نشریه‌ی مکانیک سنگ
JOURNAL OF ROCK MECHANICS
دوره ششم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، صفحه ۵۰ تا ۵۷

بکارگیری آزمونی نوین جهت اندازه‌گیری درجای مقاومت فشاری تک محوری صخره سنگ‌ها و بتن

علی صابری ورزنه[1*]؛ محمود نادری[2]
۱- دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)
۲- استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

دریافت : ۱۴۰۱/۰۹؛ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲

چکیده

مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌ها دارای اهمیت زیادی می‌باشد از جمله در طراحی سازه‌های سطحی و زیرسطحی و طراحی تونل‌های سنگی. همچنین از مهمترین مشخصات مکانیکی بتن‌ها، مقاومت فشاری آن می‌باشد. آزمون‌های فراوانی برای اندازه‌گیری مقاومت سنگ‌ها و بتن‌ها موجود می‌باشد که یا جزء روش‌های مخرب بوده و یا وسایل بکار رفته در آن‌ها دارای قیمت زیادی می‌باشد. لذا احتیاج به روشی که بتوان با استفاده از آن، مقاومت تک محوری سنگ‌ها و بتن‌ها را بدون تخریب نمونه و در هر شرایط دمایی و رطوبتی و در هر مکانی بصورت ساده و با کمترین هزینه اندازه‌گیری نمود دارای اهمیت بسیاری می‌باشد. در این مقاله از روشی نوین با نام "انتقال اصطکاک" استفاده شده که با بکارگیری آن می‌توان بصورت درجا و بدون آسیب زیاد به محل آزمون، مقاومت فشاری تک محوری را با دقت بالا و با سرعت اندازه‌گیری نمود. با استفاده از آزمون فوق دیگری نیازی به کرگیری و انتقال نمونه به آزمایشگاه نمی‌باشد. مصالح استفاده شده عبارتند از ۷ نوع سنگ مختلف و ۸ نوع بتن با رده‌های مقاومتی متفاوت. طبق نتایج بدست آمده، رابطه خطی $y=0.62x$ میان مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌ها با نتایج حاصل از آزمون انتقال اصطکاک بدست آمده است که با توجه به ضریب همبستگی برابر با ۹۱ درصد، می‌توان با بکارگیری آزمون انتقال اصطکاک، مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌ها را بصورت درجا و حتی در مسیرهای صعب‌العبور اندازه‌گیری نمود.

واژگان کلیدی ضریب همبستگی، بتن، سنگ، مقاومت، انتقال اصطکاک

۱- مقدمه

آزمون‌های درجا و غیر مخرب دارای مزایای زیادی می‌باشند. از جمله مزایای قابل توجه آن می‌توان به سرعت بالا و هزینه پایین اشاره نمود. در صورتیکه در آزمون‌های آزمایشگاهی احتیاج به نمونه برداری و تخریب آن نمونه می‌باشد تا بتوان مشخصات مد نظر را مورد بررسی قرار داد. همچنین از مزیت‌های آزمون‌های درجا، دسترسی فوری به نتایج مورد نیاز می‌باشد. مشخصات مکانیکی و مهندسی سنگ‌ها دارای اهمیت فراوانی می‌باشد. از جمله در طراحی سازه‌های سطحی و زیرسطحی، در تجزیه و تحلیل پایداری شیب‌ها و طراحی تونل‌ها و غارهای سنگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین در مهندسی معدن مانند حفاری سنگ‌ها، نیز مستلزم دانش مقاومت سنگ است.

برای بتن‌ها نیز، آزمون‌های آزمایشگاهی نشان‌دهنده مشخصات بتن در شرایط خاصی بوده و امکان دارد با توجه به مواردی مانند توجه ننمودن به روش‌های عمل‌آوری، وضعیت واقعی المان در سازه، شیوه انتخاب نمونه‌ها از کل، بوجود آمدن تغییراتی در مقدار و نوع مصالح از پیمانه‌ای به یک پیمانه‌ی دیگر، اختلاف در رطوبت و دمای نگهداری بتن، نشان‌دهنده خصوصیات بتن در قسمت‌های مختلف سازه‌ی مورد نظر نباشد. لذا امروزه گرایش به انجام آزمایشات درجا برای اندازه‌گیری مشخصات مکانیکی بتن‌ها، بصورت روش‌های نیمه مخرب یا غیر مخرب بیشتر شده است. ولی مواردی از جمله مقدار مخرب بودن آزمون، سرعت انجام آزمون،

هزینه و امکان تفسیر نتایج و ارزیابی مقاومت بتن می‌بایست مورد توجه قرار گیرد.

