

# بررسی پایایی بتن‌های خودمتراکم ساخته شده از سنگ‌دانه‌های مختلف تحت اثر محیط سولفات با استفاده از آزمون «پیچش»

محمود نادری (استاد)

ابوالفضل رشوند آوه (کارشناس ارشد)

علی صابری ورزیه\* (دکتری)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۴۰۱ (۳۸-۲، شماره ۱/۱، ص. ۵۹-۶۳)، پژوهشی

در نوشتار حاضر، با توجه به نبود اطلاعات مرتبط با تأثیر مقاومت سنگ‌دانه‌ها در عملکرد بتن خودمتراکم، تأثیر نوع و مقاومت آنها در دوام بتن خودمتراکم در مقابل سولفات سدیم ارائه شده است. برای ساخت بتن‌ها از ۹ نوع سنگ مختلف استفاده شده است. نتایج به دست آمده، بیان‌گر رابطه‌ی مستقیم بین مقاومت سنگ مادر با مقاومت بتن خودمتراکم ساخته شده با سنگ مذکور در آب و محلول سولفات سدیم است. ضریب همبستگی بالایی بین نتایج آزمون «پیچش» با آزمون «مغزه‌گیری» به دست آمد، که می‌توان برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری سنگ‌ها از آزمون «پیچش» با اطمینان بالا استفاده کرد. مقاومت فشاری سنگ‌های: توف سبز بلورین، توف سبز، اندزیت، ریولیت، تراورتن، آهک، مرمریت و گرانیت به ترتیب برابر ۳۱/۷۶، ۳۳/۱۲، ۳۹/۹۲، ۴۳/۱۴، ۴۸/۴۱، ۵۱/۹۷، ۵۹/۶۶ و ۶۲/۱۷ مگاپاسکال بوده است. با افزایش مقاومت فشاری، نتایج آزمون پیچش نیز افزایش داشته است، به طوری که برای سنگ‌های مذکور به ترتیب برابر: ۱۷۶/۳، ۱۵۵/۹، ۱۸۸/۵، ۲۰۳/۴، ۲۰۳/۴، ۲۳۱/۴، ۲۴۰/۷ و ۲۴۶/۱ نیوتن - متر به دست آمده است. در ضمن سنگ‌های با درصد جذب آب بالاتر، با تغییرات کمتری از نظر حجم نمونه مواجه بوده‌اند.

profm Mahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir  
rashvand-a@edu.ikiu.ac.ir  
ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir

واژگان کلیدی: سولفات سدیم، آزمون «پیچش»، سنگ مادر، بتن خودمتراکم، دوام.

## ۱. مقدمه

خرابی و تخریب بتن می‌شود.<sup>[۱-۳]</sup> برخی از پژوهشگران روی اثر خاکستر بادی در مقاومت فشاری بتن و ملات در برابر حمله‌ی سولفات مطالعه و اشاره کرده‌اند که با استفاده از مقدار کافی خاکستر بادی، می‌توان به طور مؤثر مقاومت بتن را در برابر حمله‌ی سولفات‌ها افزایش داد.<sup>[۴]</sup>

نای<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۴)، در مطالعه‌ی خود مشاهده کردند که مواد افزودنی معدنی، مانند خاکستر بادی یا مواد افزودنی اضافی می‌توانند در بتن حاوی سیمان پرتلند استفاده شوند و برای بهبود دوام بتن مانند مقاومت در برابر سولفات‌ها مفید باشند.<sup>[۵]</sup> سولفات منیزیم از دیگر سولفات‌ها مضرتر است، زیرا فقط با آلومینات کلسیم هیدراته واکنش نمی‌دهد، بلکه در عین حال باعث می‌شود که سیلیکات‌های کلسیم هیدراته کاملاً تجزیه و به یک توده‌ی ترک‌خورده تبدیل شوند.<sup>[۶]</sup>

بنلی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۷)، در مطالعه‌ی روی مقاومت فشاری ملات‌های خودمتراکم حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد خاکستر بادی مشاهده کردند که افزایش مقدار خاکستر بادی باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود، اما مقاومت ملات در برابر حمله‌ی سولفات‌ها افزایش می‌یابد.<sup>[۸]</sup> صمیمی و شیرزادی (۲۰۲۰)، در بررسی تأثیر سولفات‌ها

در بسیاری از مناطق ایران و به خصوص در مناطق جنوبی کشور، که بتن در معرض آب دریا قرار دارد، سولفات‌ها از عوامل اصلی مخرب بتن هستند. از عوامل اصلی مربوط به دوام بتن می‌توان به نوع مصالح، ساختار بتن، تراکم، پرداخت و عمل‌آوری اشاره کرد. تراکم نامناسب بتن به دلیل ویریه‌ی غیرقابل قبول در قسمت‌های محدود بین قالب‌ها و میلگردها به عنوان یکی از عوامل اصلی پایایی کم سازه در معرض حمله‌ی سولفات‌هاست.

حمله‌ی سولفات‌ها به بتن یک فرایند پیچیده است و عوامل فراوانی می‌توانند در مقاومت به سولفات تأثیر بگذارند، مانند: نوع سیمان، نوع کاتیون سولفات و مدت زمان قرار گرفتن در معرض حمله‌ی سولفات‌ها. به طور کلی حمله‌ی سولفات‌ها باعث می‌شود که یون‌های سولفات با هیدروکسید کلسیم و آلومینات کلسیم هیدراته شده واکنش نشان دهند و تبدیل به اترینگایت شوند، که باعث انقباض، ترک‌خوردگی،

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۲۰۲۰/۲۵، اصلاحیه ۱۴۰۰/۸/۴، پذیرش ۱۴۰۰/۸/۱۷

DOI:10.24200/J30.2021.58151.2951

در بتن خودتراکم دریافتند که افزودن ژئولیت در مقایسه با متاکائولین به ترتیب باعث افزایش ۱ و ۵ برابری مقاومت بتن در برابر حملات یون‌های کلرید و سولفات‌منیزیم می‌شود.<sup>[۹]</sup>

در کل با بررسی مطالعات پیشین مشاهده می‌شود که آسیب ناشی از واکنش‌های اجزاء بتن همراه با سولفات‌ها، شامل: پوسته‌پوسته شدن، لایه‌لایه شدن، ترک خوردگی بزرگ و احتمالاً از بین رفتن انسجام است. در بسیاری از نوشتارهای پژوهشی، خراب شدن بتن در محیط سولفات‌ها به عنوان دو پدیده، طبقه‌بندی شده‌اند: حمله‌ی شیمیایی سولفات‌ها یا حمله‌ی فیزیکی سولفات‌ها. در برخی موارد نیز حمله‌ی سولفات‌ها به دو دسته‌ی آسیب‌های داخلی و خارجی طبقه‌بندی می‌شود.<sup>[۱۰-۱۲]</sup>

