



## طراحی، ساخت و بررسی خواص بتن حاوی بور ساخته شده با سنگدانه‌های بوردار طبیعی و مصنوعی برای استفاده در حفاظ پرتوهای نوترون

نعمت اله بخشی<sup>۱</sup>، غلامرضا رئیس علی<sup>۲</sup>، علی مهدوی<sup>۳</sup>،

فرهاد فروزانفر<sup>۴</sup>، ناهید حاجیلو<sup>۵</sup>، ارژنگ شاهرور<sup>۵</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

۲- دانشیار مهندسی هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

۳- استادیار مهندسی عمران، دانشگاه مازندران، دانشکده مهندسی عمران

۴- کارشناس عمران، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده مواد

۵- سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی

[nbakhshi@aut.ac.ir](mailto:nbakhshi@aut.ac.ir)

### خلاصه

هدف از این تحقیق، طراحی و ساخت بتن حاوی بور، می باشد به گونه‌ای که دارای خواص مکانیکی و میزان تضعیف مناسب، برای حفاظ تابش‌های نوترون باشد. در ساخت این بتن استفاده از سنگدانه‌های بوردار طبیعی، اثرات سوء بر بتن، داشت، لذا یک سنگدانه بوردار مصنوعی تولید شد. این سنگدانه اثرات زیان آوری روی مقاومت و گیرش بتن نداشت. برای تعیین مقدار سنگدانه بوردار مصنوعی و بررسی میزان جذب نوترون در بتن، از کد کامپیوتری MCNP استفاده گردید. مقایسه خواص بتن حاوی بور با بتن بدون بور نشان دهنده‌ی مناسب بودن خواص فیزیکی، مکانیکی و میزان تضعیف پرتوهای نوترون و گاما در بتن حاوی بور برای استفاده در حفاظ پرتوهای نوترون می باشد.

کلمات کلیدی: بتن حاوی بور، سنگدانه بوردار، حفاظ، جذب نوترون، خواص مکانیکی.

### مقدمه

امروزه با پیشرفت تکنولوژی، استفاده از فن آوری هسته‌ای در زمینه‌های مختلف صنعتی، پزشکی، تحقیقاتی و... رو به افزایش است. در اثر واکنش‌های هسته‌ای پرتوهای مختلفی از جمله، پرتوهای گاما و نوترون ساطع می‌شوند. این پرتوها، قابلیت نفوذ بالایی در مواد دارند و در صورتیکه با حفاظ مناسبی تضعیف نشوند، می‌توانند به انسان، موجودات زنده و دستگاه‌ها، آسیب‌های جدی وارد سازند و خطرات زیست محیطی جبران ناپذیری را ایجاد نمایند. لذا طراحی و ساخت حفاظ پرتوهای رادیواکتیو برای حفاظت مردم، تجهیزات و ساختمانها و ... از اثرات مضر پرتوها، یکی از مهمترین مسائل در مهندسی هسته‌ای می‌باشد. حفاظ پرتو رادیواکتیو، یک مانع فیزیکی است که بین یک چشمه یونیزاسیون رادیواکتیو و شیئی یا هدف مورد حفاظت، قرار داده می‌شود تا میزان تابش پرتوها را در محل مورد حفاظت به مقدار مطلوب کاهش دهد. خصوصیات هسته‌ای یا تضعیف‌کنندگی حفاظ‌ها، به مواد و عناصر تشکیل دهنده‌ی آنها مربوط می‌شود. با این حال فاکتورهای دیگری از خواص مکانیکی و اقتصادی وجود دارد، که باید در انتخاب مواد برای استفاده در حفاظ مورد توجه قرار گیرد [۱]. طراحی یک حفاظ موثر نوترون، بسیار پیچیده است. اغلب ترکیب سه گروه از مواد زیر برای استفاده در حفاظ نوترون، مطلوب است: حفاظ نوترون باید شامل نوعی ماده سنگین، مانند آهن یا عناصری با عدد اتمی بالاتر باشد تا سرعت نوترون‌های سریع را از طریق برخورد‌های ناکشسان کاهش دهد. وجود عناصر سبک مانند هیدروژن، برای کاهش سرعت نوترون‌های نیمه سریع، از طریق برخورد‌های کشسان، مطلوب می‌باشد. زیرا جرم آن در حدود جرم نوترون است. در نهایت، حذف نوترون‌های کند، از طریق عمل جذب ضروری است. هیدروژن در این عمل موثر است اما با جذب نوترون‌ها توسط هیدروژن، پرتوهای گاما (گامای ثانویه) با انرژی ۲/۲ میلیون الکترون ولت تولید می‌شود، این پرتوها به دلیل قابلیت نفوذ زیاد در مواد، موجب افزایش ضخامت حفاظ می‌گردند. در میان مواد جذب‌کننده نوترون، عنصر بور (بور-۱۰) نه تنها دارای سطح مقطع جذب بالایی برای گیراندازی نوترون‌های حرارتی است، بلکه پس از جذب نوترون‌ها، پرتوهای گامای ثانویه با انرژی ۰/۴۷۸ میلیون الکترون ولت تولید می‌نماید که قابلیت نفوذ کمتری (در مقایسه با پرتوهای گامای ثانویه ناشی از جذب نوترون‌ها در سایر مواد حفاظ) دارند. به همین دلایل مواد حاوی بور

۱- کارشناس ارشد آزمایشگاه بتن و مصالح ساختمانی دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۲- عضو هیات علمی سازمان انرژی اتمی ایران.



اغلب در حفاظ‌های نوترون مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲ و ۳]. قابلیت جذب خیلی بالای بور- $^{10}$ ، این امکان را فراهم می‌سازد تا مقادیر کمی از آن در مواد حفاظ استفاده شود. به عنوان مثال، بتن حجیم بوردار در کتابخانه ملی اک ریج در ایالات متحده آمریکا حاوی  $0/2$  تا  $1$  درصد وزنی بور است. یک نکته مهم این است که بور می‌تواند اثرات زیان آوری روی گیرش و سخت شدن بتن داشته باشد و نباید در حفاظ به مقدار زیاد، استفاده شود. مصالح مهم بور در استاندارد ASTM C638 [۴] لیست شده‌اند. نمونه‌ی این نوع مصالح کلمانیت، بوروکلستیت، اولکسیت، پایگیت و تورمالین هستند [۱]. جهت ساخت حفاظ در برابر تابش‌های نوترون می‌توان از مصالح مختلفی استفاده کرد. ولیکن بتن به عنوان یکی از رایج‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین این مصالح، به منظور حفاظت بیولوژیکی در نیروگاه‌های هسته‌ای، واحدهای پزشکی و صنعتی و مراکز تحقیقات هسته‌ای و ... به طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. [۱، ۵، ۶]. بتن به دلیل دارا بودن مواد سبک و سنگین و خواص مناسب، به عنوان یک ماده‌ی بسیار عالی و با تنوع زیاد، برای استفاده در حفاظ مورد توجه می‌باشد. خواص مکانیکی رضایت بخش، هزینه‌ی اولیه و نگهداری کم، سهولت و تنوع در ساخت و امکان قالب گیری با شکل‌های پیچیده نیز، از دیگر مزایای استفاده از بتن به عنوان حفاظ پرتوفاست. با توجه به ملاحظات ذکر شده، بتن ماده مناسبی برای حفاظ پرتوهای نوترون و گاما می‌باشد [۲، ۳، ۷].

