

## بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از ترکیب زئولیت و متاکائولین بر دوام و خوردگی میلگرد در بتن خودتراکم

مهدی قویدل شهرکی<sup>۱</sup>، محمود میری<sup>۲\*</sup> و مهر ا... رخشانی مهر<sup>۳</sup>  
<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران دانشگاه سیستان و بلوچستان  
<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان  
<sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه الزهرا (س)

### چکیده

در این مقاله با جایگزینی پوزولان‌های زئولیت و متاکائولین به عنوان بخشی از سیمان، ضمن کاهش مصرف سیمان و کمک به حفظ محیط زیست، اثر آن‌ها بر دوام و خوردگی میلگرد در بتن خودتراکم مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور، طرح اختلاط‌های مختلفی حاوی زئولیت، متاکائولین و ترکیب آن‌ها با همدیگر ساخته شده و نتایج با نمونه شاهد مقایسه شده‌اند. نسبت آب به پودر در کلیه طرح‌ها یکسان انتخاب شده است. آزمایش‌های انجام شده شامل مقاومت فشاری، جذب آب، نفوذ آب، مقاومت ویژه الکتریکی، نفوذ تسریع شده (مهاجرت) یون کلر و خوردگی تسریع شده می‌باشد. نتایج بیانگر این هستند که افزودن پوزولان‌های زئولیت و متاکائولین به صورت هم‌زمان به بتن خودتراکم موجب بهبود قابل ملاحظه دوام و خوردگی میلگرد در آن شده است. به طوری که طرح اختلاط حاوی ۱۰ درصد زئولیت و ۱۰ درصد متاکائولین ضریب نفوذ یون کلر را نسبت به نمونه شاهد ۸۸ درصد کاهش و مقاومت در برابر خوردگی را ۱/۹۴ برابر بهبود داده است.

**واژگان کلیدی:** زئولیت، متاکائولین، دوام بتن خودتراکم، خوردگی میلگرد.

### ۱- مقدمه

از این رو استفاده از مواد پوزولانی نظیر خاکستر بادی، دوده سیلیس، پومیس، زئولیت و متاکائولین به دلیل کاهش مصرف سیمان و بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن در چند دهه اخیر افزایش چشمگیری یافته است. طبق تحقیقات Page و Vennesland [۱] افزودن پوزولان به بتن سبب کاهش pH بتن از ۱۳/۵ به ۱۲/۵ گردیده و در نتیجه قابلیت بتن حاوی پوزولان در پیوند با یون کلر کم می‌شود.

Dipayan بر روی نمونه‌های ساخته شده از زئولیت با درصدهای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید را انجام داده و نشان داد با افزودن ۴۰ درصد زئولیت، شار عبوری از بتن نسبت به نمونه شاهد ۲۷۹/۹ درصد بهبود یافته است [۲]. Vejmeková و همکاران [۳] نشان دادند که زئولیت طبیعی می‌تواند به عنوان یک پودر زیست‌محیطی با قابلیت جایگزینی بخشی از سیمان پرتلند در بتن و صنعت ساختمان به کار رود. همچنین با بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده به این نتیجه رسیدند که جایگزینی حدود ۲۰٪ وزن سیمان با زئولیت، بهترین ترکیب بین سایر ترکیبات بررسی شده (۱۰٪ و ۴۰٪ زئولیت جایگزین سیمان) توسط آن‌ها است.

از مشاهده نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی و RCPT، که توسط Kazemian و همکاران [۴] انجام شده است می‌توان

تولید سیمان جهت استفاده در بتن به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی یکی از بزرگ‌ترین بخش‌های صنعت در جهان محسوب می‌گردد. مصرف زیاد سوخت‌های فسیلی جامد، مایع و گاز در کارخانجات این بخش و همچنین نیروگاه‌ها جهت تأمین برق مورد نیاز کارخانه‌های سیمان علاوه بر هزینه زیاد تولید، در ایجاد آلاینده‌های مختلف همچون CO<sub>2</sub>، NOX و فلزات سنگین نقش مهمی را ایفا می‌کند. انتشار این آلاینده‌ها اثرات زیست محیطی زیانباری از جمله تولید گازهای گلخانه‌ای، افزایش سرعت تغییرات آب و هوایی، باران‌های اسیدی و سایر موارد را به همراه دارد. بنابر این اگر بتوان درصدی از سیمان مورد استفاده را کاهش داد، به همان میزان از انتشار آلاینده‌های ناشی از تولید آن کاسته خواهد شد. یکی از گزینه‌های مطرح در خصوص جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی در بتن، پوزولان‌ها است. از جمله مزایای استفاده از پوزولان‌ها می‌توان کاهش حرارت هیدراتاسیون، کاهش نفوذ، کنترل واکنش‌های قلیایی سنگ‌دانه‌ها، افزایش مقاومت در برابر عوامل شیمیایی، کاهش انقباض خشک‌شدگی بتن، افزایش مقاومت در سنین بالا، بهبود خواص بتن تازه و کاهش هزینه را برشمرد.

که وجود متاکائولین در بتن خودتراکم مقاومت الکتریکی را به- ازای نسبت آب به سیمان ۰/۳۲، ۰/۳۸ و ۰/۴۵ به ترتیب ۲۴٪، ۲۶٪ و ۲۰٪ افزایش داده است.

Ramezaniapour و همکاران [۸] در مقاله‌ای اثر متاکائولین بومی خاورمیانه به عنوان ماده سیمانی مکمل و پرکننده روی مقاومت و دوام بتن را بررسی و به یک رابطه نمایی حاکم بین نفوذ کلرید و مقاومت فشاری دست یافتند. آن‌ها درصد بهینه جایگزینی متاکائولین را ۵ درصد جهت افزایش ۲ تا ۴ برابری مقاومت بیان نمودند.

