

## مقایسه روش‌های مختلف تعیین کشش غیرمستقیم در نمونه‌های دانه ریز و دانه درشت

رضا محسنی افخم<sup>۱</sup>؛ ابوالفضل فقیهی حبیب‌آبادی<sup>۲</sup>؛ هادی عطاپور<sup>۳\*</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران
- ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
- ۳- استادیار گروه مهندسی ژئومکانیک، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، مرکزی، ایران

دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

\*نویسنده مسئول: [h.atapour@arakut.ac.ir](mailto:h.atapour@arakut.ac.ir)

### چکیده

مقاومت کششی یکی از پارامترهای مهم در تحلیل و طراحی سازه‌های معدنی و عمرانی به شمار می‌آید. این ویژگی نقش تاثیرگذاری در ارزیابی پایداری حفریات زیرزمینی و انتخاب مصالح مناسب برای پایداری‌سازی آن‌ها دارد. به دلیل مشکلات فنی در تعیین مقاومت کشش مستقیم مواد ترد مانند سنگ، روش‌های استاندارد برای برآورد غیرمستقیم این پارامتر توسعه یافته‌اند. هدف این پژوهش، مقایسه تجربی چهار روش غیرمستقیم رایج، شامل آزمایش برزلی، آزمایش خمش سه نقطه‌ای، آزمایش خمش چهار نقطه‌ای و آزمایش بار نقطه‌ای در تعیین مقاومت کششی نمونه‌های شبه‌سنگی است. بدین منظور، چهار طرح اختلاط با طیفی از نمونه‌های شبه‌سنگی دانه ریز تا دانه درشت تهیه و آزمایش شدند. نتایج نشان داد مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های دانه ریز در آزمایش بار نقطه‌ای کمترین و در آزمایش برزلی بیشترین مقدار را دارد؛ در نمونه‌های دانه درشت در آزمایش بار نقطه‌ای کمترین و در آزمایش خمش سه نقطه‌ای بیشترین مقدار را نشان داده است. این پژوهش با ارائه مجموعه‌ای کنترل‌شده از نمونه‌های شبه‌سنگی و تحلیل درصدی مستقیم بین روش‌ها، چارچوبی کاربردی برای انتخاب روش آزمایش متناسب با ویژگی‌های ریزساختاری فراهم می‌کند. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنایی برای توسعه ضرایب تبدیل و بهبود روش‌های تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم در نمونه‌های شبه‌سنگی باشد.

نمونه‌های شبه‌سنگی، آزمایش برزلی، آزمایش خمش سه نقطه‌ای، آزمایش خمش چهار نقطه‌ای، آزمایش شاخص بار نقطه‌ای نمونه‌های دانه ریز، نمونه‌های دانه درشت

### واژگان کلیدی

### ۱- مقدمه

اندازه‌گیری مقاومت کششی، روش‌های متعددی وجود دارد که به‌طور کلی در دو دسته‌ی مستقیم و غیرمستقیم طبقه‌بندی می‌شوند. روش کشش مستقیم با وجود آن‌که معتبرترین روش برای اندازه‌گیری دقیق مقاومت کششی محسوب می‌شود، در عمل با چالش‌هایی همراه است؛ از جمله دشواری در گیردار کردن کامل نمونه بدون ایجاد تمرکز تنش در نواحی تماس، احتمال شکست زود هنگام از محل بارگذاری و همچنین در

مقاومت کششی یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی عملکرد مصالح سنگی و نمونه‌های شبه‌سنگی به‌شمار می‌رود و نقش مهمی در طراحی سازه‌های ژئوتکنیکی، پایداری حفریات زیرزمینی، شیروانی‌ها، پوشش تونل‌ها و زیرساخت‌های عمرانی دارد. بسیاری از شکست‌ها به صورت کششی شروع می‌شوند [۱]. این موضوع اهمیت مقاومت کششی را افزایش می‌دهد. برای

مطالعات آزمایشگاهی و عددی تایید کرده‌اند که با افزایش تردی مصالح، اختلاف نتایج بین آزمایش‌های برزیلی و خمشی بیشتر می‌شود و خمش مقاومت واقع‌بینانه‌تری ارائه می‌دهد [۱۴]. وانگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که در گچ و شیل نرم، خطای آزمایش برزیلی تا ۳۰ درصد افزایش می‌یابد [۱۵]. با استفاده از تکنیک  $DIC^2$ ، رن<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۲۲) و تامر<sup>۴</sup> (۲۰۲۱) و همکاران نشان دادند که در نمونه‌های نرم ترک آزمایش برزیلی به سمت برش مماسی میل می‌کند [۱۶،۱۷]. روئیز<sup>۵</sup> (۲۰۲۲) و همکاران و محسنی افخم و همکاران (۲۰۲۵) بررسی کردند که با استفاده از روش‌های تصویربرداری دیجیتال می‌توان صحت نوع ترک و شکست ایجاد شده را بررسی کرد [۱۸،۱۹]. شائو<sup>۶</sup> و بیلینگتون<sup>۷</sup> (۲۰۲۲) در بتن  $UHPC^8$  تأیید کردند که آزمایش خمش چهار نقطه‌ای در نمونه‌های نرم دقت بیشتری دارد [۲۰]. همچنین کای<sup>۹</sup> (۲۰۲۳) و همکاران نشان دادند که در نمونه‌های ترد آزمایش خمش سه نقطه‌ای ترجیح داده می‌شود [۲۱]. باسو<sup>۱۰</sup> (۲۰۰۷) و همکاران ترکیب آزمایش برزیلی با شاخص بار نقطه‌ای و چکش اشمیت را برای سنگ‌های میکروبولوری معرفی کردند که دقت پیش‌بینی مقاومت کششی را بهبود می‌دهد [۲۲]. ما<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۸) و همکاران با مدل‌سازی المان مجزا دریافتند که در رفتار نمونه‌های نرم، نتایج آزمایش خمش چهار نقطه‌ای بهتر از آزمایش برزیلی است [۲۳]. مرور انتقادی پراس<sup>۱۲</sup> و دیدریش<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۴) تأکید می‌کنند هیچ روش غیرمستقیمی برای همه‌ی مصالح مناسب نیست و ویژگی‌های ریزساختاری معیار انتخاب آزمایش باید باشد [۲۴]. تحلیل‌های ترکیبی  $DIC$  و شبیه‌سازی اجزای محدود توسط هوانگ<sup>۱۴</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، بهالدینی<sup>۱۵</sup> و همکاران (۲۰۱۹)، نشان داد که معیار انرژی ترک می‌تواند تفسیر مشترکی برای نتایج سه آزمایش برزیلی، خمش سه نقطه‌ای و چهار نقطه‌ای فراهم کند [۲۵،۲۶].

دسترس نبودن تجهیزات تخصصی برای اعمال نیروی کششی در بسیاری از آزمایشگاه‌ها. به همین دلایل، استفاده از روش‌های غیرمستقیم کاربرد بیشتری یافته است. در میان این روش‌ها، آزمایش برزیلی به دلیل سادگی اجرا، دقت مناسب، قابلیت تکرارپذیری بالا و امکان استفاده از تجهیزات فشاری رایج، به‌عنوان پرکاربردترین روش غیرمستقیم برای تعیین مقاومت کششی مصالح سنگی شناخته می‌شود [۲،۳]. از دیگر روش‌های رایج غیرمستقیم می‌توان به آزمایش خمش سه نقطه‌ای، آزمایش خمش چهار نقطه‌ای و آزمایش شاخص بار نقطه‌ای اشاره کرد که علاوه بر برآورد مقاومت کششی، امکان بررسی رفتار شکست خمشی را نیز فراهم می‌کنند.

