

## ارزیابی دوام و خصوصیات مکانیکی بتن‌های ساخته‌شده از

### پوزولان خاکستر پوسته برنج

علی‌اکبر رضانیانپور

مهدی مهدی‌خانی

پویا پوریبیک

محمد مهدی کیومرثی

مهدی زمانی

مرکز تحقیقات، تکنولوژی و دوام بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر

Email: [aramce@aut.ac.ir](mailto:aramce@aut.ac.ir)

تلفن: 64543074

#### چکیده:

سالیان متمادی است که بتن به عنوان یکی از مصالح مصرفی ساخت دست بشر جایگاه ویژه ای در بین مهندسين عمران پیدا کرده است. در طول این سالها فاکتورهای گوناگونی در مورد بتن مورد بررسی قرار گرفته است. از مواردی که اخیراً به طور ویژه در آسیای شرقی و آمریکای شمالی مورد توجه قرار گرفته است، خاصیت های خاکستر پوسته برنج بعنوان یک پوزولان مصنوعی مرغوب در ترکیبات بتن می باشد که امروزه در دنیا کاربردهای متعددی یافته است. این پوزولان در ایران فقط در مقیاس آزمایشگاهی و بسیار محدود تولید گردیده است، چرا که هنوز اثرات مختلف آن بر بتن مورد بررسی دقیق علمی قرار نگرفته است. به همین منظور برای نخستین بار در خاورمیانه، در دانشگاه صنعتی امیرکبیر اقدام به طراحی و ساخت کوره مخصوص تولید خاکستر پوسته برنج شده است. در این پژوهش با انجام آزمایش‌های مختلف برای تعیین خواص مکانیکی و نیز آزمایش‌های مختلف دوام اثر این پوزولان مصنوعی در بتن‌های ساخته شده با خاکستر فوق، بررسی شده است. نتایج حاصل شده نشان دهنده اثرات مناسب خاکستر پوسته برنج بر روی خواص مکانیکی و نیز افزایش دوام و عمر مفید بتن‌های ساخته‌شده با این خاکستر در نمونه‌های آزمایشگاهی است.

#### کلمات کلیدی:

خاکستر پوسته برنج، پوزولان مصنوعی، خواص مکانیکی، دوام بتن

#### Abstract:

There are several years that concrete is one of the most important materials for civil engineers. Through these years, several factors in concrete have been studied. Durability of concrete is one of these factors that affect the service life of concrete structures. Recently, the properties of Rice Husk Ash (RHA) as high-quality artificial pozzolanic materials are important issues that specialists are concerned with, especially in East Asia and North America. It is not widely produced and used due to lack of adequate experiments on this material. In this research, in order to supply typical RHA, for the first time in the Middle East, an special furnace was designed and constructed in Amirkabir University of Technology. This furnace was built in a pilot size having the ability to control the conditions of combustion. Then various experiments were carried out to determine mechanical properties and durability of concretes incorporating RHA. The results show that RHA as an artificial pozzolanic material has increased the strength and durability of concretes.

#### Keywords:

Rice Husk Ash (RHA), Artificial Pozzolan, Mechanical Properties, Durability of Concretes

## 1- مقدمه

بحران انرژی و نیاز به صرفه‌جویی در مواد انرژی زا در تهیه و تولید مواد مختلف نظیر سیمان باعث گردیده تا کوششی وسیع در اقتصادی کردن تولید این فرآورده و بهبود بخشیدن به کیفیت آن در سطح جهان انجام گیرد. یکی از قدمهای موثر در حل این مهم، استفاده از مواد پوزولانی به صورت طبیعی و مصنوعی در سیمان است. استفاده از این مواد و جایگزین کردن درصدی از آنها در بتن را تنها بهای تمام شده بتن را تقلیل می‌دهد بلکه دوام بتن را در محیط‌های مخرب افزون می‌سازد.

استاندارد ASTM-C618، پوزولان را به این صورت تعریف می‌کند: ماده‌ی سیلیسی یا سیلیسی آلومیناتی که به خودی خود ارزش چسبندگی ندارد، اما به شکل ذرات بسیار ریز و در مجاورت رطوبت با درجات حرارت معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی نشان داده و ترکیباتی را به وجود می‌آورد که خاصیت سیمانی و چسبندگی دارد. بنابراین پوزولان یک ماده‌ی طبیعی یا مصنوعی است که حاوی سیلیس فعال است.

اولین استفاده از خاکستر پوسته برنج در بتن مربوط به سال 1924 در کشور آلمان بوده که توسط بیگل گزارش شده است. کارهای بعدی در آمریکا توسط مک دانیل در سال 1946، هوگ (Hough) در سال 1955 و هوگ و بار (Barr) در سال 1956 انجام گرفت که تولید و رفتار بلوکهای ساخته شده از سیمان پرتلند و خاکستر پوسته برنج را توصیف نمودند.[1]

در سال 1972 مهتا (Mehta) [2] در آمریکا اولین مقالات خود در مورد استفاده از پوسته برنج را انتشار داد. اهمیت کار مهتا از این جهت است که او مطالعه دقیقی در پارامترهای موثر بر احتراق پوسته برنج و کیفیت خاکستر تولید شده انجام داد. کوره دیگری که در دانشگاه صنعتی دلفت هلند ساخته شده است که به صورت غیرپوسته کار می‌کند. این کوره به کمک همزنهایی که درون آن تعبیه شده است، خاکستر پوسته برنج را کاملاً یکنواخت می‌کند. [3]

در تحقیق جامعی که زانگ (Zhang) و مالهورترا (Malhotra) [4] بر روی پوزولان خاکستر پوسته برنج انجام داده‌اند، خصوصیات مکانیکی نمونه‌های حاوی خاکستر پوسته برنج به میزان قابل توجهی بهبود یافته است. سن سل (Sensale) [5] نیز در تحقیقات مشابه دیگری 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، نمونه‌های بتنی از روزهای نخستین با افزایش مقاومت روبرو شده‌اند. نیر (Nair) و همکارانش [6] نیز در تحقیقی دیگر که بر روی خاکستر پوسته برنج تولیدشده از کوره‌های موجود در کشور هند انجام دادند نشان دادند که این خصوصیات مکانیکی نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان می‌تواند بسته به نحوه تولید خاکستر پوسته برنج کاملاً تغییر کند.

