تحقیقات بتن
سال دهم، شمارهٔ سوم
پاییز ۹۶
ص ۵۱ – ۴۳
تاریخ دریافت: ۹۶/۲/۵
تاریخ پذیرش: ۹۶/۹/۵

تولید بتن‌سنگین از سنگ‌دانه‌های باریت معادن استان آذربایجان‌غربی

عطاالله بهرامی *
استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه ارومیه
فاطمه کاظمی
کارشناس ارشد مهندسی استخراج معدن
سیدعلی سیدپور
کارشناس گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه
مهدی موتاب
کارشناس ارشد گروه مهندسی معدن، دانشگاه ارومیه

چکیده

کاربرد بتن های سنگین در ساخت راکتورهای نیروگاه های هسته ای، مراکز پزشکی، مراکز تحقیقاتی شتاب دهنده ها و نیز مراکز نظامی به عنوان پانل های محافظ، جایگاه خاصی را داراست. هدف از این تحقیق، طراحی و ساخت بتن سنگین با استفاده از ذخایر باریت استان آذربایجان-غربی است. بدین منظور پس از انجام مطالعات اولیه بر روی چندین نمونه سنگ باریت، نمونه باریت معدن شاخ سفید مهاباد براساس استانداردهای ASTM C637 و ASTMC33 (با توجه به مقادیر چگالی و عیار) برای ساخت بتن سنگین انتخاب گردید. سپس طرح اختلاط بتن با انجام ٤ آزمایش تعیین، و نمونه هایی از بتن سنگین با ۰، ۵۰، ٦۵، ۷۵، ۸۵ درصد سنگدانه باریت و همچنین بتن سنگین ساخته شده از ۱۰۰ درصد سنگدانه باریت، تهیه گردید. در تمامی نمونه ها مقدار سیمان و نسبت آب به سیمان ثابت و به ترتیب برابر ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/٤۸ است. بر روی نمونه ها آزمایش های تعیین مقدار چگالی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته، سرعت امواج التراسونیک و آزمایش های محافظت پرتویی انجام شد. نتایج حاصل از آزمایش ها نشان داد که بتن سنگین ساخته شده با ترکیب ۱۰۰٪ باریت (به جای سنگدانه شن و ماسه) دارای چگالی ۳/۳٦۲ گرم بر سانتیمترمکعب، مقاومت فشاری ۳۸٦/۷۳ کیلوگرم بر سانتیمترمربع، مقاومت کششی ۵٤/۸ کیلوگرم بر سانتیمترمربع ، مدول الاستیسیته ۱۰۵×۲/٦۳ کیلوگرم بر سانتیمترمربع، سرعت امواج اولتراسونیک در آن ٤/۸۰ کیلومتر بر ثانیه و ضریب تضعیف برای تابش چشمه های کبالت-٦۰ و سزیم-۱۳۷ به ترتیب $0/22\ cm^{-1}$ و $0/30\ cm^{-1}$ است.

واژه‌های کلیدی: سنگدانه باریت، بتن سنگین، آزمایش های فیزیکی و مکانیکی، محافظت پرتویی، آذربایجانغربی.

* نویسنده مسئول: a.bahrami@urmia.ac.ir

۱- مقدمه

بتن یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی است. اگرچه مقاومت و تحمل بار بتن با فولاد قابل مقایسه نیست، اما مصرف آن به‌دلیل مقاومت بالا در مقابل آب و در نتیجه استفاده از آن برای ساخت پل‌های آب‌گذر، دیوارهای حائل در برابر آب، سدها، کانال‌ها و لوله‌های انتقال آب و مخازن ذخیره‌سازی از فولاد بیشتر است. سهولت شکل‌پذیری بتن تازه، دسترسی آسان، مقرون به‌صرفه بودن، انرژی اولیه مورد نیاز کمتر و امکان استفاده مجدد از مواد زائد بتن به‌عنوان سنگ‌دانه از دیگر مزایایی آن در برابر مصالح ساختمانی دیگر است[۱]. همچنین بتن یک ماده مناسب و دارای استفاده فراوان در حفاظت‌های بیولوژیکی و هسته‌ای است. تابش اشعه در مقادیر بالاتر از حد مجاز برای سلامت انسان بسیار خطرناک است. بتن سنگین در سراسر جهان دارای کاربرد محافظتی در برابر تشعشعات خطرناک است. کاربرد بتن‌های سنگین در ساخت راکتورهای نیروگاه‌های هسته‌ای، مراکز پزشکی، مراکز تحقیقاتی شتاب‌دهنده‌ها و نیز مراکز نظامی به‌عنوان پانل‌های محافظ، جایگاه خاصی را داراست[۲]. در بیشتر مواقع دیوارهای حجیم ساخته شده از بتن معمولی با اهداف حفاظتی در مکان‌هایی نظیر راکتورهای هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند، ولی در مواقعی که فضای قابل استفاده محدود باشد کاهش در ضخامت دیوار به‌سبب استفاده از بتن با چگالی بالا(بتن سنگین) امکان‌پذیر خواهد بود؛ زیرا مصالح به‌کار برده شده در بتن سنگین دارای دو ویژگی چگالی و عناصر با عدد اتمی بالا بوده که موجب افزایش میرایی اشعه در بتن می‌شود[۳].