با این حال، مطالعات نشان داده‌اند که در نمونه‌های نرم، تمرکز تنش در نواحی تماس بارگذاری در آزمایش برزیلی می‌تواند توزیع تنش کششی را از حالت ایده‌آل نظری منحرف کرده و موجب شود مقدار مقاومت کششی به‌دست‌آمده کمتر از مقدار واقعی یا در برخی موارد، بیش‌برآورد شود [۴-۸]. بر همین اساس، استفاده از آزمایش‌های خمشی به‌ویژه خمش چهار نقطه‌ای به‌عنوان جایگزین یا مکمل آزمایش برزیلی در نمونه‌های نرم پیشنهاد شده است؛ چرا که این آزمایش با فراهم کردن توزیع تنش یکنواخت‌تر در ناحیه میانی نمونه، امکان ایجاد ترک در یک ناحیه مشخص را فراهم می‌سازد و در نتیجه، ارزیابی دقیق‌تری از مقاومت کششی ارائه می‌دهد [۹]. در نمونه‌های شبه‌سنگی، افزودن پودر سنگ و تغییر در اندازه و مقدار سنگ‌دانه‌ها می‌تواند ریزساختار و رفتار شکست ماده را از حالت نرم به ترد تغییر دهد. تحقیقات نشان داده‌اند که در ملات‌هایی با درصد بالای ریزدانه، آزمایش خمش چهار نقطه‌ای دارای کمترین پراکندگی داده‌ها و بیشترین تطابق با نتایج آزمایش کشش مستقیم است [۱۰،۱۱]. در مقابل، در نمونه‌های تردتر، آزمایش‌های برزیلی و خمش سه نقطه‌ای عملکرد مناسبی از خود نشان داده و نتایجی قابل‌اعتماد ارائه داده‌اند [۱۲،۱۳].

<sup>9</sup> Cai  
<sup>10</sup> Basu  
<sup>11</sup> Ma  
<sup>12</sup> Perras  
<sup>13</sup> Diederichs  
<sup>14</sup> Huang  
<sup>15</sup> Bahaaddini

<sup>1</sup> Wong  
<sup>2</sup> Digital Image Correlation  
<sup>3</sup> Ren  
<sup>4</sup> Tamer  
<sup>5</sup> Ruiz  
<sup>6</sup> Shao  
<sup>7</sup> Billington  
<sup>8</sup> Ultra-High Performance Concrete

تکیه‌گاه  $(mm)$ ، شعاع نمونه  $(mm)$  و  $\sigma_t (MPa)$  مقاومت کششی به‌دست‌آمده از آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای  $(MPa)$  است [۲۸].

$$\sigma_t = \frac{PL}{\pi r^3} \quad (2)$$

آزمایش خمش چهارنقطه‌ای یکی از روش برای ارزیابی رفتار کششی مواد شبه سنگی می‌باشد. در این روش، نمونه با مقطع دایره‌ای بر روی دو تکیه‌گاه قرار داده شده و دو نیروی متمرکز، به‌صورت متقارن و در فواصل برابر از مرکز نمونه اعمال می‌گردند. این نوع بارگذاری موجب ایجاد ناحیه‌ای با لنگر خمشی یکنواخت در بخش میانی نمونه می‌شود که بیشترین تنش کششی در سطح پایینی آن به‌وجود می‌آید. بر اساس تئوری خمش تیرها، مقدار مقاومت کششی متناظر از رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود؛ در این رابطه  $L$  فاصله‌ی بین دو تکیه‌گاه  $r, (mm)$  شعاع نمونه  $(mm)$  و  $\sigma_t (MPa)$  مقاومت کششی به‌دست‌آمده از آزمایش خمش چهارنقطه‌ای  $(MPa)$  است [۲۸].

$$\sigma_t = \frac{2PL}{\pi r^3} \quad (3)$$

در آزمایش بار نقطه‌ای، نمونه سنگی به صورت استوانه‌ای یا مکعبی میان دو فک بارگذاری قرار گرفته و نیروی متمرکز به‌صورت تدریجی تا شکست نمونه به آن اعمال می‌شود. در این آزمایش، مقاومت سنگ در برابر بارگذاری متمرکز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مقاومت شاخص بار نقطه‌ای بر اساس رابطه‌ی (۴) محاسبه می‌شود، که در آن  $P (N)$  نیروی شکست،  $D (mm)$  بعد مشخصه نمونه (قطر برای نمونه استوانه‌ای و طول کوچک‌تر برای نمونه‌های مکعب یا نامنظم)،  $I_s (MPa)$  مقاومت شاخص بار نقطه‌ای و  $F$  ضریب اصلاحی است. مقدار به‌دست‌آمده معمولاً به مقاومت شاخص بار نقطه‌ای استاندارد با بعد ۵۰ میلی‌متر  $I_{s(50)}$  تصحیح می‌گردد [۲۹].

$$I_{s(50)} = F \times I_s$$

$$I_s = \frac{P}{D^2} \quad (4)$$

$$F = \sqrt{\left(\frac{D}{50}\right)}$$

روابط متعددی برای تخمین مقاومت کششی از شاخص بار نقطه‌ای ارائه شده است. در این مطالعه از رابطه‌ی (۵) مطابق رابطه‌ی ارائه شده‌ی  $ISRM$  استفاده شد [30].

$$\sigma_t(I_{s(50)}) = 1.25 I_{s(50)} \quad (6)$$

با وجود مطالعات انجام‌شده، هنوز ارزیابی جامع و تجربی مجموعه‌ای از نمونه‌های شبه‌سنگی که طیف کاملی از نمونه‌های دانه ریز تا دانه درشت را شامل شود، انجام نگرفته است. پژوهش حاضر با استفاده از چهار طرح اختلاط متفاوت (از مواد دانه ریز تا دانه درشت) به بررسی دقت ارزیابی مقاومت کششی هر یک از آزمایش‌های برزیلی، آزمایش خمش سه نقطه‌ای و آزمایش خمش چهار نقطه‌ای در انواع نمونه‌ها می‌پردازد. هدف این مطالعه، مقایسه عملکرد این روش‌ها و تعیین اینکه کدام آزمایش برای هر نوع نمونه مناسب‌تر است. نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند راهنمای عملی برای انتخاب روش مناسب در پروژه‌های ژئوتکنیکی، حفاری و تحلیل شکست باشد.

## ۲- روابط تحلیلی و تجربی آزمایش‌های کشش غیرمستقیم

آزمایش برزیلی یکی از روش‌های پرکاربرد برای برآورد مقاومت کششی غیرمستقیم در سنگ‌ها و مواد شبه‌سنگی است. در این روش، نمونه‌ای با شکل دیسکی میان دو فک بارگذاری قرار گرفته و نیروی فشاری در امتداد قطر آن اعمال می‌شود. با توجه به تئوری الاستیسیته خطی، این نوع بارگذاری موجب ایجاد یک میدان تنش کششی در راستای عمود بر خط نیرو می‌شود که بیشترین مقدار آن در مرکز دیسک متمرکز است. بر اساس این فرض، مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم  $\sigma_{BTS} (MPa)$  از رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌گردد، که در آن  $P$  نیروی فشاری اعمال شده  $(kN)$ ،  $D$  قطر نمونه  $(mm)$  و  $t$  ضخامت نمونه  $(mm)$  است [۲۷].

$$\sigma_{BTS} = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (1)$$

آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای یکی از روش‌ها برای ارزیابی مقاومت کششی مصالح شبه‌سنگی می‌باشد. در این روش، نمونه‌ای استوانه‌ای با سطح مقطع دایره‌ای بر روی دو تکیه‌گاه ساده قرار گرفته و یک نیروی متمرکز در مرکز نمونه به آن اعمال می‌شود. تحت تأثیر این بارگذاری، در نیمه‌ی پایینی نمونه میدان تنش کششی ایجاد می‌گردد که بیشترین مقدار آن در زیر نقطه‌ی اعمال نیرو اتفاق می‌افتد. با استفاده از تئوری خمش تیرها، مقدار مقاومت کششی متناظر از رابطه‌ی (۲) قابل محاسبه است؛ به‌طوری‌که در این رابطه  $L$  فاصله‌ی بین دو

### ۳- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به منظور ارزیابی رفتار مکانیکی نمونه‌های شبه‌سنگی و بررسی تأثیر نوع آن‌ها (از مواد دانه ریز تا دانه درشت) بر خواص کششی نمونه‌ها، ابتدا بر انتخاب و ترکیب مناسب مصالح تمرکز شد، چرا که نوع، درصد و نحوه ترکیب سنگدانه‌ها تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌ها دارد. بر این اساس، نمونه‌هایی با نسبت‌های مختلف از دوغاب، پودر سنگ و سنگدانه‌های ریز و درشت ساخته شدند و سپس آزمایش‌های کشش غیرمستقیم بر روی آن‌ها انجام شد تا اثر تغییرات در ترکیب مصالح بر خواص کششی نمونه‌های شبه‌سنگی مورد ارزیابی قرار گیرد.