ساراسواتی (Saraswathy) و سانگ (Song) [7] نیز در آزمایش‌های خود نشان دادند که تخلخل مؤثر در نمونه‌های بتنی حاوی مقدار بهینه خاکستر پوسته برنج می‌تواند کاهش یابد. در تحقیق انجام‌گرفته توسط زانگ (Zhang) و مالهورترا (Malhotra) [4] نشان داده شد که افزودن خاکستر پوسته برنج می‌تواند تا نزدیک چهار برابر از نفوذ یون کلراید به داخل نمونه‌های بتنی در آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید جلوگیری نماید. یافته‌های چندپراسیرت (Chindaprasirt) [8 و 9] و همکاران نیز علاوه بر تأیید نظر فوق نشان می‌دهد که عمق نفوذ یون کلراید نیز در این نمونه‌ها کاهش قابل توجهی داشته است. ساراسواتی (Saraswathy) و سانگ (Song) [7] نیز در آزمایش‌های خود نشان دادند که افزودن خاکستر پوسته برنج به نمونه‌های بتن مسلح، خوردگی آرماتورها را به طرز چشمگیری کاهش داده است. در آزمایش فوق، فرآیند خوردگی نمونه‌های بتنی توسط جریان الکتریسیته تسریع شده بود و زمان آغاز ترک خوردگی کنترل شده است. کوتینهو (Coutinho) [10] نیز در آزمایش‌های خود نشان داد که افزودن خاکستر پوسته برنج به نمونه‌های بتنی باعث کاهش جذب آب مویینه گردیده است.

در کشور ما خاکستر پوسته برنج، مطابق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران در رده پوزولانهای مصنوعی قرار دارد که می‌تواند به عنوان جایگزین درصدی از سیمان خواص مکانیکی و دوام بتن را بهبود بخشد. استفاده از خاکستر پوسته برنج به منظور ماده جایگزین سیمان جهت تولید سیمانهای پوزولانی در کشور ما بسیار بااهمیت است. زیرا با توجه به فراوانی شالیزارهای شمال ایران و میزان تولید برنج در این ناحیه و نواحی دیگر کشور سالیانه به مقدار زیادی پوسته برنج در ایران تولید می‌شود، در حال حاضر از این پوسته‌ها استفاده چندانی نمی‌شود و یا در مواردی اندک استفاده‌های بسیار محدودی دارد و بحث خارج کردن آنها از محیط زیست نیز با مشکلات عدیده‌ای روبروست این در حالی است که پوسته برنج یک فرآورده با ارزش و در واقع یک

ماده خام صنعتی با قابلیت‌های متنوعی محسوب می‌شود. [11]

با توجه به اینکه تهیه خاکستر پوسته برنج مرغوب از نظر فعالیت پوزولانی، به شرایط سوزاندن و امکان کنترل دما و زمان سوختن بسیار وابسته است، نتایج تحقیقات انجام شده بر روی این ماده بسته به نوع سوزاندن و کوره‌های استفاده شده متفاوت می‌باشد و محققان سعی بر این دارند تا با طراحی کوره‌های نوین به کنترل هر چه بهتر شرایط سوختن دست یابند. به منظور دستیابی به

خاکستر پوسته برنج با فعالیت پوزولانی بالا، در دانشگاه صنعتی امیرکبیر اقدام به طراحی و ساخت کوره مخصوص سوزاندن پوسته برنج با قابلیت کنترل شرایط سوختن گردید. [12] پس از آماده شدن کوره برای دستیابی به بهترین شرایط سوختن و تهیه خاکستر مناسب، نحوه عملکرد دستگاه و سوزاندن پوسته‌ها در دفعات متعدد مورد آزمایش قرار گرفته و بهترین شرایط سوختن بر اساس آن بدست آمده است که مشخصات شیمیایی حاصل از آزمایش XRF آن در جدول 1 آمده است. نتایج حاصل از آزمایش XRD بر روی خاکستر بدست آمده (شکل 1) نشان می‌دهد که سیلیس موجود در خاکستر کاملاً آمورف بوده و هیچگونه ذرات کریستالی در خاکستر وجود ندارد. [13]

## 2- طرح اختلاط و آماده سازی نمونه‌ها

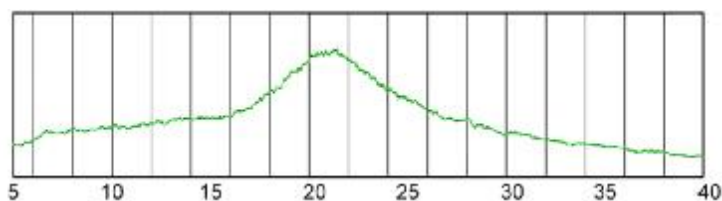
ساخت نمونه‌ها در 4 مرحله و برای 4 مخلوط مختلف در نظر گرفته شد. تنها تفاوت موجود در مخلوط‌های ساخته شده درصد جایگزینی پوزولان به جای سیمان در بتن بود. نمونه‌های هر مخلوط پس از ساخت کدگذاری شده‌اند. جدول 2 طرح اختلاط به کار رفته را نشان می‌دهد که در آن RHA علامت اختصاری پوزولان خاکستر پوسته برنج می‌باشد.

جدول ۱- آنالیز XRF خاکستر پوسته برنج و سیمان مصرفی

	آزمایش‌های شیمیایی		ترکیب شیمیایی								قانون بوگ %			
	وزن مخصوص	بلین (cm <sup>2</sup> /gram)	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	LOI	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
خاکستر پوسته برنج	۲۰۱۵	۳۶۰۰	۸۹/۶۱	۰/۰۴	۰/۲۲	۰/۹۱	۰/۴۲	۰/۰۷	۱/۵۸	۵/۹۱	—	—	—	—
سیمان نوع ۱ تهران	۳۰۲۱	۳۲۰۰	۲۱/۵	۳/۶۸	۲/۷۶	۶۱/۵	۴/۸۰	۰/۱۲	۰/۹۵	۱/۳۵	۵۱/۱	۲۳/۱	۵/۱	۸/۴

جدول ۲ طرح اختلاط نمونه‌ها

	RHA (kg/m <sup>3</sup> )	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	ستگدانه (kg/m <sup>3</sup> )		آب (kg/m <sup>3</sup> )
			ریز	درشت	
CTL	۰	۴۲۰	۸۱۵	۹۹۵	۱۸۹
7%RHA	۲۹/۴	۳۹۰/۶	۸۱۵	۹۹۵	۱۸۹
10%RHA	۴۲	۳۷۸	۸۱۵	۹۹۵	۱۸۹
15%RHA	۶۳	۳۵۷	۸۱۵	۹۹۵	۱۸۹



