

ارزیابی مقاومت فشاری بتن خودتراکم سنگین به روش غیر مخرب

اسمعیل برهانی پاسکیانی *

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران.

رحمت مدندوست

استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

حسین پروینی ثانی

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران.

چکیده

امروزه بتن‌های سنگین کاربرد گسترده‌ای در ابنیه، پل‌ها، نیروگاه‌ها و مراکز پزشکی دارند. هدف این پژوهش، ارزیابی مقاومت بتن خودتراکم سنگین با آزمایش‌های غیرمخرب است. در این تحقیق، تأثیر جایگزینی سنگ‌دانه سنگین وزن مگنتیت (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ درصد) در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز بتن برای شش طرح اختلاط آزمایش شد. همچنین، از ۶٪ میکروسیلیس (ماده واکنشی و پرکننده) به جای سیمان و ۲۵٪ پودر سنگ آهک (پرکننده) به جای ماسه استفاده گردید. نتایج نشان داد، افزودن میکروسیلیس با بهبود خاصیت واکنشی و پرکنندگی، مقاومت فشاری بتن را ۸٪ افزایش می‌دهد. جایگزینی ۵۰٪ مگنتیت، باعث افزایش مقاومت فشاری بتن حدود ۱۰ مگاپاسکال شد؛ در حالی که جایگزینی کامل، ۵ مگاپاسکال افزایش مقاومت ایجاد کرد. با افزایش سن بتن، سرعت پالس التراسونیک افزایش یافت؛ در ۹۰ روز، طرح با ۵۰٪ مگنتیت، ۱/۷٪ و طرح با میکروسیلیس حدود ۲ تا ۳٪ افزایش سرعت را نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: بتن سنگین، آزمایش‌های بتن تازه، مقاومت فشاری، التراسونیک، چکش اشمیت.

* نویسنده مسئول: es.borhani.p@gmail.com

۱- مقدمه

امروزه تکنولوژی بتن در دنیا رشد چشمگیری داشته است که منجر به تولید و پیدایش بتن‌های نوین متنوعی گردیده است که از جمله آنان می‌توان به بتن سنگین^۱ اشاره نمود. بتن سنگین یا بتن با چگالی زیاد در لغت‌نامه مؤسسه بتن و سیمان آمریکا (ACI-116R) چنین تعریف شده است: بتنی که اساساً دارای وزن مخصوص بیشتری نسبت به بتن‌های ساخته شده با سنگ‌دانه‌های معمولی می‌باشد و معمولاً با استفاده از سنگ‌دانه‌های سنگین تهیه شده و در موارد خاص به عنوان سپر محافظ در مقابل تشعشع به کار می‌رود [۱]. مثال‌های متعددی از کاربرد و موارد استفاده از بتن سنگین با سنگ‌دانه‌های سنگین وزن در سازه‌های بتنی می‌توان بیان نمود؛ از جمله می‌توان به ابنیه، پل، سد، سیلو، نیروگاه‌ها و مراکز پزشکی اشاره نمود. همچنین از بتن سنگین در شرایطی که نیاز به وزن زیادی در حجم کمتر باشد؛ مانند خطوط لوله‌ی دریایی، سازه‌های موج‌شکن یا وزنه‌های تعادل نیز می‌توان استفاده نمود. بتن سنگین- وزن، از سنگ‌دانه‌های سنگین تشکیل شده که وزن مخصوص آن حدود ۱/۵ تا ۲/۵ برابر بتن معمولی می‌باشد (وزن واحد حجم بتن معمولی حدوداً 2400 kg/m^3 است). بتن با چگالی (وزن مخصوص) بیش از 2600 kg/m^3 بتن سنگین در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، سنگ‌دانه‌هایی با وزن مخصوص بیش از 3000 kg/m^3 به عنوان سنگ‌دانه‌های سنگین شناخته می‌شوند [۲]. سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در بتن سنگین وزن، سنگ‌دانه‌های مگنتیت، باریت، لیمونیت، هماتیت، ایلمنیت و غیره می‌باشند و وزن مخصوص سنگ‌دانه‌های مگنتیت و باریت تقریباً در حدود ۳۰٪ بیشتر از سنگ‌دانه‌های دیگر می‌باشند. همچنین سنگ‌دانه مگنتیت سختی، خاصیت مغناطیسی و عیار آهن بالاتری نسبت به سایر سنگ‌دانه‌های سنگین وزن دارد.

از سوی دیگر، با توجه به وزن مخصوص زیاد سنگ‌دانه‌های سنگین وزن و ماهیت سنگینی که دارند، می‌توانند بر روی ساختار بتن، به‌ویژه در شرایط بتن تازه تأثیرات منفی داشته باشند که بر روی کیفیت بتن سخت‌شده از نظر مقاومت نیز اثرگذار می‌باشد که منجر به ایجاد مشکلاتی در تولید و اجرای آن خواهد شد.

عمده‌ترین مسأله بتن‌های سنگین، پدیده جدایشگی سنگ‌دانه‌ها می‌باشد. علت اصلی این مسأله تفاوت زیاد وزن مخصوص سنگ‌دانه سنگین وزن با سایر عناصر بتن می‌باشد که این سنگ‌دانه‌ها از بتن جدا می‌شوند؛ به این ترتیب همگنی بتن از بین می‌رود [۴]. بنابراین، اگر ذرات سنگ‌دانه به اندازه کافی سنگین باشد که بتواند بر نیروی شناوری اعمال شده توسط ملات غلبه کند، شروع به ته‌نشین شدن می‌کند [۵]. خطر جداسازی با افزایش قوام بتن تازه به دلیل تحرک بیشتر سنگ‌دانه درشت در ماتریس ملات تازه افزایش می‌یابد [۶]. بنابراین برای ساخت بتن سنگین به‌ویژه در سازه‌های مرتفع و عناصری که نیاز به پمپاژ بتن دارند، باید اقدامات اجرایی ویژه‌ای برای جلوگیری از این پدیده انجام شود [۷-۱۰]. مشکل پدیده جدایشگی سنگ‌دانه با استفاده از اجرای بتن خودتراکم (SCC)^۲ تا حدودی زیادی برطرف می‌گردد. همچنین با توجه به تراکم میلگرد در عضو سازه‌ای نیاز به استفاده از بتن خودتراکم به دلیل روانی و حل مشکل جدایشگی سنگ‌دانه‌ها برای بتن سنگین نیز مطرح می‌گردد [۱۱].

تحقیقات متعددی در زمینه‌ی بتن سنگین انجام شده است. به عنوان مثال، در سال ۲۰۱۴، سینق^۳ و رامانا^۴ [۷] خواص مکانیکی بتن سنگین با استفاده از سنگ‌دانه درشت وزن هماتیت (سنگ آهن با عیار بالا Fe58) را بررسی کردند. در این مقاله، سنگ‌دانه درشت با سنگ‌دانه درشت هماتیت از صفر تا ۵۰٪ حجمی جایگزین شده و همچنین از ماسه طبیعی به عنوان سنگ‌دانه ریز و سه میزان میکروسیلیس ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ وزنی سیمان استفاده شد. نتایج نشان داد که هماتیت را می‌توان برای ساخت بتن سنگین بدون تأثیر زیاد بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی بتن استفاده کرد و با افزایش درصد میکروسیلیس، میزان مقاومت فشاری بتن افزوده می‌شود.

در سال ۲۰۱۵، اودا^۵ [۱۲] به توسعه بتن با چگالی سنگین با کارایی بالا با استفاده از سنگ‌دانه‌های مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که مخلوط بتن حاوی سنگ‌دانه درشت مگنتیت با ۱۰٪ دوده سیلیس به بالاترین میزان مقاومت فشاری می‌رسد. مقاومت فشاری بتن حاوی سنگ‌دانه باریت بسیار نزدیک به بتن حاوی ۶۰٪ مگنتیت

^۴ Ramana^۵ Ouda^۱ Heavyweight Concrete^۲ Self-Compacting Concrete^۳ Singh

جداگانه می‌تواند در تعیین مقاومت فشاری بتن معمولی موثر باشد؛ با این حال، ضریب همبستگی بین مقاومت فشاری بتن و امواج التراسونیک $0/3$ و ضریب همبستگی بین مقاومت فشاری بتن و عدد بازگشت چکش اشمیت عدد $0/34$ بدست آمد که ضریب همبستگی بالایی نمی‌باشد (نزدیک به یک) که دلیل آن تفاوت در تراکم نمونه‌ها و خطای آزمایشگاهی می‌باشد.