#### ساخت نمونه‌ها

به‌منظور دستیابی به داده‌های آزمایشگاهی مناسب و کاهش خطای نتایج، تولید نمونه‌هایی با ترکیب یکنواخت و بافت همگن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از آنجا که توزیع اندازه‌ی سنگدانه‌ها نقش مهمی در ویژگی‌های مقاومتی و رفتار مکانیکی مواد شبه‌سنگی دارد، در این پژوهش مجموعه‌ای از نمونه‌ها با ترکیب‌های مختلف دانه‌بندی، شامل دانه‌های ریز تا جدول ۱ ارائه شده است. همچنین ویژگی‌های دانه‌بندی سنگدانه‌ها شامل قطر مؤثر ( $D_{10}$ )، قطر متوسط ( $D_{50}$ )، قطر

درشت، ساخته شد تا تأثیر این عامل به‌صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد اولیه مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها شامل سیمان پرتلند تیپ ۲، پودر سنگ، سنگدانه‌های ریز و درشت و آب بودند. سیمان تیپ ۲ مورد استفاده بر اساس الزامات استاندارد ملی ایران ( $ISIRI 389$ ) و استاندارد بین‌المللی  $ASTM C150$  تولید شده است [۳۱]. پودر سنگ با چگالی تقریبی ۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده شد. در ترکیب مخلوط‌ها از دو نوع سنگدانه استفاده شد: سنگدانه‌ی ریز (ماسه) با چگالی ۲/۳۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب و سنگدانه‌ی درشت (شن) با چگالی ۲/۶۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب. هر دو نوع سنگدانه دارای دانه‌بندی کنترل‌شده و منطبق با الزامات استاندارد  $ASTM C33$  بودند [۳۲].

برای بررسی تأثیر ترکیب مواد، چهار نوع نمونه شبه‌سنگی ساخته شد. ترکیب‌ها شامل دوغاب سیمانی، دوغاب همراه پودر سنگ، دوغاب حاوی سنگدانه ریز، و دوغاب حاوی سنگدانه‌های ریز و درشت بود. مشخصات اختلاط هر نمونه شامل نسبت آب به سیمان، نسبت سیمان به پودر سنگ یا سنگدانه‌ها در

جدول ۱. نسبت‌های اختلاط نمونه‌های شبه‌سنگی

نوع نمونه	ترکیب اصلی	نسبت آب به سیمان (w/c)	نسبت سیمان به پودر سنگ	نسبت سیمان به ماسه	نسبت سیمان به مجموع سنگدانه‌ها
۱	دوغاب سیمانی	۰/۵	-	-	-
۲	دوغاب سیمانی + پودر سنگ	۰/۶	۱	-	-
۳	دوغاب سیمانی + سنگدانه ریز	۰/۶	-	۰/۳۳	-
۴	دوغاب سیمانی + سنگدانه ریز و درشت	۰/۶	-	-	۰/۶۷

جدول ۲. مشخصات دانه بندی سنگدانه‌های مورد استفاده.

نوع سنگدانه	$D_{10}(\mu m)$	$D_{50}(\mu m)$	$D_{60}(\mu m)$	(Cu)
سنگدانه ریز	۷۰۰	۱۱۹۰	۲۱۰۰	۳
سنگدانه درشت	۱۹۵۰	۲۹۵۵	۳۰۵۰	۱/۵۶

مدت ۲۰ ثانیه روی میز لرزان قرار گرفتند تا تراکم و خروج هوا به‌درستی انجام شود. پس از قالب‌ریزی، نمونه‌ها به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط و درون قالب نگهداری شدند. پس از گیرش اولیه، آن‌ها از قالب خارج و به‌مدت ۲۸ روز در آب

برای آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا مخلوط هر ترکیب با نسبت‌های معین در میکسر ریخته شده و تا یکنواخت شدن کامل مواد هم زده شد. سپس برای توزیع مناسب و تراکم کافی، مخلوط‌ها به‌طور همزمان در قالب‌های بزرگ ریخته و قالب‌ها به

می‌دهد. کلیه مراحل ساخت و عمل‌آوری مطابق با استاندارد *ASTM C192* انجام شد [۳۳].

به‌منظور رعایت استانداردهای موجود، قطر نمونه‌های دیسکی و استوانه‌ای حداقل ۱۰ برابر بزرگ‌ترین اندازه سنگدانه تشکیل‌دهنده ماده شبه‌سنگی در نظر گرفته شد.

عمل‌آوری شدند. در مرحله بعد، به‌منظور دستیابی به ابعاد استاندارد، مغزه‌گیری بر روی بلوک‌های عمل‌آوری‌شده انجام گرفت و نمونه‌های موردنیاز برای آزمایش‌های برزیلی، خمش سه‌نقطه‌ای و خمش چهارنقطه‌ای با قطر ۵۴ میلی‌متر (*NX*) استخراج شدند. شکل ۱ (الف) بلوک‌های مغزه‌گیری شده و شکل ۱ (ب) نمونه‌های آماده شده برای انجام آزمایش‌ها را نشان



(ب)



(الف)

شکل ۱. (الف) بلوک‌های مغزه‌گیری‌شده و (ب) نمونه‌های استخراج‌شده با قطر *NX*.

مطالعه، چهار روش غیرمستقیم برای بررسی مقاومت کششی نمونه‌های شبه‌سنگی به‌کار گرفته شد که شامل آزمایش برزیلی، آزمایش خمش سه نقطه‌ای، آزمایش خمش چهار نقطه‌ای و آزمایش شاخص بار نقطه‌ای می‌باشد. در ادامه، برای بررسی تأثیر دانه ریز یا دانه درشت بودن نمونه بر خواص کششی نمونه‌های شبه‌سنگی شرایط و رویه اجرای هر یک از این آزمایش‌ها تشریح می‌شود.

### ۳-۲-۱- آزمایش برزیلی

آزمایش برزیلی مطابق با استاندارد *ISRM* انجام شد [۳۴]. نمونه‌های دیسکی تحت بارگذاری فشاری پیوسته قرار گرفتند و مطابق استاندارد نرخ بارگذاری ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. در طول آزمایش، نیروی اعمالی و تغییر شکل قطری نمونه‌ها ثبت شد. شکل ۳ نمای کلی مراحل آزمایش را نشان می‌دهد.

### انجام آزمایش‌ها

نمونه‌های شبه‌سنگی و بتن به دلیل شکننده بودن و اختلاف بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی بیشتر در معرض شکست تحت بارهای کششی قرار دارند. این موضوع عمدتاً به وجود ریزترک‌های اولیه در ساختار ماده مربوط می‌شود؛ در بارگذاری فشاری، این ترک‌ها تحت فشرده شدن قرار گرفته و تأثیر چندانی بر رفتار کلی نمونه ندارند، اما در شرایط کششی، ترک‌ها به یکدیگر متصل شده و مسیر شکست شکل می‌گیرد. با توجه به اهمیت تعیین مقاومت کششی برای تحلیل رفتار مکانیکی مصالح، روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری این پارامتر توسعه یافته است. آزمایش کشش مستقیم به‌عنوان دقیق‌ترین روش شناخته می‌شود، اما پیچیدگی تجهیزاتی، نیاز به بارگذاری محوری دقیق و هزینه‌های بالا، کاربرد آن را در عمل محدود کرده است. در مقابل، آزمایش‌های غیرمستقیم به دلیل سادگی اجرا و قابلیت تکرار، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این



(ب)

شکل ۲. (الف) نمایی از دستگاه بارگذاری آزمایش برزیلی و (ب) نمونه‌ها بعد از شکست.

بارگذاری ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه آزمایش شدند [۳۵] و نیروی اعمالی و تغییر شکل میانی به صورت پیوسته ثبت گردید (شکل ۴).



(الف)

۳-۲-۲- آزمایش مقاومت خمش سه نقطه‌ای

آزمایش خمش سه نقطه‌ای برای ارزیابی مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های بتن و شبه‌سنگی انجام شد. نمونه‌ها با نرخ



(ب)

شکل ۳. (الف) نمایی از دستگاه بارگذاری آزمایش مقاومت خمش سه نقطه‌ای و (ب) نمونه‌ها قبل از بارگذاری.



(الف)

۳-۲-۳- آزمایش مقاومت خمش چهار نقطه‌ای

آزمایش خمش چهار نقطه‌ای مشابه خمش سه نقطه‌ای انجام شد، با این تفاوت که بار توسط دو غلتک اعمال می‌شود تا ناحیه‌ای با تنش یکنواخت ایجاد گردد [۳۶]. نمونه‌ها با نرخ بارگذاری ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه آزمایش شدند و نیروی اعمالی و تغییر شکل به صورت پیوسته ثبت شد. شکل ۴ نمایی از نمونه‌ها پس از شکست را نشان می‌دهد.

