

## تأثیر مواد پوزولانی در بهبود آثار منفی ناشی از ناحیه انتقالی در بتن

جعفر شفت<sup>۱</sup>، علی الهوردی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۸/۰۱ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۱۶

پیام‌نگار: ali.allahverdi@iust.ac.ir

## چکیده

در بتن، در فضای بین خمیر سیمان و سنگدانه، ناحیه‌ای با تخلخل زیاد مشاهده شده است که به آن ناحیه انتقالی سطح مشترک می‌گویند. وجود تخلخل زیاد در این ناحیه، به کاهش مقاومت فشاری و مقاومت کششی می‌انجامد. به همین دلیل، پژوهشگران در پی آن هستند که آثار ناشی از ناحیه انتقالی را کاهش دهند. استفاده از افزودنی‌های معدنی در ابعاد ریز، می‌تواند از دو طریق ناحیه انتقالی را بهبود دهد. اولاً، با پر کردن تخلخل بتن در ناحیه انتقالی، و ثانیاً با انجام واکنش پوزولانی که به تولید مواد چسباننده منجر می‌شود. به عنوان مثال، دوده سیلیس، نانو سیلیس، خاکستر پوسته برنج، متاکائولن، سرباره و دیگر موادی که دارای سیلیس بی‌ریخت هستند، می‌توانند با کلسیم هیدروکسید، که ماده‌ای غیر چسباننده است و در ناحیه انتقالی غلظت بالایی دارد، وارد واکنش شوند. محصول این واکنش، تولید ژل کلسیم هیدرات سیلیکات است که سبب کاهش تخلخل و افزایش قدرت پیوند خمیر سیمان و سنگدانه می‌شود.

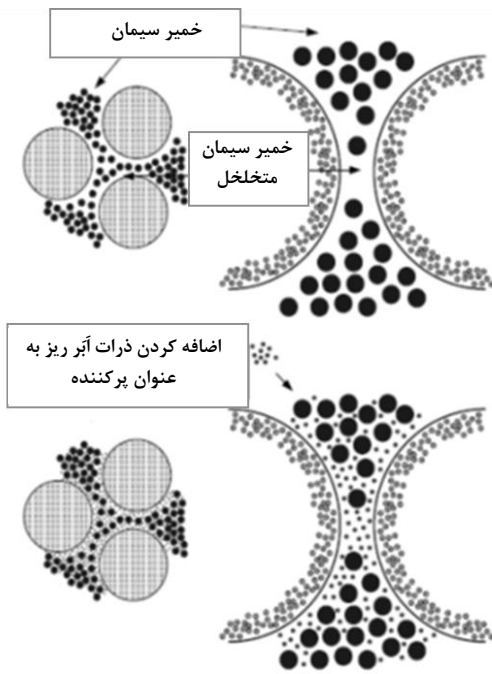
کلیدواژه‌ها: دوده سیلیسی، مواد پوزولانی، ناحیه انتقالی سطح مشترک، افزودنی‌های معدنی.

## ۱. مقدمه

در مفهوم وسیع، به هر ماده‌ای که از یک ترکیب چسباننده با خاصیت سیمانی شدن تشکیل شده باشد، بتن گفته می‌شود. در تولید بتن، سه ماده، نقش اساسی دارند: سیمان، آب و سنگدانه [۱]. مطالعات میکروسکوپی حاکی از آن است که در فضای بین خمیر سیمان و سنگدانه، ناحیه متخلخلی به نام ناحیه انتقالی سطح مشترک وجود دارد که ضخامت آن در حدود ۱۰ تا ۶۰ میکرون است. وجود تخلخل زیاد در ناحیه انتقالی سبب کاهش مواد چسباننده می‌شود [۲] و در نتیجه به کاهش مقاومت فشاری و خمشی [۳] و افزایش نفوذپذیری و به تبع آن افزایش آسیب‌پذیری

\* تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز

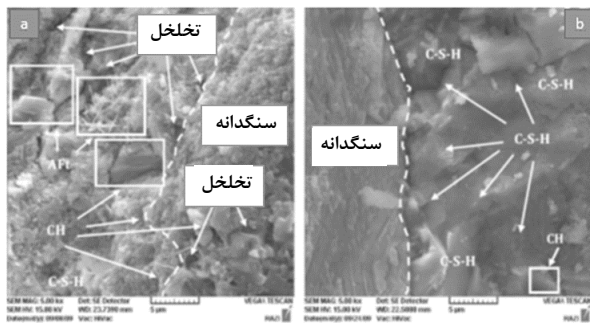
بتن در برابر نفوذ سولفات‌ها، کلرایدها و قلیایی‌ها می‌انجامد [۴]. به دلیل همین آثار منفی که ناحیه انتقالی در بتن ایجاد می‌کند، تحقیقات گسترده‌ای برای اصلاح و یا حذف این ناحیه صورت گرفته است. یکی از این روش‌ها بهره‌گیری از افزودنی‌های معدنی ریز است. نیلی و احسانی [۵] از نانو سیلیس و دوده سیلیسی برای بهبود ناحیه انتقالی استفاده کردند که مشخص شد با جایگزینی ۳ درصد نانو سیلیس و ۵ درصد دوده سیلیسی با سیمان، بهترین مقاومت فشاری برای بتن ایجاد می‌شود. آزمایش‌های کوهن و همکاران [۶] نشان داد که استفاده از دوده سیلیسی به تنهایی نیز در بهبود ناحیه انتقالی مؤثر است. متاکائولن از دیگر موادی است که برای بهبود آثار منفی ناحیه انتقالی به کار گرفته شده است [۷، ۸]. ژان و همکارانش [۷]



شکل ۱. ذرات آبر ریز در نقش پرکننده تخلخل در ناحیه انتقالی [۱۳].

## ۲-۱ نانو سیلیس<sup>۲</sup> و دوده سیلیسی

سیلیس ماده‌ای معدنی است که در ابعاد میکرو و نانو برای بهبود خواص سیمان مصرف می‌شود. میکرو سیلیس، همان دوده سیلیسی است که نیلی و احسانی [۵] از آن برای بهبود آثار منفی ناشی از وجود فضای انتقالی بهره بردند. آنها از روش‌های XRD، SEM و EDS برای مطالعه ریزساختار بتن استفاده کردند. مطابق شکل (۲)، افزودن نانو سیلیس توانسته است تخلخل ناحیه انتقالی را به مقدار زیادی کاهش دهد.



شکل ۲. تصویر میکروسکوپیکی از ناحیه انتقالی بین خامیر سیمان و سنگدانه. (الف) بدون نانو سیلیس (ب) با ۳٪ نانو سیلیس [۵].

مشاهده کردند که اضافه کردن ۱۰ درصد متاکائولن به سیمان، سبب کاهش تخلخل می‌شود و ناحیه انتقالی را متراکم می‌کند. حتی تأثیر متاکائولین از دوده سیلیسی و سرباره بیشتر است. سرباره از دیگر افزودنی‌های معدنی است که برای بهبود خواص ناحیه انتقالی به‌کار رفته است. این ماده از کوره‌های ذوب فلزات به‌دست‌آمده و بسته به مواد ورودی به کوره، ترکیبات مختلفی دارد [۹]. تحقیقات نشان داده‌اند که جایگزین کردن ۱۰ درصد وزنی سیمان با سرباره و تولید سیمان پرتلند سرباره‌ای، موجب افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود [۷]. همچنین، خاکستر پوسته برنج که از سوزاندن پوسته برنج (RHA) به‌دست می‌آید و یک ماده پوزولانی بسیار واکنش‌پذیر است، برای بهبود ریزساختار ناحیه انتقالی بین خمیر سیمان و سنگدانه در بتن‌های با کارایی بالا (HPC) به‌کار رفته است [۱۰]. بنابر تحقیقات انجام شده، جایگزین کردن خاکستر پوسته برنج با سیمان تا ۲۰ درصد، سبب افزایش مقاومت فشاری می‌شود [۱۰]، اما با جایگزینی ۳۰ درصد، شاهد تضعیف بتن خواهیم بود [۱۱]. برخی پژوهشگران، تأثیر ابعاد ذرات خاکستر پوسته برنج جایگزین شده را نیز در خواص بتن ارزیابی و مشاهده کردند هرچه خاکستر پوسته برنج نرم‌تر باشد، نفوذپذیری آب در بتن، کمتر می‌شود که به معنی کاهش بیشتر تخلخل و بهبود بیشتر ناحیه انتقالی [۱۲]. در این مقاله، تأثیر هر یک از افزودنی‌های معدنی به تفکیک بررسی می‌شود.

## ۲. تأثیر افزودنی‌های معدنی در بهبود ناحیه انتقالی

افزودنی‌های معدنی را به صورت مواد بسیار ریز و در مواردی ریزتر از دانه‌های سیمان به کار می‌برند. اگر این افزودنی‌ها ریزتر از دانه‌های ناحیه انتقالی را کم می‌کنند. ضمن این‌که افزودنی‌های معدنی به دلیل برخورداری از خاصیت پوزولانی، قادر به واکنش با کلسیم هیدروکسید و تولید مواد چسباننده هستند. در ادامه، تحقیقاتی را که برای بررسی تأثیر افزودنی‌های معدنی بر خواص ناحیه انتقال انجام شده است، مرور می‌کنیم.