در کشور چک، تولید بتن با استفاده از متاکائولین و تعیین مجموعه گسترده‌ای از ویژگی‌های بتن با عملکرد بالا که حاوی ۱۰٪ متاکائولین است، آزمایش و مشاهده گردید که متاکائولین می‌تواند به‌عنوان یکی از گزینه‌های جایگزین سیلیکافوم و روباره آهن‌گذاری در کشورهایی که دسترسی به این دو ماده دشوار و یا از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست، مفید باشد [۹].

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح مصرفی

#### ۲-۱-۱- سنگ‌دانه

مشخصات فیزیکی مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۱) ارائه شده است. به منظور دانه‌بندی مناسب و حذف ترکیبات زیان‌آور، مصالح ابتدا به خوبی شسته و پس از خشک شدن در اون، الک گردیده و حد وسط استاندارد ASTM C33-10 [۱۰] انتخاب گردیده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه‌ها

سنگ‌دانه	وزن مخصوص اشباع با سطح خشک (کیلوگرم بر متر مکعب)	جذب آب (درصد)	اندازه بزرگ-ترین دانه (میلی‌متر)	مدول نرمی
شن	۲۷۳۱	۰/۸۴	۱۲/۵	-
ماسه	۲۶۰۴	۱/۵۸	۳/۱۷۵	۲/۷

### ۲-۱-۲- سیمان

سیمان مصرفی پرتلند نوع ۲ با وزن مخصوص ۳۱۰۷ کیلوگرم بر متر مکعب بوده که مشخصات آن به ترتیب مطابق جداول (۲) و (۳) اندازه‌گیری شده است [۱۱].

نتیجه گرفت که جایگزینی زئولیت اثر مهمی بر دوام طرح‌های بتن خودتراکم دارد که با افزایش درصد جایگزینی تأثیر آن نیز بیشتر می‌شود. با مشاهده خصوصیات بتن تازه و سخت شده طرح‌های خودتراکم بررسی شده توسط آن‌ها، به نظر می‌رسد جایگزینی ۲۰٪ زئولیت می‌تواند مقدار بهینه مناسبی در نظر گرفته شود، در حالی که ۱۰٪ جایگزینی باعث بیشترین مقاومت فشاری می‌شود. Ashoori و همکاران [۵] طی پژوهشی در خصوص تأثیر زئولیت در بتن به این نتیجه رسیده‌اند که زئولیت موجود در بتن منجر به کاهش مقاومت فشاری در همه سنین عمل‌آوری شده است، با این حال کاهش مقاومت آن به نسبت کاهش وزن سیمان، قابل توجه نیست. همچنین مطالعه نتایج حاصل از نفوذ و جذب آب، تأثیر مناسب جایگزینی تا ۲۰٪ زئولیت را بر دوام بتن تأیید می‌نماید.

Hassan و همکاران [۶] در تحقیقی پیرامون تأثیر متاکائولین بر دوام بتن‌های خودتراکم نشان داده‌اند که اضافه نمودن متاکائولین نیاز به فوق روان کننده را نسبت به میکروسیلیس، کمتر می‌کند. نتایج مقاومت فشاری بتن حاوی متاکائولین و میکروسیلیس در سن ۲۸ روز نشان می‌دهد که هر دو افزودنی متاکائولین و میکروسیلیس مقاومت فشاری بتن خودتراکم را افزایش می‌دهد. در حالی که افزودن متاکائولین ویسکوزیته مخلوط بتن خودتراکم را افزایش می‌دهد، افزودن میکروسیلیس هیچ تأثیری روی ویسکوزیته ندارد. این استنتاج مبتنی بر نتایج آزمایش‌های T50 و V-funnel می‌باشد که نشان‌دهنده افزایش اسلامپ با افزایش درصد متاکائولین در مخلوط SCC است. درصد بهینه متاکائولین در پژوهش فوق با احتساب قابلیت نفوذ یون کلر، ۲۰ درصد به دست آمده است، همچنین افزودن درصد‌های مختلف متاکائولین مقدار نفوذ یون کلر را پایین‌تر آورده است.

نتایج حاصل از تحقیقی که توسط Madandoust و Mousavi [۷] بر روی خواص بتن خودتراکم تازه و سخت‌شده حاوی متاکائولین با نسبت‌های آب به مواد سیمانی ۰/۳۲، ۰/۳۸ و ۰/۴۵ انجام شد، نشان می‌دهد که وجود متاکائولین در بتن خودتراکم مقاومت فشاری را در سنین اولیه و دراز مدت بهبود می‌بخشد. سرعت عبور امواج فراصوت نیز مشابه نتایج مقاومت فشاری است. از دیگر نتایج تحقیق فوق می‌توان اشاره کرد که وجود متاکائولین باعث کاهش جذب آب در بتن خودتراکم شده است. همه مخلوط‌های حاوی متاکائولین جذب آب کمی (کمتر از ۳٪ در ۳۰ دقیقه) داشته‌اند. در همین تحقیق نشان داده شد

جدول ۴- ویژگی‌های فوق روان کننده مورد استفاده

کوپلیمرهای اصلاح شده پلی کربوکسیلیک اسید	ترکیب شیمیایی
آنیونی	طبیعت یونی
سبز تیره	رنگ
مایع	حالت فیزیکی
۷±۱	pH
۱/۱±۰/۰۲ ۲۰°C	وزن مخصوص (kg/lit)
۵۰۰ Max	کلراید (PPM)

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی سیمان و پوزولان‌ها

ترکیب شیمیایی (%)	سیمان	ژئولیت	متاکائولین
SiO <sub>2</sub>	۲۱/۰۴	۶۷/۴۴	۵۲/۱
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۵/۱۲	۱۰/۹	۴۴/۷
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۶	۰/۸۴	۰/۸
MgO	۱/۷۵	۰/۳۳	۰/۰۳
CaO	۶۴/۰۴	۱/۲۴	۰/۰۹
Na <sub>2</sub> O	۰/۶	۳/۷۱	۱/۹
K <sub>2</sub> O	۰/۴۳	۴/۳۹	۰/۰۳
SO <sub>3</sub>	۲/۳۶	۰/۴۷	--
L.O.I	۱/۰۸	۱۱/۰۵	۰/۷

