



کد مقاله: ۱-۱۰۵

## مروری بر استفاده از خاکستر پوسته برنج در بتن و عوامل موثر بر خواص پوزولانی آن

کوروش دخانچی اول<sup>۱</sup>، حسن ساقی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه حکیم سبزواری، [kooroshmail@yahoo.com](mailto:kooroshmail@yahoo.com)

۲- عضو هیأت علمی، دانشگاه حکیم سبزواری

### چکیده

پوسته برنج یک منبع بسیار مناسب برای استحصال سیلیس بی شکل می باشد. از هر ۱۰۰۰ کیلوگرم برنج، حدود ۲۰۰ کیلوگرم پوسته و نهایتاً حدود ۴۰ کیلوگرم خاکستر به دست می آید که معمولاً بین ۸۵٪ تا ۹۵٪ سیلیس دارد. مقدار سیلیکای موجود در خاکستر و مقدار فعالیت پوزولانی آن، به شرایط سوزاندن نظیر دمای نهایی احتراق، مدت زمان احتراق در دمای نهایی، نرخ افزایش دما و روند خنک شدن، نوع کوره، کیفیت و میزان آسیاب نمودن خاکستر خروجی کوره بستگی دارد. در برخی تحقیقات میزان بهینه مصرف خاکستر پوسته برنج ۷٪، ۱۰٪ یا ۱۵٪ عنوان گردیده که این تفاوت‌ها وابستگی بسیاری به نحوه سوزاندن پوسته برنج، خنک کردن و آسیاب آن دارد و تاثیر مستقیمی در خاصیت پوزولانی خاکستر می گذارد. در یک حالت جامع شاید بهتر باشد برای درصد بهینه مصرف خاکستر پوسته برنج محدوده ۱۰ تا ۱۵ درصد را بیان نمود. لذا ضروری است تحقیقاتی در مورد دسته بندی خاکستر پوسته برنج تولیدی و درصد بهینه مصرف آن انجام گیرد. هدف از این تحقیق بررسی دلایل تفاوت در میزان بهینه مصرف خاکستر پوسته برنج مشخص شده در تحقیقات گذشته می باشد.

**کلمات کلیدی:** خاکستر پوسته برنج، پوزولان، بتن، دمای نهایی احتراق

### ۱- مقدمه

میزان تولید سالانه برنج پوسته دار در سطح دنیا به ۶۸۰ میلیون تن میرسد که تقریباً ۱۴۵ میلیون تن از این مقدار را پوسته برنج تشکیل میدهد. حجم پوسته برنج تولید شده در ایران بالغ بر نیم میلیون تن در سال است. تولید نسبتاً بالای سالانه برنج در کشور، سبب جمع آوری مقدار زیادی پوسته برنج می گردد. این واقعیت سبب شد تا تحقیقاتی بر روی پوسته برنج جهت استخراج سیلیکا انجام شود. پوسته برنج محصول جانبی عمده صنعت عمل آوری برنج است که میتواند ماده خام در دسترس و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه برای تولید سیلیکاتها و سیلیکا باشد و به عنوان منبع جایگزین ارزان قیمت سیلیکای فعال برای تولید مواد با بنیان سیلیکون برای مصرف تکنولوژیکی و صنعتی به کار رود [۱]. سیلیکا ( $SiO_2$ ) یک ماده خام اولیه است که با توجه به قطر کوچک ذرات آن دارای کاربردهای زیادی در فناوریهای مختلف همچون کاربرد در صنایع الکترونیک، سرامیک، مواد پلیمری، تصفیه روغن نباتی، محصولات دارویی، مواد شوینده، چسب، پر کردن ستون دستگاه های کروماتوگرافی و غیره است [۲ و ۳]. سیلیکات سدیم، که ماده اولیه تولید سیلیکا است معمولاً از ذوب کوارتز با کربنات سدیم در دمای  $1300^{\circ}C$  بدست می آید که یک فرآیند زمان بر و پرهزینه میباشد [۳]. در سال های اخیر تلاشهای زیادی جهت استفاده از خاکستر بدون کربن (خاکستر سفید) برخی از پسماندهای گیاهی همچون پوسته برنج جهت استخراج سیلیکا شده است. پوسته برنج منبع بسیار عالی،

با درجه بالای سیلیس بی شکل می باشد. اهمیت بی شکل بودن سیلیکای به دست آمده در این است که سیلیکای بی شکل، فعال است. سیلیکای فعال، سیلیکای واکنش پذیر است که در واکنشها شرکت میکند در حالیکه سیلیکا در شکل بلورین، غیرفعال بوده و در واکنشها شرکت نمی کند. سوزاندن پوسته برنج منجر به تشکیل خاکستر پوسته برنج با محتوای  $\text{SiO}_2$  می گردد که از ۸۵% تا ۹۸% متغیر است [۵ و ۴]. هدف از سوزاندن پوسته، افزایش مقدار نسبی اکسید سیلیکون به وسیله کاهش مواد کربنی موجود در نمونه و همچنین سوختن دیگر ترکیبات نامطلوب موجود در نمونه است [۹-۶]. پیشینه استفاده از خاکستر پوسته برنج در بتن به سال ۱۹۲۴ میلادی توسط بیگل در آلمان بر می گردد. پس از آن مک دانیل<sup>۱</sup> در سال ۱۹۴۶ و هوگ<sup>۲</sup> در سال ۱۹۵۵ و بار<sup>۳</sup> در سال ۱۹۵۶ در آمریکا در زمینه کاربرد این مواد علی الخصوص عملکرد بلوکهای ساخته شده با ترکیب سیمان و خاکستر پوسته برنج تحقیقات بیشتری انجام دادند؛ که نتایج آزمایشات انجام شده حاکی از افزایش تاب فشاری نمونه نسبت به حالت بدون استفاده از خاکستر پوسته برنج بود [۱۰]. در سال ۱۹۷۲ مهتا<sup>۴</sup> در آمریکا اولین مقالات خود در مورد استفاده از پوسته برنج را انتشار داد [۱۱]. مهتا مطالعه دقیقی در پارامترهای موثر بر احتراق پوسته برنج و کیفیت خاکستر تولید شده انجام داد. همچنین ژانگ<sup>۵</sup> و ماهوترا<sup>۶</sup> تحقیقات جامعی بر روی پوزولان خاکستر پوسته برنج انجام دادند و خصوصیات مکانیکی نمونه های حاوی خاکستر پوسته برنج را به میزان قابل توجهی بهبود بخشیدند [۱۲]. سنسیل<sup>۷</sup> نیز در تحقیقاتی که بر روی خاکستر پوسته برنج آمریکا و اروگوئه انجام داده بود، نشان داد که در مواردی که خاکستر پوسته برنج با کیفیت مناسب تهیه شده است، نمونه های بتنی از روزهای نخستین با افزایش مقاومت روبرو شده اند [۱۳]. نیر<sup>۸</sup> و همکارانش نیز در تحقیقی دیگر که بر روی خاکستر پوسته برنج تولید شده از کوره های موجود در کشور هند انجام دادند نشان دادند که این خصوصیات مکانیکی نمونه های بتنی حاوی پوزولان می تواند بسته به نحوه تولید خاکستر پوسته برنج کاملاً تغییر کند [۱۴]. سانگ<sup>۹</sup> و ساراسواتی<sup>۱۰</sup> نیز در آزمایش های خود نشان دادند که تخلخل مؤثر در نمونه های بتنی حاوی مقدار بهینه خاکستر پوسته برنج می تواند کاهش یابد [۱۵]. در تحقیق انجام گرفته توسط ژانگ و ماهوترا نشان داده شد که افزودن خاکستر پوسته برنج می تواند تا نزدیک چهار برابر از نفوذ یون کلراید به داخل نمونه های بتنی در آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید جلوگیری نماید [۱۲]. یافته های چندپراسیت<sup>۱۱</sup> و همکاران نیز علاوه بر تأیید نظر فوق نشان می دهد که عمق نفوذ یون کلراید نیز در این نمونه ها کاهش قابل توجهی داشته است [۱۶ و ۱۷]. ساراسواتی و سانگ نیز در آزمایش های خود نشان دادند که افزودن خاکستر پوسته برنج به نمونه های بتن مسلح، خوردگی آرماتورها را به طرز چشمگیری کاهش داده است. در آزمایش فوق، فرآیند خوردگی نمونه های بتنی توسط جریان الکتریسیته تسریع شده بود و زمان آغاز ترک خوردگی کنترل شده است [۱۵]. کوتینهو<sup>۱۲</sup> نیز در آزمایش های خود نشان داد که افزودن خاکستر پوسته برنج به نمونه های بتنی باعث کاهش جذب آب مویینه گردیده است [۱۸]. مهتا پی به این نکته برد که احتراق پوسته برنج در شرایط کنترل شده منجر به تولید خاکستر سیلیسی سفید رنگ با درصد خلوص زیاد و واکنش پذیری بسیار زیاد با آهک خواهد شد [۱۹]. این خاکستر از خواص پوزولانی بسیار مناسبی برخوردار بوده و دارای قابلیت بکارگیری بعنوان جایگزینی برای سیمان است. از هر ۱۰۰۰ کیلوگرم برنج تقریباً ۲۰۰ کیلوگرم پوسته برنج تولید شده که از سوزاندن آن حدود ۴۰ کیلوگرم خاکستر به دست می