### ۳-۲-۴- آزمایش شاخص بار نقطه‌ای

آزمایش شاخص بار نقطه‌ای به‌عنوان روشی ساده، اقتصادی و قابل اجرا در میدان برای برآورد مقاومت سنگ‌ها شناخته می‌شود [۳۷]. این آزمایش معمولاً به‌عنوان معیار غیرمستقیم برای تعیین مقاومت فشاری و کششی سنگ‌ها به‌کار می‌رود [۳۸] و نمونه‌ها می‌توانند به شکل‌های مختلف، از جمله استوانه‌ای، مکعبی یا نامنظم، مورد آزمایش قرار گیرند [۳۹]. در این مطالعه، آزمایش به‌صورت محوری بر روی نمونه‌های دیسکی انجام شد و مقاومت نهایی شکست ثبت گردید (شکل ۶).



شکل ۴. نمونه‌ها بعد از شکست در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای



(ب)



(الف)

شکل ۵. (الف) نمونه‌های آزمایش شاخص بار نقطه‌ای بعد از شکست و (ب) نمایی از دستگاه بارگذاری آزمایش شاخص بار نقطه‌ای.

## ۴- ارائه نتایج

### ۴-۱- نمونه نوع یک

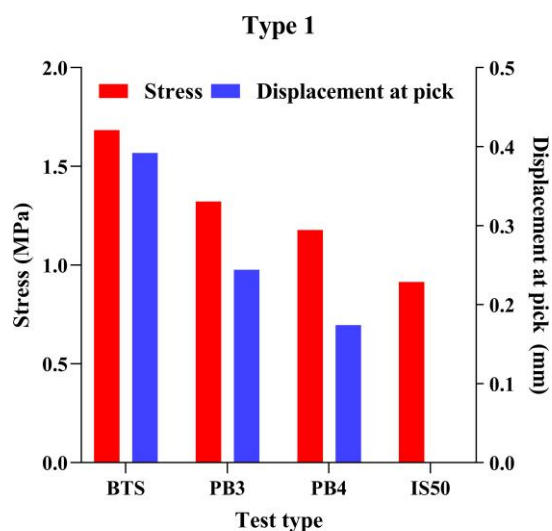
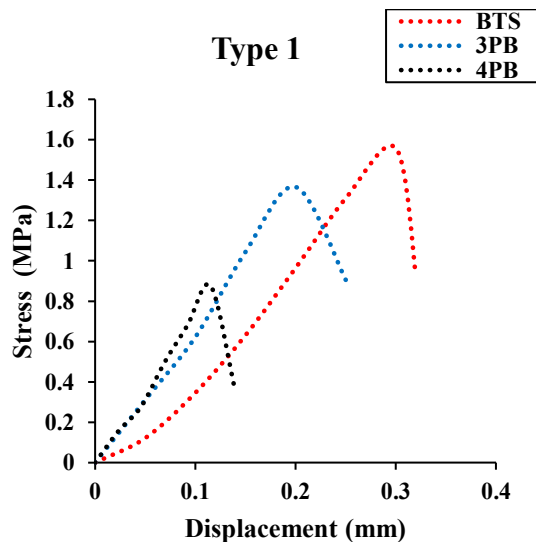
شکل ۶ (الف) تغییرات مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم و جابجایی متناظر با مقاومت برای هر آزمایش در نمونه نوع یک را نشان می‌دهد. بررسی نتایج نشان داد که مقاومت کششی در آزمایش برزیلی بیشترین مقدار را داشته و پس از آن به ترتیب در آزمایش خمش سه نقطه‌ای، خمش چهار نقطه‌ای و در نهایت شاخص بار نقطه‌ای مقاومت کششی کاهش یافته است. بررسی دقیق‌تر مقادیر نشان می‌دهد که مقاومت کششی در آزمایش

این بخش به ارائه و تحلیل نتایج آزمایش‌های مکانیکی نمونه‌های شبه‌سنگی می‌پردازد. نمونه‌ها با چهار ترکیب دانه‌بندی مختلف، از دانه‌های ریز تا درشت، ساخته شده و بر اساس نسبت دانه‌های ریز و درشت به چهار گروه دسته‌بندی شدند. هدف از این آزمایش‌ها، مقایسه عملکرد آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم با توجه به تغییر جنس نمونه‌های شبه‌سنگی است.

نمونه و به صورت کشش محوری شکل می‌گیرد که باعث نزدیک‌تر شدن نتایج به مقاومت کششی واقعی ماده می‌شود. مطالعه تجربی و تحلیلی گارسیا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۷) نشان داده است که برای ملات‌ها و نمونه‌های دانه ریز، آزمایش خمش چهار نقطه‌ای پراکندگی کمتری در نتایج دارد [۳۸]. علاوه بر این، با افزایش مقاومت کششی، میزان جابجایی افزایش می‌یابد. با بررسی دقیق‌تر می‌توان مشاهده کرد که آزمایش خمش سه نقطه‌ای نسبت به آزمایش خمش چهار نقطه‌ای ۴۰/۲۲ درصد و آزمایش برزیلی نسبت به آزمایش خمش سه نقطه‌ای ۶۰/۶۵ درصد افزایش داشته است. دلیل این است که در نمونه‌های دانه ریز، آزمایش‌های با مقاومت کششی بالاتر باعث کاهش تمرکز تنش در نمونه‌های شبه‌سنگی شده و نیروها به شکل یکنواخت‌تری در حجم نمونه توزیع می‌شوند؛ بنابراین نمونه‌ها پیش از گسیختگی نهایی، ظرفیت بیشتری برای تغییر شکل از خود نشان می‌دهند.

شکل ۶ (ب) منحنی‌های تنش-جابجایی را نشان می‌دهد که در آن آزمایش‌های دارای مقاومت کششی بیشتر جابجایی بیشتری تا نقطه شکست داشته‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت کششی در آزمایش‌ها، نمونه‌های شبه‌سنگی توانایی بیشتری در جذب انرژی پیدا کرده و رفتار شکل‌پذیرتری از خود نشان داده است.

خمش سه نقطه‌ای نسبت به آزمایش برزیلی ۲۷/۳۸ درصد کمتر بوده است. همچنین این مقدار در خمش چهار نقطه‌ای نسبت به خمش سه نقطه‌ای ۱۲/۲۲ درصد و در شاخص بار نقطه‌ای نسبت به خمش چهار نقطه‌ای ۲۸/۸۰ درصد کاهش داشته است. در نمونه‌های دانه ریز، کمترین مقادیر مقاومت کششی در آزمایش‌های شاخص بار نقطه‌ای و خمش چهار نقطه‌ای به دست آمده است و آزمایش برزیلی بیشترین مقدار مقاومت همراه با بیشترین پراکندگی داده‌ها را نشان می‌دهد. این نتایج با گزارش‌های پراس و دیدریش همخوانی دارد؛ آن‌ها نشان داده‌اند که در نمونه‌های دانه ریز، آزمایش برزیلی می‌تواند برآورد نادرستی از مقاومت کششی ارائه دهد و مسیر ترک‌ها از مرکز نمونه منحرف شوند [۳۷]. در این نوع نمونه‌ها، تمرکز تنش در نواحی تماس بارگذاری در آزمایش برزیلی موجب توزیع تنش غیرایده‌آل و شکست‌های عمدتاً برشی می‌شود. بنابراین، مقدار مقاومت کششی به دست آمده در این آزمایش ممکن است با مقاومت واقعی ماده متفاوت باشد. این رفتار در مطالعات *DIC* و تحلیل عددی رن و همکاران (۲۰۲۲) نیز گزارش شده است؛ آن‌ها نشان دادند که ترک‌ها ممکن است از مرکز دیسک منحرف شوند و شکست دومحوره یا برشی غالب شود [۱۶]. از طرف دیگر، آزمایش خمش چهار نقطه‌ای باعث ایجاد ناحیه‌ای با لنگر خمشی یکنواخت در وسط نمونه می‌شود که تمرکز نیروهای نقطه‌ای را کاهش می‌دهد. در نتیجه، ترک اولیه معمولاً در میانه



<sup>1</sup> García

(الف)

(ب)

