

ارائه معادلات مورد نیاز جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری سنگ‌ها و بتن‌ها، با به‌کارگیری آزمون نوین "پیچش" و مقایسه‌ی آن با آزمون‌های استاندارد

محمود نادری^۱، علی صابری ورزنده^{۲*}، ابوالفضل رشوند آوه^۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۲۲

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۰۵

چکیده

در کارهای مهندسی به ویژه در مهندسی ژئوتکنیک، مهندسی عمران و مهندسی معدن، قبل یا پس از ساخت سازه‌ها مواردی پیش می‌آید که نیاز به تعیین مقاومت برجای سنگ یا بتن، ضروری می‌باشد. در این خصوص می‌توان تغییر در کاربری سازه (تغییر در بار وارده)، نامطلوب بودن شرایط اجرا، کمبود زمان، عدم دسترسی به تجهیزات آزمایشگاهی و آسیب دیدگی سازه را از جمله دلایل برای ارزیابی مقاومت مصالح به صورت برجا برشمرد. روشهای متعددی برای آزمایش مصالح وجود دارد که یا مخرب می‌باشند و یا دارای وسایل گران قیمت و وارداتی هستند. در این مقاله با استفاده از آزمون نوین "پیچش" اقدام به اندازه‌گیری مقاومت ۹ نوع سنگ مختلف و بتن با هشت رده مقاومتی مختلف شده است. همچنین ضمن مقایسه نتایج با روش‌های استاندارد، نمودارهای کالیبراسیون و معادلات مورد نیاز جهت تبدیل نتایج آزمون "پیچش" به مقاومت فشاری مصالح مذکور ارائه گردیده است. با توجه به نتایج حاصله می‌توان برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن‌های معمولی با استفاده از آزمون پیچش، از رابطه $y = 19.27x^{0.67}$ با ضریب تعیین حدود ۰/۹۵ استفاده نمود. همچنین برای سنگ‌های استفاده شده در این تحقیق نیز می‌توان با بکارگیری معادله $y = 27.87x^{0.52}$ ، مقاومت فشاری سنگ‌های مذکور را با استفاده از آزمون پیچش با دقت بالای ۹۴ درصد تعیین نمود.

کلید واژه‌ها: آزمون پیچش، مقاومت برجا، سنگ، بتن، نمودار کالیبراسیون.

۱. عضو هیات علمی گروه عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۲. دکتری عمران سازه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir

۳. کارشناس ارشد عمران سازه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

اخیرا کاربرد آزمون های غیرمخرب برای ارزیابی مشخصات و رفتار مواد در صنایع مختلف گسترش قابل توجهی یافته است. عدم تخریب نمونه ها و عدم آسیب رسانی و نیز حفظ یکپارچگی آن ها مهمترین عامل گسترش روز افزون این آزمون ها در آزمایش های مهندسی به ویژه در مهندسی ژئوتکنیک، مهندسی عمران و مهندسی معدن می باشد. برای افزایش دوام بتن ها می بایست توجه ویژه ای به سطح بیرونی بتن نمود. زیرا سطح بیرونی به صورت مستقیم در معرض عوامل مختلف جوی قرار داشته و هرگونه تغییر در شرایط محیطی تاثیر بسزایی بر آن دارد. لذا استفاده از روشی که بتواند به صورت مستقیم مقاومت سطحی بتن را اندازه گیری نماید دارای اهمیت است. همچنین اندازه گیری پارامترهای ژئوتکنیکی مورد نیاز در طراحی سازه های واقع در توده های سنگی یکی از مسائل مهم در علم مهندسی است. مقاومت فشاری تک محوری (Uniaxial compressive strengt) از جمله این پارامترها می باشد که به طور گسترده ای در طراحی سازه ها در توده های سنگی استفاده می گردد. اطلاع از مقاومت تک محوری سنگ ها در پیشبرد بهینه ی عملیات های پایدارسازی دیواره ی چاه های نفتی، حفاری و تونل سازی تاثیر بسزایی دارد.

در مورد مقاومت فشاری مصالح مختلف شامل rockfill مصالح بهسازی شده خاکی با تزریق و ... و نیز در کاربردهای سدهای سنگریزه ای و تونل سازی کارهای تحقیقاتی زیادی انجام شده است. در مقاله ای در خصوص استحکام برشی زهکشی نشده نمونه های قالب گیری شده از آزمایش های نفوذ سنج و سایر آزمایش های آزمایشگاهی ملاحظه گردید که نتایج تست Su-PP از نظر آماری با سایر تست ها سازگار است (Budak et al., 2022). در تحقیقی دیگر در خصوص بررسی نیروی برشی حاصل از دیسک برشی در برش دوار ماسه سنگ ها ملاحظه شد که با افزایش شعاع برش دیسک، نیروهای عادی و دورانی افزایش یافته و نیروی جانبی کاهش می یابد (Zhang et al., 2022). در مقاله ای در خصوص تأثیر

شکستگی ذرات سنگریزه بر نشست طولانی مدت سدهای خاکی، نشست تاج با استفاده از یک مدل عددی ویسکوالاستیک پیش بینی شد که با استفاده از داده های نظارت دقیق سد کالیبره شد (Alidadi et al., 2022).