روش‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری درجای مقاومت سنگ‌ها و بتن‌ها وجود دارد. آزمون‌های اولتراسونیک [۱] و چکش اشمیت [۲] از جمله آزمون‌های غیرمخرب می‌باشند که البته حفره، ترک و مقدار آرماتور می‌تواند در جواب‌ها تاثیر گذار باشد. آزمون‌های مخرب و نیمه مخرب نیز شامل بارگذاری المان در سازه یا خود قطعه به طور مستقل، مغزه‌گیری از قسمتی از سازه [۳]، روش بیرون کشیدن [۴] و غیره می‌باشد. البته این روش‌ها دارای معایبی هستند از جمله خسارت زیاد به سازه، قابلیت تکرار محدود، هزینه بالا و معمولا تعطیلی بهره‌برداری از سازه در هنگام انجام آزمایش. همچنین نتایج بدست آمده از آزمایش روی مغزه‌های گرفته شده، نشان داده که مقاومت مغزه‌ها کمتر از مقاومت فشاری واقعی می‌باشد [۵]. همچنین در طول سال‌ها، تلاش‌های کم و بیش موفقی برای اندازه-گیری مقاومت سنگ‌ها صورت گرفته است [۶-۹].

روش‌های درجا که توسط نادری [۱۰-۱۱] ابداع گردیده است آزمون‌های "انتقال اصطکاک" و "پیچش" می‌باشد که روشی نیمه مخرب یا با خرابی جزئی می‌باشد. نظر به کارائی منحصر به‌فرد آزمون "انتقال اصطکاک" که این آزمون را برای هر گونه شرایط آزمایشگاهی و محیطی قابل استفاده می‌سازد، می‌توان به جهت ارزیابی مقاومت آزمایشگاهی و درجای انواع مواد، با هدف کنترل کیفیت و مطالعات پژوهشی و تحقیقاتی استفاده نمود. چون در این آزمون، شکست در خود جسم رخ می‌دهد در نتیجه نتایج حاصل از آن در مقایسه با آزمون‌های تعیین سختی سطح که مقاومت را ارزیابی می‌کنند، دارای اعتبار بیشتری است. این آزمون از دقت بالایی برخوردار بوده و تحت تمامی شرایط محیطی (خشک، مرطوب، زیر آب و تحت هر دمایی) قابل انجام است. در مقالات مذکور، آزمون‌های ابداعی با مقاومت فشاری بتن‌های کرگیری شده مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که ضریب همبستگی بالای ۹۰ درصد می‌باشد. همچنین طبق نتایج حاصل شده مشخص گردید که دقت آزمون‌های ابداعی بیشتر از آزمون فشاری برای بتن-های کرگیری شده می‌باشد. همچنین در مقالات فوق آزمون انتقال اصطکاک با آزمون استاندارد *Pull-off* مورد مقایسه قرار گرفته است که نتایج حاصل شده بیانگر دقت بالای آزمون‌های ابداعی می‌باشد. همچنبن در مقالات فوق از آزمون انتقال اصطکاک برای اندازه‌گیری مقاومت چسبندگی بین بتن و لایه‌های مختلف تعمیری استفاده شده است.

در تحقیقاتی در خصوص استفاده از آزمون انتقال اصطکاک و پیچش با مدل‌سازی توسط نرم‌افزار آباکوس مشخص گردید که نتایج حاصل شده، دارای دقت بالایی می‌باشد [۱۲-۱۳]. همچنین از این آزمون‌ها برای ارزیابی مقاومت سطحی ملات‌های الیافی و پلیمری [۱۴-۱۶]، چسبندگی بین بتن و لایه‌های تعمیری [۱۷-۲۲] و رویه آسفالتی [۲۳] استفاده شده است. در تحقیقی روی تاثیر شرایط رطوبتی سنگ‌ها بر بتن با استفاده از آزمون انتقال اصطکاک مشخص گردید که افزایش مقاومت صخره سنگ باعث افزایش مقاومت بتن ساخته شده از سنگدانه‌های همان صخره سنگ می‌گردد [۲۴]. در تحقیقی دیگر روی تاثیر مقاومت و جذب آب صخره بر مقاومت فشاری بتن با استفاده از آزمون انتقال اصطکاک مشخص گردید که با افزایش مقاومت صخره سنگ تا ۱۰ برابر، مقاومت بتن ساخته شده از سنگدانه‌های همان صخره سنگ تا حداکثر ۴۶ درصد افزایش می-یابد [۲۵].