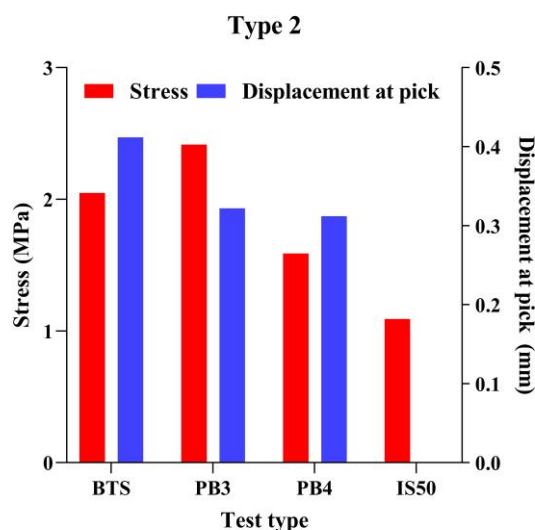
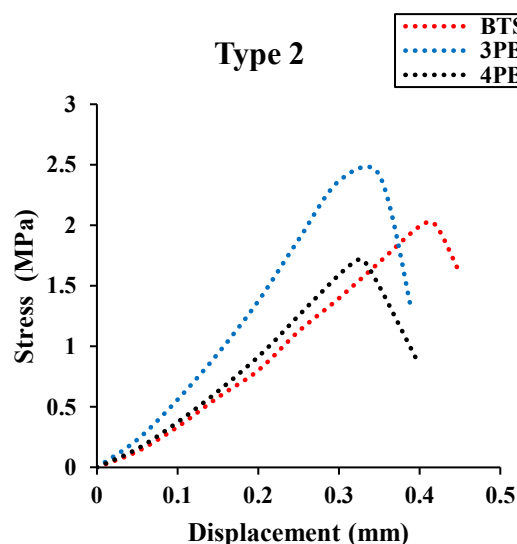
شکل ۶. (الف) مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم و جابجایی متناظر با مقاومت در نمونه نوع یک و (ب) منحنی نیرو-جابجایی

#### ۲-۴- نمونه نوع دو

در نمونه نوع دو که نمونه نیز تقریباً دانه ریز است، روندی مشابه نمونه نوع یک مشاهده شد. شکل ۷ (الف) نشان می‌دهد که آزمایش شاخص بار نقطه‌ای و آزمایش خمش چهار نقطه‌ای دارای کمترین برآورد مقاومت کششی بوده‌اند. با بررسی دقیق‌تر می‌توان مشاهده کرد که آزمایش خمش سه نقطه‌ای نسبت به آزمایش خمش چهار نقطه‌ای ۳/۲ درصد و آزمایش برزیلی نسبت به آزمایش خمش سه نقطه‌ای ۲۷/۸۹ درصد افزایش داشته است.

در نمودار تنش-جابجایی (شکل ۷ (ب)) نیز آزمایش‌های دارای مقاومت کششی بیشتر جابجایی بیشتری تا نقطه شکست داشته‌اند. این تغییرات برای آزمایش خمش سه نقطه‌ای صدق نمی‌کند.

در نمونه نوع دو که نمونه نیز تقریباً دانه ریز است، روندی مشابه نمونه نوع یک مشاهده شد. شکل ۷ (الف) نشان می‌دهد که آزمایش شاخص بار نقطه‌ای و آزمایش خمش چهار نقطه‌ای دارای کمترین برآورد مقاومت کششی بوده‌اند. با بررسی دقیق‌تر می‌توان مشاهده کرد که آزمایش خمش چهار نقطه‌ای نسبت به آزمایش شاخص بار نقطه‌ای ۳۱/۲۸ درصد، آزمایش خمش سه نقطه‌ای نسبت به آزمایش خمش چهار نقطه‌ای ۵۲/۱۴ درصد افزایش و آزمایش برزیلی نسبت به آزمایش خمش سه نقطه‌ای ۱۵/۱۸ درصد کاهش داشته است. همچنین مطالعه لوچان<sup>۱</sup> و پولاک<sup>۲</sup> (۲۰۲۴) نشان می‌دهد در نمونه‌های تقریباً دانه ریز آزمایش خمش سه نقطه‌ای و چهار نقطه‌ای معمولاً



(الف)

(ب)

شکل ۷. (الف) مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم و جابجایی متناظر با مقاومت در نمونه نوع دو و (ب) منحنی نیرو-جابجایی

#### ۳-۴- نمونه نوع سه

در نمونه نوع سه که مقداری سنگدانه ریز به آن اضافه گردید و نمونه‌های دانه درشت‌تر شد روند نتایج آزمایش‌های کشش غیر مستقیم با نتایج دو نمونه دانه ریزتر متفاوت بود. شکل ۸ (الف) نشان می‌دهد که آزمایش شاخص بار نقطه‌ای و آزمایش برزیلی

در نمونه نوع سه که مقداری سنگدانه ریز به آن اضافه گردید و نمونه‌های دانه درشت‌تر شد روند نتایج آزمایش‌های کشش غیر مستقیم با نتایج دو نمونه دانه ریزتر متفاوت بود. شکل ۸ (الف) نشان می‌دهد که آزمایش شاخص بار نقطه‌ای و آزمایش برزیلی

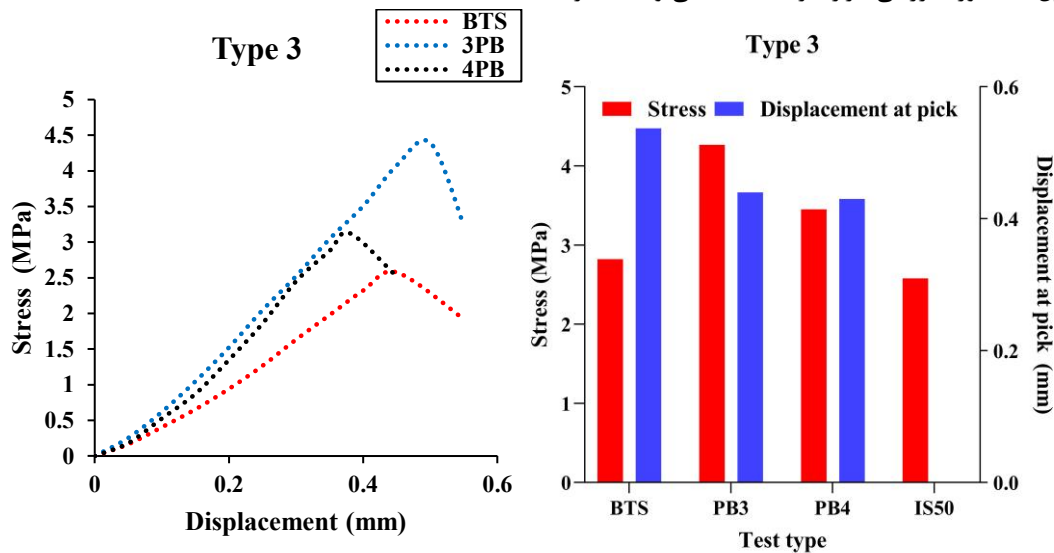
<sup>2</sup> Polak

<sup>1</sup> Lochan

تفاوت در مکانیزم شکست شود. در آزمایش خمش سه نقطه‌ای پراکندگی نتایج نسبت به آزمایش های برزلی و شاخص بار نقطه‌ای نیز بیشتر است. همچنین با بررسی جابجایی متناظر با مقاومت برای هر آزمایش در این نوع نمونه می‌توان مشاهده کرد که آزمایش خمش سه نقطه‌ای نسبت به آزمایش خمش چهار نقطه‌ای ۲/۳۲ درصد و آزمایش برزلی نسبت به آزمایش خمش سه نقطه‌ای ۲۲/۰۷ درصد افزایش داشته است.

نمودار تنش-جابجایی (شکل ۸ (ب)) نشان می‌دهد که آزمایش های دارای مقاومت کششی بیشتر جابجایی بیشتری تا نقطه شکست داشته‌اند.

