزیلی) توزیع تنش در نمونه یکنواخت‌تر است، نتایج به دست آمده از آن نیز قابل اطمینان‌تر می‌باشد. به علاوه امروزه این روش عمومیت بیشتری دارد (فهیمی فر، ۱۳۸۰). در شکل ۳ انجام آزمایش انجام شده در این تحقیق توسط دستگاه نمایش داده شده است.

۱- آماده‌سازی آن‌ها بسیار ارزان و ساده است.

۲- تمرکز تنش یا تأثیرات انتهایی نمونه به شدت نمونه‌های استوانه‌ای نیست.

۳- آماده کردن نمونه‌های استخوان سگی باعث تهیه هم زمان نمونه‌های استوانه‌ای به صورت محصول جنبی شده که می‌توان از آن‌ها در سایر آزمایش‌ها استفاده نمود.

امیرانلوی (۱۳۸۶)، آزمایش‌های مختلف مقاومتی کششی بار نقطه‌ای (قطری و محوری) و مقاومت کششی برزیلی با زوایای مختلف B (زاویه بین محور بارگذاری و سطوح تورق مغزه) در دو حالت خشک و اشباع انجام گردیده و از نتایج حاصله ناهمسانی مقاومتی آن‌ها تعیین و محاسبه گردیده است. نتایج حاصله نشان آن به شرح زیر می‌باشد.

۱- اشباع شدگی نسبت ناهمسانی مقاومتی سنگ‌ها را افزایش داده است زیرا کاهش مقاومت در امتداد سطوح تورق به علت وجود کانی‌های میکا و رس بیشتر از امتداد عمود بر آن‌ها بوده است.

شرایط آزمایشگاهی انجام شده است که داده‌های آن در جدول ۱ نمایش داده شده است.

از تعداد نمونه‌های یاد شده نمونه مورد آزمایش، ۱۱ داده برزیلی بدست آمد که از این میان از دو داده بدست آمده به علت پراکندگی غیر عادی نتایج (به عنوان خطای آزمایش) صرف نظر گردید و همچنین دو نمونه دیگر به واسطه آسیب دیدن در زمان آزمایش، حذف شدند.

نمودار تغییرات تخلخل و مقاومت کششی برزیلی در شکل ۴ به نمایش درآمده است.

از رابطه به دست آمده توسط رگرسیون چند جمله‌ای به دلیل روند غیر منطقی آن پس از افزایش تخلخل که کاهش مقاومت را نشان می‌داد و در نهایت به شکل افزایشی تغییر می‌یابد و همچنین از روابط نمایی و خطی با ضریب همبستگی پایین صرف نظر شده است. روابط (نمایی  $R = 0.7476$  و لگاریتمی  $R = 0.7384$ ) با ضریب همبستگی مناسب ارائه شد که با توجه به بالا بودن ضریب همبستگی ( $R^2 = 0.7476$ ) رگرسیون توانی رابطه مربوطه به شرح زیر پیشنهاد می‌گردد.

$$\sigma_t = 7/5627n^{-0.208} \quad (1)$$

که در آن تخلخل (n) بر حسب درصد و مقاومت کششی برزیلی (MPa) بر حسب مگاپاسکال می‌باشد.

#### ۴-۳- تحلیل نتایج آزمایش‌های چگالی و مقاومت کششی (برزیلی)

آزمایش‌های چگالی و مقاومت کششی (برزیلی) تحت استاندارد ISRM روی نمونه‌های یاد شده از سنگ آهن مگنتیت در شرایط آزمایشگاهی انجام شده است که داده‌های آن در جدول ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲. تصاویری از نمونه‌های تهیه شده برای انجام آزمایش (عرب، ۱۳۹۵)



