

ارزیابی درجای مقاومت فشاری سنگ ها و ملات های تعمیراتی با استفاده از روش "پیچش"

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

۱- استاد، دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

۲- دکتری، دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

۳- کارشناس ارشد، دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸

چکیده

امروزه اندازه گیری مقاومت مصالح به صورت درجا و در محل پروژه از اهمیت بالایی برخوردار است. روش های زیادی جهت ارزیابی مقاومت فشاری سنگ ها و ملات ها موجود می باشد که یا جزء آزمون های مخرب هستند و یا وسایل آن ها دارای قیمت های گزاف و وارداتی می باشد. در این تحقیق از آزمونی نوین با نام "پیچش" استفاده شده است که با دقت بالا و با کاربری وسیع، قابلیت اندازه گیری مقاومت فشاری انواع مصالح از جمله سنگ ها و ملات ها را دارا می باشد. در این مقاله آزمایش "پیچش" روی سنگ های گرانیت، تراورتن، مرمریت، ریولیت، اندزیت، توف سبز بلورین، آهک، بازالت، توف سبز سنگی و تعدادی ملات های تعمیراتی انجام شده است. سپس نتایج این آزمون با روش های استاندارد مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین معادلات و نمودارهای کالیبراسیون جهت تبدیل نتایج آزمون "پیچش" به مقاومت فشاری سنگ ها و ملات ها ارائه شده است. با استفاده از نتایج این تحقیق می توان با استفاده از دستگاه ارزان و ساده "پیچش"، مقاومت فشاری مصالح مذکور را با خرابی جزئی و در محل پروژه با دقت بالایی اندازه گیری نمود.

واژگان کلیدی

سنگ، ملات، مقاومت، آزمون درجا.

۱- مقدمه

مختلف دمایی و رطوبتی قرار دارد از اهمیت بالایی برخوردار است. در نتیجه به کارگیری آزمونی که ضمن آسیب نرساندن به نمونه بتواند مقاومت درجا و سطحی آن ها را اندازه گیری نماید دارای اهمیت است.

آزمون های زیادی برای اندازه گیری مقاومت مصالح در سازه ابداع شده است که در سه گروه نیمه مخرب، مخرب و غیر مخرب قرار دارند. اکثر آزمون های استاندارد در گروه های مخرب قرار دارند. برای انجام آزمون های مخرب باید قسمتی از سازه را با اهر نمودن یا کرگیری جدا نمود و سپس تحت آزمایش قرار داد. از مهمترین معایب این روش ها می توان به عدم تکرار پذیر بودن بالا، محدودیت در نمونه برداری، صرف هزینه های بالا و آسیب زیاد به سازه اشاره نمود [1]. در برخی تحقیقات مشاهده شده است که نتایج حاصل از نمونه های مغزه گیری شده کمتر از مقاومت واقعی مصالح می باشد

امروزه برای اندازه گیری مشخصات مکانیکی مصالحی از جمله سنگ ها، ملات ها و بتن ها، استفاده از روش های غیر مخرب یا با خرابی جزئی مورد استقبال بالایی می باشد. حفظ انسجام و عدم آسیب رسانی به نمونه ها از مهمترین دلایل توسعه روز افزون استفاده از آزمون های درجا در رشته های مهندسی به خصوص در حوزه زمین شناسی، معدن و عمران می باشد. مقاومت فشاری تک محوری سنگ ها (*Uniaxial Compressive Strength - UCS*) از جمله پارامترهایی است که به طور وسیعی در طراحی سازه ها در توده های سنگی استفاده می شود. آگاهی از مقاومت فشاری تک محوری سنگ ها در به سرانجام رساندن بهینه ی عملیات های پایدارسازی دیواره ی تونل سازی، حفاری و چاه های نفتی تاثیر بسیاری دارد. همچنین سطح ملات های تعمیراتی که به صورت بیواسطه تحت تاثیر شرایط

۲- کارهای آزمایشگاهی

۲-۱ مصالح مصرفی

سنگ های استفاده شده در این پژوهش در جدول ۱ نشان داده شده است.