از آن‌جا که بخش عمده‌ی از کیفیت بتن به اجزاء متشکله‌ی آن بستگی دارد، نوع سنگ‌دانه‌ها که بیشترین حجم بتن را تشکیل می‌دهند، اهمیت ویژه‌ی دارند. به همین دلیل، بررسی تأثیر ترکیب‌های بتن، مانند سنگ‌دانه‌ها در خواص مکانیکی و دوام آن، اهمیت بسیاری دارد. سنگ‌دانه‌ها بین ۶۰ تا ۸۰ درصد از حجم بتن را تشکیل می‌دهند. سنگ‌دانه‌ها مهم‌ترین عامل مؤثر در مقاومت بتن در نظر گرفته می‌شوند. علاوه بر این، سنگ‌دانه‌ها باعث افزایش طول جریان سیال از طریق ریزساختار بتن و قطع اتصال‌های منافذ در شبکه‌ی مورگی خمیر سیمان می‌شوند. البته، در هنگام انجام آزمون مقاومت فشاری، شکستگی معمولاً در سطح مشترک بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه رخ می‌دهد. از این رو، مقاومت بالقوه‌ی سنگ‌دانه‌ها کاملاً به مقاومت بتن کمک نمی‌کنند.<sup>[۱۳-۱۸]</sup>

نوشتارهای منتشر شده در گذشته نشان می‌دهند که سنگ‌دانه‌ها تأثیرات زیادی را در مشخصات مکانیکی بتن دارند. در برخی پژوهش‌ها مشاهده شد که اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ها، تأثیر فراوانی در مقاومت بتن‌های متخلخل دارد. با این حال، سنگ‌دانه‌های بزرگ‌تر از ۷ میلی‌متر به طور قابل توجهی در مقاومت فشاری بتن تأثیر نمی‌گذارند.<sup>[۱۹-۲۰]</sup> فابین<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۲)، گزارش کردند که با افزایش اندازه‌ی متوسط سنگ‌دانه‌ها، مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد.<sup>[۲۱]</sup> عبداللهی (۲۰۱۲)، نیز برای روند مقاومت نمونه‌های بتنی حاوی کوارتز، گرانیت و ماسه‌ی رودخانه‌ی یک مدل خطی ارائه کرده است.<sup>[۲۲]</sup> همچنین نتایج منتشر شده‌ی تی‌سادو<sup>۴</sup> (۲۰۱۳)، نشان می‌دهد که سنگ‌دانه‌های گرانیت، بتنی با مقاومت بالاتر از سنگ‌دانه‌های مرمر تولید می‌کنند.<sup>[۲۳]</sup> علاوه بر این، مطالعات وو<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۱) نشان داد که نوع سنگ‌دانه، تأثیر بیشتری در مقاومت فشاری بتن‌های با مقاومت بالا نسبت به بتن‌های با مقاومت معمولی دارد.<sup>[۲۴]</sup> لیو<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، در خصوص تأثیر سنگ‌دانه‌های سولفاتی و محیط‌های خورنده روی مقاومت فشاری بتن‌ها مشاهده کردند که استفاده از سنگ‌دانه‌های سولفات‌ها در محیط ناسالم باعث کاهش بیش از ۱۰٪ مقاومت فشاری خواهد شد.<sup>[۲۵]</sup> نتیج<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۷)، در بررسی تأثیر خرده‌های سنگ مرمر و کاشی در بتن خودتراکم دریافتند که با افزایش فشردگی و کاهش اتصال بین منافذ، نفوذ سولفات‌ها به داخل بتن کاهش می‌یابد.<sup>[۲۶]</sup> شربتدار و حبیبی (۲۰۱۸)، نیز در مطالعه‌ی خود به این نتیجه رسیدند که مقاومت فشاری بتن در مقدار تأثیر سولفات‌ها مؤثر است، به گونه‌ی که بتن با مقاومت فشاری ۲۰ مگاپاسکال، با افزایش غلظت محلول سولفات دچار کاهش مقاومت می‌شود؛ اما بتن‌های با مقاومت ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال، ابتدا دچار افزایش مقاومت و سپس دچار کاهش می‌شوند.<sup>[۲۷]</sup>

در پژوهش حاضر، تأثیر نوع و مقاومت سنگ‌دانه‌ها در دوام بتن خودتراکم در مقابل سولفات‌سدیم ارائه شده است. برای ساخت بتن‌ها از سنگ‌های: گرانیت، مرمریت، اندزیت، ریولیت، تراورتن، آهک، توف سنگی، توف سبز بلورین و بازالت استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری سنگ‌ها از آزمون‌های

«پیش»<sup>[۲۸]</sup> و «مغزه‌گیری»<sup>[۲۹]</sup> استفاده شده است. آزمایش‌ها در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز انجام شده است. در برخی مطالعات پیشین از آزمون «پیش» برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن‌های معمولی و الیافی،<sup>[۳۰]</sup> ملات‌های معمولی و الیافی،<sup>[۳۱]</sup> و ملات‌های اصلاح شده با پلیمر،<sup>[۳۲]</sup> استفاده شده است.

## ۲. کارهای آزمایشگاهی

### ۲.۱. مصالح مصرفی

شن و ماسه‌ی مورد نیاز پژوهش حاضر به صورت قطعه‌سنگ‌ها از مناطق مختلف اطراف شهرستان قزوین تهیه و در محل آزمایشگاه به شن و ماسه با دانه‌بندی مورد نظر تبدیل شده‌اند. انواع مختلف سنگ‌دانه‌های استفاده شده در شکل ۱ مشاهده می‌شود. دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها، مطابق با استاندارد ASTM C۱۳۶-۰۱،<sup>[۳۵]</sup> انجام شده است.

برای این که بتوان مقدار آب خالص بتن را کنترل و وزن دقیق سنگ‌دانه‌ها و آب را در هر مخلوط بتن تعیین کرد، با استفاده از استانداردهای ASTM C۷۸<sup>[۳۶]</sup> و ASTM C۱۲۷،<sup>[۳۸]</sup> مقدار جذب آب سنگ‌دانه‌ها و چگالی آنها تعیین شده است.

در جدول ۱، نیز وزن اشباع با سطح خشک، وزن خشک، حجم اشباع با سطح خشک، چگالی و جذب آب تمامی سنگ‌دانه‌های به کار رفته در پژوهش حاضر ارائه شده است.