شکل 1- نتایج حاصل از آزمایش XRD بر روی خاکستر پوسته برنج مصرفی

به طور کلی مصرف پوزولان‌ها موجب کاهش اسلامپ مخلوط بتن تازه می‌شود. این مسأله به زبری بیشتر پوزولان‌ها نسبت به سیمان برمی‌گردد. با توجه به اینکه در طرح اختلاط‌های موردنظر اسلامپ ثابت در تمامی اختلاط‌ها با نسبت ثابت آب به سیمان موردنظر بوده است، لذا در طرح‌های همراه با پوزولان از فوق‌روان‌کننده جهت ثابت نگهداشتن اسلامپ استفاده شده است. در این تحقیق از فوق‌روان‌کننده ای بر پایه پلی‌کربوکسیلات‌های بهینه شده استفاده شده است که میزان مصرف آن بین 0/2 تا 1/2 درصد وزن سیمان می‌باشد. وزن مخصوص این فوق‌روان‌کننده 1/05 گرم بر سانتی متر مکعب و غلظت آن 28 % می‌باشد. نمونه‌های ساخته‌شده برحسب نوع استفاده و نیز آزمایش‌های مطابق برنامه در شکل‌های زیر ساخته شدند:

1. نمونه‌های مکعبی 10×10×10 cm: این نمونه‌ها به منظور آزمایش‌های مکانیکی مقاومت فشاری در نظر گرفته شدند.
2. نمونه‌های مکعبی 15×15×15 cm: این نمونه‌ها به منظور آزمایش‌های نفوذپذیری تحت فشار آب در نظر گرفته شدند.

3. نمونه‌های استوانه‌ای به قطر 10 cm و ارتفاع 20 cm: این نمونه‌ها جهت استفاده در آزمایش تسریع‌شده یون کلر در نظر گرفته شده‌اند. نمونه‌های قابل استفاده در دستگاه RCPT، به صورت استوانه‌های 5×10 می‌باشد و به دلیل نبود قالبهایی با این ابعاد، نمونه‌ها در ابعاد 10×20 ساخته شد که این نمونه‌ها، نهایتاً جهت استفاده در آزمایش به سه قطعه با ارتفاع 5 سانتی‌متر برش خوردند.
4. نمونه‌های استوانه‌ای به قطر 15 cm و ارتفاع 30 cm: این نمونه‌ها جهت تعیین مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و مقاومت الکتریکی انواع مخلوط‌ها در نظر گرفته شد. آزمایش مورد نظر جهت تعیین مقاومت کششی نمونه‌ها آزمایش برزیلی بوده است.
5. نمونه‌های استوانه‌ای بتن مسلح به قطر 10 cm و ارتفاع 20 cm همراه با آرماتور 12: در مرکز سطح مقطع این نمونه‌ها آرماتور با قطر 12 میلی‌متر کار گذاشته شد. این نمونه‌ها جهت آزمایش تعیین پتانسیل خوردگی آرماتور در آزمایش آزمایش نیم پیل در نظر گرفته شدند.
6. نمونه‌های مکعبی 15×15×15cm بتن مسلح همراه با آرماتور 12: با توجه به اینکه نمونه‌های استوانه‌ای مسلح غیرقابل استفاده در دستگاه گالوپالس بودند نمونه‌های مکعبی مسلح نیز جهت بررسی خوردگی آرماتورها در نظر گرفته شد. نمونه‌های ساخته‌شده پس از بتن‌ریزی در حدود 12 تا 24 ساعت درون قالب باقی ماندند، در این مدت دائماً سطح نمونه‌ها مرطوب نگهداشته شد. نمونه‌ها پس از باز شدن قالبها، بلافاصله در شرایط عمل‌آوری، در محیط آب آهک اشباع قرار گرفتند. دمای میانگین محیط آزمایشگاه در این مدت حدوداً 22 الی 26 درجه سانتیگراد بوده است.

### 3- روش انجام آزمایش‌ها

#### الف) آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری معمولترین آزمایش برای ارزیابی نمونه‌های بتنی است. مقاومت فشاری نمونه بتنی می‌تواند نمایانگر روند فعالیت‌های سیمانی و پوزولانی و کیفیت ماتریس سیمانی بتن و پیوستگی آن با سنگدانه‌ها باشد. همانطور که قبلاً اشاره شد برای انجام این آزمایش، نمونه‌های مکعبی 10×10×10 در محلول اشباع آب آهک نگهداری شدند. آزمایش‌های مقاومت فشاری در سنین 3، 7، 28، 90، 180 روزه بر روی سه نمونه‌ها انجام شد.

#### ب) آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها و آزمایش مدول الاستیسیته

برای این آزمایشها نمونه‌های استوانه‌ای به قطر 15 cm و ارتفاع 30 cm در محلول اشباع آب آهک نگهداری شدند. آزمایش‌های مقاومت کششی در سنین 7، 28 و 90 روزه بر روی نمونه‌ها انجام شد. این نمونه‌ها تحت آزمایش برزیلی قرار گرفته و مقاومت کششی نمونه‌ها حاصل میانگین مقاومت کششی 2 نمونه در هر سن می‌باشد. از سوی دیگر، آزمایش‌های مدول الاستیسیته در سنین 28، 90 روزه بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج مدول الاستیسیته نیز مشابه آزمایش مقاومت کششی از میانگین نتایج دو نمونه استوانه‌ای حاصل شده است.

#### ج) آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT)

مهمترین عامل زنگ‌زدگی و خوردگی آرماتور در بتن وجود یون کلراید می‌باشد. یون‌های کلراید ممکن است از مصالح آلوده یا مواد افزودنی 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 این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C1202، یک نمونه بتنی اشباع، با استفاده از دستگاه RCPT در معرض یک ولتاژ 60 ولتی جریان مستقیم به مدت 6 ساعت قرار می‌گیرد. در یک محفظه از محلول 3% NaCl و در محفظه دیگر از محلول 3N NaOH استفاده می‌شود و در مجموع مجموع بار الکتریکی عبوری اندازه‌گیری می‌شود.