روش های زیادی برای آزمایش مصالح در سازه ابداع شده است که بر اساس احتمال آسیب رسانی به سازه به سه گروه غیر مخرب، نیمه مخرب و مخرب تقسیم می شوند. در روش های مخرب که از روش استاندارد برای اندازه گیری مقاومت مصالح استفاده می شود، برای آزمایش باید قسمت هایی از سازه را با مغزه گیری یا اره کردن جدا نمود. معایب اصلی روش های مخرب عبارتند از محدود بودن نمونه ها و غیر قابل تکرار بودن آن ها، آسیب قابل توجه به سازه، هزینه های بالا و غیره. یکی از روش های مخرب، مغزه گیری از محل مورد نظر است (ACI 214, 2003). البته در تحقیقی مشاهده شد که نتایج به دست آمده از آن، کمتر از مقاومت فشاری بتن واقعی می باشد (Masi et al., 2003). همچنین امکان دارد در قسمت هایی از سازه، انجام مغزه گیری میسر نباشد. روش "بیرون کشیدن" (Pull-out) روش مخرب دیگری است که باعث آسیب رساندن به المان بتنی می گردد (ASTM C900, 2015). در سال های اخیر، با توجه به معایب آزمون فشاری تک محوری، برخی از پژوهشگران، آزمون های ساده ای را برای ارزیابی غیر مستقیم مقاومت فشاری پیشنهاد نموده اند (Rabe et al., 2018. Jalali et al., 2019. Kahraman et al., 2016. Kumar et al., 2017).

از آزمون های غیر مخرب می توان به آزمایش های "اولتراسونیک" (Ultrasonic) و "چکش اشمیت" (Schmidt hammer) اشاره کرد (ASTM C597, 2016. ASTM C808/C805M, 2018). البته مقدار آرماتور، حفره و ترک می تواند در نتایج حاصل از این روش ها تاثیرگذار باشد. روش "کشیدن از سطح" (Pull-off) نیز روش برجای دیگری برای ارزیابی مقاومت می باشد (ASTM C1583/C1583M, 2013). تحقیقات گذشته نشان داده است که این روش برای ارزیابی مقاومت بتن در محل سازه،

استفاده شده است (Saberi and Naderi, 2020. Saberi and Naderi, 2021).

با توجه به نیاز اندازه گیری مقاومت فشاری مصالح به صورت برجا و در محل سازه، لذا در این تحقیق با استفاده از آزمون نوین پیچش اقدام به اندازه گیری مقاومت فشاری ۹ نوع سنگ و ۸ رده مقاومتی بتن شده است. سپس با مقایسه نتایج حاصل از آزمون پیچش با نتایج آزمون های استاندارد، اقدام به رسم نمودارهای کالیبراسیون و ارائه معادلات مورد نیاز جهت تبدیل نتایج آزمون پیچش به مقاومت فشاری مصالح شده است. سنگ های مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از ریولیت، مرمیت، توف سبز بلورین، اندزیت، گرانیت، توف سبز سنگی، تراورتن، بازالت و آهک. همچنین از بتن های با مقاومت های ۱۵ تا ۵۰ مگاپاسکال استفاده شده است. در نتیجه با انجام این تحقیق می توان به صورت برجا و خرابی ناچیز و استفاده از دستگاه ساده پیچش، مقاومت فشاری سنگ ها و بتن ها را با ضریب همبستگی بالایی اندازه گیری نمود.

۲. کارهای آزمایشگاهی

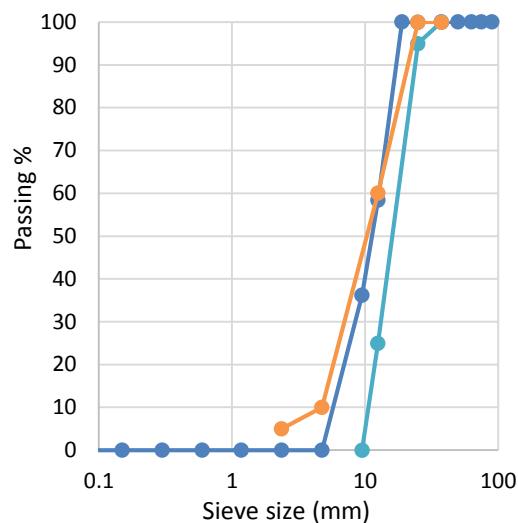
۱،۲. مصالح مصرفی

مصالح مورد استفاده برای ساخت بتن عبارتند از سیمان پرتلند نوع ۲ محصول کارخانه سیمان آبیک، ماسه از معادن شهریار، آب آشامیدنی استان قزوین، شن از معادن قزوین، چسب دو جزئی از نوع اپوکسی و مواد عمل آورنده از نوع پلی اولفین. دانه بندی سنگدانه ها طبق استاندارد ASTM C136, 2006 انجام پذیرفت. میزان جذب آب شن و ماسه بر اساس استانداردهای ASTM C127, 2012 و ASTM C128, 2015 به ترتیب برابر ۳/۲ و ۲/۶ درصد بدست آمد. نمودار دانه بندی مصالح در شکل ۱ نشان داده شده است. مشخصات فوق روان کننده استفاده شده در ساخت بتن در جدول ۱ نشان داده شده است.

مناسب است اما قیمت دستگاه آن بسیار بالا بوده و همچنین دستگاهی وارداتی می باشد (Pereira and Medeiros, 2012). از روش های نیمه مخرب نیز می توان به آزمون "انتقال اصطکاک" (Friction-transfer) اشاره نمود (Naderi, 2005). دستگاه مورد استفاده در این روش بسیار ساده، کم هزینه و در دسترس است. این تست به سرعت (تقریباً ده دقیقه) قابل انجام است و نیازی به فرد با تخصص بالا ندارد (Saberi and Naderi, 2020). از آنجایی که شکست در آزمایش های انتقال اصطکاک در نمونه رخ می دهد، نتایج آن ها نسبت به آزمون های سختی سنجی یا آزمایش های دیگر که به طور غیرمستقیم مقاومت را تخمین می زنند قابل اعتماد است (Saberi and Naderi, 2020). مقایسه نتایج آزمون انتقال اصطکاک با روش های دیگر نشان دهنده ضریب همبستگی بالا بین نتایج وجود دارد (Saberi and Naderi, 2021).