جدول ۲-۲- طرح اختلاط

در این تحقیق نسبت آب به پودر ثابت و به میزان ۰/۴ در نظر گرفته شده که پودر شامل سیمان، پودر سنگ، متاکائولین و ژئولیت می‌باشد. نسبت سنگ‌دانه‌ها بر اساس پیشنهاد Ambrose و همکاران [۱۲] انتخاب و طرح اختلاط بتن خودتراکم منطبق بر روش ارائه شده در مرجع EFNARC [۱۳] تهیه شده است. در ساخت بتن خودتراکم از روش پیشنهادی Tamimi که در پژوهش Hsi-Wen [۱۴] ارائه شده، استفاده گردیده است. مشخصات طرح‌های اختلاط مورد آزمایش در جدول (۵) نشان داده شده است. نحوه نام‌گذاری مخلوط‌های بتن بدین صورت است که حروف، نمایانگر نوع پوزولان و عدد بعد از هر حرف نشان دهنده درصد پوزولان جایگزین سیمان است. به عنوان مثال ZOM10 بیانگر طرح اختلاطی با صفر درصد ژئولیت و ۱۰ درصد متاکائولین می‌باشد.

جدول ۳- خصوصیات فیزیکی سیمان

مقدار مشخصه فیزیکی	مشخصات فیزیکی سیمان مورد استفاده
۱۸۷ دقیقه	زمان گیرش اولیه
۲۷۳ دقیقه	زمان گیرش نهایی
۲۷۸ kg / cm <sup>2</sup>	مقاومت ۳ روزه
۳۴۵ kg / cm <sup>2</sup>	مقاومت ۷ روزه
۴۵۹ kg / cm <sup>2</sup>	مقاومت ۲۸ روزه

جدول ۲-۳- پوزولان

ژئولیت مورد استفاده در این پژوهش با وزن مخصوص ۲۰۶۴ کیلوگرم بر متر مکعب و متاکائولین مصرفی با وزن مخصوص ۲۵۵۱ کیلوگرم بر متر مکعب مطابق با خصوصیات ارائه شده در جدول (۲) بوده است.

جدول ۵- نام‌گذاری طرح‌ها و وزن اجزای آن (kg/m<sup>3</sup>)

ژئولیت	Control	Z10M0	ZOM10	Z5M5	Z10M10
شن SSD	۶۵۵	۶۴۳	۶۴۷	۶۴۸	۶۴۵
ماسه SSD	۸۴۱	۸۳۳	۸۳۹	۸۳۷	۸۲۶
سیمان	۴۵۰	۴۰۵	۴۰۵	۴۰۵	۳۶۰
پودر سنگ	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰
آب اختلاط	۲۳۳	۲۳۳	۲۳۳	۲۳۳	۲۳۳
درصد فوق روان کننده	۱/۵	۱/۹	۱/۹	۱/۸	۲/۲
VMA	۱/۷۱	۱/۷۱	۱/۷۱	۱/۷۱	۱/۷۱
متاکائولین	۰	۰	۴۵	۲۲/۵	۴۵
ژئولیت	۰	۴۵	۰	۲۲/۵	۴۵

جدول ۲-۴- آب و مواد افزودنی

در ساخت مخلوط‌های بتنی از آب شرب استفاده شده است. همچنین از آن‌جا که پودر سنگ از خلل و فرج داخل بتن کاسته و باعث بهبود چسبندگی مخلوط بتن می‌گردد، از پودر سنگی با وزن مخصوص ۲۶۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب و برای رسیدن به خاصیت خودتراکمی مناسب فوق روان کننده‌ای بر پایه پلی-کربوکسیلات کوپلیمر با نام تجاری P100-3R و وزن مخصوص ۱۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، به صورت درصدی از وزن سیمان و پوزولان و با ویژگی‌هایی مطابق با جدول (۴) استفاده شده است.

## ۳-۲- آزمایشات انجام شده

به منظور اطمینان از قرارگیری مخلوط‌های ساخته شده در رده بتن‌های خودتراکم، ابتدا آزمایشات بتن تازه انجام شده و نتایج حاصله با مقادیر آیین‌نامه‌ای مقایسه شده‌اند که نتایج حاصله در جدول (۶) ذکر شده است. از آن‌جا که نتایج حاصل در محدوده مجاز آیین‌نامه EFNARC [۱۳] قرار دارند، تمامی طرح اختلاط‌های مورد بررسی در این تحقیق خصوصیات مورد نیاز جهت طبقه‌بندی به عنوان بتن خودتراکم را دارا می‌باشند (شکل (۱)).



شکل ۱- آزمایش جعبه L شکل و جریان اسلامپ

## جدول ۶- نتایج آزمایش‌های بتن خودتراکم تازه

عنوان آزمایش	کمیت اندازه‌گیری شده	Control	Z10M0	Z10M10	Z5M5	Z10M10	حدود مجاز [۱۳]
جریان اسلامپ	D-final (cm)	۶۸	۶۵	۷۲	۶۹	۶۴	۸۰-۶۵
	T <sub>50</sub> (sec)	۱	۳/۷	۳/۱	۲/۹	۲/۴	۵-۲
L-Box	T-20 (Sec)	۲	۲/۱	۰/۶	۱/۶	۰/۶	--
	T-40 (sec)	۴	۳/۸	۱/۴	۳/۱	۱/۶	--
	(h <sub>2</sub> /h <sub>1</sub> )	۰/۷	۰/۹	۰/۹	۰/۸	۰/۸	۱-۰/۸
V-Funnel	T10 (sec)	۴/۴	۷/۶	۹/۱	۸/۴	۶/۷	۱۲-۸
	T5min	۷	۷/۶	۵/۲	۶/۵	۷/۶	--
J-Ring	D-final (cm)	۶۴	۶۳	۶۹	۶۷	۶۱	--
	(h <sub>2</sub> -h <sub>1</sub> ) (mm)	۹/۳	۹	۸	۷/۶	۸/۳	۱۰-۰

آزمایش مقاومت فشاری: جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری از آزمون‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر که در شرایط

استاندارد عمل‌آوری شدند و در سنین ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰ و ۱۸۰ روز استفاده شده است [۱۵].