- 1- Mac Daniell
- 2- Hough
- 3- Barr
- ۴- Mehta
- 5- Zhang
- 6- Malhotra
- 7- Sensale
- 8- Nair
- 9- Song
- 10- Saraswathy
- 11- Chindaprasirt
- 12- Coutinho

آید که معمولاً بین ۸۵ تا ۹۵ درصد سیلیس دارد که در مقایسه سایر ضایعات کشاورزی بسیار زیاد است. مقدار سیلیکای موجود در خاکستر و مقدار فعالیت پوزولانی آن، بسته به شرایط سوزاندن نظیر دمای نهایی احتراق، مدت زمان احتراق در دمای نهایی، نرخ افزایش دما و روند خنک شدن، نوع کوره، کیفیت و میزان آسیاب نمودن خاکستر خروجی کوره، انواع برنج، محتوای رطوبتی پوسته برنج، اقلیم و منطقه جغرافیایی متغیر است [۲۰].

هدف از این تحقیق بررسی دلایل تفاوت در میزان بهینه مصرف خاکستر پوسته برنج مشخص شده در تحقیقات گذشته می باشد.

## ۲- روش بهینه استخراج سیلیکای فعال از پوسته برنج

پوسته برنج طارم محلی به منظور جدا شدن ذرات شن و گرد و غبار غربال شده و سپس با آب مقطر شستشو داده شد. پوسته های خشک شده به مدت ۶ ساعت در دمای  $700^{\circ}\text{C}$  قرار گرفتند. خاکستر به دست آمده با هیدروکسید سدیم (Merck) دو مولار مخلوط شده و به مدت ۱۲ ساعت تقطیر برگشتی گردید. بعد از ۱۲ ساعت، محلول به دست آمده با اسید هیدروکلریدریک غلیظ رسوب داده شد. سپس مخلوط به دست آمده کاملاً با آب مقطر شستشو گردید و با کاغذ صافی واتمن فیلتر شد. ماده حاصله در دمای  $120^{\circ}\text{C}$  در طول شب خشک گردید در مطالعه ای که توسط چاکورتی<sup>۱</sup> و همکاران [۲۱] انجام شده است نشان داده شده است که آماده سازی پوسته برنج با اسید کلردریک 1 نرمال در حذف فلزات ناخالص بسیار موثر است. آنها نشان دادند که پیش تصفیه پوسته برنج قبل از احتراق بر خصوصیات سیلیس بی شکل نیز اثر منفی نمی گذارد. ابتدا پوسته برنج از طریق کلسینه کردن به خاکستر تبدیل شد و سپس سیلیکا به وسیله محلول قلیایی مناسب از خاکستر پوسته برنج استخراج گردید. شستشو موجب کاهش ناخالصیهای معدنی مانند CaO از پوسته برنج میگردد. شستشوی پودر به دست آمده با آب مقطر برای خروج کلر اضافی، عامل کلیدی برای افزایش خلوص سیلیکای استخراج شده میباشد. نتایج حاصل از آنالیز XRF و XRD سیلیکای استخراج شده نشان دهنده خلوص و درصد بالای سیلیکای استخراج شده و فعال بودن آن است [۳]. مزیت این روش تولید سیلیکا در این است که مصرف انرژی کمتر شده، دمای استخراج به شدت کاهش یافته است و ماده اولیه استخراج سیلیکا به وفور در دسترس میباشد. دلا<sup>۲</sup> و همکاران [۷] گزارش نمودند که سیلیکای فعال با مساحت سطحی زیاد میتواند از خاکستر پوسته برنج بعد از تیمار حرارتی در دمای  $700^{\circ}\text{C}$  به مدت ۶ ساعت تولید شود.

