

خواص مکانیکی و نفوذپذیری بتن سنگین حاوی گندله آهن، خرده آهن و میکروسیلیس

عبدالله کرمی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

عبدالکریم عباسی دزفولی

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

سید عباس حسینی *

استادیار، دانشکده صنعت و معدن چرام، دانشگاه یاسوج، چرام، ایران.

چکیده

بتنی که دارای وزن مخصوص بیشتری نسبت به بتن معمولی است به عنوان بتن سنگین شناخته می شود. استفاده از سنگ دانه با وزن مخصوص بالا در واقع مهمترین راهکار تولید بتن سنگین می باشد. به دلیل استفاده از سنگ دانه های با خاصیت فلزی و عدد اتمی بالا، این نوع بتن دارای خاصیت حفاظت در برابر اشعه های مضر می باشد. در این تحقیق امکان استفاده از گندله آهن به همراه پوسته آهن به عنوان جایگزین بخشی از سنگ دانه بتن برای تولید بتن سنگین مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ۲۵، ۸۰ و ۱۰۰ درصد سنگ دانه با گندله و پوسته آهن جایگزین شده و برای جلوگیری از اثر این جایگزینی در افزایش تخلخل بتن، بخشی از سیمان طرح اختلاط نیز با میکروسیلیس جایگزین شده است. آزمایشات مقاومت فشاری، مقاومت کششی، خمشی و همچنین نفوذپذیری بر روی نمونه های ساخته شده، انجام گرفته و همچنین وزن مخصوص بتن سنگین تولید شده نیز گزارش شده است. نتایج نشان دهنده اثر بسیار خوب میکروسیلیس بر بهبود خواص بتن سنگین می باشد. مقاومت فشاری بتن سنگین با افزایش درصد گندله و پوسته آهن در حضور میکروسیلیس تا ۳۴ درصد بیشتر از بتن معمولی بدست آمده است. مقاومت های کششی و خمشی نیز در صورت استفاده از میکروسیلیس به ترتیب حداکثر تا ۵۰ و ۱۲ درصد نسبت به بتن معمولی افزایش داشته اند. نفوذپذیری بتن سنگین برای هر درصد جایگزینی گندله و پوسته آهن کمتر از بتن معمولی بوده است.

واژه های کلیدی: بتن سنگین، گندله آهن، پوسته آهن، مقاومت فشاری، نفوذپذیری، میکروسیلیس.

۱- مقدمه

به دلیل کارکردی که از بتن سنگین انتظار می‌رود، این نوع بتن هم از نظر مکانیکی باید دارای مقاومت بالایی باشد و هم دارای خاصیت حفاظت اشعه بالایی باشد. ترکیب این دو خاصیت مهم از طریق انتخاب و به کارگیری سنگ‌دانه با چگالی و همچنین مقاومت مکانیکی بالا امکان‌پذیر خواهد بود. سنگ‌دانه‌های مورد بررسی باید دارای مواد و کانی‌های فلزی با عدد اتمی بالا باشد تا در برابر نوترون‌ها و پروتون‌ها عملکرد میراکنندگی قابل قبولی داشته باشد [۱۰، ۱۱]. تحقیقات زیادی درباره اثر نوع سنگ‌دانه بر خواص بتن سنگین انجام گرفته است [۱۰، ۱۲، ۱۳] اسین و دوگان نشان دادند که استفاده از سنگ آهک سنگین به عنوان سنگ‌دانه با وجودی که چگالی بتن را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد ولی موجب کاهش خواص مکانیکی و قدرت حفاظتی در برابر اشعه بتن سنگین خواهد شد [۱۴]. اوادا گزارش کرد که استفاده از سنگ‌دانه مگنتیت نسبت به باریت دارای مقاومت مکانیکی و همچنین خاصیت حفاظت اشعه بیشتری می‌باشد [۱۵]. جانکویچ و همکاران نشان دادند که استفاده از باریت به عنوان سنگ‌دانه موجب افزایش مقاومت خمشی و کاهش مقاومت فشاری خواهد شد [۱۶]. بهرامی و همکاران نشان دادند که استفاده کامل از سنگ‌دانه باریت موجب ۲۰ درصد کاهش در مقاومت فشاری بتن می‌شود ولی دوام بتن را افزایش می‌دهد [۱۷].

گندله آهن یکی از موادی است که پتانسیل استفاده به عنوان سنگ‌دانه در بتن سنگین را دارا می‌باشد. گندله آهن ماده‌ی اولیه تولید آهن و آهن اسفنجی است که در طی فرایندی از ترکیب پودر سنگ آهن با آب، آهک و بنتونیت به وجود می‌آید. گندله آهن حاوی مقادیر زیادی فلز آهن بوده و همچنین از وزن مخصوص و مقاومت مکانیکی بالایی برخوردار است. با وجود اینکه این ماده کاندیدای مناسبی جهت استفاده به عنوان سنگ‌دانه در بتن سنگین می‌باشد ولی در رابطه با استفاده از این ماده به عنوان سنگ‌دانه در بتن سنگین تاکنون تحقیقی صورت نگرفته است. کاجونوس و همکاران از ضایعات آهن به عنوان جایگزین بخشی از سنگ‌دانه در بتن استفاده کردند و مقاومت بهتر این نوع بتن در برابر پوسته شدن ناشی از چرخه‌های ذوب و یخ زدن بتن را گزارش کردند [۱۸].