شماره نمونه	نوع سنگ	نام سنگ
۱	آذرین	ریولیت
۲	دگرگونی	مرمریت
۳	آذر آواری	توف سبز بلورین
۴	آذرین	اندزیت
۵	آذرین	گرانیت
۶	آذر آواری	توف سبز سنگی
۷	آذرین	تراورتن
۸	رسوبی	آهک
۹	آذرین	بازالت

مصالح مورد استفاده برای ساخت ملات ها عبارتند از سیمان تیپ ۲ محصول کارخانه سیمان آبیک، سنگدانه ها از معادن شهریار، آب آشامیدنی استان قزوین، چسب دو جزئی از نوع رزینی، دانه بندی ماسه طبق استاندارد *ASTM C136* [19] انجام پذیرفت. میزان جذب آب ماسه بر اساس استانداردهای *ASTM C127* [20] برابر ۳/۲ درصد بدست آمد.

در جدول ۲ جذب آب، چگالی، حجم اشباع با سطح خشک و وزن اشباع با سطح خشک سنگ های آزمایش شده قابل مشاهده می باشد.

جدول ۲: مشخصات فیزیکی سنگ ها

سنگ	وزن اشباع (gf)	حجم اشباع (cm ³)	چگالی (Kg/m ³)	جذب آب (%)
ریولیت	۴۰۳/۳	۱۵۰/۴	۲/۵۹۳	۲/۳۶۰
توف سبز بلورین	۶۲۱/۴	۲۴۲/۸	۲/۴۹۵	۲/۵۴۱
توف سبز سنگی	۴۶۷/۲	۱۹۸/۷	۲/۲۲	۵/۸۲۱
بازالت	۶۱۲/۱	۲۲۸	۲/۶۲۰	۰/۵۵
گرانیت	۵۴۸/۲	۲۰۸/۸	۲/۶۱۵	۰/۴۰۳
آهک	۶۲۰/۸	۲۳۴	۲/۶۳۰	۰/۸۶۱
مرمریت	۶۲۱/۸	۲۳۶/۷	۲/۶۱۰	۰/۱۶۲
اندزیت	۵۸۸/۱	۲۱۹/۹	۲/۵۴۵	۱/۶۶۴
تراورتن	۶۸۷/۷	۲۶۷/۱	۲/۵۳۵	۱/۵۵۱

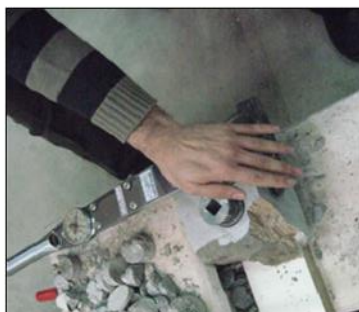
[2] آزمون "بیرون کشیدن" نیز یکی از روش های مخرب می باشد که مقدار آسیب آن به المان سازه ای بسیار زیاد می باشد [3]. در تحقیقات اخیر، با عنایت به معایب روش فشاری تک محوری، برخی از محققین، روش های ساده ای را جهت اندازه گیری غیر مستقیم مقاومت مصالح پیشنهاد داده اند [4-7].

آزمون "کشیدن از سطح" یک روش نیمه مخرب می باشد که جهت اندازه گیری درجای مقاومت فشاری مصالح به کار برده می شود [8]. البته دستگاه های آن وارداتی و دارای هزینه های بالایی می باشد اما تحقیقات نشان داده که این آزمون دارای دقت مناسبی است [9]. آزمون های غیر مخرب دیگر روش های "ولتراسونیک" و "چکش اشمیت" می باشند [10-11]. البته حفزه ها، ترک ها و مقدار آرماتورها در نتایج به دست آمده موثر می باشند. یکی از آزمون های جدید، روش "انتقال اصطکاک" [12] می باشد. نتایج حاصل از این روش، در مقایسه با آزمایش هایی که به صورت غیر مستقیم و با سختی سنجی مقاومت را تعیین می کنند دارای دقت بالاتری است [13]. این آزمون نیازی به افراد متخصص نداشته و در دسترس می باشد [14]. مقایسه نتایج به دست آمده از این آزمون با روش های دیگر نشان دهنده ضریب بالای همبستگی بین نتایج است [15].