نقطه‌ای ۳۳/۸۶ درصد کاهش داشته است. با دانه درشت‌تر شدن ماده، اختلاف بین نتایج آزمایش‌ها کاهش یافت و رفتار آزمایش برزلی در این حالت نسبتاً نتایج ایده‌آل‌تری نشان داد که با مشاهدات تامر و همکاران (۲۰۱۹) که گزارش کرده‌اند که خمش سه نقطه‌ای می‌تواند برای نمونه‌های دانه درشت مناسب‌تر باشد [۴۰]، همخوانی ندارد. ناهمخوانی مشاهده شده میان نتایج این پژوهش و نتایج گزارش شده توسط نامر و همکاران را می‌توان عمدتاً به تفاوت در نوع، ابعاد و هندسه دانه‌ها، نوع دانه‌بند و شرایط نمونه‌سازی نسبت داد. در حالی که در مطالعه نامر و همکاران از سنگ طبیعی با ناهمگنی ذاتی استفاده شده است، در پژوهش حاضر نمونه‌های شبه‌سنگی با ترکیب و دانه‌بندی کنترل شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند که می‌تواند منجر به



(ب)

(الف)

شکل ۸. (الف) مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم و جابجایی متناظر با مقاومت در نمونه نوع سه و (ب) منحنی نیرو-جابجایی

خمش سه نقطه‌ای نسبت به آزمایش خمش چهار نقطه‌ای ۶۴/۸۸ درصد افزایش و آزمایش برزلی نسبت به آزمایش خمش سه نقطه‌ای ۶۱/۱۴ درصد کاهش داشته است. برای نمونه‌های دانه درشت‌تر، برخلاف نمونه‌های دانه ریز، افزایش قابل توجهی در نتایج آزمایش خمش سه نقطه‌ای مشاهده شد و پراکندگی نتایج آزمایش خمش‌ها نسبت به برزلی بیشتر بود. این نتایج با یافته‌های پراس و دیدریش (۲۰۱۴) که نشان می‌دهد در نمونه‌های دانه درشت اختلاف بین روش‌ها کاهش می‌یابد و هر آزمایش می‌تواند حساسیت متفاوتی به ناهمگنی‌ها نشان دهد،

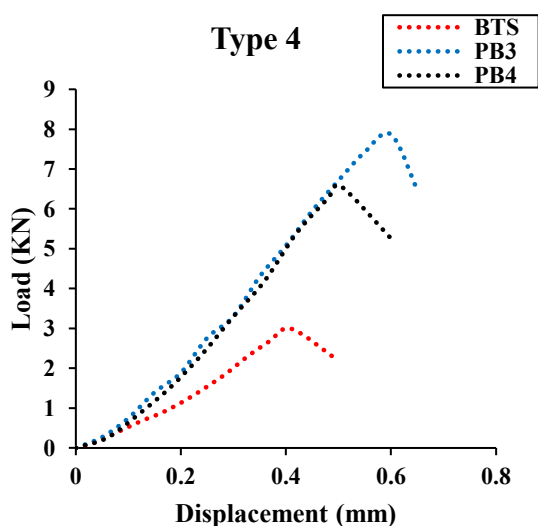
#### ۴-۴- نمونه نوع چهار

در نمونه نوع چهار که دانه درشت‌ترین نمونه ساخته شده با ترکیب سنگدانه های ریز و درشت است، روند نتایج آزمایش های کشش غیر مستقیم با نتایج نمونه نوع ۳ مشابه بود. شکل ۹ (الف) نشان می‌دهد که آزمایش شاخص بار نقطه‌ای و آزمایش برزلی دارای کمترین برآورد مقاومت کششی بوده اند. با بررسی دقیق‌تر می‌توان مشاهده کرد که آزمایش خمش چهار نقطه‌ای نسبت به آزمایش شاخص بار نقطه‌ای ۸۸/۲۲ درصد، آزمایش

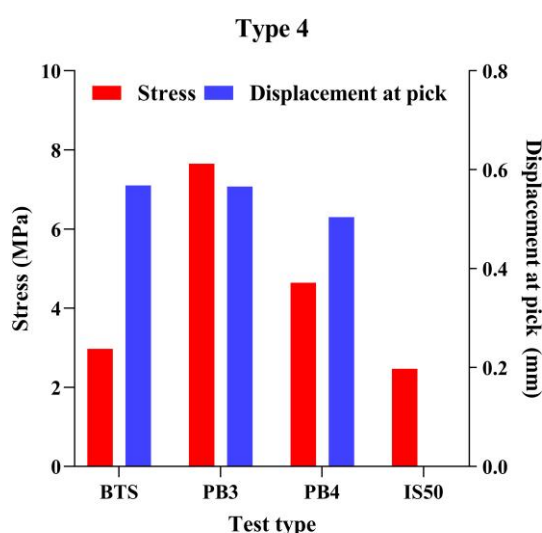
نسبت به آزمایش‌های برزیلی و شاخص بار نقطه‌ای نیز بیشتر است. همچنین جابجایی متناظر با مقاومت برای هر آزمایش در این نوع نمونه بیشتر بوده است. با بررسی دقیق‌تر می‌توان مشاهده کرد که آزمایش خمش سه نقطه‌ای نسبت به آزمایش خمش چهار نقطه‌ای ۱۲/۳ درصد افزایش و آزمایش برزیلی نسبت به آزمایش خمش سه نقطه‌ای ۰۰/۳۵ درصد کاهش داشته است.

نمودار تنش-جابجایی (شکل ۹ ب)) نشان می‌دهد که آزمایش‌های دارای مقاومت کششی بیشتر جابجایی بیشتری تا نقطه شکست داشته‌اند.

همخوانی دارد [۳۷]. بنابراین، با افزایش اندازه دانه‌ها، آزمایش برزیلی می‌تواند نتایج بهتری ارائه دهد. در نمونه‌های دانه درشت، خمش سه نقطه‌ای ممکن است مقدار بالاتری از مقاومت خمشی نشان دهد زیرا نقطه تمرکز لنگر در مرکز است و ترک تحت شرایط کششی تک‌محوری شکل می‌گیرد [۴۱]. علاوه بر این، در نمونه‌های دانه درشت (مشابه تیپ ۳ و ۴)، احتمال قرارگیری سنگدانه‌های بزرگ درست در زیر نقطه اعمال بار متمرکز وجود دارد. این موضوع می‌تواند موجب قفل و بست سنگدانه‌ها شده و به طور موضعی مانع رشد ترک شود که در نهایت منجر به ثبت مقاومت‌های بالاتر نسبت به واقعیت می‌گردد. همچنین در آزمایش‌های خمش سه نقطه‌ای و چهار نقطه‌ای پراکنندگی نتایج



(ب)



(الف)

شکل ۹. (الف) مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم و جابجایی متناظر با مقاومت در نمونه نوع چهار و (ب) منحنی نیرو-جابجایی

قضاوت در این مقایسه‌ها شامل منطق توزیع تنش کششی، یکنواختی میدان تنش، نوع و محل شروع ترک، میزان پراکنندگی داده‌ها و محافظه‌کارانه بودن مقادیر به دست آمده با توجه به ریزساختار نمونه‌ها (ناشی از دانه ریز یا دانه درشت بودن سنگدانه) بوده است. بر این اساس، ارزیابی صحت نسبی روش‌ها بر پایه تطابق نتایج با رفتار مورد انتظار مصالح و شواهد گزارش شده در مطالعات پیشین صورت گرفته است.

نتایج نشان داد با افزایش اندازه ذرات تشکیل دهنده ماده شبه‌سنگی، مقاومت کششی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. لازم به تأکید است که در این پژوهش، هیچ‌یک از روش‌های کشش غیرمستقیم به عنوان معیار مرجع مطلق برای تعیین مقاومت کششی در نظر گرفته نشده است. از آنجا که آزمایش کشش مستقیم به عنوان روش مرجع قلمداد می‌شود و انجام آن در این مطالعه امکان‌پذیر نبوده است، مقایسه نتایج صرفاً بر مبنای تحلیل نسبی رفتار مکانیکی و شکست انجام شده است. معیار

## ۵- نتیجه‌گیری

این مطالعه به مقایسه‌ی چهار روش غیرمستقیم متداول در تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های شبه‌سنگی، شامل آزمایش برزلی، آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای، آزمایش خمش چهارنقطه‌ای و شاخص بار نقطه‌ای، بر مجموعه‌ای از نمونه‌ها با طرح اختلاط‌های متفاوت از دانه‌ریز تا دانه‌درشت اختصاص داشت. در این مطالعه، کمترین مقادیر مقاومت کششی به دست آمده در روش‌های مختلف، به‌عنوان برآوردی محافظه‌کارانه‌تر در نظر گرفته شده‌اند که در طراحی‌های مهندسی، حاشیه‌ایمنی مطمئن‌تری را فراهم می‌کنند. نتایج حاصل نشان داد که تغییر جنس نمونه و اندازه‌ی دانه‌ها نقش مهمی در مقدار مقاومت کششی غیر مستقیم دارد. در نمونه‌های دانه‌ریز، روش‌های خمشی به‌ویژه آزمایش خمش چهارنقطه‌ای به دلیل ایجاد ناحیه‌ای با توزیع تنش یکنواخت‌تر، نتایجی قابل قبول‌تری ارائه داده است. با افزایش اندازه‌ی دانه‌ها، آزمایش برزلی به دلیل تأثیرپذیری کمتر از ناهمگنی‌های موضعی سنگدانه‌ها، عملکرد مناسب‌تری نسبت به روش‌های خمشی از خود نشان داده است. در این شرایط، ماهیت شکست کششی در مرکز نمونه بهتر بوده و نتایج آزمایش برزلی به مقاومت واقعی

نزدیک‌تر هستند. بررسی‌های انجام‌شده نشان داد که اختلاف بین مقادیر مقاومت کششی در روش‌های غیرمستقیم در نمونه‌های نرم‌تر کاهش می‌یابد و مقادیر حاصل از آزمایش‌ها به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شود. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب روش مناسب تعیین مقاومت کششی باید متناسب با خواص دانه بندی نمونه‌ها انجام گیرد.