برای تهیه خاکستر از پوسته برنج دو روش مختلف به کار رفت. در روش اول پوسته برنج به منظور جدا شدن ذرات شن و گرد و غبار، غربال شده و سپس با آب مقطر شستشو داده شد و در هوای آزاد خشک گردید. پوسته های خشک شده به مدت ۶ ساعت در دمای  $700^{\circ}\text{C}$  با شیب افزایش دمایی  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  قرار گرفتند [۷]. در روش دوم پوسته برنج به منظور جدا شدن ذرات شن و گرد و غبار، غربال شده و سپس با آب مقطر شستشو داده شد. در مرحله بعد پوسته ها به مدت ۴ ساعت در محلول هیدروکلریدریک اسید (Merck, %37) یک مولار شستشو شدند که باعث خروج یون های معدنی محلول در محیط آبی از پوسته برنج می شود. بعد از گذشت مدت زمان معین، پوسته ها مجدداً شستشو داده شده و در هوای آزاد خشک گردیدند. پوسته های خشک شده به مدت ۶ ساعت در دمای  $700^{\circ}\text{C}$  با نرخ دمایی مشابه بالا قرار گرفتند تا خاکستر پوسته برنج به دست می آید [۷].

1- Chakraverty

2- Della

یکی از مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد پوزولانی خاکستر پوسته برنج مدت زمان آسیاب نمودن خاکستر است. نتایج آزمایش مؤید آن است که با افزایش مدت زمان آسیاب نمودن، علی رغم ریزتر شدن ذرات خاکستر، بدلیل فرو ریزش ساختار متخلخل اسکلت سیلیسی خاکستر پوسته، جذب آب سطحی خاکستر را کاهش یافته و نیاز آبی مخلوطهای سیمانی آمیخته با آن خاکسترها به طرز بارزی کاهش می‌یابد [۲۲]. این فرآیند با افزایش روانی مخلوطهای سیمان پرتلند آمیخته با این خاکسترها و بهبود عملکرد پوزولانی خاکستر همراه است. مدت زمان بهینه آسیاب نمودن خاکستر حدود ۴ ساعت می‌باشد که با افزایش مدت زمان آسیاب نمودن تا ۴ ساعت منجر به بهبود عملکرد مقاومتی خاکستر شده و افزایش مدت زمان آسیاب نمودن بیش از این حد علاوه بر افزایش هزینه تولید تأثیر منفی در عملکرد پوزولانی این افزودنی پوزولانی خواهد داشت و منجر به کاهش واکنش پذیری خاکستر و کاهش مقاومت بتن ساخته شده با آن می‌شود. سنجش تغییرات هدایت الکتریکی محلول اشباع آهک-پوزولان روشی بسیار سریع و دقیق جهت ارزیابی فعالیت پوزولانی و واکنش پذیری خاکستر پوسته برنج با آهک می‌باشد که می‌تواند به عنوان جایگزینی برای روش‌های معمول سنجش عملکرد پوزولانی مطرح شود. توجه به این نکته حائز اهمیت است که مدت زمان بهینه آسیاب نمودن بسته به نوع دستگاه آسیاب و انرژی آسیاب متغیر خواهد بود. در این خصوص مهتا چنین استدلال نموده است که از آنجایی که واکنش پذیری خاکستر پوسته برنج از سطوح داخلی آن نشأت می‌گیرد لذا از آسیاب نمودن بیش از حد خاکستر باید اجتناب نمود [۲۳].

جدول ۱ - طرح اختلاط نمونه شاهد و نمونه های ساخته شده با خاکستر پوسته برنج

سنگدانه (Kg/m3)	فوق روان ساز (L/m3)	آب (Kg/m3)	پوزولان (Kg/m3)	سیمان (Kg/m3)	طرح اختلاط
۱۳۰۰	-	۲۹۵	-	۵۹۱	طرح کنترل
۱۳۰۰	به میزان لازم جهت حفظ روانی ثابت نمونه ها	۲۹۵	۲۹/۵۵	۵۶۱/۴۵	طرح جایگزین ۱ خاکستر پوسته برنج به جای ۵٪ سیمان
۱۳۰۰	به میزان لازم جهت حفظ روانی ثابت نمونه ها	۲۹۵	۵۹/۱	۵۳۱/۹	طرح جایگزین ۲ خاکستر پوسته برنج به جای ۱۰٪ سیمان
۱۳۰۰	به میزان لازم جهت حفظ روانی ثابت نمونه ها	۲۹۵	۸۸/۶۵	۵۰۲/۳۵	طرح جایگزین ۳ خاکستر پوسته برنج به جای ۱۵٪ سیمان

در جدول زیر میزان فوق روان کننده مورد نیاز و مقاومت فشاری هر طرح اختلاط با توجه به مدت زمان آسیاب کردن خاکستر پوسته برنج مشخص گردیده است.

جدول ۲ - نتایج فوق روانساز مورد نیاز، دانسیته و مقاومت فشاری طرحهای مخلوط

نام طرح	فوق روان ساز (L/m <sup>3</sup> )	دانسیته (gr/cm <sup>3</sup> )	مقاومت فشاری (MPa)
Control	0/00	2/25	39/43
T1 - 20min	1/612	2/19	44/48
T2 - 20min	3/223	2/18	45/71
T3 - 20min	4/277	2/16	50/19
T1 - 1h	1/426	2/19	49/37
T2 - 1h	2/789	2/17	51/53
T3 - 1h	3/967	2/17	59/14
T1 - 2h	1/364	2/19	48/41
T2 - 2h	2/851	2/18	55/43
T3 - 2h	3/223	2/17	58/71
T1 - 4h	1/364	2/20	50/64
T2 - 4h	2/541	2/18	56/22
T3 - 4h	3/285	2/17	61/32
T1 - 8h	1/364	2/19	40/51
T2 - 8h	2/541	2/18	47/35
T3 - 8h	3/409	2/16	52/41
T1 - 16h	1/364	2/19	40/01
T2 - 16h	2/603	2/17	49/89
T3 - 16h	3/285	2/15	54/81