یکی دیگر از روش های برجا که توسط آقای نادری ابداع گردیده است، روش "پیچش" (Twist-off) می باشد که در قلمرو آزمون های نیمه مخرب یا به عبارت بهتر با خرابی جزئی محسوب می گردد (Naderi, 2007). در این آزمون، یک استوانه فلزی به قطر ۵۰ میلی متر با استفاده از چسب اپوکسی، به سطح محل انجام آزمون چسبانده می شود. سپس، با استفاده از یک پیچش سنج دستی معمولی، به استوانه فلزی لنگر پیچشی وارد می گردد تا جسم مورد آزمایش دچار شکست شود. در تحقیقی روی مقاومت فشاری المان های سازه ای در محل اصلی سازه با استفاده از آزمون "پیچش" و مقایسه با مقاومت فشاری نمونه های مکعبی مشاهده شد که ارتباط بالایی بین نتایج حاصل از آزمون "پیچش" و مقاومت فشاری نمونه های مکعبی قرار دارد (Naderi and Musavi, 2013). در تحقیق دیگری که برای ارزیابی مقاومت فشاری پل های بتنی در استان هرمزگان صورت پذیرفت، نتایج حاصله دلالت بر کارایی بالای آزمون "پیچش" برای اندازه گیری مقاومت برجای بتن دارند (Naderi et al., 2012). در تحقیقات گذشته از روش پیچش برای اندازه گیری مقاومت فشاری ملات های معمولی، الیافی و اصلاح شده با پلیمر

چسبانده می شود. پس از چسباندن استوانه، همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، با استفاده از یک پیچش سنج دستی معمولی، به استوانه فلزی لنگر پیچشی وارد می گردد تا جسم مورد آزمایش دچار شکست شود. لوازم به کار رفته در آزمون "پیچش" در مقایسه با دیگر آزمون های متناظر، بسیار ساده، ارزان و قابل دسترس است. آسیب وارده از آزمون "پیچش" بسیار جزئی و سطحی بوده و با ایجاد شکست در خود جسم، مقاومت آن را به طور مستقیم و بدون ربط به عامل دیگری تعیین می نماید.

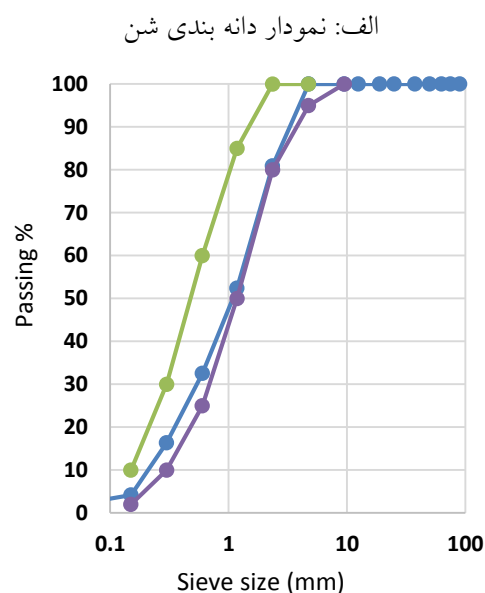


الف) اندازه گیری مقاومت فشاری بتن ها



ب) اندازه گیری مقاومت فشاری سنگ ها

شکل ۲. آزمون برجای "پیچش"



الف: نمودار دانه بندی شن

ب: نمودار دانه بندی ماسه

شکل ۱. نمودار دانه بندی

جدول ۱. مشخصات فوق روان کننده

Type	Color	Unit weight	pH
Poltcarboxylate	Brown	1.11 Kg / Lit	5

۲.۲. روش های آزمایشگاهی

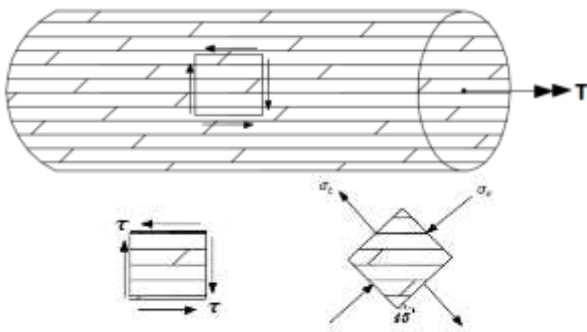
در آزمون پیچش، یک استوانه فلزی به قطر ۵۰ میلی متر با استفاده از چسب اپوکسی، روی سطح محل انجام آزمون

تئوری آزمون "پیچش" در شکل ۳ نمونه های شکسته شده با آزمون پیچش نشان داده شده است.

در شکل ۵ یک استوانه با مقطع دایره (مانند نمونه در آزمون پیچش) تحت اثر لنگر پیچشی نشان داده شده است. هنگامی که بر این مقطع فقط لنگر پیچشی اثر می کند، در المان های مقطع وضعیت برش خالص حاکم می باشد. با توجه به دایره مور المان واقع بر سطح میله، حداکثر تنش کششی و حداکثر تنش فشاری ایجاد شده در استوانه تحت پیچش برای المان سطح استوانه در شکل ۶ قابل مشاهده می باشد (Beer and Johnson., 2014).



الف: نمونه سنگ تست شده



شکل ۵. المان تحت برش خالص

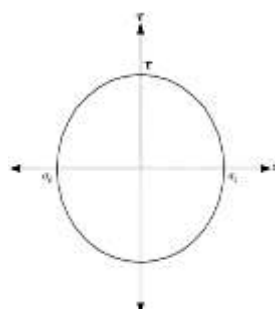
با توجه به شکل دایره مور تنش (شکل ۶- الف) دیده می شود که تنش های برشی، کششی و فشاری حداکثر، هر سه مقداری برابر شعاع دایره مور دارند. در ضمن تنش های اصلی کششی و فشاری با افق زاویه ۴۵ درجه می سازند. سنگ های ترد دارای شکست کششی می باشد. همانند شکل ۶- ب صفحات شکست در این حالت، عمود بر راستای کششی ظاهر می شوند (Beer and Johnson., 2014).