آزمون‌های فراوانی برای اندازه‌گیری مقاومت سنگ‌ها و بتن‌ها موجود می‌باشد که یا جزء روش‌های مخرب بوده و یا وسایل بکار رفته در آن‌ها دارای قیمت زیادی می‌باشد. لذا احتیاج به روشی که بتوان با استفاده از آن، مقاومت تک محوری سنگ‌ها و بتن‌ها را بدون تخریب نمونه و در هر شرایط دمایی و رطوبتی و در هر مکانی بصورت ساده و با کمترین هزینه اندازه‌گیری نمود دارای اهمیت بسیاری می‌باشد. در این مقاله از روشی نوین با نام "انتقال اصطکاک" استفاده شده که با بکارگیری آن می‌توان بصورت درجا و بدون آسیب زیاد به محل آزمون، مقاومت فشاری تک محوری را با دقت بالا و با سرعت اندازه‌گیری نمود. با استفاده از آزمون فوق دیگری نیازی به کرگیری و انتقال نمونه به آزمایشگاه نمی‌باشد. در این تحقیق با استفاده از آزمون درجا و نوین انتقال اصطکاک اقدام به ارزیابی مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌های مختلف و بتن‌های با مقاومت ۱۵ تا ۵۰ مگاپاسکال شده است. همچنین نتایج حاصل از آزمون انتقال اصطکاک با استفاده از نمودارهای کالیبراسیون با آزمون‌های استاندارد مورد مقایسه قرار گرفته است. سپس با ارائه معادلات مورد نیاز، نتایج آزمون انتقال اصطکاک به راحتی و با دقت بالا، قابل تبدیل به مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌ها و بتن‌ها می‌باشد.

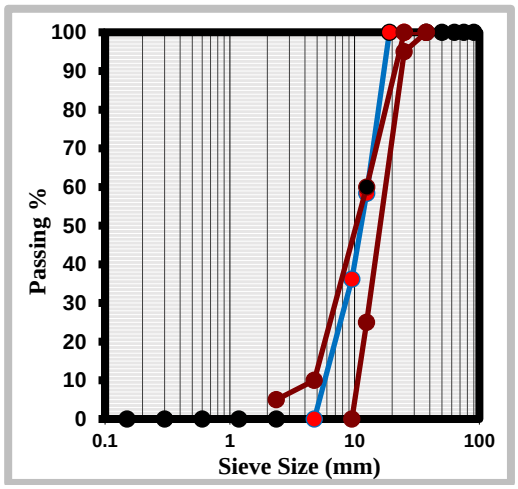
مصالح استفاده شده عبارتند از ۷ نوع سنگ مختلف و ۸ نوع بتن با رده‌های مقاومتی متفاوت. طبق نتایج بدست آمده، رابطه خطی $y=0.62x$ میان مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌ها با نتایج حاصل از آزمون انتقال اصطکاک بدست آمده است که با توجه به ضریب همبستگی برابر با ۹۱ درصد، می‌توان با بکارگیری آزمون انتقال اصطکاک، مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌ها را بصورت درجا و حتی در مسیرهای صعب‌العبور اندازه‌گیری نمود.

۲- کارهای آزمایشگاهی

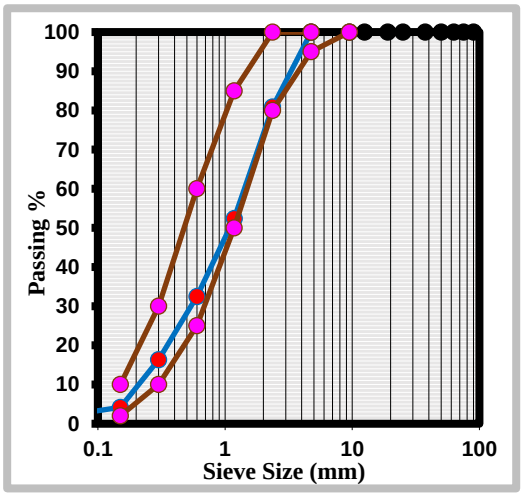
۲-۱- مصالح مصرفی

برای ساخت بتن با مقاومت‌های مختلف از شن و ماسه با اندازه‌ی حداکثر به ترتیب ۱۹ و ۴/۷۵ میلی‌متر استفاده شده است. دانه‌بندی

سنگدانه‌ها طبق استاندارد *ASTM C136* [۲۶] انجام پذیرفت. میزان جذب آب شن و ماسه بر اساس استانداردهای *ASTM C128* [۲۷] و *ASTM C127* [۲۸] به ترتیب برابر ۲/۶ و ۳/۲ درصد تعیین گردید. چگالی شن و ماسه در حالت اشباع با سطح خشک برابر ۲۳۳۰ و ۲۵۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد. نمودار دانه‌بندی شن و ماسه در **شکل ۱** نشان داده شده است.



