

تأثیر سنگدانه‌ها در مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن

علیرضا کبودان* (دانش آموخته‌ی دکتری)

محمود نادری (استاد)

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

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۰
دوری ۲ - ۳۷، شماره ۱/۴، ص. ۹۳-۸۱، (پژوهشی)

مقاومت، دوام و شکل سنگدانه در خصوصیات بتن تأثیرگذار است. لذا در نوشتار حاضر، تأثیر مشخصات سنگ‌های صخره‌ی: گرانیته، اندزیت، سیلیس، آهک، مرمر و توف و سنگدانه‌های حاصل از شکستن آن‌ها در مقاومت فشاری و نفوذپذیری نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه بررسی شده است. برای انجام مطالعات، ویژگی‌های مکانیکی (مقاومت‌های فشاری، کششی و سطحی، مقاومت در برابر سایش و ضربه، سختی اشمیت و چگالی اشباع با سطح خشک)، دوامی (تخلخل، نفوذپذیری و جذب آب) و هندسی (گردگوشگی، توپری و نسبت ابعادی) سنگدانه‌ها و سنگ‌های صخره‌ی ذکر شده اندازه‌گیری شده‌اند. نتایج حاصل نشان می‌دهند که سنگ‌های صخره‌ی، نفوذپذیری کمتر و مقاومت فشاری بیشتری نسبت به بتن حاوی سنگدانه‌های همان سنگ صخره دارند. به علاوه، همبستگی قوی‌یی بین ویژگی‌های مکانیکی و دوامی ذکر شده با مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن وجود دارد و تأثیر خصوصیات هندسی سنگدانه‌ها در مقایسه با نوع آن‌ها، در مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن قابل صرف‌نظر است.

واژگان کلیدی: مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن، شکل سنگدانه‌ها، مشخصات مکانیکی، دوامی سنگدانه‌ها.

۱. مقدمه

برای این‌که یک سازه‌ی بتنی بتواند وظایفی را که برای آن طراحی شده است، به‌خوبی انجام دهد، لازم است که مشخصات مکانیکی و دوام کافی داشته باشد، تا در مقابل بارهای وارده و عوامل مخرب عملکرد مطلوبی داشته باشد. پژوهش‌گران همواره در میان مشخصات مکانیکی و دوام بتن، به تعیین و ارزیابی مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن توجه بسیاری داشته و مطالعات بسیاری در این زمینه انجام داده‌اند.^[۳-۱] از طرفی، اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی بتن تأثیر بسزایی در مشخصات بتن دارند.^[۶-۴] سنگدانه‌ها یکی از اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی بتن هستند و تقریباً ۶۰ تا ۸۰ درصد حجم آن را تشکیل می‌دهند. همچنین، سنگدانه‌ها توسط خمیر سیمان احاطه و به‌عنوان مهم‌ترین عامل برای تعیین وزن واحد حجم، مدول کشسانی و پایداری ابعاد بتن در نظر گرفته می‌شوند. سنگدانه‌ها با افزایش طول مسیر جریان و قطع کردن ارتباط داخلی منافذ شبکه‌ی مویینه در خمیر سیمان، می‌توانند عامل مهمی در تعیین دوام بتن محسوب شوند. البته از آن‌جا که شکست و گسیختگی در بتن از ناحیه‌ی مرزی ضعیف بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها صورت می‌گیرد، مقدار کمی از ظرفیت مقاومتی سنگدانه‌ها در مقاومت فشاری بتن شرکت می‌کند. با توجه به این

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۱۲/۱۸، اصلاحیه ۱۴۰۰/۲/۲۵، پذیرش ۱۴۰۰/۳/۲۹.

DOI:10.24200/J30.2021.57637.2923

alireza.kaboudan@edu.ikiu.ac.ir
profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir

موارد، مطالعاتی در زمینه‌ی تأثیر سنگدانه‌ها در مشخصات بتن انجام شده است. بررسی‌های انجام شده‌ی پژوهش‌گران نشان می‌دهند که اندازه‌ی سنگدانه‌ها یکی از عوامل مؤثر در مقاومت فشاری بتن متخلخل است و با افزایش اندازه‌ی سنگدانه‌ها، مقاومت فشاری نیز افزایش می‌یابد. اما سنگدانه‌های بزرگ‌تر از ۷ میلی‌متر، تأثیر قابل ملاحظه‌یی در مقاومت فشاری بتن متخلخل ندارند.^[۸و۷] در همین ارتباط، نتایجی به‌دست آمده است که نشان می‌دهند مقدار بهینه‌ی برای اندازه‌ی سنگدانه‌ها وجود دارد، که بیشترین مقاومت فشاری بتن را نتیجه می‌دهد و با افزایش اندازه‌ی سنگدانه‌ها نسبت به مقدار بهینه، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد.^[۹] همچنین، مطالعات پیشین نشان می‌دهند که با افزایش اندازه‌ی متوسط سنگدانه‌ها، به دلیل افزایش حجم ریزترک‌ها، مقاومت فشاری بتن کاهش و نفوذپذیری آن افزایش می‌یابد.^[۱۰] مداح^۱ و همکاران (۲۰۱۰) بیان داشته‌اند که مقاومت فشاری بتن ساخته شده با سنگدانه‌های فیلیت، تقریباً ۸۰٪ مقاومت فشاری نمونه‌ی بتنی حاوی سنگدانه‌های گرانیته بوده و روند کسب مقاومتی تقریباً مشابهی برای بتن‌های حاوی سنگدانه‌های گرانیته گزارش کرده‌اند.^[۱۱] عبداللهی (۲۰۱۲)، نیز در بررسی اثر سنگدانه‌های کوارتز، گرانیته و شن رودخانه‌یی در مقاومت فشاری، گزارش داده است که بتن حاوی سنگدانه‌های کوارتز، نسبت به سایر بتن‌ها مقاومت فشاری بیشتری از خود نشان می‌دهد و کمترین مقاومت فشاری نیز در بتن حاوی سنگدانه‌های گرانیته مشاهده شده است. ایشان همچنین

رابطه‌ی خطی بین مقاومت فشاری و سن نمونه‌های بتنی ارائه کرده است.^[۱۴] تسادو^۲ (۲۰۱۳)، نیز در نوشتارش در ارتباط با تأثیر سنگدانه‌های گرانیت، آهک و مرمر در مقاومت فشاری بتن دریافته است که بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های بتنی دارای سنگدانه‌های گرانیت و کمترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های بتنی دارای سنگدانه‌های مرمر است.^[۱۳] همچنین وو^۳ و همکارانش (۲۰۰۱)، با بررسی بتن‌های حاوی سنگدانه‌های کوارتز، گرانیت، آهک و مرمر بیان داشتند که نوع سنگدانه‌ی مصرفی، اثر چشم‌گیرتری در مقاومت فشاری بتن‌های با مقاومت‌های بالا دارد و با کاهش مقاومت فشاری بتن، تأثیر سنگدانه‌ی مصرفی نیز کاهش می‌یابد.^[۱۴] در ارتباط با تأثیر سنگدانه‌ها در خصوصیات بتن، همبستگی تقریباً قابل توجهی با ضریب تعیینی برابر با ۰٫۶۱ بین مقاومت فشاری بتن و مقاومت سنگدانه‌ها گزارش شده است. البته، پژوهش‌گران دیگری (۲۰۲۰) با انجام آزمایش‌هایی بر ۶ طرح مخلوط بتنی حاوی سنگدانه‌ها با مقاومت‌های مختلف دریافته‌اند که تأثیر مقاومت سنگدانه‌ها در مقاومت‌های کششی و خمشی بتن نسبت به تأثیر آن‌ها در مقاومت فشاری بتن کمتر است.^[۱۵] باید توجه شود که مقاومت سنگدانه، تأثیر بیشتری در مقاومت بتن پرمقاومت نسبت به بتن‌های معمول دارد، زیرا در بتن‌های پرمقاومت، به دلیل کمتر بودن نسبت آب به سیمان، مقاومت ناحیه‌ی انتقال بیشتر است و به همین دلیل مقاومت بتن‌های پرمقاومت به میزان کمتری تحت تأثیر مقاومت ناحیه‌ی انتقال قرار دارد.^[۱۶، ۱۷]

مطالعات انجام شده فقط محدود به تأثیر سنگدانه‌ها در مشخصات مکانیکی بتن نیست و پژوهش‌گران همواره به بررسی تأثیر سنگدانه‌ها در دوام بتن نیز توجه داشته‌اند. نتایج منتشر شده توسط ژانگ^۴ و همکارانش (۲۰۱۹)، نشان می‌دهند که با افزایش نسبت ابعادی سنگدانه‌ها، عمق کربناسیون به‌طور قابل ملاحظه‌ی افزایش یافته و میزان تیز گوشه بودن سنگدانه‌ها تأثیر چندانی در عمق کربناسیون نداشته است.^[۱۸] از طرفی، نوع سنگدانه تأثیر بسزایی در نفوذپذیری بتن دارد. در این رابطه، توپولیسکیک - کورسیک^۵ و همکارانش (۲۰۱۲) به بررسی نفوذپذیری بتن‌های حاوی نسبت‌های مختلف آب به سیمان و سنگدانه‌های بازالت، آهک، دیاباز، اندزیت و رودخانه‌ی پرداختند و دریافته‌اند که نفوذپذیری بتن به شدت تحت تأثیر دو عامل نسبت آب به سیمان و نوع سنگدانه قرار دارد. همچنین، استفاده‌ی هم‌زمان از سنگدانه‌های بازالت، آهک، دیاباز و اندزیت با سنگدانه‌های رودخانه‌ی برای ساخت بتن موجب کاهش بیشتر عمق نفوذ آب، در مقایسه با بتن حاوی سنگدانه‌های مذکور به تنهایی (بدون سنگدانه‌ی رودخانه‌ی) می‌شود.^[۱۹] نتایج منتشره در ارتباط با تأثیر سنگدانه‌های بازافتی بتنی، گرانیت و شن رودخانه‌ی در مشخصات مکانیکی و دوام بتن نشان می‌دهند که بتن دارای سنگدانه‌های بازافتی بتنی، بیشترین نفوذپذیری و تخلخل و کمترین چگالی و مقاومت فشاری را نسبت به سایر بتن‌ها دارد. از طرفی، کمترین نفوذپذیری و تخلخل و بیشترین مقاومت فشاری و چگالی نیز برای بتن دارای سنگدانه‌های گرانیت مشاهده شده است.^[۲۰] در ارتباط با اثر دانه‌بندی سنگدانه‌ها در نفوذپذیری بتن گزارش شده است که بتن ساخته شده با طرح مخلوطی که در آن مقدار ماسه بیشتر از مقدار شن باشد، به دلیل وجود ساختاری متراکم‌تر، نفوذپذیری کمتری از خود نشان خواهد داد.^[۲۱] به علاوه، کونگ^۶ و همکارانش (۲۰۱۶)، با بررسی نفوذپذیری بتن در برابر یون کلراید گزارش کرده‌اند که نوع سنگدانه نسبت به اندازه‌ی آن، تأثیر کمتری در نفوذپذیری بتن دارد.^[۲۲] نتایج منتشره‌ی وردا^۷ و همکارانش (۲۰۱۲)، نیز بیان‌گر تأثیر چشمگیر اثر دانه‌بندی سنگدانه‌ها در نفوذپذیری بتن است.^[۲۳] تأثیر اندازه‌ی سنگدانه‌ها در نفوذپذیری بتن متخلخل نیز قابل توجه است. به‌طوری که در بتن‌های متخلخل با تخلخل یکسان، نفوذپذیری با افزایش اندازه‌ی سنگدانه‌ها افزایش می‌یابد. علت این است که در یک تخلخل یکسان، تعداد منافذ بتن متخلخل حاوی