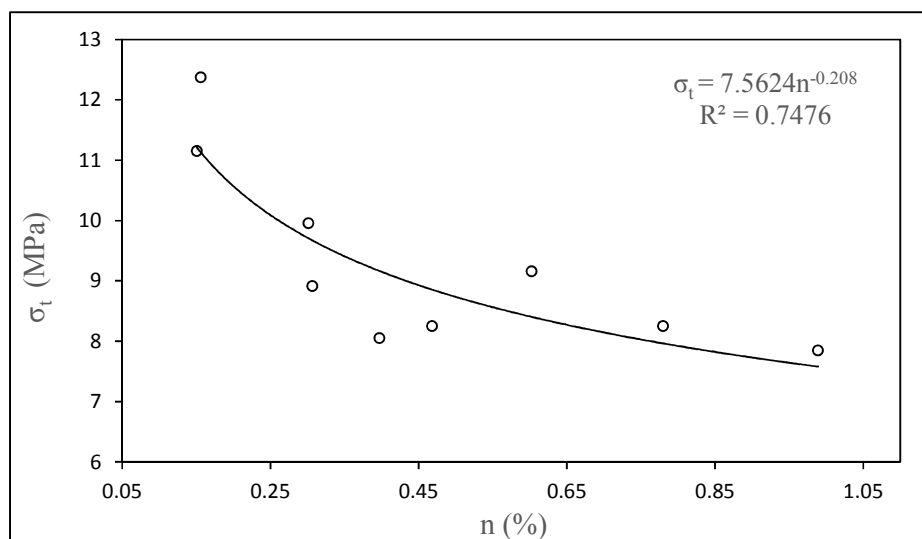
شکل ۳. انجام آزمایش برزیلی

#### ۴-۲- تحلیل نتایج آزمایش‌های تخلخل و مقاومت کششی (برزیلی)

آزمایش‌های تخلخل و مقاومت کششی (برزیلی) تحت استاندارد ISRM روی پانزده نمونه از سنگ آهن مگنتیت در

جدول ۱. داده‌های مربوط به تخلخل و مقاومت کششی (برزیلی) (عرب، ۱۳۹۵)

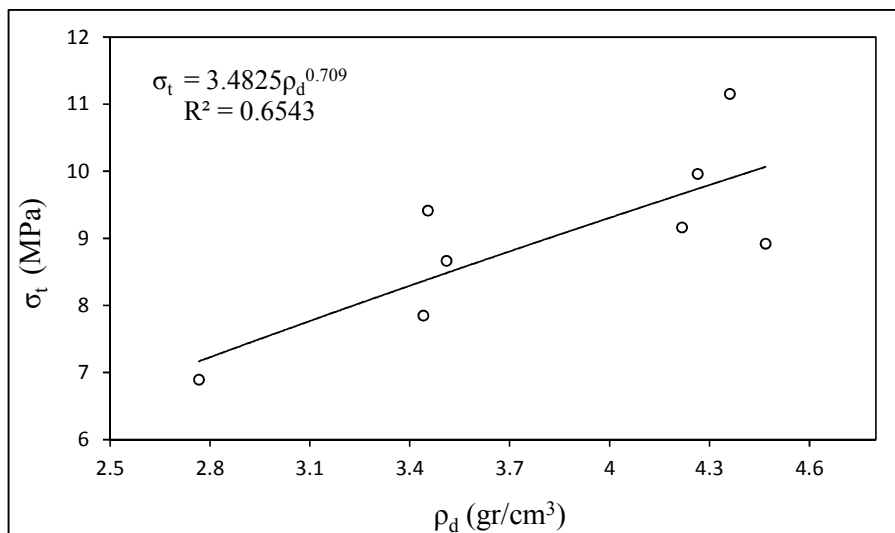
شماره نمونه	تخلخل n (%)	$\sigma_t$ (MPa)	شماره نمونه	تخلخل n (%)	$\sigma_t$ (MPa)
۱	۰/۱۵۱	۱۱/۱۵۲	۷	۰/۶۰۳	۹/۱۶۰
۲	۰/۱۵۶	۱۲/۳۷۵	۸	۰/۷۸۰	۸/۲۵۰
۳	۰/۳۰۱	۹/۹۵۷	۹	۰/۹۸۹	۷/۸۴۵
۴	۰/۳۰۷	۸/۹۱۶	۱۰	۰/۸۹۲	۷/۱۲۲
۵	۰/۳۹۷	۸/۰۵۰	۱۱	۰/۸۵۸	۷/۵۴۴
۶	۰/۴۶۸	۸/۲۵۰			



شکل ۴. نمودار رابطه تخلخل و مقاومت کششی (برزیلی) با رگرسیون نمایی

جدول ۲. داده‌های چگالی و مقاومت کششی (برزیلی) (عرب، ۱۳۹۵)