اجرای همزمان چهار روش بر روی مجموعه‌ای کنترل‌شده از نمونه‌ها با طرح اختلاط متفاوت، امکان مقایسه روش‌های کشش غیر مستقیم را فراهم کرد. با ایجاد روابط رگرسیون امکان تحلیل‌های آماری دقیق‌تر در مطالعات آتی مهیا شده است. پیشنهاد می‌شود در ادامه‌ی این پژوهش، آزمایش‌های کشش مستقیم به‌عنوان معیار مرجع، همراه با ثبت کرنش و تغییر شکل توسط روش‌های تصویربرداری دیجیتال (*DIC*) به کار گرفته شوند تا ارزیابی دقیق‌تری از مکانیسم شکست و توزیع تنش در روش‌های غیرمستقیم فراهم شود. به‌کارگیری مدل‌سازی عددی و تحلیل اثر پارامترهایی مانند نرخ بارگذاری و شرایط محیطی نیز می‌تواند درک بهتری از تفاوت عملکرد روش‌ها در سطوح مختلف شکنندگی و اندازه‌ی دانه‌ها ایجاد کند.

## منابع

- Hudson JA. Tensile strength and the ring test. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Elsevier; 1969. p. 91–7.
- Fairhurst C. On the validity of the “Brazilian” test for brittle materials. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Elsevier; 1964. p. 535–46.
- Miguel LFF, Riera JD, Iturrioz I, Araújo GF. Influence of the width of the loading strip in the Brazilian tensile test of concrete and other brittle materials. *J Mater Civ Eng*. 2016;28(11):4016136.
- Zhang XP, Zhang PY, Ji PQ, Zhang H, Zhang Q. The applicability of Brazilian test loading with different platens to measure tensile strength of rock: a numerical study. *Rock Mech Rock Eng*. 2024;57(1):233–60.
- Claesson J, Bohloli B. Brazilian test: Stress field and tensile strength of anisotropic rocks using an analytical solution. *Int J Rock Mech Min Sci*. 2002;39(8):991–1004.
- Bahaaddini M, Serati M, Masoumi H, Rahimi E. Numerical assessment of rupture mechanisms in Brazilian test of brittle materials. *Int J Solids Struct*. 2019;180–181:1–12.
- Zhang XP, Zhang PY, Ji PQ, Zhang H, Zhang Q. The Applicability of Brazilian Test Loading with Different Platens to Measure Tensile Strength of Rock: A Numerical Study. *Rock Mech Rock Eng*. 2023;57(1):233–60.
- Doostan A, Eftekhari SM, Ahmadi M. Experimental Investigation of the Effect of Grain Size on the Mechanical Parameters and Mode I Fracture Toughness of Rock-Like Materials. *J ROCK Mech*. 2024;8(2):21–34.
- Sturm R, Fam A. Bond and Development Length of GFRP Bars Embedded in Shotcrete. *J Compos Constr*. 2025;29(4):4025025.
- Yu F, Wang M, Yao D, Yang W. Study on flexural behavior of self-compacting concrete beams with recycled aggregates. *Buildings*. 2022;12(7):881.

11. Guo SY, Zhang X, Ren J, Chen JZ, Zhao TJ, Li TW, et al. Preparation of TiO<sub>2</sub>/epoxy resin composite and its effect on mechanical and bonding properties of OPC mortars. *Constr Build Mater*. 2021;272:121960.
12. Li W, Ji W, Su Y, Ban X. Tensile constitutive model of reactive powder concrete based on flexural experiment. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing; 2020. p. 12021.
13. Erarslan N, Liang ZZ, Williams DJ. Experimental and numerical studies on determination of indirect tensile strength of rocks. *Rock Mech Rock Eng*. 2012;45(5):739–51.
14. Aqla S, Widodo NP, Rai MA. Study of physical and numerical model in determination of fracture toughness mode I using three point bending and Brazilian test for andesite, limestone and cement paste. In: *Proceedings of the 9th Asian Rock Mechanics Symposium, Indonesia*. 2016.
15. Wong LNY, Jong MC. Water saturation effects on the Brazilian tensile strength of gypsum and assessment of cracking processes using high-speed video. *Rock Mech rock Eng*. 2014;47(4):1103–15.
16. Ren H, Song S, Ning J. Investigation into the damage mechanism of concrete in the Brazilian test and flattened Brazilian test through the moment tensor. *Eng Fract Mech*. 2022;262:108093.
17. Efe T, Demirdag S, Tufekci K, Sengun N, Altindag R. Estimating the direct tensile strength of rocks from indirect tests. *Arab J Geosci*. 2021;14(14):1343. Available from: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07539-9>
18. Ruiz G, Ortiz M, Pandolfi A. Three-dimensional finite-element simulation of the dynamic Brazilian tests on concrete cylinders. *Int J Numer Methods Eng*. 2000;48(7):963–94.
19. Mohseni Afkham R, Bahaaddini M, Majdi A. Experimental investigation on the effect of loading platen curvature on the failure patterns in the brazilian test. *Journal of Engineering Geology* 2025; 19 (3) :414-429
20. Shao Y, Billington SL. Impact of UHPC tensile behavior on steel reinforced UHPC flexural behavior. *J Struct Eng*. 2022;148(1):4021244.
21. Cai H, Liu Z, Xu Z, Zhang Z, Xu T. Flexural Tensile Behavior of Interface between Precast and Cast-in-Place UHPC Members Based on Four-Point Bending Test. *Buildings*. 2023;13(3):745.
22. Basu A, Celestino TB, Bortolucci AA. Predicting weathering grades by Schmidt hammer test: an investigation on granitic rock materials from Southeastern Brazil. In: *ISRM Congress*. ISRM; 2007. p. ISRM-11CONGRESS.
23. Ma Y, Huang H. DEM analysis of failure mechanisms in the intact Brazilian test. *Int J Rock Mech Min Sci*. 2018;102:109–19.
24. Perras MA, Diederichs MS. A Review of the Tensile Strength of Rock: Concepts and Testing. *Geotech Geol Eng*. 2014;32(2):525–46.
25. Huang F, Wu C, Ni P, Wan G, Zheng A, Jang BA, et al. Experimental analysis of progressive failure behavior of rock tunnel with a fault zone using non-contact DIC technique. *Int J Rock Mech Min Sci*. 2020;132:104355.
26. Bahaaddini M, Serati M, Masoumi H, Rahimi E. Numerical assessment of rupture mechanisms in Brazilian test of brittle materials. *Int J Solids Struct*. 2019;180–181:1–12.
27. Hondros G. The evaluation of Poisson's ratio and modulus of materials of a low tensile resistance by the Brazilian (indirect tensile) test with particular reference to concrete. *J Appl Sci*. 1959;10(3):243–68.
28. Pandey P, Singh DP. Deformation of a rock in different tensile tests. *Eng Geol*. 1986;22(3):281–92.
29. ASTM. D5731-08: Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications. *Rock Mech*. 1985;22(2):1–9.
30. Franklin JA. Suggested method for determining point load strength. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Elsevier*; 1985. p. 51–60.
31. Standard A. Standard specification for Portland cement. *ASTM Int West Conshohocken, PA*. 2009;
32. Berney ES, Smith DM. Mechanical and physical properties of ASTM C33 Sand. 2008;
33. ASTM C. 192/C 192M Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. *Annu B ASTM Stand*. 2007;4.