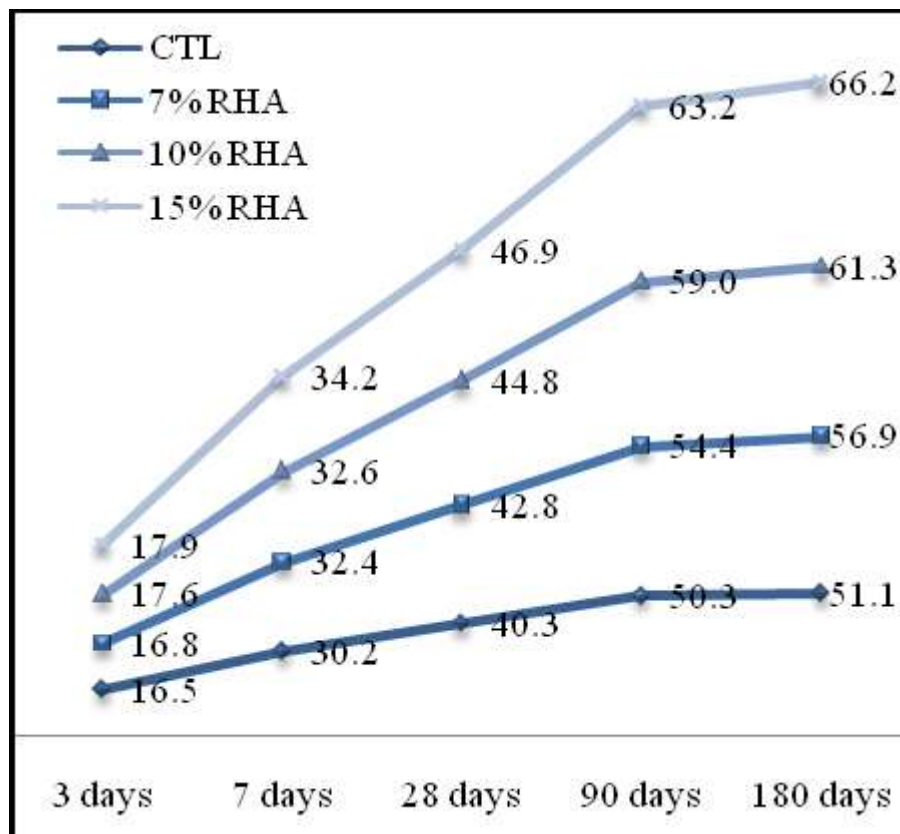
مشاهده میگردد مدت زمان بهینه آسیاب نمون خاکستر حدود ۴ ساعت بدست آمد که البته این مقدار بسته به نوع دستگاه آسیاب و انرژی آسیاب متغیر خواهد بود. همچنین مقدار بهینه مصرف خاکستر پوسته برنج با توجه به نتیجه آزمایش ها  $RHA=15\%$  می باشد.

### ۳- نتایج و تفسیرها آزمایش ها [24]

در این قسمت نتایج مربوط به آزمایشات مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته، نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT)، نفوذ آب و بررسی خوردگی آرماتور به طور جداگانه مورد بررسی قرار می گیرند.

#### ۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

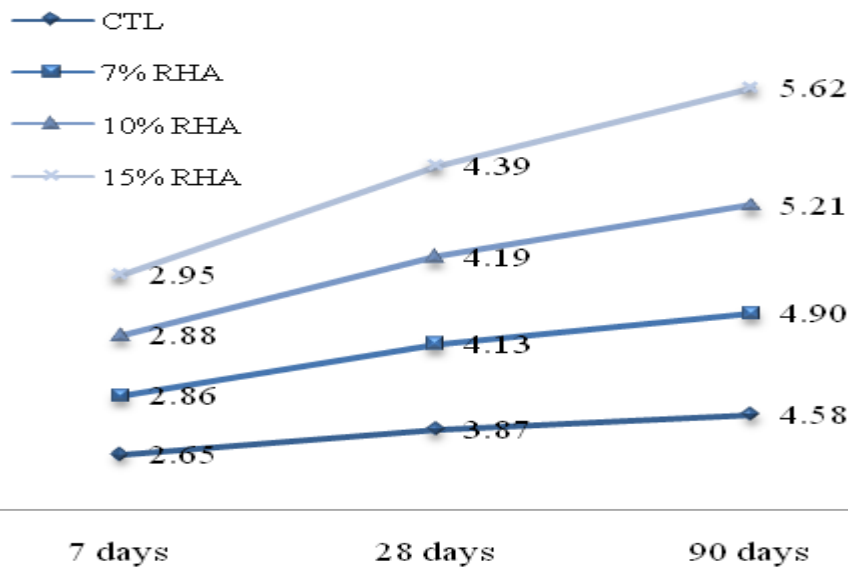
نتایج آزمایشهای مقاومت فشاری در شکل ۱ نشان داده شده اند. نتایج نشان دهنده فعالیت مناسب پوزولانی در بتن حاوی خاکستر پوسته برنج با گذشت زمان و افزایش سن می باشد، بطوریکه نسبت مقاومت فشاری بتن حاوی 15 درصد خاکستر پوسته برنج به نمونه شاهد در سن 3 روزه 107% و در سن 28 روزه 129% می باشد.



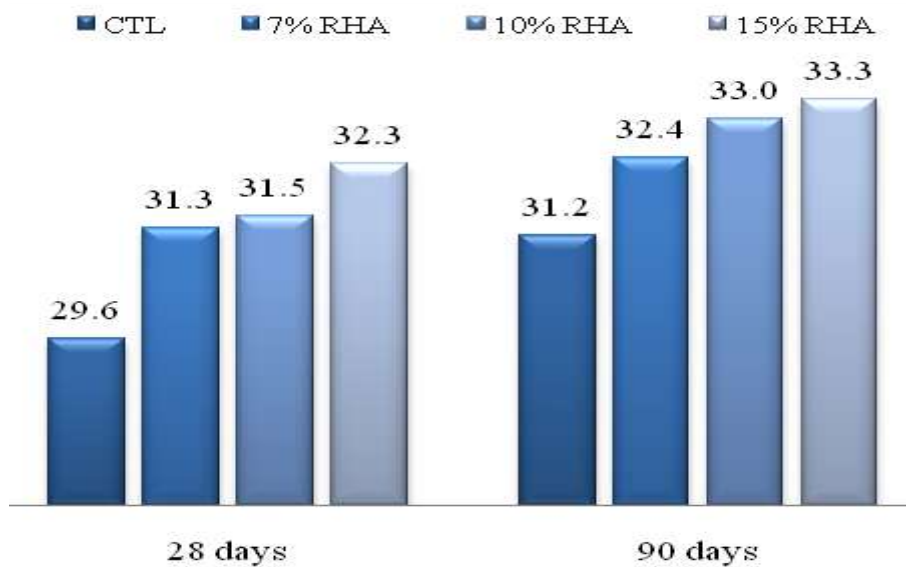
شکل ۱ - نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمون های مکعبی (MPa)

### ۲-۳ - آزمایش مقاومت کششی و مدول الاستیسیته

نتایج مقاومت کششی و آزمایش مدول الاستیسیته در اشکال ۲ و ۳ آورده شده است. نتایج نشان دهنده افزایش مقاومت کششی بتن با افزایش سن و افزایش درصد خاکستر پوسته برنج و افزایش فعالیت پوزولانی در بتن حاوی خاکستر پوسته برنج با گذشت زمان می باشد. نسبت مقاومت کششی بتن حاوی ۱۵ درصد خاکستر پوسته برنج نسبت به نمونه شاهد در سن ۷ روزه ۱۱۱٪ می باشد که در سن ۹۰ روزه این نسبت به ۱۲۲٪ افزایش می یابد. همچنین این افزایش مقادیر برای آزمایشهای مدول الاستیسیته در نمونه های حاوی ۱۵ درصد خاکستر پوسته برنج در سن ۲۸ روزه ۱۰۹٪ و در سن ۹۰ روزه این نسبت ۱۰۶٪ گزارش شده است که نشان دهنده فعالیت مناسب خاکستر پوسته برنج تولید شده است.