در داخل کشور تحقیقات منتشر شده‌ای در خصوص طراحی و ساخت بتن‌های حاوی بور برای حفاظ تابش‌های نوترون، مشاهده نگردید. تعدادی از تحقیقات انجام شده در سایر کشورها، که در سال‌های اخیر در خصوص بتن‌های حاوی بور منتشر شده اند در ادامه بحث ذکر می‌گردند. قاندوز و همکاران، با استفاده از کلمانیت فریت شده و ترکیبات پلیمری، بتن‌های جدیدی را ساختند و با استفاده از محاسبات کامپیوتری دریافتند که این بتن جدید، خواص حفاظی بهتری نسبت به بتن‌های معمولی، برای جذب نوترون‌های حرارتی در حفاظ‌ها دارد [۸]. بارار و بایولکن بتن‌های بوردار حاوی کلمانیت و بازده خواص حفاظتی آن را برای نوترون مورد بررسی قرار دادند و بلوک‌هایی را با این بتن‌ها ساختند و قابلیت نفوذ نوترون و مقاومت فشاری این بتن‌ها را اندازه گیری نمودند [۹]. بتن‌های حاوی بور از جمله بتن‌های ویژه‌ای هستند که اغلب در حفاظ تابش‌های نوترون مورد استفاده قرار می‌گیرند. لذا با توجه به نیازهای روز کشور، در این تحقیق، ساخت بتن حاوی بور مورد توجه قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق هدف، طراحی و ساخت بتن حاوی بور برای حفاظ تابش‌های نوترون می‌باشد. برای این منظور حفاظ شتابدهنده‌ی تولید رادیو دارو (تالیوم- $^{201}$ ) مد نظر قرار گرفت. در این شتابدهنده، در حین بمباران هدف تالیوم با پروتون، به جز محصول مورد نظر پرتوهای مختلفی مانند نوترون‌های پر انرژی، پرتوهای گاما و ذرات باردار دیگر تولید می‌شوند که حفاظت در برابر این پرتوها اجتناب ناپذیر است. برای حفاظت در برابر این پرتوها از دیوارهای بتنی ضخیم استفاده می‌شود [۱۰]. نوترون‌های سریع در برخورد با حفاظ کم کم انرژی خود را از دست می‌دهند و به نوترون‌های حرارتی تبدیل می‌شوند. همانطور که قبلاً ذکر شد، برای جذب نوترون‌های حرارتی از مواد حاوی بور استفاده می‌شود. لذا برای جذب نوترون‌های حرارتی، ساخت بتن حاوی بور مد نظر قرار گرفت. برای تهیه سنگدانه بوردار جهت استفاده در بتن حاوی بور، معادن بور در سراسر کشور مورد بررسی قرار گرفت و سنگدانه بوردار تهیه شد و اثرات سنگدانه بوردار طبیعی در بتن مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج آزمایشات بتن‌های اولیه، به رفع مشکلات مربوط به اثرات منفی مواد بوردار، پرداخته شد. لذا برای ساخت بتن حاوی بور، مواد بوردار مصنوعی نیز مد نظر قرار گرفت ولی نیاز به وارد کردن محصول از خارج یا صرف هزینه‌های سنگین بود. لذا سعی شد از مواد موجود و داخلی استفاده شود. برای این منظور یک سنگدانه بوردار مصنوعی تولید گردید و اثرات آن در بتن مورد بررسی قرار گرفت.

بر اساس استاندارد ANSI/ANS [۱۱] برای شبیه سازی ترابرد پرتوها در مواد بکار رفته در حفاظ، می‌توان از کدهای کامپیوتری ترابرد پرتوها استفاده نمود. برای انجام محاسبات هسته‌ای و تعیین مقدار بور لازم در بتن، باید طیف انرژی نوترون‌ها مشخص باشد. لذا از طیف نوترون‌های بدست آمده در حین بمباران هدف تالیوم- $^{203}$  [۱۲] توسط یک شتاب دهنده سیکلوترون مدل (Cyclone 30) [۱۳]، استفاده شد. سپس با استفاده از محاسبات با کد کامپیوتری MCNP (Monte Carlo N-Particle) [۱۴] اثرات مقدار سنگدانه بوردار (از صفر تا  $1/1$ ٪)، در تضعیف پرتوهای گاما و نوترون در بتن، مورد بررسی قرار گرفت و مقدار مناسب سنگدانه بوردار، برای این بتن تعیین گردید. علائم اختصاری به کار رفته در این تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

NCSxxx-BFyyy : بتن معمولی S: حاوی ۷٪ دوده سیلیسی xxx : مقدار مواد سیمانی  $\text{kg/m}^3$  B: سنگدانه بوردار طبیعی  
BF: سنگدانه بوردار مصنوعی yyy : مقدار سنگدانه بوردار  $\text{kg/m}^3$

در این تحقیق برای ساخت بتن معمولی و بتن حاوی بور از مصالح به شرح ذیل استفاده شده است:

الف- مواد سیمانی: سیمان پرتلند تیپ ۲ شرکت آبیگ و دوده سیلیسی شرکت بتن شیمی به کار برده شد.

ب- آب: آب آشامیدنی.

ج- فوق روان کننده: برای افزایش کارایی بتن، از فوق روان کننده ژلنیوم ۵۱ استفاده گردید.

د- زود گیر کننده: زود گیر کننده MEYCO SA 540 فقط در ساخت نمونه‌های اولیه ی بتن استفاده شد.

ه) سنگدانه معمولی: برای ساخت بتن‌های معمولی و حاوی بور، از سنگدانه‌های معمولی شرکت متوساک استفاده شده است. مشخصات این سنگدانه در جدول (۱) ارائه شده است.



جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگدانه‌ی معمولی (متوساک).

ردیف	شرح آزمایش	(+۴/۷۵) mm	(۴/۷۵-۱۲/۵) mm	(۱۲/۵-۱۹) mm
۱	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	۲/۵۶	۲/۵۹	۲/۵۸
۲	درصد جذب آب	۲/۳۷	۱/۸۷	۱/۷۱
۳	درصد سایش لس آنجلس	---	۱۴/۱	
۴	مدول نرمی	۳/۳۶	---	
۵	وزن مخصوص غیر متراکم (انبوهی) kg/m <sup>3</sup>	۱۵۷۷	۱۴۳۴	۱۴۱۴
۶	وزن مخصوص متراکم (انبوهی) kg/m <sup>3</sup>	۱۶۷۹	۱۵۳۹	۱۵۶۸

و- سنگدانه‌های بوردار: پس از بررسی معادن بور ایران، مشخص گردید که فقط یک معدن فعال بور در کشور وجود دارد [۱۵ و ۱۶]. لذا طی بازدیدی که از تنها معدن بور کشور (معدن قره‌گل) بعمل آمد، سنگدانه بوردار طبیعی تهیه شد.