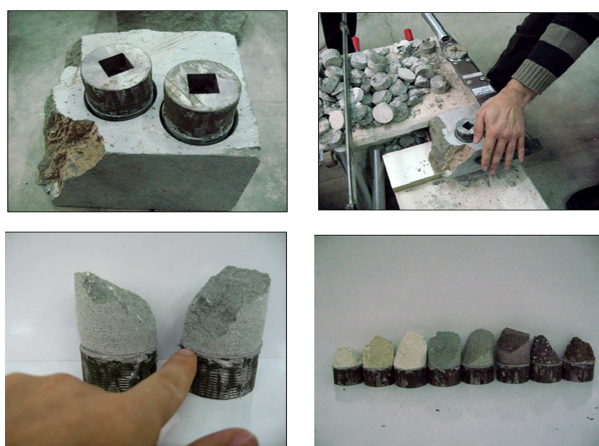
سیمان استفاده شده، سیمان پرتلند تیپ II محصول کارخانه‌ی آبیگ بوده است. قطر بزرگ‌ترین سنگ‌دانه‌ی مصرفی با توجه به ابعاد قالب مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری، برابر ۹/۵ میلی‌متر انتخاب شده است. آب استفاده شده، آب شرب شهر قزوین بوده است. با توجه به ثابت بودن نسبت آب به سیمان جهت به دست آوردن اسلامپ مورد نیاز از نسبت‌های متفاوت فوق روان‌کننده‌ی محصول شرکت نامیکاران قزوین استفاده شده است. به منظور حفظ یک‌پارچگی بتن و جلوگیری از جداسدگی در بتن (شیره دادن بتن) از خاکستر بادی محصول شرکت نامیکاران استفاده شده است. سولفات‌سدیم در بسته‌های یک کیلوگرمی به صورت پودر جامد تهیه و به میزان ۱۸ گرم بر لیتر در تهیه‌ی محلول سولفات‌سدیم استفاده شده است. به منظور تعیین وزن



شکل ۱. شکل سطحی سنگ‌دانه‌های شکسته شده در آزمایشگاه.

جدول ۱. چگالی و جذب آب سنگ دانه‌ها.

نوع سنگ مادر	وزن اشباع با سطح خشک (gr)	وزن خشک (gr)	حجم اشباع با سطح خشک (cm <sup>3</sup> )	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	جذب آب (%)
گرانیت	۵۴۸/۲	۵۴۶	۲۰۸/۸	۲/۶۱۵	۰/۴۰۳
مرمریت	۶۲۱/۸	۶۱۵/۸	۲۳۶/۷	۲/۶۱۰	۰/۱۶۲
اندزیت	۵۸۸/۱	۵۸۶/۸	۲۱۹/۹	۲/۵۴۵	۱/۶۶۴
ریولیت	۴۰۳/۳	۳۹۰	۱۵۰/۴	۲/۵۹۳	۲/۳۶۰
توف سبز بلورین	۶۲۱/۴	۶۰۶	۲۴۲/۸	۲/۴۹۵	۲/۵۴۱
توف سبز سنگی	۴۶۷/۲	۴۴۱/۵	۱۹۸/۷	۲/۲۲	۵/۸۲۱
تراورتن	۶۸۷/۷	۶۷۷/۲	۲۶۷/۱	۲/۵۳۵	۱/۵۵۱
آهک	۶۲۰/۸	۶۱۵/۵	۲۳۴	۲/۶۳۰	۰/۸۶۱
بازالت	۶۱۲/۱	۶۰۸/۷	۲۲۸	۲/۶۲۰	۰/۵۵



شکل ۲. نحوه‌ی انجام آزمون «پیچش».

حالت خشک، مقادیر مقاومت را معمولاً ۱۰٪ بیشتر از حالتی که مغزه در حالت تر آزمایش می‌شود، به دست می‌دهد. برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها از یک فشاری هیدرولیکی با دقت ۱/۰ تن استفاده شده است. قالب‌های استفاده شده از نوع فلزی معمولی به ابعاد ۱۰۰ × ۱۰۰ × ۱۰۰ میلی‌متر بوده است. نمونه‌های بتنی در هر دو محلول سولفات سدیم و آب شرب در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز تحت آزمایش تعیین مقاومت فشاری قرار گرفتند.

### ۳.۲. ساخت نمونه‌ها

عوامل تأثیرگذار در حمله‌ی سولفات و کسب مقاومت به صورت عمده عبارت‌اند از: نسبت آب به سیمان، نوع سیمان و ترکیب دانه‌بندی. لذا به منظور کمیته‌سازی تأثیر عوامل در نتایج آزمایش‌ها سعی در انتخاب طرح اختلاطی بوده است، که با ثابت بودن پارامترهای ذکر شده‌ی اخیر، حدود مقرر شده در آزمایش‌های بتن خودتراکم را تأمین کند. لذا با توجه به تأثیر کم مقدار فوق روان‌کننده بر روی حمله‌ی سولفات‌ها، میزان فوق روان‌کننده بین نمونه‌های مختلف به عنوان متغیر اختیار شده است. نمونه‌های تهیه شده در دو مخزن فلزی، شامل آب شرب و محلول سولفات سدیم به منظور عمل‌آوری قرار داده شدند. طرح‌های اختلاط استفاده شده در جدول ۲ ارائه شده است.

مخلوط‌های تهیه شده از هر نمونه در قالب‌های فلزی، بدون هرگونه عمل ویریه

نمونه‌ها از ترازوی با دقت ۱/۰ گرم و برای تعیین حجم نمونه‌ها از دستگاه ارشمیدس استفاده شده است.

برای تعیین حجم و وزن نمونه‌ها، ابتدا نمونه‌های مورد نظر به مدت ۲۴ ساعت در محلول سولفات عمل‌آوری شدند تا نمونه‌ها، حالت اشباع داشته باشند. سپس وزن نمونه‌ها در حالت با سطح خشک با استفاده از ترازوی با دقت ۱/۰ گرم و سپس حجم ظاهری آنها با استفاده از دستگاه ارشمیدس تعیین شده است. مراحل اخیر، هر دو روز خوانده و میزان تغییرات وزن و حجم نمونه‌ها یادداشت شده‌اند.

## ۲.۲. روش‌های آزمایشگاهی

### ۲.۲.۱. آزمون «پیچش»

آزمون «پیچش»، یک روش دقیق با کاربری وسیع در تعیین مقاومت مصالح هم در آزمایشگاه و هم در محل سازه است و به عنوان روشی سریع، دقیق و کم‌هزینه با خرابی جزئی، در قلمرو آزمون‌های نیمه‌مخرب محسوب می‌شود. جذابیت روش مذکور در دقت، سرعت انجام، سادگی، خرابی جزئی و هزینه‌ی اندک انجام آن است، که آن را در مقایسه با سایر آزمون‌های درجا، متمایز ساخته است. آزمون «پیچش»، در حالت‌های افقی، قائم و به طور کلی بر روی هر سطح صافی، به سادگی و بدون نیاز به برنامه‌ریزی قبلی انجام پذیر است. ابزار استفاده شده در آزمون «پیچش»، بسیار ساده و قابل دسترس است و انجام آزمون نیاز به مهارت قبلی ندارد.