الف) شن



ب) ماسه

شکل ۱- نمودار دانه بندی سنگدانه‌ها

همچنین مشخصات فوق روان‌کننده‌ی استفاده شده در ساخت بتن در **جدول ۱** نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات فوق روان‌کننده

PH	چگالی	رنگ	نوع
۵	۱/۱۱ *Kg/Lit*	قهوه‌ای	پلی‌کربکسیلات

برای ساخت بتن‌ها از روش طرح مخلوط ملی بتن [۲۹] استفاده شده است. بتن‌های مکعبی با مقاومت‌های ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ مگاپاسکال برای انجام آزمون‌ها ساخته شد. سنگ‌های بکار گرفته شده در این تحقیق در **جدول ۲** نشان داده شده است.

جدول ۲- سنگ‌های مورد آزمایش

نوع سنگ	نام سنگ
آذر آواری	سنگ توف
آذرین	سنگ گرانیت
رسوبی	سنگ آهک
آذرین	سنگ تراورتن
دگرگونی	سنگ مرمریت
آذرین	سنگ بازالت
آذرین	سنگ اندزیت

۲-۲- روش‌های آزمایشگاهی

آزمون انتقال اصطکاک، آزمونی نوین و درجا جهت ارزیابی مشخصات مکانیکی و مشخصات مهندسی انواع مصالح از جمله سنگ‌ها و بتن‌ها می‌باشد. برای انجام آزمون مطابق **شکل ۲**، ابتدا باید یک مغزه جزئی به قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۵ میلی‌متر روی سطح بتن یا سنگ ایجاد نمود.

شکل ۲- ایجاد مغزه روی نمونه‌ها

بعد از ایجاد مغزه، دستگاه فلزی انتقال اصطکاک روی قسمت کرگیری شده قرار گرفته و با استفاده از پیچ‌های اطراف، روی مغزه تثبیت می‌گردد (**شکل ۳**).

الف) تثبیت دستگاه روی سنگ

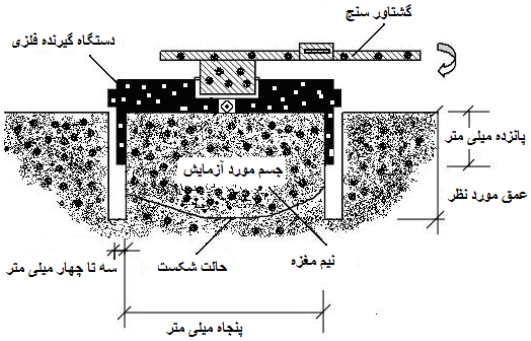
ب) تثبیت دستگاه روی بتن

شکل ۳- تثبیت دستگاه فلزی انتقال اصطکاک

سپس با بکارگیری یک ترکمتر، لنگر پیچشی را اعمال نموده تا مغزه دچار شکست شود (**شکل ۴**).

شکل ۴- انجام آزمون انتقال اصطکاک

در **شکل ۵** آزمون انتقال اصطکاک به طور شماتیک قابل مشاهده است.

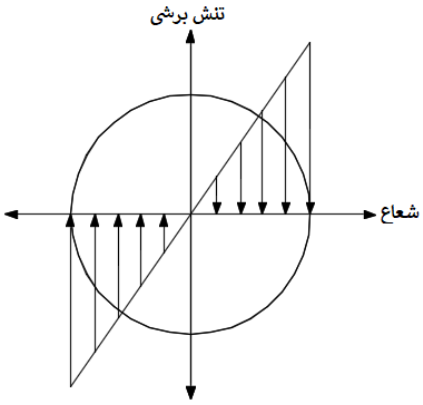


شکل ۵- شماتیک آزمون انتقال اصطکاک

مطابق **شکل ۶**، مغزه‌ها پس از اعمال آزمون انتقال اصطکاک به شکل استوانه‌ای با زاویه شکست تقریبا ۴۵ درجه نسبت به سطح افق می‌باشد.