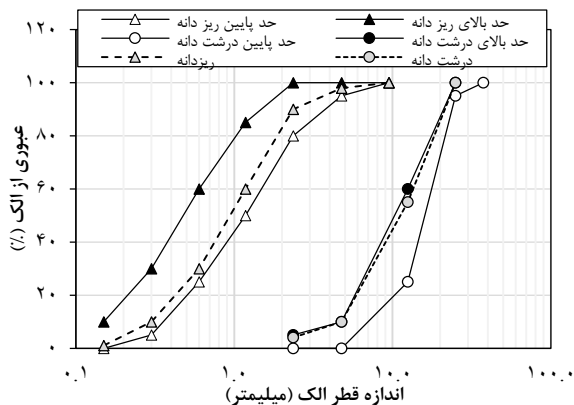
با توجه به کمبود اطلاعات در زمینه استفاده از گندله آهن به عنوان سنگ‌دانه و همچنین متغیر بودن نتایج تحقیقات قبلی در مورد

رشد سریع صنعت ساخت و ساز و گسترش تکنولوژی، موجب افزایش نیاز به تحقیق درباره مصالح ساختمانی به‌ویژه بتن برای تأمین نیازهای مختلف صنعتی و ساختمانی شده است. بتن سنگین (HWC) یکی از انواع بتن می‌باشد که بارزترین مشخصه آن، چگالی زیاد آن نسبت به بتن معمولی است. از مهم‌ترین کاربردهای بتن سنگین، استفاده به عنوان سپر محافظتی جهت جلوگیری از نشت رادیواکتیو در تاسیسات هسته‌ای و همچنین استفاده در آزمایشگاه‌ها و بیمارستان‌هایی که دارای دستگاه‌های ساطع کننده امواج مضر از قبیل امواج ایکس و گاما هستند می‌باشد [۱].

بتن سنگین به دلیل چگالی بالا و همچنین استفاده از موادی که دارای عدد اتمی بالایی هستند (عناصر فلزی) به نحو مناسبی به عنوان سپر حفاظتی اشعه عمل می‌کند [۲، ۳]. بتن معمولی دارای چگالی تقریبی با میانگین ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد؛ بر این مبنا در ادبیات فنی، بتن با چگالی بیشتر از ۲۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب به عنوان بتن سنگین تعریف شده است [۴]. با توجه به توصیه‌های آیین‌نامه ACI، مقدار چگالی بتن سنگین می‌تواند تا مقدار ۵۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب نیز برسد [۵]. خواص مقاومتی و همچنین حفاظتی بتن سنگین وابسته به مواد تشکیل دهنده آن می‌باشد و از آنجا که سنگ‌دانه بخش اعظمی از بتن را تشکیل می‌دهد؛ نوع و مقدار سنگ‌دانه مهم‌ترین عامل تاثیرگذار در تولید بتن سنگین است [۶]. از نظر وزنی، استفاده از سنگ‌دانه با چگالی زیاد عامل اصلی ایجاد کننده بتن سنگین می‌باشد به طوری که برای تولید بتن سنگین، وزن مخصوص سنگ‌دانه باید بیشتر از ۳۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب باشد. این سنگ‌دانه‌ها که به عنوان سنگ‌دانه سنگین شناخته می‌شوند، دارای منشأ معدنی- فلزی هستند و می‌توانند به صورت طبیعی و یا مصنوعی تولید شده باشند. ژئوتیت، لیمونیت، باریت، همتیت، مگنتیت و سرباره کوره قوس الکتریکی تولید آهن از جمله موادی هستند که به عنوان سنگ‌دانه در بتن سنگین مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷، ۸]. استفاده از سنگ‌دانه‌های با چگالی بیشتر، علاوه بر تأمین چگالی بیشتر برای بتن، موجب افزایش مقاومت فشاری بتن به صورت چشمگیری خواهند شد؛ به عنوان نمونه، تحقیقات قبلی نشان داده است اثر این افزایش مقاومت موجب کاهش ضخامت دیوارهای باربر بتنی به اندازه ۴۰ درصد نسبت به بتن معمولی شده است [۹].

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سیمان پرتلند ۵۲۵-۱

گیرش اولیه	گیرش نهایی	مقاومت فشاری (Kg/cm ²)
(دقیقه)	(دقیقه)	
۱۸۰	۲۲۰	۲۵۰
		۴۰۲
		۵۴۳



شکل ۱- دانه بندی ریز دانه و درشت دانه سنگی

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی گندله آهن^۱ (%)

Fe (T)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	P	S
۶۹	۳/۸	۰/۸	۱/۵	۱/۶	۱/۲	۰/۰۷	۰/۰۱



(ب)

(الف)

شکل ۲- مصالح جایگزین شن و ماسه، الف) گندله آهن، ب) پوسته آهن

جدول ۳- مشخصات پودر میکروسیلیس

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

جدول ۴- مشخصات فوق روان کننده پلی کربوکسیلات

نام	pH	محتوای جامد (%)	نسبت وزن مخصوص
HF5000M	۷/۲	۳۴	۱/۰۲

خواص مکانیکی بتن حاوی سنگ دانه آهنی در این تحقیق از گندله به عنوان جایگزین بخشی از سنگ دانه استفاده شده است. همچنین ریزدانه بتن نیز با خرده آهن که به صورت پوسته های آهنی در ابعاد کوچک هستند نیز جایگزین گردیده است. در برخی از طرح اختلاطها بخشی از سیمان با میکروسیلیس جایگزین شده است تا اثر این جایگزینی در مقاومت و نفوذپذیری بتن سنگین مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مصالح

مواد تشکیل دهنده نمونه های بتنی در این پژوهش عبارتند از سیمان پرتلند معمولی تیب یک (۱-۵۲۵)، ریزدانه و درشت دانه معمولی معادن بوشهر، گندله معدن گل گهر سیرجان، آب شرب بوشهر، پوسته آهن اهواز، میکروسیلیس ازنا و مواد افزودنی شامل فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات بوده است.