34. Bieniawski ZT, Hawkes I. Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials - 1. Suggested Method for Determining Direct Tensile Strength. *Int J Rock Mech Min Sci.* 1978;15(3):99–103.
35. EN TS. TS EN 12372, “Natural stone test methods- Determination of flexural strength under concentrated load,” Turkish Standards Institution, 2013. *Inst Turkish Stand.* :15.
36. NP EN 13161:2006. NP EN 13161:2006 - Natural stone test methods Determination of flexural strength under constant moment (in Portuguese). Turkish Standards Institution, Ankara/Turkey. Turkish Standards Institution Ankara; 2006. p. 16.
37. Perras MA, Diederichs MS. A Review of the Tensile Strength of Rock: Concepts and Testing. *Geotech Geol Eng.* 2014;32(2):525–46.
38. García VJ, Márquez CO, Zúñiga-Suárez AR, Zúñiga-Torres BC, Villalta-Granda LJ. Brazilian test of concrete specimens subjected to different loading geometries: review and new insights. *Int J Concr Struct Mater.* 2017;11:343–63.
39. Lochan PP, Polak MA. Evaluation of 3-Point and 4-Point Bending Tests for Tensile Strength Assessment of GFRP Bars. *Materials (Basel).* 2024;17(21):5261.
40. Efe T, Sengun N, Demirdag S, Tufekci K, Altindag R. Effect of Sample Dimension on Three and Four Points Bending Tests of Fine Crystalline Marble and its Relationship with Direct Tensile Strength. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* IOP Publishing; 2019. p. 12093.
41. Słowik M, Akram A. Length effect at testing splitting tensile strength of concrete. *Materials (Basel).* 2021;15(1):250.



## Comparison of Indirect Tensile Strength Determination Methods for Samples Ranging from Fine-Grained to Coarse-Grained

Reza Mohseniafkham<sup>1</sup>; Abolfazl Faghihi Habibabadi<sup>2</sup>; Hadi Atapour<sup>\*3</sup>

1- M.Sc. student in Rock Mechanics, Department of Mining Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- M.Sc. student in Rock Mechanics, Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Geomechanical Engineering, Faculty of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, Markazi, Iran.

Received: 16. November. 2025      Accepted: 21. December. 2025

(\*Corresponding author: h.atapour@arakut.ac.ir)

### Keywords

Rock-like specimens, Brazilian test, Three-point bending test, Four-point bending test, Point-load index test, Fine-grained specimens, Coarse-grained specimens

### Final English Extended Abstract

Tensile strength is one of the key parameters in the analysis and design of mining and civil engineering structures. This property plays an important role in assessing the stability of slopes and underground excavations and in selecting appropriate materials for their stabilization. Because direct determination of tensile strength for brittle materials such as rock is technically difficult, standardized methods for indirect estimation have been developed. This study experimentally compares four common indirect methods—the Brazilian (indirect tensile) test, three-point bending test, four-point bending test, and the point-load index test—for determining the tensile strength of quasi-rock specimens. To this end, four mix designs producing a spectrum of quasi-rock specimens from fine-grained to coarse-grained were prepared and

tested.

Results showed that, in fine-grained specimens, tensile strength values increased by 61%, 12%, and 27% for (1) four-point bending versus point-load index, (2) three-point bending versus four-point bending, and (3) Brazilian versus three-point bending, respectively. In coarse-grained specimens these differences changed to +135%, +64%, and -61%, respectively. The four-point bending test produced lower scatter and a more conservative estimate than the Brazilian test in fine-grained specimens. In coarse-grained specimens, the results from the three methods were closer to one another. By providing a controlled set of quasi-rock specimens and a percentage-based direct comparison among methods, this study offers a practical framework for selecting the testing method appropriate to microstructural characteristics. The findings can serve as a basis for developing conversion coefficients and for improving indirect tensile strength determination methods for quasi-rock specimens.

### Summary

This study experimentally compares four widely used indirect methods for estimating tensile strength of quasi-rock specimens: the Brazilian (indirect tensile) test, three-point bending, four-point bending, and the point-load index test. Four mix designs were prepared to produce a controlled spectrum of specimens from fine-grained to coarse-grained. Tests quantified method-to-method differences in measured tensile strength and data scatter. In fine-grained specimens, relative increases in measured strength were 61% (4-point bending vs. point-load), 12% (3-point vs. 4-point bending), and 27% (Brazilian vs. 3-point bending); the corresponding changes in coarse-grained specimens were +135%, +64%, and -61%. Four-point bending yielded lower scatter and more conservative estimates than the Brazilian test for fine-grained samples, while results converged for coarse-grained samples. The work provides a practical framework and data basis for selecting appropriate indirect tests and developing conversion coefficients according to microstructural characteristics.



## Introduction

Tensile strength is a critical mechanical property for assessing the stability and performance of rock-like materials in mining and civil-engineering applications, influencing slope stability, excavation support, and material selection for stabilization. Because brittle materials such as rock are difficult to test in direct tension, several standardized indirect methods—most commonly the Brazilian (indirect tensile) test, three-point and four-point bending tests, and the point-load index test—are widely used to estimate tensile strength. However, these methods can yield different results depending on specimen microstructure, geometry, and testing protocol, which complicates method selection and the interpretation of laboratory data for design purposes.

The present study aims to provide a clear, experimentally based comparison of four widely used indirect tensile-strength methods across a controlled range of quasi-rock specimens varying from fine- to coarse-grained. Specifically, the objectives are to (1) quantify systematic differences in measured tensile strength between methods, (2) evaluate data scatter and conservativeness of each method as a function of grain size, and (3) offer practical guidance for selecting appropriate test methods and for developing conversion coefficients.

This investigation adopts a laboratory-scale, controlled approach using four mix designs to span microstructural variation; consequently, findings are most directly applicable to quasi-rock materials under similar conditions. Nonetheless, the results aim to inform broader applications—such as establishing conversion factors, improving testing protocols, and guiding future work on natural rocks, scale effects, and numerical modeling of indirect tensile behavior. Key challenges addressed include material heterogeneity, scale-dependence of indirect estimates, and the trade-off between simplicity of test methods and accuracy of tensile-strength estimation.

## Methodology and Approaches

Four mix designs were prepared to produce a controlled suite of quasi-rock specimens spanning a spectrum from fine-grained to coarse-grained. Materials (water, cement, stone powder, fine and coarse aggregates) were mixed in a mechanical mixer, cast in large molds, vibrated for 20 s to ensure compaction, left in molds 24 h, and then water-cured for 28 days; standard coring produced test specimens with an NX diameter of 54 mm.

Indirect tensile strength was measured using four methods: the Brazilian (splitting) test, three-point bending, four-point bending, and the point-load index test. Tests were performed on a digital universal loading frame with continuous recording of applied load and specimen deformation; bending and splitting tests were conducted at a controlled displacement rate of 0.2 mm/min to obtain comparable failure conditions.

Experimental results were summarized using standard statistical descriptors (mean, standard deviation, coefficient of variation) and direct percentage comparisons between methods to quantify systematic offsets and scatter as a function of grain size. The controlled matrix of mixes and identical test procedures enabled a consistent, percentage-based comparison of method performance across microstructural classes.

## Results and Conclusions

The experimental comparison of four widely used indirect tensile-strength methods—Brazilian (splitting) test, three-point bending, four-point bending, and point-load index—on a controlled suite of quasi-rock specimens (four mix designs spanning fine- to coarse-grained microstructures) revealed pronounced method- and grain-size-dependent behavior. Quantitatively, for fine-grained specimens four-point bending produced tensile strength values 61% higher than the point-load index, three-point bending gave values 12% higher than four-point bending, and the Brazilian test yielded values 27% higher than three-point bending; for coarse-grained specimens the corresponding changes were +135% (four-point vs. point-load), +64% (three-point vs. four-point), and -61% (Brazilian vs. three-point). Beyond mean offsets, four-point bending exhibited noticeably lower scatter (smaller coefficient of variation) and therefore provided more conservative and repeatable estimates than the Brazilian test in fine-grained samples, while the three bending/splitting methods converged toward similar values as grain size increased. These results demonstrate that no single indirect method universally represents tensile strength across microstructural classes: test selection must account for grain-size and heterogeneity if reliable, conservative estimates are required. Practically, the percentage-based comparisons and controlled dataset produced here supply an empirical basis for deriving conversion coefficients between methods, for



harmonizing test protocols, and for improving reporting standards (e.g., mandatory grain-size descriptors and basic statistics). We recommend further validation on natural rock types, larger sample populations to strengthen statistical confidence, investigations of scale and environmental effects, and numerical modelling to link observed offsets to underlying failure mechanisms.

---