شماره نمونه	چگالی خشک $\rho_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\sigma_t$ (MPa)	شماره نمونه	چگالی خشک $\rho_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\sigma_t$ (MPa)
۱	۲/۷۶۷	۶/۸۹۰	۷	۴/۳۶۱	۱۱/۱۵۲
۲	۳/۴۴۰	۷/۸۴۵	۸	۴/۴۶۸	۸/۹۱۶
۳	۳/۴۵۴	۹/۴۱۱	۹	۴/۶۴۲	۹/۴۴۵
۴	۳/۵۱۰	۸/۶۶۳	۱۰	۴/۶۶۸	۱۰/۰۸۵
۵	۴/۲۱۸	۹/۱۶۰	۱۱	۴/۷۸۹	۹/۲۴۳
۶	۴/۲۶۵	۹/۹۵۷			



شکل ۵. نمودار رابطه چگالی و مقاومت کششی (برزیلی) با رگرسیون نمایی

در اینجا سعی می‌شود که مدلی دو متغیره برای پیش‌بینی دقیقتر پیشنهاد شود. برای این منظور ابتدا یک تغییر متغیر ساده انجام شده و از تقسیم چگالی بر تخلخل یک متغیر جدید حاصل شد، سپس با چند نوع مدل رگرسیونی مورد تحلیل آماری قرار گرفتند.

شکل ۶، نمودار تغییرات متغیر جدید  $\left(\frac{\rho_d}{n}\right)$  و مقاومت کششی برزیلی را نشان می‌دهد. مدل های دیگری از رگرسیون مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند که مقدار ضریب همبستگی در روابط نمایی، خطی و چند جمله‌ای به ترتیب برابر بودند با: ۰/۶۴۶، ۰/۶۵۷، ۰/۶۷۴۴. رابطه ۳ به عنوان مناسب‌ترین مدل پیشنهاد می‌شود.

با توجه به بالا بودن ضریب همبستگی  $(R^2 = 0.6543)$  رگرسیون توانی رابطه مربوطه به شرح زیر پیشنهاد می‌گردد.

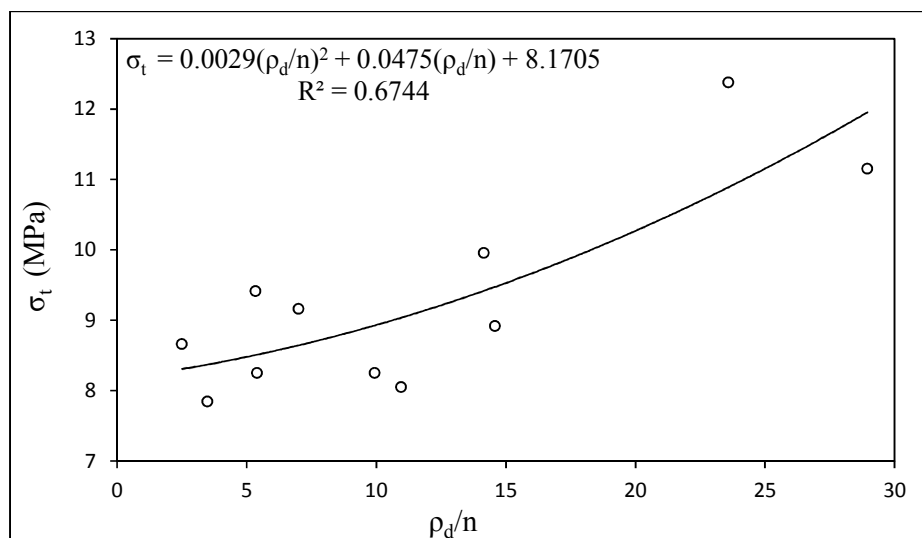
$$\sigma_t = 3.4825 \rho_d^{0.709} \quad (2)$$

که در آن چگالی ( $\rho_d$ ) بر حسب گرم بر سانتیمتر مکعب و مقاومت کششی بر حسب مگاپاسکال می‌باشد. در ادامه به بررسی سه پارامتر با یکدیگر پرداخته می‌شود.