**آزمایش عمق نفوذ آب:** جهت انجام آزمایش نفوذ آب بر اساس استاندارد DIN 1048 آزمون‌های استوانه‌ای در سن ۲۸ روز، تحت فشار ثابت ۵ اتمسفر قرار گرفته است. پس از گذشت ۲±۷۲ ساعت نمونه‌ها به دو نیم تقسیم شده و مقدار ماکزیمم عمق نفوذ آب اندازه‌گیری و نتایج ثبت گردیده است [۱۶].

**آزمایش جذب آب حجمی:** درصد جذب آب حجمی بر اساس استاندارد BS 1881 part 122، با آزمون‌های بتن مغزه-گیری شده از سازه یا اجزای پیش ساخته به شکل استوانه به قطر ۷۵ و ارتفاع ۱۵۰-۳۲ میلی‌متر تعیین می‌شود. در این پژوهش اندازه‌گیری جذب آب حجمی با الگوبرداری از استاندارد فوق عمدتاً شبیه به BS 1881 قدیمی، بر روی آزمون‌های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متری در سن ۲۸ روز انجام شد [۱۷].

**مقاومت ویژه الکتریکی:** در سنجش مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌های بتنی، مطابق شکل (۲) از دستگاهی استفاده شده که با فرکانس ۱۲۸ کیلوهرتز و ولتاژ ۳ ولت (جریان AC) و با کمک دو صفحه مسی قرار گرفته بر روی دو وجه مقابل آزمون، مقاومت ویژه الکتریکی بتن محصور در صفحات را اندازه‌گیری می‌کند. برای این منظور از آزمون‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری در سنین ۷، ۱۴، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز استفاده شده است.

برای تعیین مقاومت ویژه الکتریکی، طبق رابطه (۱)، مقاومت ویژه الکتریکی اندازه‌گیری شده در سطح تماس ضرب، و بر طول یا فاصله بین دو صفحه مسی تقسیم شده است [۱۸]:

$$\rho = \frac{Z A}{L} \quad (1)$$

که در آن:

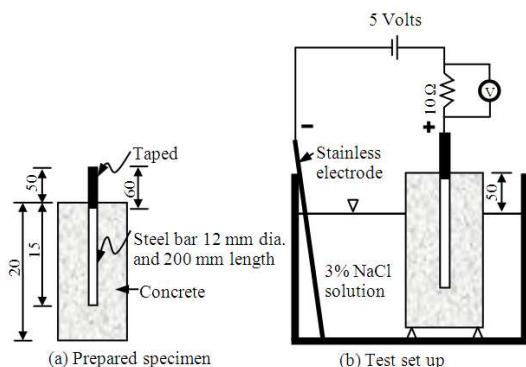
$\rho$  = مقاومت ویژه الکتریکی [Ω.m]

$Z$  = مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده [Ω]

$A$  = سطح مقطع آزمون در تماس با خمیر [m<sup>2</sup>] و

$L$  = ارتفاع آزمون یا فاصله بین دو صفحه مسی [m]

می‌باشد.



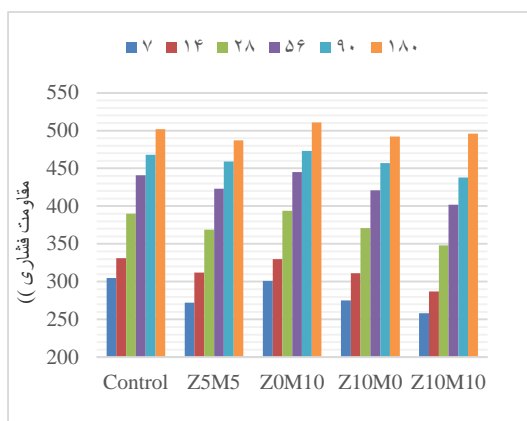
شکل ۳- شماتیک آزمایش خوردگی تسریع شده [۲۰]

نمونه‌ها با قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و در سن ۹۰ روز جهت انجام آزمایش خوردگی تسریع شده، به حوضچه حاوی محلول کلرید سدیم ۵٪ منتقل شده‌اند. قطب مثبت منبع تغذیه به سر میلگرد و قطب منفی به شبکه فلزی در تماس با آب درون حوضچه، متصل می‌باشد. جریان عبوری در این سیستم به صورت روزانه توسط یک مولتی‌متر حساس اندازه‌گیری و محلول الکترولیت جهت حفظ خواص اولیه هر ده روز تعویض شده است.

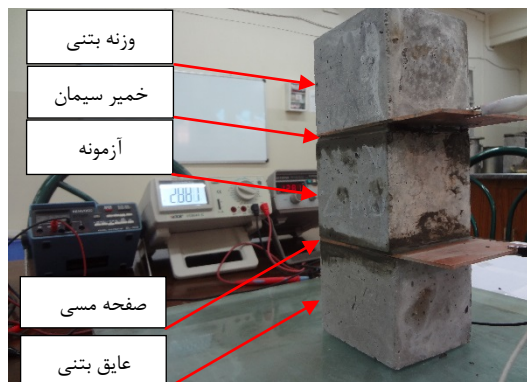
### ۳- نتایج آزمایشات انجام شده

#### ۳-۱- مقاومت فشاری

با بررسی مقاومت فشاری میانگین حاصل از شکست دو آزمون مکعبی برای هر طرح اختلاط در سن ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰ و ۱۸۰ روز که در شکل (۴) نشان داده شده است، مشخص گردید که علی‌رغم کاهش قابل توجه مقدار سیمان مصرفی در نمونه‌های حاوی پوزولان، کاهش مقاومت قابل توجهی را شاهد نیستیم.