نکته قابل ذکر اینکه نمونه‌های قابل استفاده در دستگاه RCPT، به صورت استوانه‌های 5×10 می‌باشد و به دلیل نبود قالبهایی با این ابعاد، نمونه‌ها در ابعاد 10×20 ساخته شدند که این نمونه‌ها، نهایتاً جهت استفاده در آزمایش به سه قطعه با ارتفاع 5 سانتی‌متر برش می‌خورند. قابل ذکر است که با توجه به حساسیت دستگاه RCPT، لازم است نهایت دقت در برش نمونه‌ها به کار گرفته شود. در برش برای آزمایش RCPT بین 1 تا 2 سانتی متر از انتهای قالب‌ها بریده و کنار گذاشته شد.

#### د) آزمایش نفوذ آب

نفوذپذیری بتن معمولاً از طریق محاسبه آب تحت فشار که برای جریان یافتن به درون یک نمونه بتنی داخل می‌شود، در یک فاصله زمانی مشخص، یا با محاسبه مقدار آب خارج شده از وجه دیگر نمونه که در معرض هوا است، در یک فاصله زمانی مشخص، تعیین می‌گردد. همچنین با اندازه‌گیری عمق نفوذ آب پس از شکستن نمونه می‌توان به معیاری برای نفوذ پذیری بتن دست یافت. در روش اخیر بر اساس DIN1048، نمونه‌های مکعبی 15×15×15 سانتیمتری بتن تحت فشار ثابت 5 اتمسفر،

قراری می‌گیرند. طبق استاندارد باید سطحی از نمونه که آب با فشار بر آن اثر می‌کند با برس سیمی کمی زبر شود. پس از گذشت 3 روز نمونه‌ها به دو نیم تقسیم شده و مقدار نفوذ آب اندازه‌گیری می‌شود.

#### ه) آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی (اهمی)

یون‌هایی که به داخل محیط بتن نفوذ کرده‌اند، از میان منافذ موجود در ساختار بتن حرکت می‌کنند. به علت حرکت یون‌ها داخل محیط بتن، بتن دارای هدایت الکتریکی می‌باشد. مقدار مقاومت الکتریکی بتن بستگی مستقیم به نفوذپذیری بتن و شرایط محیطی بتن (مقدار یون‌های نفوذی و رطوبت بتن) دارد و مسلماً هرچه نفوذپذیری بتن بیشتر باشد، یونها به راحتی و با سرعت بیشتری می‌توانند به داخل محیط بتن راه یابند. لذا بتن‌هایی که دارای مقاومت الکتریکی بالایی هستند، در برابر نفوذ یون کلراید و شروع خوردگی عملکرد بهتری خواهند داشت.

در اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی معمولاً مقاومت الکتریکی پوشش بتن روی آرماتور در نظر است و دستگاهی که برای تعیین پتانسیل و یا شدت خوردگی به کار می‌روند قادر به تعیین مقاومت الکتریکی نیز هستند. با تعیین مقاومت الکتریکی میتوان احتمال خوردگی را در سازه تعیین کرد. بنا بر راهنمایی‌های دستگاه مورد استفاده در این آزمایش، در صورتیکه مقاومت الکتریکی بیش از 12 کیلوهم-سانتیمتر باشد، احتمال خوردگی بسیار ضعیف بوده و در صورتیکه کمتر از 5 کیلوهم-سانتیمتر باشد، خوردگی به احتمال زیادی به وقوع خواهد پیوست.

برای انجام این آزمایش در هر سری ابتدا دستگاه آزمایش مقاومت الکتریکی کالیبره می‌شد و سپس آزمایش انجام می‌گردید. نکته قابل توجه اینکه رطوبت نمونه بتنی بر روی نتایج اثر می‌گذارد، از اینرو باید نمونه‌های بتنی پس از خارج شدن از محلول آب آهک به سرعت مورد آزمایش قرار گیرند. آزمایش‌های گوناگونی توسط دستگاه مقاومت الکتریکی در سنین 28 و 180 روزه برای طرح اختلاط‌های مورد نظر انجام گرفت.

#### و) بررسی خوردگی آرماتور (آزمایش‌های نیم‌پیل و گالوپالس)

در تعیین پتانسیل خوردگی آرماتور، اختلاف ولتاژ بین آرماتور و یک الکتروود مرجع در تماس با بتن اندازه‌گیری می‌شود. این آزمایش معمولاً توسط دستگاه نیم‌پیل که در استاندارد ASTM C876 نیز تعریف شده است انجام می‌گیرد. اختلاف پتانسیل الکتروشیمیایی اندازه‌گیری شده به وسیله دستگاه نیم‌پیل به عوامل چندی بستگی دارد که مستقیماً بر روی نتایج تأثیر می‌گذارند. مهمترین عامل کیفیت پوشش بتنی روی آرماتور است که به خصوص به شرایط رطوبتی و آلودگی پوشش بتنی به یون کلراید بستگی دارد.

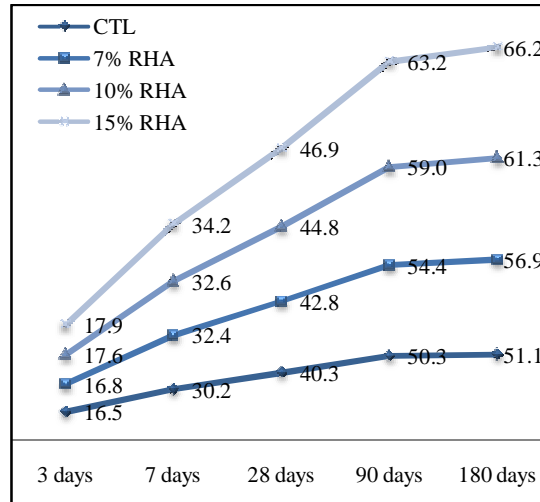
روش اندازه‌گیری شدت خوردگی توسط دستگاه گالوپالس یک روش سریع غیرمخرب براساس تکنیک پلاریزاسیون می‌باشد پس از برقراری اختلاف پتانسیل موجود بین آرماتور و الکتروود مرجع روی سطح بتن یک پالس جریان آندیک کوتاه‌مدت از طریق همین مدار برقرار شده اعمال می‌شود. جریان اعمال شده به‌طور معمول بین 10 تا 100 میکروآمپر است و مدت زمان اعمال پالس بین 5 الی 30 ثانیه می‌باشد. این جریان ثابت طی زمان اعمال، موجب تغییرات در پتانسیل آرماتورها می‌شود که توسط دستگاه اندازه‌گیری می‌شود. آرماتورها در اثر این اعمال جریان در جهت آندیک در مقایسه با پتانسیل آزاد خوردگی پلاریزه می‌شود. میزان این پلاریزاسیون بستگی به وضعیت خوردگی دارد. هرچه میزان خوردگی در مقایسه با آرماتور غیرفعال بیشتر باشد، تفاوت بین پتانسیل قطبی شده و پتانسیل خوردگی آزاد کمتر است.