سنگدانه‌های با اندازه‌ی کوچک‌تر بیشتر است، اما میانگین اندازه‌ی منافذ ذکر شده کمتر خواهد بود.^[۲۴] همچنین نتایج مشابهی توسط ژانگ^۸ و همکارانش (۲۰۲۱)، در ارتباط با تأثیر بیشینه‌ی اندازه‌ی سنگدانه‌ها در متغیرهای دوام و نفوذپذیری بتن‌های معمول، شامل جذب آب مویینه، جذب آب حجمی، جذب آب سطحی، نفوذ و مهاجرت تسریع شده‌ی یون کلر گزارش شده است، که نشان می‌دهند با کاهش اندازه‌ی بیشینه‌ی سنگدانه‌ها، به دلیل بهبود خواص ناحیه‌ی انتقال و کاهش خلل و فرج بتن، متغیرهای مذکور بهبود می‌یابند.^[۲۵] نتایج حاصل از مطالعات صورت گرفته در این ارتباط نیز نشان می‌دهند که با افزایش کرویت سنگدانه‌ها، نفوذپذیری بتن نیز افزایش می‌یابد و بالعکس.^[۲۶] از طرفی، سنگدانه‌های مثلی شکل سبب افزایش طول مسیر حرکت یون‌ها در داخل بتن نسبت به سنگدانه‌های دایره‌ی، بیضوی و مستطیلی شکل می‌شوند. همچنین، نسبت حجمی سنگدانه‌ها، تأثیر کمتری در میزان نفوذ یون‌ها به داخل بتن در مقایسه با شکل سنگدانه‌ها دارد.^[۲۷]

مطالب اخیر نشان می‌دهند که پژوهشگران عمدتاً بر تأثیر مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها، مانند بزرگ‌ترین اندازه، دانه‌بندی، شکل و مقدار سنگدانه‌ها در مشخصات مکانیکی و دوام بتن تمرکز داشته‌اند و نتایج گزارش شده اکثراً مربوط به استفاده از یک نوع سنگدانه یا تعداد محدودی از آن‌ها هستند.

از این رو، مطالعه‌ی که در آن اثر ویژگی‌های هندسی، مقاومتی و نفوذپذیری سنگدانه‌های مختلف در مقاومت و نفوذپذیری بتن بررسی شده باشد، ضروری به‌نظر می‌رسد. به همین دلیل، در نوشتار حاضر، اثر مشخصات مختلف سنگدانه‌های گرانیت، اندزیت، سیلیس، آهک، مرمر و توف، شامل: مقاومت‌های فشاری، کششی و سطحی، مقاومت در برابر ضربه و سایش (آزمایش لس آنجلس)، سختی اشمیت، نفوذپذیری، تخلخل، جذب آب و چگالی اشباع با سطح خشک در مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن حاوی سنگدانه‌های ذکر شده ارزیابی شده است. به علاوه، تأثیر ویژگی‌های هندسی سنگدانه‌ها، شامل میزان گردگوشگی،^{۱۰} توپری^{۱۱} و نسبت ابعادی^{۱۲} در نفوذپذیری و مقاومت بتن نیز در نوشتار حاضر بررسی شده است. در بررسی‌های مذکور از روش‌های ابداعی «محفظه‌ی استوانه‌ی»^[۲۸] و «پیچش»^[۲۹] برای اندازه‌گیری به ترتیب نفوذپذیری و مقاومت سطحی نمونه‌های بتنی استفاده شده است. از مزایای روش‌های اخیر بر سایر روش‌های معمول برای اندازه‌گیری نفوذپذیری و مقاومت، می‌توان به امکان انجام آزمایش‌ها در محل سازه، علاوه بر آزمایشگاه اشاره کرد. همچنین مطالعات دیگری نیز با به‌کارگیری روش‌های ذکر شده برای ارزیابی مشخصات مکانیکی و دوامی بتن انجام شده است.^[۳۰-۳۲]

۲. روش «محفظه‌ی استوانه‌ی»

در بررسی‌های انجام شده، روش «محفظه‌ی استوانه‌ی»^[۲۸] برای اندازه‌گیری نفوذپذیری نمونه‌های بتنی استفاده شده است و دستگاه آزمایش روش اخیر در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

از روش «محفظه‌ی استوانه‌ی» می‌توان برای تعیین نفوذپذیری سایر مصالح ساختمانی، مانند سنگ و آجر در برابر نفوذ مایعات مختلف مانند مشتقات نفتی نیز استفاده کرد. مهم‌ترین مزیت روش محفظه‌ی استوانه‌ی بر سایر روش‌های معمول برای اندازه‌گیری نفوذپذیری مانند روش تدوین شده در استاندارد بریتانیا،^[۳۵] فقط در آزمایشگاه استفاده می‌شوند، می‌توان به امکان انجام آزمایش هم در آزمایشگاه و هم در در محل سازه اشاره کرد. قابلیت انجام آزمایش در سطوح مختلف، مانند: سطوح قائم، افقی و شیب‌دار و محل‌هایی که نمونه‌گیری مشکل است، از مزایای روش



الف) آزمایش پیچش؛ ب) صفحه های فلزی جدا شده از سطح یک نمونه بتنی؛



پ) سنگ های صخره آماده شده برای آزمایش پیچش.

شکل ۲. سنگ های صخره و نمونه های بتنی آماده شده برای آزمایش پیچش.

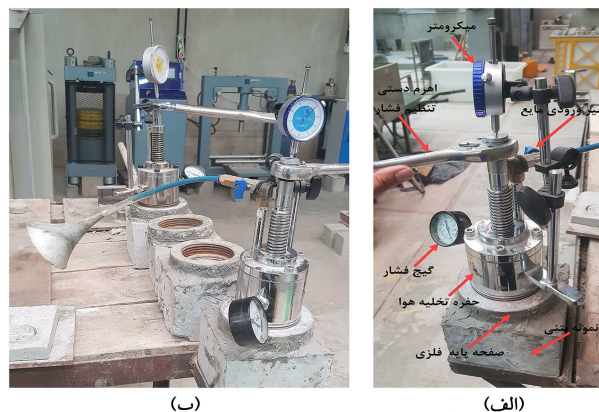
فشار آبی برابر با ۵ بار به نمونه ها وارد شده است). حفره بی نیز در محفظه ی فشار برای خروج هوای محبوس شده ی احتمالی در دستگاه تعبیه شده است. مقدار نفوذ مایع در نمونه را می توان از طریق میکرومتر تعبیه شده بر دستگاه در زمان های مختلف قرائت کرد. با استفاده از قرائت های میکرومتر در زمان های ثبت شده و سطحی که آب از آن به درون نمونه نفوذ می کند (سطح داخلی صفحه ی پایه)، مقدار حجم آب نفوذ کرده به نمونه ی بتنی و متوسط نرخ نفوذ آب در هر لحظه از زمان قابل محاسبه است. یادآور می شود که در روش های آزمایشگاهی موجود برای ارزیابی نفوذپذیری بتن مانند روش تدوین شده در استاندارد بریتانیا، متغیرهای مذکور قابل محاسبه نیستند.

۳. روش «پیچش»

در روش «پیچش»، که توسط نادری ابداع شد، ابتدا آلودگی ها از سطح نمونه توسط برس سیمی زبر زدوده می شود. سپس صفحات فلزی با ابعاد مشخص توسط چسب اپوکسی بر سطح نمونه چسبانده می شود و پس از کسب مقاومت کافی توسط چسب، با استفاده از دستگاه پیچش سنج، لنگر پیچشی لازم برای جدا کردن صفحه ی فلزی از سطح نمونه اندازه گیری می شود. پس از جدا شدن صفحه، به طور چشمی محل جدا شدن صفحه از نمونه بررسی می شود تا اطمینان حاصل شود که جداشدگی از سطح بتن است. در صورتی که جداشدگی از سطح چسب باشد، نتایج آزمایش نامعتبر خواهد بود.^[۲۹] در شکل ۲، نحوه ی انجام آزمایش اخیر مشاهده می شود. از روش «پیچش» می توان در محل سازه نیز استفاده کرد. خرابی جزئی به وجود آمده در اثر جدا شدن صفحه ی فلزی نیز به سادگی با ملات معمولی قابل ترمیم است. گزارش شده است که رابطه ی خطی بین گشتاور پیچشی به دست آمده با به کارگیری روش «پیچش» و مقاومت فشاری نمونه ی بتنی وجود دارد و با اندازه گیری گشتاور پیچشی می توان مقاومت فشاری نمونه ها را محاسبه کرد.^[۳۳]

۴. آزمایش ها

در نوشتار حاضر، اثر سنگدانه های گرانیات، اندزیت، سیلیس، آهک، مرمر و توف در نفوذپذیری و مقاومت نمونه های بتنی مکعبی ۲۸ روزه با ابعاد $150 \times 150 \times 150$



ب)

الف)



پ)

الف) اجزای مختلف دستگاه محفظه استوانه ای؛

ب) اندازه گیری نفوذپذیری یک نمونه بتنی با به کارگیری روش محفظه استوانه ای؛
پ) اندازه گیری نفوذپذیری سنگ های صخره با به کارگیری روش محفظه استوانه ای.