شکل ۴- مقاومت فشاری طرح اختلاط‌های مختلف بتن خودتراکم ( $\text{kg/cm}^2$ )



شکل ۲- آماده‌سازی آزمون برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی

آزمایش نفوذ تسریع شده (مهاجرت) یون کلر: در این تحقیق ضریب مهاجرت یون کلر بر اساس استاندارد NTBUILD 492 انجام شده است [۱۹]. نمونه‌های مورد استفاده، استوانه‌ای و به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر و سن آن‌ها ۹۰ روز بوده است. برای انجام آزمایش از محلول ۱۰٪ وزنی NaCl به‌عنوان کاتولیت و محلول ۰/۳ نرمال NaOH به عنوان آنولیت استفاده شده است [۲۰].

در انتها با شکستن آزمون‌ها و پاشش محلول نیترات نقره، عمق نفوذ یون کلر مشخص و بر اساس فرمول (۲) ضریب مهاجرت یون کلر محاسبه شده است:

$$D_{nssm} = \frac{0.239(273+T)L}{(U-2)t} \left( X_d - 0.238 \sqrt{\frac{(273+T)LX_d}{U-2}} \right) \quad (2)$$

که در آن:

$D_{nssm}$ : ضریب مهاجرت غیر پایدار یون کلر، ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )

$U$ : قدر مطلق مقدار ولتاژ اعمال شده، (V)

$T$ : مقدار متوسط درجه حرارت اولیه و نهایی در محلول آنولیت، (درجه سانتی‌گراد)

$L$ : ضخامت نمونه، (میلی‌متر)

$X_d$ : مقدار متوسط عمق نفوذ، (میلی‌متر) و

$t$ : مدت زمان آزمایش (ساعت)، می‌باشند.

آزمایش خوردگی تسریع شده: این آزمایش با الگوبرداری از تحقیقات Horsakulthai و Paopongpaiboon طراحی و در شکل (۳) نحوه انجام آن به صورت شماتیک نمایش داده شده است [۲۰].

ژئولیت و متاکائولین عملکرد بهتری داشته است. می‌توان گفت تشکیل ژل‌های ثانویه ناشی از واکنش  $\text{Ca(OH)}_2$  با  $\text{SiO}_2$  موجود در ژئولیت و متاکائولین و در نتیجه بهتر شدن ریز ساختار بتن و انفصال ارتباط مویینه حفرات جذب آب بتن SCC با افزایش درصد ژئولیت و متاکائولین باعث کاهش جذب آب حجمی آن شده است. با توجه به توصیه‌های CIRIA [۲۲] برای مناطق عربی در حاشیه خلیج فارس و دریای سرخ، که حداکثر جذب آب کوتاه مدت اندازه‌گیری شده مطابق روش BS 1881 part 122، به ۲ درصد محدود شده است، تمامی طرح‌های اختلاط به جز شاهد برای استفاده در مناطق فوق‌الذکر مناسب است.



شکل ۶- جذب آب نمونه‌های مختلف

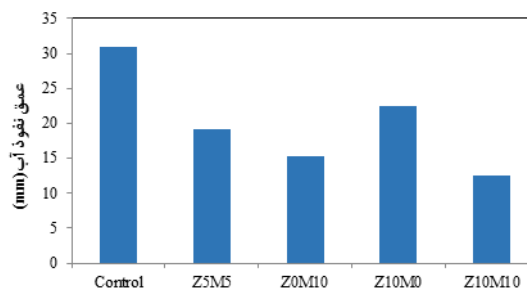
### ۳-۴- مقاومت ویژه الکتریکی

شکل (۷) مقاومت ویژه الکتریکی تمامی طرح‌ها را در سنین ۷، ۱۴، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز نشان می‌دهد. با افزایش سن، به علت انجام واکنش پوزولانی در طرح اختلاط‌های دارای پوزولان مقاومت ویژه الکتریکی این طرح‌ها نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. این روند افزایشی با بیشتر شدن درصد پوزولان جایگزین سیمان و همچنین افزایش سن نمونه‌ها قابل ملاحظه است به طوری که طرح اختلاط خودتراکم Z10M10 با ترکیب ژئولیت و متاکائولین در تمامی سنین بیشترین مقاومت ویژه الکتریکی را کسب کرده است و این مقدار در سن ۹۰ روز به ۴۷/۹ کیلو اهم-سانتی‌متر رسیده است که نسبت به نمونه شاهد با مقاومتی معادل ۱۶/۷، حدود ۲/۹ برابر افزایش داشته است. در مقایسه با طرح‌های دارای ژئولیت با طرح‌های حاوی ترکیب ژئولیت و متاکائولین چنین استنباط می‌گردد که هر چند طرح‌های دارای پوزولان تنها مقاومت ویژه الکتریکی را نسبت به طرح اختلاط شاهد افزایش داده، ولی افزودن متاکائولین به ژئولیت تأثیر به‌سزایی در مقاومت ویژه الکتریکی ایجاد نموده است. علت بهبود مقاومت ویژه الکتریکی در اثر افزودن پوزولان را می‌توان ناشی از این امر دانست که انجام واکنش‌های پوزولانی و تشکیل

همان‌طور که مشاهده می‌شود در سنین ۷ و ۲۸ روز، نمونه شاهد دارای مقاومت بیشتری است که به تدریج با تکمیل واکنش‌های پوزولانی، افزایش مقاومت در سنین بالاتر را شاهد هستیم. به طوری که در طرح اختلاط Z10M10 با وجود کاهش ۲۰ درصدی سیمان مقاومت فشاری در سن ۱۸۰ روز نسبت به نمونه شاهد ۱/۲۱ درصد کاهش داشته است.