در این تحقیق در سنین گوناگون آزمایش‌های گالوپالس و نیم پیل بر روی نمونه‌های ساخته‌شده از مخلوط‌های مختلف انجام گرفت. طبقه قرائت به این شکل انجام شد که روی سه نقطه از هر نمونه نتایج قرائت شد و میانگین این قرائت‌ها برای نمونه‌های مختلف در نظر قرار گرفت. لیکن در طول آزمایش تا سن شش‌ماهه، جریان و یا اختلاف پتانسیلی - که نشان‌دهنده آسیب‌دیدگی آرماتورها است - در نمونه‌ها مشاهده نشد و احتمال خوردگی آرماتور براساس نتایج موجود تا چندین سال آینده نیز انتظار نمی‌رفت. لذا با توجه به برخی تحقیقات موجود، با ساخت دستگاه خوردگی تسریع شده، اقدام به برقراری جریان الکتریکی در نمونه‌های بتنی گرفته شد. روش کار دستگاه خوردگی تسریع شده بدین صورت است که نمونه‌های مسلح بتنی که در مدت 28 و 180 روز در محیط آب آهک اشباع عمل‌آوری شدند، به صورت نیمه مغروق در محلول 5% کلرید سدیم قرار می‌گیرند. آنگاه به آرماتورهای نمونه‌ها جریان مستقیمی با اختلاف پتانسیل 60 ولت به مدت 7 روز متصل شد و در طول این مدت به طور مرتب صحت عملکرد دستگاه کنترل می‌گشت. پس از مدت کوتاهی چنانکه انتظار می‌رود بر القای جریان الکتریسیته خوردگی در میلگردها آغاز می‌گردد.

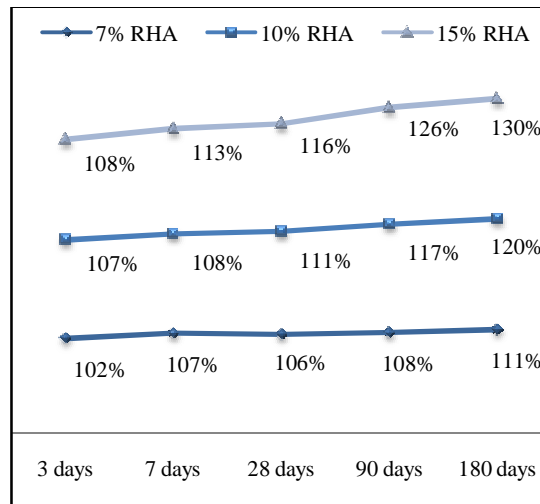
## 4- نتایج و تفسیرها

## الف) آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایشهای مقاومت فشاری در شکل 2 نشان داده شده‌اند. همچنین شکل 3 تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی را تا سن 180 روز نشان می‌دهد که می‌تواند ملاک مناسبی جهت بررسی تغییرات مقاومت فشاری مخلوط‌های مختلف باشد. از نتایج آزمایشهای مقاومت فشاری دیده می‌شود که در تمام موارد مقاومت فشاری بتن با سن آن افزایش می‌یابد. نتایج نشان دهنده فعالیت مناسب پوزولانی در بتن حاوی خاکستر پوسته برنج با گذشت زمان می‌باشد، بطوریکه نسبت مقاومت فشاری بتن حاوی 15 درصد خاکستر پوسته برنج به بتن کنترل در سن 3 روزه 107% می‌باشد که در سن 28 روزه این نسبت به 130% بالغ می‌گردد.



شکل 2- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی (MPa)



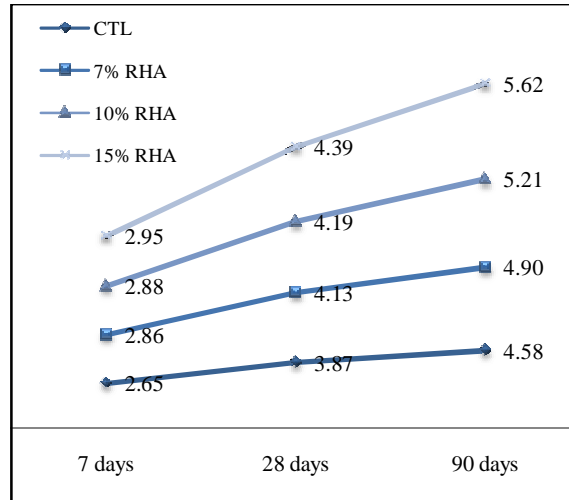
شکل 3- درصد افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف نسبت به نمونه‌های شاهد (%)

## ب) آزمایش مقاومت کششی و مدول الاستیسیته

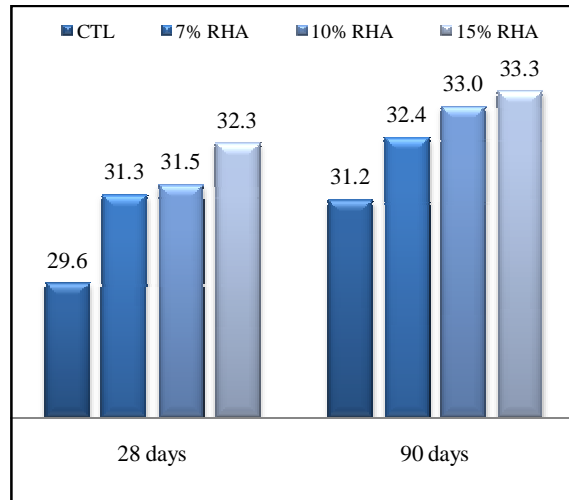
نتایج مقاومت کششی و آزمایش مدول الاستیسیته در اشکال 4 و 5 آورده شده است. از نتایج آزمایشهای مقاومت کششی دیده می‌شود که در تمام موارد مقاومت کششی بتن با سن آن افزایش می‌یابد. بطوریکه نسبت مقاومت کششی بتن حاوی 15 درصد خاکستر پوسته برنج نسبت به بتن شاهد در سن 7 روزه 111% می‌باشد که در سن 90 روزه این نسبت به 123% بالغ می‌گردد. به علاوه افزایش درصد خاکستر پوسته برنج به طور چشمگیری در افزایش مقاومت کششی بتن تاثیر داشته

است. همچنین این افزایش مقادیر برای آزمایشهای مدول الاستیسیته در نمونه‌های حاوی 15 درصد خاکستر پوسته برنج در سن 7 روزه 111% و در سن 90 روزه این نسبت 123% گزارش شده است که نشان‌دهنده فعالیت مناسب خاکستر پوسته برنج تولید شده است.