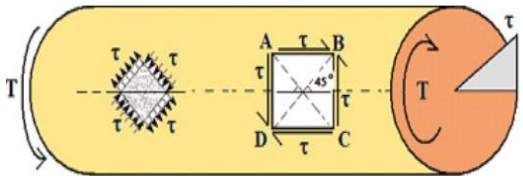
شکل ۶- نتیجه آزمون انتقال اصطکاک

علت این نوع شکست با توجه به قوانین مقاومت مصالح قابل توضیح می‌باشد. زمانیکه به مغزه، لنگر پیچشی اعمال می‌شود، تنش-های برشی حداکثر روی محیط مغزه و در تارهای انتهایی آن بوجود می‌آید (**شکل ۷**).



شکل ۷- حداکثر تنش برشی

با توجه به قضیه دایره موهر، می‌توان نتیجه گرفت که مقدار حداکثر تنش‌های برشی، فشاری و کششی، مساوی شعاع دایره موهر است. لذا، تنش‌های اصلی فشاری و کششی با سطح افق زاویه‌ای برابر ۴۵ درجه ساخته و مطابق **شکل ۸**، صفحات شکست در مغزه، عمود بر راستای تنش‌های کششی بوده و لذا زاویه شکست با سطح افق برابر ۴۵ درجه می‌باشد.



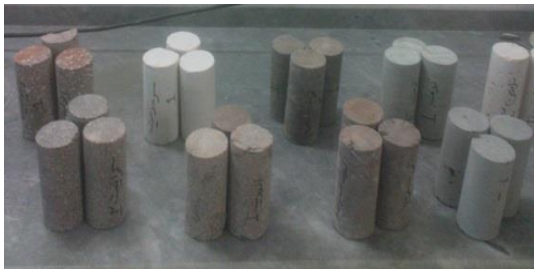
شکل ۸- صفحات شکست

همچنین تنش برشی ایجاد شده در مغزه تحت اثر پیچش برابر **رابطه ۱** می‌باشد.

$$\tau_{E-max} = \frac{Tr}{J} \ , J = \frac{\pi r^4}{2} \qquad (۱)$$

که در آن J برابر ممان اینرسی دوم سطح و r شعاع مغزه می‌باشد.

در **شکل ۹** نیز مغزه‌های گرفته شده از سنگ‌ها جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک محوری آن‌ها قابل مشاهده است.



شکل ۹- مغزه‌های سنگ‌ها

در نمونه‌های بتنی برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک محوری از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر استفاده شد. برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری برای هر رده، ۳ نمونه‌ی مکعبی مورد آزمایش قرار گرفت. در کل تعداد ۲۴ نمونه‌ی مکعبی بتن برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری استفاده شد. همچنین تعداد ۲۸ نمونه‌ی مکعبی بتنی با همان مشخصات و همان رده‌های مقاومتی تحت آزمون انتقال اصطکاک قرار گرفت.

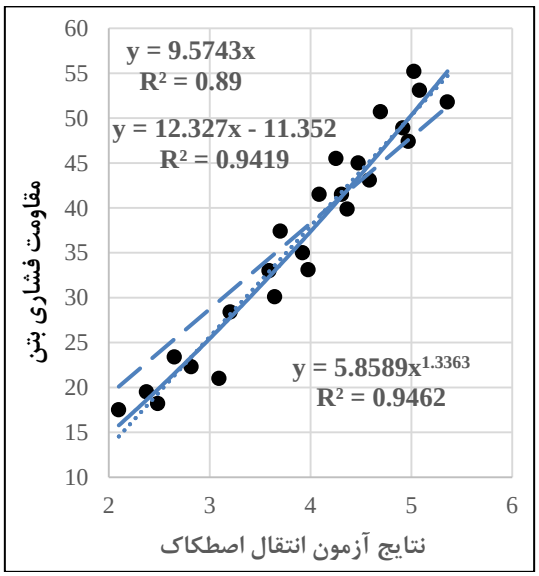
برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌ها، مغزه‌هایی با قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر تهیه گردید. از هر نوع سنگ تعداد ۳ مغزه تهیه شد. از همان سنگی که برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک محوری استفاده شد، از قسمتی دیگر از همان سنگ برای انجام آزمون انتقال اصطکاک استفاده شد.