روش آزمون «پیچش»، مطابق شکل ۲، بر این اساس استوار است که استوانه‌ی فلزی به قطر ۴۰ و ارتفاع ۲۵ میلی‌متر، توسط ماده‌ی چسباننده، که معمولاً یک سیستم اپوکسی دو قسمته است، بر روی محل آزمون چسبانده می‌شود. سپس توسط یک پیچش‌سنج دستی معمولی، گشتاور پیچشی مستقیماً به دستگاه استوانه‌ی مذکور اعمال می‌شود و به طور پیوسته و یکنواخت تا لحظه‌ی گسیخته شدن جسم مورد آزمون از سطح زیرین استوانه، افزایش می‌یابد تا شکست رخ دهد.

### ۲.۲.۲. آزمون «مغزه‌گیری»

مقاومت فشاری بتن و سنگ را می‌توان با استفاده از مغزه‌گیری جسم مورد نظر مستقیماً اندازه‌گیری کرد. مغزه‌های مذکور اغلب توسط دستگاه مت‌الماسه گرفته می‌شود. به این ترتیب یک نمونه‌ی استوانه‌ی حاصل می‌شود، که سطح انتهایی آن تخت و تراز نیست. مغزه‌ها باید کلاک‌گذاری شوند<sup>[۳۷، ۳۸]</sup> و در محیطی مرطوب تحت آزمایش فشاری قرار گیرند؛ و یا بنا بر آنچه دستورالعمل ACI 318<sup>[۳۹]</sup> توصیه می‌کند، در حالت خشک آزمایش شوند. مطالعات نشان می‌دهد که آزمایش در

جدول ۲. طرح اختلاط بتن‌های خودتراکم ساخته شده از سنگ‌های مختلف (کیلوگرم بر مترمکعب).

نوع سنگ	سنگ‌دانه (Kg/m <sup>۳</sup> )	سیمان (Kg/m <sup>۳</sup> )	خاکستر بادی (Kg/m <sup>۳</sup> )	فوق‌روان‌کننده (Kg/m <sup>۳</sup> )	آب (Kg/m <sup>۳</sup> )	نسبت آب به سیمان	نسبت آب به پودر
ریولیت	۱۶۴۷	۴۵۰	۱۵۰	۸/۵	۲۳۹	۰/۵۳	۰/۳۹۸
آذرین	۱۶۴۷	۴۵۰	۱۵۰	۱۰	۲۳۹	۰/۵۳	۰/۳۹۸
توف سبز بلورین	۱۶۴۷	۴۵۰	۱۵۰	۸/۵	۲۳۹	۰/۵۳	۰/۳۹۸
توف سبز سنگی	۱۶۴۷	۴۵۰	۱۵۰	۸/۵	۲۳۹	۰/۵۳	۰/۳۹۸
مرمریت	۱۶۴۷	۴۵۰	۱۵۰	۱۰	۲۳۹	۰/۵۳	۰/۳۹۸
گرانیت	۱۶۴۷	۴۵۰	۱۵۰	۹/۳	۲۳۹	۰/۵۳	۰/۳۹۸
تراورتن	۱۶۴۷	۴۵۰	۱۵۰	۸/۵	۲۳۹	۰/۵۳	۰/۳۹۸
آهک	۱۶۴۷	۴۵۰	۱۵۰	۸/۵	۲۳۹	۰/۵۳	۰/۳۹۸
اندزیت	۱۶۴۷	۴۵۰	۱۵۰	۱۰	۲۳۹	۰/۵۳	۰/۳۹۸

جدول ۳. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های بتن تازه.

نوع سنگ‌دانه‌ی بتن	جریان اسلامپ mm	زمان جریان اسلامپ تا قطر ۵۰ سانتی‌متر (s)	زمان تخلیه‌ی بتن پس ۱۰ ثانیه (s)	زمان تخلیه‌ی بتن پس از ۶۰۰ ثانیه (s)
بازالت	۵۹/۵	۵	۲۱/۵	۳۰/۴
گرانیت	۶۶	۴	۱۳/۴	۱۹/۱
مرمریت	۶۴/۵	۴/۲	۱۱/۵	۱۸/۹
تراورتن	۶۱/۷	۴/۵	۱۷/۱	۲۲/۵
اندزیت	۶۳/۵	۴/۳	۱۶/۳	۲۲/۶
توف سبز بلورین	۶۷	۴	۱۵/۶	۲۱/۵
توف سبز سنگی	۶۵	۴	۱۶/۳	۲۰/۲
آهک	۶۲	۴/۵	۱۵/۶	۱۹/۲
ریولیت	۶۱	۴/۸	۱۶	۲۲

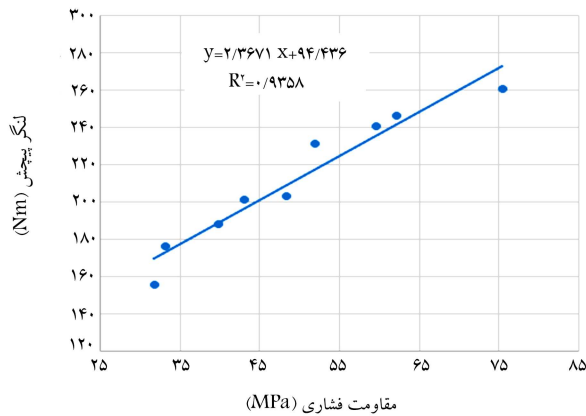
### ۳. نتایج به دست آمده و تحلیل آنها

#### ۱.۳. مقاومت فشاری سنگ‌ها

در شکل ۳، مقاومت فشاری سنگ‌های مختلف حاصل از آزمون مغزه‌گیری مشاهده می‌شود، که مطابق آن بیشترین مقاومت فشاری مربوط به سنگ بازالت و کمترین مقاومت فشاری برای سنگ توف به دست آمده است. نسبت مقاومت فشاری دو سنگ مذکور برابر است با ۲/۳۷ بوده است. مقاومت فشاری سنگ‌ها به ترتیب از زیاد به کم برای سنگ‌های: بازالت، گرانیت، مرمریت، آهک، تراورتن، ریولیت، اندزیت، توف سبز و توف سبز بلورین بوده است. در بخش‌های بعدی، ارتباط بین مقاومت سنگ‌ها با مقاومت فشاری بتن‌های خودتراکم بررسی شده است. در شکل ۴، نیز مقاومت سنگ‌های مختلف حاصل از آزمون پیش‌ش مشاهده می‌شود، که مطابق آن، بیشترین مقاومت حاصل از آزمون پیش‌ش مربوط به سنگ بازالت و کمترین مقاومت برای سنگ توف به دست آمده است. نسبت مقاومت دو سنگ اخیر برابر است با ۱/۶۷ بوده است. مقاومت سنگ‌ها حاصل از آزمون پیش‌ش به ترتیب از زیاد به کم برای سنگ‌های: بازالت، گرانیت،

کردن ریخته شدند. از هر طرح اختلاط، سه نمونه برای نگهداری در محلول سولفات و سه نمونه برای عمل‌آوری در آب شرب تهیه و انجام آزمایش‌ها در سنین ۰،۷ و ۱۴ و ۲۸ روز انجام شده است.