یک روش نوینی که توسط نادری [16] اختراع شده است آزمون "پیچش" است که در زمره روش های نیمه مخرب یا یا به عبارت بهتر روش های با خرابی جزئی قرار دارد. در یک پژوهش بر روی مقاومت فشاری برخی المان های سازه ای در محل با استفاده از روش "پیچش" و مقایسه نتایج با مقاومت فشاری نمونه های مکعبی مشاهده شد که ارتباط زیادی بین نتایج به دست آمده از آزمون "پیچش" و مقاومت فشاری نمونه های آزمایشگاهی قرار دارد [17]. در پژوهش دیگری که برای تخمین مقاومت فشاری پل های بتنی در استان هرمزگان انجام شد، نتایج حاصله بیانگر کارایی زیاد آزمون "پیچش" برای اندازه گیری مقاومت درجای مصالح می باشد [18].

در این مقاله با به کارگیری آزمون نوین و درجای پیچش اقدام به تخمین مقاومت فشاری سنگ های مختلف با نام های گرانیت، تراورتن، مرمریت، ریولیت، اندزیت، توف سبز بلورین، آهک، بازالت، توف سبز سنگی و تعدادی ملات های تعمیراتی شده است. همچنین مقاومت فشاری مصالح مذکور با استفاده از آزمون های استاندارد نیز تعیین شده و نتایج حاصله با نتایج به دست آمده از روش پیچش مقایسه گردیده است. در ادامه با ارائه معادلات و منحنی های کالیبراسیون مورد نیاز، نتایج پیچش به راحتی قابل تبدیل به مقاومت فشاری سنگ ها و ملات ها می باشد.

سپس همانگونه که در شکل ۳ قابل مشاهده است، با به کارگیری یک ترکمتر دستی معمولی، به استوانه فلزی لنگر پیچشی وارد می شود تا جسم مورد آزمایش دچار شکست گردد.



الف) ارزیابی مقاومت فشاری سنگ ها



ب) تخمین مقاومت فشاری ملات ها

شکل ۳. آزمون نوین "پیچش"

لوازم به کار رفته در آزمون "پیچش" در مقایسه با دیگر آزمون ها، بسیار ارزان، ساده و قابل دسترس است. آسیب وارده از این روش 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. در شکل ۴ نیز مغزه های به دست آمده از سنگ های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۴. سنگ های کرگیری شده

برای ساخت ملات های تعمیری از نسبت نشان داده شده در جدول ۳ استفاده شده است.

جدول ۳: نسبت های ملات های تعمیری

نام مختصر	نسبت سیمان به ماسه	نسبت آب به سیمان
M1	۲ : ۱	۰/۵

برای تعیین مقاومت فشاری ملات ها، نمونه ها تحت عمل آوری های "غرقاب داخل آب"، "مواد عمل آورنده" و "رها شده در فضای آزمایشگاه" قرار گرفتند. نمونه ها در سنین ۷، ۴۲ و ۹۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه های مقاومت فشاری ملات ها به صورت مکعبی با ابعاد ۵ سانتی متر می باشد. برای انجام آزمون پیچش روی ملات ها نیز از نمونه های مکعبی با ابعاد ۱۵ سانتی متر استفاده شده است.

۲-۲ روش های آزمایشگاهی

در روش پیچش، ابتدا مطابق شکل ۱ با استفاده از دستگاه کرگیری نسبت به ایجاد مغزه جزئی روی سنگ ها اقدام می شود.



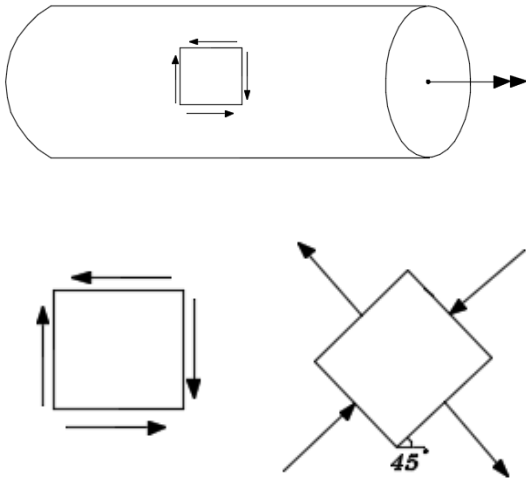
شکل ۱. کرگیری از سنگ ها

سپس یک استوانه فلزی به قطر ۵ سانتی متر با استفاده از چسب رزینی، بر روی سطح محل آزمون چسبانده می شود (شکل ۲).