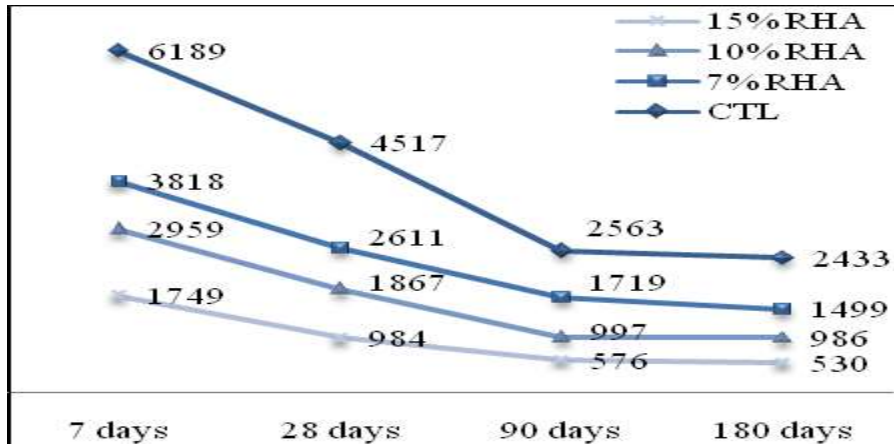
شکل ۲ - نتایج آزمایش مقاومت کششی بر حسب MPa



شکل ۳ - نتایج آزمایش مدول الاستیسیته بر حسب GPa

### ۳-۳ - آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT)

مهمترین عامل زنگ زدگی و خوردگی در بتن وجود یون کلراید می‌باشد. یون های کلراید ممکن است از مصالح آلوده و یا در اثر نفوذ از منابع خارجی مانند آب دریا وارد بتن گردد. میزان کلراید آزاد در محیط بتن تابع ساختار فیزیکی و به خصوص شیمیایی محیط بتن است. در شکل ۴ مقادیر کل بار الکتریکی عبوری اندازه گیری شده برای طرح اختلاط های مختلف پس از برقراری جریان الکتریکی را نشان داده شده است. نمونه های ساخته شده با پوزولان خاکستر پوسته برنج، نسبت به نمونه های شاهد از نفوذپذیری کمتری برخوردار بوده اند.



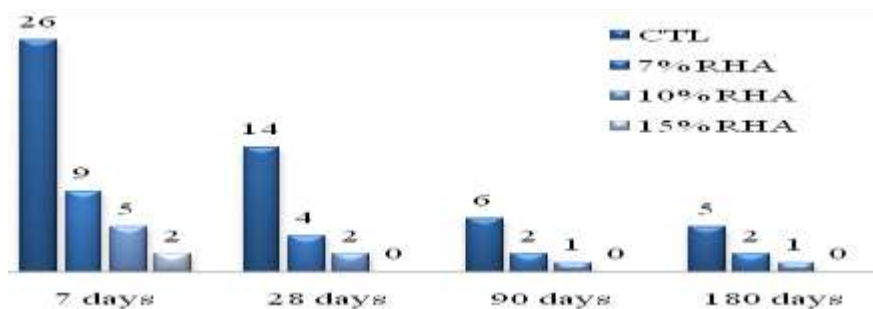
شکل ۴ - نتایج آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید (کولمب)

جدول ۳ - طبقه بندی نفوذپذیری در مقابل یون کلراید (ASTM C1202) [25]

شار الکتریکی عبوری (کولمب)	نفوذپذیری بتن در مقابل یون کلراید
> 4000	زیاد
2000 ~ 4000	متوسط
1000 ~ 2000	کم
100 ~ 1000	خیلی کم
< 100	قابل چشم پوشی

### ۴-۳ - آزمایش نفوذ آب

شکل ۵ نتایج آزمایش نفوذ آب نمونه های مکعبی را بر حسب میلیمتر نشان میدهد. همانگونه که انتظار میرود، نمونه های ساخته شده با پوزولان خاکستر پوسته برنج، از نفوذپذیری کمتری نسبت به نمونه های شاهد برخوردار بوده اند و با افزودن مقادیر کم پوزولان، به شدت کاهش می یابد.



شکل ۵ - نتایج آزمایش نفوذ آب بر حسب mm



نهدی<sup>۱</sup> و همکارانش [۲۶] تحقیقات گسترده ای بر روی بتن حاوی خاکستر پسته شلتوک انجام داده اند. تحقیقات آنان گزارش نمود که با افزایش میزان خاکستر پسته شلتوک برنج در بتن نفوذپذیری بتن در مقابل یون کلر از سطح متوسط برای بتن معمولی به سطح کم و یا خیلی کم بسته به نوع و میزان خاکستر پسته شلتوک برنج می‌رسد.

### ۳-۵ - آزمایش بررسی خوردگی آرماتور (آزمایشهای مقاومت الکتریکی اهمی، نیمپیل و گالوپالس)

با توجه به اعداد جدول ۵ و ۴، مشاهده می‌شود که مقاومت الکتریکی کلیه نمونه‌ها با گذشت زمان و بالا رفتن سن نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند. هرچند که نتایج کلاً از نظر مقاومت الکتریکی مطلوب و عموماً از همان سنین اولیه در محدوده با قابلیت خوردگی آرماتور نسبتاً کم قلمداد می‌شوند. نمونه‌های پوزولانی خاکستر پسته برنج کاملاً در کاهش خوردگی آرماتور مؤثر واقع شده‌اند. به طوری که مقدار پتانسیل الکتریکی در نمونه‌های بتنی حاوی ۱۵ درصد خاکستر پسته برنج نسبت به بتن شاهد در سن ۲۸ روزه ۷۵٪ می‌باشد که در سن ۱۸۰ روزه این نسبت تا مقدار ۶۸٪ کاهش می‌یابد. نسبت کاهش شدت جریان الکتریکی در سن ۲۸ روزه ۵۲٪ و در سن ۱۸۰ روزه ۵۰٪ ذکر شده است.