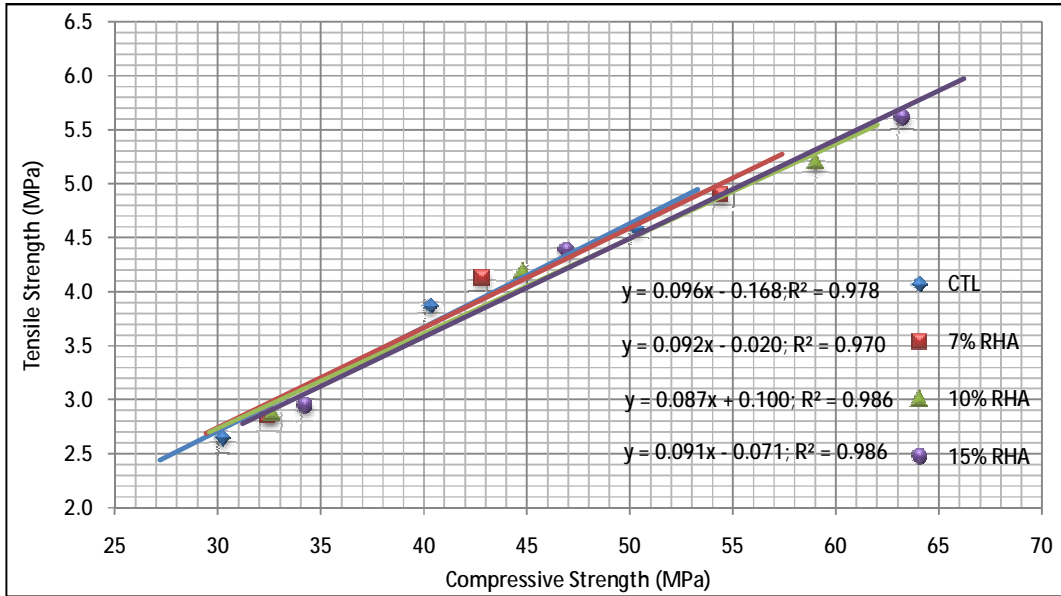
شکل 6 که ارتباط بین مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها را نشان می‌دهد، بیانگر رابطه مناسب بین این دو مقاومت می‌باشد. با توجه به نتایج حاصله در شکل 6 ملاحظه می‌گردد که روند کسب مقاومت کششی مشابه روند کسب مقاومت فشاری نمونه‌ها است و مقاومت کششی نیز با گذشت زمان افزایش می‌یابد. به علاوه در این نمودار معادلات خطی موجود میان مقاومت‌های کششی و فشاری نمونه‌های مختلف نیز مشاهده می‌شود. چنانکه از مقایسه منحنی‌ها برمی‌آید، میان پارامترهای مقاومت‌های کششی و فشاری همبستگی خوبی وجود دارد.



شکل 4- نتایج آزمایش مقاومت کششی بر حسب MPa



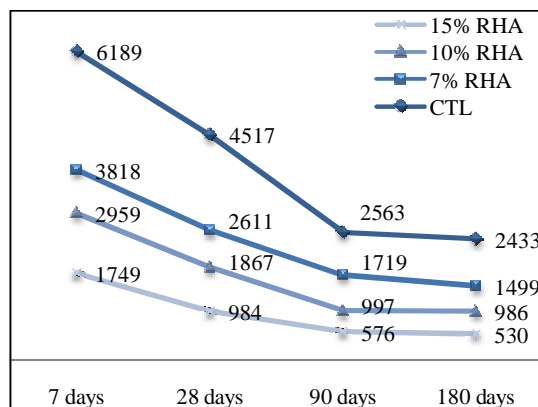
شکل 5- نتایج آزمایش مدول الاستیسیته بر حسب GPa



شکل 6- مقایسه رابطه میان آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی

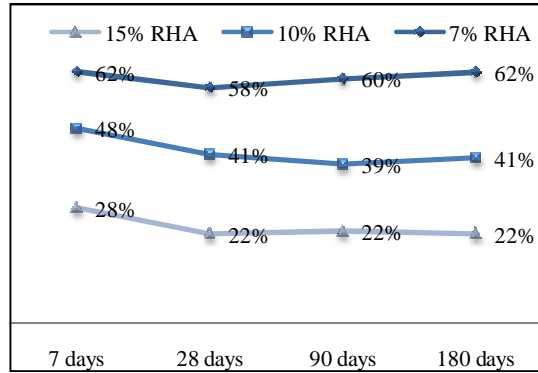
ج) آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT)

در شکل 7 مقادیر کل بار الکتریکی عبوری اندازه‌گیری شده برای طرح اختلاط‌های مختلف پس از برقراری جریان الکتریکی را نشان داده شده است. همچنین شکل 8 درصد نفوذپذیری برای نمونه‌های مختلف نسبت به نمونه شاهد را نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل 8 پیداست، نمونه‌های ساخته‌شده با پوزولان خاکستر پوسته برنج، نسبت به نمونه‌های شاهد از نفوذپذیری کمتری برخوردار بوده‌اند. به عنوان مثال، نسبت مقدار شار عبوری از نمونه‌های بتنی حاوی 15 درصد خاکستر پوسته برنج نسبت به بتن شاهد در حدود 40% می‌باشد که این عدد در نمونه‌های حاوی 7 درصد خاکستر پوسته برنج به 75% بالغ می‌گردد. همچنین در یک کار تحلیلی بر روی نتایج به‌دست آمده، رابطه میان آزمایش‌های مقاومت فشاری و نفوذ تسریع شده یون کلراید برای طرح اختلاط‌های مختلف و در سنین متفاوت بررسی شده است که نتایج آن در شکل 9 نشان داده شده است. چنانکه از مقایسه نتایج دو آزمایش برمی‌آید، میان پارامترهای مقاومت فشاری و نفوذ تسریع شده یون کلراید در نمونه‌های گوناگون همبستگی خوبی وجود دارد. یعنی همچنان که مقاومت فشاری افزایش می‌یابد مقدار نفوذ تسریع شده یون کلراید در نمونه‌های گوناگون نیز کاهش یافته است.