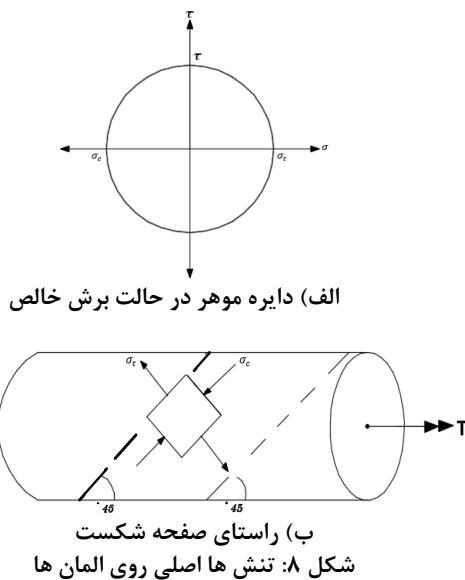
شکل ۲. چسباندن استوانه فولادی روی سنگ ها

روی این مقطع فقط لنگر پیچشی اعمال می شود، در المان های مقطع وضعیت برش خالص حاکم می گردد. با توجه به دایره موهر المان واقع بر سطح میله، حداکثر تنش کششی و حداکثر تنش فشاری به وجود آمده در استوانه تحت پیچش برای المان سطح استوانه در شکل ۸ قابل مشاهده می باشد.



شکل ۷: المان تحت اثر برش خالص

با عنایت به دایره موهر تنش (شکل ۸-الف) دیده می شود که تنش های برشی، فشاری و کششی حداکثر، هر سه مقداری برابر شعاع دایره موهر دارا می باشند. همچنین تنش های اصلی کششی و فشاری با افق زاویه ۴۵ درجه می سازند. مواد ترد مانند سنگ دارای شکست کششی است. همانند شکل ۸-ب صفحات شکست در این حالت، عمود بر راستای کششی ظاهر می گردند.



الف) دایره موهر در حالت برش خالص

ب) راستای صفحه شکست
شکل ۸: تنش ها اصلی روی المان ها

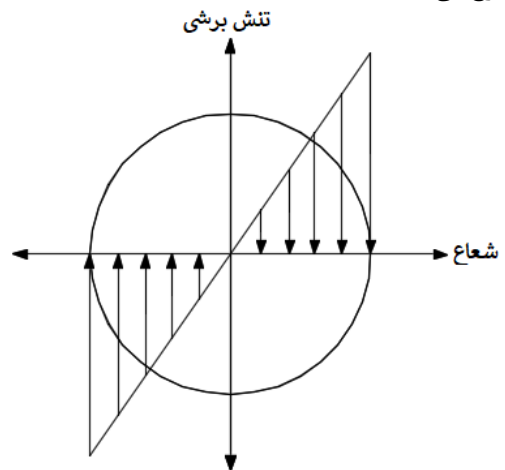
همانطور که در شکل ۵ مشاهده شد، ملاحظه می شود که شکست

تئوری آزمون "پیچش" در شکل ۵ نوع شکست مغزه ها توسط آزمون پیچش نشان داده شده است.



شکل ۵: شکست مغزه ها در آزمون پیچش

با توجه به اینکه شکست سنگ ها در روش پیچش به صورت استوانه با سطح مقطع دایره ای می باشد لذا مطابق شکل ۶ در اثر اعمال لنگر پیچشی، تنش های برشی به صورت عمود بر شعاع دایره اعمال می شوند. تنش های برشی متناسب با فاصله از مرکز بوده و بیشترین مقدار تنش برشی روی محیط دایره که بیشترین فاصله از مرکز دایره را دارد رخ می دهد.



