

خواص جذب نوترون کامپوزیت ژئوپلیمری حاصل از خاکستر آتشفشانی کوه تفتان

بابک هاشمی^{۱*}، رقیه امینی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۲۱، ش.ص: ۳۲-۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱)

چکیده

موادی که به عنوان جاذب نوترون مورد استفاده قرار می‌گیرند، باید خاصیت کند کنندگی نوترون‌های سریع و همچنین جذب نوترون‌های حرارتی را داشته باشند. ژئوپلیمرها از جمله موادی هستند که در سال‌های اخیر جای‌گزین سیمان‌ها شده‌اند و از آن‌ها جهت نگهداری زباله‌های هسته‌ای استفاده شده است. در این تحقیق خاصیت جذب نوترون کامپوزیت ژئوپلیمری ساخته شده از خاکستر آتشفشانی کوه تفتان مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور با افزودن ترکیبات هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم به خاکستر آتشفشانی و قرار دادن آن در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت و سپس نگه داشتن در دمای محیط به مدت هفت روز واکنش ژئوپلیمریزاسیون انجام شد. به منظور بهبود خواص جذبی ژئوپلیمر، اکسید بور و کاربید بور به میزان ۱۰-۵ درصد وزنی به ژئوپلیمر اضافه شد. بر روی نمونه‌های تولید شده آنالیز تفرق اشعه ایکس (XRD) و طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) به ترتیب به منظور بررسی فازها و پیوندهای شیمیایی به‌وجود آمده صورت گرفت. همچنین آزمون استحکام فشاری برای بررسی استحکام نمونه‌ها و آزمون جذب نوترون جهت بررسی خاصیت جذب نوترون آن‌ها انجام گردید. نتایج به دست آمده از آنالیز XRD وجود فازهای مربوط به تشکیل ژئوپلیمر و نتایج آنالیز FTIR وجود شبکه ژئوپلیمری را تایید کرد. استحکام فشاری بیشینه ۳۷،۵۴ مگاپاسکال برای نمونه فاقد اکسید و کاربید بور به دست آمد؛ اما نمونه‌های دارای افزودنی استحکام فشاری کمتری داشتند. آزمون جذب نوترون نیز نشان داد که نمونه‌های حاوی کاربید بور نسبت به نمونه‌های حاوی اکسید بور به دلیل داشتن عنصر کربن جذب نوترون بالاتری دارند.

واژه‌های کلیدی: جاذب نوترون، فعال کننده قلیایی، خاکستر آتشفشانی کوه تفتان، ژئوپلیمر.

^۱- دانشیار بخش مهندسی مواد و متالورژی دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

^۲- کارشناسی ارشد بخش مهندسی مواد و متالورژی دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

*- نویسنده مسئول مقاله: hashemib@shirazu.ac.ir

پیشگفتار

امروزه در جهان و به ویژه در کشور ما استفاده از تکنولوژی هسته‌ای در زمینه‌های گوناگون نیروگاهی، صنعتی، کشاورزی، پزشکی، هر روز گسترش بیشتری می‌یابد. یکی از مهم‌ترین مسائل در کاربرد فناوری هسته‌ای، حفاظت در برابر تابش‌های هسته‌ای می‌باشد تا از اثرات زیان‌آور زیست محیطی آن‌ها جلوگیری شود. در بحث حفاظت در برابر اشعه، تابش‌های نوترون و گاما از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند؛ زیرا به دلیل بدون بار بودن می‌توانند به راحتی از لایه محافظ عبور نمایند [۱]. بنابراین طراحی یک حفاظ مناسب و موثر در مقابل این اشعه‌ها نیازمند انتخاب مواد مناسب با در نظر گرفتن ضخامت لازم برای آن‌ها است [۲].

نوترون‌ها دارای بار الکتریکی نیستند و در برخورد با مواد به راحتی انرژی خود را از دست نمی‌دهند. بیشینه انتقال انرژی هنگامی رخ می‌دهد که نوترون با هسته اتم هیدروژن یعنی پروتون برخورد نماید که تقریباً دارای جرم مساوی با نوترون می‌باشد. اگر در برخورد بین نوترون و پروتون، پروتون جابجا شود، تمام انرژی نوترون به پروتون انتقال می‌یابد و نوترون متوقف می‌شود. مقدار انتقال انرژی نوترون در برخورد با عناصر سنگین‌تر از هیدروژن متناسب با افزایش عدد جرمی عنصر کاهش می‌یابد [۲].

حفاظت در برابر نوترون براساس کندسازی نوترون‌های سریع و جذب نوترون‌های کم انرژی (حرارتی) می‌باشد. با توجه به اینکه نوع واکنش نوترون بستگی به انرژی دارد، نوترون‌ها را بر حسب میزان انرژی آن‌ها رده بندی می‌کنند. نوترون‌های را که انرژی آن‌ها بیش از حدود 2 Mev است را نوترون‌های تند یا سریع و نوترون‌های با انرژی کم‌تر را نوترون‌های حرارتی می‌نامند. فرایند کندسازی نوترون‌های سریع در اثر پراکندگی کشسان نوترون توسط عناصر سبک انجام می‌پذیرد. هیدروژن بهترین کند کننده نوترون‌های سریع است. بور و ترکیبات آن نیز به دلیل داشتن سطح مقطع بالا در جذب نوترون‌های حرارتی کاربرد دارند. به همین دلیل هرچه میزان هیدروژن و بور در ماده محافظت بیشتر باشد، حفاظت در برابر نوترون‌ها افزایش می‌یابد

[۳].

سیمان‌ها یا بتن نیز از جمله موادی هستند که در ساخت سازه‌ها بکار می‌رود و علاوه بر دارا بودن ترکیبات هیدراته دارای خصوصیات ماندگاری مناسب، هزینه اولیه و نگهداری کم و سهولت در ساخت می‌باشد، به همین دلیل تحقیقات زیادی بر روی آن انجام شده است تا به‌عنوان یک ماده حفاظت کننده در برابر اشعه نوترون و پرتو گاما بکار گرفته شوند. در سال‌های اخیر به دلایل مسائل زیست محیطی و کاهش تولید دی اکسید کربن، ژئوپلیمرها به‌عنوان جایگزینی برای سیمان‌ها و بتن‌ها بکار گرفته شده‌اند [4].