جدول ۴ - مقادیر مقاومت الکتریکی برای نمونه‌های بتنی

پارامتر	سن نمونه	CTL	7% RHA	10% RHA	15% RHA
مقاومت الکتریکی (KΩ.cm)	۲۸۰ روزه	3/4	3/7	4/4	4/9
مقاومت الکتریکی (KΩ.cm)	۱۸۰ روزه	12/6	13/3	15/1	16/9
جریان شدت الکتریکی (μA/cm <sup>2</sup> )	۲۸۰ روزه	2/1	1/4	1/1	1/1
جریان شدت الکتریکی (μA/cm <sup>2</sup> )	۱۸۰ روزه	1/5	1/1	1/0	0/9
پتانسیل الکتریکی (mV)	۲۸۰ روزه	-835	-720	-691	-630
پتانسیل الکتریکی (mV)	۱۸۰ روزه	-512	-481	-413	-346

جدول ۵ - دسته بندی نمونه‌های سیمانی از نظر مقاومت الکتریکی [27]

نوع بتن از نظر دوام در برابر خوردگی	مقاومت ویژه الکتریکی بتن اشباع (KΩ.cm)
عالی	بیشتر از ۲۰
خوب	۱۰-۲۰
متوسط	۵-۱۰
ضعیف	کمتر از ۵

جدول ۶ - طبقه بندی احتمال خوردگی در آزمایش نیم پیل (ASTM C876) [28]

احتمال خوردگی	محدوده پتانسیل (mV)
به احتمال 50 درصد خوردگی وجود ندارد	> -۷۵
فعالیت خوردگی قطعی نمی‌باشد ولی احتمال آن کاملاً وجود دارد.	-۷۵ << -۲۲۵
به احتمال 50 درصد خوردگی وجود دارد	< -۲۲۵

واکنش قلیایی مصالح سنگی در بتن به دلیل محیط قلیایی درون بتن و اثر آن بر سنگ دانه ها اتفاق می افتد. این واکنش شیمیایی بین برخی فازهای کانی که در حالت عادی پایدارند و قلیایی های سیمان ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) رخ داده، عمدتاً به شکل ترکهایی در سطح بتن و یا گاهی اوقات همراه با و بیرون آمدن ژل منبسط شونده ای در سطح ترک باعث ایجاد خسارت می شود. در سال های اخیر برخی تلاش ها جهت استفاده از خاکستر پوسته ی برنج (**Rice Husk Ash**) جهت کنترل واکنش قلیایی طبیعی انجام شده است [۲۹-۳۱]. نیکول هاسپاریک<sup>۱</sup> به اتفاق همکارانش، اثرات خاکستر پوسته ی برنج و میکروسلیس را در کنترل واکنش قلیایی سیلیسی بررسی کردند. آن ها در مطالعات خود به این نتیجه دست یافتند که رفتار **SF** و **RHA** در کنترل پدیده ی واکنش قلیایی سنگدانه ها در بتن بسیار به هم نزدیک و مناسب بوده و انبساط نمونه های با ۱۲٪ جایگزینی **RHA** و **SF** کمتر از حد مجاز تعیین شده در استاندارد **ASTM C 1260** یعنی ۰٫۱۰٪ بعد از ۱۶ روز بوده است [32].

استفاده از خاکستر پوسته ی برنج جهت کنترل واکنش قلیایی سنگدانه دارای یک میزان بهینه است. این مقدار بهینه جایگزینی، در حدود ۷٪ می باشد و با افزایش میزان جایگزینی بیش از ۷٪ خاکستر پوسته ی برنج انبساط ها افزایش می یابد. می توان چنین گفت که جایگزینی ۷٪ خاکستر پوسته ی برنج، با هیدروکسید کلسیم موجود واکنش داده و لذا، در نتیجه ی کاهش میزان قلیابیت نسبت به میزان واکنش در نمونه های بدون **RHA**، ژل تولید شده کمتر و در نتیجه انبساط کاهش خواهد یافت. با افزایش میزان جایگزینی **RHA**، خاکستر پوسته ی برنج مازاد ۷٪، دیگر وارد واکنش نشده و با افزایش قلیابیت سیستم، باعث افزایش انبساط می شود. پس از تهیه ی خاکستر پوسته ی برنج، برای شناسایی و مشخص کردن میزان عناصر موجود در نمونه های به دست آمده آزمایش اشعه X بر روی آن انجام شد. نتایج حاصل از آزمایش تجزیه ی فلورسانس اشعه X (**XRF**) این نمونه ها به همراه نمونه سیمان مصرف شده در جدول ۷ آورده شده است. عناصر شیمیایی خاکستر پوسته برنج نشان می دهند که این مواد چنان که انتظار داریم، عمدتاً از سیلیس ( $\text{SiO}_2$ ) تشکیل شده اند. همچنین نتایج حاکی از آن هستند که خاکسترهای تولید شده در دمای پایین و یا خاکسترهایی که در مدت زمان ۳۰ دقیقه آماده شده اند، به دلیل وجود کربن اضافی مناسب نمونه های بتنی نمی باشند. با توجه به جدول 3، خاکستر تولید شده در دمای  $650^\circ\text{C}$  و زمان های ۶۰ و ۹۰ دقیقه در شرایط بهتری نسبت به سایر موارد وجود دارد. سیلیس موجود در خاکستر، ابتدا به شکل آمورف و غیربلوری است لیکن در دمای بالاتر از  $650^\circ\text{C}$  به حالت بلوری در خواهد آمد. در دمای  $650^\circ\text{C}$  هر دو زمان ۶۰ دقیقه و ۹۰ دقیقه سیلیس موجود در خاکستر پوسته برنج به صورت آمورف می باشد. لیکن از تولید اقتصادی زمان ۶۰ دقیقه که توجیه منطقی پیدا میکند انتخاب شده است. در نتیجه خاکستر پوسته ی برنج تولیدی در دمای  $650^\circ\text{C}$  و مدت زمان ۶۰ دقیقه به صورت بهینه خواهد بود.

جدول ۷ - نتایج آزمایش **XRF** بر روی خاکستر پوسته ی برنج تولید شده و سیمان مورد استفاده

دما	زمان	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	SO3	MgO	Na2O	K2O	P2O5	TiO2	LoI
550	60min	75.22	0.05	0.14	0.57	0.37	0.36	0.07	1.47	0.51	0.01	21.01
550	90min	80.76	0.03	0.09	0.66	0.23	0.43	0.05	1.72	0.79	0.01	14.95
600	60min	80.55	0.02	0.24	0.59	0.34	0.39	0.06	1.65	0.44	0.02	15.33
600	90min	85.60	0.06	0.15	0.87	0.22	0.41	0.06	1.53	0.48	0.02	9.81
650	30min	76.21	0.08	0.22	0.86	0.21	0.31	0.08	1.69	0.52	0.01	19.53
650	60min	89.61	0.04	0.22	0.91	0.15	0.42	0.07	1.58	0.41	0.02	5.91
650	90min	90.21	0.06	0.27	0.85	0.25	0.49	0.08	1.51	0.56	0.02	5.48
700	30min	81.35	0.09	0.15	0.77	0.18	0.33	0.08	1.72	0.53	0.02	14.53
700	60min	89.93	0.06	0.11	0.88	0.14	0.39	0.09	1.48	0.55	0.02	6.01
700	90min	92.19	0.09	0.10	0.71	0.09	0.41	0.05	1.64	0.41	0.01	4.14
750	30min	84.22	0.09	0.18	0.54	0.17	0.38	0.06	1.35	0.61	0.02	12.09
750	60min	93.11	0.08	0.27	0.67	0.11	0.44	0.06	1.69	0.63	0.02	2.67
1100	A few	95.31	0.04	0.11	0.78	0.11	0.41	0.09	1.61	0.45	0.01	0.84
سیمان نوع ۱		21.50	3.68	2.76	61.5	2.5	4.8	0.12	0.95	0.23	0.04	1.35