در سال ۲۰۲۱، اصلانی^۶ و همکاران [۳] به توسعه و تجزیه و تحلیل بتن سنگین وزن با مقاومت بالا با استفاده از سنگ‌دانه‌های مگنتیت پرداختند. در این مطالعه، ۹ مخلوط بتن سنگین با استحکام بالا بسیار کارآمد توسعه یافت و خواص تازه و سخت شده مورد بحث قرار گرفت. نتایج نشان داد که با جایگزینی ۱۰۰٪ سنگ‌دانه‌های سنگین وزن مگنتیت با درشت‌دانه در نسبت آب به سیمان $0/3$ ، مقاومت فشاری ۲۸ روزه تقریباً برابر با نسبت جایگزینی صفر و ۵۰٪ سنگ‌دانه‌های سنگین وزن مگنتیت با درشت‌دانه می‌شود. همچنین، با کاهش نسبت آب به سیمان، تأثیر میزان جایگزینی سنگ‌دانه‌های سنگین وزن ملموس‌تر بوده، به طوریکه مقاومت فشاری بتن با افزایش میزان جایگزینی سنگ‌دانه‌های سنگین وزن در نسبت آب به سیمان کمتر، افزایش می‌یابد. هیچ روند ثابتی وجود نداشت که بتواند رابطه بین سطوح جایگزینی مگنتیت و مقاومت کششی را نشان دهد. در سال ۲۰۲۴ وینکیتاسامی^۷ و همکاران [۱۶] خواص مکانیکی و دوام بتن سنگین با درجه سازه‌ای با خاکستر بادی و سرباره را بررسی نمودند. جایگزینی سیمان با خاکستر بادی در سطوح ۱۵٪، ۲۵٪، ۳۵٪ و سرباره در سطوح ۴۰٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ انجام شد. بررسی تجربی نشان داد که کرنش انقباض خشک کردن طولانی‌مدت برای همه بتن‌های سنگین حاوی خاکستر بادی (۱۵٪ تا ۳۵٪) کمتر از سیمان پرتلند ۱۰۰٪ معمولی و همه بتن‌های سنگین حاوی سرباره است.

در سال ۱۴۰۳، عیسی‌زاده و مدندوست [۱۷]، به تأثیر میکروسیلیس و الیاف فولادی بر کاهش پدیده جداشدگی در بتن سنگین پرداختند. نتایج نشان داد که حضور میکروسیلیس در بتن سنگین- وزن منجر به افزایش مقاومت فشاری به‌ویژه سنین اولیه (۷ روز) تا حدود ۲۰٪ می‌گردد. همچنین، سرعت عبور امواج التراسونیک در

در بیش از ۹۰ روز بود. نتایج همچنین نشان داد که مقاومت فشاری بتن با کارایی بالا حاوی مگنتیت به عنوان سنگ‌دانه ریز به طور قابل توجهی بیشتر از مقاومت فشاری حاوی ماسه به میزان ۲۳٪ بود. از سوی دیگر، بتن ساخته شده با سنگ‌دانه ریز مگنتیت دارای خواص فیزیکی و مکانیکی بالاتری نسبت به بتن‌های حاوی باریت و گوتیت است.

در سال ۲۰۱۹، صدر ممتازی و همکاران [۱۳] به بررسی پارامترهای شکست بتن مگنتیت سنگین وزن با نسبت‌های مختلف آب به سیمان به سه روش پرداختند. در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر نسبت‌های مختلف آب به سیمان ($W/C=0/4-0/7$) بر ویژگی‌های شکست بتن سنگین، آزمایش‌های خمشی سه نقطه‌ای بر روی ۲۲۴ تیر انجام شد. سپس پارامترهای شکست با استفاده از روش کار از شکست (WFM)^۱، روش اثر اندازه (SEM)^۲ و روش اثر مرزی (BEM)^۳ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که نسبت آب به سیمان به طور قابل توجهی بر پارامترهای شکست بتن- های سنگین تأثیر می‌گذارد. کاهش نسبت آب به سیمان همچنین سطح شکست، اندازه ناحیه انعطاف‌پذیری نوک ترک، طول ناحیه فرآیند شکست (C_f)^۴ در SEM و طول مشخصه (L_{ch})^۵ WFM را کاهش می‌دهد. در سال ۲۰۲۰، عمران لطفی و همکاران [۱۴] تأثیر حداکثر اندازه سنگ‌دانه و محتوای سیمان بر ویژگی‌های مکانیکی و محافظت تشعشعی بتن سنگین را بررسی نمودند. در این بررسی، تأثیر محتوای سیمان (۳۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب)، حداکثر اندازه سنگ‌دانه (۱۲/۵، ۱۹ و ۲۵ میلی‌متر) و نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و ۰/۶۵ بر ویژگی‌های محافظ بتن مگنتیت سنگین وزن در برابر تابش اشعه گاما مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش ماکزیمم اندازه سنگ‌دانه و کاهش محتوای سیمان و نسبت آب به سیمان، شار عبوری کاهش می‌یابد و ویژگی‌های محافظ بتن سنگین وزن مگنتیت بهبود می‌یابد. در سال ۱۳۹۸، غدیری و مناف‌پور [۱۵] به ارزیابی آزمایشگاهی مقاومت فشاری بتن معمولی با استفاده از آزمایشات غیرمخرب التراسونیک و چکش اشمیت و مقایسه با نتایج با روش مخرب پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که آزمایش‌های مخرب و غیرمخرب به طور

⁵ Characteristic Length

⁶ Aslani

⁷ Venkitasamy

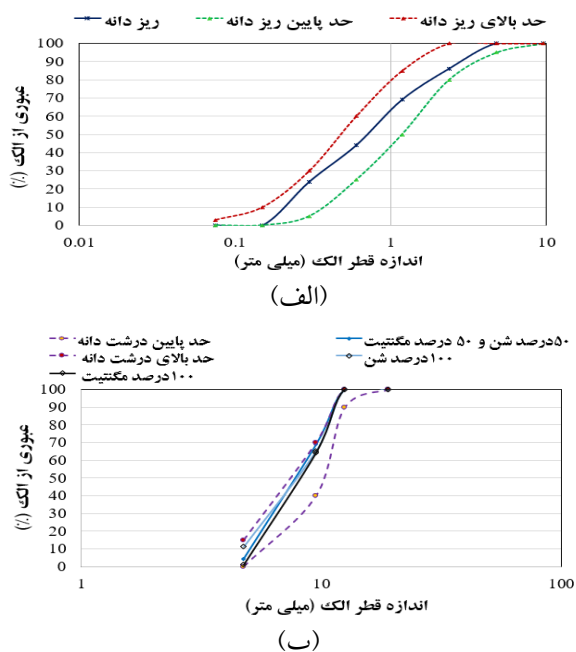
¹ Work of Fracture Method

² Size Effect Method

³ Boundary Effect Method

⁴ Length of the fracture process zone

محدوده استاندارد ASTM C33 [۱۸] مطابق شکل (۱) می باشد که بزرگترین اندازه شن مصرفی ۱۲ میلی متر در نظر گرفته شد. دانه بندی درشت دانه مربوط به ۱۰۰٪ شن، ۵۰٪ شن و ۵۰٪ مگنتیت، ۱۰۰٪ مگنتیت می باشد.



شکل ۱- دانه بندی ریزدانه و درشت دانه: الف) دانه بندی ماسه، ب) دانه بندی شن

لازم به ذکر است، ماسه مصرفی به میزان ۴۵٪ و شن به میزان ۵۵٪ در طرح مخلوط در نظر گرفته شد. برای سنگ دانه سنگین وزن مگنتیت از استاندارد ASTM C637 استفاده می شود [۱۹]. شکل (۲) سنگ دانه مگنتیت مصرفی با قطر ۱۲ میلی متر را نشان می دهد.



شکل ۲- درشت دانه مگنتیت

سیمان مصرفی برای بتن، سیمان پرتلند بر طبق استاندارد ASTM C150 [۲۰]، از نوع تیپ دو دیلمان گیلان و آب مصرفی از آب شرب شهرستان رشت می باشد. مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی در جدول (۱) ارائه شده است. به جهت بالا بردن روانی و خود تراکمی بتن از فوق روان کننده

بتن سنگین وزن با میکروسیلیس ۷/۵٪ بیشتر از بتن سنگین وزن بدون میکروسیلیس می باشد.

هدف این مقاله بررسی خواص تازه و سخت شده بتن خودتراکم سنگین حاوی مگنتیت با درصد جایگزینی صفر، ۵۰ و ۱۰۰ درصد با و بدون میکروسیلیس (۶٪ وزنی سیمان در نقش واکنشی و پرکنندگی) به همراه پودر سنگ آهک (۲۵٪ وزنی ماسه به عنوان پرکننده) می باشد. آزمایش های بتن تازه شامل اسلامپ، آزمایش قیف V و L-Box برای بررسی روانی و کارایی بتن خودتراکم سنگین مورد بررسی قرار می گیرند. آزمایش های بتن سخت شده شامل مقاومت فشاری (شرایط عمل آوری مرطوب)، التراسونیک و چکش اشمیت در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نیز انجام می پذیرد تا خصوصیات مکانیکی بتن های خودتراکم سنگین ارزیابی گردد. تاکنون تحقیقات محدودی به منظور ارزیابی مقاومت فشاری بتن خودتراکم سنگین وزن به دلیل عدم ته نشینی سنگ دانه های سنگین - وزن انجام شده است. از سوی دیگر، ماهیت روش های التراسونیک و چکش اشمیت در ارزیابی مقاومت فشاری بتن نمی باشد. به طوریکه، در چکش اشمیت صرفاً بررسی سختی با تاکید بر پوسته - ی سیمانی و در امواج التراسونیک نیز مدت زمان عبور موج برای بررسی ساختار عمقی نمونه، مورد ارزیابی قرار می گیرد. فلذا، برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن به روش غیرمستقیم از نمودارهای کالیبره استفاده می شود که این نمودار رابط بین شاخص اندازه گیری شده در روش غیرمخرب با مقاومت فشاری نمونه های استاندارد می باشد که در این مقاله مورد بررسی قرار می گیرد که نوآوری تحقیق می باشد.