- سنگدانه بوردار طبیعی: با انجام آزمایش XRD مشخص گردید این سنگدانه شامل کانی‌های کلمانیت و هیدروبراسیت می باشد. بر اساس استاندارد ASTM C637، سنگدانه‌ی بوردار مورد استفاده در بتن حفاظ تابش‌های هسته‌ای باید از الک نمره‌ی ۴ عبور نماید و بر روی الک نمره‌ی ۳۰ باقی بماند. این محدودیت‌ها جهت پخش یکنواخت سنگدانه در بتن و کاهش اثرات زیان آور سنگدانه‌ی بوردار بر بتن می باشد. سنگدانه‌های بوردار عبوری از الک نمره ۴ و مانده روی الک نمره ۳۰ مشابه دانه بندی ماسه معمولی در بتن‌های آزمایشی جایگزین ماسه گردیدند. بر اساس استاندارد ASTM C128 چگالی این سنگدانه ۲/۲ و جذب آب آن ۴/۲۲ درصد بدست آمد. نتایج آنالیز شیمیایی بر روی این سنگدانه در جدول (۲) ارائه گردیده است.

- سنگدانه بوردار مصنوعی: با توجه به نتایج آزمایشات اولیه‌ی بتن حاوی سنگدانه بوردار مشخص گردید که سنگدانه بوردار طبیعی اثرات منفی شدیدی بر بتن دارد، لذا تصمیم گرفته شد، سنگدانه بوردار مصنوعی تولید شود که این اثرات نامطلوب را نداشته باشد. بنابراین با توجه به مطالعات و آزمایشاتی که انجام گرفت سنگدانه‌ی بوردار مصنوعی ساخته شد. پس از موفقیت آزمایشات اولیه‌ی استفاده از نمونه‌های آزمایشگاهی سنگدانه مصنوعی در ساخت بتن، این سنگدانه در مقیاس نیمه صنعتی به مقدار مورد نیاز تولید گردید و در دو محدوده اسمی (۰/۱۶-۴/۷۵) و (۰-۰/۱۶) میلیمتر تفکیک گردید و آزمایش جذب آب و چگالی روی آنها انجام گرفت. چگالی این سنگدانه‌ها ۲/۵۶ و جذب آب آنها ۰/۴۷ درصد تعیین شد. نتایج آنالیز شیمیایی این سنگدانه نیز در جدول (۲) ارائه گردیده است.

جدول ۲- آنالیز شیمیایی سنگدانه‌های بوردار طبیعی و مصنوعی برحسب درصد

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	L.O.I. at 980°C	نوع و اندازه سنگدانه بوردار (mm)
۳۰/۶۵	۳/۳۰	۰/۴۶	۵/۶۶	۱۶/۶۴	۰/۱۷	۰/۳۱	۲/۰۶	۲۲/۲۷	۱۹/۳۵	سنگدانه طبیعی (۰/۱۶-۴/۷۵)
۲۳/۲۵	۲/۰۵	۰/۳۴	۶/۸۴	۱۶/۳۲	۰/۱۱	۰/۱۸	۰/۱۴	۲۷/۳۱	۲۳/۳۳	سنگدانه طبیعی (۰-۰/۱۶)
۳۰/۴	۲/۶۸	۰/۳۸	۸/۹۴	۲۱/۳۴	۰/۱۴	۰/۲۴	۰/۸	۳۵/۷۰	---	سنگدانه مصنوعی (۰/۱۶-۴/۷۵)

## نتایج و بحث

مقادیر مختلف سنگدانه بوردار طبیعی و مصنوعی در ساخت بتن حاوی بور استفاده گردید و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آزمایشات بتن های حاوی بور و بحث و بررسی آنها به شرح ذیل می باشد:

الف) بتن حاوی سنگدانه‌های بوردار طبیعی

در این تحقیق تاثیر نوع و مقدار سنگدانه بوردار در بتن مورد بررسی قرار گرفته که نتایج آن در جدول ۳ و شکل ۱ ارائه گردیده است. بر اساس جدول ۳، طرح NC400 به عنوان طرح شاهد اول ساخته شد. این طرح ضمن داشتن شکل ظاهری مناسب، کارآئی لازم را داشت و مقاومت فشاری آن در سن ۲۸ روز ۴۵۰ kg/cm<sup>2</sup> بدست آمد. برای بررسی اثر مقدار سنگدانه بوردار طبیعی در خواص بتن، ابتدا طرح NC400-B100-1 و سپس طرح NC400-B200 مطابق جدول ۳ ساخته شدند. شکل ظاهری بتن ساخته شده زیاد مناسب نبود و بتن آب انداختگی داشت و علی رغم استفاده از فوق روان کننده، کارآئی بتن نسبت به طرح شاهد، کاهش یافته بود. در این بتن‌ها پس از ۵ روز نیز گیرش اتفاق نیفتاد و حتی بعد از باز کردن قالب‌ها، قادر به حفظ شکل خود نبودند و پس از ۷ روز نیز مقاومت فشاری آنها صفر شد. مقاومت فشاری بتن‌های NC400-B100-1 و NC400-B200 پس از ۳۲ روز به ترتیب ۲۴۵ kg/cm<sup>2</sup> و ۱۴۰ kg/cm<sup>2</sup> بدست آمد.

باتوجه به اینکه سنگدانه بوردار طبیعی اثر کند گیر کنندگی قوی داشت، طرح NC400-B100-2 مشابه طرح NC400-B100-1 و با مقادیر نسبتاً زیاد زودگیر کننده (۷٪ وزن سیمان) ساخته شد (طبق توصیه تولید کننده مقدار مصرف این زودگیر کننده می‌تواند تا ۱۰٪ وزن سیمان باشد).



جدول ۳- نسبت‌های اختلاط مصالح و نتایج طرح‌های اختلاط آزمایشی بتن‌های معمولی و حاوی بور.

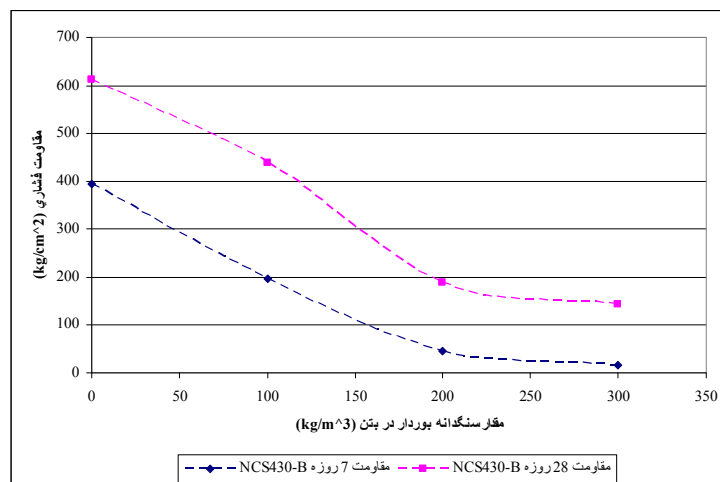
ردیف	کد نمونه‌ها	W/C	مواد سیمانی (kg/m <sup>3</sup> )	سنگدانه بوردار طبیعی (kg/m <sup>3</sup> )	زود گیر کننده (kg/m <sup>3</sup> )	فوق روان کننده (kg/m <sup>3</sup> )	اسلامپ (cm)	مقاومت فشاری (kg/cm <sup>2</sup> )	
								۷ روز	نهایی
۱	شاهد NC400	۰/۳۶	۴۰۰	۰	۰	۱/۹۸۵	۵	۳۵۵	۴۵۰
۲	NC400-B100-1	۰/۳۶	۴۰۰	۱۰۰	۰	۴/۳۶۹	۱	۰	۲۴۵
۳	NC400-B200	۰/۳۶	۴۰۰	۲۰۰	۰	۵/۱۶۹	۴	۰	۱۴۰
۴	NC400-B100-2	۰/۳۶	۴۰۰	۱۰۰	۲۸	۵/۸۳۰	-----	۱۶۵	۳۰۰

پس از افزودن زودگیرکننده و اختلاط بتن، مشاهده گردید که برخلاف طرح قبلی، بتن سریعاً در حال گیرش می‌باشد و به سرعت از کارآئی بتن کاسته می‌شود. لذا سریعاً نمونه برداری انجام شد. مقاومت فشاری بتن در ۷ روز به  $165 \text{ kg/cm}^2$  و در ۳۲ روز به  $300 \text{ kg/cm}^2$  رسید.

با توجه به نتایج جدول ۳، برای بهبود مشکل وضعیت ظاهری، کاهش آب انداختگی و افزایش مقاومت فشاری بتن، در طرح‌های بعدی (NCS430) مقدار مواد سیمانی از  $400 \text{ kg/m}^3$  به  $430 \text{ kg/m}^3$  افزایش داده شد و از ۷٪ دوده سیلیسی بعنوان جایگزین بخشی از مواد سیمانی استفاده شد. به دلیل افت شدید در کارآئی بتن، امکان کاهش نسبت آب به سیمان وجود نداشت. بتن NCS430 شکل ظاهری، چسبندگی و کارآئی بسیار مناسبی داشت و آب انداختگی نداشت. مقاومت فشاری این بتن در سن ۷ و ۲۸ روز به ترتیب،  $395$  و  $613 \text{ kg/cm}^2$  بدست آمد که این مقدار حدود ۳۶٪ بیش از مقاومت فشاری نمونه شاهد قبلی (NC400) می‌باشد. لذا این طرح بعنوان طرح شاهد دوم استفاده شد و مقادیر ۱۰۰، ۲۰۰ و  $300$  کیلوگرم سنگدانه بوردار طبیعی، جایگزین ماسه آن گردید. با توجه به تجربیات قبلی در این بررسی علاوه بر افزایش مقدار و تغییر در نوع مواد سیمانی، مقدار زودگیرکننده نیز به ۳٪ وزن سیمان کاهش یافت تا از گیرش سریع بتن جلوگیری بعمل آید.

طرح NCS430-B100، پس از ساخت، شکل ظاهری و کارآئی مناسبی داشت. بر اساس شکل ۱ مقاومت فشاری این بتن در سن ۷ روز  $198 \text{ kg/cm}^2$  و در سن ۲۸ روز  $440 \text{ kg/cm}^2$  بدست آمد که نسبت به طرح‌های NC400-B100-1 و NC400-B100-2 که مقدار سنگدانه بوردار مشابهی داشتند به ترتیب در حدود ۸۰٪ و ۴۷٪ افزایش مقاومت را نشان می‌دهد هرچند نسبت به طرح شاهد، حدود ۲۸٪ کاهش مقاومت مشاهده می‌شود. لذا در صورتی که مقدار بسیار کمی سنگدانه بوردار در بتن نیاز باشد می‌توان از این طرح جهت ساخت بتن بوردار استفاده نمود (هرچند سایر فاکتورهای بتن نیز باید بررسی شود). طرح NCS430-B200، بعد از ساخت شکل ظاهری مناسبی داشت و کارآئی آن نیز خوب بود، مقاومت فشاری این طرح در سن ۷ روز  $45 \text{ kg/cm}^2$  و در سن ۲۸ روز  $190 \text{ kg/cm}^2$  بدست آمد. این مقاومت‌ها نسبت به بتن شاهد در سن ۷ و ۲۸ روز، به ترتیب در حدود ۸۹٪ و ۶۹٪ کاهش را نشان می‌دهد. لذا از این طرح به دلیل نداشتن مقاومت مناسب، جهت ساخت بتن نمی‌توان استفاده کرد. مقاومت فشاری بتن در طرح NCS430-B300 نیز با مقدار  $300$  کیلوگرم سنگدانه بوردار طبیعی در هر متر مکعب بتن، در سن ۷ روز  $15 \text{ kg/cm}^2$  و پس از ۲۸ روز  $143 \text{ kg/cm}^2$  بدست آمد که نسبت به بتن شاهد در سن ۷ و ۲۸ روز به ترتیب در حدود ۹۶٪ و ۷۷٪ کاهش نشان می‌دهد (شکل ۱). لذا این طرح نیز برای ساخت بتن مناسب نمی‌باشد.

نتایج بدست آمده تا این مرحله از تحقیق نشان داد که کاهش نسبت آب به سیمان، افزودن زودگیر کننده و افزودن مقدار مواد سیمانی و استفاده از دوده سیلیسی، هرچند تا حدودی در افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی بور (سنگدانه بوردار طبیعی) موثر است ولیکن کافی نیست. افزایش مقاومت با استفاده از کاهش نسبت آب به سیمان علی رغم استفاده از فوق روان کننده به دلیل کاهش کارآئی در اثر استفاده از سنگدانه بوردار، امکان پذیر نیست.



شکل ۱- نتایج طرح‌های اختلاط NCS430 بتن حاوی مقادیر مختلف سنگدانه‌ی بوردار طبیعی.



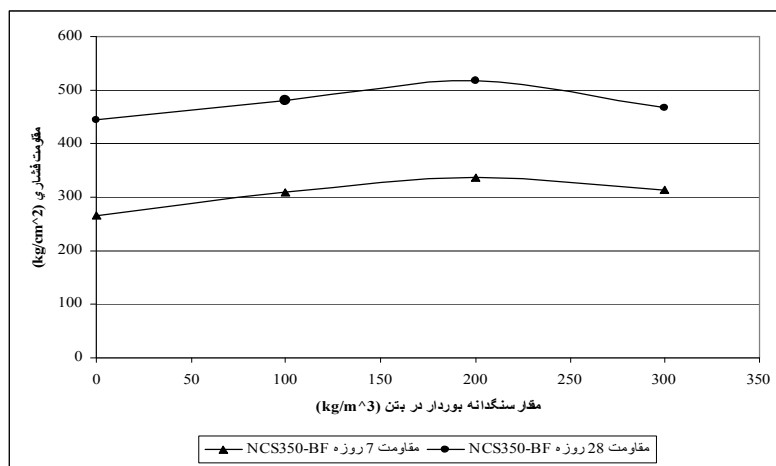
همانطور که از نتایج بدست آمده برمی آید، افزودن زودگیر کننده نیز باعث گیرش سریع بتن می‌شود. افزودن مقدار مواد سیمانی نیز باعث افزایش جمع شدگی و ترک خوردگی بتن خواهد شد. بنابراین برای حل مشکل کاهش مقاومت و گیرش بتن، بایستی به بررسی عامل ایجادکننده آن یعنی سنگدانه بوردار طبیعی پرداخت. لذا در این مرحله، مطالعاتی در خصوص چگونگی حل این معضل انجام شد و تصمیم گرفته شد حلالیت سنگدانه بوردار در آب به نحوی کاهش داده شود. لذا راه کارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت و پس از بررسی روشهای مختلف، سنگدانه بوردار مصنوعی در آزمایشگاه تولید شد و اثر آن در بتن مورد آزمایش قرار گرفت.

طرح اختلاط اولین نمونه بتن با سنگدانه بوردار مصنوعی (NCS430-BF310) مشابه طرح NCS430-B300 ولی با مقدار سنگدانه بوردار مصنوعی  $310 \text{ kg/cm}^3$  یعنی کمی بیش از مقدار سنگدانه بوردار استفاده شده در طرح NCS430-B300 و بدون زودگیر کننده ساخته شد. شکل ظاهری بتن مناسب بود و افت کارائی نداشت و مقاومت فشاری ۷ روزه این بتن  $460 \text{ kg/cm}^2$  بدست آمد. در صورتی که مقاومت فشاری طرح NCS430-B300 حتی با ۳٪ وزنی سیمان، زودگیر کننده پس از ۷ روز،  $15 \text{ kg/cm}^2$  بدست آمده بود. بعبارت دیگر استفاده از این روش مطابق شکل (۱) ضمن عدم نیاز به زودگیر کننده باعث افزایش ۳۱ برابری در مقاومت فشاری بتن حاوی بور شد.

(ب) بتن حاوی سنگدانه‌های بوردار مصنوعی (تولید شده در آزمایشگاه)

با توجه به موفقیت آمیز بودن اولین آزمایش استفاده از سنگدانه بوردار مصنوعی در بتن، مشکل کاهش مقاومت و کندگیر کنندگی این سنگدانه حل شد. جهت بررسی کاملتر، در مرحله بعد مقادیر بیشتری از این سنگدانه در آزمایشگاه تولید گردید و نمونه‌های بتن حاوی مقادیر ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوگرم سنگدانه بوردار مصنوعی در هر متر مکعب بتن، ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت.

با توجه به نتایج بدست آمده تا این مرحله از تحقیق و با توجه به حل شدن مشکلات سنگدانه بوردار، دیگر نیازی به بتن با مقادیر زیاد مواد سیمانی و نسبت آب به سیمان کم و استفاده از زودگیرکننده نمی باشد. با توجه به اینکه در نهایت این بتن در دیواره‌های حجیم استفاده خواهد شد، زیاد بودن مواد سیمانی باعث مشکلاتی از جمله، افزایش حرارت هیدراتاسیون و انقباض و ترک خوردگی در بتن خواهد شد. همچنین پائین بودن نسبت آب به سیمان باعث افزایش غیر ضروری در هزینه‌ها می‌شود. لذا برای ادامه تحقیق از یک بتن شاهد جدید (NCS350) استفاده شد. در طرح شاهد NCS350 نسبت به طرح شاهد قبلی (طرح NCS430)، نسبت آب به مواد سیمانی از ۰/۳۶ به ۰/۴۵ افزایش و مقدار مواد سیمانی از ۴۳۰ به ۳۵۰ کیلوگرم در هر متر مکعب بتن، کاهش داده شد و از زودگیرکننده نیز استفاده نگردید. شکل ظاهری و کارایی بتن طرح NCS350 مناسب بود. مقاومت ۷ و ۲۸ روزه آن به ترتیب ۲۶۵ و  $445 \text{ kg/cm}^2$  بدست آمد. این طرح بعنوان طرح شاهد برای ادامه تحقیق در نظر گرفته شد و اثر مقدار سنگدانه بوردار مصنوعی (تولید شده در آزمایشگاه) در این بتن مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۲).



شکل ۲- نتایج طرح‌های اختلاط بتن حاوی مقادیر مختلف سنگدانه‌ی بوردار مصنوعی.

بتن طرح NCS350-BF100 با جایگزینی ۱۰۰ کیلوگرم سنگدانه بوردار مصنوعی به جای ماسه‌ی طرح شاهد NCS350 ساخته شد. این بتن در حالت تازه، دارای شکل ظاهری مناسب و کارائی لازم بود. مقاومت فشاری آن در سن ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب  $271 \text{ kg/cm}^2$  و  $482 \text{ kg/cm}^2$  بدست آمد که نه تنها افت مقاومتی مشاهده نشد بلکه مقاومت آن کمی بیش از مقاومت فشاری بتن شاهد بود.

بتن طرح NCS350-BF200 با مقدار سنگدانه بوردار مصنوعی  $200 \text{ kg/m}^3$  ( عبوری الک نمره‌ی ۴ و مانده‌ی الک نمره‌ی ۳۰) در حالت تازه دارای شکل ظاهری نسبتاً مناسب بود و کارائی لازم را داشت. مقاومت فشاری این بتن در سن ۷ و ۲۸ روز به ترتیب  $337 \text{ kg/cm}^2$  و  $518 \text{ kg/cm}^2$  بدست آمد که از مقاومت فشاری بتن شاهد بیشتر است. همچنین طرح NCS350-BF200-P#30 با مقدار سنگدانه بوردار مصنوعی  $200 \text{ kg/m}^3$  ( عبوری الک نمره‌ی ۳۰) ساخته شد. نتایج آزمایشات نشان داد که اندازه سنگدانه بوردار مصنوعی تأثیری بر مقاومت فشاری بتن نداشته است. ولیکن براساس

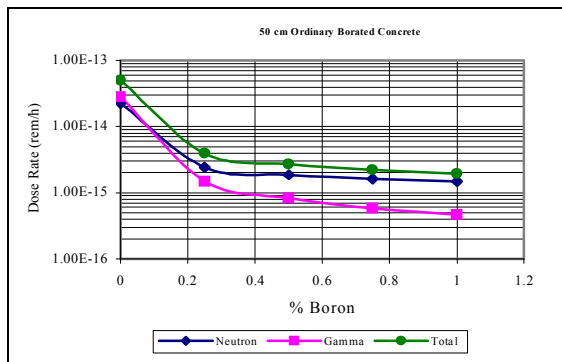


توصیه استاندارد ASTM C637 در ادامه این تحقیق فقط از سنگدانه بوردار مصنوعی عبوری از الک نمره ۴ و مانده روی الک نمره ۳۰ استفاده شد. بتن طرح NCS350-BF300 با مقدار سنگدانه بوردار مصنوعی  $300 \text{ kg/m}^3$  در حالت تازه دارای شکل ظاهری نسبتاً مناسب بود و کارایی لازم را داشت. مقاومت فشاری این بتن در سن ۷ و ۲۸ روز به ترتیب  $313 \text{ kg/cm}^2$  و  $467 \text{ kg/cm}^2$  بدست آمد که از مقاومت فشاری بتن شاهد بیشتر است. نتایج شکل ۲ نشان می‌دهد که از سنگدانه بوردار مصنوعی می‌توان برای ساخت بتن حاوی بور استفاده نمود بدون اینکه نگرانی در خصوص کاهش شدید مقاومت و یا دیرگیر شدن بتن وجود داشته باشد و مقدار سنگدانه بوردار نیز تاثیر چندانی در تغییرات مقاومت بتن ندارد. لذا می‌توان به هر اندازه که نیاز باشد از این سنگدانه در بتن حاوی بور استفاده نمود. عامل کنترل کننده مقدار این سنگدانه در بتن، هزینه و تاثیر آن در جذب پرتوها می‌باشد که بایستی از حداقل مقدار سنگدانه بوردار استفاده نمود. در این تحقیق برای تعیین حداقل سنگدانه بوردار مصنوعی مورد نیاز برای ساخت بتن‌های حاوی بور، از محاسبات کامپیوتری با کد MCNP استفاده گردید. برخی ترکیبات شیمیایی بتن برای استفاده در محاسبات در جدول ۴ ارائه گردیده است.

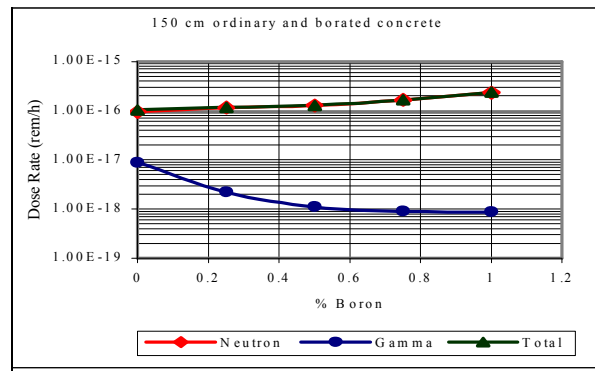
جدول ۴- ترکیبات شیمیایی نمونه‌های بتن معمولی و بتن حاوی بور.

نوع بتن	درصد وزنی ترکیبات شیمیایی بتن												
	Ca	Al	Si	Mg	Na	S	K	Ti	Fe	Ba	H	B	O
بتن معمولی	۱۲/۹۵	۵/۰۵	۲۴/۱۲	۱/۲۸	۰/۵۴	۰/۵۵	۲/۴۵	۰/۴۴	۵/۵۹	۱/۱۰	۰/۳۶	۰	۴۵/۴۰
بتن حاوی بور	۱۲/۸۸	۴/۸۱	۲۳/۴۱	۱/۹۱	۰/۵۱	۰/۵۲	۲/۳۱	۰/۴۱	۵/۲۶	۱/۰۲	۰/۳۶	۰/۶۰	۴۵/۸۳

برای انجام محاسبات و تعیین مقدار بور مورد نیاز جهت استفاده در بتن معمولی حاوی بور، از دو طیف مختلف تابش‌های نوترون ایجاد شده در اتاق هدف سیکلوترون برای تولید رادیو داروی تالیوم ۲۰۱ استفاده گردید. یک طیف نوترون با انرژی بالا، مربوط به پرتوهایی است که درست در مقابل محل بمباران هدف تالیوم ۲۰۳ تولید می‌شوند و طیف دیگر در محل راهروی حفاظ، که در آن انرژی پرتوهای نوترون کاهش یافته است. نتایج محاسبات انجام گرفته با استفاده از کد کامپیوتری MCNP، شامل دوز نوترون و دوز گامای ثانویه تولید شده در اثر جذب نوترون‌ها در بتن و مجموع دوز نوترون و گاما برای بتن‌های حاوی مقادیر مختلف بور در شکل‌های (۳) و (۴) ارائه گردیده است.



شکل ۴- نمودار تغییرات مقدار دوز نوترون و گاما و مجموع، برای طیف نوترون (کم انرژی) حاصل از بمباران هدف تالیوم-۲۰۳ در بتن معمولی با درصدهای مختلف بور.



شکل ۳- تغییرات مقدار دوز نوترون و گاما و مجموع، برای طیف نوترون (با انرژی زیاد) حاصل از بمباران هدف تالیوم-۲۰۳ در بتن معمولی با درصدهای مختلف بور.

نتایج بدست آمده از شکل ۳ نشان می‌دهد که برای طیف نوترون با انرژی زیاد، افزودن سنگدانه بوردار به بتن معمولی، اثر منفی در تضعیف تابش‌های نوترون پر انرژی دارد هر چند این اثر بسیار کم می‌باشد. ولیکن با افزایش مقدار بور تا مقدار ۰/۶ درصد وزن بتن، از میزان پرتوهای گامای ثانویه کاسته شده است. همچنین نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که برای طیف کم انرژی چشمه تالیوم، افزودن مقدار بور به بتن معمولی، تا ۰/۳ درصد، اثر قابل توجهی در بهبود تضعیف و جذب تابش‌های نوترون دارد و افزودن مقدار بور تا ۰/۶ درصد، اثر قابل توجهی در کاهش تابش‌های گامای ثانویه دارد. دوز مربوط به مجموع دوزهای نوترون و گاما نیز با افزایش مقدار سنگدانه بوردار تا ۰/۵ درصد، کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد.

مقایسه نتایج بدست آمده برای بتن‌ها با ضخامت ۱۵۰ سانتیمتر، نشان می‌دهد که بتن معمولی حاوی ۰/۶ درصد بور، مقدار تابش‌های نوترون حاصل از طیف پر انرژی تالیوم را حدود ۱۱٪ کمتر از بتن معمولی تضعیف می‌نماید ولیکن دوز گامای ثانویه، ناشی از طیف پر انرژی چشمه تالیوم را، ۲۵ برابر نسبت به بتن معمولی، بهتر تضعیف می‌نمایند. همچنین این نتایج نشان می‌دهد که بتن حاوی ۰/۶ درصد بور در ضخامت ۵۰ سانتیمتر، دوز نوترون ناشی از طیف کم انرژی چشمه تالیوم را، ۱۳ برابر و دوز گامای ثانویه ناشی از طیف کم انرژی چشمه تالیوم را، ۳۹ برابر نسبت به بتن معمولی، بهتر تضعیف می‌نمایند.

با توجه به نتایج حاصل از محاسبات انجام شده با استفاده از کد MCNP و شکل‌های (۳) و (۴)، مقدار بور لازم برای ساخت نمونه‌های نهایی بتن حاوی بور (NCS350-BF)، ۰/۶ درصد وزن بتن خشک ( $118 \text{ kg/m}^3$ ) سنگدانه بوردار) تعیین شد و در ساخت نمونه‌های نهایی استفاده گردید. پس از



بررسی‌هایی که انجام گرفت، مقادیر مورد نیاز سنگدانه بوردار مصنوعی بصورت نیمه صنعتی تولید گردید. این سنگدانه پس از خردکردن و دانه بندی، در ساخت نمونه‌های نهائی بتن حاوی بور، به عنوان سنگدانه بوردار مورد استفاده قرار گرفت.

(ج) بتن حاوی سنگدانه های بوردار مصنوعی (تولید نیمه صنعتی)

برای بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی بتن‌های نهائی ساخته شده شامل بتن معمولی، بتن حاوی سنگدانه های بوردار مصنوعی (تولید نیمه صنعتی)، آزمایشات تعیین وزن مخصوص، مقاومت فشاری و کششی، چکش اشمیت، اولتراسونیک، مدول الاستیسیته، درصد جذب آب و میزان آب قابل تبخیر بتن در دمای ۸۵، ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس انجام شد. نتایج آزمایشات مذکور در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- نتایج آزمایش‌های خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های نهائی بتن‌های معمولی و حاوی بور (با سنگدانه بوردار مصنوعی تولید نیمه صنعتی).

ردیف	نام آزمایش	استاندارد یا روش	بتن حاوی بور	بتن معمولی	درصد تغییرات خواص بتن حاوی بور نسبت به بتن معمولی
۱	چگالی بتن در حالت SSD ( $\text{kg/m}^3$ )	ASTM C642	۲۳۴۱	۲۳۴۱	۰
۲	چگالی بتن در حالت خشک ( $\text{kg/m}^3$ )	ASTM C642	۲۲۰۱	۲۱۹۹	+۰/۱
۳	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (نمونه ۱۰*۱۰) ( $\text{kg/cm}^2$ )	BS 1881 Part 4	۵۳۳	۵۵۴	-۳/۸
۴	مقاومت کششی (روش برزیلی) ( $\text{kg/cm}^2$ )	ASTM C496	۳۸/۹	۴۵/۷	-۱۴/۹
۵	عدد بازگشت چکش اشمیت	ASTM C805	۳۵/۹	۳۵/۴	+۱/۴
۶	سرعت امواج اولتراسونیک در بتن ( $\text{km/s}$ )	ASTM C597	۴/۴۵	۴/۵۵	-۲/۲
۷	مدول الاستیسیته تری ( $\text{kg/cm}^2$ )	ASTM C469	$۲/۷۲ * ۱۰^۵$	$۳/۰۲ * ۱۰^۵$	-۹/۹
۸	جذب آب بتن (%)	BS 1881 Part 122	۱/۷۱	۱/۴۳	+۱۹/۶
۹	کاهش وزن نمونه‌های بتن (آب قابل تبخیر) (%)	در دمای ۸۵ °C	۵/۴۱	۶/۳۲	-۱۴/۴
۱۰		در دمای ۱۰۰ °C	۵/۸۲	۶/۴۸	-۱۰/۲
۱۱		در دمای ۲۰۰ °C	۷/۳۲	۷/۵۹	-۳/۶

نتایج جدول ۵ بیانگر این است که استفاده از سنگدانه بوردار مصنوعی (تولید نیمه صنعتی) تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی چگالی بتن ندارد ولی مقاومت فشاری بتن را کمی کاهش می دهد که این کاهش مقاومت بسیار اندک است. مقاومت کششی بتن حاوی بور به میزان بیشتر تحت تاثیر سنگدانه بوردار قرار گرفته و کاهش ۱۴/۹٪ را نشان می دهد. در بتن حاوی بور، عدد بازگشت چکش اشمیت افزایش جزئی و سرعت امواج اولتراسونیک کاهش کمی را نسبت به بتن شاهد نشان می دهد. مدول الاستیسیته تری در بتن حاوی بور کمتر از بتن معمولی است. کم بودن مدول الاستیسیته برای بتن حفاظ یک مزیت محسوب می شود چون باعث کاهش تنشهای ناشی از گرادبان دمائی و ... می شود. جذب آب بتن حاوی بور بیشتر از بتن شاهد است ولی از مقدار حداکثر برای شرایط دوام که معمولاً ۲٪ در نظر گرفته می شود، کمتر است. وجود هیدروژن در مواد حفاظ حائز اهمیت است. لذا آب غیر قابل تبخیر در بتن حفاظ یک مزیت مهم محسوب می شود. نتایج آزمایشات نشان داد در که بتن حاوی بور مقدار آب قابل تبخیر دمای ۸۵ °C، ۱۴/۴٪ کمتر از بتن معمولی است و به عبارت دیگر آب غیر قابل تبخیر در بتن حاوی بور ۱۴/۴٪ بیشتر از بتن معمولی است و هیدروژن بیشتری دارد. تفاوت میزان آب قابل تبخیر در دماهای بالاتر کاهش می یابد و در دمای ۲۰۰ °C تفاوت کمی بین دو نوع بتن وجود دارد.

### نتیجه گیری

نتایج بررسی‌های معادن کشور نشان داد که فقط یک معدن فعال بور بنام معدن بور قره گل وجود دارد. نتایج آزمایشات سنگدانه این معدن نشان داد که از سنگدانه بوردار طبیعی بدلیل ایجاد اختلال شدید در گیرش و کاهش شدید مقاومت فشاری بتن، نمی توان در ساخت بتن حاوی بور استفاده نمود. بنابراین با بررسی‌هایی که انجام شد، سنگدانه بوردار مصنوعی در مقیاس آزمایشگاهی و نیمه صنعتی تولید گردید و اثرات استفاده از این سنگدانه در گیرش و مقاومت بتن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از این سنگدانه بوردار مصنوعی در بتن، برگیرش آن تاثیر منفی ندارد و تغییر قابل ملاحظه‌ای (نسبت به سنگدانه بوردار طبیعی) بر کاهش مقاومت فشاری بتن نمی گذارد (حتی در نمونه‌های آزمایشگاهی افزایش مقاومت مشاهده شد) و می توان بدون استفاده از زودگیر کننده و با مقادیر کم مواد سیمانی بتن حاوی بور ساخت. لذا این سنگدانه مصنوعی انتخاب و در ساخت بتن‌های حاوی بور استفاده شد.

برای تعیین مقدار بور مورد نیاز در بتن‌های حاوی بور، مقدار بور در ترکیبات بتن، از ۰ تا ۱ درصد تغییر داده شد و با استفاده از محاسبات با کد کامپیوتری MCNP تاثیر مقدار بور این بتن‌ها در تضعیف تابش‌های گاما و نوترون مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از محاسبات با کد MCNP مقدار بور لازم برای تضعیف مناسب تابش‌های گاما و نوترون، ۰/۶ درصد وزن بتن بدست آمد و در ساخت بتن‌های نهائی از این مقدار بور، بصورت سنگدانه بوردار استفاده شد. مقایسه نتایج بدست آمده نشان می دهد که بتن حاوی ۰/۶ درصد بور، مقدار تابش‌های نوترون حاصل از طیف پرنوترونی را حدود ۱۱٪



کمتر از بتن معمولی تضعیف می‌نماید ولیکن دوز گامای ثانویه ناشی از طیف پر انرژی چشمه تالیوم را، ۲۵ برابر نسبت به بتن معمولی، بهتر تضعیف می‌نماید. همچنین این نتایج نشان می‌دهد که بتن معمولی حاوی ۰/۶ درصد بور، دوز نوترون ناشی از طیف کم انرژی چشمه تالیوم را، ۱۳ برابر و دوز گامای ثانویه ناشی از طیف کم انرژی چشمه تالیوم را، ۳۹ برابر نسبت به بتن معمولی، بهتر تضعیف می‌نماید.

بررسی کلی نتایج فوق نشان می‌دهد همانطور که انتظار می‌رفت، بتن‌های حاوی بور برای نوترون‌های پر انرژی چشمه‌ی تالیوم از بتن‌های بدون بور عملکرد بهتری ندارند. ولی برای پرتوهای گامای طیف پر انرژی تالیوم و تابش‌های نوترون و گامای طیف کم انرژی چشمه‌ی تالیوم، عملکرد بتن‌های حاوی بور در تضعیف پرتوها بهتر از بتن معمولی بدون بور می‌باشد.

با استفاده از نتایج آزمایشات بتن‌های اولیه و محاسبات با کد MCNP مقادیر مصالح مورد نیاز برای ساخت بتن‌های نهایی بدست آمد و مقدار مواد سیمانی  $350 \text{ kg/m}^3$  و نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۵ و مقدار سنگدانه بوردار  $128 \text{ kg/m}^3$  تعیین گردید. در مجموع بررسی نتایج آزمایشات فیزیکی و مکانیکی در جدول ۵ نشان می‌دهد که با افزودن سنگدانه بوردار به بتن، مقاومت فشاری، کششی و سرعت امواج اولتراسونیک کاهش می‌یابد ولیکن عدد بازگشت چکش اشmitt، جذب آب و مقدار آب غیر قابل تبخیر افزایش خواهد داشت. مدول الاستیسیته با افزودن بور در بتن معمولی کاهش یافت. در مجموع نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که بتن حاوی بور خواص فیزیکی و مکانیکی مناسبی دارد.

لذا با توجه به نتایج محاسبات هسته‌ای و آزمایش خواص مکانیکی، بتن حاوی بور ساخته شده در این تحقیق از نظر خواص بررسی شده برای استفاده در حفاظ پرتوهای نوترون جهت جذب نوترون‌های حرارتی مناسب می‌باشد.

## مراجع

- 1- Kaplan, M. F., (1989) "Concrete Radiation Shielding", Capt. (5,6,8,9), First Published, London, Longman Scientific.
- 2- Morioka, Atsuhiko, et al. (2004), "Irradiation and penetration tests of boron-doped low activation concrete using 2.45 and 14 MeV neutron sources", Journal of Nuclear Materials, Volumes 329-333, Part 2, 1, P. 1619-1623.
- 3- Schaeffer, N. M., (1973) "Reactor Shielding for Nuclear Engineers", TID-25951, National Technical Information Service, Springfield.
- 4- American Society for Testing and Materials, (2002) Significance of tests and properties of concrete and concrete making materials; ASTM Special Technical Publication. NO.169-B.
- 5- Mclain, S., Martens, J., (1964) "Reactor Handbook", Vol. IV, Engineering, Second Edition, New York, London, Sydney.
- 6- Chilton, A. B., Shultis, J.K., and Few, R. E., (1984) "Principles of Radiation Shielding", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ 07632.
- 7- Jaeger, R. G., (1968-75) "Engineering Compendium on Radiation Shielding", Vol. I: Shielding Fundamentals and Methods, Vol. II: Shielding Materials and Design, Vol. III: Shield Design and Engineering, Springer-Verlag, New York.
- 8- Gunduz, G. (1982) "Colemanite-Barite Frit and Polymer Impregnated Concrete as Shielding Materials", Nuclear Engineering and Design, Vol. 72, Issue 3, P. 439-447.
- 9- Yasar, Y., (1996) "Activation Characteristics of Concrete Shields Containing Colemanite", Journal of Nuclear Materials, Vol. 233-237, Part 2, P. 1511-1515.
- ۱۰- حاجیلو، ناهید، (۱۳۸۲)، پایان نامه کارشناسی ارشد، (اساتید راهنما دکتر غلامرضا رئیس‌علی، دکتر سعید حمیدی، همانند سازی ترابرد و جویبارش، دانشگاه اراک. MCNP با استفاده از کد کامپیوتری Cyclone30 نوترون‌ها در راهرو اتاق هدف تالیوم سیکلوترون
- 11- American Nuclear Society Standards Committee Working Group ANS-6.4, (1997) "Nuclear Analysis and Design of Concrete Radiation Shielding for Nuclear Power Plants (ANSI/ANS-5-4-1997)", America, American Nuclear Society. Special Technical Publication. NO.169-B.
- 12- Raisali, G., Hajiloo, N., Hamidi, S., Aslani, G., (2006), "Analysis of Neutron and Gamma-ray Streaming Along the Maze of NRCAM Tellium Production Target Room", Applied Radiation and Isotopes, 64, P. 940-947.
- 13- Ion Beam Applications, s.a, (1993), "Cyclone30 Maintenance Preventive Maintenance Schedule", Issue#OM30-ST4.
- 14 - J. F. Briesmeister, (2000) "MCNP-4C A General Monte Carlo N-Particle Transport Code System-Version 4C", Los Alamos National Laboratory, LA-13709-M.
- ۱۵- مهندسین مشاور ایمنی و معدنی ایمن آرا، (۱۳۷۲)، پی‌جویی بور در مناطق پتانسیل دار، وزارت معادن و فلزات، معاونت معدنی و اکتشافی.
- ۱۶- پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور، (۱۳۸۵) [www.ngdir.ir](http://www.ngdir.ir).