### ۳-۲- عمق نفوذ آب

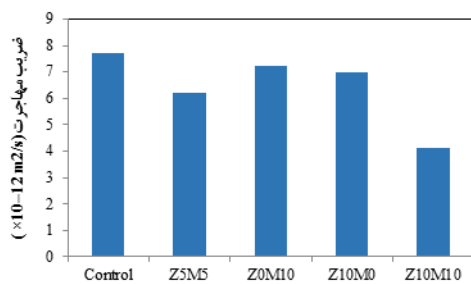
نتایج حاصل از این آزمایش بر روی نمونه‌های مختلف در شکل نشان (۵) داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، افزودن پوزولان به مخلوط SCC باعث بهبود قابل ملاحظه‌ی مقاومت در برابر نفوذ آب نسبت به نمونه شاهد شده است. بر اساس نتایج به دست آمده کمترین نفوذ آب مربوط به طرح Z10M10 است که بهبود ۲۴۶ درصدی نسبت به نمونه شاهد، را نشان می‌دهد. می‌توان گفت عمق نفوذ آب با درصد پوزولان جایگزین سیمان نسبت عکس دارد و نیز ترکیب پوزولان‌های ژئولیت و متاکائولین در مقایسه با طرح‌های تک پوزولانی عملکرد بهتری داشته است. ذرات پوزولان به علت اندازه ریز خود خلل و فرج ریز ساختار خمیر سیمان را پر کرده و باعث شده خلل و فرج بتن کمتر و در نتیجه باعث کاهش نفوذپذیری آن شده است. در مقایسه با الزامات آیین‌نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان (پیشنهادی) [۲۱]، به جز نمونه شاهد که در شرایط محیطی متوسط قرار گرفته است، تمامی طرح‌ها در محدوده شرایط محیطی شدید قابل استفاده می‌باشد.



شکل ۵- عمق نفوذ آب در نمونه‌های مختلف

### ۳-۳- جذب آب حجمی

با بررسی نتایج این آزمایش که در شکل (۶) نشان داده شده، نتیجه می‌شود که طرح‌های حاوی ترکیب پوزولان‌های ژئولیت و متاکائولین در مقایسه با بتن شاهد جذب آب کمتری داشته‌اند و در مقایسه با نمونه‌های حاوی پوزولان تنها نیز ترکیب



شکل ۸- ضریب مهاجرت یون کلر در سن ۹۰ روز

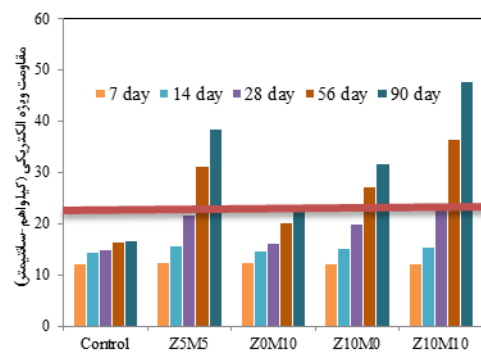
کمترین مقدار نفوذ یون کلر مربوط به طرح Z10M10 است که مقدار ضریب نفوذ کلر را ۸۸ درصد نسبت به نمونه شاهد بهبود بخشیده است. علت این کاهش را می‌توان خاصیت چسبندگی و عملکرد زئولیت و متاکائولین به عنوان پرکننده بتن دانست. با پر شدن منافذ به وسیله محصولات واکنش پوزولانی و کم شدن تخلخل ناحیه انتقالی و دیگر حفرات، ساختار متراکم‌تر با محصولات C-S-H مشاهده می‌گردد که منجر به کاهش نفوذ یون کلر یا به عبارتی کاهش ضریب مهاجرت در بتن خودتراکم حاوی پوزولان می‌شود.

### ۳-۶- خوردگی تسریع شده

در شکل (۹) روند تغییرات جریان عبوری نمونه‌های استوانه-ای دارای میلگرد تحت اختلاف پتانسیل ثابت ۱۲ ولت در محلول NaCl پنج درصد نشان داده شده است. طرح‌های دارای پوزولان جریان عبوری اولیه کمتری نسبت به نمونه شاهد داشته‌اند، که نشانگر کاهش رسانایی بتن ناشی از انسداد و قطع اتصال زنجیر بین حفرات و همچنین کوچک‌تر شدن ارتباط حفرات متأثر از واکنش‌های پوزولانی است. از آن‌جا که رسیدن جریان به آرماتور از طریق زنجیره حفرات داخل بتن صورت می‌گیرد لذا با انسداد بسیاری از این زنجیره‌ها به دلیل تشکیل ژل‌های ثانویه سیلیکات جریان کمتری از این نمونه‌ها عبور نموده است.

در طول اندازه‌گیری جریان اولیه نمونه‌ها مشاهده شد که شروع ترک ابتدا پس از ثابت بودن جریان در یک بازه زمانی، با تغییر ناگهانی جریان حداقل به میزان ۵ میلی‌آمپر اتفاق می‌افتد که این امر ناشی از وقوع ترک‌های ریز در بتن و برقراری ارتباط بیشتر محلول با آرماتور می‌باشد و پس از چند روز با تسریع روند خوردگی و به تبع آن افزایش محصولات ناشی از خوردگی، ترک‌ها بزرگ‌تر گردیده و به وضوح قابل مشاهده می‌شود، که نمونه‌ای از آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

ژل سیلیکاتی ثانویه حاصل از این واکنش‌ها باعث ریزتر شدن حفرات و انفصال زنجیره بین حفرات شده و در نتیجه با کاهش حجم فضاهای خالی در بتن، انسجام بیشتر بتن و افزایش مقاومت ویژه الکتریکی آن شده است. از مقایسه این نتایج با رابطه مقاومت الکتریکی ویژه و احتمال خوردگی می‌توان نتیجه گرفت احتمال خوردگی در همه طرح‌های دارای پوزولان کمتر از نمونه شاهد است. بر اساس جدول (۷) در سن ۹۰ روز کلیه طرح‌های دارای ترکیب زئولیت و متاکائولین در محدوده احتمال خوردگی کم (بیشتر از ۲۰ کیلو اهم-سانتی‌متر) قرار می‌گیرد، در صورتی که نمونه شاهد در محدوده احتمال خوردگی متوسط (بین ۱۰-۲۰ کیلو اهم-سانتی‌متر) می‌باشد.