۲- ساخت نمونه ها و انجام آزمایش

۲-۱- مصالح مصرفی

در این مقاله مصالح مصرفی شامل سنگ دانه های سنگین وزن (مگنتیت) از معدن زنجان و سنگ دانه های درشت (شن) و سنگ دانه های ریزدانه (ماسه) از مصالح استاندارد در لوله سازی بتنی گیلان تهیه شده است. همچنین وزن مخصوص سنگ دانه دانه طبیعی 2800 Kg/cm^3 و وزن مخصوص سنگ دانه مگنتیت 4570 Kg/cm^3 اندازه گیری شده است که نشان می دهد وزن مخصوص سنگ دانه طبیعی حدود $1/63$ برابر وزن مخصوص سنگ دانه طبیعی است. نمودار دانه بندی شن و ماسه مصرفی در

جهت عمل آوری نمونه‌ها پس از قالب‌گیری به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق زیر پوشش پلاستیک برای حفظ رطوبت نگهداری شده و پس از خارج کردن از قالب‌ها تا زمان انجام آزمایشات در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در محیط عمل آوری طبق استاندارد ASTM C192 نگهداری شدند [۲۲].

۲-۲- طرح اختلاط و آماده سازی نمونه‌ها

در این تحقیق برای ساخت نمونه‌ها از شش نوع طرح اختلاط (سه طرح اختلاط بدون پودر میکروسیلیس و سه طرح اختلاط با پودر میکروسیلیس (۶٪ وزنی سیمان)) مطابق جدول (۳) استفاده گردیده است. پودر سنگ آهک به میزان ۲۵٪ وزنی ماسه به‌عنوان پرکننده مورد استفاده قرار گرفت.

ماسه با قطر صفر تا ۵ میلی‌متر در طرح اختلاط مورد استفاده قرار گرفت. میزان ماسه و شن مصرفی به ترتیب ۴۵٪ و ۵۵٪ و نسبت آب به سیمان برای تمامی طرح اختلاط‌ها مقدار ثابت ۰/۴۵ در نظر گرفته شده است. به منظور حفظ کارایی بتن تازه، به ترکیبات فوق‌روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات به مقدار حداکثر ۹ کیلوگرم بر مترمکعب (۲٪ وزنی سیمان) اضافه گردید.

پلی‌کربوکسیلات طبق استاندارد ASTM C494 [۲۱] استفاده شد. میزان پلی‌کربوکسیلات (فرکوپلاست^۱) مصرفی ۲٪ وزنی سیمان در طرح اختلاط بوده و از شرکت شیمی ساختمان تهران تهیه شده است. همچنین، به جهت بهبود بخشیدن به خواص مکانیکی و بالا بردن مقاومت و همچنین دوام این نوع بتن (بتن سنگین وزن) از پودر میکروسیلیس (۶٪ وزنی سیمان) و پودر سنگ آهک (۲۵٪ وزنی جایگزین ماسه) نیز استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سیمان پرتلند تیپ ۲ دیلمان گیلان

انبساط	۰/۷-۰/۹
زمان گیرش اولیه (دقیقه)	۱۱۵-۱۳۰
زمان گیرش نهایی (دقیقه)	۱۹۰-۲۰۵
بلین (cm ² /gr)	۳۰۰۰-۳۲۰۰

هر دو این مصالح از شرکت سراپوش از معادن همدان تهیه شده است. مشخصات پودر میکروسیلیس در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات پودر میکروسیلیس

سیلیس (%)	رطوبت (%)	چگالی (kg/m ³)	بلین (m ² /gr)
۹۲	۰/۲۶	۲۱۵	۲۲

جدول ۳- طرح اختلاط بتن خودتراکم سنگین و غیرسنگین برای ساخت یک مترمکعب بتن

نام طرح	شن (Kg)	سنگ‌دانه (Kg)	سیمان (Kg)	ماسه (۵-۰ میلی‌متر) (Kg)	پودر سنگ آهک (Kg)	پودر میکروسیلیس (Kg)	آب (Kg)	فوق‌روان‌کننده (%)
SCC0	۸۱۰	۰	۴۵۰	۷۴۲/۵۰۰	۲۴۷/۵۰۰	-	۲۰۲/۵۰۰	۲
SCC0-MS	۸۱۰	۰	۴۲۳	۷۴۲/۵۰۰	۲۴۷/۵۰۰	۲۷	۲۰۲/۵۰۰	۲
SCC50	۴۰۵	۴۰۵	۴۵۰	۷۴۲/۵۰۰	۲۴۷/۵۰۰	-	۲۰۲/۵۰۰	۲
SCC50-MS	۴۰۵	۴۰۵	۴۲۳	۷۴۲/۵۰۰	۲۴۷/۵۰۰	۲۷	۲۰۲/۵۰۰	۲
SCC100	۰	۸۱۰	۴۵۰	۷۴۲/۵۰۰	۲۴۷/۵۰۰	-	۲۰۲/۵۰۰	۲
SCC100-MS	۰	۸۱۰	۴۲۳	۷۴۲/۵۰۰	۲۴۷/۵۰۰	۲۷	۲۰۲/۵۰۰	۲

L-Box و قیف V و آزمایش‌های بتن سخت شده (وزن مخصوص، مقاومت فشاری، چکش اشमित، التراسونیک) می‌باشد.

آزمایش‌های بتن سخت‌شده در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز انجام گردید و نتایج حاصل از میانگین حداقل سه نمونه ساخته شده از

بتن SCC حاوی سنگ‌دانه طبیعی با میزان جایگزینی سنگ‌دانه سنگین وزن مگنتیت با شن برابر با صفر، ۵۰ و ۱۰۰ ارائه شده است. همچنین نمونه‌های حاوی میکروسیلیس به میزان ۶٪ وزنی سیمان با حروف MS در جدول (۳) نامگذاری شده‌اند.

آزمایش‌ها شامل آزمایش‌های بتن تازه (آزمایش جریان اسلامپ،

^۱ FARCO PLAST PS10

در این آزمایش مدت زمان خروج بتن از قیف V اندازه گیری شده و به عنوان معیاری برای تعیین قابلیت پرمکنندگی، لزجت خمیری و تعیین جداشدگی بتن مورد استفاده قرار می گیرد.

۳-۲- آزمایش های بتن سخت شده

آزمایش های بتن سخت شده شامل وزن مخصوص بتن سخت شده طبق استاندارد ASTM C138 [۲۶]، مقاومت فشاری طبق استاندارد EN BS 12390 [۲۷]، چکش اشमित طبق استاندارد ASTM C805 [۲۸] و التراسونیک طبق استاندارد ASTM C597 [۲۹] می باشد. در ادامه به توضیحاتی در زمینه آزمایش چکش اشमित و التراسونیک پرداخته می شود.

چکش اشमित روشی سریع، کم هزینه و غیرمخرب هم در آزمایشگاه و هم در محل برای تعیین مقاومت فشاری بتن می باشد. هدف از این آزمایش تعیین یکنواختی بتن در سازه و یا مقایسه تغییر کیفیت بتن در نقاط مختلف یک سازه است و نمی توان این روش را به عنوان جایگزین آزمایش مقاومت فشاری استاندارد استفاده نمود. این آزمایش نسبت به تغییرات موضعی در جنس بتن حساس می باشد. بعلاوه، انرژی که بتن جذب می کند، هم با مقاومت و هم با سختی آن ارتباط دارد. به طوریکه، ترکیب مقاومت و سختی کنترل کننده برجهندگی می باشد. آزمایش چکش اشमित برجهندگی فقط خواص سطح بتن را می سنجد. به علت پراکندگی موضعی در سختی بتن در یک مساحت کوچک، عدد برجهندگی باید در تعدادی از نقاط نزدیک به یکدیگر تعیین شوند و سپس از نتیجه آن ها میانگین گرفته شود.

همچنین، از روش های غیرمخرب، می توان به روش التراسونیک اشاره نمود. اساس این آزمایش بر مبنای تعیین سرعت عبور امواج ماورای صوت از میان اجسام قرار دارد. در این روش توسط دستگاه التراسونیک پالس های الکترونیکی ایجاد می گردد. سپس توسط مبدل های فرستنده، این پالس های الکترونیکی بصورت امواج ارتعاشی بین ۲۰ تا ۵۰ کیلوهرتز تبدیل شده و پس از عبور امواج از طول معین L از بتن توسط یک مبدل گیرنده، دریافت و به صورت سیگنال الکترونیکی تبدیل می شود. مدار الکترونیکی دستگاه قادر است که زمان عبور پالس را بر حسب ± 0.1

طرح اختلاط می باشد. تمامی آزمایش ها در دانشکده فنی شهید چمران رشت انجام شده است.