1. Rice Husk Ash
2. Ultrafine Particles

## ۲-۲ متاکائولین

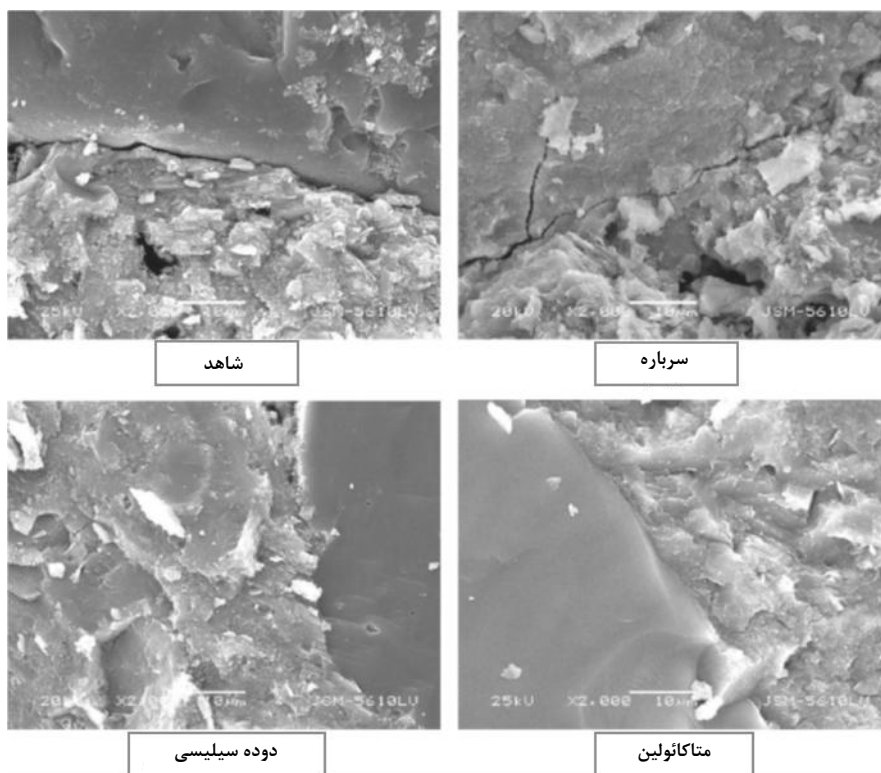
متاکائولین یک ماده معدنی حاوی خاک رس کائولن است که در دمای °C ۵۰۰ تا °C ۸۰۰ تکلیس شده است. متاکائولین تا حدی کمتر از دوده سیلیسی واکنش می‌دهد [۱۳].

ذات<sup>۱</sup> و همکارانش [۷] سه نوع افزودنی معدنی را به طور جداگانه و هر یک را به میزان ۱۰ درصد وزنی به سیمان افزودند. این افزودنی‌ها متاکائولین (MK)، دوده سیلیسی (SF) و سرپاره (SL) بود. سپس تأثیر این افزودنی‌ها را بر تخلخل، مقاومت فشاری و خواص ناحیه انتقالی در بتن‌های تولیدی بررسی کردند. آنها برای بررسی ریز ساختار بتن از SEM بهره بردند و مشاهده کردند که این افزودنی‌ها سبب کاهش تخلخل می‌شوند و ناحیه انتقالی را متراکم می‌کنند. همچنین، پی بردند که تأثیر متاکائولین از دو افزودنی دیگر بیشتر است. درحالی که سرپاره کمترین تأثیر را دارد. این واقعیت در شکل (۳) نیز مشهود است.

آن‌ها نانو سیلیس با درصدهای وزنی ۰، ۱/۵، ۳، ۵ و ۷/۵ و دوده سیلیسی با درصدهای وزنی ۰، ۵ و ۷/۵ را به بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ اضافه و مقاومت فشاری بتن را اندازه‌گیری کردند. نتایج این اندازه‌گیری در جدول (۱) درج شد است. طبق این جدول، با افزودن ۳ درصد نانو سیلیس و ۵ درصد دوده سیلیسی، بهترین مقاومت فشاری برای بتن ایجاد می‌شود.