شکل ۷- مقاومت ویژه الکتریکی و احتمال خوردگی آرماتور

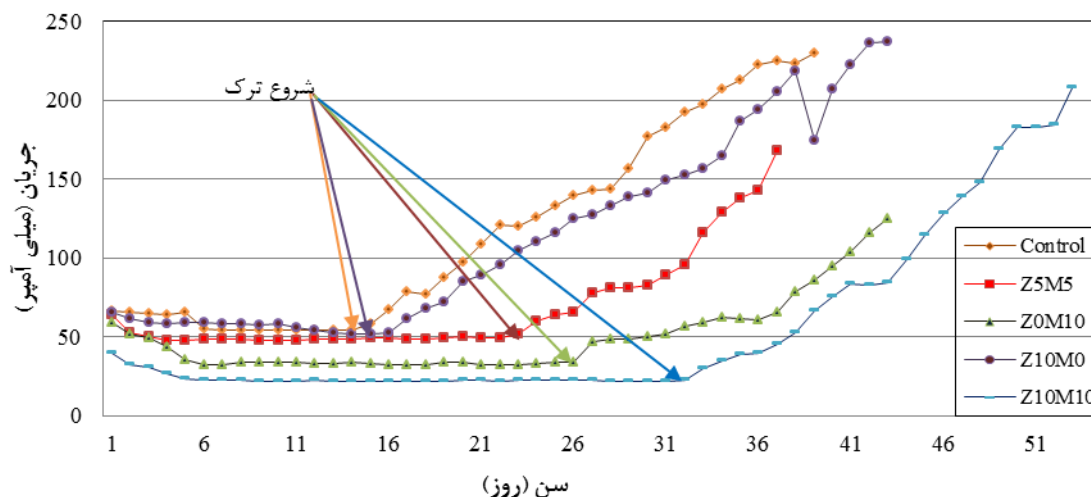
### جدول ۷- رابطه بین مقاومت الکتریکی ویژه بتن و احتمال

#### خوردگی آرماتور [۲۳]

مقاومت الکتریکی ویژه بیشتر از ۲۰ کیلو اهم - سانتی‌متر	احتمال خوردگی کم است
مقاومت الکتریکی ویژه بین ۱۰-۲۰ کیلو اهم - سانتی‌متر	احتمال خوردگی متوسط است
مقاومت الکتریکی ویژه بین ۵-۱۰ کیلو اهم - سانتی‌متر	احتمال خوردگی زیاد است
مقاومت الکتریکی ویژه کمتر از ۵ کیلو اهم - سانتی‌متر	احتمال خوردگی بسیار زیاد است

### ۳-۵- نفوذ تسریع شده (مهاجرت) یون کلر

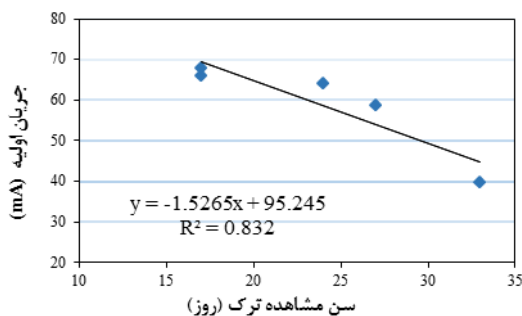
شکل (۸) نتایج ضریب مهاجرت یون کلر را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل تمام طرح‌های حاوی پوزولان چه به صورت تنها و چه ترکیبی نفوذ یون کلر در بتن را کاهش داده‌اند.



شکل ۹- تغییرات جریان عبوری در نمونه‌ها

بیشترین سن مشاهده ترک مربوط به طرح Z10M10 می- باشد که نسبت به نمونه افزایشی حدود ۱/۹۴ برابری را نشان می‌دهد.

در شکل (۱۲) ارتباط بین جریان اولیه و سن وقوع ترک نشان داده شده است. می‌توان چنین گفت که استفاده از ژئولیت و متاکائولین باعث انفصال حفرات، تشکیل بلورهای ریزتر و کوچک شدن حفرات به دلیل پر شدن با محصولات واکنش پوزولانی، شده است که این عوامل جریان عبوری اولیه از بتن خودتراکم را کاهش داده است. در این پژوهش با بررسی و مقایسه ۵ طرح اختلاط مورد آزمایش، به نظر می‌رسد هر چه درصد پوزولان جایگزین سیمان افزایش یافته، جریان عبوری از نمونه و در نتیجه رسانایی بتن کاهش یافته است که این امر منجر به کند شدن واکنش آندیک در بتن شده و خوردگی آرماتور در زمان طولانی‌تری انجام می‌گیرد و به تبع آن سن مشاهده ترک نیز افزایش یافته است.

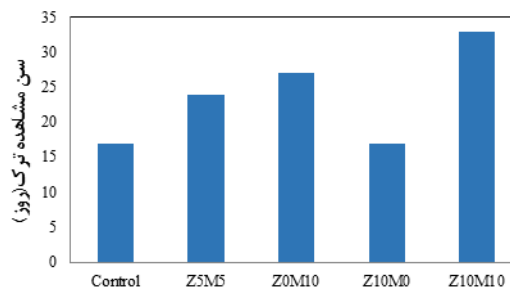


شکل ۱۲- ارتباط بین جریان عبوری اولیه و سن مشاهده ترک



شکل ۱۰- آزمون حین و بعد از آزمایش خوردگی تسریع شده

برای بررسی نقش پوزولان‌ها در مکانیسم خوردگی، در شکل (۱۱) نتایج سن مشاهده ترک طرح‌ها نیز ارائه شده است. این شکل نشان دهنده تأثیر مناسب ژئولیت و متاکائولین بر مقاومت در برابر خوردگی در مخلوط SCC می‌باشد. در مقایسه نمونه شاهد با طرح‌های دارای ژئولیت و متاکائولین مشاهده می‌شود که این طرح‌ها عملکرد بهتری در برابر ترک خوردگی داشته‌اند.