#### ۴-۴- تحلیل نتایج آزمایش‌های چگالی، تخلخل و مقاومت کششی (برزیلی)

جدول ۳. داده‌های چگالی، تخلخل و مقاومت کششی (برزیلی) (عرب، ۱۳۹۵)

شماره نمونه	$\rho_d$ (gr/cm <sup>3</sup> ) / n (%)	$\sigma_t$ (MPa)	شماره نمونه	$\rho_d$ (gr/cm <sup>3</sup> ) / n (%)	$\sigma_t$ (MPa)
۱	۲/۵	۸/۶۶۳	۷	۱۰/۹۵۷	۸/۰۵۰
۲	۳/۴۷۸	۷/۸۴۵	۸	۱۴/۱۵۵	۹/۹۵۷
۳	۵/۳۳۸	۹/۴۱۱	۹	۱۴/۵۷۵	۸/۹۱۶
۴	۵/۴	۸/۲۵۰	۱۰	۲۳/۵۸	۱۲/۳۷۵
۵	۷	۹/۱۶۰	۱۱	۲۸/۹۵	۱۱/۱۵۲
۶	۹/۹۴	۸/۲۵۰			



شکل ۶. چگالی، تخلخل و مقاومت کششی (برزیلی) با رگرسیون چندجمله‌ای

شد که به نظر می‌رسد، دارای مناسبترین تغییر متغیر است. جدول ۴ داده‌های اصلاح شده جدید را نشان می‌دهد.

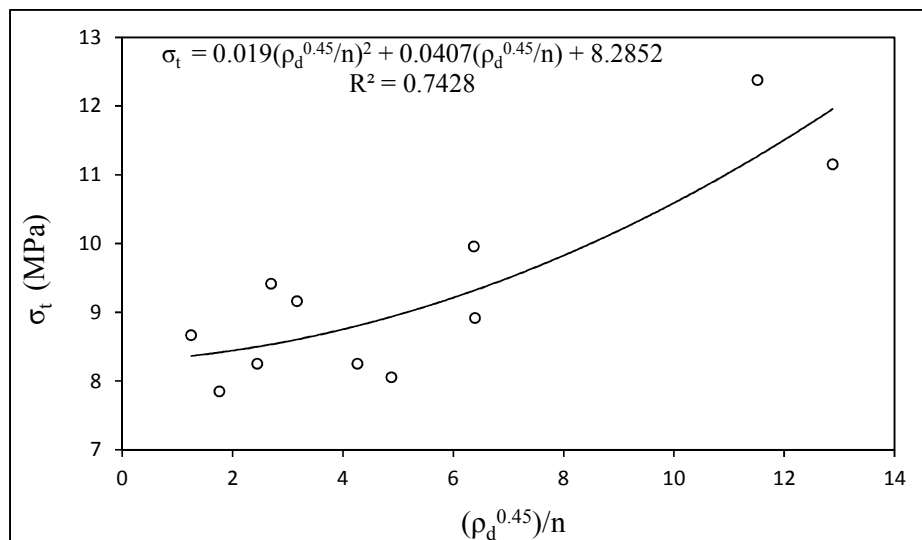
مناسب‌ترین تغییر متغیر، عبارت بود از  $(\frac{\rho_d}{n})^{0.45}$ .

$$\sigma_t = 0.0029 \left(\frac{\rho_d}{n}\right)^2 + 0.0475 \left(\frac{\rho_d}{n}\right) + 8.1705 \quad (3)$$

پس از انجام تعداد زیادی عملیات آماری تغییر متغیر و تحلیل رگرسیون‌های گوناگون، سرانجام رگرسیونی پیشنهاد

جدول ۴. داده‌های چگالی، تخلخل و مقاومت کششی (برزیلی) (عرب، ۱۳۹۵)

$\sigma_t$ (MPa)	$(\rho_d^{0.45})(\text{gr/cm}^3)/n$ (%)	شماره نمونه	$\sigma_t$ (MPa)	$(\rho_d^{0.45})(\text{gr/cm}^3)/n$ (%)	شماره نمونه
۸/۰۵۰	۴/۸۸۰	۷	۸/۶۶۳	۱/۲۵۳	۱
۹/۹۵۷	۶/۳۷۵	۸	۷/۸۴۵	۱/۷۶۳	۲
۸/۹۱۶	۶/۳۹۸	۹	۸/۲۵۰	۲/۴۴۸	۳
۱۲/۳۷۵	۱۱/۵۱۸	۱۰	۹/۴۱۱	۲/۶۹۹	۴
۱۱/۱۵۲	۱۲/۸۷۹	۱۱	۹/۱۶۰	۳/۱۷۲	۵
			۸/۲۵۰	۴/۲۶۷	۶