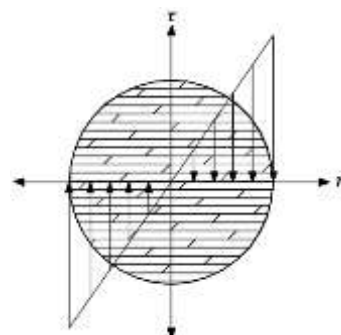
ب: نمونه ای از شکست سنگ ها

شکل ۳. نمونه های شکسته شده در آزمون پیچش

با توجه به اینکه سنگ های شکسته شده در آزمون پیچش به صورت استوانه با سطح مقطع دایروی می باشد لذا مطابق شکل ۴ در اثر اعمال لنگر پیچشی، تنش های برشی به صورت عمود بر شعاع دایره ظاهر می شوند. تنش های برشی متناسب با فاصله از مرکز دایره بوده و بیشترین تنش برشی روی محیط دایره که بیشترین فاصله از مرکز را دارد رخ می دهد (Beer and Johnson., 2014).



الف) دایره مور در حالت برش خالص



شکل ۴. تنش برشی ایجاد شده در اثر اعمال لنگر پیچشی

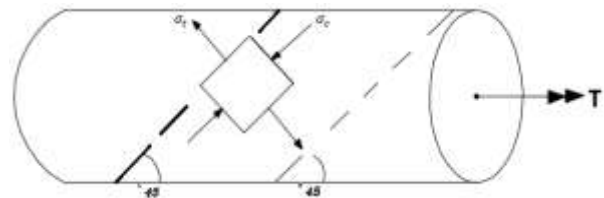
با قطر و ضخامت مشخص صورت می پذیرد که معمولا دارای ارتفاع حدود بیست سانتی متر می باشد. سپس قسمت کرگیری شده از محل جدا می گردد و به عنوان مغزه برای انجام آزمایشاتی مانند آزمایش فشاری تک محوره مورد استفاده قرار می گیرد.

اما در آزمون نیمه مخرب پیچش، کرگیری به ارتفاع کمی انجام شده ولی قسمت کرگیری از محل جدا نمی گردد. به عبارتی در آزمون پیچش هیچ مغزه ای از محل جدا نمی گردد و در همانجا استوانه فولادی روی قسمت کرگیری شده چسبانده می شود و با استفاده از یک ترکمر معمولی آزمون پیچش انجام می شود. همچنین قابل ذکر است که برای انجام آزمون پیچش روی بتن حتی احتیاج به کرگیری هم نمی باشد و استوانه فولادی بدون کرگیری روی محل انجام آزمایش قرار میگیرد.

برای انجام آزمون مقاومت فشاری تک محوری سنگ ها مطابق با استاندارد ASTM D4543 بار روی آزمون باید بطور پیوسته با نرخ فشار ثابت یک مگاپاسکل بر ثانیه اعمال شده و بار بیشینه باید با تقریب ۱۰ کیلونیوتن ثبت شود. در شکل ۷- الف، نمونه قرار گرفته زیر جک نشان داده شده است. در شکل ۷- ب نیز مغزه های گرفته شده از سنگ های مختلف قابل مشاهده است.



ب: مغزه سنگ های مورد آزمایش



ب) راستای صفحه شکست

شکل ۶. راستای تنش ها

در شکل های ۵ و ۶:

لنگر پیچشی خالص $T =$

تنش اصلی فشاری $\sigma_c =$

تنش اصلی کششی $\sigma_t =$

تنش برشی خالص $\tau =$

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده بود، نمونه هایی از شکست سنگ در آزمون پیچش قابل مشاهده است. ملاحظه می شود که شکست نمونه استوانه ای در آزمون پیچش دارای زاویه ۴۵ درجه با افق می باشد که دلیل آن در بالا ذکر گردیده است. در این تحقیق از دو واژه ی مختلف در مقاله استفاده شده است. که عبارتند از واژه "کرگیری" و واژه "مغزه گیری". این دو واژه در موارد معمول دارای معنای مشابه هستند. اما زمانیکه صحبت از روش های مخرب و نیمه مخرب می گردد، این دو واژه دارای معنای متفاوتی می گردند. در روش های مخرب ابتدا با استفاده از مته، کرگیری



الف: نمونه قرار گرفته زیر جک

شکل ۷. آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

مقاومت های فشاری در محدوده ۱۵ تا ۵۰ مگاپاسکال شد. برای طرح اختلاط بتن از روش گام به گام طرح مخلوط ملی بتن استفاده شده است (BHRC, 2008). نسبت های مخلوط نمونه های بتنی در جدول ۲ ارائه گردیده است. درصد جذب آب سنگدانه ها نیز محاسبه و به آب طرح اختلاط ها اضافه گردید. همچنین مقدار روانی و درصد هوای بتن های تازه در جدول فوق قابل مشاهده است. در جدول ۳ نیز جذب آب، چگالی در حالت خشک و وزن در دو حالت اشباع با سطح خشک و حالت خشک برای سنگ های استفاده شده در این تحقیق قابل مشاهده است.