شکل ۱. اجزاء مختلف دستگاه «محفظه ی استوانه ای»؛

محفظه ی استوانه ای است. عدم وجود محدودیت در ابعاد نمونه یی که قرار است نفوذپذیری آن ارزیابی شود، قابلیت حمل دستگاه، امکان انجام آزمایش به دفعات، هزینه ی اندک دستگاه آزمایش از مزایای دیگر روش محفظه ی استوانه ای هستند. همچنین با محاسبه ی حجم مایع نفوذ کرده به محل آزمایش، نیازی به شکستن نمونه برای اندازه گیری عمق نفوذ آب نیست، که این امکان در روش های موجود مانند روش تدوین شده در استاندارد بریتانیا وجود ندارد. این تذکر لازم است که نتایج به دست آمده با به کارگیری روش «محفظه ی استوانه ای» برای اندازه گیری نفوذپذیری بتن در برخی نوشتارها منتشر شده است.^[۳۱-۳۹] نتایج گزارش شده نشان می دهند که رابطه ی خطی و مستقیم با ضریب تعیینی تقریباً برابر با ۰/۹۵ بین اعماق نفوذ آب اندازه گیری شده با استفاده از دو روش «محفظه ی استوانه ای» و استاندارد بریتانیا برای نمونه های بتنی با و بدون افزودنی وجود دارد. این موضوع بیانگر دقت و اعتبار نتایج به دست آمده از روش «محفظه ی استوانه ای» است.^[۳۱]

مطابق شکل ۱، برای ارزیابی نفوذپذیری با استفاده از روش «محفظه ی استوانه ای»، به سطح تقریبی برابر با 15×15 سانتی متر نیاز است. در روش اخیر، پس از زدودن آلودگی ها از سطح نمونه، صفحه ی فلزی پایه توسط چسب اپوکسی بر روی نمونه چسبانده و پس از کسب مقاومت کافی توسط چسب، دستگاه آزمایش بر روی صفحه ی پایه تثبیت می شود. پس از تثبیت دستگاه بر محل انجام آزمایش، محفظه ی آن با مایع مورد نظر پر و با بستن شیر ورودی مایع و با استفاده از اهرم دستی، فشار مورد نظر به آب داخل محفظه اعمال می شود، که با استفاده از گیج تعبیه شده بر دستگاه، مقدار آن قابل قرائت است (در مطالعه ی حاضر، برای اندازه گیری نفوذپذیری

ابعادی محاسبه شده‌اند. گردگوشگی، میزان نزدیکی یک شکل هندسی را به یک دایره نشان می‌دهد و مقدار آن همواره بین ۰ و ۱ است (مقدار گردگوشگی یک دایره برابر با ۱ است). نسبت ابعادی و توپری یک شکل هندسی نیز به ترتیب بیان‌گر میزان کشیدگی و تراکم (چگالی) آن است. نسبت ابعادی همواره بزرگ‌تر از ۱ است. مقدار شاخص توپری یک شکل هندسی نیز همانند گردگوشگی، همواره بین ۰ و ۱ است، که مقدار ۱ برای شاخص توپری، نشان‌دهنده یک شکل کاملاً توپر است (مانند دایره) و مقادیر کوچک‌تر از ۱ نشان‌دهنده وجود شیار یا نامنظمی در مرزهای شکل هندسی بررسی شده است. گردگوشگی، نسبت ابعادی و توپری یک شکل هندسی به ترتیب با استفاده از روابط ۱ الی ۳ به دست می‌آیند.

$$(۱) \quad \mu_g = \frac{A}{P^2} \times \pi$$

$$(۲) \quad \text{نسبت ابعادی} = \frac{L_{max}}{L_{min}}$$

$$(۳) \quad \text{توپری} = \frac{A}{A_{convex}}$$

که در آن‌ها، A مساحت شکل هندسی، P محیط شکل هندسی، L_{max} و L_{min} به ترتیب طول بیشترین و کمترین بُعد شکل هندسی و A_{convex} بوش محذب شکل هندسی هستند.

برای محاسبه متغیرهای اخیر، نمونه‌های بتنی با استفاده از تیغه‌ی الماسه در مقاطع مختلفی برش زده شدند و از مقاطع مذکور عکس گرفته شد و به کمک برنامه‌ی آنالیز تصویر ImageJ، متغیرهای ذکر شده با استفاده از روابط ارائه شده محاسبه شدند. در شکل ۴ - الف، مقطع برش‌خورده از یک نمونه بتنی حاوی سنگدانه‌ها با اندازه‌های مختلف (ریز و درشت) مشاهده می‌شود، که مطابق آن به دلیل وجود سنگدانه‌های بسیار کوچک، که شناسایی آن‌ها در تصاویر گرفته شده بسیار سخت است، تعیین مرز دقیق سنگدانه‌ها به منظور محاسبه متغیرهای هندسی آن‌ها (نسبت ابعادی، گردگوشگی و توپری) میسر نیست. به همین دلیل، در نوشتار حاضر برای رفع مشکل اخیر و تعیین دقیق‌تر مرز سنگدانه‌ها، از سنگدانه‌هایی که بین دو الک با اندازه‌های ۰/۵ و ۰/۷۵ اینچ قرار داشتند، استفاده شده است. در نوشتار حاضر، از میانگین نتایج به دست آمده از ۳۰ مقطع مختلف بتنی برای محاسبه متغیرهای هندسی سنگدانه‌ها، شامل: نسبت ابعادی، گردگوشگی و توپری استفاده شده است. بدین صورت که با استفاده از نرم‌افزار ImageJ، متغیرهای مذکور برای

میلی‌متر که در آب عمل‌آوری شده بودند، بررسی شده است. سنگ‌های صخره‌یی ذکر شده با استفاده از دستگاه سنگ شکن به سنگدانه تبدیل شدند، تا در ساخت نمونه‌های بتنی استفاده شوند. از سنگدانه‌های اشیاع با سطح خشک، رد شده از الک ۰/۷۵، اینچ و مانده روی الک ۰/۵، اینچ برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. برای محاسبه دقیق‌تر متغیرهای هندسی وابسته به شکل سنگدانه‌ها و تأثیر آن‌ها در مقاومت و نفوذپذیری بتن از چنین دانه‌بندی گسسته‌یی در ساخت بتن‌ها استفاده شده است، که در مورد آن کامل‌تر توضیح داده شده است. سیمان پرتلند نیز نوع II و آب مصرفی، آب شرب شهر قزوین بوده است. در نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۵، نمونه‌های بتنی مطالعه شده، کارایی مطلوبی از خود نشان دادند و به همین دلیل از نسبت ۰/۵ برای ساخت بتن‌ها استفاده شده است.

برای بررسی اثر سنگدانه در مقاومت و نفوذپذیری بتن، از نتایج به دست آمده آزمایش‌های مقاومت‌های فشاری،^[۴۰] سطحی و کششی،^[۴۱] لس‌آنجلس (k_{500})،^[۴۲] چکش اشیمیت،^[۴۳] نفوذپذیری،^[۴۴] تخلخل،^[۴۵] جذب آب^[۴۵] و چگالی اشیاع با سطح خشک،^[۴۵] استفاده شده است. آزمایش‌های مقاومت فشاری سنگ‌های صخره با استفاده از مغزه‌های استوانه‌یی با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و قطر ۵ سانتی‌متر انجام شدند. برای آزمون‌های «محفظه‌ی استوانه‌یی» و «پیچش» نیز از سنگ‌های صخره و برای سایر آزمایش‌ها از سنگدانه‌ها استفاده شده است. همچنین، نتایج مقاومت‌های کششی و سختی اشیمیت از شرکت‌های بهره‌بردار از معادن مرتبط تهیه شدند. این تذکر لازم است که کلیه مراحل انجام آزمایش‌ها، در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام شده است. در شکل ۳، سنگ‌های صخره و مغزه‌های سنگی مشاهده می‌شوند. در جدول ۱، نیز طرح‌های مخلوط نمونه‌های بتنی ارائه شده است، که به صورتی محاسبه شده‌اند که نسبت حجمی سنگدانه‌ها ثابت باشد (تقریباً برابر با ۰/۶۵ حجم بتن).

برای بررسی تأثیر شکل سنگدانه‌ها در نفوذپذیری و مقاومت بتن، مشخصات دوفعده‌ی هندسی مرتبط با شکل سنگدانه‌ها، شامل: گردگوشگی، توپری و نسبت

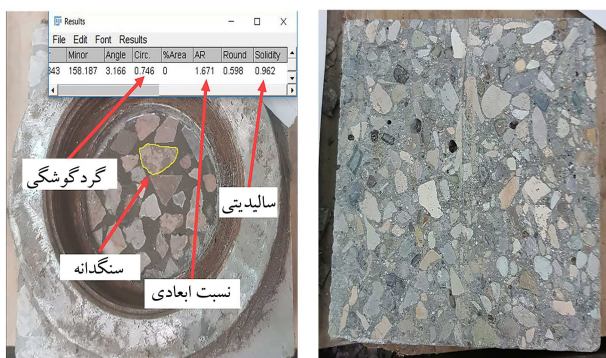


الف) سنگ‌های صخره؛ ب) مغزه گیری از سنگ صخره؛ پ) مغزه‌های سنگ صخره.

شکل ۳. سنگ‌های صخره و مغزه‌های استوانه‌یی تهیه شده از آن‌ها.

جدول ۱. طرح‌های مخلوط نمونه‌های بتنی آماده شده.

سنگدانه‌ی مصرفی	سیمان (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	سنگدانه (kg/m^3)
گرانیت	۳۵۰	۱۷۵	۱۷۸۸
اندزیت	۳۵۰	۱۷۵	۱۷۲۳
سیالپس	۳۵۰	۱۷۵	۱۶۷۱
آهک	۳۵۰	۱۷۵	۱۶۷۷
مرمر	۳۵۰	۱۷۵	۱۶۵۱
توف	۳۵۰	۱۷۵	۱۴۹۵



الف) مقطع برش خورده از یک نمونه بتنی حاوی درشت دانه‌ها و ریزدانه‌ها؛ ب) مقادیر گردگوشگی، توپری و نسبت ابعادی سنگ دانه‌ها محاسبه شده با استفاده از برنامه آنالیز تصویر ImageJ.

شکل ۴. مقاطع بتنی برش خورده برای اندازه‌گیری مقادیر گردگوشگی، توپری و نسبت ابعادی سنگدانه‌ها.

جدول ۲. مقادیر میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات برای گردگوشگی سنگدانه‌ها.