ژئوپلیمر به عنوان نسل سوم سیمان بعد از سیمان پرتلند معمولی و آهک قرار می‌گیرد. اصطلاح ژئوپلیمر به طور کلی برای توصیف مواد آلومینو سیلیکات قلیایی آمورف استفاده می‌شود، همچنین اصطلاحات پلیمرهای معدنی^۱، سیمان قلیا فعال^۲، ژئوسیمان^۳، سرامیک‌های با پیوند قلیایی^۴ و هیدروسرامیک‌ها^۵ نیز در مورد آن‌ها به کار می‌رود [۴]. با وجود این تنوع در نامگذاری این اصطلاحات همگی توصیف مواد تولید شده با یک شیمی مشخص می‌باشند که شامل تکرار یک واحد مونومر سیالات^۶ $(-\text{Si-O-Al-O}-)$ می‌باشند. انواع مواد آلومینوسیلیکاتی مانند کائولن، فلدسپات‌ها، خاکستر آتشفشانی، سرباره‌های متالورژیکی و خاکستر زغال سنگ به عنوان مواد جامد اولیه در ساخت ژئوپلیمرها به کار می‌رود. میزان واکنش پذیری این مواد آلومینوسیلیکاتی بستگی به ساختار شیمیایی، ترکیب کانی شناسی، مورفولوژی، اندازه ذرات و میزان فاز شیشه‌ای موجود در آن‌ها دارد. ژئوپلیمر یک ساختار آمورف تا نیمه کریستالی با پیوندهای سه بعدی $(-\text{Si-O-Al}-)$ است که یک شبکه پلیمری دارد. شبکه‌های چهار وجهی SiO_4 و AlO_4 به طور متناوب با به اشتراک گذاری همه اتم‌های اکسیژن با اتم‌های Al به هم متصل می‌شوند. در شکل ۱ شماتیکی از فرایند تشکیل ژئوپلیمر نشان داده شده است [5,6].

تاکنون تحقیقی در مورد خواص جذبی ژئوپلیمرها در برابر اشعه نوترونی انجام نشده است. به ویژه اینکه رفتار و خصوصیات ژئوپلیمرها به شدت وابسته به ماده

4- Alkali-bonded ceramics

5- Hydroceramics

6- Sialate

1- Inorganic polymers

2- Alkali-activated cements

3- Geocements

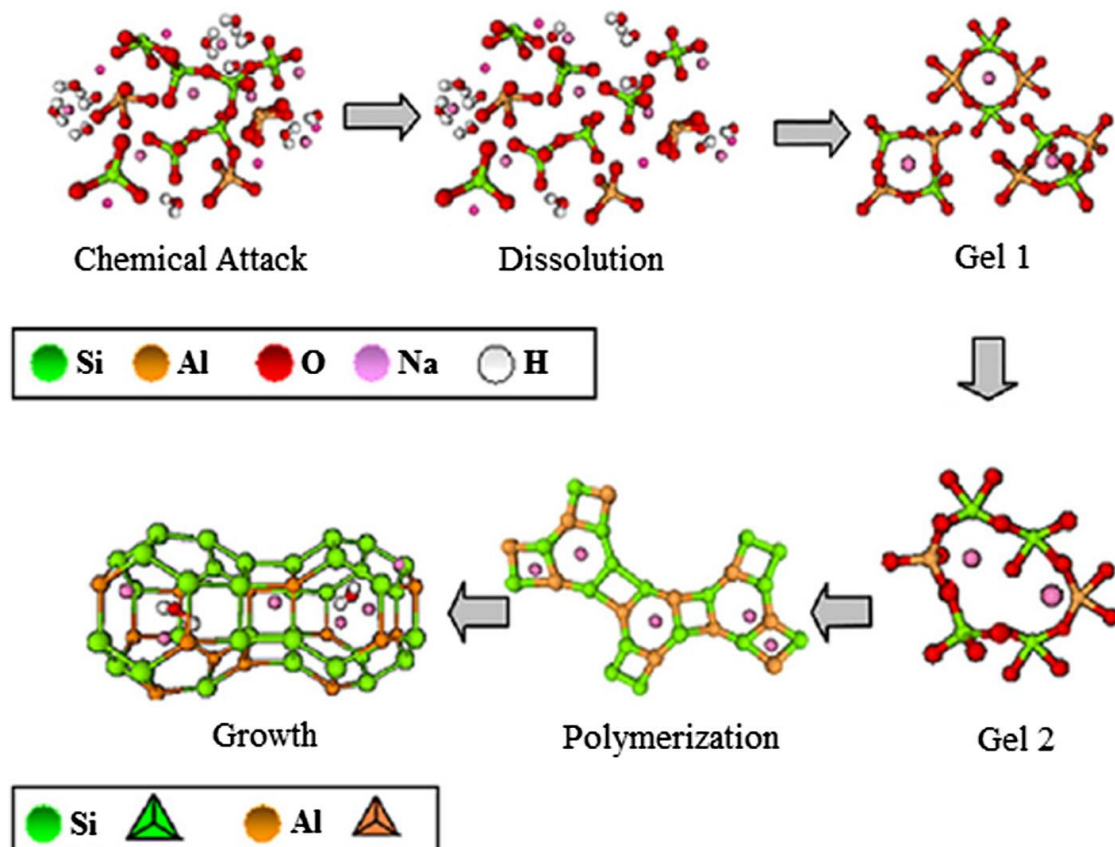
Al₂O₃ به SiO₂ باعث بهبود خواص مکانیکی می‌گردد [7]. همچنین کاربید و اکسید بور مورد نیاز از شرکت مرک با خلوص ۹۸ درصد و اندازه ذرات کوچک‌تر از ۱۰ میکرومتر تهیه شد.

برای فعال نمودن ذرات آلومینوسیلیکاتی ابتدا محلول هیدروکسید سدیم تهیه گردید. در این تحقیق از محلول هیدروکسید سدیم ۱۲ مولار استفاده شد. برای این منظور ۴۸۰ گرم هیدروکسید سدیم در ظرفی مدرج ریخته شد و سپس آب دو بار تقطیر شده به آن اضافه گردید تا حجم محلول به یک لیتر برسد. محلول با استفاده از همزن مغناطیسی هم زده شد تا محلولی شفاف بدست آمد. سپس محلول سیلیکات سدیم با نسبت وزنی دو و نیم به یک (سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم) به محلول هیدروکسید سدیم اضافه شد.

آلومینوسیلیکاتی سازنده آن می‌باشد. لذا در این تحقیق سعی شده است خواص جذب اشعه نوترونی ژئوپلیمر بر پایه خاکستر آتشفشان تفتان به همراه افزودنی‌هایی همچون اکسید بور و کاربید بور مورد بررسی قرار گرفته و با خواص جذبی سیمان‌های متداول مقایسه گردد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از خاکستر آتشفشانی کوه تفتان (خاک پوزولانی) به عنوان منبع آلومینوسیلیکاتی با اندازه ذرات ۳۷ میکرومتر، با ترکیب شیمیایی مطابق جدول ۱ استفاده شد. فعال کننده‌های قلیایی مورد استفاده محلول سیلیکات سدیم شرکت مرک (جدول ۲) و هیدروکسید سدیم تولید شرکت کیمیا مواد با خلوص ۹۹ درصد بودند. به منظور افزایش استحکام نمونه‌ها از نانو سیلیس شرکت نانوفناوری-های نوین فدک (جدول ۳) استفاده گردید. افزایش نسبت



شکل ۱- شماتیکی از تشکیل ژئوپلیمر

جدول ۱- ترکیب شیمیایی خاکستر آتشفشانی کوه تفتان

ترکیب	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	N ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	MgO	L.O.I
درصد وزنی	۵۴,۱۹	۱۵,۶۳	۳,۸۱	۱۳,۰۷	۲,۸	۲,۲۵	۰,۵۷	۰,۳۶	۲,۱۳	<۳

جدول ۲- مشخصات محلول سیلیکات سدیم

Na ₂ O	(7.5-8.5)%
SiO ₂	(25.5-28.5)%
Density at 20 °c	1.296-1.396 g/ml
Fe (iron)	≤ 0.005%
Heavy metal as Pb	≤ 0.005%
H ₂ O	(63-65)%

چگالی نمونه‌های ساخته شده به روش ارشمیدسی اندازه‌گیری شد. به منظور شناسایی فازها و بررسی ساختار ژئوپلیمری نمونه‌ها از آنالیز XRD و FTIR استفاده شد. ریزساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین استحکام فشاری و خواص جذبی نمونه‌ها به ترتیب توسط دستگاه پرس با قابلیت اعمال نیروی ۲۰ تن و چشمه نوترونی Pu-Be با نرخ انتشار 1.13×10^7 n/s و فاصله 2-34cm ساخت کشور آمریکا با خصوصیات ذیل اندازه‌گیری گردید. از هر ترکیب تعداد سه نمونه ساخته شد و استحکام فشاری گزارش شده میانگین استحکام فشاری نمونه‌ها است..