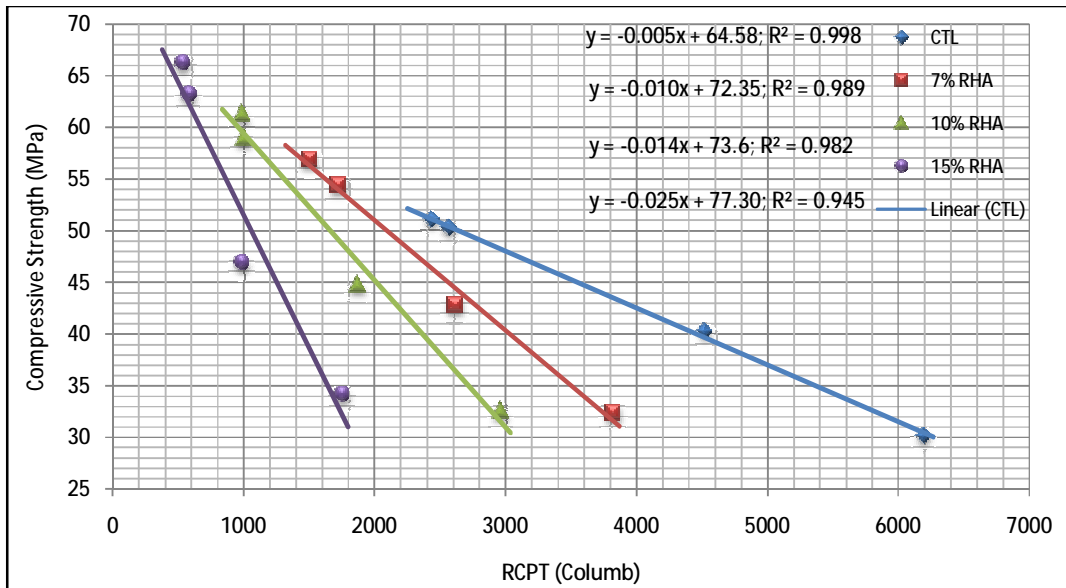


شکل 7- نتایج آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید (کولمب)





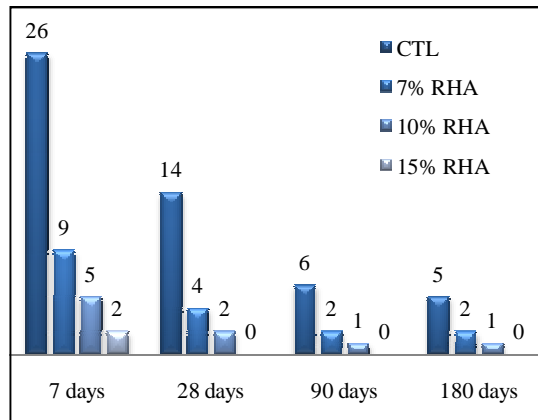
شکل 8- درصد نفوذپذیری نسبت به نمونه شاهد در آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید



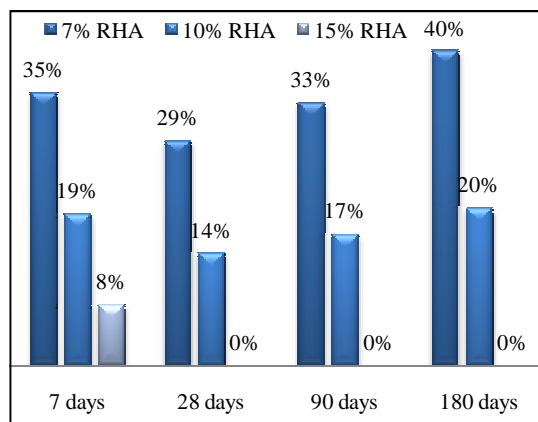
شکل 9- مقایسه رابطه میان آزمایش‌های مقاومت فشاری و نفوذ تسریع شده یون کلراید

#### د) آزمایش نفوذ آب

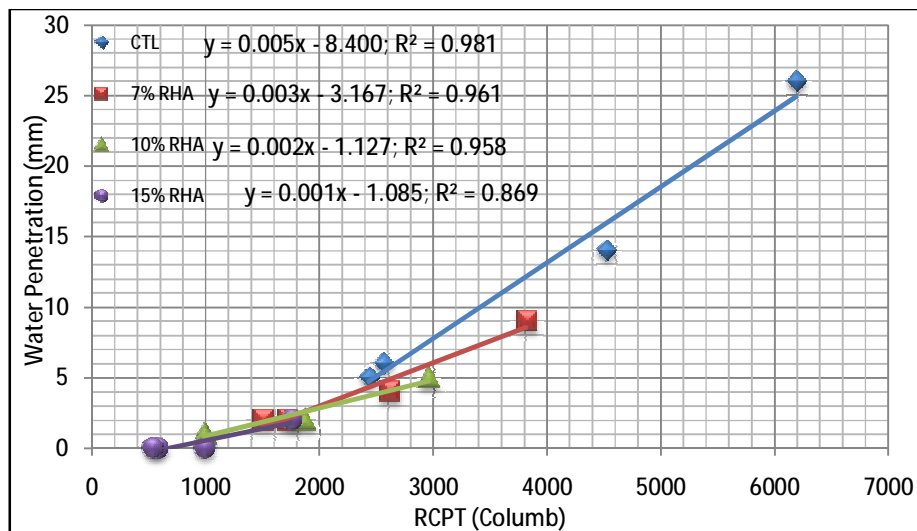
شکل 10 نتایج آزمایش نفوذ آب نمونه‌های مکعبی را بر حسب میلی‌متر نشان می‌دهد. همانگونه که انتظار می‌رود، نمونه‌های ساخته‌شده با پوزولان خاکستر پوسته برنج، از نفوذپذیری کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد برخوردار بوده‌اند. به علاوه، شکل 11 درصد نفوذپذیری برای نمونه‌های مختلف نسبت به نمونه‌های شاهد را به صورت نمودار میله‌ای نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در تمام موارد مقدار نفوذ پذیری آب در نمونه‌های بتنی با افزودن مقادیر کم پوزولان، به شدت کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، افزودن تنها 7 درصد خاکستر پوسته برنج به بتن شاهد در حدود 65% از نفوذ پذیری بتن در سن 7 روزه کاسته است. در نمودارهای تحلیلی شکل 12 معادلات خطی موجود میان پارامترهای مختلف و مقدار پراکندگی نقاط نسبت به خط رگرسیون بررسی شده است. چنانکه از مقایسه نمودارها برمی‌آید، میان پارامترهای گوناگون همبستگی خوبی وجود دارد. از طرفی دیگر نتایج آزمایش‌های نفوذ آب و نفوذ تسریع شده یون کلراید نشان می‌دهد که در مواردی که میزان نفوذ یون کلراید کم شده است نفوذ آب نیز کاهش چشمگیری یافته است. همچنین نتایج نشان دهنده همبستگی خوب میان نتایج بدست آمده است. تنها در نمونه‌های بتنی حاوی 15 درصد خاکستر پوسته برنج که هیچگونه نفوذی دیده نشده است مقدار همبستگی کاهش یافته است که با توجه به مقادیر حاصل شده از آزمایش نفوذ، این مقدار همبستگی طبیعی است.