برای انجام آزمون چکش اشمیت نیز از استاندارد ASTM C805, 2018 استفاده شده است. چکش استفاده شده از نوع N می باشد. توصیه های سازنده در مورد کاربرد دستگاه و قرائت نتایج کاملا رعایت گردید. در هنگام استفاده از این روش باید محدودیت های آن مد نظر قرار گیرد. این روش را نمی توان به عنوان جایگزین آزمایش فشاری استاندارد استفاده نمود بلکه روشی است در جهت تعیین یکنواختی مصالح و یا مقایسه تغییر کیفیت مصالح در نقاط مختلف. برای ارزیابی مقاومت های حاصل از آزمون "پیچش" و مقاومت فشاری، اقدام به ساخت نمونه های مکعبی با

جدول ۲. نسبت های مخلوط نمونه های بتنی

Design number	Compressive Strength MPa	Water	Cement	W/C	Sand	Gravel	Super Plasticizer	Slump (mm)	Air content (%)
		$\frac{Kg}{m^3}$	$\frac{Kg}{m^3}$		$\frac{Kg}{m^3}$	$\frac{Kg}{m^3}$	$\frac{Kg}{m^3}$		
1	15	221	328	0.67	901	716	0	4.7	3.2
2	20	215	356	0.6	888	707	0	4	3.1
3	25	211	381	0.55	879	699	0	3.1	2.8
4	30	206	416	0.49	864	687	0	2.5	2.6
5	35	198	440	0.45	862	686	1.17	6	2.7
6	40	195	476	0.41	851	677	1.61	5.7	2.6
7	45	191	516	0.37	838	667	2.12	5.5	2.4
8	50	187	534	0.35	835	664	2.61	5.3	2.3

جدول ۳. مشخصات فیزیکی سنگ ها

Rock	Saturation weight (gr)	Dry weight (gr)	Saturated volume (cm ³)	Density	Water absorption (%)
				$\frac{Kg}{m^3}$	
Granite	548.2	546	208.8	2.615	0.403
Marble	621.8	615.8	236.7	2.610	0.162
Andzit	588.1	558.8	219.9	2.545	1.664
Rhyolite	403.3	390	150.4	2.593	2.360
Green tuff	621.4	606	242.8	2.495	2.541
Stone tuff	467.2	441.5	198.7	2.220	5.821
Travertine	687.7	677.2	267.1	2.535	1.551
lime	620.8	615.5	234	2.630	0.861
Basalt	612.1	608.7	228	2.620	0.550

۳. نتایج به دست آمده و تحلیل آن ها

۱,۳. ارزیابی مقاومت فشاری بتن ها

در جدول ۴ نتایج مقاومت فشاری بتن ها و نتایج حاصل از آزمون پیچش نشان داده شده است.

جدول ۴. نتایج مقاومت فشاری و آزمون پیچش بر روی

نمونه های بتن

Sample number	Compressive strength (MPa)	Torsional moment (N.m)
1	18.7	136
2	21.4	156
3	28.8	194
4	36.8	210
5	40.6	237
6	44.8	244
7	48	252
8	51.3	290

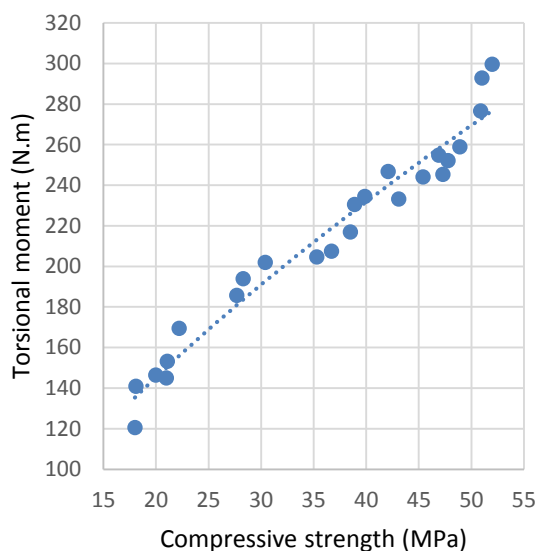
با توجه به جدول ۴ مشاهده می شود با افزایش مقاومت فشاری بتن ها، نتایج حاصل از آزمون پیچش نیز افزایش یافته است. مقاومت فشاری بتن ها از ۱۸/۷ مگاپاسکال تا ۵۱/۳ مگاپاسکال و مقدار نتایج آزمون پیچش از ۱۳۶ نیوتن متر تا ۲۹۰ نیوتن متر متغیر است.

در آزمون پیچش چون شکست در خود جسم مورد آزمایش اتفاق می افتد در نتیجه نتایج آن نسبت به آزمون های تعیین سختی سطح یا آزمون هایی که به طور غیر مستقیم مقاومت مصالح را ارزیابی می نماید، از اعتبار بیشتری برخوردار است. با توجه به این که قطر استوانه فلزی ثابت است (۵۰ میلی متر)، گشتاور پیچشی نهایی شکست نیز می تواند بدون نیاز به محاسبه تنش ها جهت ارزیابی مقاومت به کار گرفته شود.

در ادامه برای بررسی رابطه بین نتایج حاصل از آزمون "پیچش" با مقاومت فشاری بتن ها با رده های مختلف از تحلیل آماری رگرسیون استفاده گردیده است. بدین منظور ابتدا ضریب همبستگی و ضریب تعیین بین آزمون فوق و مقاومت فشاری بتن با رگرسیون خطی به دست آورده می شود. سپس با توجه به فرضیه تحقیق، در خصوص اینکه "خط رگرسیون باید از محور مختصات عبور نماید و معادله

کالیبراسیون به صورت $y=ax$ انتخاب و تحلیل رگرسیون صورت پذیرد"، لذا ضریب تعیین در این حالت نیز به دست آورده می شود. در انتها اگر بین ضریب تعیین در دو حالت فوق اختلافی وجود داشته باشد می توان از تحلیل رگرسیون به صورت توانی استفاده نمود.

در شکل ۸ نتایج به دست آمده از انجام آزمون "پیچش" و مقاومت فشاری نمونه های بتنی مکعبی نشان داده شده است.