۳- نتایج بدست آمده و تحلیل آن‌ها

۳-۱- ارزیابی مقاومت فشاری بتن‌ها

در این بخش، معادله‌ی بدست آمده از تحلیل رگرسیون-های خطی و توانی جهت ارزیابی مقاومت فشاری بتن‌ها با استفاده از آزمون انتقال اصطکاک نشان داده شده است. بدین جهت ابتدا ضرایب تعیین و همبستگی، توسط تحلیل رگرسیون خطی بدست آمده است. سپس با توجه به فرضیه تحقیق، که خط رگرسیون می‌بایست از محور مختصات عبور نماید، لذا ضرایب مذکور برای این حالت دوباره بدست می‌آید. اگر بین ضرایب بدست آمده در دو حالت، اختلافی موجود باشد می‌توان از تحلیل رگرسیون توانی استفاده نمود.

با توجه به تحلیل رگرسیون انجام شده، همبستگی بین نتایج آزمون انتقال اصطکاک با مقاومت فشاری بتن‌ها در **شکل ۱۰** قابل مشاهده است.



شکل ۱۰- همبستگی بین آزمون‌ها برای بتن

با توجه به **شکل ۱۰** مشاهده می‌شود ضریب تعیین برابر ۹۴ درصد میان مقاومت فشاری بتن‌های با مقاومت فشاری و نتایج حاصل از آزمون انتقال اصطکاک وجود دارد. اما با توجه به فرضیه تحقیق، مقدار ضریب تعیین به ۸۹ درصد کاهش پیدا نموده است، لذا می‌توان از منحنی کالیبراسیون توانی استفاده نمود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مقدار شدت همبستگی بین مقاومت فشاری

بتن‌ها با مقاومت‌های مختلف و نتایج آزمون انتقال اصطکاک، در یک مدل توانی توسط **رابطه ۲** برابر ۹۶ درصد است.

$$y=5.86x^{1.33} \quad (۲)$$

که در این رابطه y برابر مقاومت فشاری بتن و x نتایج آزمون انتقال اصطکاک می‌باشد.

۳-۲- ارزیابی مشخصات سنگ‌ها

به جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک محوری انواع سنگ‌ها، مغزه‌های نمونه‌ها به طور مستقیم مورد استفاده قرار گرفت. مغزه‌ها بصورت استوانه‌ای می‌باشند که سطوح بالا و پایین آن‌ها تخت نمی‌باشد. لذا می‌بایست مغزه‌ها کلاهک گذاری شود [۳ ، ۳۰]. همچنین در محیطی مرطوب آزمایش شوند یا با توجه به *ACI318* [۳۱]، باید در حالت خشک آزمایش شوند. برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌ها از جک فشاری هیدرولیکی با دقت ۰/۱ تن استفاده شده است.

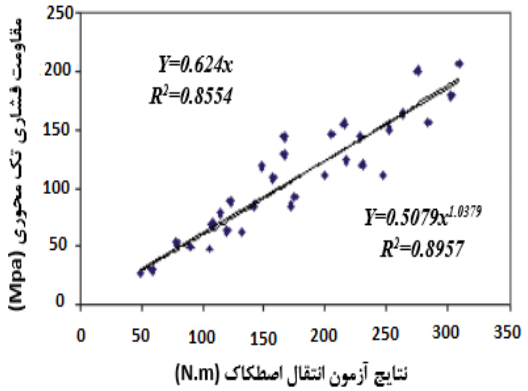
برای مقایسه نتایج حاصل از آزمون انتقال اصطکاک با آزمون فشاری تک محوری سنگ‌ها، نتایج حاصله در **جدول ۳** قابل شاهده است.

جدول ۳- نتایج آزمون‌ها روی سنگ‌های مختلف

نام سنگ	چگالی خشک (g/cm^3)	فشاری تک محوری (MP)	انتقال اصطکاک (N.m)
سنگ توف	۲/۴۳	۵۱	۸۹/۴
سنگ گرانیت	۲/۷۵	۱۴۵/۳	۱۶۶/۸
سنگ آهک	۲/۶۵	۱۶۵/۳	۲۶۳/۵
سنگ تراورتن	۲/۷۴	۸۰/۱	۱۱۴/۲
سنگ مرمریت	۲/۴۱	۲۶/۹	۴۹/۹
سنگ بازالت	۲/۹۴	۲۰۷/۸	۳۰۸/۵
سنگ اندزیت	۲/۷۱	۱۵۵/۹	۲۱۵/۷

با توجه به نتایج نشان داده شده در **جدول ۳** مشاهده می‌شود رابطه مستقیم بین مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌های مختلف با نتایج حاصل از آزمون انتقال اصطکاک وجود دارد.