باتوجه به تأثیر نوع مصالح مصرفی بر روی ویژگی‌های محافظتی بتن که باعث مقاومت و توان محافظتی آن در برابر اشعه می‌شود، بایستی از مصالح مناسب برای بهبود ویژگی‌های بتن استفاده شود. باتوجه به مطالعات انجام شده، استفاده از مصالحی نظیر آهن یا کانه آهن (مگنتیت، هماتیت، لیمونیت و ...)، کانه سرب (گالن)، باریت (سولفات باریم)، قطعات فولاد و ... نتایج مثبتی بر روی ویژگی‌های مکانیکی و محافظتی بتن دارند. استفاده از هماتیت به‌عنوان مصالح سنگین باعث افزایش چگالی بتن حاصل و همچنین بالا رفتن چسبندگی و تراکم بتن می‌شود[۴]. براساس مطالعات هماتیت محافظ بسیار خوبی در برابر ذرات نوترون و اشعه γ است[۵]. اضافه کردن زئولیت به سیمان نیز موجب افزایش مقاومت و کاهش نفوذپذیری می‌شود[۶]. استفاده از باریت نیز باعث افزایش میرایی اشعه در بتن ساخته شده و محافظت در برابر اشعه‌های ایکس و γ شده است[۷]. تحقیقات متعددی در رابطه با بکارگیری باریت در ساخت بتن سنگین انجام گرفته است. باریت ($BaSo_4$)، سولفات طبیعی باریم و از سولفات‌های بی‌آب، یک کانی سنگین با وزن مخصوص ۴/۵-۴/۲ گرم بر سانتیمترمکعب و سختی ۳/۵-۲/۵ براساس جدول موس است. سیستم تبلوری باریت، ارتورومبیک و رومبیک بی‌پیرامیدال بوده و بلورهای آن شفاف تا نیمه شفاف هستند. باریت منبع اصلی باریم بوده، عدد اتمی آن ۵۶ و وزن اتمی باریت ۱۳۷/۳۴ است. کاربرد عمده باریت در صنایع گل حفاری است، از دیگر کاربردهای باریت می‌توان به صنایع لاستیک، مشمع و کاغذهای مرغوب، کابل‌سازی، رنگ‌سازی(بویژه رنگ سفید)، لعابکاری، تهیه آلیاژها و ... اشاره کرد. در سال ۲۰۰۳ تحقیقی در رابطه با به‌کارگیری باریت در ساخت بتن سنگین، در دانشگاه عثمان قاضی ترکیه انجام گرفت. همچنین آزمایش‌های مختلفی برای تعیین نسبت آب به سیمان بهینه برای تولید بتن سنگین با استفاده از باریت انجام شد. براساس نتایج حاصل استفاده از باریت مقاومت کافی را تأمین می‌کند، همچنین با افزایش نسبت $\frac{W}{C}$ مقاومت فشاری، سختی اشمیت و مدول الاستیسیته کاهش و مقدار فرکانس رزونانس و سرعت امواج فراصوتی افزایش می‌یابد. در نهایت نسبت $\frac{W}{C}$ برابر ۰/۴ مناسب تشخیص داده شد[۸]. در مطالعه‌ای دیگر که در سال ۲۰۰۶ در دانشگاه سلیمان دمیرل ترکیه انجام گرفت، تأثیر مقدار باریت بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی بتن بررسی شد. نتایج نشان دادند که با افزایش میزان باریت، وزن واحد حجم افزایش می‌یابد. افزایش میزان باریت در نسبت‌های $\frac{W}{C}$ بیش از ۰/۵۱ تأثیری بر سختی اشمیت و فرکانس فراصوتی ندارد، اما در $\frac{W}{C}$ برابر ۰/۴۳ با افزایش باریت سختی اشمیت و فرکانس فراصوتی کاهش می‌یابد[۲]. قلی‌پور فیضی و همکارانش در سال ۱۳۹۵ تحقیقی در رابطه با ارزیابی خصوصیات بتن سنگین تهیه شده از سنگ‌دانه‌های باریت انجام دادند. در این تحقیق به امکان‌سنجی ساخت بتن سنگین باتوجه به منابع باریت موجود در اطراف شهرستان شاهین‌دژ پرداخته شده است. براساس نتایج، بتن سنگین ساخته شده از باریت علیرغم وزن مخصوص بیشتر دارای مقاومت فشاری و کششی کمتری نسبت به انواع دیگر است، اما مدول الاستیسیته آن بالاتر است[۹]. «حسن‌نژاد و برنجیان» در سال ۱۳۹۲

طی پژوهشی تأثیر نوع سنگ‌دانه‌ها را بر سرعت امواج فراصوت و ریزساختار و مقاومت بتن بررسی کردند. نتایج نشان داد که جنس سنگ‌دانه تأثیر بالایی بر روی مقاومت فشاری بتن داشته و با تغییر جنس سنگ‌دانه و افزایش مقاومت، سرعت امواج فراصوت کاهش می‌یابد[۱۰].

در این تحقیق باتوجه به وجود ذخایر مناسبی از باریت در استان آذربایجان‌غربی به بررسی امکان به‌کارگیری این منابع معدنی در ساخت بتن سنگین پرداخته شده است. بدین منظور آزمایش‌های اولیه‌ای بر روی ذخایر مختلف باریت شهرستان مهاباد انجام گرفته است. سپس به تهیه نمونه‌های بتن سنگین با ویژگی‌های مختلف از لحاظ درصد باریت و نسبت اختلاط پرداخته شده است. در نهایت پس از تعیین طرح اختلاط مناسب آزمایش‌های مختلف مکانیک-سنگی و جذب پرتو بر روی نمونه‌ها انجام و نمونه با درصد اختلاط مناسب مشخص گردید.