سنگدانه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
گرانیت	۰٫۶۷۰	۰٫۰۸۲	۱۲٫۲۳۹
اندزیت	۰٫۶۹۱	۰٫۱۰۵	۱۵٫۱۹۵
سیلیس	۰٫۶۳۲	۰٫۱۱۲	۱۷٫۷۲۲
آهک	۰٫۶۵۹	۰٫۰۹۶	۱۴٫۵۶۸
مرمر	۰٫۷۱۰	۰٫۱۵۰	۲۱٫۱۲۷
توف	۰٫۶۴۰	۰٫۱۲۶	۱۹٫۶۸۸

جدول ۳. مقادیر میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات برای نسبت ابعادی سنگدانه‌ها.

سنگدانه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
گرانیت	۲٫۲۴۰	۰٫۴۱۴	۱۸٫۴۸۲
اندزیت	۱٫۸۲۲	۰٫۳۷۰	۲۰٫۳۰۷
سیلیس	۲٫۱۲۳	۰٫۵۶۵	۲۶٫۶۱۳
آهک	۲٫۰۱۸	۰٫۳۹۶	۱۹٫۶۲۳
مرمر	۱٫۷۸۰	۰٫۴۹۹	۲۸٫۰۳۳
توف	۲٫۲۹۰	۰٫۷۱۹	۳۱٫۳۹۷

جدول ۴. مقادیر میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات برای توپری سنگدانه‌ها.

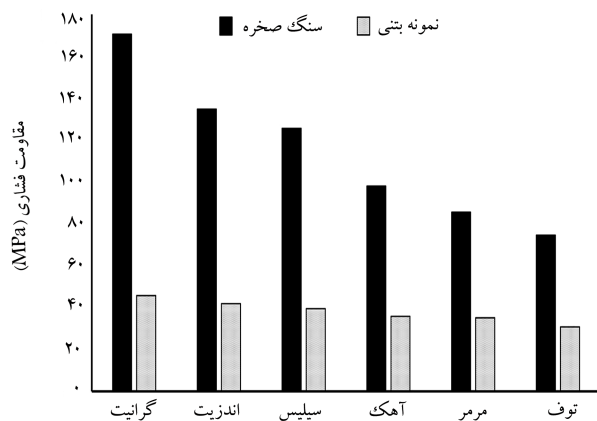
سنگدانه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
گرانیت	۰٫۸۸۰	۰٫۰۵۴	۶٫۱۳۶
اندزیت	۰٫۹۰۸	۰٫۰۷۱	۷٫۸۱۹
سیلیس	۰٫۸۹۱	۰٫۰۳۸	۴٫۲۶۶
آهک	۰٫۹۰۵	۰٫۰۴۷	۵٫۱۹۳
مرمر	۰٫۹۳۰	۰٫۰۲۰	۲٫۱۵۱
توف	۰٫۹۴۰	۰٫۰۴۶	۴٫۸۹۴

کلیه سنگدانه‌های موجود در هر مقطع بتنی برش خورده به دست آمده و از میانگین نتایج محاسبه شده در مقاطع بتنی برش خورده برای انجام بررسی‌ها استفاده شده است. در شکل ۴ - ب، نیز نمونه‌یی از نتایج به دست آمده با استفاده از برنامه‌ی ImageJ نشان داده شده است. در جدول‌های ۲ الی ۴ نیز مقادیر میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات محاسبه شده به ترتیب برای گردگوشگی، نسبت ابعادی و توپری سنگدانه‌های بررسی شده ارائه شده است.

۵. تحلیل و بررسی نتایج

۱.۵. نتایج مقاومت‌های فشاری و سطحی

در شکل ۵، نتایج به دست آمده برای مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی و سنگ‌های صخره مشاهده می‌شود، که مطابق آن، بیشترین مقاومت فشاری برای سنگ‌های



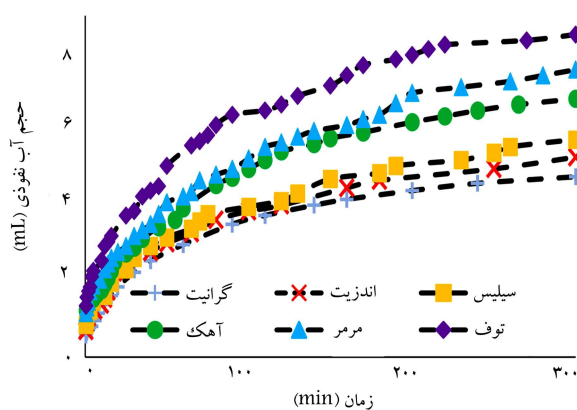
شکل ۵. مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی و سنگ‌های صخره.

صخره مربوط به گرانیت و کمترین مقاومت فشاری مربوط به توف است. نسبت مقاومت فشاری دو سنگ صخره‌ی گرانیت و توف برابر با ۲٫۲۹ است. مشاهده می‌شود که محدوده‌ی وسیعی برای مقاومت فشاری سنگ‌های صخره‌ی مختلف وجود دارد. همچنین، در شکل ۵ مشاهده می‌شود که بتن‌های ساخته شده با سنگدانه‌هایی که از سنگ‌های صخره با مقاومت فشاری بیشتری به دست آمده‌اند، مقاومت فشاری بیشتری از خود نشان می‌دهند. بتن دارای سنگدانه‌ی گرانیتی، بیشترین مقاومت فشاری و بتن حاوی سنگدانه‌ی توف، کمترین مقاومت فشاری را دارند. نسبت مقاومت فشاری برای دو نمونه‌ی بتنی اخیر برابر با ۱٫۴۹ بوده است. با توجه به نتایج شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد که مقاومت فشاری سنگ صخره از مقاومت فشاری نمونه‌ی بتنی ساخته شده با سنگدانه‌های همان سنگ صخره بیشتر است. با توجه به نتایج به دست آمده، نسبت مقاومت فشاری سنگ صخره‌ی گرانیت به مقاومت فشاری بتن حاوی سنگدانه‌های گرانیتی برابر با ۳٫۷۲ و در مورد سنگ صخره‌ی توف، این نسبت برابر با ۲٫۴۲ بوده است. یکی از عوامل تأثیرگذار در مقاومت فشاری بتن، مقاومت ناحیه‌ی مرزی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌هاست. به دلیل این‌که در آزمایش مقاومت فشاری، گسیختگی در نمونه‌ی بتنی معمولاً از ناحیه‌ی مرزی مذکور، که مقاومت کمتری نسبت به سایر اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی بتن دارد، رخ می‌دهد؛ مقاومت فشاری کمتری برای بتن در مقایسه با سنگ صخره‌ی سنگدانه‌های آن بتن حاصل شده است. با توجه به نتایج رسم شده در شکل ۵، برای افزایش مقاومت فشاری بتن، ترتیب نوع سنگدانه‌های انتخابی در طرح مخلوط بتن به این قرار بوده است: گرانیت، اندزیت، سیلیس، آهک، مرمر و توف.

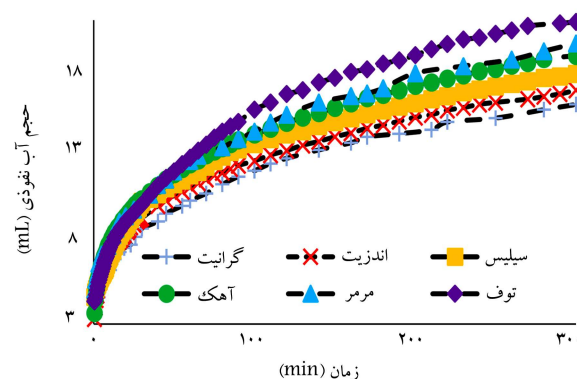
در شکل ۶، رابطه‌ی بین مقاومت‌های فشاری و سطحی نمونه‌های بتنی و سنگ‌های صخره مشاهده می‌شود. برای محاسبه‌ی مقاومت سطحی از رابطه‌ی ۴ استفاده می‌شود:

$$\tau = \frac{T \cdot r}{J} \quad (4)$$

که در آن، τ مقاومت سطحی (MPa)، T لنگر پیچشی اندازه‌گیری شده برای جدا کردن صفحه‌ی فلزی از سطح نمونه (N.mm)، r شعاع صفحه‌ی فلزی (mm) و J ، ممان اینرسی قطبی صفحه‌ی فلزی (mm⁴) است. مطابق شکل ۶، رابطه‌ی خطی بین مقاومت‌های فشاری و سطحی اندازه‌گیری شده برای سنگ‌های صخره و نمونه‌های بتنی وجود دارد. ضرایب تعیین (R^2) برای رابطه‌ی مقاومت فشاری با مقاومت سطحی نمونه‌های بتنی و سنگ‌های صخره به ترتیب برابر با ۰٫۹۵۰۸ و ۰٫۸۹۷۷ محاسبه شده‌اند. ضرایب تعیین به دست آمده بیانگر آن هستند که با



الف) نمودار حجم آب نفوذی در برابر زمان برای سنگ های صخره؛

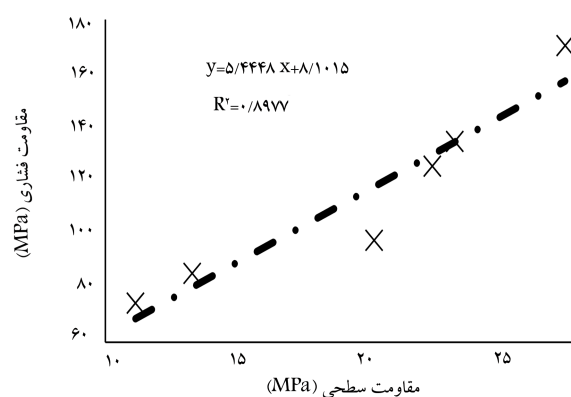


ب) نمودار حجم آب نفوذی در برابر زمان برای نمونه های بتنی.

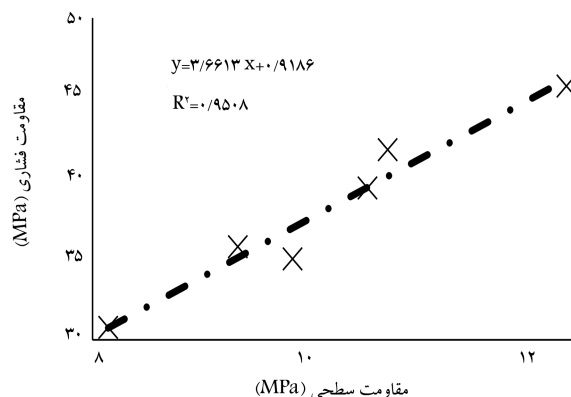
شکل ۷. نمودار حجم آب نفوذی در برابر زمان برای سنگ‌های صخره و نمونه‌های بتنی مورد مطالعه.