نتایج حاصل از آزمایش جریان اسلامپ، زمان جریان اسلامپ تا ۵۰ سانتی‌متر و آزمایش V Funnel به دست آمده از بتن‌های ساخته شده از نمونه‌های سنگ‌های مختلف در جدول ۳ ارائه شده است.<sup>[۴۰]</sup> از آن‌جا که منظور از انجام پروژه‌ی حاضر، مقایسه بین بتن‌های ساخته شده با سنگ‌دانه‌های مختلف است، لذا سعی بر آن بوده است تا عوامل تأثیرگذار در مقاومت و تراکم بتن برای تمامی بتن‌ها ثابت نگه داشته شود. سنگ‌دانه‌ها با توجه به شکل و بافت سطحی خود، رفتارهای متفاوتی در آزمایش اسلامپ نشان می‌دهند. زمان آزمایش اسلامپ برای تمامی نمونه‌ها در زمان ۴۰ ثانیه پس از اتمام عمل اختلاط انجام شده است. در این مرحله، مخروط اسلامپ بدون هرگونه لغزشی به صورت قائم برداشته شده و زمان با استفاده از کرنومتر اندازه‌گیری شده است. همچنین در پیچه‌ی دستگاه V Funnel بدون هرگونه لغزشی به صورت قائم برداشته شده است.

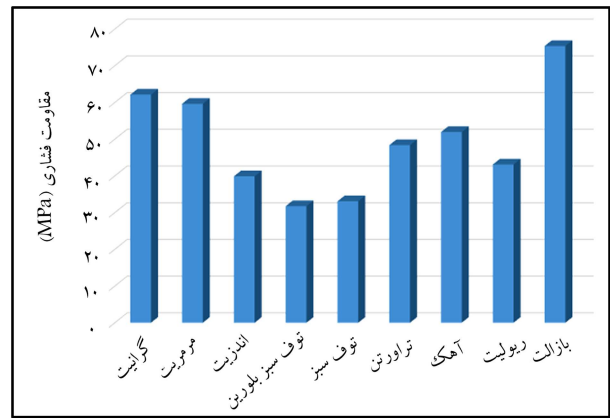


شکل ۵. رابطه‌ی نتایج حاصل از آزمون پیچش با آزمون مغزه‌گیری.

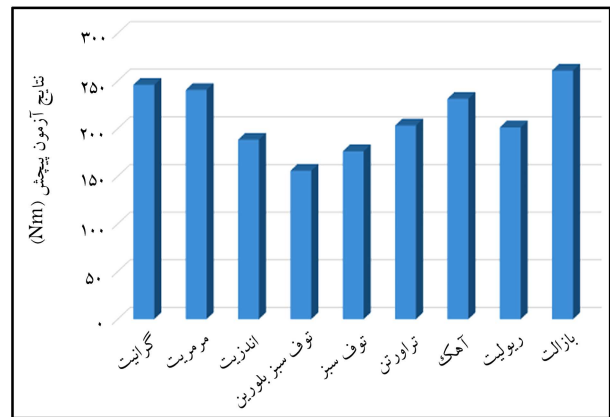
مطابق شکل ۵، ضریب تعیین برابر با ۹۳/۵٪ است. در نتیجه می‌توان با استفاده از آزمون پیچش به صورت درجا، مقاومت فشاری انواع سنگ‌ها را مشخص کرد. برای نشان دادن کاربردهای وسیع آزمون پیچش، مقاومت فشاری ملات‌های سیمانی با استفاده از جک بتن شکن و آزمون پیچش مورد مقایسه قرار گرفت و همبستگی بین نتایج ارائه شد. مقاومت فشاری ملات‌ها در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۴۲ و ۹۰ روز مورد بررسی قرار گرفت. مقاومت فشاری ملات‌ها در سنین مذکور به ترتیب برابر ۲۳/۳، ۳۴/۱، ۴۷/۶، ۵۱/۲ و ۵۴/۴ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از آزمون پیچش در سنین فوق به ترتیب برابر است با ۴/۶، ۶/۶، ۸/۵، ۸/۹ و ۹/۷ مگاپاسکال است. با مقایسه نتایج ملاحظه می‌شود که ضریب همبستگی بین نتایج بالای ۹۵ درصد است که نشان از دقت بالای آزمون پیچش برای ارزیابی مقاومت فشاری مصالح سیمانی است.

### ۲.۳. تأثیر سولفات سدیم

در جدول ۵، مقاومت فشاری بتن‌های خودمتراکم ساخته شده از سنگ‌های مختلف در شرایط عمل‌آوری در آب و در محلول سولفات سدیم مشاهده می‌شود، که مطابق آن بتن عمل‌آوری شده در محلول سولفات در برخی نمونه‌ها در سنین اولیه نه فقط کاهش مقاومت از خود نشان نداده است، بلکه مقداری افزایش در مقاومت مشاهده شده است. البته افزایش اخیر با گذشت زمان کاهش یافته است، که یک دلیل آن را می‌توان رسوب محلول سولفات و یا کریستاله شدن سولفات سدیم در نمونه دانست، که در سنین کم باعث پر شدن منافذ و در نتیجه تولید جسمی متراکم‌تر می‌شود. بیشترین تأثیر سولفات در بتن‌های خودمتراکم ساخته شده از سنگ بازالت بوده است، به گونه‌ی که مقاومت فشاری ۷ روزه بتن خودمتراکم عمل‌آوری شده در آب برابر ۲۶/۴ مگاپاسکال بوده است. در صورتی که مقاومت فشاری همین بتن در سولفات سدیم برابر ۱۹/۵ مگاپاسکال بوده است، که باعث کاهش حدود ۲۶٪ در مقاومت فشاری شده است. همچنین بتن خودمتراکم ساخته شده با سنگ توف سبز نیز در همی سنین بر اثر تأثیر سولفات سدیم دچار کاهش مقاومت فشاری شده است. به گونه‌ی که مقاومت فشاری بتن خودمتراکم ساخته شده با سنگ توف سبز در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ به ترتیب برابر ۲۳/۹، ۳۶/۷ و ۴۱/۱ مگاپاسکال بوده است. در صورتی که مقاومت فشاری همین بتن در معرض سولفات در سنین فوق به ترتیب برابر است با ۲۲/۸، ۳۴/۹ و ۳۷/۶ مگاپاسکال بوده است. به عبارتی، سولفات سدیم باعث کاهش مقاومت فشاری بتن‌های خودمتراکم ساخته شده با سنگ توف سبز در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ به ترتیب به مقدار ۴/۷، ۱/۴ و ۸/۶ درصد شده است.



شکل ۳. مقاومت فشاری مغزه‌های سنگ‌های مختلف، شکسته شده با جک فشاری.



شکل ۴. مقاومت سنگ‌های مختلف حاصل از آزمون پیچش.

جدول ۴. نتایج حاصل از آزمون پیچش و مغزه‌گیری.