۳-۱- آزمایش های بتن تازه و سخت شده

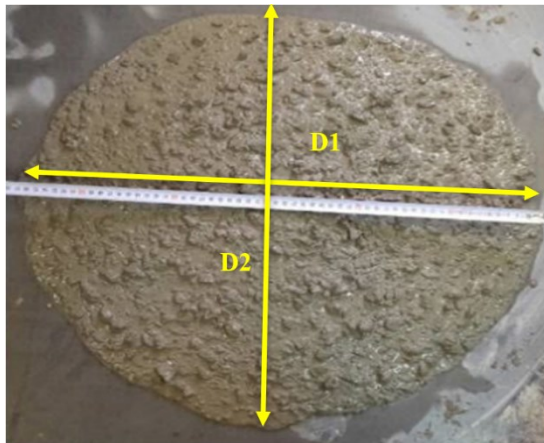
۳-۱-۱- آزمایش های بتن تازه

آزمایش های بتن تازه شامل آزمایش جریان اسلامپ، L-Box و قیف V می باشد. در آزمایش جریان اسلامپ قطر دایره ایجاد شده بعد از بلند کردن مخروط که به جریان اسلامپ معروف است به عنوان معیاری برای روانی بتن اندازه گیری می شود و زمان رسیدن بتن به قطر ۵۰ سانتیمتر T50 نیز، به عنوان معیاری از ویسکوزیته بتن است. در این روش به جای اندازه گیری افت و فرونشستن مخروط بتن، قطر متوسط پهن شدگی بتن در سطح زمین اندازه گیری می شود که میزان پرنشده و جریانی بتن خودتراکم را نشان می دهد [۲۳]. قطر نهایی بتن نشان دهنده تنش تسلیم بتن تازه و معیار سنجش قابلیت پرمکنندگی بتن تازه است؛ به طوریکه اگر میانگین دو قطر کمتر از ۵۵ سانتیمتر باشد، تنش تسلیم بتن زیاد و کارپذیری آن کم است. در صورتیکه این مقدار بیش از ۸۵ سانتی متر باشد ویسکوزیته خمیری کم بوده و احتمال ناپایداری وجود دارد.

هدف از آزمایش L-Box بررسی قابلیت پرمکنندگی و عبور بتن خودتراکم است. به طوریکه، افزایش حجم خمیر سیمان سبب افزایش قابلیت عبور می شود [۲۴ و ۲۵]. همچنین، می توان وجود یا عدم پدیده انسداد ناشی از حضور میلگردها را مشاهده کرد. زمان پر شدن بتن در ناحیه افقی به فواصل ۲۰ (در زمان ۲۰ ثانیه) و ۴۰ (در زمان ۴۰ ثانیه) سانتی متر اندازه گیری می شود. موسسه ICAR^۱ مقدار مناسب انسداد را بین ۰/۸ تا ۰/۸۵ پیشنهاد کرده است. موسسه EFNARC^۲ و انجمن بتن آمریکا مقدار مناسب این نسبت را بین ۰/۸ تا ۱ مناسب می داند.

آزمایش قیف V، برای تعیین زمان جریان بتن خودتراکم ساخته شده توسط دستگاه V شکل انجام می شود. هدف از این آزمایش بررسی قابلیت پرمکنندگی و عبور بتن از بین فضاهای باریک می باشد. قیف بایستی بدون آنکه تراکمی صورت گیرد و یا ضربه ای به بدنه ظرف وارد شود، از بتن پر شود و سطح آن صاف شود.

نشان می‌دهد که تأثیر سنگ‌دانه سنگین وزن بر روی خصوصیات بتن تازه بیشتر بوده است. به طوریکه، در نمونه حاوی میکروسیلیس بدون سنگ‌دانه سنگین وزن (SCC0-MS) نسبت به نمونه حاوی میکروسیلیس با سنگ‌دانه سنگین وزن (SCC50-MS) این عدد از ۰/۸۵ به ۰/۹۴ رسیده است.



شکل ۳- اندازه‌گیری جریان اسلامپ بتن خودتراکم

جدول ۴- نتایج آزمایش‌های بتن تازه نمونه‌های بتن خودتراکم سنگین و غیرسنگین

نام طرح اختلاط	میانگین قطر اسلامپ (سانتی‌متر)	آزمایش L-Box	آزمایش قیف V (ثانیه)
SCC0	۶۳/۵	۰/۸۱	۱۰
SCC0-MS	۷۰/۵	۰/۸۵	۱۰
SCC50	۷۲/۵	۰/۹۴	۱۰
SCC50-MS	۷۲/۵	۰/۹۴	۱۰
SCC100	۷۲/۵	۰/۹۶	۱۰
SCC100-MS	۷۲/۵	۰/۹۷	۹
محدوده پیشنهادی EFNARC	اسلامپ < 55 < 85	انسداد < 0.8 < 1	۱۰



شکل ۴- آزمایش L-Box بتن خودتراکم

میکروثانیه اندازه‌گیری کند. سرعت موج مستقیماً تعیین نشده بلکه از روی مدت زمانی که یک پالس مسافت معینی را طی می‌کند، محاسبه می‌گردد. بر حسب رابطه‌ی (۱) بدست می‌آید:

$$V = \frac{L}{T} \quad (1)$$

که V: سرعت پالس (بر حسب Km/s یا m/s)، L: طول مسیر پالس و T زمان عبور پالس، مدت زمانی که پالس از طول L عبور می‌کند، می‌باشد. این آزمایش برای تعیین یکنواختی بتن در یک عضو یا در بین اعضای سازه، کشف وجود ترک و اندازه‌گیری عمق آن و دیگر نارسایی‌ها، مانند: منافذ، اندازه‌گیری تغییرات خواص بتن با زمان و تعیین مقاومت بتن کاربرد دارد. رابطه سرعت پالس با مقاومت فشاری نسبت مستقیم دارد و سرعت بالاتر پالس نشان دهنده کیفیت مطلوب‌تر بتن می‌باشد. سرعت پالس برای بتن معمولی از ۳۷۰۰ تا ۴۲۰۰ متر بر ثانیه است [۳۰].

۴- بحث و بررسی نتایج

برای بررسی خصوصیات مکانیکی و فیزیکی بتن‌های تازه و سخت‌شده ساخته شده شامل بتن خودتراکم معمولی و سنگین، آزمایش‌های اسلامپ، L-Box و قیف V شکل برای بررسی روانی و کارایی بتن تازه و آزمایش‌های وزن مخصوص، مقاومت فشاری (در شرایط عمل‌آوری مرطوب)، چکش اشمیت و التراسونیک برای بررسی خصوصیات مکانیکی و فیزیکی بتن سخت‌شده انجام شده است.

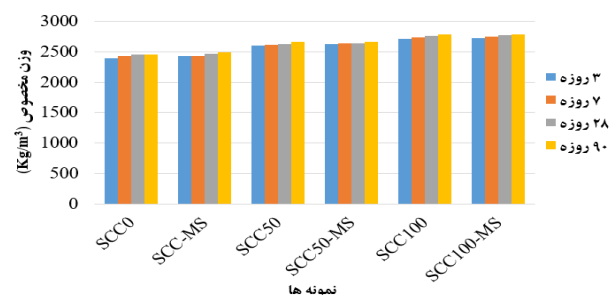
۴-۱- نتایج آزمایش‌های بتن تازه

شکل (۳) آزمایش جریان اسلامپ را نشان می‌دهد که نتایج حاصل از طرح نمونه‌ها پس از انجام آزمایش، براساس جدول (۴) بدست می‌آید. میانگین قطر اسلامپ برای دو سری آزمایش و در دو جهت در نظر گرفته شده است.

همانطور که از اعداد جدول (۴) مشخص است، وجود سنگ‌دانه سنگین وزن در بتن خودتراکم منجر به پهن‌شدگی اسلامپ و عدد بالاتر اسلامپ نسبت به نمونه‌های بتن خودتراکم بدون سنگ‌دانه سنگین وزن می‌شود. شکل (۴) آزمایش L-Box را نشان می‌دهد. همانطور که جدول (۴) نشان می‌دهد، نتایج آزمایش L-Box به دلیل قرارگرفتن در محدوده استاندارد، قابل قبول می‌باشد. نتایج

۲۸ روز به ترتیب به میزان حدود ۷/۴۲٪ و ۱۲٪ بیشتر از نمونه بتنی دارای سنگ‌دانه طبیعی می‌باشد.

شکل (۶) میزان وزن مخصوص نمونه‌ها در سنین مختلف را نشان می‌دهد. همچنین، در جدول (۶) می‌توان درصد تغییرات وزن مخصوص نمونه‌ها نسبت به نمونه SCC0 را مشاهده نمود. با افزایش درصد جایگزینی سنگ‌دانه سنگین وزن می‌توان افزایش وزن مخصوص نمونه را مشاهده نمود.