جدول ۸ - الزامات شیمیایی استاندارد پوزولان ها 3433 / ASTM C 618 / ISIRI

الزامات استاندارد	نتایج آزمایش بر روی RHA	ویژگی های شیمیایی (الزامی)
حداقل ۷۰٪	۸۹٫۹	SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
حداکثر ۴٪	۰٫۱۵	SO <sub>3</sub>
حداکثر ۳٪	۰٫۲۳	رطوبت
حداکثر ۶٪	۵٫۹	کسر وزن در اثر سرخ شدن

جدول ۹ - الزامات فیزیکی استاندارد پوزولان ها 3433 / ASTM C 618 / ISIRI

الزامات استاندارد	نتایج آزمایش بر روی RHA	ویژگی های فیزیکی
حداکثر ۳۴٪	۸	میزان باقیمانده روی الک ۴۵ میکرون به روش تر
		شاخص فعالیت بر اساس مقاومت
-	۱۰۲	مقاومت ۳ روزه نسبت به شاهد
حداقل ۷۵٪	۱۰۶	مقاومت ۷ روزه نسبت به شاهد
حداقل ۷۵٪	۱۱۰	مقاومت ۲۸ روزه نسبت به شاهد

جدول ۱۰ - تاثیر زمان نگهداری در دمای پخت روی میزان فعالیت

میزان فعالیت پوزولانی (درصد)			نوع نمونه
۴ ساعت	۳/۵ ساعت	۳ ساعت	
۴۱	۲۴	۱۱	ماده چسباننده پخته شده در کوره با دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد

اندرس<sup>۱</sup> و همکارانش [33] مقاومت فشاری برای  $RHA=10\%$  بیشترین مقدار را نسبت به سایر درصدهای جایگزینی نتیجه داده است. هر چند در بعضی پژوهش ها نظیر مطالعه انجام شده توسط گانسن<sup>۲</sup> و همکارانش [34] برای مقدار جایگزینی ۱۵ درصد مقاومت بیشتری نسبت به ۱۰ درصد گزارش شده است. و البته این تفاوت ها وابستگی بسیاری به نحوه سوزاندن پوسته برنج می تواند داشته باشد که تاثیر مستقیمی در خاصیت پوزولانی خاکستر دارد. بنابراین در یک حالت جامع شاید بهتر باشد برای درصد بهینه به جای مقدار ۱۰ درصد، محدوده ۱۰ تا ۱۵ درصد را بیان نمود. اما باید به این نکته نیز توجه داشت که برای مقدار بیشتر از ۱۰ درصد میزان دقت در سوزاندن و داشتن تجهیزات بهتر ضرورت می یابد. البته ذکر این نکته نیز ضروری است که پوسته برنج به دست آمده از نواحی مختلف تاثیرات متفاوتی را حتی با درصد های یکسان جایگزینی در آزمایشات فوق خواهد داشت. برای مثال مطالعه انجام شده توسط جما<sup>۳</sup> [35] مقایسه خوبی را در نتایج مقاومت فشاری بتن برای خاکستر پوسته برنج تهیه شده از دو کشور مختلف ولی با درصدهای یکسان جایگزینی نشان می دهد. با این حال در این پژوهش نیز باز هم میزان ۱۰ درصد جایگزینی برای هر نوع بتن یاد شده بیشترین مقاومت را نتیجه داده است. درصد جذب آب با افزایش درصد خاکستر افزایش می یابد که البته چندان هم دور از انتظار نمی باشد (پیش از این در مورد میل به جذب آب خاکستر اشاره شده بود) و البته این افزایش درصد جذب برای  $RHA = 10\%$  نسبت به بتن کنترل حتی به یک درصد نیز نمی رسد. بنابراین این افزایش درصد جذب آب با توجه به تاثیر قابل ملاحظه خاکستر پوسته برنج بر افزایش مقاومت مکانیکی بتن به هیچ عنوان نگران کننده نمی باشد.

- 
- 1- Andres
  - 2- Ganesan
  - 3- Gemma

## ۴- نتیجه گیری

همان طور که می دانیم نحوه تولید سیمان شامل مواد اولیه، دمای کوره، شرایط خنک کردن، ریزی ذرات سیمان، ترکیبات شیمیایی و... بر خواص فیزیکی و شیمیایی سیمان تولیدی و خواص هیدراتاسیون و سیمانی آن تاثیر زیادی داشته و بر همین اساس به تیپ های مختلف تقسیم می شود که هر کدام کاربرد و نحوه مصرف خاص خود را دارد. در تحقیقات و آزمایشات انجام گرفته بر روی تولید خاکستر پوسته برنج (Rice Husk Ash – RHA) نیز مشخص گردید نحوه تولید خاکستر شامل جنس پوسته ها و ترکیبات آنها، دمای کوره، زمان سوزاندن و خنک کردن، میزان آسیاب و ریزی ذرات بر خواص فیزیکی و شیمیایی خاکستر پوسته برنج که نوعی پوزولان مصنوعی می باشد تاثیر داشته و لازم می باشد با توجه به کاربرد مصرف آن که شامل استفاده از خاکستر پوسته برنج به عنوان پوزولان در ساختن بتن آرمه، ساخت ملاتهای بنایی و اندود، تثبیت خاک، بلوکهای سیمانی باربر و غیر باربر و خشتهای فشرده تثبیت شده به تیپ های مختلف تقسیم گردیده و درصد بهینه مصرف هر کدام مشخص گردد. مهمترین عامل تاثیرگذار در خواص خاکستر پوسته برنج نحوه سوزاندن پوسته برنج شامل دمای کوره، زمان سوزاندن و نحوه خنک کردن خاکستر می باشد. عامل تاثیرگذار دیگر ریزی ذرات خاکستر تولیدی می باشد که با توجه به مدت زمان آسیاب کردن سرعت و توان دستگاه متفاوت می باشد که درجه نرمی خاکستر تولیدی به آن وابسته می باشد. در نهایت موارد فوق را باید با آزمایش XRD و XRF و همچنین آزمایش تعیین سطح مخصوص (بلین) تعیین و با توجه به فعالیت پوزولانی توسط سنجش تغییرات هدایت الکتریکی محلول اشباع آهک-پوزولان دسته بندی نمود. لذا ضروری می باشد تحقیقاتی در مورد دسته بندی خاکستر پوسته برنج تولیدی و درصد بهینه مصرف آن انجام گیرد.