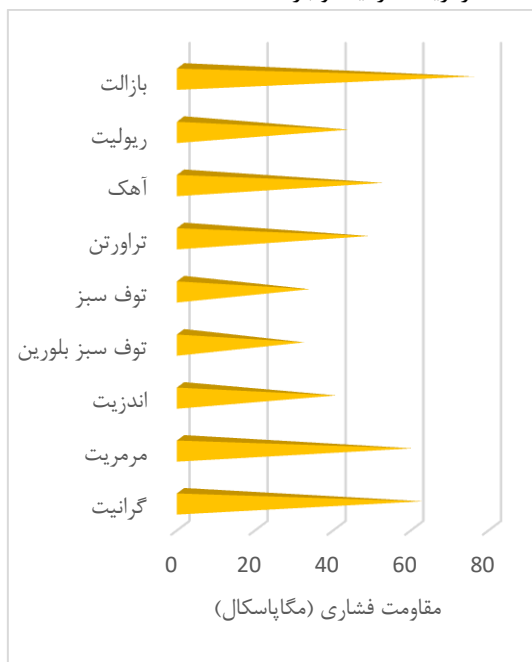
شکل ۶: تنش برشی ایجاد شده در مغزه

در شکل ۷ یک استوانه با مقطع دایره (مانند مغزه ی سنگی در روش پیچش) تحت اثر لنگر پیچشی نشان داده شده است. زمانی که بر

برای اندازه گیری مقاومت فشاری سنگ ها از مغزه گیری نمونه به طور مستقیم استفاده می شود. مغزه ها اغلب به وسیله دستگاه مغزه گیری گرفته می گردد. به این ترتیب یک نمونه استوانه ای به دست می آید که سطوح انتهایی آن تخت نیست. لذا مغزه باید کلاهدک گذاری شود [I-21] و در محیطی مرطوب تحت آزمایش قرار گیرند یا بنابر آنچه [22] ACI318 توصیه می کند، باید در حالت خشک آزمایش نمود. در این تحقیق برای تعیین مقاومت فشاری مغزه ها از جک فشاری هیدرولیکی با دقت ۰/۱ تن استفاده گردیده است.

۱-۱-۳ نتایج آزمایش UCS

نمودار میله ای مربوط به مقاومت فشاری سنگ ها در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج نشان داده شده در شکل فوق، میانگین مقاومت فشاری سه نمونه می باشد. از شکل ۹ مشاهده می شود که کمترین مقاومت مربوط به سنگ توف و بیشترین مقاومت برای سنگ بازالت به دست آمده است. نسبت مقاومت فشاری این دو سنگ برابر است با ۲/۳۷ است. مقاومت فشاری سنگ ها به ترتیب از کم به زیاد برای سنگ های توف سبز بلورین، توف سنگی، اندزیت، ریولیت، تراورتن، آهک، مرمریت، گرانیت و بازالت است.



شکل ۹: مقاومت فشاری سنگ

۱-۲-۳ نتایج روش پیچش بر روی سنگ ها

نمودار میله ای مربوط به نتایج به دست آمده از اعمال روش پیچش روی سنگها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج نشان داده شده در شکل فوق، میانگین آزمون روی سه نمونه می باشد. با توجه به شکل ۱۰ بیشترین مقاومت حاصل از انجام آزمون پیچش، مربوط به سنگ بازالت و کمترین مقاومت برای سنگ توف می باشد.

مغزه های استوانه ای در روش پیچش دارای زاویه ۴۵ درجه با افق می باشد که دلیل آن در بالا ذکر گردید.