سیمان مورد استفاده در این تحقیق از نوع سیمان پرتلند تیب یک (۱-۵۲۵) می باشد که مشخصات فیزیکی آن در جدول ۱ نشان داده است [5]. مشخصات سیمان ارائه شده در جدول ۱ بر اساس آزمایشات انجام گرفته در آزمایشگاه توسط مولفین ارائه شده است. از سنگ دانه های معمولی (ماسه و شن) معادن بوشهر و همچنین از سنگ دانه های سنگین گندله و پوسته آهن گل گهر سیرجان استفاده شده است. چگالی اشباع با سطح خشک درشت دانه و ریزدانه به ترتیب ۲۵۳۴ و ۲۶۱۸ کیلوگرم بر مترمکعب و درصد جذب آب نیز به ترتیب برابر با ۱/۶ و ۱/۵۸ به دست آمده است. نمودار دانه بندی اصلاح شده شن و ماسه در شکل ۱ نشان داده شده است. چگالی گندله و پوسته آهن نیز به ترتیب برابر با ۴/۵ و ۴/۲ می باشد. آنالیز شیمیایی گندله در جدول ۲ نشان داده شده است. در شکل ۲ گندله و پوسته آهن استفاده شده در این تحقیق نشان داده شده است. از پودر میکروسیلیس ازنا در این پژوهش استفاده شده که مشخصات آن بر اساس آنالیزهای انجام شده در آزمایشگاه در جدول ۳ نشان داده شده است. جهت دست یابی و کاهش نسبت آب به سیمان و روانی ثابت از فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات با مشخصات نشان داده شده در جدول ۴ استفاده شده است.

^۱ واحد کنترل کیفیت شرکت گل گهر سیرجان

۲-۲- طرح اختلاط و آماده سازی نمونه‌ها

برابر با ۲۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است. در برخی از طرح اختلاط‌ها ۱۰ درصد از سیمان با میکروسلیس جایگزین شده است. طرح اختلاط‌های شماره ۱ و ۲ با عناوین C و CN معرف بتن بدون گندله و پوسته آهن هستند که جهت بررسی جایگزینی گندله و پوسته با بتن معمولی ساخته شده‌اند.

در این پژوهش برای ساخت نمونه‌ها از ۸ نوع طرح اختلاط مطابق جدول ۵ استفاده گردیده است. نسبت آب به سیمان برابر با مقدار ثابت ۰/۵ در نظر گرفته شده است. همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده است، مقدار سیمان برابر با ۴۰۰ کیلوگرم و مقدار آب

جدول ۵- طرح اختلاط بتن معمولی و بتن سنگین برای ساخت یک مترمکعب بتن

نام طرح	آب (kg)	سیمان (kg)	میکروسلیس (kg)	شن (kg)	ماسه (kg)	گندله آهن (kg)	پوسته آهن (kg)	گندله آهن پوسته آهن (%)	(%)
C	۲۰۰	۴۰۰	-	۸۵۵	۹۶۵	-	-	-	-
CN	۲۰۰	۳۶۰	۴۰	۸۵۵	۹۶۵	-	-	-	-
H25	۲۰۰	۴۰۰	-	۶۴۲	۷۲۴	۳۳۸	۳۳۸	۲۵	۲۵
H25N	۲۰۰	۳۶۰	۴۰	۶۴۲	۷۲۴	۳۳۸	۳۳۸	۲۵	۲۵
H80	۲۰۰	۴۰۰	-	۱۷۲	۱۹۳	۱۰۸۰	۱۰۸۰	۸۰	۸۰
H80N	۲۰۰	۳۶۰	۴۰	۱۷۲	۱۹۳	۱۰۸۰	۱۰۸۰	۸۰	۸۰
H100	۲۰۰	۴۰۰	-	-	۱۹۳	۱۳۵۰	۱۰۸۰	۱۰۰	۸۰
H100N	۲۰۰	۳۶۰	۴۰	-	۱۹۳	۱۳۵۰	۱۰۸۰	۱۰۰	۸۰

کشتی، نفوذپذیری و وزن مخصوص انجام شده است. همه آزمایشات در سن ۲۸ روزه انجام گرفته است و نتایج گزارش شده، میانگین ۳ نمونه ساخته شده برای هر طرح اختلاط می‌باشد. آزمایش مقاومت فشاری علاوه بر ۲۸ روز در سن ۷ روز نیز بر روی نمونه‌ها انجام گرفته است.

در طرح اختلاط‌های بتن سنگین ۲۵، ۸۰، ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه با گندله و پوسته آهن جایگزین شده‌اند. این جایگزینی بدین صورت انجام گرفته است که سنگ‌دانه به صورت وزنی حذف گردیده و سپس حجم سنگ‌دانه حذف شده محاسبه گردیده و این حجم با گندله و پوسته آهن جایگزین شده است. در طرح اختلاطی که ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه حذف شده، برای حفظ پیوستگی بتن، ۲۰ درصد از ریزدانه بتن حذف نگردیده است. به منظور حفظ کارایی بتن تازه، به ترکیبات فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات به مقدار حداکثر ۶ کیلوگرم در متر مکعب اضافه گردید تا اسلامپ بتن تقریباً در محدوده ۱۰۰ میلیمتر باقی بماند. نمونه‌ها پس از قالب گیری به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق زیر پوشش پلاستیک جهت حفظ رطوبت نگهداری شدند و بعد از خارج کردن از قالب‌ها تا زمان انجام آزمایشات در سنین ۷ و ۲۸ روزه در محیط عمل‌آوری طبق استاندارد ASTM C192 نگهداری شدند [۱۹].

۳-۱- وزن مخصوص

وزن مخصوص در دو حالت بتن خمیری و بتن سخت شده اندازه گیری شده است. برای اندازه گیری وزن مخصوص تر بتن از روش استاندارد ASTM C138 استفاده شده است [۲۰]. طبق این استاندارد ابتدا وزن قالب خالی به همراه درپوش شیشه اندازه گیری شده و سپس وزن قالب که با آب پر شده و درپوش شیشه ای روی آن قرار گرفته است اندازه گیری می‌شود. تفاوت دو مقدار بدست آمده وزن آب را به دست خواهد آورد که با تقسیم آن بر ۹۹۸ حجم دقیق قالب محاسبه خواهد شد. مجدداً وزن قالب توخالی را اندازه گیری کرده (m1) و بعد از پر کردن قالب با بتن و مترکم کردن آن نیز وزن کل قالب و بتن اندازه گیری می‌شود (m2). با تقسیم تفاوت دو وزن بر حجم بدست آمده در مرحله قبل، وزن

۳- نتایج و بحث

برای بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی بتن‌های نهایی ساخته شده شامل بتن معمولی و سنگین، آزمایشات مقاومت خمشی، فشاری،