شکل ۸. رابطه بین نتایج آزمون "پیچش" با مقاومت فشاری بتن ها

با انجام تحلیل رگرسیون خطی، رابطه ۱ نتیجه می شود که دارای همبستگی خطی با ضریب تعیین برابر ۰/۹۵ می باشد.

$$y = 4.163x + 63.65 \quad (1)$$

در رابطه ۱ منظور از y ، مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال و منظور از x نتایج حاصل از آزمون پیچش بر حسب نیوتن متر می باشد. اما اگر معادله رگرسیون در حالت خطی بصورت $y=ax$ انتخاب و تحلیل همبستگی انجام شود، مقدار ضریب تعیین برابر ۰/۹۹ می شود. لذا می توان از منحنی توانی که تا حدود زیادی با منحنی خطی تطابق دارد استفاده نمود. نتایج حاصل از تحلیل همبستگی نشان می دهد که طبق رابطه ۲، نتایج حاصل از آزمون پیچش با مقاومت فشاری بتن

یک نمونه استوانه ای حاصل می گردد که سطوح انتهایی آن تخت و تراز نمی باشد. لذا مغزه ها باید کلاهیگ گذاری شود و در محیطی مرطوب تحت آزمایش قرار گیرند (, BSI 1881, 2008). یا بنابر آنچه ACI318, 2019 توصیه می کند، در حالت خشک آزمایش شوند. برای تعیین مقاومت فشاری مغزه ها از جک فشاری هیدرولیکی با دقت ۰/۱ تن استفاده شده است.

۱,۲,۳. نتایج آزمایش روی مغزه های سنگی و آزمون پیچش در جدول ۵ مقاومت فشاری سنگ های مختلف حاصل از آزمون مغزه گیری و نتایج آزمون پیچش قابل مشاهده است. از جدول ۵ مشاهده می شود که کمترین مقاومت فشاری مربوط به سنگ توف و بیشترین مقاومت فشاری برای سنگ بازالت به دست آمده است.

ها دارای همبستگی بالا با مقدار ضریب تعیین برابر ۰/۹۵ می باشد.

$$y = 19.27x^{0.67} \quad (۲)$$

در رابطه ۲ منظور از y ، مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال و منظور از x نتایج حاصل از آزمون پیچش بر حسب نیوتن متر می باشد. لذا می توان برای ارزیابی برجای مقاومت فشاری بتن ها، با به-کارگیری آزمون "پیچش"، مقدار لنگر پیچشی به دست آمده از این آزمون را برای تبدیل به مقاومت فشاری نمونه های بتنی، با استفاده از منحنی کالیبراسیون توانی (شکل ۸) و با اطمینان بالا استفاده نمود.

۲,۳. ارزیابی مقاومت فشاری سنگ ها

برای اندازه گیری مقاومت فشاری سنگ ها می توان از مغزه گیری جسم مورد نظر به طور مستقیم استفاده نمود. مغزه ها اغلب به وسیله دستگاه کرگیری گرفته می شود. به این ترتیب

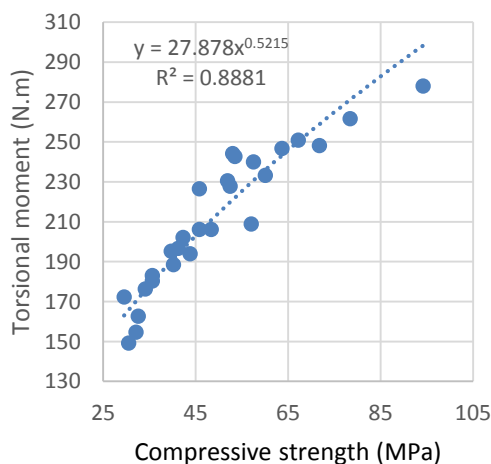
جدول ۵. مقاومت فشاری مغزه سنگ های مختلف

Rock Type	Sample number	Load (ton)	Average load (ton)	Average strength (Mpa)	Torsional moment on Twist-off (N.m)
Granite	1	14.1	11.2	62.17	246
	2	12.5			
	3	9			
Marble	1	11.8	11.71	59.66	240
	2	10.2			
	3	13.2			
Andzit	1	8.6	7.83	39.92	186
	2	7.9			
	3	7			
Green tuff	1	6.4	6.23	31.76	180
	2	6			
	3	4.3			
Stone tuff	1	7	6.5	33.12	184
	2	6.7			
	3	5.8			
Travertine	1	11.2	9.5	48.41	198
	2	7.8			
	3	9.5			
lime	1	11.3	10.2	51.97	228
	2	10.3			
	3	9			

ادامه جدول ۵. مقاومت فشاری مغزه سنگ های مختلف

Rock Type	Sample number	Load (ton)	Average load (ton)	Average strength (Mpa)	Torsional moment on Twist-off (N.m)
Rhyolite	1	8.3	8.47	43.14	192
	2	8.1			
	3	9			
Basalt	1	18.5	14.8	75.41	247
	2	15.4			
	3	10.5			

از جدول ۷ مشاهده می شود که با افزایش مقاومت فشاری سنگ ها، مقدار لنگر پیچشی حاصل از آزمون پیچش نیز افزایش یافته است. اما از آنجا که آزمایش چکش اشमित به سطح نمونه شدیداً وابسته است و وجود حفرات و ترک های سطحی موجود روی سنگ ها منجر به قرائت اشتباه از وسیله آزمون چکش اشमित می گردد لذا امکان دارد سنگ های دارای مقاومت کمتر اما دارای سطح صاف و صیقلی نتایج بالاتر نسبت به سنگ های مشابه اما دارای سطح زبر و خشن از خود نشان دهد. نمونه این امر عدد قرائت شده برای سنگ گرانیت نسبت به سنگ بازالت است. همچنین برای آزمون پیچش، قطر استوانه و ارتفاع کرگیری سنگ ها می تواند روی نتایج تاثیر مستقیم داشته باشد. با توجه به جدول ۷، رابطه بین مقاومت فشاری سنگ های مختلف با نتایج حاصل از آزمون پیچش در شکل ۹ قابل مشاهده است.