۳- نتایج حاصله و تحلیل آن ها

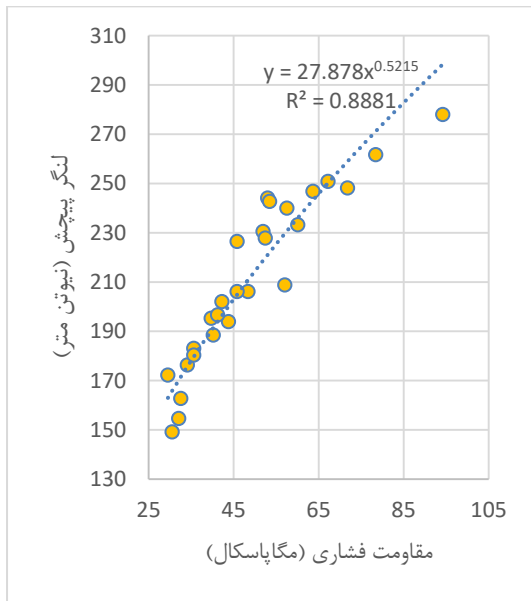
۳-۱- تخمین مقاومت فشاری سنگ ها

در ابتدا برای مقایسه نتایج به دست آمده از روش پیچش با آزمون مغزه گیری، نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است.

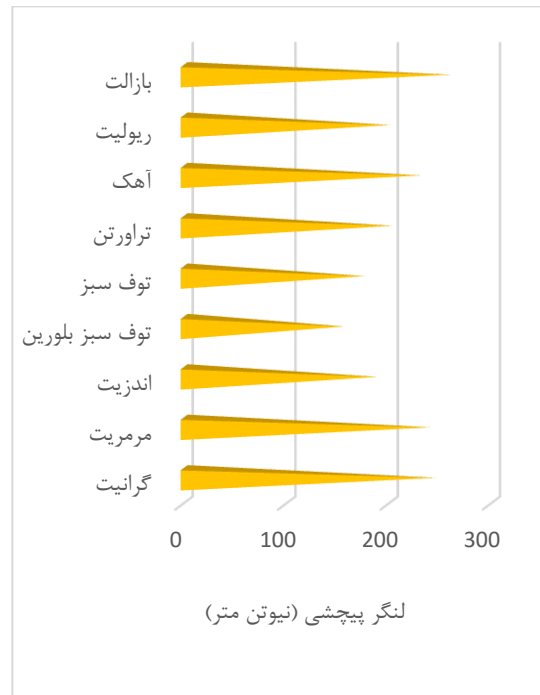
جدول ۴: نتایج حاصل از آزمایشات روی سنگ ها

نوع سنگ	لنگر پیچشی (N.m)	مقاومت فشاری (Mpa)
گرانیت	۲۴۴	۵۳
	۲۴۸	۶۴
	۲۴۶	۷۱
مرمریت	۲۳۰	۵۲
	۲۳۳	۶۰
	۲۵۰	۶۷
اندزیت	۱۸۳	۳۵
	۱۸۸	۴۰
	۱۹۴	۴۳
توف سبز بلورین	۱۴۹	۳۰
	۱۵۴	۳۲
	۱۶۳	۳۳
توف سنگی	۱۸۰	۳۵
	۱۷۲	۲۹
	۱۷۶	۳۴
تراورتن	۲۰۶	۳۹
	۱۹۵	۴۸
	۲۰۸	۵۷
آهک	۲۲۷	۴۵
	۲۳۹	۵۲
	۲۲۶	۵۷
ریولیت	۲۰۲	۴۱
	۱۹۶	۴۲
	۲۰۶	۴۶
بازالت	۲۴۲	۵۳
	۲۶۱	۷۸
	۲۷۷	۹۳

از جدول ۴ مشاهده می شود که با افزایش مقاومت فشاری سنگ ها، مقدار لنگر پیچشی حاصل از روش پیچش نیز افزایش یافته است.



شکل ۱۱: رابطه نتایج آزمون پیچش با آزمون مغزه گیری



شکل ۱۰: نتایج انجام آزمون پیچش روی سنگ ها

۲-۳ تخمین مقاومت فشاری ملات ها

نتایج حاصل از آزمون "پیچش" با مقاومت فشاری ملات تعمیراتی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز در جدول ۵ نشان داده شده است.

با توجه به نتایج ذکر شده در جدول ۴، رابطه بین مقاومت فشاری سنگ ها با نتایج حاصل از روش پیچش در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. از شکل ۱۱ مشاهده می شود که یک رابطه توانی مابین مقاومت فشاری سنگ ها با نتایج به دست آمده از آزمون پیچش وجود دارد که برابر است با $y = 27.878x^{0.52}$. مطابق شکل ۱۱ ضریب تعیین برابر ۰/۸۸ و ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۴ می باشد. در نتیجه می توان با استفاده از آزمون پیچش به صورت درجا و با دقت بالا مقاومت فشاری سنگ ها را اندازه گیری نمود.