جدول ۶- وزن مخصوص نمونه‌های بتنی، کیلوگرم بر مترمکعب

ردیف	نمونه	وزن مخصوص خمیری	وزن مخصوص بتن سخت شده
۱	C	۲۴۰۱	۲۳۸۹
۲	CN	۲۴۰۳	۲۳۹۳
۳	H25	۲۶۰۰	۲۶۴۵
۴	H25N	۲۶۴۰	۲۶۳۹
۵	H80	۳۲۰۰	۳۱۸۵
۶	H80N	۳۲۳۶	۳۲۰۴
۷	H100	۳۵۹۰	۳۵۴۰
۸	H100N	۳۶۱۰	۳۵۷۵

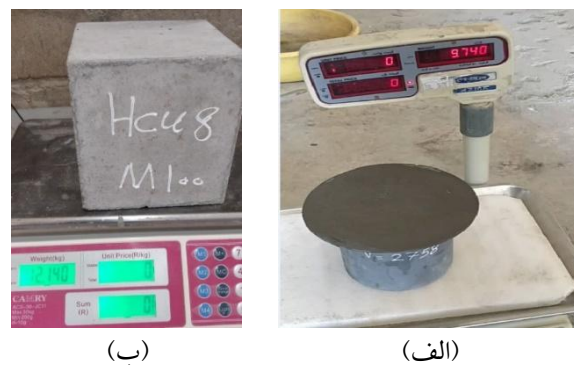
۳-۲- مقاومت فشاری

جهت تعیین مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتیمتر با سن ۷ و ۲۸ روز از استاندارد EN BS 12390 استفاده شده است [۲۵]. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری در جدول ۷ ارائه شده است. نسبت مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به مقاومت نمونه شاهد (C) در هر سن نیز در شکل ۵ نشان داده شده است. از نتایج مشخص است که در بتن سنگین با زیاد شدن درصد گندله و پوسته آهن در صورتیکه به طرح میکروسلیس اضافه نشود مقدار مقاومت فشاری تغییر چندانی نخواهد داشت. مقاومت فشاری در ۷ روز، با زیاد شدن مقدار سنگ‌دانه آهنی، مقداری کاهش یافته و در ۲۸ روز، نتایج، مقدار جزئی افزایش را نشان می‌دهد. جایگزینی ۱۰ درصد از سیمان طرح اختلاط با میکروسلیس تأثیر بسیار زیادی در ارتقاء مقاومت فشاری مخصوصاً در نمونه‌های حاوی مقادیر بیشتر سنگ‌دانه شامل گندله و پوسته آهن شده است. از جدول ۷ مشخص است که، درحالی‌که در نمونه شاهد به‌عنوان بتن سبک، مقاومت از ۳۸ به ۴۱ مگاپاسکال افزایش یافته (۵ درصد افزایش) ولی در نمونه با ۱۰۰ درصد گندله و پوسته آهن، میکروسلیس موجب افزایش مقاومت از ۴۰ به ۵۱ مگاپاسکال (۲۵ درصد افزایش) شده است.

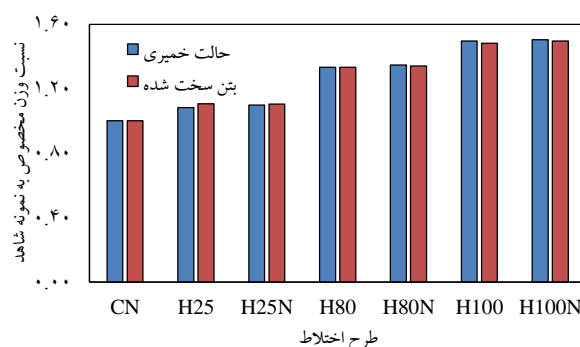
در مقایسه با نتایج بدست آمده از سایر محققان می‌توان اشاره کرد که اسماعیل و الهاشم برای جایگزینی ۲۰ درصد از ریزدانه با خرده آهن افزایش ۱۷ درصدی در مقاومت فشاری را گزارش کرده‌اند

مخصوص بتن تر بدست می‌آید.

برای اندازه‌گیری وزن مخصوص بتن سخت شده طبق استاندارد EN 12390-7 از نمونه‌های مکعبی ۱۵*۱۵*۱۵ سانتی‌متر با سن ۲۸ روز استفاده گردیده است [۲۱]. در شکل ۳ نحوه اندازه‌گیری وزن دو نمونه بتن خمیری و سخت شده نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده برای وزن مخصوص بتن در جدول ۶ نشان داده شده است. نسبت وزن مخصوص هر نمونه به نمونه شاهد نیز در شکل ۴ ارائه شده است. از نتایج مشخص است که با افزایش مقدار گندله و پوسته آهنی در بتن، مقدار چگالی افزایش یافته است به طوری‌که وزن مخصوص برای نمونه‌های حاوی ۲۵، ۸۰ و ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه آهنی به ترتیب ۱۰، ۳۴ و ۵۰ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. مقدار این افزایش متناسب با درصد جایگزینی و وزن مخصوص گندله و پوسته آهن می‌باشد. نتایج ارائه شده با نتایج حاصل از جایگزینی سنگ‌دانه با خرده آهن که توسط برخی محققین انجام گرفته است همخوانی دارد [۲۲، ۲۳]. به‌عنوان نمونه تایه و صفار افزایش ۱۰ درصدی چگالی به واسطه جایگزینی ۳۰ درصد از سنگ‌دانه معمولی با خرده آهن را گزارش کرده‌اند [۲۴].