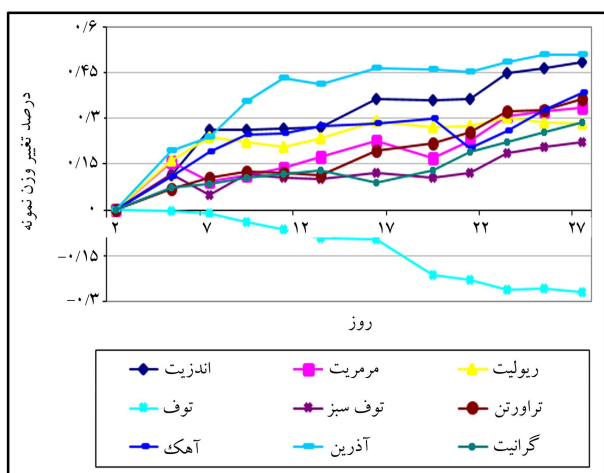
نوع سنگ	مقاومت فشاری (MPa)	لنگر پیچش (N.m)
گرانیت	۶۲/۱۷	۲۴۶/۱
مرمریت	۵۹/۶۶	۲۴۰/۷
اندزیت	۳۹/۹۲	۱۸۸/۵
توف سبز بلورین	۳۱/۷۶	۱۵۵/۹
توف سبز	۳۳/۱۲	۱۷۶/۳
تراورتن	۴۸/۴۱	۲۰۳/۴
آهک	۵۱/۹۷	۲۳۱/۴
ریولیت	۴۳/۱۴	۲۰۱/۳
بازالت	۷۵/۴۱	۲۶۱

مرمریت، آهک، تراورتن، ریولیت، اندزیت، توف سبز و توف سبز بلورین بوده است.

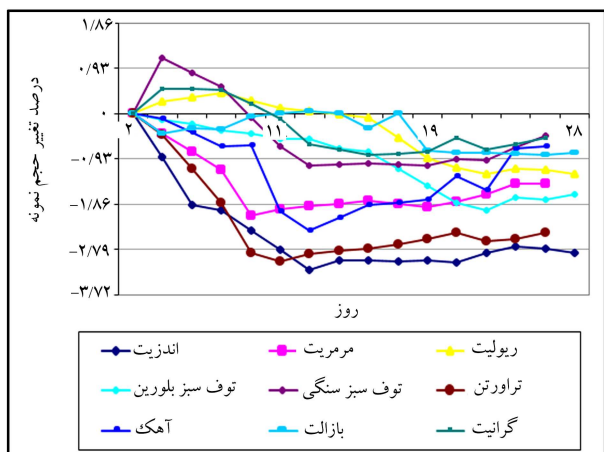
برای مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمون پیچش با آزمون مغزه‌گیری، نتایج عددی در جدول ۴ ارائه شده است، که مطابق آن، رابطه‌ی بین مقاومت فشاری سنگ‌های مختلف با نتایج حاصل از آزمون پیچش، که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، یک رابطه‌ی خطی بین مقاومت فشاری حاصل از آزمون مغزه‌گیری با نتایج حاصل از آزمون پیچش وجود دارد، که برابر است با:  $Y = 2/37X + 94/43$ .

جدول ۵. مقاومت فشاری بتن‌های خودتراکم.

نوع سنگ	بتن عمل‌آوری شده در آب (مگاپاسکال)			بتن عمل‌آوری شده در سولفات (مگاپاسکال)		
	۷ روزه	۱۴ روزه	۲۸ روزه	۷ روزه	۱۴ روزه	۲۸ روزه
ریولیت	۲۴/۴	۳۱/۵	۳۴/۶	۲۵/۵	۳۲/۵	۳۶/۳
مرمریت	۲۶/۲	۳۸/۲	۵۰/۳	۲۷/۴	۳۹/۸	۵۱/۳
توف سبز بلورین	۲۲/۷	۲۹/۳	۳۴/۳	۲۱/۲	۳۰/۲	۳۴/۷
اندزیت	۲۵/۶	۳۹/۲	۴۸/۲	۲۶/۹	۳۸/۸	۴۳/۶
گرانیت	۳۲/۶	۴۱/۶	۵۰/۵	۳۳/۱	۳۸	۵۰/۱
توف سبز سنگی	۲۳/۹	۳۶/۷	۴۱/۱	۲۲/۸	۳۴/۹	۳۷/۶
تراورتن	۲۸/۳	۳۷/۴	۴۳/۳	۳۰/۷	۳۴/۴	۴۳/۲
آهک	۲۹/۴	۴۰/۲	۴۸/۶	۳۱/۴	۴۲/۶	۴۹/۳
بازالت	۲۶/۴	۳۱/۵	۳۵/۸	۱۹/۵	۳۱/۴	۳۶/۹



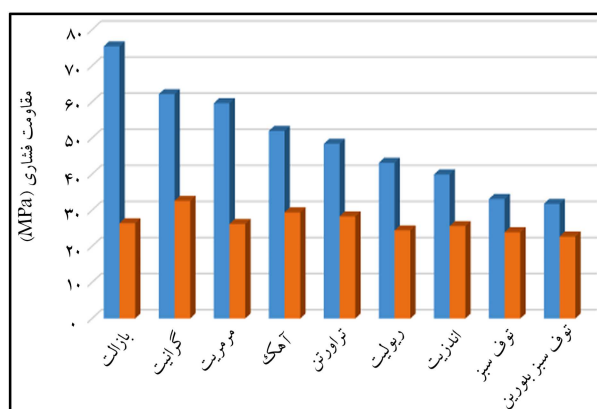
شکل ۷. درصد تغییر وزن نمونه‌های بتن خودتراکم ساخته شده از سنگ‌های مختلف.



شکل ۸. درصد تغییر حجم نمونه‌های بتن خودتراکم ساخته شده از سنگ‌های مختلف.

به ماهیت ورقه‌بندی بودن در هنگام شکستن، مقاومت بتن ساخته شده با آن پایین است و لذا مناسب امر بتن‌سازی نیست.

نتایج حاصل از تغییر وزن شکل ۷ و حجم نمونه‌های بتنی شکل ۸ در محلول



شکل ۶. مقاومت فشاری سنگ‌های مختلف و بتن‌های ساخته شده با همان سنگ‌ها.