داخل نمونه‌های بتنی در شکل ۷ - ب، می‌توان نتیجه گرفت که نفوذپذیری کمتری برای بتن‌های حاوی سنگدانه‌های به دست آمده از سنگ‌های صخره با نفوذپذیری کمتر حاصل می‌شود.

نسبت حجم آب نفوذی به داخل نمونه‌های بتنی به حجم آب نفوذی به داخل سنگ‌های صخره متناظر با سنگدانه‌های به‌کاررفته در همان نمونه‌های بتنی در شکل ۸ مشاهده می‌شود، که مطابق آن حجم آب نفوذ کرده به داخل نمونه‌ی بتنی در مقایسه با حجم آب نفوذی به داخل سنگ صخره‌ی متناظر با سنگدانه‌های به‌کار رفته در همان بتن بیشتر است. این رفتار بیان‌گر تخلخل و پیوستگی کمتر منافذ موجود در سنگ صخره نسبت به نمونه‌ی بتنی حاوی سنگدانه‌های همان سنگ صخره است. جالب است به این نکته اشاره شود که حجم آب نفوذی به داخل سنگ توف، که نفوذپذیرترین سنگ در بررسی‌های کنونی بوده است، تقریباً نصف حجم آب نفوذی به داخل نمونه‌ی بتنی ساخته شده با سنگدانه‌ی گرانیتی است، که نفوذناپذیرترین نمونه‌ی بتنی بررسی شده است (حجم آب نفوذی به داخل سنگ صخره‌ی توف و نمونه‌ی بتنی دارای سنگدانه‌ی گرانیتی به ترتیب برابر با ۸/۵۱ و ۱۶/۰۱ میلی‌لیتر بوده است). این اختلاف را می‌توان با بررسی ویژگی‌های فازهای تشکیل‌دهنده‌ی بتن توجیه کرد. از سه فاز تشکیل‌دهنده‌ی بتن (سنگدانه، خمیر سیمان و ناحیه‌ی مرزی بین این دو)، دو فاز خمیر سیمان و ناحیه‌ی مرزی، نفوذپذیری بیشتری نسبت به فاز سنگدانه داشته‌اند و به همین دلیل، نفوذپذیری بیشتری برای نمونه‌ی بتنی نسبت به سنگ صخره‌ی متناظر با سنگدانه‌های به‌کار رفته در همان بتن مشاهده می‌شود. به علاوه، مطابق شکل ۸، نسبت حجم آب نفوذی بزرگ‌تری



الف) رابطه بین مقاومت های فشاری و سطحی سنگ های صخره؛



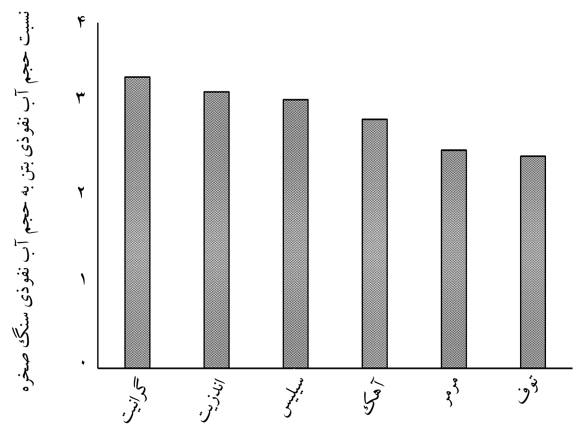
ب) رابطه بین مقاومت های فشاری و سطحی نمونه های بتنی.

شکل ۶. رابطه بین مقاومت‌های فشاری و سطحی سنگ‌های صخره و نمونه‌های بتنی مورد مطالعه.

محاسبه‌ی مقاومت سطحی می‌توان مقاومت فشاری نمونه‌ها را با دقت بالایی تخمین زد.

۲.۵. نتایج نفوذپذیری به دست آمده از روش «محفظه‌ی استوانه‌یی» در شکل ۷، نمودار حجم آب نفوذی در برابر زمان برای نمونه‌های بتنی و سنگ‌های صخره مشاهده می‌شود، که مطابق آن در ابتدای آزمایش، آب با سرعت بیشتری به داخل نمونه‌های بتنی و سنگ‌های صخره نفوذ کرده و با گذشت زمان از سرعت نفوذ آب کاسته شده است. این رفتار به دلیل اصطکاک داخلی منافذ، لزجت آب و پُر شدن منافذ بیشتر از آب با گذشت زمان است. بررسی نمودار حجم آب نفوذی در برابر زمان برای سنگ‌های صخره در شکل ۷ - الف نشان می‌دهد که کمترین حجم آب نفوذی برای سنگ گرانیت و بیشترین حجم آب نفوذی برای سنگ توف اندازه‌گیری شده است. نسبت حجم آب نفوذی برای دو نمونه سنگ صخره‌ی گرانیت و توف برابر با ۱/۷۹ بوده است. سنگ‌های صخره‌ی مرمر، آهک، سیلیس و اندزیت نیز به ترتیب در رده‌های دوم تا پنجم از نظر مقدار حجم آب نفوذی قرار دارند.

در شکل ۷ - ب نیز روند مشابهی برای حجم آب نفوذی به داخل نمونه‌های بتنی مشاهده می‌شود. نمونه‌ی بتنی ساخته شده از سنگدانه‌های گرانیت، کمترین مقدار حجم آب نفوذی و نمونه‌ی بتنی حاوی سنگدانه‌های توف، بیشترین حجم آب نفوذی را از خود نشان داده و نسبت حجم آب نفوذی به داخل دو نمونه‌ی بتنی اخیر برابر با ۱/۳۱ بوده است. با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده برای حجم آب نفوذی به



شکل ۸. نسبت حجم آب نفوذی به داخل نمونه‌های بتنی به حجم آب نفوذی به داخل سنگ‌های صخره‌ای متناظر با سنگدانه‌های به‌کاررفته در همان نمونه‌های بتنی.

برای نمونه‌های بتنی حاوی سنگدانه‌های با نفوذپذیری کمتر به دست آمده است. این نسبت برای سنگ‌های صخره‌ای گرانیت و توف به ترتیب برابر با ۳/۳۷ و ۲/۴۶ بوده است.

۳.۵. روابط بین مشخصات سنگدانه‌ها و سنگ‌های صخره با

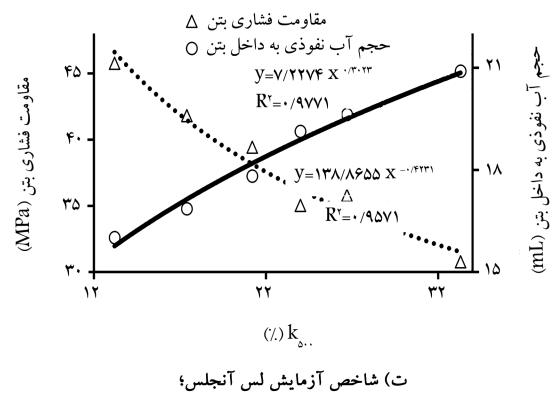
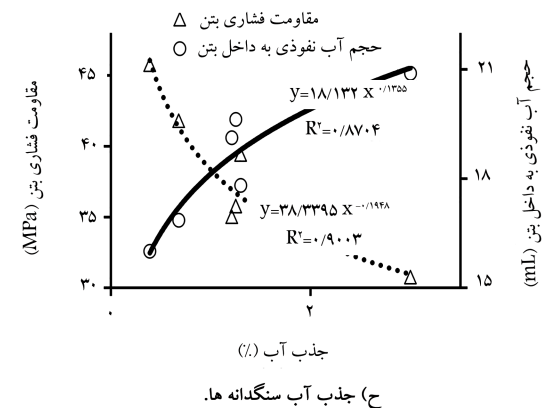
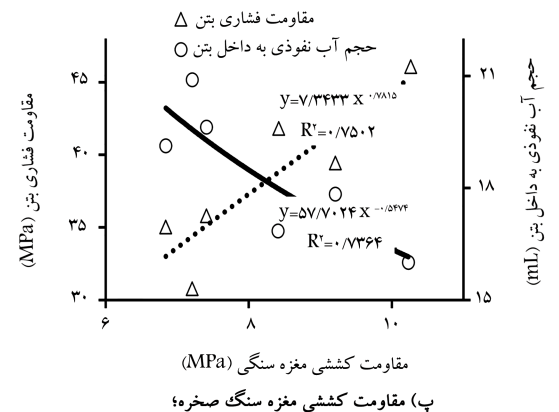
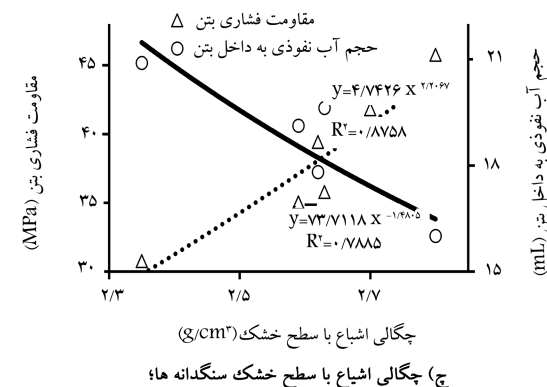
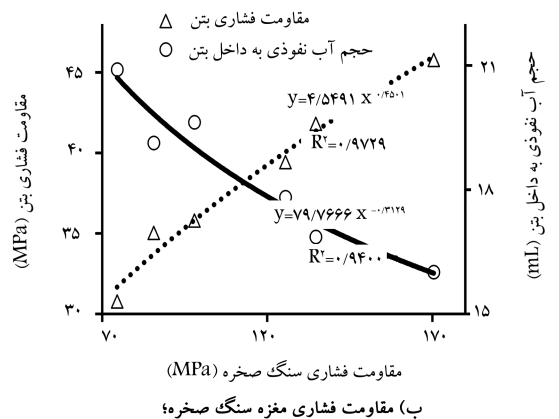
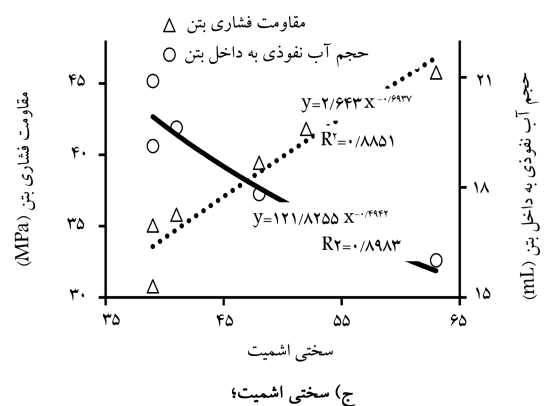
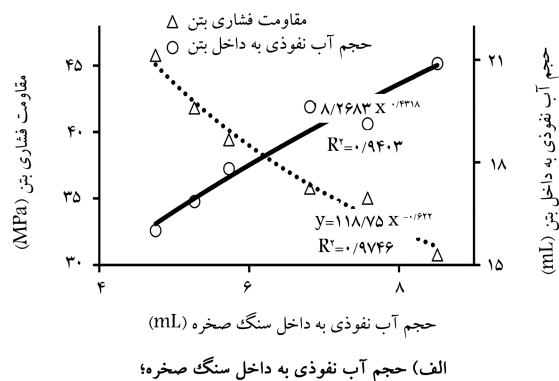
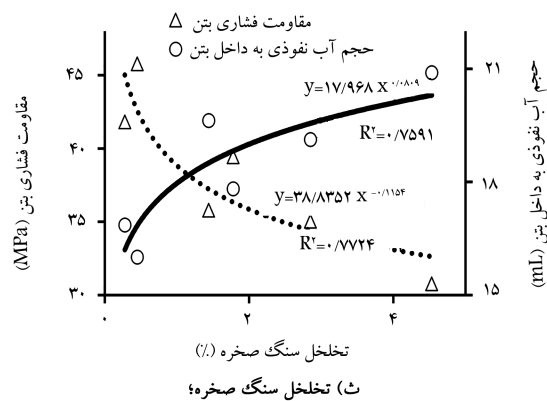
مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن

مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن تابعی از نوع و مشخصات سنگدانه‌ها هستند. برای بررسی مطلب اخیر، در شکل ۹، استفاده از تابع توانی برای تقریب روابط متغیرهای اندازه‌گیری شده برای سنگدانه‌ها و سنگ‌های صخره با مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن مشاهده می‌شود.

متغیرهای بررسی شده برای سنگدانه‌ها و سنگ‌های صخره در شکل ۹، شامل مقاومت‌های فشاری و کششی، شاخص محاسبه شده از آزمایش لس آنجلس (K_{500})، سختی اشمیت، تخلخل، جذب آب و چگالی اشباع با سطح خشک هستند. مطابق شکل ۹، رابطه‌ی معکوسی بین مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن وجود دارد. همچنین در شکل ۹، تمامی روابط با ضرایب تعیینی بزرگ‌تر از ۰/۷۳ تقریب زده شده‌اند، که بیان‌گر وجود همبستگی قوی بین متغیرهای ذکر شده است. کوچک‌ترین ضریب تعیین برای رابطه‌ی بین حجم آب نفوذی به داخل بتن و مقاومت کششی سنگ صخره برابر با ۰/۷۳۶۴ به دست آمده است. بزرگ‌ترین ضریب تعیین نیز برابر با ۰/۹۷۴۶ و مربوط به رابطه‌ی مقاومت فشاری بتن با حجم آب نفوذی به داخل سنگ صخره است. همچنین، در شکل ۹ مشاهده می‌شود که رابطه‌ی مستقیمی بین مقاومت فشاری بتن و متغیرهایی که بیان‌گر مقاومت و سختی سنگ صخره و سنگدانه‌ها هستند، مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی، چگالی اشباع با سطح خشک، معکوس شاخص آزمایش لس آنجلس و سختی اشمیت وجود دارد. به علاوه، با افزایش متغیرهای ذکر شده، نفوذپذیری بتن متناظر کاهش یافته است. از طرفی دیگر، در شکل ۹، رابطه‌ی معکوسی بین مقاومت فشاری بتن و متغیرهایی که نشان‌دهنده‌ی ارتباط و پیوستگی منافذ موجود در سنگ صخره هستند، شامل: حجم آب نفوذی، تخلخل و جذب آب مشاهده می‌شود. مقادیر کمتر برای متغیرهای اخیر نشان از ساختار متراکم‌تر سنگ صخره و در نتیجه مقاومت فشاری بیشتر و نفوذپذیری کمتر برای بتن ساخته شده با سنگدانه‌های همان سنگ صخره هستند. نتایج به دست آمده در نوشتار حاضر با نتایج گزارش شده در سایر نوشتارها سازگاری دارد. با توجه به نتایج به دست آمده، خواص مقاومتی، سایش، وزن مخصوص

و تخلخل، شکل و بافت، دوام و پایداری سنگدانه‌ها به ترتیب بیشترین تأثیر را در مقاومت بتن دارند. همچنین رابطه‌ی مستقیم بین برخی خصوصیات سنگدانه‌ها، مانند: وزن مخصوص، ارزش خردشوندگی (ACV) و ارزش ضربه‌ی (AIV) و مقاومت سنگدانه‌ها با مقاومت بتن وجود دارد. همچنین، با افزایش تخلخل و جذب آب سنگدانه‌ها از مقاومت بتن کاسته می‌شود.^[۴۶] شایان ذکر است که مقاومت و خصوصیات ناحیه‌ی انتقال از عوامل مهم و تأثیرگذار در مقاومت بتن است، که خود نیز به نوع سنگدانه بستگی دارد.^[۴۷] به علاوه، نوع و بافت سنگدانه تأثیر قابل توجهی در مقاومت‌های فشاری و کششی بتن‌های معمولی و گودردی دارد. به‌کارگیری سنگدانه‌ها با مشخصات مکانیکی و بافت سطحی زبرتر سبب افزایش مقاومت بتن می‌شود. همچنین، رابطه‌ی معکوس بین تخلخل سنگدانه‌ها و مقاومت بتن برقرار است.^[۴۸] نتایج گزارش شده توسط برخی پژوهش‌گران، بیان‌گر وجود رابطه‌ی مستقیم بین مقاومت در برابر خرد شدن سنگدانه‌ها و مشخصات مکانیکی بتن‌های معمولی و توانمند، شامل: مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول کشسانی هستند. بیشترین و کمترین میزان همبستگی به ترتیب برای رابطه بین مقاومت در برابر خرد شدن سنگدانه‌ها و مدول کشسانی (با ضرایب تعیینی در حدود ۰/۹۰) و مقاومت فشاری بتن (با ضرایب تعیینی در حدود ۰/۶۴) مشاهده شده است.^[۴۹] همچنین، نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده بیان‌گر تأثیرگذاری نوع و بافت سنگدانه‌ها در مشخصات بتن با مقاومت بالا هستند؛ به‌طوری که همبستگی بالایی بین مشخصات مکانیکی بتن با مقاومت بالا (مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت در برابر سایش) با مشخصات مکانیکی سنگ‌های صخره و سنگدانه‌های مرتبط (مقاومت فشاری و مقاومت در برابر سایش) با ضرایب تعیینی بزرگ‌تر از ۰/۸۰ وجود دارد.^[۵۰] نتایج منتشر شده توسط دیگر پژوهش‌گران نیز بیان‌گر آن هستند که رابطه‌ی معکوس بین مقاومت و نفوذپذیری بتن برقرار است. ضمن اینکه با کاهش جذب آب سنگدانه‌ها و افزایش وزن مخصوص آن‌ها، تخلخل بتن نیز کاهش می‌یابد، که سبب افزایش مقاومت فشاری و چگالی بتن می‌شود.^[۵۱]

در شکل ۱۰، میزان تأثیر نوع سنگدانه با مشخصات هندسی اندازه‌گیری شده برای سنگدانه‌ها (گردگوشگی، توپری و نسبت ابعادی) در مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضرایب تعیینی کوچک‌تر از ۰/۱ برای تقریب روابط مذکور محاسبه شده است. بنابراین، شکل سنگدانه‌ها در مقایسه با نوع سنگ صخره و سنگدانه و متغیرهایی که بیان‌گر ریزساختار آن‌ها هستند (همانند مقاومت فشاری و نفوذپذیری)، تأثیر قابل توجهی در مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن ندارند. به عبارت دیگر، مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن به شدت تحت تأثیر نوع سنگدانه است. این تذکر لازم است که ضرایب تعیین نه چندان چشمگیری برای تقریب روابط اخیر با استفاده از توابع خطی، درجه دو، لگاریتمی و نمایی نیز به دست آمده‌اند، که بیان‌گر تأثیر ناچیز شکل و مشخصات هندسی سنگدانه‌ها در مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن، در مقایسه با تأثیر نوع سنگدانه در متغیرهای مذکور است. نتایج منتشر شده توسط سایر پژوهش‌گران با نتایجی که به آن‌ها اشاره شده است، نیز سازگار بوده است. با توجه به نتایج گزارش شده، هنگامی که مقاومت ناحیه‌ی انتقال کم باشد (بتن‌های معمول)، شکل سنگدانه‌ها تأثیر ناچیزی در مشخصات مکانیکی بتن، مانند مدول کشسانی و مقاومت کششی دارد. در صورتی که پیوند بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها، مقاومت بیشتری داشته است (بتن‌های پرمقاومت)، شکل سنگدانه‌ها نیز در مشخصات مکانیکی بتن تأثیرگذار خواهد بود.^[۵۱] شایان ذکر است که در صورت استفاده از یک نوع سنگدانه در طرح مخلوط بتن، مشخصات هندسی سنگدانه‌ها می‌تواند تأثیر قابل توجهی در مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن داشته باشند. با توجه به این مطالب می‌توان گفت که برای ساخت بتنی با



شکل ۹. رابطه‌ی بین حجم آب نفوذی و مقاومت فشاری بتن‌های حاوی سنگدانه‌های مختلف.

جدول ۵. نتایج به دست آمده برای ارزیابی میزان تأثیر مقاومت فشاری سنگ صخره و گردگوشگی سنگدانه‌ها در مقاومت فشاری بتن.