۲- روش تحقیق

باتوجه به پیشرفت‌های روزافزون صنایع هسته‌ای و آسیب‌های ناشی از مواد پرتوزا، ضرورت استفاده از مواد محافظ در برابر این اشعه‌ها بیش از پیش اهمیت پیدا کرده است. از جمله مواد محافظ مناسب می‌توان به بتن سنگین اشاره کرد. در فرایند جذب توسط حفاظ-های بتنی، جذب اشعه‌های α، γ و تشعشع نوترون‌ها بایستی مورد توجه قرار گیرد. جذب اشعه‌های α و γ که قدرت نفوذ بالایی دارند متناسب با جرم ماده جذاب است و به نوع ماده بستگی ندارد. باتوجه به ترکیب بتن سنگین که مخلوطی از هیدروژن و دیگر هسته‌های اتمی سبک و سنگین است و می‌تواند در محدوده نسبتا وسیعی از لحاظ جرم مخصوص ساخته شود، لذا در جذب اشعه-های γ، کند کردن سرعت نوترون‌ها و جذب آنها موثر است [۱۲]. در حفاظت‌های بیولوژیکی، قدرت حفاظتی ماده محافظ به سه عامل انرژی اشعه، چگالی ماده جاذب و عدد اتمی عناصر موجود در ماده محافظ وابسته است، به‌طوریکه با افزایش انرژی اشعه، میرایی کاهش ولی با افزایش چگالی ماده جاذب و عدد اتمی عناصر موجود در جاذب، میرایی افزایش می‌یابد[۶].

ضریب تضعیف خطی μ که پارامتر معرف اندرکنش بتن با اشعه‌های تابشی مانند α و γ است، مهم‌ترین مشخصه کمی در تعیین مقدار نفوذ اشعه در بتن است. میزان این کمیت تابعی از انرژی فوتون تابشی، نوع، عدد اتمی و چگالی مصالح مورد استفاده در بتن است[۱۱]. کارهای تحقیقاتی عددی و آزمایشگاهی متعددی به-منظور محاسبه و برآورد ضریب تضعیف خطی صورت پذیرفته است[۱۴]. μ برای بتن سنگین حاوی باریت به‌صورت رابطه ۱ است:

$$\mu = 0.055\, e^{1.36\,c}\ \ cm^{-1} \qquad (1)$$

و در مورد بتن با نسبت مشخص باریت

$$\mu = 0.006\, e^{1.04\,\Delta}\ \ cm^{-1} \qquad (2)$$

که C درصد باریت و Δ وزن واحد بتن است.

از دیگر مسائل مهم طراحی بتن‌های سنگین حفاظتی، مقاومت فشاری آن‌ها است. راکتورهای بتنی پیش‌تنیده (PCRV) تحت فشار، تنش و دماهای بیش از سازه‌های متعارف هستند. این عامل باعث ایجاد ریز ترک و افت پیش‌تنیدگی در بتن می‌شود، بنابراین بتن(PCRV) نه‌تنها باید دارای چگالی بالا، بلکه باید برای مقاومت فشاری بالایی نیز طراحی شود [۱۲].

همان‌گونه که گفته شد، در حفاظ پرتوهای γ عمل تضعیف اشعه با جرم ماده محافظ متناسب است. باریت از جمله مواد محافظ مناسب در برابر این اشعه‌هاست، اما به‌دلیل محدودیت ذخایر باریت در جهان و قیمت آن، از باریت به‌تنهایی نمی‌توان برای ساخت و ساز استفاده کرد، بنابراین از ترکیب این ماده معدنی در بتن، برای حفاظت‌های هسته‌ای استفاده می‌شود. وزن مخصوص بتن حاوی مصالح سنگی مانند باریت ۳/۷۶-۳/۴۵ گرم بر سانتیمترمکعب بوده، که حدود ۵۰٪ از بتن معمولی بیشتر است[۱۳].

۳- مواد و روش

مصالح به‌کار رفته در ساخت بتن سنگین در این تحقیق به شرح زیر است:

-سنگ‌دانه‌های سنگین:برای انتخاب سنگ‌دانه‌های سنگین مناسب، پس از نمونه‌برداری از پنج معدن باریت شاخ سفید، عبداله آباد، سرخاب، گرده‌بردان و قره‌بلاغ واقع در شهرستان مهاباد استان آذربایجان‌غربی و انجام آزمایش‌های مختلف براساس استانداردهای ASTMC637، ASTMC33 و بررسی نتایج، باریت معدن شاخ سفید به‌دلیل چگالی بالا و عیار مناسب‌تر برای ساخت بتن سنگین انتخاب گردید(جدول ۱). نتایج آنالیز XRF و وزن مخصوص نمونه باریت معدن شاخ سفید در جدول ۱ آمده است.