شکل ۳- تعیین وزن مخصوص، الف) بتن خمیری، ب) بتن سخت شده



شکل ۴- نسبت وزن مخصوص نمونه‌ها به نمونه شاهد در حالت خمیری و سخت شده

آزمایش مقاومت کششی از نمونه استوانه‌ای به ابعاد 150×300 میلی‌متر استفاده شده است. مطابق با استاندارد ASTM C496 نمونه طوری بین صفحات دستگاه جک بتن شکن قرار می‌گیرد که محور آن افقی باشد و سپس بار افزایش می‌یابد تا گسیختگی به صورت دو نیم شدن در صفحه شامل قطر قائم نمونه به وجود آید [28]. برای جلوگیری از تنش‌های فشاری موضعی خیلی بالا در خطوط بارگذاری مطابق استاندارد ASTM C496-90 نوارهای تخته سه لایه باریکی به ضخامت 3 میلی‌متر و به عرض 25 میلی‌متر و طولی برابر با طول قالب استفاده گردید. بر اساس نتایج آزمایش مقاومت کششی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$T = 2P / (3.14 * L * D) \quad (1)$$

در این رابطه، T مقاومت کششی (kg/cm^2)، P حداکثر بار اعمال شده (kg)، L و D نیز به ترتیب طول و قطر آزمون (cm) می‌باشند. در شکل 6، دستگاه اندازه‌گیری مقاومت کششی به همراه یک نمونه گسیخته شده نشان داده شده است. نتایج حاصل از این آزمایش برای نمونه‌ها در سن 28 روز در جدول 8 نشان داده شده است. نسبت مقاومت کششی به مقاومت کششی نمونه شاهد نیز در شکل 7 نشان داده شده است.



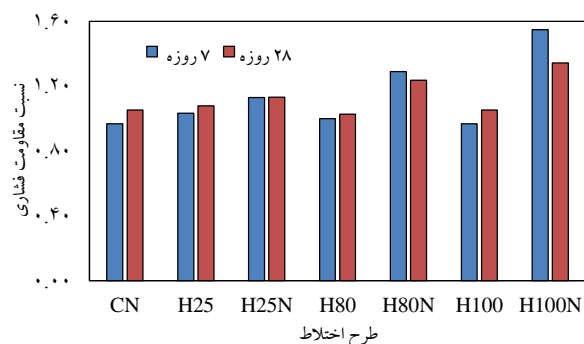
شکل 6- دستگاه آزمایش کششی به روش برزلی

طبق نتایج بدست آمده، مقاومت کششی بتن معمولی 3/42 مگاپاسکال بدست آمده است و با افزایش مقدار جایگزینی سنگ‌دانه با سنگ‌دانه آهنی، مقدار مقاومت کششی به صورت جزئی کاهش یافته و برای نمونه H100 به 3/24 مگاپاسکال رسیده که بیانگر 5 درصد کاهش مقاومت می‌باشد. روند مشاهده شده، برعکس روند اتفاق افتاده برای مقاومت فشاری بوده است

که در این پژوهش مقدار افزایش در مقاومت فشاری برای جایگزینی 25 درصد درشت‌دانه و سنگ‌دانه طبق شکل 5 تقریباً 10 درصد بدست آمده است [26]. ساتیپاراخ و همکاران افزایش 26 درصدی در مقاومت فشاری در صورت جایگزینی ریزدانه با خرده آهن را گزارش کرده‌اند [27]. برخلاف نتایج گزارش شده توسط ساتیپاراخ و همکاران، نتایج بدست آمده در این تحقیق نشان داد که بدون استفاده از میکروسیلیس و با وجود جایگزینی درشت دانه و ریزدانه چنین افزایشی امکان پذیر نخواهد بود. در نمونه‌های فاقد میکروسیلیس در واقع حفرات ایجاد شده به دلیل شکل پولکی پوسته‌های آهن می‌تواند در کم کردن تأثیر سنگ‌دانه سنگین مؤثر باشد که این موضوع توسط برخی محققین مانند تایه و ساغر نیز گزارش شده است [24].

جدول 7- مقاومت فشاری، مگاپاسکال

ردیف	نمونه	روزه 7	روزه 28
1	C	34	38
2	CN	30	41
3	H25	32	41
4	H25N	35	43
5	H80	31	39
6	H80N	40	47
7	H100	30	40
8	H100N	44	51



شکل 5- نسبت مقاومت فشاری نمونه‌ها به نمونه شاهد در سنین 7 و 28 روزه

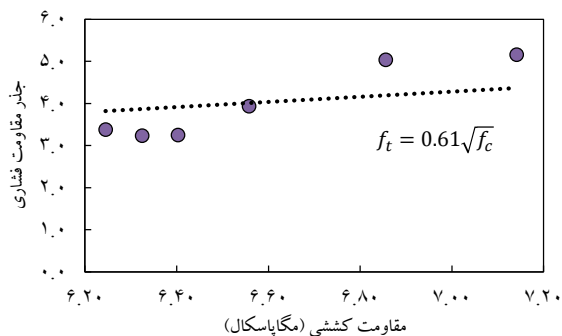
3-3- مقاومت کششی

در این تحقیق از روش شکست برزلی جهت تعیین مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای استفاده شده است. جهت انجام

کششی به نمونه فاقد خرده آهن نزدیکتر گردید [۲۳]. در این تحقیق هم طبق نتایج بدست آمده با افزایش مقدار گندله و پوسته آهن مقدار مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته مگر اینکه در طرح اختلاط از میکروسیلیس استفاده شده باشد. با توجه به اینکه مراجع مختلف مقاومت کششی را به صورتی مضربی از $f_c^{0.5}$ بیان می کنند، در شکل ۸ نمودار برآزنده شده به نتایج آزمایشگاهی برای بیان مقاومت کششی بر حسب مقاومت فشاری نشان داده شده است. طبق شکل نشان داده شده رابطه به صورت زیر بدست آمده است:

$$f_t = 0.61\sqrt{f_c} \quad (2)$$

در این رابطه، f_t مقاومت کششی بر حسب مگاپاسکال و f_c مقاومت فشاری می باشد.