متغیر	ضریب رگرسیونی استاندارد شده	سطح معنا داری
مقدار ثابت معادله	-	۰/۵۵۴
مقاومت فشاری سنگ صخره	۰/۹۸۰	۰/۰۰۰
گردگوشگی سنگدانه‌ها	۰/۱۴۱	۰/۰۹۰

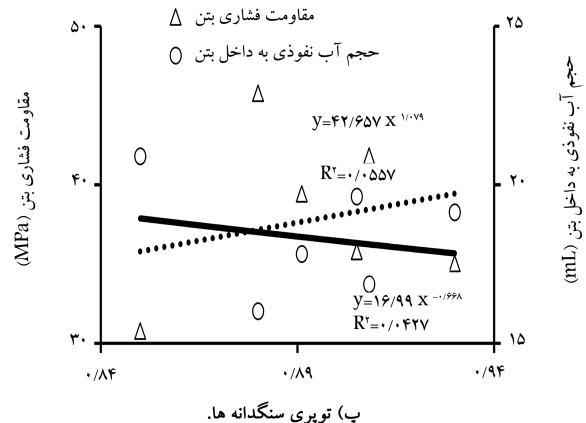
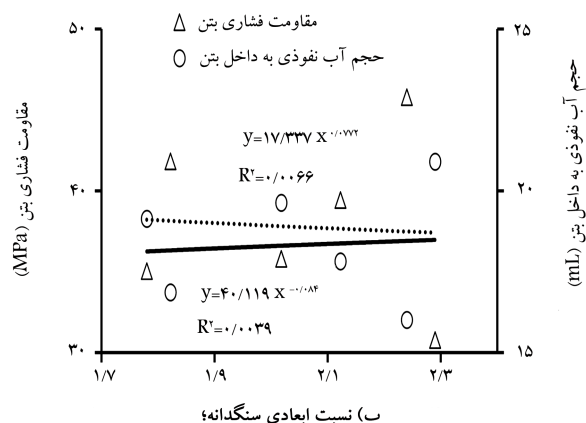
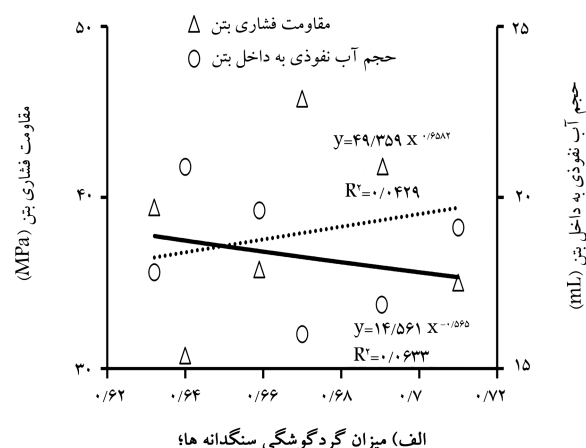
جدول ۶. نتایج به دست آمده برای ارزیابی میزان تأثیر حجم آب نفوذی به داخل سنگ صخره و گردگوشگی سنگدانه‌ها در نفوذپذیری بتن.

متغیر	ضریب رگرسیونی استاندارد شده	سطح معنا داری
مقدار ثابت معادله	-	۰/۰۴۱
حجم آب نفوذی به داخل سنگ صخره	۰/۹۵۰	۰/۰۰۴
گردگوشگی سنگدانه‌ها	-۰/۱۷۳	۰/۲۵۲

می‌یابد. همچنین، در یک حجم مشخص از بتن، با کاهش میزان توپری سنگدانه‌ها، مقدار خمیر سیمان افزایش می‌یابد. به دلیل اینکه غالباً خمیر سیمان، نفوذپذیری بیشتری نسبت به سنگدانه‌ها دارد، نفوذپذیری بتن نیز افزایش می‌یابد. همچنین، کاهش میزان توپری سنگدانه‌ها، با کاهش مقاومت فشاری بتن همراه خواهد بود. بافت سطحی سنگدانه‌ها نیز نقش بسزایی در مشخصات مکانیکی و دوامی بتن دارد. بافت سطحی زبرتر، به دلیل افزایش قفل و بست مکانیکی بین خمیر سیمان و سنگدانه، سبب افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود. قفل و بست مکانیکی بین سنگدانه‌های گردگوشه و خمیر سیمان کمتر از قفل و بست مکانیکی متناظر در اثر استفاده از سنگدانه‌های شکسته شده است.^[۵۲] باید توجه شود که شکل سنگدانه‌ها به نوع سنگ شکن و نوع سنگ صخره (ساختار آن) بستگی دارد.

برای مقایسه‌ی دقیق‌تر میزان تأثیر نوع و شکل سنگدانه‌ها در مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن، دو تحلیل رگرسیونی انجام شده است. در تحلیل رگرسیونی اول، میزان تأثیر گردگوشگی سنگدانه‌ها و مقاومت فشاری مغزه‌ی سنگ صخره در مقاومت فشاری بتن بررسی شده است. در تحلیل رگرسیونی دوم نیز میزان تأثیر گردگوشگی سنگدانه‌ها و حجم آب نفوذی به داخل سنگ صخره در نفوذپذیری بتن ارزیابی شده است. برای جلوگیری از هم‌خطی چندگانه، متغیرهایی که همبستگی بالایی با هم داشتند، از تحلیل‌های صورت گرفته حذف شده‌اند. نتایج به دست آمده از تحلیل‌های اخیر در جدول‌های ۵ و ۶ ارائه شده است.

مطابق جدول‌های ۵ و ۶، ضرایب رگرسیونی استاندارد شده‌ی محاسبه شده برای مقاومت فشاری و نفوذپذیری سنگ‌های صخره به مقدار قابل توجهی بزرگ‌تر از مقادیر متناظر به دست آمده برای متغیر گردگوشگی سنگدانه‌ها هستند (به‌طور میانگین ضرایب رگرسیونی استاندارد شده برای مقاومت فشاری و حجم آب نفوذی به داخل سنگ‌های صخره، ۶/۲۲ برابر ضرایب رگرسیونی استاندارد شده برای گردگوشگی سنگدانه‌ها محاسبه شده‌اند). سطوح معناداری به دست آمده برای متغیر گردگوشگی سنگدانه‌ها در جدول‌های ۵ و ۶ نیز نشان‌دهنده‌ی تأثیر ناچیز متغیر گردگوشگی در مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن نسبت به دو متغیر دیگر هستند. زیرا سطوح معناداری بزرگ‌تر از ۰/۰۵ برای گردگوشگی سنگدانه‌ها محاسبه شده است.



شکل ۱۰. رابطه‌ی بین حجم آب نفوذی و مقاومت فشاری بتن‌های حاوی سنگدانه‌های مختلف.

مقاومت بیشتر و نفوذپذیری کمتر، ابتدا باید نوع سنگدانه‌ی مصرفی را مدنظر قرار داد، زیرا مشخصات مکانیکی و دوامی بتن به شدت تحت تأثیر نوع سنگدانه‌ی مصرفی قرار دارد. پس از انتخاب نوع سنگدانه‌ها، برای دست‌یابی به مقاومت فشاری و نفوذپذیری مطلوب‌تر، باید به شکل و مشخصات هندسی سنگدانه‌ها نیز توجه کرد. زیرا در صورت استفاده از یک نوع سنگدانه، شکل و مشخصات هندسی سنگدانه‌ها تأثیر بسزایی در مشخصات بتن خواهند داشت. با افزایش میزان گردگوشگی و نسبت ابعادی سنگدانه‌ها، مقاومت فشاری کاهش و نفوذپذیری افزایش

۶. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، تأثیر سنگدانه‌های گرانیت، اندزیت، سیلیس، آهک، مرمر و توف در مقاومت فشاری و نفوذپذیری نمونه‌های بتنی مطالعه شده است. بدین منظور، مقاومت‌های فشاری، کششی، و سطحی، مقاومت در برابر ضربه و شاخص، سختی اشیمت، چگالی اشباع با سطح خشک، حجم آب نفوذی، تخلخل، جذب آب سنگدانه‌ها و سنگ‌های صخره با استفاده از آزمایش‌های مرتبط به دست آمده‌اند. همچنین، برای بررسی تأثیر شکل سنگدانه‌ها در مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن، گردگوشگی، توپری و نسبت ابعادی آن‌ها در مقاطع مختلف بتنی محاسبه شده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها می‌توان نتیجه گرفت که:

۱. با افزایش مقاومت فشاری و نفوذپذیری سنگ صخره، مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن حاوی سنگدانه‌های همان سنگ صخره نیز افزایش می‌یابد و بالعکس. برای افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری آن، ترتیب نوع سنگدانه‌های بررسی شده در نوشتار حاضر به این قرار بود: گرانیت، اندزیت، سیلیس، آهک، مرمر و توف؛

۲. مقاومت فشاری سنگ صخره از مقاومت فشاری بتن ساخته شده با سنگدانه‌های همان سنگ صخره بیشتر است. همچنین، سنگ صخره از بتن حاوی سنگدانه‌های همان سنگ صخره، نفوذناپذیرتر است. این رفتار می‌تواند به دلیل وجود دو فاز دیگر، یعنی خمیر سیمان و ناحیه‌ی مرزی ضعیف بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها باشد، که مقاومت کمتر و نفوذپذیری بیشتری نسبت به سنگ صخره دارند؛

۳. رابطه‌ی خطی مستقیم بین مقاومت‌های فشاری و سطحی اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های بتنی و سنگ‌های صخره وجود دارد. ضرایب همبستگی محاسبه شده برای رابطه‌ی اخیر برای نمونه‌های بتنی و سنگ‌های صخره که به ترتیب برابر با 0.95 و 0.89 به دست آمده‌اند، نشان می‌دهند که با استفاده از نتایج روش «پیچش» می‌توان مقاومت فشاری نمونه‌ها را با دقت بالایی تخمین زد؛

۴. همبستگی بالایی با ضرایب تعیین بزرگ‌تر از 0.73 بین مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن با مشخصات مکانیکی و دوامی سنگ‌های صخره و سنگدانه‌ها، مانند مقاومت‌های فشاری، کششی و سطحی، مقاومت در برابر ضربه و سایش، سختی اشیمت، چگالی اشباع با سطح خشک، تخلخل، جذب آب و نفوذپذیری وجود دارد. این متغیرها بیانگر میزان تراکم ساختاری، پیوستگی و ارتباط بین منافذ داخل سنگ صخره هستند؛

۵. ضرایب تعیینی کوچک‌تر از 0.1 برای تقریب روابط مشخصات هندسی سنگدانه‌ها، شامل: گردگوشگی، توپری و نسبت ابعادی با نفوذپذیری و مقاومت بتن‌های حاوی سنگدانه‌های مختلف محاسبه شده‌اند، که بیانگر تأثیر ناچیز شکل و مشخصات هندسی سنگدانه‌ها در مقایسه با تأثیر مشخصات مکانیکی و دوامی آن‌ها (نوع سنگدانه) در نفوذپذیری و مقاومت بتن است. بنابراین، لازم است که پس از انتخاب نوع سنگدانه، برای ساخت بتنی با مشخصات مطلوب‌تر (مقاومت فشاری بیشتر و نفوذپذیری کمتر)، به شکل سنگدانه نیز توجه کرد.