شکل 10- نتایج آزمایش نفوذ آب بر حسب mm



شکل 11- میزان نفوذپذیری برای نمونه‌های مختلف در آزمایش نفوذ آب نسبت به نمونه‌های شاهد (%)



شکل 12- مقایسه رابطه میان آزمایش‌های RCPT و نفوذ آب

**ه) آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی (اهمی)**

در جدول 3، نتایج این آزمایش برای نمونه‌های مختلف مشاهده می‌شود. در یک بررسی کلی 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. مقایسه بین مقاومت الکتریکی نمونه‌های ساخته‌شده با پوزولان خاکستر پوسته برنج و بتن شاهد حکایت از برتری نسبی بتن ساخته‌شده با پوزولان خاکستر پوسته برنج در زمانهای مختلف دارد که دلایل آن در بخشهای گذشته تشریح گردیده‌اند.

**و) بررسی خوردگی آرماتور (آزمایش‌های نیم‌پیل و گالوپالس)**

با توجه به اعداد جدول شماره 3، مشاهده می‌شود که نمونه‌های پوزولانی خاکستر پوسته برنج کاملاً در کاهش خوردگی آرماتور مؤثر واقع شده‌اند. به طوری که مقدار پتانسیل الکتریکی در نمونه‌های بتنی حاوی 15 درصد خاکستر پوسته برنج نسبت به بتن شاهد در سن 28 روزه 75% می‌باشد که در سن 180 روزه این نسبت تا مقدار 68% کاهش می‌یابد. نسبت کاهش شدت جریان الکتریکی در سن 28 روزه 52% و در سن 180 روزه 50% ذکر شده است که خود بیانگر عملکرد مناسب خاکستر پوسته برنج تولید شده است.

**جدول 3- مقادیر مقاومت الکتریکی برای نمونه‌های بتنی**

15% RHA	10% RHA	7% RHA	CTL		
4/9	4/4	3/7	3/4	28روزه	مقاومت الکتریکی
16/9	15/1	13/3	12/6	180روزه	(کیلو اهم-سانتیمتر)
1/1	1/1	1/4	2/1	28روزه	شدت جریان الکتریکی
0/9	1/0	1/1	1/5	180روزه	( $mA/cm^2$ )
-630	-691	-720	-835	28روزه	پتانسیل الکتریکی
-346	-413	-481	-512	180روزه	(میلی‌ولت)

**نتیجه‌گیری**

- 1) نتایج جداول و اشکال خواص مکانیکی بتن‌های حاوی خاکستر پوسته برنج (مقاومت فشاری، کششی، مدول الاستیسیته) نشان دهنده کیفیت بالای پوزولان تولید شده می‌باشد. به نحوی که با در نظر گرفتن روند افزایش خواص مکانیکی می‌توان پیش‌بینی نمود که خصوصیات مکانیکی نمونه‌های دارای خاکستر پوسته برنج در سنین بالاتر باز هم بیشتر شود.
- 2) با توجه به نتایج آزمایش‌های تسریع‌شده نفوذ یون کلراید، نفوذ آب و مقاومت الکتریکی می‌توان گفت تمامی نمونه‌های ساخته‌شده در محدوده نفوذپذیری متوسط و یا کم قرار گرفته‌اند و نسبت به نمونه‌های شاهد از نفوذپذیری کمتری برخوردار بوده‌اند. ضمن آنکه این کاهش نفوذپذیری نمونه‌ها با افزایش سن نمونه‌ها بسیار چشمگیر بوده است.
- 3) با توجه به پتانسیل‌های خوردگی تسریع شده نمونه‌های مختلف حاوی خاکستر پوسته برنج، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که استفاده از پوزولان، نسبت به نمونه‌های شاهد، بسیار موفق‌تر بوده است. به طوری که بیشترین میزان خوردگی آرماتور نیز در نمونه‌های شاهد مشاهده گردید.

**مراجع**

- [1]. جعفرپور. ف، ماجدی. م. ح، رضانیانپور. ع. ا، "ساخت سیمان بنایی با پوسته برنج"، تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، 1376
- [2]. P.K. Mehta, "Siliceous ashes and hydraulic cements prepared therefrom", US Patent, 4105459, August 1978.
- [3]. Bui, D. D, "Rice husk ash a mineral admixture for high performance concrete", PhD Thesis, Delft University Press, 2001.
- [4]. 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.
- [5]. 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.

- [6]. 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.
- [7]. 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.
- [8]. 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.
- [9]. 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.
- [10]. 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
- [11]. وثوق، " بررسی خواص مهندسی و دوام بتنهای ساخته شده از پوسته برنج سوخته"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، فارسی، 1368.
- [12]. خدام رضوی، "بررسی امکان تولید پوسته برنج سوخته در ایران و خواص مکانیکی آن در بتن سخت شده"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، 1384.