شکل ۸- رابطه بین مقاومت کششی و مقاومت فشاری

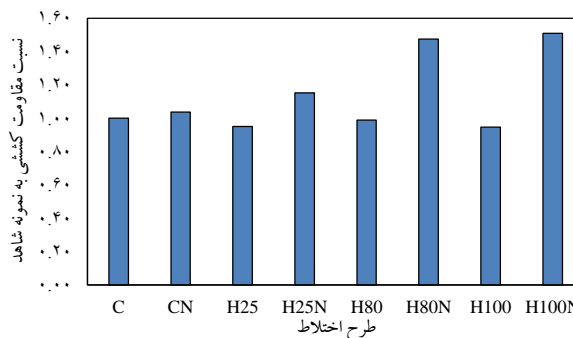
۳-۴- مقاومت خمشی

برای تعیین مدول گسیختگی بر مبنای مقاومت خمشی از تیر بتنی به ابعاد $600 \times 150 \times 150$ میلیمتر طبق استاندارد GOT 10180 استفاده شده است. برای بارگذاری نمونه‌ها، در این پژوهش از روش بار مرکزی مطابق با استاندارد ASTM C293 استفاده شده است [۳۰]. نتایج آزمایشات مقاومت خمشی در جدول ۹ آمده است. در شکل ۹ نسبت مقاومت خمشی نمونه‌ها به مقاومت خمشی نمونه شاهد نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده تفاوت چندانی در مقاومت خمشی نمونه حاوی ۲۵ و ۸۰ درصد گندله و پوسته آهن ایجاد نشده است به طوریکه مقاومت خمشی به ترتیب ۳ و ۱ درصد بیشتر از نمونه شاهد بدست آمده است. در نمونه حاوی ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه آهنی روند کاملاً متفاوت بوده است به طوری که، مقاومت خمشی ۸ درصد نسبت به نمونه شاهد

که مقدار جزئی افزایش مقاومت مشاهده گردیده بود. دلیل این امر را می توان به شکل دایره‌ای دانه‌های گندله و کاهش چفت و بست سنگ‌دانه‌ها نسبت به بتن شاهد نسبت داد. برای نمونه‌های حاوی میکروسیلیس مقاومت کششی به نحو چشمگیری بهبود یافته است به طوریکه برای نمونه H100N مقاومت کششی به ۵/۶۱ مگاپاسکال رسیده است که بیانگر ۵۰ درصد افزایش مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد است. افزایش مقاومت کششی به دلیل استفاده از میکروسیلیس بیشتر از افزایش مقاومت فشاری بوده است.

جدول ۸- مقاومت کششی، مگاپاسکال

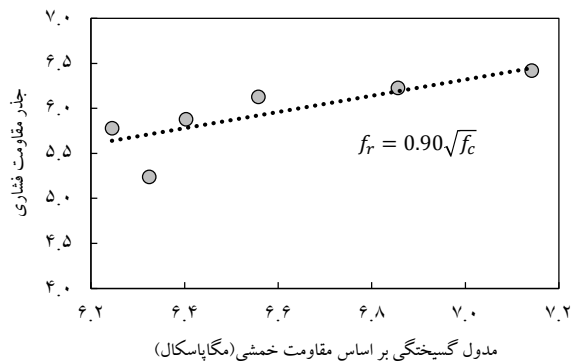
ردیف	نمونه	مقاومت کششی
۱	C	۳/۴۲
۲	CN	۳/۵۵
۳	H25	۳/۲۵
۴	H25N	۳/۹۴
۵	H80	۳/۳۷
۶	H80N	۵/۰۴
۷	H100	۳/۲۴
۸	H100N	۵/۱۶



شکل ۷- نسبت مقاومت کششی به مقاومت کششی نمونه شاهد

قمام و همکاران افزایش ۱۴ درصدی در مقاومت کششی بتن دارای ۲۰ درصد سنگ‌دانه آهنی را گزارش کرده‌اند که این نتیجه مطابق با افزایش ۱۵ درصدی در مقاومت کششی نمونه دارای ۲۵ درصد سنگ‌دانه سنگین به همراه میکروسیلیس در این تحقیق می باشد [۲۹]. میاه و همکاران افزایش ۱۸ درصدی در مقاومت کششی نمونه‌های تا ۳۰ درصد خرده آهن را گزارش کرده‌اند ولی با افزایش مقدار جایگزینی سنگ‌دانه با خرده آهن مقدار مقاومت

در شکل ۱۰ رابطه بین مدول گسیختگی ناشی از مقاومت خمشی و جذر مقاومت فشاری نشان داده شده است.



شکل ۱۰- رابطه بین مقاومت خمشی (مدول گسیختگی) و جذر مقاومت فشاری

۳-۵- آزمایش نفوذپذیری

آزمایش نفوذپذیری با استفاده از روش استاندارد BSEN12390-8 انجام گرفته است [۲۵]. در این پژوهش از نمونه استوانه‌ای به ابعاد ۱۵۰*۱۵۰ میلی‌متر تحت فشار آب جهت تعیین میزان نفوذپذیری بتن استفاده شده است. ابتدا نمونه تحت فشار ۲ بار قرار گرفته و هر ۱۶ ساعت ۲ بار فشار افزایش داده می‌شود تا در نهایت نمونه تحت فشار ۱۰ بار قرار گیرد و سپس نمونه از دستگاه خارج شده و توسط دستگاه جک نمونه شکسته می‌شود و مقدار نفوذ آب با استفاده از کولیس اندازه‌گیری می‌شود. دستگاه آزمایش به همراه یکی از نمونه‌های شکسته شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج عمق نفوذ آب در جدول ۱۰ آورده شده است.



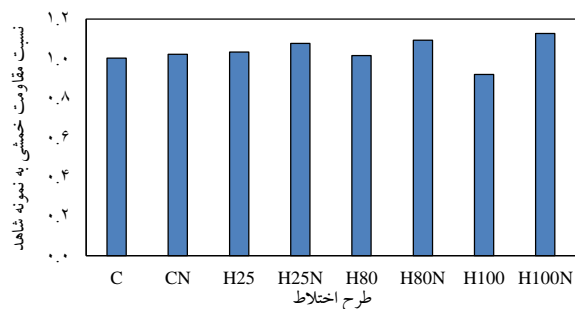
شکل ۱۱- آزمایش نفوذ پذیری، (الف) دستگاه آزمایش نفوذپذیری، (ب) اندازه‌گیری مقدار نفوذ آب در نمونه

نتایج نشان دهنده کمتر بودن عمق نفوذ آب به مقدار جزئی در

کاهش یافته است. برای نمونه‌های حاوی میکروسیلیس مشاهده می‌گردد که همانند رویه مشاهده شده در مقاومت فشاری و کششی، افزودن میکروسیلیس موجب بهبود مقاومت خمشی شده است. مقدار این افزایش برای نمونه‌های حاوی ۲۵، ۸۰ و ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه آهنی به ترتیب برابر با ۸، ۹ و ۱۲ درصد بوده است. در مقایسه با دو مقاومت فشاری و کششی، اثر میکروسیلیس برای بهبود مقاومت خمشی کمتر بوده است.