جدول۱- نتایج آنالیزهای شیمیایی و فیزیکی نمونه‌های ۵ معدن و آنالیز XRF معدن شاخ سفید مهاباد

وزن مخصوص	Pb (ppm)	Zn (ppm)	SrO %	Al_2O_3 %	MnO %	MgO %	CaO %	Fe_2O_3 %	SiO_2 %	$BaSo_4$%	
۴/۲۰	۶۱	۵۳	۰/۴۳	۰/۱۶	۰/۰۳۲	۰/۱۹	۰/۰۸	۰/۴۹	۰/۳۴	۹۷/۷۵	شاخ سفید
۴/۲۴	–	–	۲/۸۲	۰/۴۵	۱/۸۵	–	۰/۲۹	۴/۲۴	۴/۰۳	۸۶/۳۲	عبداله آباد
۴/۲۱	–	–	۳/۰۱	۰/۵۵	۲/۱۱	–	۰/۶	۴/۷۹	۵/۲۱	۸۳/۷۳	سرخاب
۳/۸۹	–	–	۵/۷۹	۰/۸۷	۳/۱۵	–	۰/۸۹	۶/۳۷	۸/۲۱	۷۸/۹۳	گرده‌بردان
۳/۵۶	–	–	۶/۸۶	۰/۳۲	۵/۳۸	–	۰/۵۶	۷/۵۸	۸/۴۳	۷۵/۵۶	قره‌بلاغ

سایر مصالح مورد استفاده در ساخت بتن شامل: سنگ‌دانه‌های معمولی (شن و ماسه موجود در آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه)، مواد سیمانی (سیمان پرتلند کارخانه سیمان ارومیه)، آب (سیستم آب لوله‌کشی دانشگاه ارومیه).

در این تحقیق برای دستیابی به طرح اختلاط مناسب بتن از روش حجم مطلق استفاده شد. پس از انجام ۴ آزمایش با مقدار مواد سیمانی ۳۲۵، ۳۵۰، ۵۰۰ و ۵۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، اثر مواد سیمانی در خواص بتن سنگین ساخته شده بررسی گردید. براساس نتایج بتن با مقدار ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان دارای خواص مناسب‌تری در حالت تازه و سخت شده است، لذا این مقدار سیمان برای ساخت بتن انتخاب گردید. با بررسی اثر نسبت‌های مختلف آب به سیمان ($\frac{W}{C}$)، در نهایت نسبت ۰/۴۸ مناسب تشخیص داده شد. در ادامه باتوجه به مقادیر ذکر شده برای سیمان و نسبت $\frac{W}{C}$ و برای بررسی خواص فیزیکی، مکانیکی و هسته‌ای بتن سنگین حاوی سنگدانه‌های باریت، نمونه‌هایی از بتن سنگین با ۰، ۵۰، ۶۵، ۷۵، ۸۵ و ۱۰۰ درصد باریت ساخته شد(جدول ۲). در این نمونه‌ها باریت باتوجه به درصد ذکر شده، جای‌گزین سنگ‌دانه‌های شن و ماسه در طرح اختلاط شده است، برای مثال در نمونه با ۵۰٪ باریت، ۵۰٪ از حجم سنگ‌دانه شن و ماسه با باریت جای‌گزین شد.

جدول ۲- طرح اختلاط بتن

ماسه (kg/m^3)	شن (kg/m^3)	باریت (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	$\frac{W}{C}$	٪ اختلاط باریت
۱۰۵۰	۷۰۰	۰	۳۵۰	۰/۴۸	۰
۹۴۵	۶۳۰	۱۷۵	۳۵۰	۰/۴۸	۵۰
۷۸۷/۵	۵۲۵	۴۳۷/۵	۳۵۰	۰/۴۸	۶۵
۵۲۵	۳۵۰	۸۷۵	۳۵۰	۰/۴۸	۷۵
۲۶۲/۵	۱۷۵	۱۳۱۲/۵	۳۵۰	۰/۴۸	۸۵
۰	۰	۱۷۵۰	۳۵۰	۰/۴۸	۱۰۰

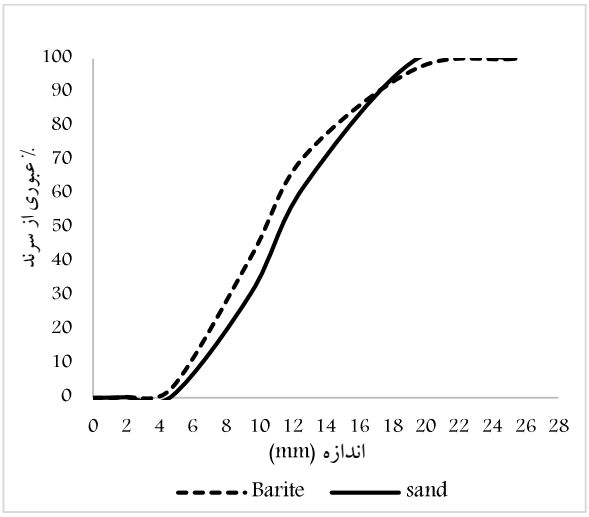
بر روی نمونه‌ها آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی شامل چگالی(استاندارد ASTM C642)، درصد جذب آب، مقاومت فشاری(استاندارد BS1881 PART 4)، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته، سختی اشمیت و سرعت امواج التراسونیک انجام گرفت. سپس با استفاده از کد کامپیوتری MCNP، ضریب تضعیف بتن سنگین برای چشمه‌های گامای کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ محاسبه گردید. همچنین ضریب تضعیف بتن در مقابل چشمه گاما با استفاده از کلیماتور و آشکارساز گاما اندازه‌گیری شد.

لازم به ذکر است، در پروسه ساخت بتن سنگین در این تحقیق به‌منظور عدم وجود خطا، تمامی بررسی‌ها و آزمایش‌ها براساس استانداردهای موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و همچنین استانداردهای ASTM انجام گرفته است.