برای ساخت ژئوپلیمر و به منظور افزایش استحکام نمونه‌ها ابتدا ۷,۵ درصد وزنی نانو سیلیس به خاکستر آتشفشانی اضافه شد. سپس مخلوط جامد به نسبت وزنی یک و نیم به یک به محلول فعال کننده قلیایی اضافه گردید. پس از مخلوط کردن فاز مایع و جامد، مخلوط به مدت ۱۵ دقیقه با استفاده از همزن مکانیکی هم زده شد تا مخلوطی خمیری یکنواخت بدست آید. خمیر حاصل در قالب‌هایی از جنس پلی اتیلن به ابعاد ۱۷*۱۷*۱,۵ سانتی متر ریخته شد و به منظور حباب زدایی به مدت ۱۵ دقیقه روی میز ویبره قرار گرفتند. در ادامه به منظور انجام فرایند گیرش ژئوپلیمر، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای ۶۵ درجه سانتی گراد نگه داشته شدند، پس از خارج کردن نمونه‌ها از قالب به مدت ۷ روز در دمای محیط قرار گرفتند. برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی مخلوط فوق با درصدهای وزنی متفاوت (۱۵-۰) کاربید و اکسید بور مخلوط شدند.

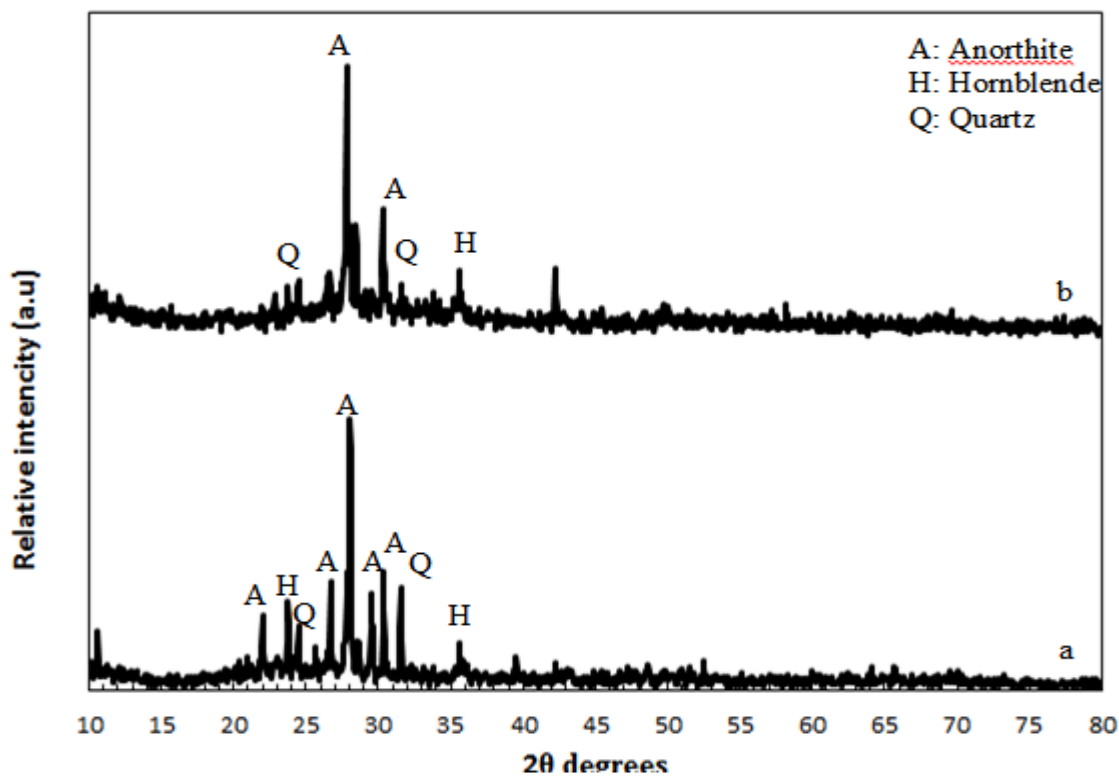
نتایج و بحث

آنالیز XRD نمونه‌ها

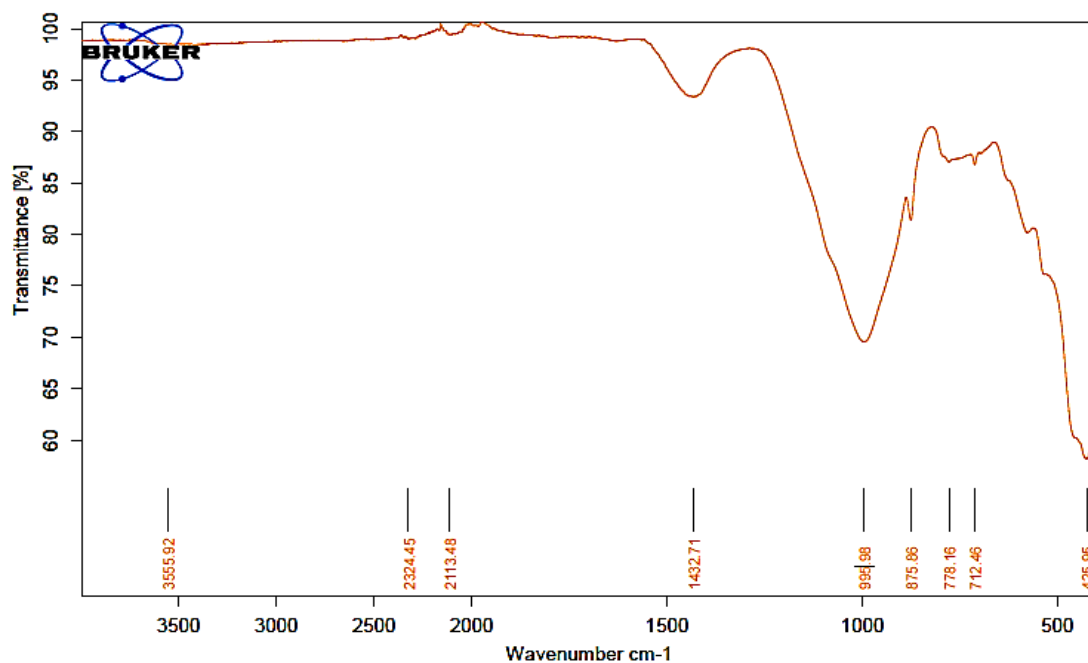
در شکل ۲ نمودار XRD مربوط به خاکستر آتشفشانی و نمونه ژئوپلیمری سنتز شده نشان داده شده است. در نمودار پراش خاکستر آتشفشانی (شکل ۱-a) فاز بلوری عمدتاً آنورتیت است در حالی که در نمودار پراش نمونه ژئوپلیمری شدت پیک‌های آنورتیت کاهش یافته و یا حذف شده است، این موضوع در پیک‌های با زاویه $2\theta=11$, $22,23,25/5,30$ به خوبی مشاهده می‌شود. کاهش شدت پیک‌ها در واقع نشان دهنده مشارکت این فاز در فرایند ژئوپلیمراسیون می‌باشد [8]، بنابراین این نتیجه به دست می‌آید که کریستال آنورتیت وقتی در مجاورت محلول فعال کننده قلیایی قرار می‌گیرد، تجزیه شده و منجر به تشکیل ژئوپلیمر می‌شود.

آنالیز FTIR نمونه‌های ژئوپلیمری

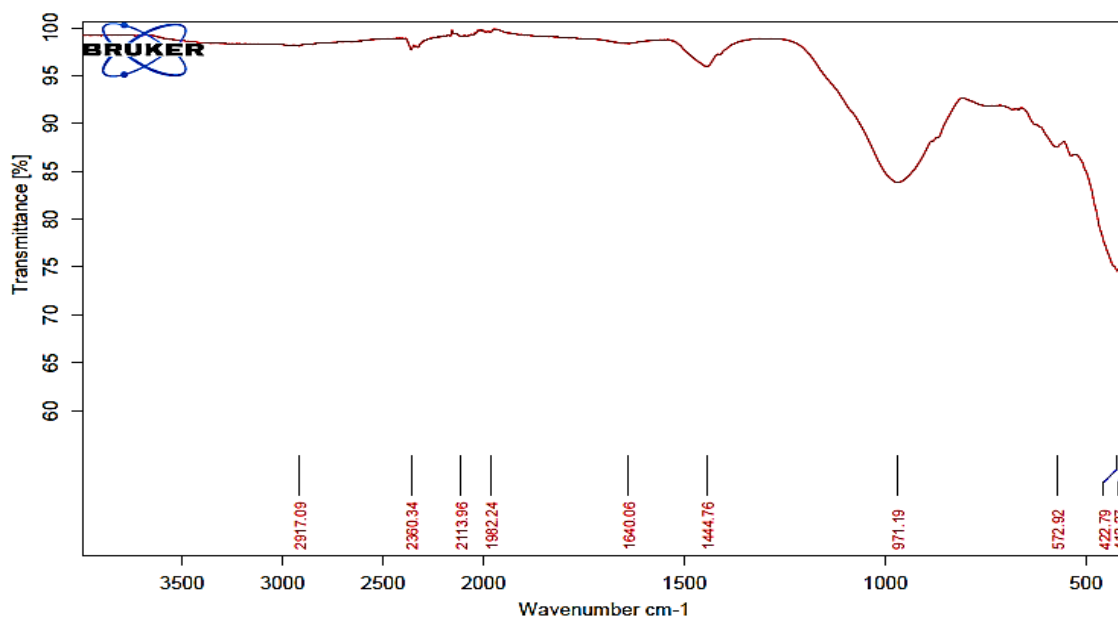
به منظور اطمینان از تشکیل شبکه ژئوپلیمری آنالیز FTIR انجام شد. در شکل‌های ۳ و ۴ آنالیز FTIR خاکستر آتشفشانی کوه تفتان و نمونه ژئوپلیمری نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳ در طول موج $425/95$ یک پیک مشاهده می‌شود که مربوط به پیوند Si-O-Fe می‌باشد [9]. پیک‌های مشاهده شده در طول موج‌های $712/46$, $778/16$ و $875/96$ مربوط به پیوندهای ارتعاشی Si-O هستند. پیوند اصلی مربوط به شبکه آلومینوسیلیکاتی، پیوند ارتعاشی است که در طول موج $995/98$ مشاهده می‌شود. این طول موج مربوط به پیوند Si-O-Al است. پیک موجود در طول موج $1432/71$ مربوط به پیوندهای کششی O-H مولکول‌های آب و گروه‌های سیلانی می‌باشد. در طول موج‌های $2324/45$ و $2113/46$ نیز پیک‌های مشاهده شده است. این پیک‌ها حضور کربنات‌ها را که به صورت فیزیکی به شکل مولکول‌های CO_2 جذب فاز آمورف شده‌اند را نشان می‌دهد. حضور آب، کربن دی اکسید و متان در آلومینوسیلیکات‌ها رایج است [10].



شکل ۲- الگوی پراش اشعه ایکس (a) خاکستر آتشفشان تفتان (b) نمونه ژئوپلیمری



شکل ۳- آنالیز FTIR خاکستر آتشفشانی کوه تفتان



شکل ۴- آنالیز FTIR نمونه ژئوپلیمری

به دلیل انحلال خاکستر آتشفشانی در محلول فعال کننده قلیایی و جایگزینی مقداری از SiO_4 از شبکه تتراهدرال سیلیکاتی خاکستر آتشفشانی توسط AlO_4 می‌باشد که

در شکل ۴ تقریباً تمام پیک‌های ارتعاشی که در نمونه خاکستر آتشفشانی وجود دارد، مشاهده می‌شود؛ اما شدت پیک‌ها به‌طور محسوسی کاهش پیدا کرده است. این تفاوت

ماکروسکوپیک، عکس واحد طول است. افزایش سطح مقطع ماکروسکوپیک جذب نوترون‌های حرارتی به ازای درصد‌های مختلف B_2O_3 در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، افزایش سطح مقطع ماکروسکوپیک با درصد B_2O_3 خطی نمی‌باشد و در نمونه حاوی ۵ درصد B_2O_3 نسبت به نمونه شاهد افزایش محسوسی مشاهده می‌شود.

در شکل ۷ شدت عبور نسبی یا تضعیف نوترون‌های حرارتی با افزایش درصد B_4C نشان داده شده است. با افزایش درصد B_4C شدت عبور نسبی نوترون‌های حرارتی کاهش پیدا کرده؛ چون سطح مقطع جذب نوترون‌های حرارتی افزایش یافته است. این امر به معنای تضعیف بیش-تر نوترون‌های حرارتی می‌باشد. در شکل ۸ افزایش سطح مقطع ماکروسکوپیک جذب نوترون‌های حرارتی با استفاده از رابطه ۱ نشان داده شده است. از مقایسه نتایج مربوط به این دو ترکیب مشاهده می‌شود که کاربرد بور تاثیر محسوس تری بر کاهش عبور نوترون‌های حرارتی داشته است و به ازاء یک درصد ثابت از ماده افزودنی مثلا ۵ درصد سطح مقطع ماکروسکوپیک بزرگتری را ایجاد نموده است به‌گونه‌ای که به ازاء ۱۰ درصد کاربرد بور عبور پرتو نوترونی تقریبا به صفر رسیده است.

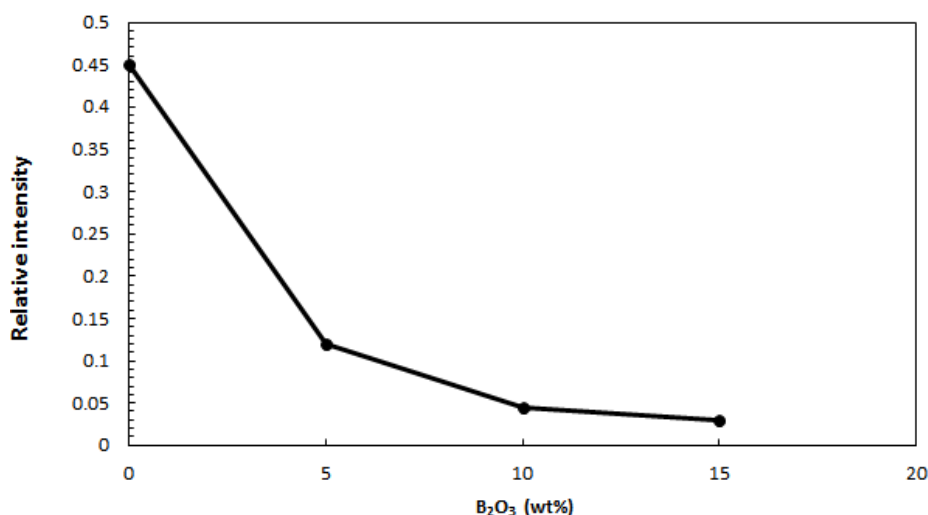
طول پیوند سیلیکات را کاهش می‌دهد و منجر به تشکیل ژل ژئوپلیمر غنی از Al می‌شود [10].

اثر اکسید بور و کاربرد بور بر تضعیف نوترون‌های حرارتی

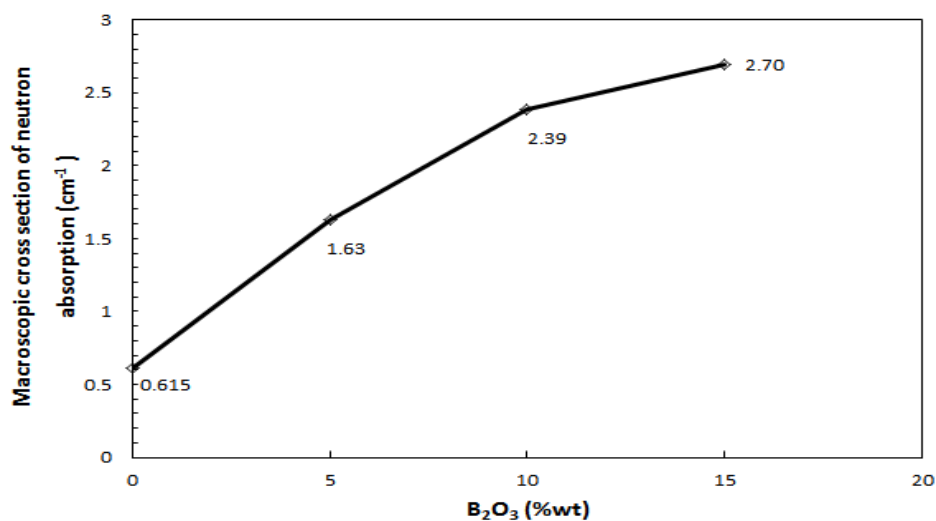
شکل ۵ شدت عبور نسبی نوترون‌ها از نمونه‌های کامپوزیتی با درصد‌های مختلف B_2O_3 در بازه نوترون‌های حرارتی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد B_2O_3 شدت پرتوی خروجی نوترون کاهش یافته است. کاهش شدت پرتوهای خروجی با افزایش درصد B_2O_3 به معنای افزایش سطح مقطع جذب نوترون‌های حرارتی می‌باشد که طبق رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$I = I^0 \exp -(N\sigma x) \quad (1)$$

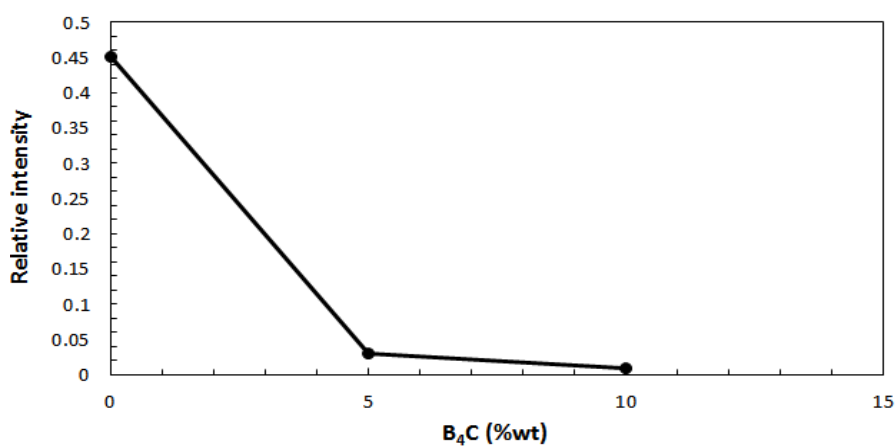
در این رابطه σ سطح مقطع میکروسکوپیک برخورد نوترون با هسته یک اتم بر حسب سانتی مترمربع، N تعداد اتم‌های ماده جاذب بر حسب سانتی متر مکعب ماده جاذب و x ضخامت ماده جاذب بر حسب سانتی متر است. حاصل ضرب σ در N را سطح مقطع ماکروسکوپیک می‌نامند و آن را با نماد Σ نشان می‌دهند. واحد سطح مقطع



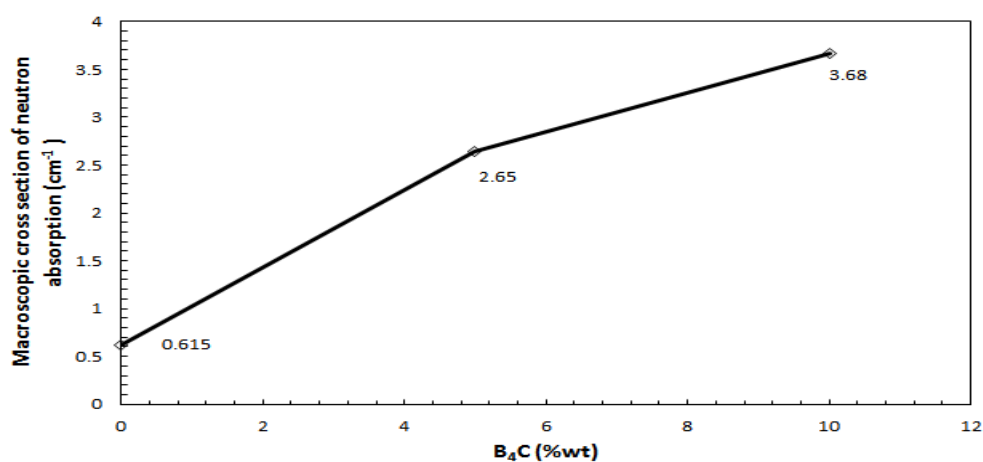
شکل ۵- شدت عبور نسبی نوترون‌های حرارتی با افزایش درصد B_2O_3 در نمونه کامپوزیتی



شکل ۶- سطح مقطع ماکروسکوپی جذب نوترون‌های حرارتی توسط نمونه‌ها به ازای درصد‌های مختلف B₂O₃



شکل ۷- شدت عبور نسبی نوترون‌های حرارتی با افزایش درصد کاربید بور در نمونه کامپوزیتی



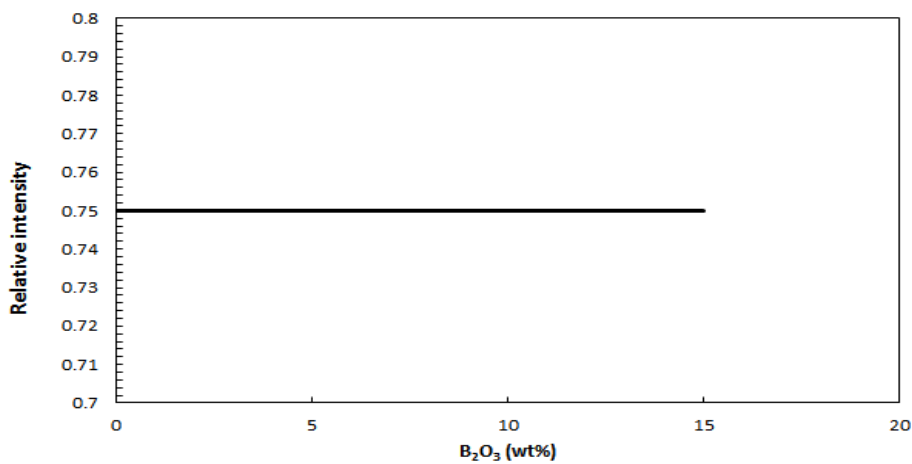
شکل ۸- سطح مقطع ماکروسکوپی جذب نوترون‌های حرارتی توسط نمونه‌های با درصد متفاوت کاربید بور

آن‌ها شدت پرتو نوترون خروجی را به یک میزان کاهش داده‌اند.

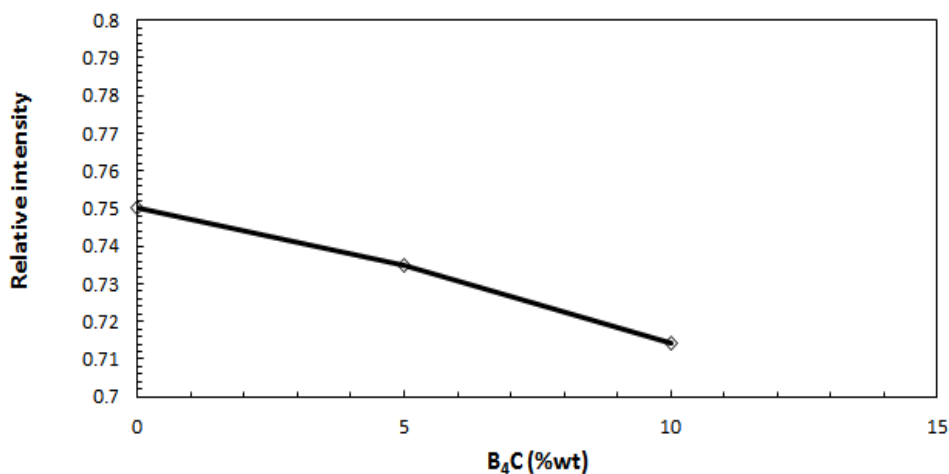
در نمونه‌های حاوی کاربید بور (شکل ۱۰) کاهش محسوس‌تری در شدت پرتو نوترون‌های سریع عبوری مشاهده می‌شود. در این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های دارای اکسید بور عنصر کربن وجود دارد، در نتیجه با افزایش درصد کاربید بور میزان کربن موجود در ماده جاذب افزایش یافته و درصد کاهش شدت عبور نسبی نوترون‌های سریع تا ۵,۳۳ درصد افزایش یافته است. قابل ذکر است این میزان کند شدن نوترون‌های سریع چندان زیاد نیست و به منظور افزایش کند شدن نوترون‌های سریع باید افزودنی‌های دیگر مانند الیاف کربن یا گرافیت مورد بررسی قرار گیرد.

اثر اکسید بور و کاربید بور در تضعیف نوترون‌های سریع

در شکل ۹ شدت عبور نسبی نوترون‌های سریع از نمونه‌های دارای درصدهای متفاوت B_2O_3 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، در شدت عبور نسبی نوترون‌های سریع از نمونه‌ها یا به عبارتی جذب آن‌ها توسط نمونه‌های با درصدهای مختلف B_2O_3 و نمونه شاهد هیچ تغییری ایجاد نشده است؛ چون برای کند شدن نوترون‌های سریع به حضور عناصر سبک مانند هیدروژن و کربن در نمونه‌ها نیاز است [4]. لذا افزودن اکسید بور تفاوت محسوسی در خواص جذبی نوترون‌های سریع ایجاد ننموده است. در نمونه‌های دارای اکسید بور همانند نمونه شاهد تنها عنصر سبک موجود هیدروژن است که در نتیجه همه



شکل ۹- شدت عبور نسبی نوترون‌های سریع به ازای نمونه‌های با درصدهای مختلف B_2O_3



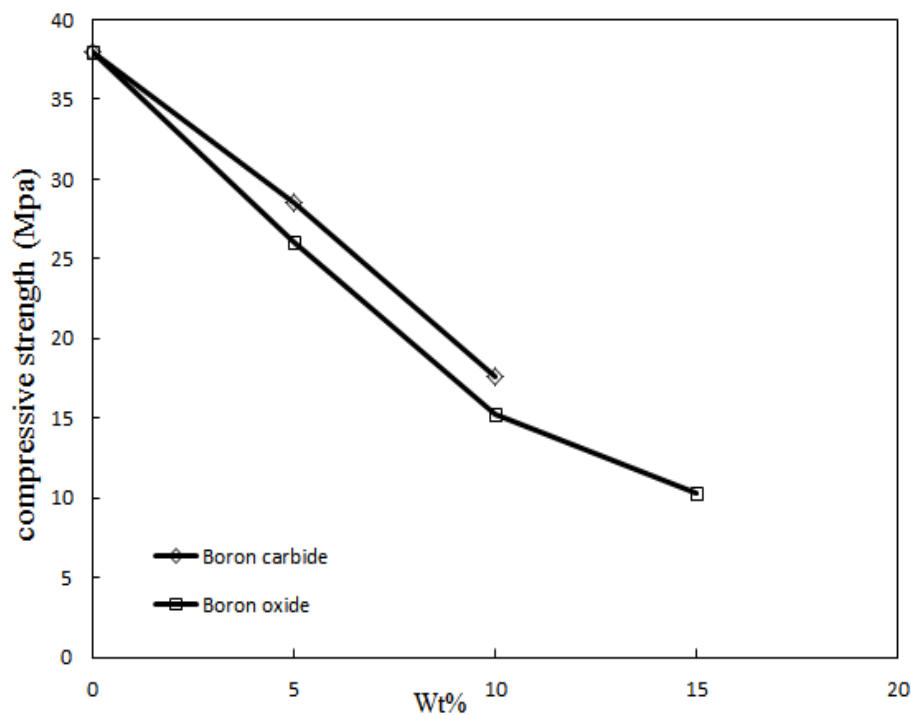
شکل ۱۰- تاثیر افزودن کاربید بور به نمونه‌ها در تضعیف شدت عبور نوترون‌های سریع

سیمان‌های معمولی و سنگین می‌باشد. این امر می‌تواند به دلیل تراکم ساختاری بیش‌تر نمونه ژئوپلیمری نسبت به سیمان‌های دیگر باشد. همچنین افزودن ترکیباتی مانند اکسید بور یا کاربید بور به این ژئوپلیمرها می‌تواند خواص جذب نوترون حرارتی آن‌ها را در مقایسه با سیمان‌های متداول بسیار افزایش دهد.

در جدول ۴ سطح مقطع جذب نوترون‌های حرارتی برای سیمان معمولی و سیمان‌های سنگین با توجه به تحقیقات گذشته [11] و همچنین سطح مقطع جذب برای نمونه ژئوپلیمری ساخته شده گزارش شده است. همان‌گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، سطح مقطع جذب نوترون حرارتی برای نمونه ژئوپلیمری به مراتب بیش‌تر از

جدول ۴- سطح مقطع ماکروسکوپیک جذب نوترون برای سیمان‌های مختلف [11].

نوع سیمان	سطح مقطع ماکروسکوپیک جذب نوترون (cm^{-1})
سیمان سنگین مگنتیتی	0.212
سیمان سنگین باریتی	0.188
سیمان معمولی	0.165
نمونه ژئوپلیمری بررسی شده در این تحقیق	0.615



شکل ۱۱- مقاومت فشاری نمونه‌های دارای اکسید و کاربید بور

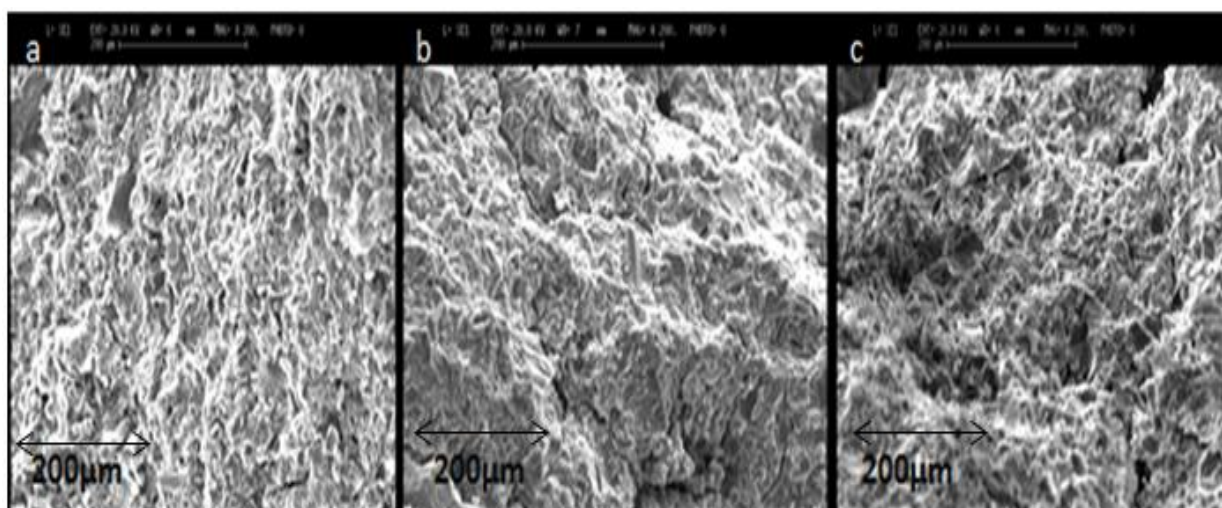
بررسی مقاومت فشاری نمونه‌ها

در شکل ۱۱ مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی اکسید بور و کاربید بور در مقایسه با نمونه معمولی نشان داده شده است. همچنین در جدول ۵ چگالی نمونه‌های حاوی اکسید و کاربید بور گزارش شده است. با توجه به شکل ۱۱ مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی اکسید و کاربید بور کاهش پیدا کرده است. این کاهش در مقاومت فشاری به دلیل کاهش چگالی نمونه‌های فوق و همچنین افزایش میزان فاز شرکت نکرده در واکنش ژئوپلیمرزسیون نسبت به نمونه با ترکیب اولیه می‌باشد [9,12]. این امر در شکل ۱۲ که تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی از سطح شکست نمونه‌ها را نشان می‌دهد به خوبی مشاهده می‌شود. همان‌گونه که در

شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، نمونه ژئوپلیمری با ترکیب بهینه یا نمونه شاهد (تصویر a) دارای تراکم ساختاری بیشتری است؛ زیرا تراکم ساختار بستگی به میزان جامد آلومینوسیلیکاتی شرکت کننده در واکنش ژئوپلیمرزاسیون دارد. با افزودن ترکیباتی همچون اکسید یا کاربید بور به ترکیب ژئوپلیمر از مقدار فاز آلومینوسیلیکاتی واکنش دهنده با محلول قلیایی کاسته شده و در نتیجه ساختاری با تراکم کم‌تر یا تخلخل بیشتر حاصل می‌شود. تصاویر b و c در شکل ۱۲ به خوبی نشان‌دهنده این موضوع و تخلخل بیشتر سطح شکست نمونه‌ها می‌باشند.

جدول ۵- چگالی نمونه‌های حاوی اکسید و کاربید بور

چگالی (g/cm ³)	درصد اکسید بور	چگالی (g/cm ³)	درصد کاربید بور
۲,۲۳	۰	۲,۲۳	۰
۱,۹۸	۵	۲,۰۲	۵
۱,۹۳	۱۰	۱,۹۳	۱۰
۱,۸۷	۱۵		

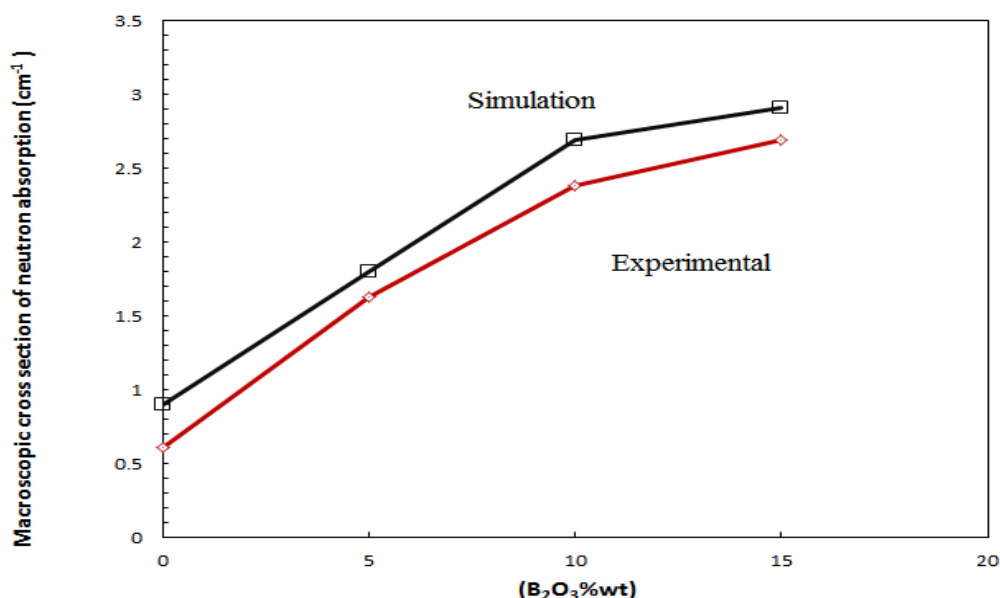


شکل ۱۲- تصاویر SEM، (a) نمونه شاهد (b) نمونه حاوی ۵ درصد اکسید بور (c) نمونه حاوی ۵ درصد کاربید بور

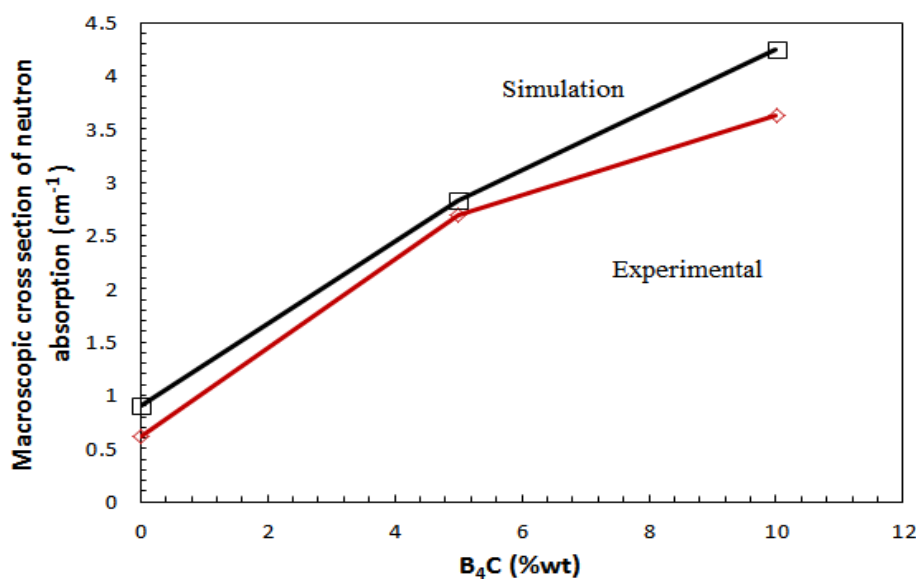
مقایسه داده‌های تجربی و نتایج شبیه سازی شده

به منظور اعتبار سنجی و اطمینان از صحت نتایج به دست آمده در خصوص سطح مقطع ماکروسکوپیک جذب نمونه‌ها، این نتایج با نتایج حاصل از شبیه سازی توسط نرم افزار

GEANT مقایسه گردید. نتایج به دست آمده در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. با توجه به تصاویر انطباق نسبتاً خوبی بین مقادیر شبیه سازی و آزمایشگاهی و همچنین روند تغییرات آن‌ها دیده می‌شود.



شکل ۱۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی سطح مقطع ماکروسکوپیک جذب و نتایج حاصل از شبیه سازی برای نمونه های حاوی اکسید بور



شکل ۱۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی سطح مقطع ماکروسکوپیک جذب و نتایج حاصل از شبیه سازی برای نمونه های حاوی کاربید بور

کاربید بور به میزان ۱۰ درصد، سبب کاهش عبور نوترون-های سریع تا ۵,۳۳ درصد گردید. استفاده از کاربید بور و اکسید بور افت مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری را به‌دنبال داشت و افزودن این ترکیبات از ۵ درصد به بالا به دلیل افزایش تخلخل ناشی از فازهای واکنش نداده در فرآیند ژئوپلیمریزاسون و کاهش تراکم ساختاری، سبب تخریب شدید خواص مکانیکی گردید. بنابراین به‌نظر می‌رسد، نمونه دارای ۵ درصد کاربید بور خواص بهینه‌ای را داشته باشد.

References:

1. Arthur Chilton, J. Kenneth Shultis, and Richard E. Faw. "Principles of radiation shielding." (1984).
2. M. N. Nasrabadi and G. Baghban. "Neutron shielding design for ^{241}Am -Be neutron source considering different sites to achieve maximum thermal and fast neutron flux using MCNPX code." *Annals of Nuclear Energy* Vol. 59, pp 47-52, 2013.
3. . Nicholas "Measurement and detection of radiation" CRC press, 2010.
4. . Duxs, J. L Provis, G. C. Lukey, A. Palomo and, J. S van Deventer "Geopolymer technology: the current state of the art" *Journal of materials science*, Vol. 42 no.9, pp 2917-2933, 2007.
5. H. Djwanto and B. Vijaya Rangan. "Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete." 2005.
6. . Davidovits, "Geopolymer cement. A review" *Geopolymer Institute, Technical papers*, Vol.21, pp 1-11, 2013.
7. . Pacheco-Torgal, "Introduction to handbook of alkali-activated cements,

نتیجه گیری

نتایج نشان داد، استفاده از بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر اتشفشان تفتان نسبت به بتن‌های معمولی و سنگین عملکرد بهتری در تضعیف نوترون‌های حرارتی می‌تواند داشته باشد. هر چه میزان اکسید بور و کاربید بور در نمونه‌های ژئوپلیمری بیش‌تر باشد، سطح مقطع جذب نوترون‌های حرارتی بیش‌تر خواهد بود. افزودن اکسید بور تاثیری در کند کردن نوترون‌های سریع نداشت؛ ولی افزودن

mortars and concretes" In *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*, pp.1-16, 2015.

8. . Chindapasirt and U. Rattanasak "Utilization of blended fluidized bed combustion (FBC) ash and pulverized coal combustion (PCC) fly ash in geopolymer" *Waste Management*, Vol. 30, no. 4 pp 667-672, 2010.
9. . Ranjbar, M. Mehrali, A. Behnia, U. J. Alengaram, and M. Z. Jumaat, "Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar" *Materials & Design* Vol. 59, pp 532-539, 2014.
10. chadjié, and D. Njopwouo "A comparative study of two methods to produce geopolymer composites from volcanic scoria and the role of structural water contained in the volcanic scoria on its reactivity" *Ceramics International* Vol.41, no. 10, pp 12568-12577, 2015.
11. M. Mahdy, P. R. S. Speare, and A. H. Abdel-Reheem "Shielding properties of heavyweight, high strength concrete" In *2nd Material Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*, pp. 5-8, 2002_F
12. . Khale and R. Chaudhary, "Mechanism of

geopolymerization and factors influencing its development: a review" Journal of materials science, Vol. 42, no. 3, pp 729-746, 2007.