جدول ۵: نتایج حاصل از آزمون "پیچش" و مقاومت فشاری ملات (مگاپاسکال)

روش آزمایش	۷ روزه			۲۸ روزه			۹۰ روزه		
	آب	مواد عمل آورنده	فضای آزاد	آب	مواد عمل آورنده	فضای آزاد	آب	مواد عمل آورنده	فضای آزاد
"پیچش"	۶/۰۴	۵/۰۶	۳/۷۷	۷/۵۸	۶/۲۳	۴/۷۵	۹/۸	۷/۸	۵/۶
"مقاومت فشاری"	۳۴/۱	۳۰/۲	۲۰/۹	۴۷/۶	۴۰/۹	۲۸/۶	۵۴/۴	۴۵/۱	۳۲/۱

طی گذشت زمان، مقاومت کمتری کسب نموده اند که به علت خروج رطوبت از داخل ملات و ناقص بودن فرآیند هیدراسیون در داخل آن می باشد. مقاومت های به دست آمده از روش "پیچش" نیز با گذشت زمان دارای روند افزایشی می باشند. در شکل ۱۲ رابطه بین نتایج حاصل از آزمون "پیچش" با مقاومت فشاری ملات نشان داده شده است.

از جدول ۵ مشاهده می شود مقاومت فشاری ملات تعمیراتی عمل آوری شده با آب و با مواد عمل آورنده از ۷ تا ۹۰ روز به ترتیب ۱/۶ و ۱/۴۹ برابر شده است. به عبارتی عمل آوری باعث افزایش مقاومت فشاری ملات تعمیراتی شده که علت آن تکمیل فرآیند هیدراسیون سیمان در داخل ملات به دلیل جلوگیری نمودن از خارج شدن رطوبت داخل ملات می باشد. اما نمونه های رها شده در فضای آزاد،

توف سبز سنگی و تعدادی ملات های تعمیری شده است. همچنین مقاومت فشاری مصالح مذکور با استفاده از آزمون های استاندارد نیز تعیین شده و نتایج حاصله با نتایج به دست آمده از روش پیچش مقایسه گردیده است. نتایج به دست آمده عبارتند از:

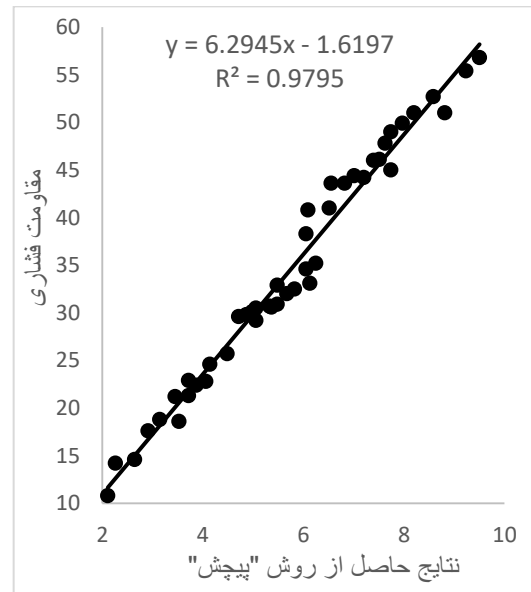
- با توجه به نتایج حاصله مشاهده می شود که با افزایش مقاومت فشاری سنگ ها، مقدار لنگر پیچشی حاصل از روش پیچش نیز افزایش یافته است. که نشانگر رابطه ای بین این دو آزمون می باشد.
- رابطه توانی $y = 27.87x^{0.52}$ مابین مقاومت فشاری سنگ ها با نتایج به دست آمده از آزمون پیچش وجود دارد که با توجه به ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۴ می توان با استفاده از آزمون پیچش به صورت درجا و با دقت بالا مقاومت فشاری سنگ ها را اندازه گیری نمود.