برای تخمین مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌ها، نمودار کالیبراسیون مورد نیاز برای تخمین *UCS* معادل از نتایج انتقال اصطکاک با استفاده از گشتاور شکست ارائه گردید. برای این منظور نتایج نشان داده شده در **جدول ۳** با استفاده از روش‌های رگرسیونی، مورد تحلیل قرار گرفت. توابع خطی، لگاریتمی، نمایی و توانی برای روابط بین قرائت‌های انتقال اصطکاک و مقادیر *UCS* مورد بررسی قرار گرفتند. سپس معادله با بالاترین ضریب همبستگی برای هر رگرسیون تعیین شد (**شکل ۱۱**).



شکل ۱۱- همبستگی بین آزمون‌ها برای سنگ‌ها

همانطور که در **شکل ۱۱** نشان داده شده است، مقادیر *UCS* با قرائت‌های مربوط به انتقال اصطکاک با استفاده از معادله $Y = 0.62X$ با $R^2 = 0.82$، که در آن Y مربوط به مقادیر *UCS* با واحد مگاپاسکال و X قرائت انتقال اصطکاک با واحد $N{\cdot}m$ است، همبستگی دارد. با اینکه تابع توانی $Y = 0.508X^{1.0379}$ ضریب همبستگی بهتری را ارائه می‌دهد ($R^2 = 0.89$)، تابع خطی راحت تر اعمال می شود. بنابراین، می‌توان گفت (**رابطه ۳**):

$$UCS_{(Mpa)}=0.62FT_{(N.m)} \quad (۳)$$

که در آن FT قرائت انتقال اصطکاک در واحد $N{\cdot}m$ است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از آزمون درجا و نوین انتقال اصطکاک اقدام به ارزیابی مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌های مختلف و بتن‌های با مقاومت ۱۵ تا ۵۰ مگاپاسکال شده است. همچنین نتایج حاصله از آزمون انتقال اصطکاک با استفاده از نمودارهای کالیبراسیون با آزمون‌های استاندارد مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده عبارتند از:

- رابطه خطی $y=0.62x$ میان مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌ها

با نتایج حاصله از آزمون انتقال اصطکاک بدست آمده است که با توجه به ضریب همبستگی برابر با ۹۱ درصد، می‌توان با بکارگیری آزمون انتقال اصطکاک مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌ها را اندازه‌گیری نمود.

- با توجه به نتایج بدست آمده، با افزایش مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌ها، مقدار نتایج حاصل از آزمون انتقال اصطکاک نیز افزایش یافته که بیانگر رابطه‌ای مستقیم بین این دو آزمون است.

- نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مقدار شدت همبستگی بین مقاومت فشاری بتن‌های با مقاومت‌های مختلف و نتایج آزمون انتقال اصطکاک، در یک مدل توانی توسط رابطه $y=5.86x^{1.33}$ برابر ۹۶ درصد است. لذا می‌توان با استفاده از آزمون انتقال اصطکاک، با دقت بالا مقدار مقاومت فشاری بتن‌ها را تعیین نمود.

- با توجه به قضیه دایره موهر، دیده می‌شود که تنش‌های کششی، برشی و فشاری، برابر شعاع دایره موهر هستند. تنش‌های اصلی فشاری و کششی نیز با سطح افق زاویه ۴۵ درجه ساخته‌اند. در نتیجه در آزمون انتقال اصطکاک، شکست مغزه‌ها با زاویه ۴۵ درجه نسبت به سطح افق رخ داده است.

۵- منبع‌ها

[1] ASTM C597-16. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA 2016.

[2] ASTM C808/C805M-18. Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

[3] ACI Committee 214, Report 214.4R-03. Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results, American Concrete Institute, 2003.

[4] ASTM C900-15. Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

[5] Masi. A., Digrisolo. A., Santarsieo. G. arsiero, “Experimental evaluation of drilling damage on the strength of cores extracted from RC buildings. in Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, 2013, 7(7): p. 749.

[6] Krauland. N, Soder. P, Agmalam. G Determination of rock mass strength by rock mass classification—some experiences & questions from Boliden mines. Int J Rock Mech, 1989, 26(1): p. 115–123.

[7] Hack. R, Huisman. M, Estimating the intact rock strength of a rock mass by simple means. In: van Rooy JL, Jermy CA (eds) Engineering Geology for Developing Countries—Proceedings of 9th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment, Durban, South Africa, 16–20 September, 2002, p. 1971–1977.

[8] Sonmez. H, Gokceoglu. C, Medley. EW, Tuncay. E, Nefeslioglu. HA, Estimating the uniaxial compressive strength of a volcanic bimrock. Int J Rock Mech Mining Sci, 2006, 43(2): p. 554–561.