پانویس‌ها

1. Meddah
2. Tsado
3. Wu
4. Jiang
5. Toplicic-Curcic
6. Kong
7. Warda
8. Zhang
9. sphericity
10. circularity
11. solidity
12. aspect ratio

منابع (References)

1. 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 mechanical properties", *Case Studies in Construction Materials*, **7**, pp. 73-81 (2017).
2. Afroughsabet, V. and Ozbakkaloglu, T. "Mechanical and durability properties of high-strength concrete contain-
- ing steel and polypropylene fibers", *Construction and Building Materials*, **94**, pp. 73-82 (2015).
3. Mardani-Aghabaglou, A., Tuyan, M. and Ramyar, K. "Mechanical and durability performance of concrete incorporating fine recycled concrete and glass aggregates", *Materials and Structures*, **48**(8), pp. 2629-2640 (2015).
4. Zhang, J., Wang, L., Sun, M. and et al. "Effect of coarse/fine aggregate ratio and cement matrix strength on fracture parameters of concrete", *Engineering Mechanics*, **21**(1), pp. 136-142 (2004).
5. Akçaoğlu, 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 and Concrete Composites*, **26**(6), pp. 633-638 (2004).
6. Xu, J. and Li, F. "A meso-scale model for analyzing the chloride diffusion of concrete subjected to external stress", *Construction and Building Materials*, **130**, pp. 11-21 (2017).
7. Yu, F., Sun, D., Wang, J. and et al. "Influence of aggregate size on compressive strength of pervious concrete", *Construction and Building Materials*, **209**, pp. 463-475 (2019).
8. Sindhu, P. and Rajagopal, D. "Experimental investigation on maximum strength of pervious concrete using

- different size of aggregates", *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, **2**(10), pp. 706-708 (2015).
9. Ogundipe, O.M., Olanike, A.O., Nnochiri, E.S. and et al. "Effects of coarse aggregate size on the compressive strength of concrete", *Civil Engineering Journal*, **4**(4), pp. 836-842 (2018).
10. Fabien, A., Choinska, M., Bonnet, S. and et al. "Experimental study of aggregate size effects on mechanical behaviour and permeability of concrete", *Proceedings of 2ed International Conference on Microstructure-related Durability of Cementitious Composites*, Amsterdam, Netherlands, pp. 412-420 (2012).
11. Meddah, M.S., Zitouni, S. and Belâabes, S. "Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete", *Construction and Building Materials*, **24**(4), pp. 505-512 (2010).
12. Abdullahi, M. "Effect of aggregate type on compressive strength of concrete", *International Journal of Civil and Structural Engineering*, **2**(3), pp. 791-800 (2012).
13. Tsado, T.Y. "A comparative analysis of concrete strength using igneous, sedimentary and metamorphic rocks (crushed granite, limestone and marble stone) as coarse aggregate", *International Journal of Engineering Research and Technology*, **2**(9), pp. 179-191 (2013).
14. Wu, K.R., Chen, B., Yao, W. and et al. "Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete", *Cement and Concrete Research*, **31**(10), pp. 1421-1425 (2001).
15. Yehia, S., Abdelfatah, A. and Mansour, D. "Effect of aggregate type and specimen configuration on concrete compressive strength", *Crystals*, **10**(7), p. 625 (2020).
16. Vishalakshi, K., Revathi, V. and Reddy, S.S. "Effect of type of coarse aggregate on the strength properties and fracture energy of normal and high strength concrete", *Engineering Fracture Mechanics*, **194**, pp. 52-60 (2018).
17. Guo, Y., Wu, J., Wang, C. and et al. "Study on the influence of the shape and size of coarse aggregate on the strength of concrete", 780, 042008, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (2020).
18. Jiang, Z.L., Gu, X.L., Huang, Q.H. and et al. "Statistical analysis of concrete carbonation depths considering different coarse aggregate shapes", *Construction and Building Materials*, **229**, pp. 2-13 (2019).
19. Toplicic-Curcic, G., Grdić, Z., Ristic, R. and et al. "Aggregate type impact on water permeability of concrete", *Romanian Journal of Materials*, **42**(2), pp. 134-142 (2012).
20. Tijani, M., Ajagbe, W., Ganiyu, A. and et al. "Effect of aggregate type on properties of pervious concrete", *Journal of Modern Technology and Engineering*, **4**(1), pp. 37-46 (2019).
21. Argiz, C., Sanjuán, M. and Muñoz- Martialay, R. "Effect of the aggregate grading on the concrete air permeability", *Materiales de Construcción*, **64**(315), pp. 1-6 (2014).
22. Kong, L., Chen, X. and Du, Y. "Evaluation of the effect of aggregate on concrete permeability using grey correlation analysis and ANN", *Computers and Concrete*, **17**(5), pp. 613-628 (2016).
23. Warda, B.A. and Munaz, A.N. "Effects of aggregate gradation on water permeability of concrete", *Advanced Materials Research*, **488-489**, pp. 248-252 (2012).
24. Zhang, Y., Li, H., Abdelhady, A. and et al. "Effects of specimen shape and size on the permeability and mechanical properties of porous concrete", *Construction and Building Materials*, **266**, 121074 (2021).
25. Ghiasvand, E. "Investigation of effect of maximum size aggregate on properties of durability of normal concretes", *Journal of Concrete Structures and Materials*, **3**(1), pp. 20-29 (2018).
26. Chen, H., Zhu, Z., Lin, J. and et al. "Numerical modeling on the influence of particle shape on ITZ's microstructure and macro-properties of cementitious composites: a critical review", *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, **7**(4), pp. 248-269 (2018).
27. Liu, Q.F., Feng, G.L., Xia, J. and et al. "Ionic transport features in concrete composites containing various shaped aggregates: a numerical study", *Composite Structures*, **183**, pp. 371-380 (2018).
28. Naderi, M. "Determination of the permeability of concrete, stone, mortar, brick and other building construction materials using cylindrical chamber method", Intellectual Property Office (IRIPO), Patent Number 67726, Iran (2010).
29. Naderi, M. "Determination of material strength and adhesion", Intellectual Property Office (IRIPO), Patent Number 32502, Iran (2005).
30. Naderi, M., Kaboudan, A. and Akhavan Sadighi, A. "Comparative study on water permeability of concrete using cylindrical chamber method and British standard and its relation with compressive strength", *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, **6**(1), pp. 116-131 (2018).
31. Naderi, M. and Kaboudan, A. "Cylindrical Chamber: A new in situ method for measuring permeability of concrete with and without admixtures", *Journal of Testing and Evaluation*, **48**(3), pp. 2225-2241 (2020).
32. Naderi, M., Kaboudan, A. and Amin-Afshar, M. "Studying the strength and diffusion and permeability coefficients of concretes containing silica fume, fly ash, zeolite and limestone powder (in Persian)", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **36.2**(2.2), pp. 13-25 (2020).
33. Naderi, M. "New twist-off method for the evaluation of in-situ strength of concrete", *Journal of Testing and Evaluation*, **35**(6), pp. 602-608 (2007).
34. Naderi, M. "Using twist-off method for measuring surface strength of concretes cured under different environments", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **23**(4), pp. 385-392 (2011).
35. British Standard Institute. "BS EN 12390-8: testing hardened concrete-depth of penetration of water under pressure", (2009).
36. Naderi, M. and Kaboudan, A. "The effect of concrete constituent materials on the penetration of surface water", *AMIRKABIR Journal of Civil Engineering*, **53**(8), pp.1-19, (In Persian) (2020).

37. Naderi, M. and Kaboudan, A. "Evaluation of the effect of strength, duration and water pressure and concrete casting direction on concrete permeability", *AMIRKABIR Journal of Civil Engineering*, **52**(9), pp. 2379-2398 (In Persian) (2019).
38. Naderi, M., Kaboudan, A. and Kargarfard, K. "Studying the compressive strength, permeability and reinforcement corrosion of concrete samples containing silica fume, fly ash and zeolite", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **8**(2), (In Persian) (2019).
39. Naderi, M., Kaboudan, A. and Keshtkar, M. "Studying the permeability and strength of concretes containing silica fume, zeolite and fly ash using "Cylindrical chamber" method and British standard", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **7**(3), pp 92-113 (In Persian) (2020).
40. Bieniawski, Z.T. and Bernede, M.J. "Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **16**(2), pp. 138-140 (1979).
41. Bieniawski, Z.T. and Hawkes, I. "Suggested methods for determining tensile strength of rock materials", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **15**, pp. 99-103 (1978).
42. Bamford, W.E., Duyse, H., Nieble, C. and et al. "Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks. Part 2. Suggested method for determination the resistance to abrasion of aggregate by use of Los Angeles machine", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **15**(3), pp. 89-97 (1978).
43. Aydin, A. "ISRM suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: revised version", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **46**, pp. 627-634 (2009).
44. Franklin, J.A. "Suggested methods for determining water-content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties. Part 3. Suggested method for porosity/density determination using saturation and buoyancy techniques", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **16**(2), pp. 143-151 (1979).
45. ASTM International, "ASTM C127-15: Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate", (2015).
46. Sharifi, J., Nikudel, M. and Yazdani, M. "Effect of physical and mechanical properties of aggregate on concrete (in Persian)", *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, **6**(1 & 2), pp. 67-82 (2013).
47. Sharifi, J., Nikudel, M. and Yazdani, M. "Study of Interfacial Bond between Aggregate and Cement paste in Concrete", *Modares Civil Engineering Journal*, **16**(1), pp.209-218 (In Persian) (2016).
48. Ghasemi, S., Nikudel, M., Raeis Ghasemi, A.M. and et al. "Effect of type and texture of aggregates on strength properties of sulfur concrete and portland concrete", *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, **14**(1-1), pp. 29-42 (In Persian) (2020).
49. Góra, J. and Piasta, W. "Impact of mechanical resistance of aggregate on properties of concrete", *Case Studies in Construction Materials*, **13**, e00438 (2020).
50. Kiliç, A., Atiş, C., Teymen, A. and et al. "The influence of aggregate type.; Bilim, F. and on the strength and abrasion resistance of high strength concrete", *Cement and Concrete Composites*, **30**(4), pp. 290-296 (2008).
51. Rocco, C. and Elices, M. "Effect of aggregate shape on the mechanical properties of a simple concrete", *Engineering Fracture Mechanics*, **76**(2), pp. 286-298 (2009).
52. Polat, R., Yadollahi, M.M., Sagsoz, A.E. and et al. "The correlation between aggregate shape and compressive strength of concrete: digital image processing approach", *International Journal of Structural Civil Engineering Research*, **2**(3), pp. 63-80 (2013).