علت تأثیر زیاد سولفات در بتن‌های ساخته شده با سنگ توف، به دلیل نفوذپذیری بالای بتن‌های ساخته شده با سنگ توف است،<sup>[۴۱]</sup> که باعث نفوذ سولفات به داخل بتن و دچار واکنش‌های مضر می‌شود. محصول واکنش مذکور، سولفات کلسیم خواهد بود. دو جزء خمیر سیمان یعنی هیدروکسید کلسیم و آلومینات کلسیم هیدراته شده، با یون‌های سولفات محلول واکنش می‌دهند. محصولات جامد واکنش حجم بزرگ‌تری در مقایسه با ترکیب‌های اولیه دارند، به طوری که شکستگی در خمیر سیمان روی می‌دهد. واکنش سولفات سدیم با هیدروکسید کلسیم در معادله‌ی ۱ ارائه شده است:



واکنش از چپ تا راست تا زمانی ادامه می‌یابد که غلظت هیدروکسید سدیم به حدی برسد که واکنش متوقف شود. در صورت تشکیل NaOH بیشتر واکنش از راست به چپ انجام می‌گیرد، که به صورت شوره زدن روی بتن مشاهده می‌شود. در شکل ۶، مقاومت فشاری سنگ‌های مختلف و بتن‌های خودتراکم ساخته شده با سنگ‌های مذکور مشاهده می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود که بیشتر موارد، رابطه‌ی مستقیمی بین مقاومت فشاری سنگ‌ها با مقاومت فشاری بتن‌های خودتراکم ساخته شده با همان سنگ وجود دارد. به عبارتی، با افزایش در میزان مقاومت سنگ دانه، مقاومت بتن نیز افزایش یافته است، اما میزان آن زیاد نیست. البته مشاهده می‌شود که سنگ بازالت، بالاترین مقاومت فشاری را دارد، اما بتن خودتراکم ساخته شده با سنگ بازالت، مقاومت فشاری کمتری نسبت به بقیه‌ی نمونه‌ها دارد. سنگ بازالت با توجه

وجود دو فاز دیگر، یعنی خمیر سیمان و ناحیه‌ی مرزی ضعیف بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه‌ها باشد، که مقاومتی کمتر نسبت به سنگ صخره دارند.

- با افزایش مقاومت فشاری سنگ‌ها، مقاومت فشاری بتن خودمتراکم حاوی سنگ‌دانه‌های همان سنگ نیز افزایش یافته‌اند و بالعکس. بیشترین مقاومت فشاری مربوط به بتن ساخته شده با سنگ گرانیت و کمترین مقاومت فشاری برای بتن حاوی سنگ توف سبز بلورین بوده است.

- با توجه به رابطه‌ی خطی بین مقاومت فشاری حاصل از آزمون مغزه‌گیری با نتایج حاصل از آزمون پیچش، که در رطوبت نسبی حدود ۶۰٪ و دمای حدود ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و با فرض صلب بودن تکیه‌گاه آزمون پیچش و همچنین ضریب تعیین ۹۳/۵٪ انجام شده است، می‌توان با به کارگیری آزمون پیچش، مقاومت فشاری سنگ‌ها را با استفاده از معادله‌ی  $Y = 2/37x + 94/43$  و با اطمینان بالا محاسبه کرد.

- بتن عمل‌آوری شده در محلول سولفات سدیم در برخی نمونه‌ها در سنین اولیه، نه فقط کاهش مقاومت از خود نشان نداده است، بلکه مقداری افزایش در مقاومت نیز مشاهده شده است، که یک دلیل آن را می‌توان رسوب محلول سولفات و یا کریستاله شدن سولفات سدیم در نمونه دانست، که در سنین کم باعث پر شدن منافذ و در نتیجه تولید جسمی متراکم‌تر می‌شود.

- بیشترین تأثیر سولفات در بتن‌های خودمتراکم ساخته شده از سنگ بازالت بوده است، به گونه‌ی که مقاومت فشاری ۷ روزه بتن خودمتراکم عمل‌آوری شده در سولفات باعث کاهش حدود ۲۶٪ شده است.

- نتایج به دست آمده از تعیین مقدار تغییر در وزن و حجم نمونه‌های بتنی خودمتراکم در معرض سولفات سدیم نشان می‌دهد که سنگ‌های با درصد جذب آب بالاتر، با تغییرات کمتری از نظر حجم نمونه مواجه هستند.

سولفات سدیم برای بتن‌های خودمتراکم ساخته شده از سنگ‌های مختلف در ادامه ارائه شده است. آزمایش‌ها به صورت یک روز در میان انجام شده است. سپس درصد تغییرات وزن و حجم نمونه‌ها نسبت به مقادیر اولیه محاسبه و در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شوند.

نتایج به دست آمده از تعیین مقدار تغییر در وزن و حجم نمونه‌ها نشان می‌دهد که سنگ‌های با درصد جذب آب بالاتر، با تغییرات کمتری از نظر حجم نمونه مواجه هستند؛ که یکی از دلایل آن را می‌توان وجود حفره‌های زیاد در سنگ‌دانه‌ها دانست، که با تشکیل محصولات حاصل از کریستاله شدن سولفات، حفره‌های سنگ‌ها پر شده‌اند، در نتیجه تغییرات حجمی با زمان پر شدن این قسمت از بتن، کم است. در مقابل تغییرات وزن نمونه‌ها، نوعی پراکندگی وجود دارد، به طوری که سنگ‌هایی مانند توف سبز، که بیشترین درصد جذب آب را دارند، کمترین تغییر را در وزن نمونه‌ها دارند. میزان تغییرات حجم نمونه‌ها با گذشت زمان افت کرده و در سن ۱۴ روز تقریباً به صورت افقی نمو یافته است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، تأثیر نوع و مقاومت سنگ‌دانه‌ها در دوام بتن خودمتراکم در مقابل سولفات سدیم ارائه شده است. برای ساخت بتن‌ها از سنگ‌های: گرانیت، مرمریت، اندزیت، ریولیت، تراورتن، آهک، توف سبز، توف سبز بلورین و بازالت استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری سنگ‌ها از آزمون‌های «پیچش» و «مغزه‌گیری» استفاده و آزمایش‌ها در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز انجام شده است. با توجه به نتایج حاصل از آزمون‌ها، این نتایج به دست آمده است:

- مقاومت فشاری سنگ‌های صخره از مقاومت فشاری بتن‌های خودمتراکم ساخته شده با سنگ‌دانه‌های همان سنگ‌ها بیشتر بوده است. این رفتار می‌تواند به دلیل

#### پانویس‌ها

1. Nie
2. Benli
3. Fabien
4. Tsado
5. Wu
6. Liu
7. Tennich

#### منابع (References)

1. Liu, G.G., Ming, J., Zhang, X.W. and et al. "Study on the durability of concrete with mineral admixtures to sulfate attack by wet-dry cycle method", *Adv. Mater. Res.*, **295-297**, pp. 165-169 (2011).
2. Zelic, J., Radovanovic, I. and Jozic, D. "The effect of silica fume additions on the durability of Portland cement

mortars exposed to magnesium sulfate attack", *Mater. Technol.*, **41**(2), pp. 91-94 (2007).