شکل ۹. رابطه نتایج حاصل از آزمون پیچش با آزمون مغزه گیری

۲,۲,۳. نتایج آزمون چکش اشमित روی سنگ ها

در جدول ۶ نتایج انجام آزمون چکش اشमित روی سنگ های مختلف قابل مشاهده است. برای مقایسه نتایج حاصل از آزمون پیچش با آزمون مغزه گیری و چکش اشमित، نتایج به صورت متمرکز در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۶. نتایج آزمون چکش اشमित روی سنگ های مختلف

Rock type	Schmidt's hammer reading
Granite	61.4
Marble	60.4
Andzit	55.8
Green tuff	49.2
Stone tuff	49.6
Travertine	52.8
lime	58
Rhyolite	60.6
Basalt	60.4

جدول ۷. نتایج آزمایشات روی سنگ ها

Rock type	Schmidt's hammer reading	Torsional moment (N.m)	Compressive strength (MPa)
Granite	61.4	246	62.17
Marble	60.4	240	59.66
Andzit	55.8	186	39.92
Green tuff	49.2	180	31.76
Stone tuff	49.6	184	33.12
Travertine	52.8	198	48.41
lime	58	228	51.97
Rhyolite	60.6	192	43.14
Basalt	60.4	247	75.41

این می باشد که آزمون پیچش در خود جسم مورد آزمایش انجام می شود و لذا نتایج با دقت بالاتری ارائه می دهد. در رابطه مذکور از y ، نتایج آزمون چکش اشمیت و منظور از x نتایج حاصل از آزمون پیچش بر حسب نیوتن متر می باشد.

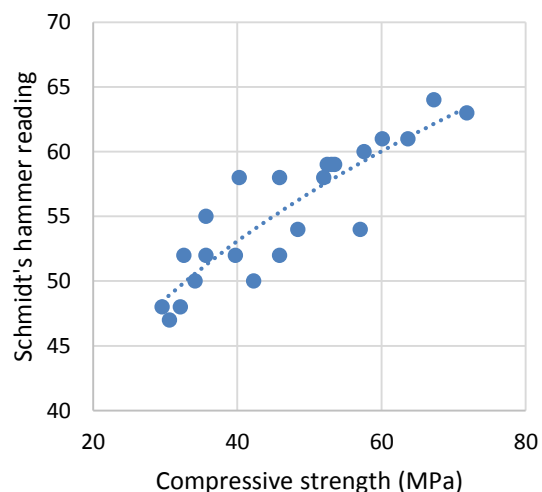
۴. نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از آزمون نوین و برجای پیچش اقدام به ارزیابی مقاومت فشاری بتن های معمولی با رده مقاومت ۱۵ تا ۵۰ مگاپاسکال و همچنین مقاومت فشاری سنگ های مختلف گردیده است. در ادامه نیز نتایج آزمون پیچش با نتایج آزمون های استاندارد مورد مقایسه قرار گرفت و با رسم نمودارهای کالیبراسیون، اقدام به ارائه معادلات مورد نیاز جهت تبدیل نتایج آزمون پیچش به مقاومت فشاری مصالح مذکور شد. با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق نتیجه گیری می شود که:

- آزمون "پیچش" با کاربری گسترده و دارای دقت بالا می تواند برای اندازه گیری مقاومت فشاری بتن های معمولی و سنگ های مختلف به کار گرفته شود. خرابی حاصل از این آزمون بسیار جزئی بوده و در هر شرایطی بصورت برجا قابل اعمال است.
- با توجه به ضریب تعیین برابر 0.95 بین نتایج آزمون پیچش با مقاومت فشاری بتن، لذا می توان با استفاده از نمودار کالیبراسیون و معادله $y = 19.27x^{0.67}$ به راحتی با به کارگیری آزمون پیچش، نسبت به اندازه گیری مقاومت فشاری بتن ها اقدام نمود.
- با عنایت به ضریب همبستگی برابر 0.94 بین نتایج آزمون پیچش با مقاومت فشاری مغزه های سنگی، لذا می توان با استفاده از معادله $y = 27.87x^{0.52}$ با جایگذاری نتایج آزمون پیچش نسبت به اندازه گیری مقاومت فشاری سنگ ها اقدام نمود.
- با مقایسه نتایج حاصل از آزمون پیچش با آزمون چکش اشمیت برای اندازه گیری مقاومت فشاری

از شکل ۹ مشاهده می شود که یک رابطه توانی بین مقاومت فشاری حاصل از آزمون مغزه گیری با نتایج حاصل از آزمون پیچش وجود دارد که برابر است با $y = 27.87x^{0.52}$. مطابق شکل ۹ ضریب همبستگی برابر با 0.94 و ضریب تعیین برابر 0.89 می باشد. در نتیجه می توان با استفاده از آزمون پیچش به صورت برجا و با دقت بالا مقاومت فشاری انواع سنگ ها را مشخص نمود. در رابطه مذکور از y ، مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال و منظور از x نتایج حاصل از آزمون پیچش بر حسب نیوتن متر می باشد.

با توجه به جدول ۷، رابطه بین مقاومت فشاری سنگ های مختلف با نتایج حاصل از آزمون چکش اشمیت در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.