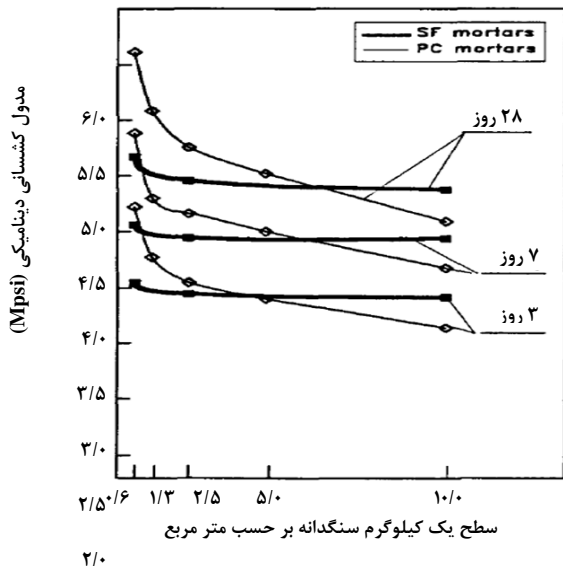
جدول ۱. تغییرات مقاومت فشاری بتن در اثر افزودن نانو سیلیس و ریز سیلیس [۵].

مقاومت فشاری بتن بعد از ۹۱ روز	ریز سیلیس (%)	نانوسیلیس (%)
۸۱	۰	۰
۸۳/۶	۵	۱/۵
۱۰۱/۹	۵	۳
۷۱/۹	۷/۵	۵
۵۸/۲	۷/۵	۷/۵



شکل ۳. تأثیر افزودن متاکائولین، ریز سیلیسی و سرپاره بر ساختار ناحیه انتقالی [۷].

1. Doun



شکل ۴. رابطه مدول کشسانی دینامیکی و سطح ویژه سنگدانه در ملات سیمان پرتلند و ملات سیمان با دوده سیلیس [۶].

#### ۴-۲ سرباره

سرباره یکی از مواد معدنی است که برای بهبود خواص ناحیه انتقالی به کار رفته است. به موادی که در کوره بلند ذوب فلزات جمع و در حکم ضایعات صنعتی شناخته می‌شوند، سرباره یا روباره می‌گویند. اگر سرباره به آهستگی سرد شود، حالت بلوری پیدا می‌کند که مصرف چندانی ندارد، چراکه واکنش پذیر نیست. اما اگر آن را به سرعت سرد کنیم، به صورت بی‌ریخت یا شیشه‌ای در می‌آید که پس از پودر شدن، در صنعت سیمان کاربرد دارد. برای سرمایش سریع، سرباره مذاب را درون حوضچه آب می‌ریزند و با جت آب سرد بر آن می‌پاشند. هنگام آسیاب کردن سرباره باید دقت کرد که چون سختی سرباره بیش از سیمان است، باید هر یک جداگانه آسیاب و در نهایت مخلوط شوند. چون سیمان و سرباره با هم مخلوط می‌شوند، ذرات سیمان نرم‌تر از ذرات سرباره خواهد شد.

در ترکیب شیمیایی سرباره‌ها، سیلیکات‌ها، آلومینوسیلیکات‌ها و کلسیم یافت می‌شود که مقدار آنها در سرباره کوره‌های مختلف، متفاوت است و به جنس مواد اولیه مصرفی کوره وابسته است. با توجه به مواد اولیه در تولید سیمان پرتلند سرباره‌ای، معمولاً در نزدیکی کارخانه‌های ذوب آهن، یک کارخانه تولید سیمان نیز مشاهده می‌شود. مانند سیمان سپاهان که در نزدیکی ذوب آهن اصفهان واقع شده است [۹].

آزمایش‌های ذان و همکارانش نشان داد که افزودن ۱۰ درصد مواد افزودنی معدنی به عنوان مواد جایگزین با سیمان، به کاهش بلورهای سوزنی شکل، مانند اترینگایت و تولید کلسیم هیدرات سیلیکات فیبری و کلسیم هیدرات آلومینوسیلیکات شده و به کاهش تخلخل و افزایش مقاومت فشاری منجر می‌شود.

آسبریچ و همکارانش [۷] به میزان ۱۰ درصد متاکائولین را جایگزین سیمان پرتلند کردند و به آن فوق روان‌کننده فرمالدهید نفتالن سولفونات اضافه، سپس اثر آن را روی سرعت یون کلرید به داخل ملات بررسی کردند. پی بردند که متاکائولین سرعت نفوذ یون کلرید به داخل شبکه سیمان هیدراته شده را کاهش می‌دهد و مقاومت بتن را در برابر انتقال آن از ناحیه انتقالی به داخل ملات تقویت می‌کند. متاکائولین به عنوان یک ماده پوزولانی، محصولات سیمانی تولید و ساختار متخلخل ناحیه انتقالی را پر می‌کند.

#### ۳-۲ دوده سیلیسی

دوده سیلیسی که به آن ریز سیلیکا یا پودر سیلیسی هم می‌گویند، از ذرات فوق‌العاده ریزی از فرآورده‌های جانبی صنایع آلیاژ فرو سیلیسی تشکیل می‌شود که عمدتاً ذرات آن را سیلیسی بی‌شکل می‌سازد. فولاد سیلیسی از احیای کوارتز توسط ذغال سنگ در دمای  $2000^{\circ}\text{C}$  تولید می‌شود. در این فرایند، احیای کوارتز به طور کامل انجام نمی‌شود و مقداری گاز  $\text{SiO}$  تولید شده که قسمتی از این گاز در اثر واکنش با هوا اکسید و منجر به تولید  $\text{SiO}_2$  می‌شود [۱۴].

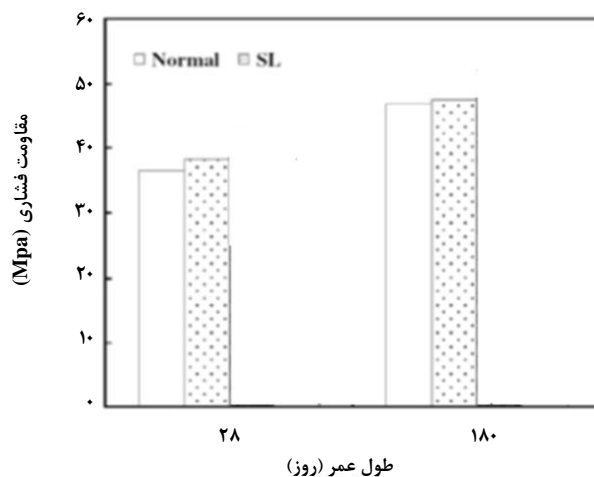
تأثیر دوده سیلیسی بر خواص مکانیکی سیمان، یکی از موضوعات مهم برای پژوهشگران بوده است. کوهن و همکاران [۶] نقش دوده سیلیسی را در ملات ارزیابی کردند. آنان برای این کار مدول کشسانی دینامیکی (E) را برای ملات تولیدی از سیمان پرتلند و سیمان، همراه با دوده سیلیسی مقایسه کردند. مطابق شکل (۴)، نشان داده شده است، وقتی سطح ویژه سنگدانه کم است، مدول کشسانی دینامیکی ملات تولیدی توسط سیمان پرتلند بیشتر است، اما با افزایش سطح ویژه، ملات تولیدی از سیمان همراه با دوده سیلیسی، مدول کشسانی دینامیکی بیشتری خواهد داشت. با توجه به این که افزایش سطح ویژه سنگدانه‌ها به معنای افزایش مساحت ناحیه انتقالی است، آنها از این مشاهدات نتیجه گرفتند که دوده سیلیسی می‌تواند آثار منفی ناشی از ناحیه انتقالی را از بین ببرد.

فیزیکی نیز سبب می‌شود بازده اختلاط به طور چشمگیری افزایش یابد. در واقع، استفاده از خاکستر پوسته برنج به عنوان یک ماده پوزولانی واکنش‌پذیر در سیمان و بتن، چندین مزیت دارد. از آن جمله می‌توان به بهبود خواص مقاومت و دوام، کاهش هزینه‌های مواد با توجه به صرفه‌جویی در مصرف سیمان، مزایای زیست محیطی مربوط به دفع مواد زائد و کاهش انتشار کربن دی‌اکسید و مزایایی دیگر اشاره کرد. واکنش‌پذیری پودرانه خاکستر پوسته برنج به وجود درصد بالای سیلیس بی‌ریخت در آن و سطح ویژه زیاد مربوط می‌شود [۱۰].

بیو و همکاران [۱۰] مشاهده کردند که هرچه درصد بیشتری خاکستر پوسته برنج با سیمان جایگزین شود، مقاومت فشاری بتن تولیدی به میزان بیشتری افزایش می‌یابد؛ البته آنها فقط تا ۲۰ درصد سیمان، خاکستر پوسته برنج جایگزین کردند و مشخص نکردند که آیا افزایش بیشتر خاکستر پوسته برنج به سیمان باز هم سبب افزایش مقاومت فشاری می‌شود یا خیر؟ نتیجه کار بیو و همکاران در جدول (۲) درج شده است.

کائو چانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۱۱] تأثیر اندازه ذرات خاکستر پوسته برنج را بر خواص بتن ارزیابی کردند. آنان برای این کار یک بار به وسیله خاکستر پوسته برنج با اندازه ۸۷ میکرون بتن تولید کردند. بار دیگر، بخشی از خاکستر پوسته برنج را آسیاب کردند تا این که اندازه ذرات آن به ۱۲ میکرون رسید و سپس از آن برای تولید بتن بهره گرفتند. در ادامه، برای مقایسه این دو بتن از تصویربرداری SEM سود جستند. تصاویر SEM بتن‌ها را در شکل (۶) مشاهده می‌کنید. مطابق این شکل، آسیاب کردن خاکستر پوسته برنج تأثیر بسزایی در کاهش تخلخل بتن دارد.

دان و همکاران [۷] تأثیر سرباره را بر خواص بتن، ارزیابی کرده‌اند. آنان برای این کار، به میزان ۱۰ درصد سرباره را با سیمان پرتلند جایگزین کردند و مقاومت فشاری سیمان سرباره‌ای و سیمان پرتلند را اندازه گرفتند. مطابق شکل (۵)، اندازه‌گیری‌ها نشان داد که جایگزین کردن ۱۰ درصد سیمان با سرباره بر مقاومت فشاری بتن تولیدی می‌افزاید.



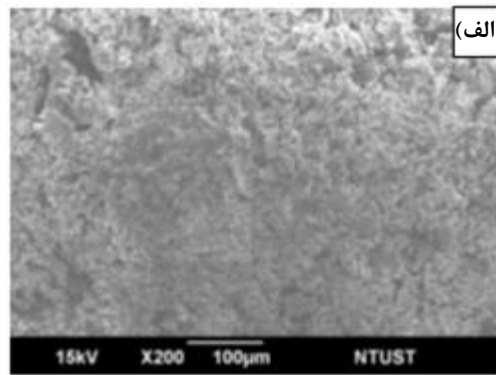
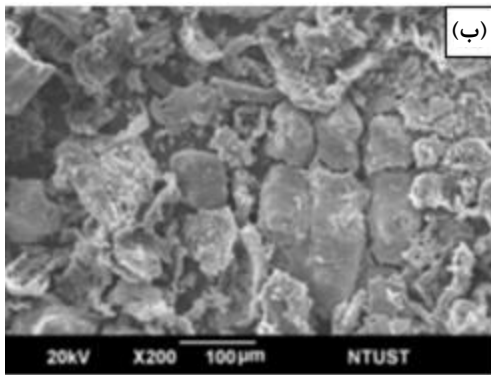
شکل ۵. تأثیر جایگزین کردن سرباره به میزان ۱۰٪ با سیمان پرتلند، بر مقاومت فشاری بتن تولیدی [۷].

## ۲-۵ خاکستر پوسته برنج

خاکستر پوسته برنج (RHA) به عنوان یک ماده پوزولانی بسیار واکنش‌پذیر، برای بهبود ریزساختار ناحیه انتقالی بین خمیر سیمان و سنگدانه در بتن‌های با کارایی بالا به کار رفته است. این ماده از سوزاندن پوسته برنج به دست می‌آید. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از مخلوط خاکستر پوسته برنج و سیمان پرتلند برای تولید بتن، علاوه بر این که از جنبه شیمیایی موثر است از نظر

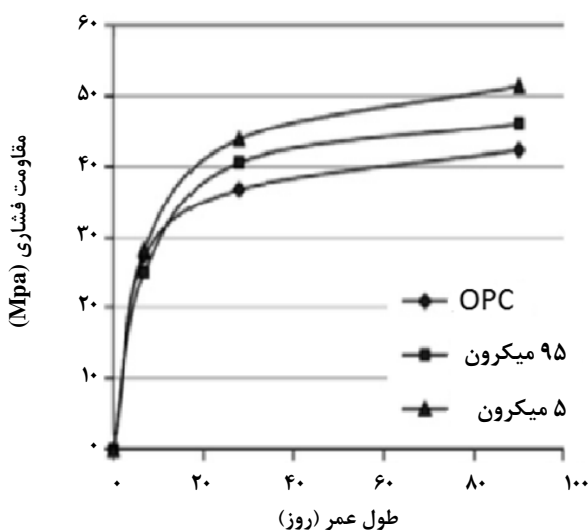
جدول ۲. تغییرات مقاومت فشاری بتن با نسبت‌های مختلف سیمان به خاکستر پوسته برنج [۱۰].

مقاومت فشاری (MPa)					نسبت سیمان و RHA
روز ۹۰	روز ۲۸	روز ۷	روز ۳	روز ۱	
۷۱/۷	۶۳/۵	۵۳/۶	۴۳/۵	۲۲	۱۰-۰
۸۳/۲	۷۲/۸	۶۰/۶	۴۷/۹	۲۲/۷	۹۰-۱۰
۸۴/۹	۷۵/۱	۶۲/۵	۴۹	۲۲/۹	۸۵-۱۵
۸۶/۸	۷۸/۲	۶۴/۳	۵۱/۵	۲۳/۱	۸۰-۲۰



شکل ۶. تصویر میکروسکوپی بتن. (الف)، خاکستر پوسته برنج آسیاب شده. (ب)، خاکستر پوسته برنج آسیاب نشده [۱۱].

فشاری بتن تولیدی و نفوذپذیری آب را در بتن اندازه‌گیری کردند. در شکل (۷) تأثیر اندازه ذرات خاکستر پوسته برنج را در مقاومت فشاری بتن تولیدی مشاهده می‌کنید. مطابق شکل (۷)، اولاً جایگزین کردن خاکستر پوسته برنج با سیمان به میزان ۱۰ درصد سبب افزایش مقاومت فشاری شده است. ثانیاً کاهش اندازه ذرات خاکستر پوسته برنج از ۹۵ میکرون به ۵ میکرون موجب افزایش مقاومت فشاری شده است. این امر به این دلیل است که با کاهش اندازه ذرات، تخلخل بهتر می‌گردد.



شکل ۷. تأثیر خاکستر پوسته برنج و اندازه ذرات آن در مقاومت فشاری بتن در طول عمرهای مختلف [۱۲].

بنابر مندرجات جدول (۴)، با کاهش اندازه ذرات خاکستر پوسته برنج، نفوذپذیری آب در بتن کاهش یافته است که این مشاهده خود

کائوچانگ و همکارانش [۱۱] خواص بتن تولید شده از سیمان پرتلند معمولی را با خواص بتن تولیدی از خاکستر پوسته برنج آسیاب شده نیز مقایسه کردند و با بهره‌گیری از درصدهای مختلف خاکستر پوسته برنج در سیمان، سعی کردند تا درصد بهینه را بیابند. نتیجه آزمایش‌های آنها در جدول (۳) درج شده است.

جدول ۳. تأثیر خاکستر پوسته برنج بر مقاومت فشاری بتن تولیدی از سیمان پرتلند [۱۱].

مقاومت فشاری (MPa)				درصد RHA جایگزین شده با سیمان
روز ۹۱	روز ۲۸	روز ۷	روز ۱	
۶۰	۵۶	۵۰	۳۰	۰
۶۲	۶۱	۴۷	۲۷	۱۰
۶۱	۶۰	۴۷	۲۶	۲۰
۶۰	۵۴	۴۳	۱۹	۳۰

مطابق مندرجات جدول بالا، جایگزینی سیمان با خاکستر پوسته برنج، سبب افزایش مقاومت نهایی بتن می‌شود. به علاوه، این جدول نشان می‌دهد که جایگزینی تا ۲۰ درصد، مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد. اما وقتی به ۳۰ درصد برسد، مقاومت کاهش می‌یابد.

گیوی<sup>۱</sup> و همکاران [۱۲] خاکستر پوسته برنج را در دو اندازه ۵ میکرون و ۹۵ میکرون با سیمان جایگزین کردند. همچنین آنها با جایگزین کردن خاکستر پوسته برنج با سیمان به میزان ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد، توانستند درصد بهینه خاکستر پوسته برنج را نیز بیابند. برای بررسی تأثیر خاکستر پوسته برنج بر خواص بتن، مقاومت

1. Givi

## مراجع

- [۱] آدام نویل و جی. جی. بروکس، ترجمه علی اکبر رضایانیپور و محمدرضا شاه نظری، «تکنولوژی بتن»، انتشارات نگارنده دانش، تهران، چاپ اول، ص ۲، ۴۲، ۴۴، ۸۱ و ۸۴، (۱۳۹۰).
- [2] Bentz, D., Three, A., "dimensional cement hydration and Microstructure program. I. Hydration rate, Heat of hydration and chemical shrinkage", NISTIR 5756, U.S. Department of commerce, (1995).
- [3] Lutz, M., Monteiról, P., Zimmermann, R., "Inhomogeneous interfacial transition zone model for the bulk modulus of mortar", Cement and Concrete Research, 1113-1122, 27, (1997).
- [4] Ziegeldorf, S., Hilsdorf, H., "A reply to the discussion, of the paper, A review of the cement - aggregate bond", Cement and Concrete Research, 277 - 286, 10, (1980).
- [5] Nili, M., Ehsan, A., "Investigating the effect of the cement paste and transition zone on strength development of concrete containing nanosilica and silica fume», Materials and Design, 174-183, 75, (2015).
- [6] Cohen, M., Goldman, A., Chen, W., "The role of silica fume in mortar: transition zone versus bulk paste modification", Cement and Concrete Resarch, 95-98, 24, (1997).
- [7] Duan, P., Shui, Z., Chen, W., Shen, C., "Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete", Construction and Building Materials, 1-6, 44, (2013).
- [۸] مهتاب پیشه‌ور، مطالعه تأثیر ناحیه انتقالی سطح مشترک سنگدانه و خمیر سیمان در خواص کیفی بتن، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، استاد راهنما دکتر علی الهوردی، (۱۳۹۰).
- [9] Schutter, G., Taerwe, L., "General hydration model for Portland cement and blast furnace slag cement", Cement and Concrete Research, 593-604, 25, (1995).
- [10] Bui, D., Hu, J., Stroeven, P., "Particle size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded Portland cement concrete", Cement and Concrete Composites, 357 - 366, 27, (2005).
- [11] Chao-Lung, H., Anh-Tuan, B., Chun-Tsun, C., "Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete", Construction and building materials, 3768 - 3772, 25, (2011).
- [12] Givi, A., Rashid, S., Aziz, F., Salleh, M., "Assessment of the effects of rice husk ash particle size on strength, water permeability and workability of binary blended concrete", Construction and Building Materials, 2145-2150, 24, (2010).
- [13] Vogt, C., "Ultrafine particles in concrete", Doctoral Thesis, school of Architecture and the Built, Sweden, (2010)
- [14] Sata, V., Jaturapitakkomol, C., Kiattikomol, K., "Influence of pozzolan from various by-product material on mechanical properties of high-strength concrete", Construction and Building Materials, 1589-1598, 21, (2007).

مؤید این حقیقت است که با کاهش اندازه ذرات، تخلخل کاهش می‌یابد. در ضمن، در جدول (۴) مشاهده می‌کنید که اگر درصدی از خاکستر پوسته برنج را با سیمان جایگزین کنیم، نفوذپذیری آب در بتن تولیدی کم می‌شود و یا به عبارتی تخلخل کاهش می‌یابد و خواص بتن بهبود پیدا می‌کند.

#### جدول ۴. تأثیر درصد‌های مختلف خاکستر پوسته برنج و اندازه ذرات آن بر نفوذپذیری آب در بتن [۱۲].

ضریب جذب آب (RHA - 95 micron)	ضریب جذب آب (RHA - 5 micron)	RHA %	نوع چسباننده
۱/۳۵	۱/۳۵	۰	OPC
۱/۲۵	۱/۰۳	۵	RHA & PC
۱/۱۳	۰/۸۹	۱۰	RHA & PC
۱/۲۵	۱/۱۲	۱۵	RHA & PC
۱/۳۲	۱/۲۰	۲۰	RHA & PC

#### ۳. نتیجه‌گیری کلی

ناحیه انتقالی بین خمیر سیمان و سنگدانه موجب تضعیف بتن و افت خواص مکانیکی آن می‌شود، از این رو تحقیقاتی برای بهبود آثار منفی ناشی از آن صورت گرفته که به کار بردن مواد معدنی پوزولانی و ریز، فصل مهمی از این تحقیقات را به خود اختصاص داده است. به‌کارگیری مواد پوزولانی در کنار سیمان می‌تواند از دو طریق این ناحیه را محدود کند که عبارتند از:

- استفاده از ذراتی ریزتر از ذرات سیمان، که با پر کردن تخلخل، موجب بهبود خواص ناحیه انتقالی می‌شوند. به طوری که ذرات پرکننده در سطح مشترک خمیر سیمان و سنگدانه قرار می‌گیرند و سبب متراکم‌سازی و کاهش اثر دیواره می‌شوند و اندازه ضخامت ناحیه انتقالی را کاهش می‌دهند.
- سیلیس موجود در مواد معدنی پوزولانی، با کلسیم هیدروکسید موجود در سیمان که غیر چسباننده است، واکنش می‌دهد و با ژل چسباننده کلسیم هیدرات سیلیکات سبب بهبود کیفیت بتن می‌شود. این واکنش در زیر آمده است.