## مراجع :

- [1] Kordatos, K., Gavela, S., Ntziouni, A., Pistiolas, K. N., Kyritsi, A., and Kasselouri-Rigopoulou, V".Synthesis of highly siliceous ZSM-5 zeolite using silica from rice husk ash", Microporous Mesoporous Mater. 115, (2008), 189-196.
- [2] D. An, Y. Guo, Y. Zhu, Z. Wang, A green route to preparation of silica powders with rice husk ash and waste gas, Chemical Engineering Journal. 162 (2010) 509-514.
- [3] U. Kalapathy, A. Proctor, J. Shultz, An improved method for production of silica from rice hull ash, Bioresource Technology. 85 (2002) 285-289.
- [4] K.-S. Chou, J.-C. Tsai, C.-T. Lo, Bioresource Technology, 78 (2001) 217-219.
- [5] Z.M. El-Bahy, M.M. Mohamed, F.I. Zidan, M.S. Thabet,
- [6] Kordatos, K., Gavela, S., Ntziouni, A., Pistiolas, K. N., Kyritsi, A., and Kasselouri-Rigopoulou, V".Synthesis of highly siliceous ZSM-5 zeolite using silica from rice husk ash", Microporous Mesoporous Mater. 115, (2008), 189-196.
- [7] Della, V. P., Kühn, I., and Hotza, D."Rice husk ash as an alternate source for active silica production", Mater. Lett. 57, (2002), 818-821.
- [8] Thuadajj, N., and Nuntiya, A."Preparation of Nanosilica Powder from Rice Husk Ash by Precipitation Method", Chiang Mai Journal of Science 35, (2008), 206-211.
- [9] Telang, C., Suryanarayanan, R., and Yu, L."Crystallization of D-Mannitol in Binary Mixtures with NaCl: Phase Diagram and Polymorphism", Pharm. Res. 20, (2003), 1939-1945.
- [10] جعفرپور، ف.، ماجدی، م. ح.، رضانیانپور، ع. ا.، "ساخت سیمان بنایی با پوسته برنج"، تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، 1376.
- [11] P.K. Mehta, "Siliceous ashes and hydraulic cements prepared therefrom", US Patent, 4105459, August 1978.
- [12] M. Zhang, V. M. Malhotra, "High-Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash as a Supplementary Cementing Material", ACI Materials Journal, November-December 1996, Tittle no. 93-M72, Pages 629-636.
- [13] Gemma Rodríguez de Sensale, Strength development of concrete with rice-husk ash, Cement and Concrete Composites, Volume 28, Issue 2, February 2006, Pages 158-160.
- [14] Deepa G. Nair, K.S. Jagadish and Alex Fraaij, Reactive pozzolanas from rice husk ash: An alternative to cement for rural housing, Cement and Concrete Research, Volume 36, Issue 6, June 2006, Pages 1062-1071.
- [15] V. Saraswathy and Ha-Won Song, Corrosion performance of rice husk ash blended concrete, Construction and Building Materials, Volume 21, Issue 8, August 2007, Pages 1779-1784.
- [16] P. Chindaprasirt and S. Rukzon, Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar, Construction and Building Materials, Volume 22, Issue 8, August 2008, Pages 1601-1606.
- [17] Prinya Chindaprasirt, Sumrerng Rukzon and Vute Sirivivatnanon, Effect of carbon dioxide on chloride penetration and chloride ion diffusion coefficient of blended Portland cement mortar, Construction and Building Materials, Volume 22, Issue 8, August 2008, Pages 1701-1707.
- [18] J. Sousa Coutinho, The combined benefits of CPF and RHA in improving the durability of concrete structures, cement and concrete composites, Volume 25, Issue 1, January 2003, Pages 51-59.
- [19] Mehta, P.K., "Properties of blended cements, cements made from rice husk ash", Journal of American Concrete Institute, 74 (1977), 440-442.
- [20] Ramli, Z., Listiorini, E., and Hamdan, H."optimization and reactivity study of silica in the synthesis of zeolites from rice husk", Journal Technology 25, (1996), 27-35.

- [21] A. Chakraverty, P. Mishra, H.D. Banerjee, Investigation of combustion of raw and acid-leached. rice husk for production of pure amorphous white silica, *Journal Of Materials Science*.23 (1988) 21-24.
- [22] Bui, D.D., Hu, J., Stroeven, P., "Particle size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded Portland cement concrete", *Cement & Concrete Composites*, 27 (2005), 357–366.
- [23] Mehta, P.K., "The chemistry and technology of cements made from rice husk ash", *Proceedings UNIDO/ESCAP/RCTT Workshop on Rice-Husk Ash Cement*, Peshavar, Pakistan, (1979), 113-122.
- [24] رضانیانپور.ع.ا.، مهدی خانی.م.، ضرابی.ک.، احمدی بنی.غ. ۱۳۸۷ ارزیابی دوام و خصوصیات مکانیکی بتنهای ساخته شده از پوزولان خاکستر پوسته برنج در نمونه های بتنی، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- [25] ASTM Standard C1202, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration", ASTM Publication, United States, 2007.
- [26] Nehdi M, duquette J, Damatty AEI, (2003), "Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete," *Cement Concrete Res*;33(8):1203–10.
- [27] ACI Committee 222. Protection of metals in concrete against corrosion, *ACI222R-01*;pp.41 . 2001
- [28] ASTM Standard C876, "Standard Test Method of Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforced Steel in Concrete", ASTM Publication, United States, 1995.
- [29] D.P.DeMerchant, B. Fournier, and F. Strang (2000): Alkali-aggregate research in New Brunswick. *Canadian Journal of Civil Engineering*, V27, No.2,212-225.
- [30] Ali Akbar Ramezaniapour, Amir Maziar Raiss ghasemi, and Tayebeh Parhizkar (2004): Influence of silica fume on alkali-silica reaction mitigation. *Proceeding of the 12th international conference on alkali-aggregate reaction in concrete*, 646-650.
- [31] Ali Akbar Ramezaniapour, Amir Maziar Raiss ghasemi, and Tayebeh Parhizkar (2004): The use of natural pozzolans to control alkali-silica reaction. *Proceeding of the 12th international conference on alkali-aggregate reaction in concrete*, 640-646.
- [32] Nicole P.Hasparyk, Paulo J.M.Monteiro, and Helena Carasek (2000): Effect of silica fume and rice husk ash on alkali-silica reaction. *A CI Mat eri al J our nal*, V. 97, No. 4: 486- 492.
- [33] Andres Salas, Silvio Delvasto, Ruby Mejía de Gutierrez, David Lange, ( 2009 ), "Comparison of two processes for treating rice husk ash for use in high performance concrete, " *Cement and Concrete Research* 39, pp 773–778.
- [34] K. Ganesan, K. Rajagopal, K. Thangavel, ( 2008 ), "Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete, " *Construction and Building Materials* 22, pp 1675–1683.
- [35] Gemma Rodri'guez de Sensale, ( 2006 ), "Strength development of concrete with rice-husk ash, " *Cement & Concrete Composites* 28, pp 158–160.