شکل ۱۰. رابطه نتایج حاصل از آزمون چکش اشمیت با آزمون مغزه گیری

از شکل ۱۰ مشاهده می شود که یک رابطه توانی بین مقاومت فشاری حاصل از آزمون مغزه گیری با نتایج حاصل از آزمون چکش اشمیت وجود دارد که برابر است با $y = 17.317x^{0.3}$. مطابق شکل ۱۰ ضریب همبستگی برابر با 0.88 و ضریب تعیین برابر 0.78 می باشد. از مقایسه نتایج حاصل از شکل های ۹ و ۱۰ مشاهده می شود که استفاده از آزمون پیچش منجر به نتایج دقیق تری نسبت به آزمون چکش اشمیت برای ارزیابی مقاومت فشاری سنگ ها می باشد. علت این امر نیز

برشی روی محیط دایره که بیشترین فاصله از مرکز را دارد رخ می دهد. لذا شکست نمونه ها در آزمون پیچش با زاویه ۴۵ درجه اتفاق می افتد که با توجه به دایره مور این نوع شکست صحیح می باشد.

سنگ ها، مشاهده شد که آزمون پیچش دارای دقت بالاتری جهت ارزیابی مقاومت فشاری سنگ ها می باشد.

• با توجه به اینکه سنگ های شکسته شده در آزمون پیچش به صورت استوانه با سطح مقطع دایروی است لذا در اثر اعمال لنگر پیچشی، بیشترین تنش

منابع

- Budak, T. O., Gurbuz, A., and Eksioglu, B., 2022. Practical transitions among undrained shear strengths of remolded samples from pocket penetrometer tests and other laboratory tests. *CATENA*, 213, p.106148.
- Li, T., Zhang, Z., Jia, C., Liu, B., Liu, Y., and Jiang, Y., 2022. Investigating the cutting force of disc cutter in multi-cutter rotary cutting of sandstone: Simulations and experiments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 152, p.105069.
- Alidadi, S., Alipour, R., and Shakeri, M., 2022. Influence of rockfill particle breakage on long-term settlement of embankment dams. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, pp.1-11.
- ACI Committee 214, Report 214.4R-03., 2003. Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results, American Concrete Institute.
- Masi, A., Digrisolo, A., and Santarsieo, G., 2003. Experimental evaluation of drilling damage on the strength of cores extracted from RC buildings. in *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, 7(7). p. 749.
- ASTM C900-15., 2015. Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Rabe, C., Silva, G., Lopes, AL., Nunes, S., Silva, and CG., 2018. Development of a new correlation to estimate the unconfined compressive strength of a Chicontepec Formation. *Int J Geomech* 18(8). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001134](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001134).
- Jalali, SH., Heidari, M., and Zarrinshoja, M., 2019. Predicting of uniaxial compressive strength of some igneous and metamorphic rocks by block punch index and cylindrical punch index tests. *Int J Rock Mech Min Sci* 119:72-80. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.04.013>.
- Kahraman, S., Fener, M., and Kilic, CO., 2016. A preliminary study on the conversion factor used in the prediction of the UCS from the BPI for pyroclastic rocks. *Bull Eng Geol Environ* 75:771– 780. <https://doi.org/10.1007/s10064-015-0789-7>.
- Kumar, R., Bhargava, K., and Choudhury, D., 2017. Correlations of uniaxial compressive strength of rock mass with conventional strength properties through random number generation. *Int J Geomech* 17(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000716](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000716).
- ASTM C597-16., 2016. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C808/C805M-18., 2018. Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C1583/C1583M-13., 2013. Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Pereira, E., and Medeiros, M.H.F., 2012. Pull off Test to Evaluate the Compressive Strength of Concrete: an Alternative to Brazilian Standard Techniques. *Ibracon Structures and Materials Journal*. 5(6). p. 757-780.
- Naderi, M., 2005. Friction-transfer test for the assessment of in situ strength and adhesion of cementitious materials. *Constr. Build. Mater* 19:454–459.
- Saberi Varzaneh, A., and Naderi, M., 2020. Determination of mechanical properties of repair mortars using in situ methods under different curings." *EUREKA: Phys. and Eng* 2. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001190>.

- Saberi Varzaneh, A., and Naderi, M., 2020. Comparing the results obtained from in-situ methods for determining the strength of the cement mortars. *J Crit Rev* 7(4). <http://dx.doi.org/10.31838/jcr.07.04.102>, (2020).
- Saberi Varzaneh, A., and Naderi, M., 2021. Study of bond strength between polymer-modified mortars/concrete and their mechanical properties using “friction-transfer” and “pull-off” methods. *Mech Adv Compos Struc*, 7(1). <https://doi.org/10.22075/mac.2021.20231.1251>.
- Naderi, M., 2007. New Twist-Off Method for the Evaluation of In-Situ Strength of Concrete, *Journal of Testing and Evaluation*. 35(6). ISSN: 0090-3973.
- Naderi, M., SheikhAleslami, A., and Mohsenzadeh, R., 2012. Case studies to determine the concrete strength of damaged structures using in situ methods. National Conference on Transport Infrastructure.
- Saberi Varzaneh, A., and Naderi, M., 2020. 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*. Published online.
- Saberi Varzaneh, A., and Naderi, M., 2021. Investigation of In-situ compressive strength of Fiber-Reinforced Mortar and the Effect of Fibers on the Adhesion of Mortar/Steel. *Advanced design and manufacturing technology*.
- Saberi Varzaneh, A., and Naderi, M., 2020. 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*, 50(4), 537 – 544.
- ASTM C136., 2006. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials.
- ASTM C127., 2012. Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate, West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials.
- ASTM C128., 2015. Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate, West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials.
- Beer, F. P., and Johnson., E. R., 2014. *Mechanics of Materials 7th Edition*, ISBN: 0073380288.
- ASTM D4543., 2019. Standard Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances, West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials.
- Housing and Urban Development Research Center., 2007. National Method of Concrete Mixing Design, No. 479.
- British Standard Institution., 2008. method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cores, BSI 1881: Part 120: 1983.
- ACI Committee 318., 2019. Report 318R-19. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute.