

بررسی تاثیر سنگدانه‌های مختلف طبیعی و مصنوعی بر خواص مکانیکی بتن‌های پر مقاومت (HSC)

ماهان سلیمیان^۱، مهتاب مردانی^۲، سعید بزرگمهر نیا^۳، امیرامیری^۴، النازامیری^۵

۱- دانش‌آموخته کارشناسی مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه خوارزمی

۳- دکتری مهندسی سازه و مدیر تحقیق و توسعه شرکت آپتوس ایران

۴- دانشجوی کارشناسی پیوسته مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرنده

۵- دانشجوی کارشناسی پیوسته مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرنده

Mahan.salimiyan.eng@gmail.com

چکیده

استفاده از بتن‌های پر مقاومت به دلایل زیادی نظیر بالا بودن مدول الاستیسیته، کاهش مقاطع طراحی به سبب مقاومت بالا، کاهش تغییر شکل‌ها و سهولت در تهیه آن همچون بتن‌های معمولی، در پروژه‌های خاصی نظیر پل‌ها و ساختمان‌های بلند مرتبه همواره مورد استقبال بوده است. دستیابی به بتن پر مقاومت بدون بهره‌گیری از سنگدانه‌های متراکم و با سختی بالا امکان پذیر نخواهد بود. امروزه استفاده از محصولات جانبی صنایع مختلف به دلیل حفظ محیط زیست، بهره‌وری بیشتر و بالا بردن توانایی‌های مکانیکی و دوامی انواع بتن‌ها رونق گرفته است. سرباره‌ها نیز محصولی جانبی صنایع ذوب سنگ فلزات و مواد دیگر هستند. از این طیف می‌توان به سرباره ذوب آهن، سرباره مس، سرباره روی و دیگر انواع فلزات اشاره کرد. شلاکه دورریز مس (Blasted Copper Slag) یا همان سرباره مس در این پژوهش مورد توجه و استفاده قرار گرفته است. استفاده از این ماده به دو شیوه پودری (با نرمی معادل سیمان) به جهت کسب خواص پوزولانی آن و درشت‌دانه برای ماده‌ی جایگزین مصالح سنگی مرسوم است. این مقاله به بررسی تاثیر سنگدانه‌های مختلف طبیعی و مصنوعی موجود در کشور در افزایش مقاومت بتن پر مقاومت (HSC) می‌پردازد. بدین منظور چهار نوع سنگدانه شامل گرانیت، سیلیس، کوارتز و گارنت به عنوان درشت‌دانه‌های طبیعی و همچنین از سرباره مس به عنوان درشت‌دانه مصنوعی در طرح مخلوط‌ها استفاده شده است. همچنین ریز دانه مورد مصرف در تمام طرح‌ها، از جنس گارنت بوده که با این حساب، ریزدانه طرح‌ها ثابت و درشت‌دانه‌ها متفاوت هستند. مجموعاً ۲۹ طرح مخلوط بهینه در مقیاس آزمایشگاهی به صورت آزمون‌های مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متری ساخته، عمل‌آوری و شکسته شد. در این مقاله عمل‌آوری نمونه‌ها توسط اتوکلاو انجام شده است برای عمل‌آوری سریع بتن و دست‌یابی به مقاومت‌های مورد نظر و قالب برداری سریع استفاده از بتن اتوکلاو شده توصیه می‌شود که در این روش دما و بخار آب و فشار همراه باهم به عضو بتنی که درون دستگاه اتوکلاو قرار گرفته است تزریق می‌شود که در این پژوهش با دمای حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. در تمام این طرح‌ها، مقدار مواد سیمانی ثابت و میکروسیلیس به مقدار ۷٪، جایگزین سیمان شد. نسبت آب به مواد سیمانی مورد استفاده در تمامی طرح‌ها از ۱۹ تا ۲۱ درصد متغیر است. در انتهای این بررسی آزمایشگاهی، مشخص گردید نمونه‌های تهیه شده با سنگدانه‌های طبیعی مختلف نسبت به طرحی که مصالح سنگی آن تماماً از گارنت بوده، مقاومت کمتری داشته و همچنین طرح ساخته شده با سرباره مس (بعنوان درشت‌دانه مصنوعی) مقاومتی تا ۳۰٪ درصد بیشتر از نمونه ساخته شده با گارنت داشته است.

واژه‌های کلیدی: سرباره مس، گارنت، گرانیت، کوارتز، سیلیس، بتن پر مقاومت، HSC

در حال حاضر نیاز استفاده از مواد با مقاومت و عملکرد بالا برای کاهش مقطع، وزن و در کل هزینه بیش از پیش احساس می شود. بتن تغییرات بسیاری داشته تا متناسب با موارد فوق باشد.

بتن پرمقاومت (UHSC) یکی از انواع بتنی است که امروزه در کشورهای پیشرفته استفاده می شود و مقاومت فشاری بین ۵۰ تا ۲۰۰ مگاپاسکال دارد UHSC به دارای ریز ساختار بمتراکم و با حداقل منافذ مویینه شناخته می شود [3]-[1]. این بتن در دهه ۱۹۷۰ میلادی در آمریکا و اروپا توسعه یافت [4] و در دهه ۱۹۸۰ در طراحی سازه بتنی محبوبیت بیشتری پیدا کرد [2], [1]. پس از آن بتن با عملکرد بالا (UHPC) در دهه ۱۹۹۰ معرفی شد که مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن بیش از ۱۵۰ مگاپاسکال است [7]-[5].

پوزولان‌ها یکی از مواد لازم برای رسیدن به بتن با مقاومت بالا هستند. در این میان میکروسیلیس به دلیل ماهیت شیمیایی و ساختار بسیار ریز آن، یکی از متداول‌ترین پوزولان‌هایی است که در بتن پرمقاومت استفاده می شود و نسبت به سایر مواد پوزولانی مقاومت بیشتری به بتن می دهد [8]. کریشنا و همکاران در پژوهشی تأثیر درصد‌های مختلف خاکستر بادی و میکروسیلیس را در بتن پرمقاومت بررسی کردند. نتایج آزمایش های آن‌ها برای نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵، نشان داد که درصد بهینه میکروسیلیس به صورت جایگزین سیمان ۱۰ درصد است [9].

علاوه بر پوزولان‌ها، انتخاب سنگدانه‌های سخت تر مانند کوارتز، بازالت، گرانیت، سیلیس و گارنت می تواند خواص مکانیکی را بهبود بخشد [11], [10]. ردی و همکاران سنگدانه‌های مختلف گرانیت، دیوریت، کوارتز، سنگ آهک و شن و ماسه رودخانه‌ای را بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که سنگدانه‌های با سطح صاف تر اسلامپ بهتری نسبت به سطوح مضرص دارند. در بتن‌های معمولی مشخصات سنگدانه‌ها اثری در مشخصات مقاومتی نداشت اما در بتن پرمقاومت، بافت سطح، شکل، خواص معدنی و شیمیایی سنگدانه‌ها بسیار موثر بوده است. سنگدانه‌های با سطح زبر مقاومت فشاری بیشتری نسبت به سنگدانه‌های صاف داشتند. همچنین سنگدانه‌های کربناتی مقاومت بیشتری نسبت به سنگدانه‌های متبلور از خود نشان دادند و فعل و انفعالات شیمیایی بیشتری با خمیر سیمان رقم زدند [12]. کیلیک و همکاران اثر نوع سنگدانه بر مشخصات مقاومتی و شاخص سایدگی بتن پرمقاومت حاوی میکروسیلیس را بررسی کردند. در این تحقیق ۵ نوع سنگدانه مختلف شامل گابرو، بازالت، کوارتز، سنگ آهک و شن و ماسه معمولی به منظور ساخت بتن پرمقاومت با طرح مخلوط مشخص مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که بتن تهیه شده با گابرو بیشترین مقاومت فشاری، خمشی و کششی را داشته و همچنین در برآوردن شاخص مقاومت سایشی نیز، از بهترین عملکرد برخوردار بوده است. این در حالی است که بتن ساخته شده با شن و ماسه معمولی کمترین مقاومت فشاری و سایش را به همراه داشته است [13].

استفاده از پسماندهای صنعتی و ضایعات با توجه به هزینه های دفع و آلودگی های زیست محیطی از مهمترین چالش های امروز است. در صورت استفاده مجدد از ضایعات نه تنها مشکلات فوق می تواند کاهش یابد و یا حتی از بین برود بلکه منجر به حفظ منابع طبیعی نیز می شود. بسیاری از سرباره ها دارای خاصیت سیمانی یا پوزولانی هستند که محققان را به استفاده از آنها در سیمان یا بتن ترغیب می کنند [14]. سرباره (slag) محصولی مصنوعی و جانبی است، که به هنگام جداسازی مس در کوره‌های ذوب از ناخالصی‌های موجود در سنگ مس به وجود می آید. سرباره ترکیبی از سیلیکات و اکسیدهای فلزی پیچیده است که پس از سرد شدن مواد ناخالص باقی می ماند [15]. تولید یک تن مس حدود ۲،۲ تا ۳ تن سرباره مس تولید می کند. در نهایت حدود ۲۴/۶ میلیون تن سرباره مس سالانه در جهان تولید می شود. این ماده به دلیل داشتن آهن آزاد، چگالی و سختی بسیار بالا، به عنوان ابزار سایش در سندبلاست، بالاست و کف سازی در صنایع ریلی و راهسازی و در صنعت سیمان و بتن استفاده می شود. چگالی متوسط سرباره مس حدوداً ۳/۵ g/cm³ است و این نشان می دهد که این ماده چگال تر از سنگدانه‌های معمول است. بنابراین این محصول می تواند به عنوان یک منبع مناسب سنگدانه مصنوعی در صنعت کفپوش بتنی هم مورد استفاده قرار گیرد. تلاش های عمده‌ای برای بررسی امکان‌سنجی استفاده از سرباره مس به عنوان ریزدانه و درشت‌دانه در بتن صورت گرفته است. [17], [16]

سریلاک شمی و همکاران طی پژوهشی تأثیر جایگزینی سرباره مس با ماسه به میزان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد را در بتن پرمقاومت بررسی کردند و مشخص شد که کارایی، مقاومت فشاری، خمشی و کششی و انرژی شکست با جایگزینی سرباره افزایش می یابد. [18] خلیفه الجبری و همکاران استفاده از سرباره مس بعنوان جایگزین ماسه در بتن توانمند را بررسی کردند که بر طبق آن ۸ طرح مخلوط با جایگزینی تا ۱۰۰٪ سرباره مس به جای ماسه مورد آزمایش قرار گرفت. کارپذیری، وزن مخصوص، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و دوام طرح‌ها بررسی شدند. نتایج حاکی از آن بود که وزن مخصوص بتن با افزایش سرباره

مس با نسبت مشابهی بالا می‌رود در حالی که میزان نرخ افزایش کارپذیری به نسبت افزایش درصد جایگزینی سرباره مس بیشتر است. افزایش بیش از اندازه سرباره مس نیز به دلیل بالا بردن میزان آب آزاد موجود در طرح، با کاهش مقاومت فشاری بتن تا ۱۶ درصد نسبت به نمونه شاهد همراه بود. به طوری که در درصد های جایگزینی ۸۰ و ۱۰۰ درصد، مقاومت فشاری بتن به حداقل خود رسید [20], [19]. ماوریلیدو و لیا درصد بهینه ۳۰-۶۰ درصد را برای رسیدن به مشخصات مقاومتی و جذب آب سطحی پیشنهاد کردند [21]. بررسی عملکرد بتن سیمان پرتلند با سرباره مس به عنوان جایگزین ریزدانه نیز توسط آنجس و همکاران (۲۰۱۷) صورت گرفت و نتیجه گرفتند که نمونه های حاوی ۴۰٪ سرباره مس به جای ریزدانه، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بهتری را نشان می دهند [22]. شرما و خان (۲۰۱۸) امکان تولید بتن خود تراکم حاوی ۱۰۰٪ سرباره مس به همراه درصدی متاکاولین را بررسی کردند و مشاهده کردند که مشخصات مقاومتی و دوامی افزایش می یابد [23]. راجاسکار و همکاران طی آزمایشی امکان استفاده از سرباره مس معمولی و سرباره مس اصلاح شده به عنوان جایگزین ماسه کوآرتزی در بتن فوق توانمند را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با جایگزینی ۱۰۰٪ ماسه کوآرتزی و سرباره مس معمولی به مقاومت ۱۵۰ مگاپاسکال و با جایگزینی ۱۰۰٪ ماسه کوآرتزی و سرباره اصلاح شده به مقاومت ۲۰۰ مگاپاسکال دست یافتند. سرباره مس معمولی منجر به کاهش اندک مقاومت فشاری و سرباره اصلاح شده منجر به افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد شد. تغییرات مقاومت خمشی و کششی نیز مشابه مقاومت فشاری بود [24].

مصطفی خانزادی و علی بهبودی، در بررسی ای که بر روی مشخصات مکانیکی بتن پر مقاومت ساخته شده با سرباره مس بعنوان درشتدانه مصرفی داشتند، ضمن اظهار امکان پذیر بودن استفاده از این ماده در کنار دیگر پوزولانها نظیر میکروسیلیس، مشاهده کردند که استفاده از سرباره مس، مقاومت فشاری بتن را تا ۱۵ درصد و مقاومت کششی آن را تا ۱۸ درصد بیشتر از نمونه ساخته شده با سنگ آهک در همان ابعاد و اندازه به همراه دارد و نهایتا اعلام داشتند که استفاده از سرباره مس به عنوان درشتدانه در بتن های پر مقاومت به صورت فنی ممکن بوده و مفید است [17], [16].

امکان استفاده از سرباره مس پودری بسیار ریز به عنوان ماده سیمانی تکمیلی در UHSC توسط ادوین و همکاران با درصد جایگزینی ۵٪ تا ۲۰٪ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که جایگزینی ۵٪ سیمان پرتلند با پودر سرباره مس واکنش های پوزولانی را افزایش می دهد [25]. در این مقاله تلاش شده است تا با جایگزینی درصدهای مختلفی از سرباره مس درشت دانه، مشخصات مکانیکی و کارایی آن با طرح کنترل و طرح های حاوی سرباره مس مورد سنجش قرار گیرد. بدین منظور چهار نوع سنگدانه شامل گرانیت، سیلیس، کوآرتز و گارنت به عنوان درشت دانه های طبیعی با اندازه ۰-۱۲٫۵ میلی متر و همچنین از سرباره مس به عنوان درشت دانه مصنوعی در طرح مخلوطها استفاده شده است. همچنین ریز دانه مورد مصرف در تمام طرحها، از جنس گارنت بوده که با این حساب، ریزدانه طرحها ثابت و درشتدانهها متفاوت هستند. مجموعاً ۲۹ طرح مخلوط بهینه در مقیاس آزمایشگاهی به صورت آزمونه های مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی متری ساخته، عمل آوری و شکسته شد. در این مقاله عمل آوری آزمونه ها توسط اتو کلاو انجام شده است برای عمل آوری سریع بتن و دست یابی به مقاومت های مورد نظر و قالب برداری سریع استفاده از بتن اتو کلاو شده توصیه می شود که در این روش دما و بخار آب و فشار همراه باهم به عضو بتنی که درون دستگاه اتو کلاو قرار گرفته است تزریق می شود که در این پژوهش با دمای حدود ۱۰۰ درجه سانتی گراد استفاده شده است. در تمام این طرحها، مقدار مواد سیمانی ثابت و میکروسیلیس به مقدار ۷٪، جایگزین مواد سیمانی شد. نسبت آب به سیمان مورد استفاده در تمامی طرحها از ۱۹ تا ۲۱ درصد متغیر است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱ مصالح مصرفی:

۲-۱-۱ سیمان پرتلند:

سیمان مورد استفاده در طرحها از نوع ۵۲۵-۱ بوده که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جداول ۱ و ۲ آمده است.

جدول ۱- خواص فیزیکی سیمان

ویژگی	واحد	نتیجه آزمایش
سطح مخصوص	Cm ² /gr	3200 ≤ a
وزن مخصوص	Kg/m ³	3150
اولیه	Min	90 ± 10

زمان گیرش	نهایی	170 ± 20
مقاومت فشاری ملات استاندارد	۳ روزه	330 ≤ σ
	۷ روزه	470 ≤ σ
	۲۸ روزه	610 ≤ σ

جدول ۲- خواص شیمیایی سیمان

ترکیبات	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	LOI ³
سیمان %	65.70	20.30	5.65	3.30	≤ 1.60	≤ 2.80	≤ 1.30

۲-۱-۲- مواد جایگزین سیمان

میکروسیلیس به کار گرفته شده در این مطالعه از صنایع سیلیس ایران واقع در سمنان مورد استفاده قرار گرفته است. محدوده اندازه ذرات این پودر بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر است و سطح مخصوصی در حدود ۳۵۵۰۰ سانتی مربع در گرم دارد. این محصول بیش از ۹۰ درصد سیلیس فعال داشته و مشخصات فیزیکی و شیمیایی این محصول مطابق با جداول ۳ و ۴ است.

جدول ۳- خواص شیمیایی میکروسیلیس

ترکیبات	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
%Silica Fume	90.33	2.27	0.81	0.86	1.63	2.63	0.31	0.38

جدول ۴- خواص فیزیکی میکروسیلیس

ویژگی	واحد	نتیجه آزمایش
سطح مخصوص	Cm ² /gr	35500
چگالی	Kg/m ³	2216

۲-۱-۳- آب

آب مصرفی در این طرح‌ها از منبع آب شرب کرج بوده که از استاندارد ASTM D ۱۱۲۹ تبعیت می‌کند.

۲-۱-۴- سنگدانه مصرفی

در این پژوهش از چهار نوع سنگدانه طبیعی و یک نوع سنگدانه مصنوعی با گستره ابعادی ۴/۷۵ تا ۱۲/۵ میلی‌متر استفاده شده است. جنس این سنگدانه‌ها گرانیت، سیلیس، کوارتز و گارنت بوده و درشتدانه مصنوعی از نوع سرباره مس است. سنگدانه های گرانیت و سیلیس از شرکت آرملات (معدن دلیجان)، سنگدانه گارنت از شرکت ثمین سایا کرمان و کوارتز نیز از شرکت ستبران در قزوین تهیه شده است. همچنین سرباره مس از کارخانه ذوب مس فجر، زیر نظر گروه صنعتی شهید عارفی واقع در شهری استان تهران تهیه شده است. تصاویر سنگدانه های مصرفی در شکل ۱ آمده است.





شکل ۱- سنگدانه‌های طبیعی و مصنوعی استفاده شده در طرح‌ها

بالا راست: سیلیس، بالا چپ: گرانیت، وسط راست: کوارتز، وسط چپ: گارنت، پایین: سرباره مس

ریزدانه مورد مصرف در تمامی طرح مخلوط‌ها از جنس گارنت است. مطابق با آنالیز اخذ شده از مرکز فرآوری مواد معدنی ایران، نمونه گارنت ریزدانه از کانی آندرادیت تشکیل شده است. البته مقداری کوارتز نیز همراه نمونه دیده می‌شود که این مقدار به ۱۵ الی ۲۰ درصد می‌رسد.

۲-۱-۵ مواد افزودنی

در این پژوهش از فوق‌روان‌کننده پایه پلی‌کریوکسیلات اتر با نام تجاری P۱۰-N محصول شرکت شیمی ساختمان مطابق با استاندارد ASTM C۴۹۴ استفاده شده است. بنابر اظهار تولید کننده آن، این افزودنی قابلیت کاهش آب اختلاط بتن را تا ۴۰٪ با اسلایپ ثابت دارد که همین امر، عامل افزایش مقاومت فشاری در سنین اولیه و نهایی و نیز دوام بتن می‌گردد.

۲-۱-۶ عمل آوری

در این پژوهش، طرح‌های ساخته شده به منظور کسب مقاومت در سنین اولیه از روش اتوکلاو استفاده شده است. آزمون‌های اخذ شده در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۱ اتمسفر و مدت زمان ۸ ساعت تحت عمل آوری قرار گرفتند.

۲-۲ طرح اختلاط و آماده سازی نمونه‌ها:

۲-۲-۱ سنگدانه‌های طبیعی

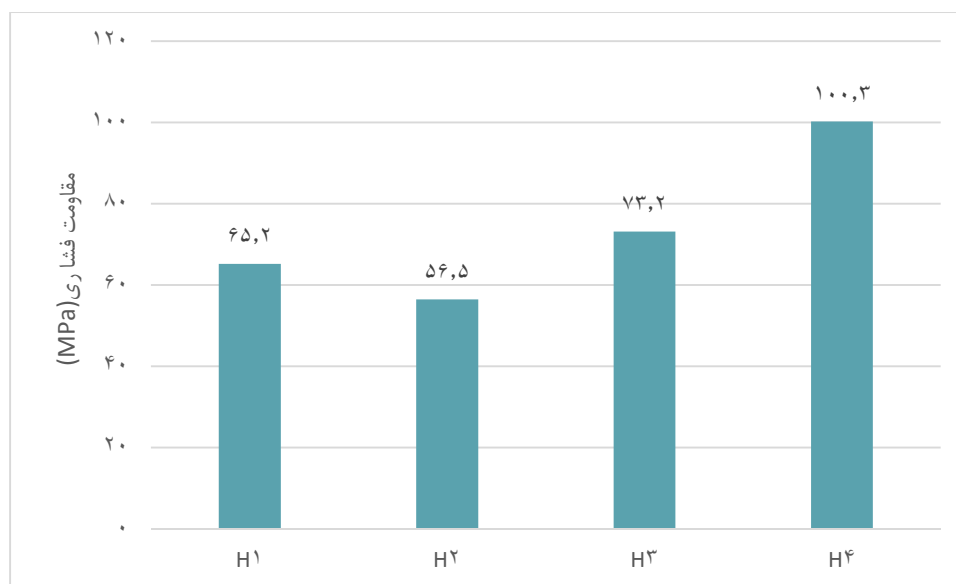
در این پژوهش، ۲۹ طرح مخلوط با استفاده از سیمان تیپ ۵۲۵-۱ و میکروسیلیس با مجموع مواد سیمانی ۱۰۰۰ کیلوگرم در مترمکعب و با نسبت مجموع آب به مواد سیمانی ۱۹ تا ۲۱ درصد تهیه و ساخته شد. طی بررسی‌های به عمل آمده مقدار مصرف میکروسیلیس برابر با ۷ درصد جایگزین وزنی سیمان انتخاب شد. ابتدا درشت‌دانه‌های طبیعی از جنس گرانیت، سیلیس، گارنت و کوارتز جهت ساخت نمونه‌ها مصرف شد. طبق نتایج به دست آمده حاصل از شکست نمونه‌های اولیه با این مصالح (شکل ۲)، آزمون‌هایی که با درشت‌دانه گارنت ساخته شده بودند بر آزمون‌هایی که درشت‌دانه‌های آن‌ها از گرانیت، سیلیس و کوارتز بود از نظر مقاومتی برتری داشتند. طرح مخلوط‌های مورد استفاده در جدول ۶ و تصویر آزمون‌ها بعد از شکست در شکل ۳ آمده است.

جدول ۵- شرح علائم اختصاری مشخصات نمونه‌ها

<i>Agg</i>	ρ	<i>W</i>	<i>SP</i>	W/C_m	<i>SF</i>	<i>C</i>	C_m	<i>No</i>
نوع سنگدانه	وزن مخصوص بتن	آب خالص طرح	فوق روان کننده	میزان آب به مواد سیمانی	میکروسیلیس	سیمان	مجموع مواد سیمانی	شماره طرح

جدول ۶- مشخصات نمونه‌های حاوی کوارتز، گرانیت، سیلیس و گارنت

$\rho(Kg/m^3)$	<i>Agg</i>	<i>W</i>	<i>SP</i> (%4 <i>C_m</i>)	W/C_m	<i>C</i>	<i>SF</i>	C_m	<i>No</i>
۲۴۶۰	کوارتز + گارنت ریزدانه	۱۵۰	۴۰	۱۵٪	۹۳۰	۷۰	۱۰۰۰	H1
۲۵۶۰	گرانیت + گارنت ریزدانه	۱۵۰	۴۰	۱۵٪	۹۳۰	۷۰	۱۰۰۰	H2
۲۵۲۰	سیلیس + گارنت ریزدانه	۱۵۰	۴۰	۱۵٪	۹۳۰	۷۰	۱۰۰۰	H3
۲۸۹۰	گارنت + گارنت ریزدانه	۱۵۰	۴۰	۱۵٪	۹۳۰	۷۰	۱۰۰۰	H4



شکل ۲- مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی حاوی کوارتز، گرانیت، سیلیس و گارنت

مقاومت آزمون‌های یاد شده، در سن ۷ روز و در شرایط عمل‌آوری اشباع بدست آمده که برحسب مگاپاسکال است. از هر طرح مخلوط ارائه شده، ۳ آزمون ساخته و میانگین آن‌ها محاسبه گردیده است. با توجه به طرح‌های ارائه شده و ناحیه شکست آزمون‌ها اینگونه بر می‌آید که در این محدوده استفاده از مواد سیمانی، مقاومت نمونه‌های ساخته شده با کوارتز و گرانیت از نمونه‌های ساخته شده با سیلیس و گارنت کمتر است. همچنین با توجه به شکل ۳، نمونه‌های ساخته شده با درشت‌دانه کوارتز به دلیل عدم چسبندگی کافی این نوع سنگدانه در برخی نقاط، مشاهده گردید که پس از شکست، سنگدانه به صورت یکپارچه و سالم در ناحیه شکست حضور داشته و درگیری لازم را با خمیر سیمان نداشته است. البته این حالت برای نمونه کوارتز تهیه شده از معدن یاد شده و به ازای نمونه‌های اخذ شده

مشاهده گردیده و قابل تعمیم به معادن و اقسام دیگر سنگدانه کوراتز نیست. این موضوع قابل بیان است که نمونه ساخته شده با گارنت درشت دانه و ریزدانه به دلیل بالا بودن مقاومت توده‌ای سنگدانه گارنت و درگیری بیشتر با خمیر سیمان از بالاترین مقاومت در طی ۷ روز برخوردار است.



شکل ۳- نمونه ای از شکست آزمونه‌ها
بالا راست: نمونه حاوی درشتدانه کوراتز، بالا چپ: حاوی گارنت، پایین: سیلیس

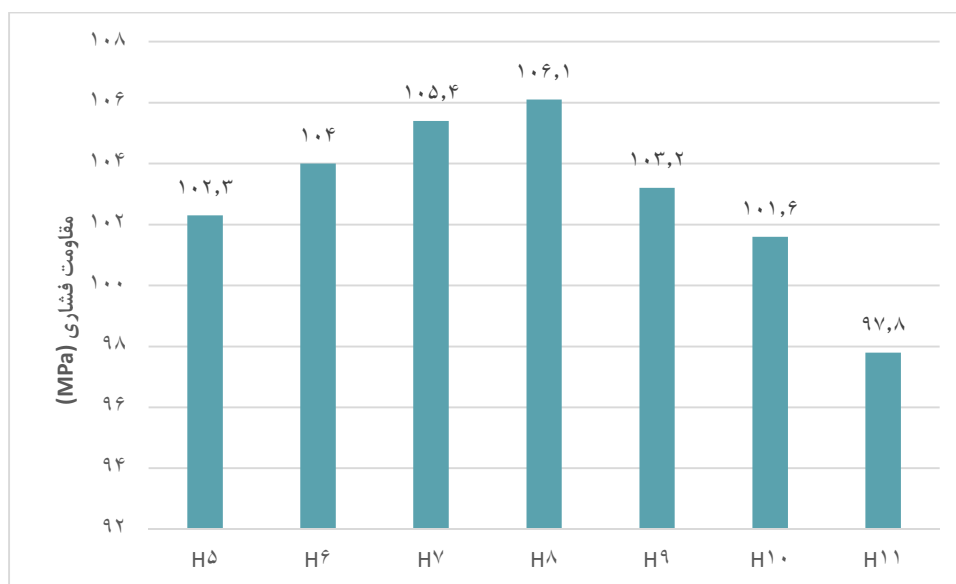
پس از تعیین مقاومت بتن‌های ساخته شده، طرح مخلوط بتن با سنگدانه گارنت، انتخاب و به عنوان نقطه شروع طرح‌های بعدی به جهت تغییر نسبت آب به مواد سیمانی و استفاده از سنگدانه مصنوعی سرباره مس منبأب افزایش مقاومت و مقایسه سنگدانه‌های مصنوعی و طبیعی یاد شده در این تحقیق تعیین گردید. در این مرحله، نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی مورد آزمون قرار گرفت. نمونه شماره H4 با درصد‌های مختلف آب به سیمان اعم از آب به سیمان ۱۵ درصد به همراه افزودنی ۴ درصدی، تا آب به سیمان ۱۹ درصد به همراه افزودنی ۰٫۵ تا ۲ درصدی مورد بررسی واقع شد. جدول شماره ۷ نتایج حاصل از ساخت این طرح‌های مخلوط به ازای میزان آب به سیمان مختلف را با مقاومت ۷ روزه آن نمایش می‌دهد.

جدول ۷- مشخصات نمونه‌های با سنگدانه گارنت و نسبت های مختلف آب به سیمان

Agg	W (Kg)	SP(%C _T)	W/C _m	C(Kg)	SF(Kg)	C _m (Kg)	No
تماما گارنت	۱۶۰	۳۰	۱۶٪	۹۳۰	۷۰	۱۰۰۰	H5
تماما گارنت	۱۷۰	۲۰	۱۷٪	۹۳۰	۷۰	۱۰۰۰	H6
تماما گارنت	۱۸۰	۱۰	۱۸٪	۹۳۰	۷۰	۱۰۰۰	H7
تماما گارنت	۱۹۰	۵	۱۹٪	۹۳۰	۷۰	۱۰۰۰	H8

تماما گارنت	۱۹۰	۱۰	۱۹٪	۹۳۰	۷۰	۱۰۰۰	H9
تماما گارنت	۱۹۰	۱۵	۱۹٪	۹۳۰	۷۰	۱۰۰۰	H10
تماما گارنت	۱۹۰	۲۰	۱۹٪	۹۳۰	۷۰	۱۰۰۰	H11

در نمونه‌های شماره ۵ تا ۸ با ثابت نگه داشتن نسبت مجموع آب و روان کننده به مواد سیمانی، تغییرات مقدار آب خالص در مقاومت نهایی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج مقاومت فشاری (شکل ۴)، مشخص شد که هرچه میزان آب خالص به سیمان را تا سقف ۱۹ درصد افزایش دهیم و همراه با آن تا بر آورده شدن کارایی لازم فوق‌روان کننده مصرف گردد، مقاومت افزایش می‌یابد که نسبت آب خالص به سیمان ۱۹ درصد به همراه ۵ درصد افزودنی بالاترین مقاومت را کسب کرد. در ادامه سه طرح با نسبت ثابت آب خالص به مواد سیمانی و درصد افزودنی بیشتر ساخته و آزمایش شد تا میزان بهینه افزودنی به دست آید. که در طرح های ۹ تا ۱۱ مقاومت نسبت به طرح شماره ۸ کاهش پیدا کرد و بدین ترتیب طرح شماره ۸ به عنوان طرح بهینه از سنگدانه‌های طبیعی تا اینجای کار در نظر گرفته شد.



شکل ۴- مقاومت فشاری نمونه‌های با سنگدانه گارنت و نسبت های مختلف آب به سیمان

۲-۲-۲ سنگدانه مصنوعی (سرباره مس)

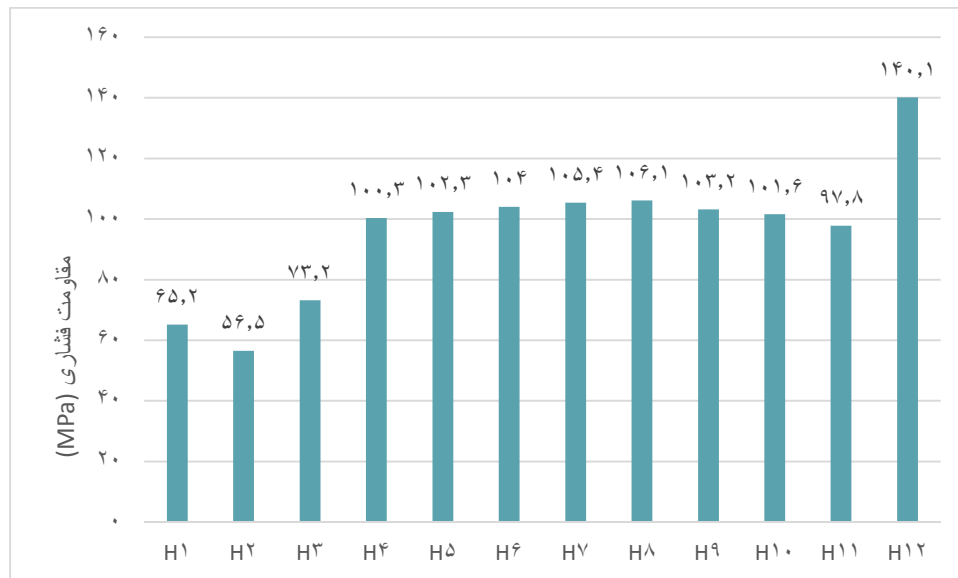
پس از تایید طرح شماره H8 که با آب به مواد سیمانی ۱۹٪ و فوق روان کننده ۵٪ و میزان میکروسیلیس ۷٪ وزنی سیمان ساخته شد، طرح مذکور با همان دانه بندی ارائه شده در نمودار دانه بندی درشت دانه و با دانه های سرباره مس تهیه شده از کارخانه ذوب مس فجر ساخته شد. طرح مخلوط ساخته شده و نتیجه ۷ روزه آن در جدول ۸ آورده شده است.

جدول (۸) جزئیات کامل نسبت اختلاط طرح ساخته شده با سرباره مس (Kg/m^3)

σ Mpa	Agg	W	SP(% C_T)	W/C_m	C	SF	C_m	No
۱۴۰٫۱	سرباره مس + گارنت ریزدانه	۱۹۰	۵	۱۹٪	۹۳۰	۷۰	۱۰۰۰	H12

۳- نتایج

با توجه به نتایج بدست آمده از طرح های ساخته شده در این پژوهش که تعداد ۱۲ طرح شاخص آن در این گزارش آمده است، مشخص گردید که از نمونه های مشابه ساخته شده با سنگدانه های طبیعی گرانیت، سیلیس، کوارتز و گارنت در شرایط یکسان، نمونه حاوی گارنت درشت دانه و ریز دانه، مقاومت فشاری بیشتری را نسبت به سایر سنگدانه های طبیعی بررسی شده در این گزارش داشته است. در ادامه و با ساخت بتن همراه با سنگدانه مصنوعی سرباره مس با توجه به طرح برتر از سنگدانه های طبیعی، مشخص گردید که این سنگدانه عملکرد بهتری را نسبت به سایر مصالح سنگی در همان گستره ابعادی داشته است. این عملکرد بهتر در قالب افزایش مقاومت بیش از ۳۰ درصد نسبت به نمونه نهایی گارنت ظاهر شد (شکل ۵).



شکل ۵- مقایسه مقاومت فشاری نمونه های حاوی کوارتز، گرانیت، سیلیس و گارنت و سرباره مس

۴- نتیجه گیری:

در این مقاله چهار نوع سنگدانه شامل گرانیت، سیلیس، کوارتز و گارنت به عنوان درشت دانه های طبیعی و همچنین از سرباره مس به عنوان درشت دانه مصنوعی در بتن پرمقاومت و مقایسه آن ها با یکدیگر نتایج زیر حاصل گردیده است:

استفاده از کوارتز به عنوان درشت دانه منجر به کاهش ۳۵ درصدی مقاومت فشاری نسبت به بتن حاوی سنگدانه گارنت بوده که به دلیل عدم چسبندگی کافی با خمیر سیمان، کاهش مقاومت می دهد.

گارنت به دلیل مقاومت توده ای بالاتر و چسبندگی مناسب تر با خمیر سیمان، مقاومت فشاری بالاتری نسبت به گرانیت و سیلیس داشته و استفاده از درشت دانه گرانیت و سیلیس نیز به عنوان جایگزین گارنت به ترتیب منجر به کاهش ۴۳٫۶٪ و ۲۷٪ مقاومت می شود.

با ثابت نگه داشتن نسبت آب و فوق روان کننده به سیمان و مقایسه تغییر میزان آب خالص در مقاومت فشاری بتن، نتایج نشان داد که حداقل نسبت آب خالص به سیمان مورد نیاز بتن، ۱۹٪ بوده و در نسبت های کمتر مقاومت فشاری بتن کاهش می یابد.

پس از انتخاب نسبت آب خالص به سیمان، بررسی در صد های مختلف فوق روان کننده از ۵ تا ۲۰ در صد نشان داد که ۵ در صد افزودنی، مقاومت فشاری بالاتری دارد.

استفاده از سنگدانه مصنوعی سرباره مس به عنوان درشت دانه جایگزین گارنت در طرح بهینه منجر به افزایش ۳۲ درصدی مقاومت فشاری گردیده و مقاومت فشاری بتن عمل آوری شده حاوی سرباره به ۱۴۰٫۱ مگاپاسکال رسیده است.

۵- فهرست منابع و مآخذ:

1. Al-Jabri, K. S. et al. (۲۰۰۹) 'Copper slag as sand replacement for high performance concrete', *Cement and Concrete Composites*. Elsevier, ۳۱(۷), pp. ۴۸۳-۴۸۸.
2. Alexander, M. and Mindess, S. (۲۰۱۰) *Aggregates in concrete*. CRC Press.
3. Ambily, P. S. et al. (۲۰۱۵) 'Studies on ultra high performance concrete incorporating copper slag as fine aggregate', *Construction and building materials*. Elsevier, ۷۷, pp. 233-240.
4. Dos Anjos, M. A. G., Sales, A. T. C. and Andrade, N. (۲۰۱۷) 'Blasted copper slag as fine aggregate in Portland cement concrete', *Journal of environmental management*. Elsevier, 196, pp. 607-613.
5. Bai, B. K. K. and Rao, M. K. (۲۰۱۵) 'Strength And Durability Properties Of High Performance Concrete Incorporating Silica Fume And Fly Ash', *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, ۸(۱), pp. ۲۳-۲۹.
6. Chithra, S., Kumar, S. R. R. S. and Chinnaraju, K. (۲۰۱۶) 'The effect of Colloidal Nano-silica on workability, mechanical and durability properties of High Performance Concrete with Copper slag as partial fine aggregate', *Construction and Building Materials*. Elsevier, ۱۱۳, pp. ۷۹۴-۸۰۴.
7. Davenport, W. G. et al. (۲۰۰۲) *Extractive metallurgy of copper*. Elsevier.
8. Edwin, R. S. et al. (۲۰۱۶) 'Effect of secondary copper slag as cementitious material in ultra-high performance mortar', *Construction and Building Materials*. Elsevier, ۱۱۹, pp. 31-44.
9. Khanzadi, M. and Behnood, A. (۲۰۰۹) 'Mechanical properties of high-strength concrete incorporating copper slag as coarse aggregate', *Construction and building materials*. Elsevier, ۲۳(۶), pp. ۲۱۸۳-۲۱۸۸.
10. Kılıç, A. et al. (۲۰۰۸) 'The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete', *Cement and Concrete Composites*. Elsevier, ۳۰(۴), pp. ۲۹۰-۲۹۶.

11. Mavroulidou, M. and Liya, N. (2015) 'Properties of concrete containing waste copper slag as a fine aggregate replacement', in Proceedings of the 14th International Conference on Environmental Science and Technology.
12. Mindess, S., Young, F. J. and Darwin, D. (2003) 'Concrete 2nd Edition', Technical Documents.
13. Naaman, A. E. and Wille, K. (2012) 'The path to ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC): five decades of progress', Proceedings of Hipermat, pp. 3-15.
14. Neville, A. M. (2012) 'Properties of concrete, Trans'. Atlantic Publications, Inc Philadelphia, PA, USA:
15. Rajasekar, A., Arunachalam, K. and Kottaisamy, M. (2019) 'Assessment of strength and durability characteristics of copper slag incorporated ultra high strength concrete', Journal of cleaner production. Elsevier, 2018, pp. 402-414.
16. Reddy, S. M., Krishna, G. R. and Ramakrishna, B. (2017) 'Petrographic Characteristics of Aggregates and Their Effect on the Properties of Concrete', International Journal of Engineering Science, 5375.
17. Rossi, P. (2011) 'Ultra-high performance fiber-reinforced concretes', Concrete international, 23(12), pp. 46-52.
18. Sharma, R. and Khan, R. A. (2018) 'Influence of copper slag and metakaolin on the durability of self compacting concrete', Journal of cleaner production. Elsevier, 171, pp. 1171-1186.
19. Shi, C., Meyer, C. and Behnood, A. (2008) 'Utilization of copper slag in cement and concrete', Resources, Conservation and recycling. Elsevier, 52(10), pp. 1115-1120.
20. Somayaji, S. (2011) Civil engineering materials. Pearson Education India.
21. Sreelakshmi, A. and Jeenu, G. (2018) 'Effect of copper slag as fine aggregate in high strength concrete', in Emerging Trends in Engineering, Science and Technology for Society, Energy and Environment. CRC Press, pp. 37-44.
22. Wang, X.-Y. (2014) 'Properties prediction of ultra high performance concrete using blended cement hydration model', Construction and Building Materials. Elsevier, 54, pp. 1-10.
23. Wille, K. et al. (2012) 'Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing', Materials and structures. Springer, 45(3), pp. 309-324.
24. Wu, W., Zhang, W. and Ma, G. (2010) 'Optimum content of copper slag as a fine aggregate in high strength concrete', Materials & Design. Elsevier, 31(9), pp. 2178-2183.
25. Yazıcı, H. (2007) 'The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures', Building and environment. Elsevier, 42(5), pp. 2083-2089.