جدول ۹- مقاومت خمشی، مگاپاسکال

ردیف	نمونه	مقاومت خمشی
۱	C	۵/۷۱
۲	CN	۵/۸۲
۳	H25	۵/۸۸
۴	H25N	۶/۱۳
۵	H80	۵/۷۸
۶	H80N	۶/۲۳
۷	H100	۵/۲۴
۸	H100N	۶/۴۲



شکل ۹- نسبت مقاومت خمشی به مقاومت خمشی نمونه شاهد

بر اساس تحقیقات قبلی موجود، اثر سنگ‌دانه‌های آهنی در مقاومت خمشی نیز بسیار متغیر گزارش شده است. مایه و همکاران ۴۷ درصد افزایش مقاومت خمشی برای جایگزینی ۳۰ درصد از ریزدانه با خرده آهن را گزارش کرده‌اند [۲۳]. تایه و صفار ۱۵ درصد افزایش مقاومت خمشی برای جایگزینی ۲۵ درصد سنگ‌دانه معمولی با سنگ‌دانه آهنی را گزارش کرده‌اند [۲۴]. غنام و همکاران نیز افزایش ۴۰ درصد برای نمونه حاوی میکروسیلیس و سنگ‌دانه آهنی گزارش کرده‌اند [۲۹]. تفاوت‌های بین نتایج تحقیق حاضر به دلیل جایگزینی درشت دانه با سنگ‌دانه آهنی و پیوستگی کمتر به دلیل گرد گوشه بودن گندله آهنی است.

استفاده از میکروسیلیس در بهبود مقاومت کششی بیشتر از مقاومت فشاری است.

- مقاومت خمشی بتن سنگین وقتی بخشی سنگ‌دانه با گندله و پوسته آهن جایگزین شود در محدوده مقاومت خمشی بتن معمولی است ولی وقتی کل سنگ‌دانه جایگزین شود، مقاومت خمشی بتن سنگین ۱۰ درصد کمتر از بتن معمولی است. میکروسیلیس موجب افزایش مقاومت خمشی بتن سنگین تا ۱۲ درصد بیشتر از بتن معمولی می‌شود.

- نفوذپذیری در برابر آب برای بتن سنگین کمتر از بتن معمولی است و اضافه کردن میکروسیلیس نیز موجب کمتر شدن نفوذپذیری بین ۳۰ تا ۴۰ درصد می‌شود.

۵- مراجع

- [1] Sayyed, M., et al., *Application of the MCNP 5 code to simulate the shielding features of concrete samples with different aggregates*. Radiation Physics and Chemistry, 2020. **174**: p. 108925.
- [2] Stel'Makh, S., E. Shcherban, and O. Zholobova. *Prescription and technological aspects of manufacturing high-quality centrifuged products and structures from heavy concrete*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. IOP Publishing.
- [3] Szajerski, P., et al., *Radiation induced strength enhancement of sulfur polymer concrete composites based on waste and residue fillers*. Journal of Cleaner Production, 2020. **271**: p. 122563.
- [4] Khalaf, M.A., C.C. Ban, and M. Ramli, *The constituents, properties and application of heavyweight concrete: A review*. Construction and building materials, 2019. **215**: p. 73-89.
- [5] *ACI 211.1-91, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. 2009: Farmington Hills, MI, USA.
- [6] Ban, C.C., et al., *Modern Heavyweight Concrete Shielding: Principles, Industrial Applications and Future Challenges; Review*. Journal of Building Engineering, 2021: p. 102290.
- [7] Aslani, F., D.M. Lesslie, and F. Hamidi, *Development and analysis of highly workable high-strength heavyweight concrete using magnetite aggregates*. Structural Concrete, 2021. **22**: p. E169-E182.
- [8] Azreen, N., et al., *Simulation of ultra-high-performance concrete mixed with hematite and barite aggregates using Monte Carlo for dry cask storage*. Construction and Building Materials, 2020.

نمونه‌های حاوی گندله آهن می‌باشد به طوریکه مقدار نفوذ از ۱۲ میلیمتر برای نمونه شاهد به ۱۱، و ۱۰ و ۱۰ میلیمتر برای نمونه‌های حاوی ۲۵ و ۸۰ و ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه آهنی رسیده است. اثر میکروسیلیس نیز باعث کاهش قابل توجه در عمق نفوذ آب شده است و این بهبود برای نمونه‌های بتن سنگین با هر درصد سنگ‌دانه آهنی تقریباً مشابه بوده است.

جدول ۱۰- نتایج آزمایش نفوذپذیری، میلیمتر

ردیف	نمونه	نفوذ آب (mm)
۱	C	۱۲
۲	CN	۸
۳	H25	۱۱
۴	H25N	۷
۵	H80	۱۰
۶	H80N	۶
۷	H100	۱۰
۸	H100N	۷

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش ساخت بتن سنگین با استفاده از نسبت‌های مختلف گندله و پوسته آهن مورد بررسی قرار گرفت و بر اساس آزمایشات انجام گرفته به صورت کلی نتایج زیر حاصل گردید:

- جایگزینی سنگ‌دانه با نسبت‌های مختلف گندله و پوسته آهن تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری بتن ندارد ولی در صورت استفاده از ۱۰ درصد میکروسیلیس مقاومت فشاری برای بتنی که کاملاً از گندله آهن تشکیل شده است تا ۲۴ درصد افزایش می‌یابد.