شکل ۷. چگالی، تخلخل و مقاومت کششی (برزیلی) با رگرسیون چندجمله ای

صورت تک پارامتری و هم دو پارامتری به شکل ابتکاری با توان‌های متفاوت و تحلیل انواع رگرسیون تخمین زده شده است. ضریب همبستگی رگرسیون پیشنهادی دو متغیره برابر با ۰/۷۴ است.

## ۶- مراجع

- امیرانلوی، ه.، (۱۳۸۶)، "مطالعه ناهمسانی مقاومت کششی سنگهای دگرگونی ناحیه همدان (کندلان، گردنه زاغه)"، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، ص. ۹۳ تا ۹۸.

- عرب، م.ج.، (۱۳۹۵)، "بررسی خواص فیزیکی بر اندیس بار نقطه‌ای و سختی اشمیت سنگ آهن - مطالعه موردی: معدن سرویان"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد محلات.

- علی‌آبادی، م. ع.، خدایمی، م.، کرمی، م.، (۱۳۹۰)، "مطالعات مقدماتی زمین‌شناسی و کانی‌شناسی معدن آهن سرویان"، چهارمین همایش ملی زمین‌شناسی اقتصادی، ص. ۵۰ تا ۵۴.

- فهیمی‌فر، الف.، (۱۳۸۰)، "آزمایشات مکانیک سنگ"، شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، جلد اول.

در میان انواع رگرسیون‌های مورد بررسی، رگرسیون چند جمله‌ای درجه دوم، با ضریب همبستگی ۰/۷۴۲۸ دارای بهترین برازش بود و معادله مربوطه به صورت زیر پیشنهاد می‌شود.

$$\sigma_t = 0.019 \left( \frac{\rho_d^{0.45}}{n} \right)^2 + 0.0407 \left( \frac{\rho_d^{0.45}}{n} \right) + 8.2852$$

$$R = 0.7428$$

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش آزمایش‌های تخلخل، چگالی و مقاومت کششی برزیلی بر روی ۱۵ نمونه سنگ آهن مگنتیت با چگالی متفاوت ( $3-5 \text{ gr/cm}^3$ ) انجام پذیرفت. آزمایش‌ها بر اساس استاندارد ISRM انجام شدند و تعدادی از نمونه‌ها به دلیل صدمه دیدن در زمان آزمایش از مجموعه اعداد مورد استفاده خارج گردید. پس از انجام این آزمایش‌ها دو به دو با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته تا تأثیر آن‌ها بر یکدیگر مشخص گردیده و رابطه موجود در بین آن‌ها به دست آید، که بعد از برقراری این روابط تعدادی از این روابط به دلیل بازدهی پایین و یا عدم روند منطقی حذف گردیده و روابط مناسب مشخص گردید. این روابط همراه با جدول و نمودارهای آن ارائه شدند تا وضعیت تأثیرگذاری عوامل فیزیکی بر سنگ مشخص گردد. روابط پیشنهادی هم به



- Townhill- Rewston, P., (1984), "In towards a relational scale of hardness for minerals (Edited by P.A. Dowd)", Leeds University Mining Association, pp. 22-27.
- Wuerker, R.G., (1955), "Measuring the tensile strength of rocks", Min. Eng., Vol. 7, No.2, pp. 157-171.
- Fairhurst, C., (1961), "Laboratory measurement of some physical properties of rock", Proc. 4<sup>TH</sup>. Symp. Rock Mech, Univ. Park, penn., pp. 105-118.
- Hoek, E., (1964), "Fracture of anisotropic rock", J. S. African Inst. Min. Metal., Vol. 64, No. 10, pp. 501-518.
- Obert, L. S., Windes, L. & Duvall, W.I., (1946), "Standardized Tests for Determining the Physical Properties of Mine Rock, U.S. Bur. Mines Rep. Invest".