3. Kilinckale, F.M. "The effect of MgSO<sub>4</sub> and HCl solutions on the strength and durability of pozzolan cement mortars", *Cem. Concr. Res.*, **27**(12), pp. 1911-1918 (1997).
4. Ghafoori, N., Najimi, M., Diawara, H. and et al. "Effects of class F fly ash on sulfate resistance of type V portland cement concretes under continuous and interrupted sulfate exposures", *Constr. Build. Mater.*, **78**, pp. 85-91 (2015).
5. Nie, Q., Zhou, C., Shu, X. and et al. "Chemical, mechanical, and durability properties of concrete with local mineral admixtures under sulfate environment in Northwest China", *Materials*, **7**(5), pp. 3772-3785 (2014).
6. Acharya, P.K. and Patro, S.K. "Acid resistance, sulphate resistance and strength properties of concrete containing ferrochrome ash (FA) and lime", *Constr. Build. Mater.*, **120**, pp. 241-250 (2016).
7. Jiang, L. and Niu, D. "Study of deterioration of concrete exposed to different types of sulfate solutions un-

- der drying-wetting cycles”, *Constr. Build. Mater.*, **117**, pp. 88-98 (2016).
8. Benli, A., Karatas, M. and Gurses, E. “Effect of sea water and MgSO<sub>4</sub> solution on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with fly ash/silica fume”, *Construction and Building Materials*, **146**, pp. 464-474 (2017).
  9. Samimi, K. and Shirzadi Javid, A.A. “Magnesium sulfate (MgSO<sub>4</sub>) attack and chloride isothermal effects on the selfconsolidating concrete containing metakaolin and zeolite”, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **45**(1), pp. 1-16 (2020).
  10. Maes, M., Mittermayr, F. and De Belie, N. “The influence of sodium and magnesium sulfate on the penetration of chlorides in mortar”, *Mater. Struct.*, **50**(2), pp. 1-14 (2017).
  11. Neville, A. “The confused world of sulfate attack on concrete”, *Cem. Concr. Res.*, **34**(8), pp. 1275-1296 (2004).
  12. Santhanam, M. “Studies on sulfate attack – mechanisms, test methods and modeling”, *PhD Dissertation, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA* (2001).
  13. Zareei, S.A., Ameri, F., Dorostkar, F. and et al. “Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: evaluating durability and echanical properties”, *Case stud. Construct. Mater.*, **7**, pp. 73-81 (2017).
  14. Afrouhsabet, V. and Ozbakkaloglu, T. “Mechanical and durability properties of highstrength concrete containing steel and polypropylene fibers”, *Construct. Build. Mater.*, **94**, pp. 73-82 (2015).
  15. Mardani-Aghabaglou, A., Tuyan, M. and Ramyar, K. “Mechanical and durability performance of concrete incorporating fine recycled concrete and glass aggregates”, *Mater. Struct.*, **48**(8), pp. 2629-2640 (2015).
  16. Akççglu, T., Tokyay, M. and çelik, T. “Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression”, *Cement Concr. Compos.*, **26**(6), pp. 633-638 (2004).
  17. Zhang, J., Wang, L., Sun, M. and et al. “Effect of coarse/fine aggregate ratio and cement matrix strength on fracture parameters of concrete”, *Eng. Mech.*, **21**(1), pp. 136-142 (2004).
  18. Xu, J. and Li, F. “A meso-scale model for analyzing the chloride diffusion of concrete subjected to external stress”, *Construct. Build. Mater.*, **130**(2), pp. 11-21 (2017).
  19. Yu, F., Sun, D., Wang, J. and et al. “Influence of aggregate size on compressive strength of pervious concrete”, *Construct. Build. Mater.*, **209**, pp. 463-475 (2019).
  20. Sindhu, P.K. and Rajagopal, D. “Experimental investigation on maximum strength of pervious concrete using different size of aggregates”, *Int. J. Innov. Sci. Eng. Technol.*, **2**(10), pp. 706-708 (2015).
  21. Fabien, A., Choinska, M., Bonnet, S. and et al. “Experimental study of aggregate size effects on mechanical behaviour and permeability of concrete”, *In: Proc. 2nd Int. Conf. On Microstructure-Related Durability of Cementitious Composites, Amsterdam*, pp. 412-420 (2012).
  22. Abdullahi, M. “Effect of aggregate type on compressive strength of concrete”, *Int. J. Civ. Struct. Eng.*, **2**(3), pp. 791-800 (2012).
  23. Tsado, T.Y. “A comparative analysis of concrete strength using igneous, sedimentary and metamorphic rocks (crushed granite, limestone stone and marble stone) as coarse aggregate”, *Int. J. Eng. Res. Technol.*, **2**(9), pp. 774-785 (2013).
  24. Wu, K.R., Chen, B., Yao, W. and et al. “Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete”, *Cement Concr. Res.*, **31**(10), pp. 1421-1425 (2001).
  25. Liu, P., Chen, Y. Wang, W. and et al. “Effect of physical and chemical sulfate attack on performance degradation of concrete under different conditions”, *Chemical Physics Letters*, **745**, 137254 (2020).
  26. Tennich, M., Ouezdou, M.B. and Kallel, A. “Behavior of self-compacting concrete made with marble and tile wastes exposed to external sulfate attack”, *Construction and Building Materials*, **135**, pp. 335-342 (2017).
  27. Sharbatdar, M.K. and Habibi, A. “Experimental evaluation of mechanical characteristics and durability of concrete specimens under combination of chloride-sulfate environment conditions and sulfate aggregate”, *Concrete Research*, **10**(4), pp. 19-33 (2018).
  28. Naderi, M. “New twist-off method for the evaluation of in-situ strength of concrete”, *Journal of Testing and Evaluation/Citation*, **35**(6), pp. 602-608 (2005).
  29. ASTM C42 / C42M-20, “Standard test method for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA (2020).
  30. Saberi Varzaneh, A. and Naderi, M. “Determination of compressive and flexural strengths of in-situ pozzolanic concrete containing polypropylene and glass fibers using ”Twist-off” method”, *Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J)*, **20**(5), pp.117-129 (Oct 2020).
  31. Naderi, M., Smaili, A. and Saberi Varzaneh, A. “Assessment of the application ”twist-off” method for determining the in situ compressive and flexural strengths in the fiber concrete”, *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, **8**(3), pp.23-41 (2021).
  32. 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 ”Pul off” methods”, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **45**(1), pp.2377-2395 (2021).
  33. Saberi Varzaneh, A. and Naderi, M. “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*, **14**(2), pp.37-48 (2021).
  34. 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*, **50**(4), pp. 537-544 (2020).



35. ASTM C136-01, "Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates", *American Society for Testing and Materials* (2001).
36. 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).
37. 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).
38. British Standard Institution, "Method for determination of compressive strength of concrete cores", *BSI 1881: Part 120* (1983).
39. ACI Committee 318, "Report 318R-19, building code requirements for structural concrete and commentary", *American Concrete Institute* (2019).
40. EFNARC, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. 2002. ISBN 0 9539733 4 4.
41. Naderi, M. and Kaboudan, A. "Experimental study of the effect of aggregate type on concrete strength and permeability", *Journal of Building Engineering*, **37**, 101928 (2021).