[9] Kumar. D, Samir. KD, Floor bearing characteristics of jointed and layered rock foundation. EJGE paper 2004-0470.

[10] Naderi. M, Friction-transfer test for the assessment of in situ strength and adhesion of cementitious materials. Construct Build Mater, 2005, 19(6): p. 454–459.

[11] Naderi. M. New Twist-Off Method for the Evaluation of In-Situ Strength of Concrete, Journal of Testing and Evaluation.2007, 35(6). ISSN: 0090-3973, (2007).

[12] Saberi Varzaneh, A. and Naderi, M., Determination of Shrinkage, Tensile and Compressive Strength of Repair Mortars and Their Adhesion on the Concrete Substrate Using "Twist-off" and "Pull-off" Methods. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. 2021, 45(3): p.2377–2395.

[13] Saberi Varzaneh, A. and Naderi, M., Experimental and Finite Element Study to Determine the Mechanical Properties and Bond Between Repair Mortars and Concrete Substrates. J. Appl. Comput. Mech., 2022, 8(2): p. 493-509.

[14] Saberi Varzaneh, A. and Naderi, M., Investigation of In-Situ Compressive Strength of FiberReinforced Mortar and the Effect of Fibers on the Adhesion of Mortar/Steel. Int J Advanced Design and Manufacturing Technology, 2021, 14(2): p. 1-15.

[15] Saberi Varzaneh, A. and Naderi, M., NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF SEMI-DESTRUCTIVE TESTS TO EVALUATE THE COMPRESSIVE AND FLEXURAL STRENGTH OF POLYMER-MODIFIED MORTARS AND THEIR ADHESION TO THE CONCRETE SUBSTRATE. Revista Română de Materiale/Romanian Journal of Materials, 2020, 50(4): p. 537-544.

[16] Saberi Varzaneh, A. and Naderi, M., “Friction-Transfer” Method to Assess the Compressive and Tensile Strengths and Rupture Modulus of Fiber-Reinforced-Pozzolanic Concrete and Mortar/Steel Adhesion. AUT J. Civil Eng., 2021, 5(4): p. 557-576.

[17] Saberi Varzaneh, A. and Naderi, M., The effects of pre-compress on the mortar/concrete bond and their in-situ compressive strength using “pull-off” and “twist-off” methods. International Journal of Advanced Structural Engineering, 2022, 12(2): p. 569–587.

[18] Saberi Varzaneh, A. and Naderi, M., Study of Bond Strength between Polymer-Modified Mortars/Concrete and Their Mechanical Properties using “Friction-Transfer” and “Pull-off” Methods. Mechanics of Advanced Composite Structures, 2021, 8(3): p. 171–184.

[19] Saberi Varzaneh, A. and Naderi, M., EFFECTS OF INITIAL PRESSURE AND FIBER ON BOND STRENGTH BETWEEN MORTAR AND CONCRETE SUBSTRATE USING TWIST-OFF AND PULL-OFF METHODS. Revista Română de Materiale / Romanian Journal of Materials, 2022, 52(2): p. 75–82.

[20] Saberi Varzaneh, A. and Naderi, M., Curing and Shrinkage Effect on the PMM/Concrete Bond, Using “Friction-transfer” and “Pull-off” Methods. Journal of Ferdowsi Civil Engineering, 2020, 33(1): p. 85-100.

[21] Naderi. M. & Ghodousian. O. Adhesion of Self-Compacting Overlays Applied to Different Concrete Substrates and Its Prediction by Fuzzy Logic, The Journal of Adhesion, 2012, 88(10): p. 848-865.

[22] Naderi. M. Analysis of the Slant Shear Test, The journal of Adhesion and Technology, 2012, 23(2): p. 229-245.

[23] Naderi, M. Evaluating in situ shear strength of bituminous pavments, Proceedings of the institution of Civil Engineering, 2006, 14(2): p. 61-65.

[24] Valibeigi. R., Naderi. M. 4th. International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development 27-29 December, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. 2016. Valibeigi. R., Naderi. M. Effect of parent rock strength and water absorption on concrete compressive strength. Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE), 2019, 5(4): p. 151-161.

[25] ASTM C136-01. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, American Society for Testing and Materials, 2001.

[26] ASTM C128. Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate, West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials, 2015.

[27] ASTM C127. Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate, West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials, 2012.

[28] The National Method for Concrete Mix Design. Building and Housing Research Center. Iran, 2008.

[29] British Standard Institution. method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cores, BSI 1881: Part 120: 1983, 2008.

[30] ACI Committee 318. Report 318R-19. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute, 2019.