- اضافه کردن بیشتر از ۲۵ درصد گندله و پوسته آهن به بتن موجب افزایش چگالی بتن به بالای ۲۶۰۰ کیلوگرم در مترمکعب و قرارگیری آن در دسته بتن سنگین خواهد شد. با جایگزینی ۱۰۰ درصد درشت‌دانه با گندله آهن و ۸۰ درصد ریزدانه با پوسته آهن، بیشترین وزن مخصوص بتن یعنی ۳۵۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب حاصل شده است.

- مقاومت کششی بتن سنگین به صورت جزئی کمتر از بتن معمولی است ولی در صورت استفاده از ۱۰ درصد میکروسیلیس تا ۵۰ درصد مقاومت کششی بیشتر از بتن معمولی خواهد بود. تأثیر

Materials, 2012. **28**(1): p. 157-163.

[23] Miah, M.J., et al., *Effect of recycled iron powder as fine aggregate on the mechanical, durability, and high temperature behavior of mortars*. Materials, 2020. **13**(5): p. 1168.

[24] Tayeh, B.A. and D.M. Al Saffar, *Utilization of waste iron powder as fine aggregate in cement mortar*. journal of engineering research and technology, 2018. **5**(2).

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

[26] Ismail, Z.Z. and E.A. Al-Hashmi, *Reuse of waste iron as a partial replacement of sand in concrete*. Waste Management, 2008. **28**(11): p. 2048-2053.

[27] Helmand, P. and S. Saini, *Mechanical properties of concrete in presence of Iron filings as complete replacement of fine aggregates*. Materials Today: Proceedings, 2019. **15**: p. 536-545.

[28] ASTM, *ASTM C 496: Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens*. 2010, West Conshohocken, PA: ASTM: ASTM International

[29] Ghannam, S., H. Najm, and R. Vasconez, *Experimental study of concrete made with granite and iron powders as partial replacement of sand*. Sustainable Materials and Technologies, 2016. **9**: p. 1-9.

[30] ASTM, *ASTM c293: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with CentrePoint Loading)*. 2012, West Conshohocken: ASTM International.

263: p. 120161.

[9] Akkurt, I. and A. El-Khayatt, *The effect of barite proportion on neutron and gamma-ray shielding*. Annals of nuclear energy, 2013. **51**: p. 5-9.

[10] Akkurt, I., et al., *Radiation shielding of concretes containing different aggregates*. Cement and Concrete Composites, 2006. **28**(2): p. 153-157.

[11] Gencil, O., et al., *Combined effects of fly ash and waste ferrochromium on properties of concrete*. Construction and Building Materials, 2012. **29**: p. 633-640.

[12] Topçu, İ.B., *Properties of heavyweight concrete produced with barite*. Cement and Concrete Research, 2003. **33**(6): p. 815-822.

[13] Gökçe, H.S., et al., *Gamma-ray attenuation coefficients and transmission thickness of high consistency heavyweight concrete containing mineral admixture*. Cement and Concrete Composites, 2018. **92**: p. 56-69.

[14] Esen, Y. and Z.M. Doğan, *Investigation of usability of limonite aggregate in heavy-weight concrete production*. Progress in Nuclear Energy, 2018. **105**: p. 185-193.

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

[16] Janković, K., et al., *The influence of nano-silica and barite aggregate on properties of ultra high performance concrete*. Construction and Building Materials, 2016. **126**: p. 147-156.

[17] Ataallah, B., et al., *Heavyweight concrete produced with Barite aggregates of W-Azerbaijan mines*. Concrete Research, 2017. **10**(3): p. 45-51.

[18] Kazjonovs, J., D. Bajare, and A. Korjakins. *Designing of high density concrete by using steel treatment waste*. in *The 10th International Conference Modern building materials, structures and techniques*. 2010.

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

[20] ASTM, *ASTM c138: Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete*. 2017, West Conshohocken, PA: ASTM International

[21] BSI, *EN 12390-7:2019, Testing Hardened Concrete—Part 7: Density of Hardened Concrete*. 2019, Belgium: European Committee for Standardization:

Brussels.

[22] Alwaeli, M. and J. Nadziakiewicz, *Recycling of scale and steel chips waste as a partial replacement of sand in concrete*. Construction and Building

Mechanical Properties and Permeability of Heavyweight Concrete Containing Iron Pellets, Crumb Iron and Microsilica

Abdollah Karami

M.S.c Student, Department of civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Abdolkarim Abbasi Dezfouli

Assistant Professor, Department of civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Seyed Abbas Hosseini *

Assistant professor, Faculty of Technology and Mining, Yasouj University, Choram, Iran.

Abstract

Concrete that has higher specific gravity than conventional concrete is known as heavyweight concrete. The use of high specific gravity aggregate is the most important way for the production of heavyweight concrete. Due to the use of aggregates with metallic properties and high atomic number, this type of concrete has the property of shielding against harmful rays. In this research, the possibility of using iron pellets with crumb iron as a substitute for concrete aggregate to produce heavyweight concrete has been investigated. For this purpose, 25, 80 and 100% of aggregates have been replaced with pellets and iron shells, and to prevent the effect of this replacement on increasing the porosity of concrete, part of the mixing cement has also been replaced with micro silica. Compressive strength, tensile strength, flexural strength as well as permeability tests have been performed on the constructed specimens and the specific gravity of the produced heavyweight concrete has also been reported. The results show a very good effect of micro silica on improving the properties of heavyweight concrete. The compressive strength of heavyweight concrete in the presence of micro silica is up to 34% higher than conventional concrete. Tensile and flexural strengths have increased up to 50% and 12%, respectively, compared to conventional concrete if micro silica is used, respectively. The permeability of heavyweight concrete for each percentage of pellet and iron shell replacement was lower than conventional concrete.

Keywords: Heavyweight concrete, Iron pellets, Crumb iron, compressive strength, Permeability, Microsilica.

* Corresponding Author: a.hosseini@yu.ac.ir