٤- بحث و نتایج

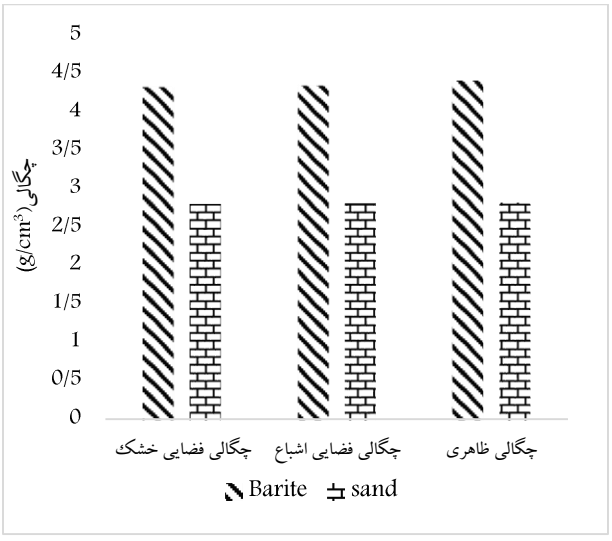
٤-١- توزیع ابعادی و تعیین چگالی مصالح مصرفی

ابتدا بر روی مصالح مورد استفاده برای ساخت بتن سنگین شامل باریت، شن و ماسه آنالیز سرندی انجام گرفت. نتایج مربوط به این آنالیز در شکل ۱ نمایش داده شده است. باتوجه به شکل، d_{80} نمونه باریت ۱۴/۵ میلیمتر و شن و ماسه ۱۵/۵ میلیمتر است که نشان‌دهنده وجود فضاهای خالی در میان مصالح تشکیل‌دهنده بتن است. به‌منظور کاهش میزان تخلخل، مصالح ریزدانه (باریت و شن وماسه ریزدانه با اندازه ذرات کمتر از ۱۰۰ مش) به ترکیب مذکور اضافه گردید.



شکل ۱- آنالیز سرندی نمونه باریت معدن شاخ سفید و شن و ماسه

نتایج مربوط به آزمایش‌های اندازه‌گیری چگالی فضایی خشک، چگالی فضایی اشباع و چگالی ظاهری نمونه باریت معدن شاخ سفید و نمونه شن و ماسه در شکل ۲ آمده است.

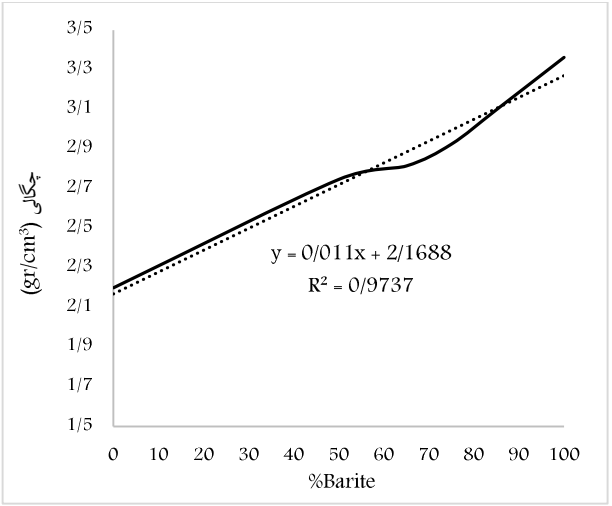


شکل ۲- چگالی نمونه باریت معدن شاخ سفید و شن و ماسه

میانگین چگالی باریت ۴/۳ گرم بر سانتیمترمکعب و شن و ماسه ۲/۸ گرم بر سانتیمترمکعب است. باتوجه به این‌که در سپرهای محافظتی با استفاده از بتن سنگین، میزان جذب به جرم واحد حجم بتن وابسته است، انتظار می‌رود با توجه به چگالی باریت، قدرت محافظتی بتن سنگین با ترکیب ۱۰۰٪ باریت مناسب باشد. همچنین در طی آزمایشی، میزان جذب آب توسط باریت و سنگ‌دانه شن و ماسه بررسی گردید، میزان جذب آب توسط باریت ۳/۹۷ ٪ و شن و ماسه ۰/۲۶ ٪ است که میزان جذب آب باریت حدود ۱۵ برابر جذب آب توسط شن و ماسه است.

٤-٢- تعیین مقدار چگالی نمونه‌ها

همان‌گونه که در بخش پیش بیان شد، پنج نمونه بتن سنگین با درصدهای مختلف باریت و نسبت آب به سیمان ۰/۴۸ مطابق استانداردهای ASTM تهیه گردید. پس از آن آزمایش‌هایی برای تعیین ویژگی‌های بتن حاوی درصدهای مختلف باریت طراحی گردید.در گام اول چگالی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد، نتایج مربوط به این آزمایش در شکل ۳ نمایش داده شده است. با توجه به شکل، مقدار چگالی بتن با افزایش درصد باریت با یک رابطه خطی افزایش پیدا می‌کند و در حالت اختلاط ۱۰۰٪ سنگدانه باریت، میزان چگالی به ۳/۳۶۲ گرم بر سانتیمترمکعب رسیده است که در حدود ۱/۵ برابر چگالی بتن بدون باریت است. بنابراین باتوجه به رابطه تجربی ۲، مقدار ضریب تضعیف خطی برای بتن سنگین حاوی ۱۰۰٪ باریت، $0/197\ cm^{-1}$ است.