- با توجه به ضریب بالای همبستگی بین مقاومت فشاری ملات تعمیری با نتایج حاصل از روش "پیچش"، می توان برای بدست آوردن مقاومت فشاری ملات ها، از روش دقیق و درجای "پیچش" با معادله $y = 6.294x - 1.619$ استفاده نمود.

- با عنایت به دایره موهر تنش دیده می شود که تنش های برشی، فشاری و کششی حداکثر، هر سه مقداری برابر شعاع دایره موهر دارا می باشند. همچنین تنش های اصلی کششی و فشاری با افق زاویه ۴۵ درجه می سازند. مواد ترد مانند سنگ دارای شکست کششی است و صفحات شکست در این حالت، عمود بر راستای کششی ظاهر می گردند. لذا در آزمون پیچش، شکست نمونه ها با زاویه ۴۵ درجه رخ داده است.

۴- منابع

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>, (2019).
 [6] Kahraman S, Fener M, Kilic CO .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>, (2016).
 [7] Kumar R, Bhargava K, Choudhury D .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), (2017).
 [8] ASTM C1583/C1583M-13. Standard Test Method



شکل ۱۲: رابطه مقاومت فشاری ملات تعمیری با نتایج حاصل از آزمون "پیچش" (مگاپاسکال)

از شکل ۱۲ مشاهده می شود مقاومت فشاری ملات تعمیری با نتایج حاصل از آزمون "پیچش" دارای ضریب تعیین و ضریب همبستگی به ترتیب برابر ۰/۹۷ و ۰/۹۸ می باشد. با توجه به ضریب همبستگی بالای بین نتایج حاصل از آزمون "پیچش" و مقاومت فشاری می توان با استفاده از آزمون پیچش به صورت درجا، مقاومت فشاری ملات های تعمیری را تعیین نمود.

۳- نتیجه گیری

در این مقاله با به کارگیری آزمون نوین و درجای پیچش اقدام به تخمین مقاومت فشاری سنگ های مختلف با نام های گرانیت، تراورتن، مرمریت، ریولیت، اندزیت، توف سبز بلورین، آهک، بازالت،

[1] ACI Committee 214, Report 214.4R-03. Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results, American Concrete Institute, (2003).
 [2] Masi. A., Digrisolo. A., Santarsieo. G. arsihero, "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, (2003).
 [3] ASTM C900-15. Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2015).
 [4] Rabe C, Silva G, Lopes AL, Nunes S, Silva CG . 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), (2018).
 [5] Jalali SH, Heidari M, Zarrinshoja M .Predicting of

- [16] Naderi M. New Twist-Off Method for the Evaluation of In-Situ Strength of Concrete, *Journal of Testing and Evaluation*. 35(6). ISSN: 0090-3973, (2007).
- [17] Naderi. M., Musavi. M. Comparison of In situ Concrete Strength of Structural Elements with Strength of Their Cubic Laboratory Samples Using "Twist-off" Method. *International Conference on Civil Engineering Architecture & Urban Sustainable Development*. (in Persian), (2013).
- [18] Naderi. M., SheikhAleslami. A., Mohsenzadeh. R. Case studies to determine the concrete strength of damaged structures using in situ methods. *National Conference on Transport Infrastructure*, (2012).
- [19] ASTM C136. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials, (2006).
- [20] 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).
- [21] British Standard Institution, method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cores, BSI 1881: Part 120: 1983, (2008).
- [22] ACI Committee 318, Report 318R-19. *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. American Concrete Institute, (2019).
- 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, (2013).
- [9] M.H.F. 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, (2012).
- [10] ASTM C597-16. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2016).
- [11] ASTM C808/C805M-18. Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2018).
- [12] Naderi M. Friction-transfer test for the assessment of in situ strength and adhesion of cementitious materials. *Constr. Build. Mater* 19:454-459, (2005).
- [13] Saberi Varzaneh A, Naderi M. 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).
- [14] Saberi Varzaneh A, Naderi M. 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>, (2020).
- [15] Saberi Varzaneh A, Naderi M. 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/0.22075/mac.2021.20231.1251>, (2021).