شکل ۶- وزن مخصوص نمونه‌ها در سنین مختلف

جدول ۶- درصد تغییرات وزن مخصوص نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی SCC0 در سنین مختلف

نام طرح	درصد تغییرات وزن مخصوص نمونه‌ها			
	روزه ۳	روزه ۷	روزه ۲۸	روزه ۹۰
SCC0-MS	۱/۴۵	۰/۰۴	۰/۴۹	۱/۷۹
SCC50	۸/۳۸	۷/۵۱	۷/۴۳	۸/۴۸
SCC50-MS	۹/۴۲	۸/۲۵	۷/۸۴	۸/۵۶
SCC100	۱۳/۲۱	۱۲/۲۴	۱۲/۶۹	۱۳/۶۲
SCC100-MS	۱۳/۵۵	۱۲/۶۵	۱۳/۰۶	۱۳/۷۴

۴-۲-۲- مقاومت فشاری

برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متری در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز با استفاده از استاندارد EN BS 12390 ساخته و آزمایش شدند [۲۷]. برای انجام آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها از دستگاه جک بتن شکن با ظرفیت ۲۰۰ تن برند آزمون استفاده شد. نتایج حاصل از مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم سنگین و غیرسنگین در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز برای شرایط نگهداری مرطوب در سنین مختلف در جدول (۷) ارائه شده است. میکروسلیس با نقش واکنشی می‌تواند در افزایش مقاومت فشاری بتن خودتراکم سنگین بویژه در سنین اولیه بتن نقش موثری داشته باشد. پودر سنگ آهک با نقش پرکنندگی

شکل (۵) آزمایش قیف V را نشان می‌دهد که همگنی مصالح در بتن نیز به خوبی قابل مشاهده است. برای انجام این آزمایش از ۱۲ لیتر بتن استفاده می‌شود.



شکل ۵- آزمایش قیف V بتن خودتراکم

نتایج آزمایش قیف V شکل نشان می‌دهد که زمان جریان برابر ۱۰ ثانیه بوده که در محدوده مجاز می‌باشد [۳۱].

۴-۲-۲- نتایج آزمایش‌های بتن سخت‌شده

۴-۲-۱- وزن مخصوص

وزن مخصوص بتن سخت‌شده طبق استاندارد ASTM C138 [۲۶] برای نمونه‌های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر با سن ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز اندازه‌گیری شده است. نتایج بدست‌آمده برای وزن مخصوص در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵- وزن مخصوص نمونه‌های مکعبی بتن خودتراکم سنگین و غیرسنگین (Kg/m^3)

نام طرح	وزن مخصوص نمونه‌ها (Kg/m^3)			
	روزه ۳	روزه ۷	روزه ۲۸	روزه ۹۰
SCC0	۲۳۹۹	۲۴۳۵	۲۴۵۰	۲۴۵۲
SCC0-MS	۲۴۳۴	۲۴۳۶	۲۴۶۲	۲۴۹۶
SCC50	۲۶۰۰	۲۶۱۸	۲۶۳۲	۲۶۶۰
SCC50-MS	۲۶۲۵	۲۶۳۶	۲۶۴۲	۲۶۶۲
SCC100	۲۷۱۶	۲۷۳۳	۲۷۶۱	۲۷۸۶
SCC100-MS	۲۷۲۴	۲۷۴۳	۲۷۷۰	۲۷۸۹

از نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار سنگ‌دانه سنگین مقدار وزن مخصوص افزایش می‌یابد. وزن مخصوص برای نمونه‌های حاوی ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه سنگین مگنتیت در

در نمونه شاهد ۲۸ روزه بتن خودتراکم دارای میکروسیلیس (SCC0-MS) مقاومت فشاری به میزان ۵/۷ مگاپاسکال (۹/۳٪) نسبت به بدون استفاده از آن (SCC0) افزایش یافته است. در حالیکه در حالت جایگزینی ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه سنگین مقاومت فشاری بتن سنگین ۲۸ روزه خودتراکم ۵/۶ مگاپاسکال (۸/۶۲٪) افزایش را نشان می‌دهد. همانطور که سینی و رامانا [۷] نشان دادند استفاده از میکروسیلیس به دلیل پر کردن فضای حفرات می‌تواند منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن‌های سنگین شود.

از سوی دیگر در دو طرح اختلاط بتن سنگین وزن خودتراکم SCC100 و SCC100-MS میزان مقاومت فشاری ۳ روزه مشابه بتن بدون سنگ‌دانه سنگین وزن (SCC0) است که شاید بتوان علت آن را در رفتار ترد این نوع سنگ‌دانه جستجو کرد. در واقع بهینه‌ترین درصد استفاده از سنگ‌دانه سنگین وزن، جایگزینی ۵۰ درصد درشت دانه با آن می‌باشد که می‌تواند منجر به افزایش مقاومت فشاری (تا ۱۰ مگاپاسکال) شود.

۴-۲-۳-التراسونیک

در این تحقیق برای آزمایش التراسونیک از دستگاه با نام شرکت MATEST به روش مستقیم استفاده شده است. شکل (۸) نحوه اندازه‌گیری سرعت پالس در آزمایش التراسونیک برای یک نمونه بتن خودتراکم را نشان می‌دهد.



شکل ۸- نحوه اندازه‌گیری سرعت پالس در آزمایش التراسونیک در یک نمونه بتن خودتراکم

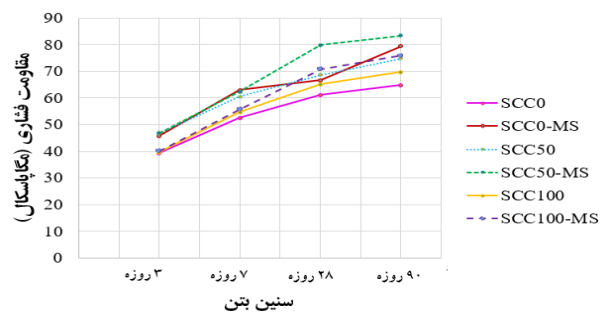
همچنین، نتایج حاصل از امواج التراسونیک برای نمونه‌های مکعبی بتن خودتراکم سنگین و غیرسنگین در جدول (۸) و (۹) ارائه شده است. برای به‌دست آوردن سرعت پالس التراسونیک مطابق رابطه- (۱)، که پیش‌تر توضیح داده شد، طول مسیر موج بر زمان عبور تقسیم می‌شود. طول مسیر در تمامی نمونه‌ها ۱۰ سانتی‌متر به اندازه طول ضلع مربع می‌باشد.

خود می‌تواند فضاهای خالی ایجاد شده در نمونه‌های بتنی را پر کند.

جدول ۷- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بتن خودتراکم سنگین و غیرسنگین

نام طرح	مقاومت فشاری (مگاپاسکال) (روش مرطوب)	روزه ۳	روزه ۷	روزه ۲۸	روزه ۹۰
SCC0	۳۹/۲۶	۵۲/۴۷	۶۱/۰۶	۶۴/۷۷	
SCC0-MS	۴۵/۸۳	۶۲/۹۵	۶۶/۷۲	۷۹/۴۸	
SCC50	۴۶/۶۸	۶۰/۵۷	۶۸/۶۵	۷۴/۷۳	
SCC50-MS	۴۶/۸۸	۶۲/۳۴	۷۹/۸۳	۸۳/۴۰	
SCC100	۳۹/۶۲	۵۴/۶۲	۶۵/۱۸	۶۹/۷۳	
SCC100-MS	۴۰/۱۲	۵۵/۷۰	۷۰/۸۰	۷۵/۹۰	

همچنین، روند افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در طی زمان در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۷- روند افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در طی زمان

از نتایج مشخص است که در بتن سنگین با زیاد شدن درصد سنگ‌دانه مگنتیت در صورتیکه میکروسیلیس اضافه نشود، میزان مقاومت فشاری با ۵۰ درصد جایگزینی افزایش اندکی به طور متوسط در حدود ۷ مگاپاسکال نسبت به نمونه شاهد خواهد داشت؛ حال آنکه با جایگزینی ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه مگنتیت، شاهد افزایش مقاومت فشاری ۹۰ روزه، ۵ مگاپاسکال به طور متوسط نسبت به نمونه شاهد خواهیم بود. میزان جایگزینی ۵۰٪ نتیجه بهتری را ارائه می‌دهد؛ زیرا میزان مقاومت فشاری ۹۰ روزه، تا ۱۰ مگاپاسکال نسبت به نمونه‌ی شاهد (بدون سنگ‌دانه مگنتیت) افزایش یافت. دلیل آن را می‌توان در نحوه شکست و رفتار ترد در هنگام استفاده از سنگ‌دانه مگنتیت پی برد. همچنین، جایگزینی ۶٪ از سیمان طرح اختلاط با میکروسیلیس تأثیر بسیاری در ارتقاء مقاومت فشاری داشته است. از جدول (۷) قابل مشاهده است که

جدول ۸- نتایج التراسونیک بر حسب مدت زمان عبور پالس نمونه- های مکعبی بتن خودتراکم سنگین و غیر سنگین

نام طرح	مدت زمان عبور پالس (میکروثانیه)			
	روزه ۹۰	روزه ۲۸	روزه ۷	روزه ۳
SCC0	۲۱/۲۵	۲۱/۶۲	۲۱/۶۳	۲۲/۷۲
SCC0-MS	۲۰/۶۰	۲۰/۷۰	۲۱/۲۵	۲۲/۱۰
SCC50	۲۰/۹۰	۲۱/۸۰	۲۱/۸۳	۲۲/۷۳
SCC50-MS	۲۰/۷۰	۲۱/۷۰	۲۱/۸۲	۲۲/۶۰
SCC100	۲۲/۱۰	۲۲/۵۰	۲۲/۸	۲۳/۶۳
SCC100-MS	۲۱/۹۵	۲۲/۴۰	۲۲/۶۲	۲۳/۶۰

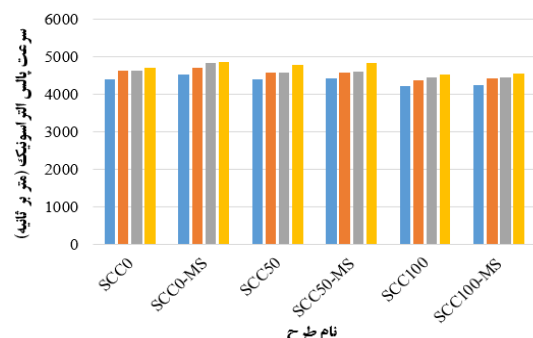
جدول ۹- نتایج التراسونیک بر حسب سرعت عبور پالس التراسونیک نمونه های مکعبی بتن خودتراکم سنگین و غیر سنگین

نام طرح	سرعت عبور پالس التراسونیک (m/s)			
	روزه ۹۰	روزه ۲۸	روزه ۷	روزه ۳
SCC0	۴۷۰۵/۹	۴۶۲۵/۳	۴۶۲۳/۲	۴۴۰۱
SCC0-MS	۴۸۵۴/۳	۴۸۳۰/۹	۴۷۰۵/۹	۴۵۲۴/۸
SCC50	۴۷۸۴/۷	۴۵۸۷/۱	۴۵۸۰/۸	۴۳۹۹/۴
SCC50-MS	۴۸۳۰/۹	۴۶۰۸/۲	۴۵۸۲/۹	۴۴۲۴/۷
SCC100	۴۵۲۴/۹	۴۴۴۴/۴	۴۳۸۵/۹	۴۲۳۱/۹
SCC100-MS	۴۵۵۵/۸	۴۴۶۴/۲	۴۴۲۰/۸	۴۲۳۷/۲

با توجه به شکل (۹) و جدول (۹) می توان پی برد که با افزایش سن بتن، به ویژه در سنین بالاتر (مثلاً ۹۰ روز) فرآیند هیدراتاسیون کامل تر شده، تراکم بتن بیشتر و تخلخل کاهش یافته است. در این حالت سرعت پالس افزایش یافته و بنابراین مدت زمان عبور پالس کمتر می شود.

با افزایش سن بتن از ۳ تا ۹۰ روز، سرعت پالس التراسونیک در همه طرح ها روندی صعودی داشته و این امر نشان دهنده افزایش تراکم و کاهش مدت زمان عبور پالس است. در مقایسه طرح ها، جایگزینی ۵۰٪ سنگ دانه سنگین وزن (SCC50) موجب افزایش سرعت پالس نسبت به بتن معمولی (SCC0) شد، به طوریکه، در ۹۰ روزه سرعت از ۴۷۰۵/۹ m/s در SCC0 به ۴۷۸۴/۷ m/s در SCC50 رسید (حدود ۱/۷٪ افزایش). با این حال، جایگزینی کامل ۱۰۰٪ سنگ دانه سنگین (SCC100) باعث کاهش سرعت نسبت به سایر طرح ها گردید و مقدار آن در ۹۰ روز به ۴۵۲۴/۹ m/s رسید حدود ۳/۸٪ کمتر از SCC0. علاوه بر این،

استفاده از میکروسلیس در همه طرح ها اثر مثبتی داشت و سرعت پالس را در حدود ۲ تا ۳٪ افزایش داد، به طوری که بیشترین مقدار سرعت در ۹۰ روز مربوط به طرح SCC50-MS با ۴۸۳۰/۹ m/s بود.



شکل ۹- نتایج حاصل از طرح ها بر حسب سرعت پالس التراسونیک

۴-۲-۴- رابطه ی مقاومت فشاری و امواج التراسونیک

بررسی همبستگی بین نتایج مقاومت فشاری و امواج التراسونیک نمونه ها در سنین مختلف در شکل (۱۰) برای حالت سنگ دانه طبیعی و سنگین وزن با و بدون میکروسلیس ارائه شده است. ضریب همبستگی بین مقاومت فشاری و سرعت عبور پالس التراسونیک برای نمونه های بتن سنگین وزن خودتراکم با و بدون میکروسلیس در سنین مختلف حدود ۰/۵ بدست آمد. با توجه به ضریب همبستگی بدست آمده، لازم است که نمودارها با توجه به حضور سنگ دانه سنگین وزن مگنتیت و طبیعی و همچنین میکروسلیس به صورت جداگانه دیده شود که ضریب همبستگی نزدیک به یک را مطابق جدول (۱۰) ارائه می دهد که نشان از تطابق خوب روابط کالیبراسیون برای بدست آوردن مقاومت فشاری بتن برای هر طرح اختلاط با داشتن سرعت عبور پالس التراسونیک می باشد.

همانطور که در تحقیق عذیری و مناف پور [۱۵] نشان داده شد، اگرچه ضریب همبستگی عدد بالایی را نشان نمی دهد ولی به دلیل استفاده از بتن خودتراکم در سنگ دانه های سنگین وزن می توان ضریب همبستگی بالاتری را نسبت به تحقیق عذیری و مناف پور مشاهده نمود (۵۴٪ نسبت به ۰/۳). همچنین به منظور اعتبارسنجی، تحقیق عیسی زاده و مدن دوست [۱۷] مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصل از بتن سنگین وزن مگنتیت با جایگزینی ۱۰۰٪ به جای شن در سن ۹۰ روز بررسی گردید. مقایسه اعداد بدست آمده از

است، در هر مورد ۱۰ الی ۱۲ بار قرائت انجام شده که از بین نتایج موجود، نتایج نزدیک به هم در نظر گرفته شده و به صورت میانگین در جدول (۱۲) ارائه شده است. همچنین شکل (۱۱) چکش اشمیت مورد استفاده برای بدست آوردن عدد بازگشت نمونه‌ها و آزمایش چکش اشمیت روی نمونه مکعبی بتن را نشان می‌دهد.

جدول ۱۱- مقایسه نتایج مقاومت فشاری و التراسونیک

نام طرح	تحقیق	التراسونیک (Km/s)	سرعت عبور پالس
بتن سنگین وزن با جایگزینی ۱۰۰٪ مگنتیت با شن	تحقیق حاضر عیسی زاده و مدندوست [۱۷]	۴/۵۲	۴/۵۲
بتن سنگین وزن با جایگزینی ۱۰۰٪ مگنتیت با شن و حاوی میکروسلیس	تحقیق حاضر عیسی زاده و مدندوست [۱۷]	۴/۵۶	۴/۸۶

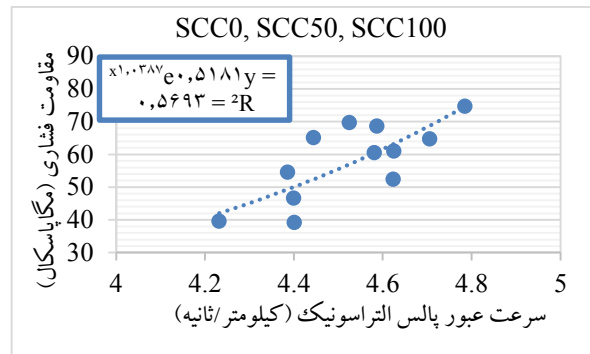
جدول ۱۲- نتایج چکش اشمیت نمونه‌های مکعبی بتن خودتراکم سنگین و غیرسنگین

نام طرح	عدد بازگشت نمونه‌ها	۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
SCC0	۲۳/۳۴	۲۸/۲۲	۲۹/۳۲	۳۰/۳۳	
SCC0-MS	۲۲/۹۶	۲۹/۳۵	۲۹/۴۸	۳۰	
SCC50	۲۵/۲۶	۲۹/۷۲	۲۹/۸۳	۳۱/۷۴	
SCC50-MS	۲۴/۶۴	۲۸/۰۹	۲۸/۳۶	۳۱	
SCC100	۲۸/۴۳	۲۸/۵	۳۰	۳۰/۵۲	
SCC100-MS	۲۵/۲۵	۲۷/۷	۲۹/۳	۲۹/۶۳	

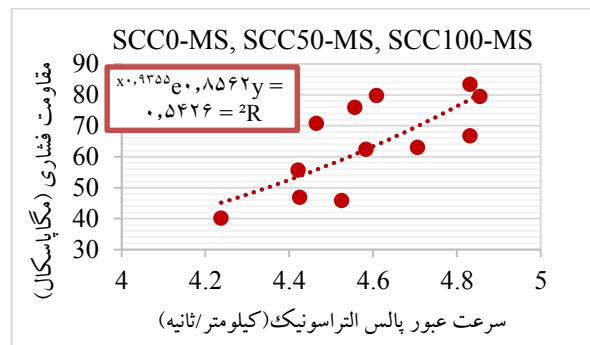


شکل ۱۱- چکش اشمیت مورد استفاده و آزمایش چکش اشمیت بر روی نمونه مکعبی بتن خودتراکم سنگین