شکل ۳- رابطه چگالی بتن با درصد اختلاط باریت

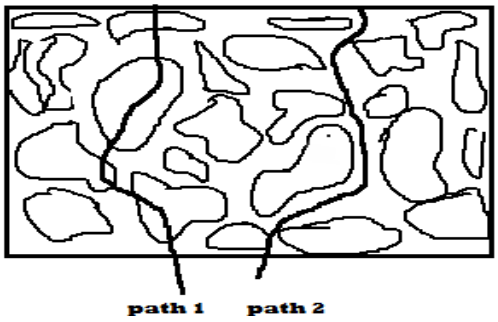
٤-٣- اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک‌محوره

به‌کارگیری سنگ‌دانه‌های سنگین علیرغم دارا بودن وزن و چگالی بالا نسبت به سنگ‌دانه‌های معمولی، تاثیر چشمگیری بر روی مشخصه مقاومت بتن نمی‌گذارند. مطابق مشاهدات تجربی در بیشتر موارد دلیل این شکست زودرس، توزیع و انتشار ترک در بتن است که در مسیر ۲ شکل ۴ نشان داده شده است، یعنی شکست در قسمت خمیری بتن رخ داده و ارتباطی با جنس سنگ‌دانه‌های مصرفی ندارد.

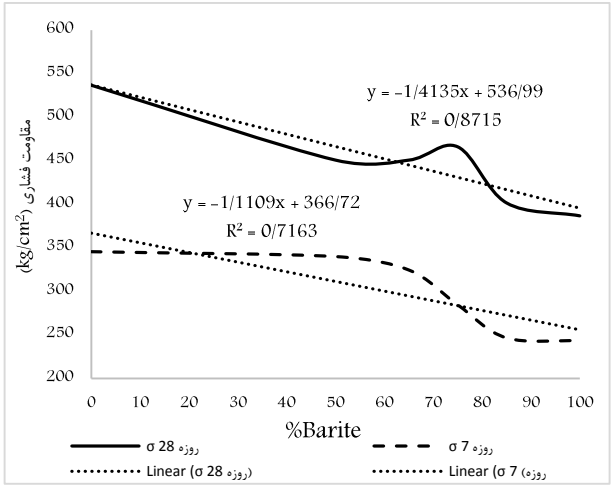
الگوی ترک‌خوردگی در مسیر ۱ شکل ۴ زمانی اتفاق می‌افتد که مقاومت سنگدانه‌ها کمتر از مقاومت خمیر سیمان باشد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف باریت در شکل ۵ نشان داده شده است. براساس شکل ۵ با افزایش درصد باریت، مقاومت فشاری تک‌محوره کاهش یافته است. مقدار مقاومت فشاری تک‌محوره ۲۸ روزه، در نمونه با ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه باریت ۳۸۶/۷۳ کیلوگرم بر سانتیمترمربع است که در مقایسه با نمونه بدون باریت ۲۷/۹ درصد کاهش یافته است. کاهش مقاومت فشاری در مقاومت ۲۸ روزه بتن با شیب بیشتری نسبت به مقاومت ۷ روزه نمود یافته است. کاهش مقاومت فشاری در این آزمایش به‌دلیل اندازه ذرات مواد تشکیل‌دهنده بتن است که باعث ایجاد فضای خالی در بین قطعات بتن شده است. بنابراین توزیع شکست در این نمونه‌ها از نوع مسیر ۲ شکل ۴ است و در قسمت خمیر سیمان اتفاق می‌افتد.

٤-٤- مقاومت کششی، مدول الاستیسیته، سرعت امواج التراسونیک و سختی اشمیت

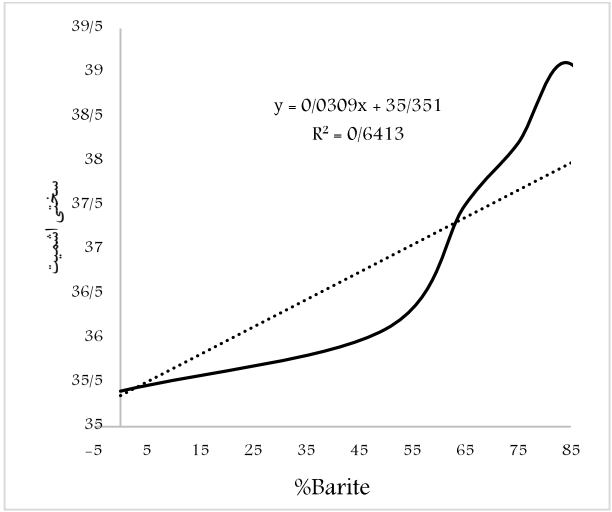
طبق آزمایش‌های تکمیلی انجام گرفته در آزمایشگاه بتن، مقاومت کششی بتن سنگین با ترکیب ۱۰۰٪ باریت ۵۴/۸ کیلوگرم بر سانتیمترمربع، مدول الاستیسیته آن $۲/۶۳\times۱۰^{۵}$ کیلوگرم بر سانتیمترمربع و سرعت امواج اولتراسونیک در آن ۴/۸۰ کیلومتر بر ثانیه محاسبه گردید. همچنین عدد بازگشتی چکش اشمیت نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج این آزمایش در شکل ۶ نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش میزان باریت مقدار سختی اشمیت نیز متناسب با آن افزایش یافته است و در حالت ۸۵ درصد اختلاط باریت به ماکزیمم مقدار ۳۹/۴ خود رسیده است.



شکل ۴- مسیرهای محتمل ترک‌خوردگی در بتن



شکل ۵- رابطه مقاومت فشاری با درصد باریت در بتن سنگین



شکل ۶- رابطه میان سختی اشمیت و درصد باریت

٤-٥- ضریب تضعیف خطی براساس کد MCNP و آنالیز شیمیایی

با توجه به اینکه بتن‌های با ۰ و ۱۰۰ درصد باریت دارای بهترین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی برای بررسی مقادیر ضریب تضعیف بوده‌اند، این نمونه‌ها برای محاسبات کد کامپیوتری

MCNP و آنالیز شیمیایی برای محاسبه ضریب تضعیف انتخاب شدند. ضرایب تضعیف نمونه‌ها برای چشمه‌های کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ اندازه‌گیری و نتایج محاسبات انجام شده در جدول ۳ آمده است. مقدار μ برای چشمه γ کبالت-۶۰ در نمونه بدون باریت $0/14\ cm^{-1}$ و در نمونه با ۱۰۰٪ باریت $0/22\ cm^{-1}$ است که در حدود ۵۷٪ افزایش داشته است. همچنین مقدار ضریب تضعیف برای چشمه γ سزیم-۱۳۷ با افزایش درصد باریت از صفر به ۱۰۰ درصد، نیز در حدود ۵۷٪ افزایش داشته است. مقادیر محاسباتی با استفاده از کد MCNP برای نمونه با ۱۰۰٪ باریت و برای چشمه‌های کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ به‌ترتیب $0/21\ cm^{-1}$ و $0/28\ cm^{-1}$ است که دارای اختلاف ناچیزی با مقادیر آزمایشگاهی است.

جدول ۳- نتایج محاسبات و اندازه‌گیری ضریب تضعیف بتن سنگین

نوع بتن	μ بتن برای چشمه گاما C_0-60			μ بتن برای چشمه گاما C_s-137		
	محاسباتی	آزمایش	٪ اختلاف	محاسباتی	آزمایش	٪ اختلاف
بتن ۰٪ باریت	۰/۱۳	۰/۱۴	۷/۷	۰/۱۷	۰/۱۹	۱۱/۸
بتن ۱۰۰٪ باریت	۰/۲۱	۰/۲۲	۴/۸	۰/۲۸	۰/۳۰	۷/۱

۵- نتیجه‌گیری

بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی بتن‌های سنگین ساخته شده با درصدهای مختلف باریت نشان می‌دهد که وجود باریت در بتن باعث افزایش جرم واحد حجم، کاهش سرعت امواج التراسونیک و همچنین کاهش چشمگیر ضرایب تضعیف امواج گاما می‌شود.

ضرایب تضعیف بتن سنگین(۱۰۰٪ باریت) برای پرتوهای γ کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ با استفاده کد کامپیوتری MCNP به‌ترتیب $0/21\ cm^{-1}$ و $0/28\ cm^{-1}$ و با استفاده از آزمایش $0/22\ cm^{-1}$ و $0/30\ cm^{-1}$ محاسبه گردید. در شرایط مشابه ضرایب تضعیف بتن معمولی(۰٪ باریت) نیز محاسبه و اندازه‌گیری شد. مقایسه ضرایب تضعیف نشان داد که متوسط ضریب تضعیف محاسباتی و عملیاتی در بتن سنگین به‌ترتیب ۵۷٪ و ۶۱٪ بیشتر از بتن معمولی است. در نهایت باتوجه به نتایج آزمایش‌ها خواص فیزیکی، مکانیکی و هسته‌ای بتن سنگین برای ساخت حفاظ پرتوهای γ از نظر سازه‌ای مناسب است. بنابراین برای یک میزان تضعیف ثابت برای پرتوهای γ با انرژی‌های متداول، می‌توان با استفاده از بتن سنگین، ضخامت حفاظ مورد نیاز را به مقدار قابل ملاحظه‌ای(حدود ۶۰٪) کاهش داد. از طرف دیگر چگالی با افزایش درصد باریت افزایش یافته و بیشترین مقدار آن در ترکیب ۱۰۰٪ باریت و به مقدار ۳/۳۶۲ گرم بر سانتیمترمکعب است که این مقدار ۶۵٪ بیش از چگالی بتن بدون باریت است همچنین میزان جذب آب در بتن سنگین حاوی باریت ۵۳٪ تعیین شده که به مراتب کمتر از نمونه معمولی بوده و باعث دوام بتن در برابر عوامل محیطی مهاجم می‌شود.

مقاومت فشاری و کششی بتن سنگین با ترکیب ۱۰۰٪ باریت به‌ترتیب ۳۸۶/۷۳ کیلوگرم بر سانتیمترمربع و ۵۴/۸ کیلوگرم بر سانتیمترمربع و مدول الاستیسیته آن $2/63\times10^5$ کیلوگرم بر سانتیمترمربع است.

عدد بازگشتی چکش اشمیت و سرعت امواج اولتراسونیک نیز به‌ترتیب ۳۹/۴ و ۴/۸۰ کیلومتر بر ثانیه است. مقایسه نتایج فوق با نتایج به‌دست آمده برای بتن معمولی نشان می‌دهد که افزودن باریت سبب کاهش مقاومت فشاری تک‌محوره و مقاومت کششی بتن می‌شود.

تقدیر و تشکر

با کمال تقدیر و تشکر از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه ارومیه جهت حمایت‌های مالی در انجام این پروژه و همچنین تشکر فراوان از جناب آقای مهندس مرتضی رنجی و شرکت پودرسازان که ما را در انجام این تحقیق یاری فرمودند.

٦- مراجع

[۱] ستارپور، مسعود."تاثیر اندازه ذرات و جنس مصالح طبیعی سنگین بر ویژگی‌های مهندسی و میرایی اشعه گاما در بتن". پایان نامه کارشناسی‌ارشد(۱۳۹۲)، دانشگاه تربیت مدرس، ص ۲.

[2] Demir, F., Budak, G., Karabulut, A., Sahin, R.,Oltulu, M., Şerifoğlu, K., Un, A. "Radiation transmission of heavyweight and normal-weight concretes containing colemanite for 6 MV and 18 MV X-rays using linear accelerator", Annals of Nuclear Energy, 37(2010), pp:339-344.

[3] Akkurt, I., Basyigit, C., Kilincarslan, S., Mavi, B., Akkurt, A. "Radiation shielding of concretes containing different aggregates", Cement & concrete Composites, 28(2006), pp: 153-157.

[4] Gencel, O., Ozel, C., Brostow, W., & Martinez-Barrera, G. "Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibers", Materials Research Innovations, 15, 3(2011), pp: 216-225.

[5] Kharita, M. H., Takeyeddin, M., Alnassar, M., & Yousef, S. "Development of special radiation shielding concretes using natural local materials and evaluation of their shielding characteristics", Progress in Nuclear energy, 50, 1(2008), pp: 33-36.

[۶] احمدی، جمال؛ عزیزی، حسام؛ کوهی، میثم. "بررسی تاثیر زئولیت در عیارهای مختلف سیمان بر روی مقاومت و نفوذپذیری بتن"، مجله تحقیقات بتن، سال هشتم، (۱۳۹۴)۲، صص: ۱۸-۵.

[7] Demir, F. Budak, G. Sahin, R. Karabulut, A. "Determination of radiation attenuation coefficients of heavyweight and normal-weight concretes containing colemanite and barite". Annals of Nuclear Energy, 38(2011), pp: 1274-1278.

[8] Bekir Topcu, I. "properties of heavyweight concrete produced with barite". Cement & concrete research, 33(2003), pp: 815-822.

[۷] قلی‌پور فیضی، مهدی؛ مجتهدی، علیرضا؛ لطف‌الهی یقین، محمدعلی. "آزمایش و ارزیابی خصوصیات مکانیکی بتن سنگین تهیه شده از سنگدانه‌های باریت"، فصلنامه آنالیز سازه-زلزله،(۱۳۹۵)۱، صص:۴۲-۳۵.

[۱۰] حسن‌نژاد، مرتضی؛ برنجیان، جواد. "بررسی اثر جنس سنگدانه در سرعت امواج فراصوت و ریزساختار و ناحیه انتقال بتن مقاومت بالا"، مجله تحقیقات بتن، سال پنجم، (۱۳۹۲)۲، صص: ۳۱-۱۹.

[11] Ouda, A. "Development of high performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-ray shielding". Progress in Nuclear Energy, 79(2015), pp: 48-55.

[۱۲] رمضانیاپور، علی‌اکبر. "بتن(ریزساختار، خواص و اجزا)". ترجمه،(۱۳۸۳)، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

[۱۳] بهرامی، عطاالله. "گزارش طرح بررسی فرآوری باریت‌های استان آذربایجان‌غربی جهت مصارف دارویی با ارزش افزوده بالا"، (۱۳۸۵)، دانشگاه ارومیه.

[14] Demir, F. and Un, A. "Radiation transmission of colemanite, tincalconite and unexcited for 6 and 18 MV X-rays by using linear accelerator", Applied Radiation and Isotopes, 72(2013), pp: 1-5.

Heavyweight concrete produced with using of Barite aggregates of W-Azerbaijan mines

Ataallah Bahrami *
Assistant professor of mineral processing, Department of mining, university of uremia.
Fatemeh Kazemi
Graduate of MSC mining engineering, university of uremia
said Ali Saidpoor
Expert of civil engineering department, university of uremia
Mahdi Mutab
Expert of mine engineering department, university of uremia

Abstract

Heavyweight concrete has a special place in the construction of reactors in nuclear power plants, medical centers, accelerators research centers and military centers as protective panels. Purpose of this research, is design and manufacture of heavyweight concrete with using of barite reserves of W-Azerbaijan province. Therefore, after conducting preliminary studies on several samples of barite ore, barite ore from Shakh-Sefid mine (in Mahabad County) has been appropriated, according to ASTM C637 and ASTMC33 standards for the production of heavyweight concrete. The concrete mix designed with doing several test, and was prepared concrete with different percent of barite and heavyweight concrete made of 100% barite. In all cases the amount of cement and W/C ratio fixed, respectively is 350 (kg/m^3) and 0.48. Different experimental such as physical, mechanical and nuclear doing upon the sample. The results showed that heavyweight concrete is made by combining 100% Barite (instead of sand) has a density about 3.362 (gr/cm^3), compressive strength 386.73 (kg/cm^2), tensile strength 54.8 (kg/cm^2), modulus of elasticity 2.63×10^5 (kg/cm^2), the ultrasonic wave velocity 4.80 (km/s) and attenuation coefficients for radiation sources of cobalt-60 and cesium-137, respectively is 0.22 cm^{-1} and 0.30 cm^{-1}.

Keywords: Barite aggregate, heavyweight concrete, physical & mechanical properties, radioactive, W-Azerbaijan.

* Corresponding Author: a.bahrami@urmia.ac.ir