مقاومت فشاری و سرعت عبور پالس التراسونیک برای تحقیق حاضر و محققان [۱۷] برای نمونه‌های با و بدون میکروسلیس در جدول (۱۱) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با توجه به آنکه در هر دو تحقیق از سنگ‌دانه سنگین وزن مگنتیت استفاده شده است و همگرایی لازم را دارا می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰- مقایسه کلی نتایج مقاومت فشاری-سرعت عبور پالس التراسونیک برای نمونه‌های بتن سنگین وزن خودتراکم در سنین مختلف: (الف) بدون میکروسلیس، (ب) با میکروسلیس

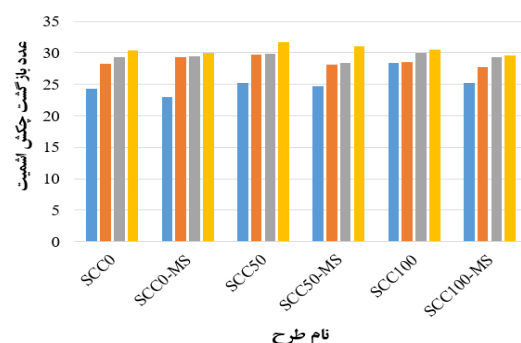
جدول ۱۰- روابط کالیبراسیون برای طرح‌های مختلف

نام طرح	رابطه کالیبراسیون	ضریب همبستگی
SCC0	$F_c = 0.0283e^{1.644V}$	$R^2=0.91$
SCC50	$F_c = 0.2334e^{1.2156V}$	$R^2=0.85$
SCC100	$F_c = 0.008e^{2.0146V}$	$R^2=0.96$
SCC0-MS	$F_c = 0.0618e^{1.463V}$	$R^2=0.90$
SCC50-MS	$F_c = 0.1112e^{1.3861V}$	$R^2=0.72$
SCC100-MS	$F_c = 0.0056e^{2.0946V}$	$R^2=0.93$

۴-۲-۵- چکش اشمیت

جدول (۱۲) نتایج حاصل از آزمایش چکش اشمیت و عدد بازگشت آن بر روی نمونه‌های مکعبی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر

همچنین، شکل (۱۲) به مقایسه نتایج حاصل از طرح‌ها با عدد بازگشت چکش اشمیت می‌پردازد.



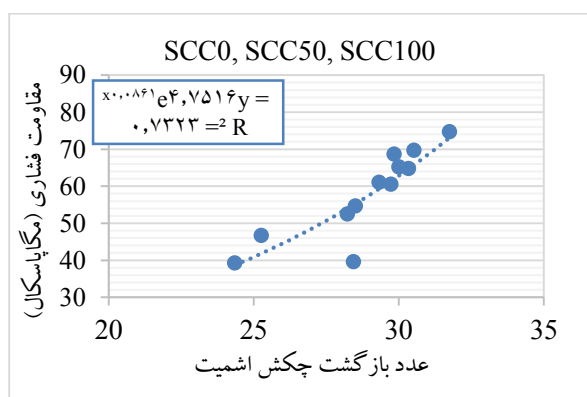
شکل ۱۲- نتایج حاصل از طرح‌ها با عدد بازگشت چکش اشمیت

همانطور که از نتایج مشخص است، اگر میکروسیلیس به بتن اضافه شود، عدد بازگشت چکش اشمیت معمولاً کاهش می‌یابد (به اندازه یک تا سه واحد)، به‌ویژه در سنین اولیه. دلیل اصلی آن، افزایش تراکم سطح بتن می‌باشد. میکروسیلیس با پر کردن فضاهای خالی بین ذرات سیمان، سطحی تراکم‌یافته‌تر و صاف‌تر ایجاد می‌کند. همچنین واکنش پوزولانی میکروسیلیس در سنین اولیه هنوز کامل نشده است و ممکن است بتن سختی سطحی پایینی نشان دهد. اگر سن بتن افزایش یابد، رفتار عدد بازگشت چکش اشمیت در بتن حاوی میکروسیلیس نیز تغییر می‌کند. در سنین بالاتر، واکنش پوزولانی کامل‌تر می‌شود. میکروسیلیس با هیدروکسید کلسیم واکنش می‌دهد و ژل C-S-H بیشتری تولید می‌کند، که باعث افزایش سختی سطحی می‌شود. در نتیجه، عدد بازگشت چکش اشمیت نسبت به سنین اولیه افزایش می‌یابد. همچنین با مقایسه نتایج حاصل از جایگزینی سنگ‌دانه سنگین وزن در بتن می‌توان دریافت که در حالت استفاده از سنگ‌دانه سنگین- وزن عدد بازگشت چکش اشمیت افزایش یافته است. استفاده از سنگ‌دانه‌های سنگین وزن باعث افزایش چگالی و تراکم بتن می‌شود و در نتیجه سختی و مقاومت سطحی آن بالا می‌رود. به همین دلیل انرژی ضربه چکش اشمیت بیشتر بازتاب یافته و عدد بازگشت افزایش می‌یابد.

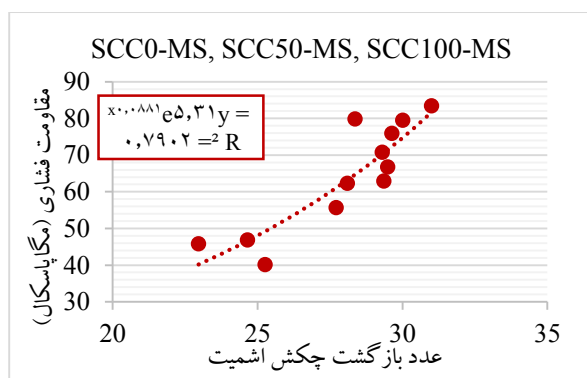
۴-۲-۶- رابطه‌ی مقاومت فشاری و چکش اشمیت

در شکل (۱۳) رابطه‌ی بین مقاومت فشاری و عدد بازگشت چکش اشمیت در سنین مختلف ارائه شده است. ضریب همبستگی

مقاومت فشاری بتن و عدد بازگشت چکش اشمیت (حدود ۰/۸) بالاتر از ضریب همبستگی بین مقاومت فشاری و سرعت عبور پالس التراسونیک (حدود ۰/۵) بدست آمد، که دلیل آن ماهیت این روش می‌باشد که چکش اشمیت به بررسی پوسته سیمانی نمونه‌ها می‌پردازد، حال آنکه امواج التراسونیک عمق نمونه را بررسی می‌کند. همچنین، همانطور که در تحقیق عذیری و مناف پور [۱۵] نشان داده شد، اگرچه ضریب همبستگی عدد بالایی را نشان نمی‌دهد (۰/۳۴)، اما به دلیل استفاده از بتن خودتراکم در سنگ‌دانه‌های سنگین وزن می‌توان ضریب همبستگی ۰/۸ را بدست آورد که دلیل آن تراکم بهتر سنگ‌دانه‌های سنگین وزن می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۳- مقایسه کلی نتایج مقاومت فشاری- عدد بازگشت چکش اشمیت برای نمونه‌های بتن سنگین وزن خودتراکم در سنین مختلف: الف) بدون میکروسیلیس، ب) با میکروسیلیس

همانطور که در شکل (۱۳) قابل مشاهده است، ضریب همبستگی بین مقاومت فشاری و عدد بازگشت چکش اشمیت برای نمونه‌های بتن سنگین وزن خودتراکم با و بدون میکروسیلیس در سنین مختلف حدود ۰/۸ بدست آمد. همچنین، جدول (۱۳) روابط

- آزمایش چکش اشمیت برای بتن‌های خودتراکم فاقد سنگ‌دانه سنگین و جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصد کارایی تقریباً خوبی را برای تعیین مقاومت فشاری بتن نشان می‌دهد و ضریب همبستگی بین مقاومت فشاری و عدد بازگشت چکش اشمیت برای حالت کلی ۰/۸ حاصل گردید.

- آزمایش التراسونیک می‌تواند همانند آزمایش چکش اشمیت برای بتن‌های خودتراکم سنگین و غیرسنگین برای بررسی مقاومت فشاری بتن‌ها به روش غیر مخرب مناسب باشد؛ زیرا ضریب همبستگی مقاومت فشاری و امواج التراسونیک برای حالت کلی ۰/۵ بدست آمده است.

- استفاده از بتن خودتراکم در سنگ‌دانه‌های سنگین وزن منجر می‌شود تا ضریب همبستگی مطلوب‌تری (نزدیک تر به یک) بین مقاومت فشاری با سرعت عبور پالس امواج التراسونیک و عدد بازگشت چکش اشمیت بدست آورد که دلیل آن تراکم بهتر سنگ‌دانه‌ها می‌باشد.

- ضریب همبستگی مقاومت فشاری بتن و عدد بازگشت چکش اشمیت (حدود ۰/۸) بالاتر از ضریب همبستگی بین مقاومت فشاری و سرعت عبور پالس التراسونیک (حدود ۰/۵) بدست آمد، که دلیل آن ماهیت استفاده از روش چکش اشمیت می‌باشد که به بررسی پوسته سیمانی نمونه‌ها می‌پردازد، حال آنکه امواج التراسونیک عمق نمونه را بررسی می‌نماید.

- کالیبراسیون نمونه‌ها نشان داد که می‌توان ارتباط معناداری میان مقاومت فشاری بتن با سرعت عبور پالس التراسونیک و عدد بازگشت چکش اشمیت بدست آورد.

۶- مراجع

- [1] ACI 116R, Cement & Concrete Terminology, USA, 2005.
- [2] Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity (Consisting of I.S. EN 206-1:2002 and the Irish National Annex), 2002.
- [3] Aslani, F., Lesslie, D. M., & Hamidi, F. Development and analysis of highly workable high-strength heavyweight concrete using magnetite aggregates. Structural Concrete, Vol. 22, E169-E182, 2021.
- [4] Farokhzad, R., Dadashi, A., & Sohrabi, A. The effect of ferrophosphorus aggregate on physical and mechanical properties of heavy-weight concrete. Construction and Building Materials, Vol.

کالیبراسیون برای هر طرح را به صورت جداگانه نشان می‌دهد.

جدول ۱۳- روابط کالیبراسیون برای طرح‌های مختلف

نام طرح	رابطه کالیبراسیون	ضریب همبستگی
SCC0	$F_c = 4.9413e^{0.0849V}$	$R^2=0.99$
SCC50	$F_c = 7.4345e^{0.0726V}$	$R^2=0.94$
SCC100	$F_c = 0.1219e^{0.2068V}$	$R^2=0.80$
SCC0-MS	$F_c = 10.344e^{0.0644V}$	$R^2=0.83$
SCC50-MS	$F_c = 4.8061e^{0.0937V}$	$R^2=0.81$
SCC100-MS	$F_c = 1.0543e^{0.1438V}$	$R^2=0.99$

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی آزمایش‌های بتن تازه و سخت شده بتن خودتراکم سنگین و غیرسنگین پرداخته شد. آزمایش‌های بتن تازه شامل اسلامپ، قیف V و L-Box بوده و آزمایش‌های بتن سخت شده برای نمونه‌های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متر شامل مقاومت فشاری، التراسونیک، چکش اشمیت در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز می‌باشد. همچنین رابطه‌ی بین مقاومت فشاری-سرعت عبور پالس امواج التراسونیک و مقاومت فشاری-عدد بازگشت چکش اشمیت برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن به روش غیرمخرب بررسی شد. نتایج به شرح زیر می‌باشد:

- آزمایش‌های بتن تازه شامل اسلامپ، قیف V و L-Box بوده در محدود مجاز آیین‌نامه‌ها قرار دارد که نشان می‌دهد بتن خودتراکم سنگین و غیرسنگین کارایی لازم را دارا می‌باشد.

- استفاده از پودر میکروسلیس با عملکرد واکنشی و پرکنندگی، می‌تواند مقاومت فشاری را در نمونه‌های بتن خودتراکم سنگین و غیرسنگین تا حدود ۱۰ مگاپاسکال افزایش دهد. به طوریکه در نمونه SCC-MS در ۲۸ روز ۵/۷ مگاپاسکال (۹/۳٪) نسبت به نمونه SCC (شاهد) افزایش مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. میکروسلیس با هیدروکسید کلسیم واکنش می‌دهد و ژل C-S-H بیشتری تولید می‌کند، که باعث افزایش سختی سطحی و مقاومت فشاری بتن می‌شود.

- استفاده از سنگ‌دانه مگنتیت با جایگزینی ۵۰٪ منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن خودتراکم سنگین می‌گردد؛ حال آنکه با جایگزینی ۱۰۰٪ سنگ‌دانه طبیعی با مگنتیت تأثیر چندانی نمی‌توان در افزایش مقاومت مشاهده نمود.

C., Balakrishnan, S., & Kumar, A. Mechanical and durability properties of structural grade heavy weight concrete with fly ash and slag. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 145, p. 105362, 2024.

[۱۷] عیسی‌زاده مهویزانی، ا.، و مدن دوست، ر. تأثیر میکروسیلیس و الیاف فولادی بر کاهش پدیده جداشدگی در بتن سنگین، پایان-نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان، ۱۴۰۳.

[18] ASTM C33, Standard Specification for Concrete Aggregate, USA: ASTM, 2005.

[19] ASTM C637. Standard Specification for Aggregates for Radiation-Shielding Concrete, 2009.

[20] ASTM C150. Standard Specification for Portland Cement, 2009.

[21] ASTM C494. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, 2011.

[22] ASTM, ASTM C192/C192m: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.

[۲۳] محمدپور، ا.، سجودی زاده، ر.، و میلایان، ر. بررسی خصوصیات مکانیکی بتن خودتراکم S.C.C، کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری شهرسازی ایران معاصر، ۱۳۹۶.

[24] Aggregates, B.N.W., ASTM C 33, Class 3S coarse aggregate or better, graded. Provide aggregates from a single source, 1, pp.1-1.

[25] BSI, BS EN 12350-1: Testing fresh Concrete (BIBM), 2005.

[26] ASTM, ASTM C138: Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

[27] BSI, BS EN 12390-8. Testing hardened concrete—Part 8: Depth of penetration of water under pressure. BSI London, UK, 2009.

[28] ASTM, C805. Standard test method for rebound number of hardened concrete, 1997.

[29] ASTM, C597, Standard test method for pulse velocity through concrete, 2009.

[30] Nondestructive testing of concrete. CRC press, 2003.

[31] Self-Compacting Concrete European Project Group. The European guidelines for self-compacting concrete: Specification, production and use. International Bureau for Precast Concrete (BIBM), 2005.

299, 2021.

[5] Esmailkhanian, B., Feys, D., Khayat, K. H., & Yahia, A. New test method to evaluate dynamic stability of self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 111, No. 3, pp. 299-308, 2014.

[6] Alami, M. M. Development of a new test method to evaluate dynamic stability of self-consolidating concrete (Master's thesis, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü), 2014.

[7] Singh, B. S., & Ramana, K. Mechanical properties of heavy weight concrete using heavy weight coarse-aggregate as hematite (Fe58 high grade iron ore). *PAN*, Vol. 15, 2014.

[8] Ban, C. C., Khalaf, M. A., Ramli, M., Ahmed, N. M., Ahmad, M. S., Ali, A. M. A., Dawood, E.T., & Ameri, F. Modern heavyweight concrete shielding: Principles, industrial applications and future challenges; review. *Journal of Building Engineering*, Vol. 39, p. 102290, 2021.

[9] Sharath, B. P., & Das, B. B. Engineering Properties of Heavyweight Concrete—A Review. *Smart Technologies for Sustainable Development*, pp. 297-314, 2021.

[10] Masoud, M. A., Kansouh, W. A., Shahien, M. G., Sakr, K., Rashad, A. M., & Zayed, A. M. An experimental investigation on the effects of barite/hematite on the radiation shielding properties of serpentine concretes. *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 120, p.103220, 2020.

[11] Khayat, K. H., & De Schutter, G. (2014). Mechanical properties of self-compacting concrete, Vol. 14, p. 161. Springer.

[12] Ouda, A. S. Development of high-performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-ray shielding. *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 79, pp. 48-55, 2015.

[13] Sadrmomtazi, A., Lotfi-Omran, O., & Nikbin, I. M. On the fracture parameters of heavy-weight magnetite concrete with different water-cement ratios through three methods. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 219, p. 106615, 2019.

[14] Lotfi-Omran, O., Sadrmomtazi, A., & Nikbin, I. M. The influences of maximum aggregate size and cement content on the mechanical and radiation shielding characteristics of heavyweight concrete. *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 121, p. 103222, 2020.

[۱۵] عذیری، س.، مناف پور، ع. ارزیابی آزمایشگاهی مقاومت

فشاری بتن با استفاده از آزمایشات غیرمخرب التراسونیک و چکش

اشمیت و مقایسه با روش مخرب، سومین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت، ۱۳۹۸.

[16] Venkitasamy, V., Santhanam, M., Rao, B. P.

Evaluation of Compressive Strength of Heavyweight Self-Compacting Concrete Using Non-Destructive Testing Methods

Esmail Borhani Paskiyabi *

Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Za.C., Islamic Azad University, Zanjan, Iran.

Rahmat Madandoust

Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology, Guilan University, Rasht, Iran.

Hossein Parvini Sani

Assistant professor, Department of Civil Engineering, Za.C., Islamic Azad University, Zanjan, Iran.

Abstract

Nowadays, heavy-weight concretes are widely used in buildings, bridges, power plants, and medical facilities. The aim of this study is to evaluate the strength of heavy self-compacting concrete using non-destructive tests. In this research, the effect of replacing heavy-weight magnetite aggregates (0%, 50%, and 100%) at the ages of 3, 7, 28, and 90 days was examined for six mix designs. Additionally, 6% microsilica (a reactive and filler material) was used as a replacement for cement, and 25% limestone powder (a filler) was used as a replacement for sand. The results showed that adding microsilica, by improving filling ability, increased the compressive strength of concrete by 8%. Moreover, a 50% replacement with magnetite led to an increase in compressive strength of about 10 MPa, while full replacement resulted in an increase of 5 MPa. With increasing concrete age, the ultrasonic pulse velocity increased; at 90 days, the mix with 50% magnetite showed a 1.7% increase, and the mix with microsilica showed an increase of about 2 to 3% in velocity.

Keywords: Heavyweight concrete, fresh concrete tests, compressive strength, ultrasonic testing, Schmidt hammer.

* Corresponding Author: es.borhani.p@gmail.com