شکل ۱۱- سن مشاهده ترک در نمونه‌های حاوی پوزولان و شاهد



۴) در طرح‌های حاوی پوزولان با بالا رفتن سن و بیشتر شدن مقدار پوزولان مقاومت ویژه الکتریکی نیز افزایش یافته است. این مقدار افزایش در طرح‌های حاوی ترکیب ژئولیت و متاکائولین به مراتب بیشتر می‌باشد.

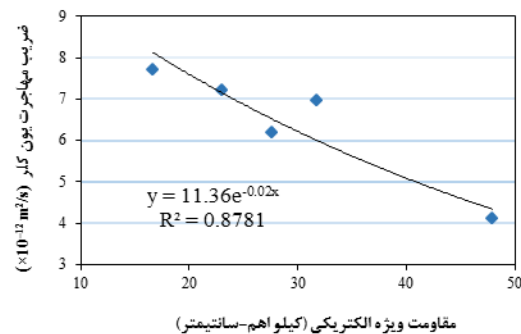
۵) افزودن پوزولان‌های ژئولیت و متاکائولین به بتن خودتراکم، ضریب نفوذ (مهاجرت) یون کلر را کاهش می‌دهد.

۶) افزودن پوزولان‌ها، مقاومت بتن خودتراکم در برابر خوردگی را به شدت افزایش می‌دهد. ترکیب پوزولان‌های ژئولیت و متاکائولین بر میزان جریان عبوری از بتن تأثیرگذار می‌باشد. افزودن متاکائولین باعث بهبود عملکرد ژئولیت در مقاومت در برابر خوردگی شده است.

#### ۵- مراجع

- [1] Page, C. L., Vennesland, O., "Pore Solution Composition and Chloride Binding Capacity of Silica Fume Cement Pastes", *Material and Structure*, 1983, 16 (91), 19-25.
- [2] Dipayan, J., "Clinoptilolite-A promising pozzolan in concrete", *Construction Materials Consultants*, Greenburg, PA, US, 2006.
- [3] Vejmelková, E., Ondráček, M., Černý, R., "Mechanical and Hydric Properties of High Performance Concrete Containing Natural Zeolites", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2012, 63.
- [4] Kazemian, A., Ramezani pour, A. A., Sarvari, M., Ahmadi, B., Moghadam, M. A., "Investigation of Fresh Properties and Durability Of Natural Zeolite Incorporated Eco-SCC", *The 10<sup>th</sup> International Congress on Advances in Civil Engineering*, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 17-19 October, 2012.
- [5] Ashoori, P., Madandoust, R., Sobhani, J., "Concrete Made with zeolite and Meakaolina Comparison on the Strength and Durability Properties", *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, 2013, 14 (4), 533-543.
- [6] Hassan, A. A. A., Lachemi, M., Khandaker M, A.H., "Effect of Metakaolin and Silica Fume on the Durability of Self-Consolidating Concrete", *Cement & Concrete Composites*, 2012, 34, 801-807.
- [7] Madandoust, R., Mousavi, Y., "Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete Containing Metakaolin", *Construction and Building Materials*, 2012, 35, 752-760.

شکل (۱۳) ارتباط بین ضریب مهاجرت یون کلر و مقاومت ویژه الکتریکی را نشان می‌دهد. با توجه به این که مقاومت الکتریکی با شدت جریان رابطه معکوس دارد و از طرفی مطابق قانون فارادی شدت جریان با آهنگ خوردگی و عمق نفوذ رابطه مسقیم دارد [۲۴]، بنابر این هرچه جریان کمتر باشد مقاومت الکتریکی افزایش یافته و عمق نفوذ کم می‌گردد. صحت این مطلب در شکل مذکور مشخص است.



شکل ۱۳- ارتباط بین ضریب مهاجرت یون کلر و مقاومت ویژه الکتریکی

#### ۴- نتیجه‌گیری

بر اساس آزمایش‌های انجام گرفته بر روی ۵ طرح اختلاط بتن خودتراکم و با اندازه‌گیری مقاومت فشاری، مقاومت ویژه الکتریکی، عمق نفوذ آب، جذب آب حجمی و همچنین آزمایشات نفوذ تسریع شده یون کلر و خوردگی تسریع شده در سنین مختلف نتایج زیر حاصل شده است:

۱) طرح اختلاط‌های حاوی پوزولان در سنین پایین مقاومت فشاری کمتری نسبت به نمونه شاهد داشته است. ولی با افزایش سن تا ۱۸۰ روز و تکمیل شدن واکنش‌های پوزولانی مقاومت فشاری این طرح‌ها نزدیک به نمونه شاهد گردیده و حتی در طرح اختلاط ZOM10 مقاومت فشاری بیشتر از نمونه شاهد شده است.

۲) تمامی طرح اختلاط‌های حاوی پوزولان چه به صورت ترکیبی و چه تنها باعث کاهش عمق نفوذ آب در بتن خودتراکم در سن ۲۸ روز گردیده است.

۳) در مجموع تمامی طرح‌های حاوی پوزولان‌های ژئولیت و متاکائولین در مقایسه با نمونه شاهد کاهش جذب آب داشته است. ولی ترکیب این دو پوزولان عملکرد بهتری نشان داده. به طوری که طرح اختلاط Z10M10، ۳۰ درصد کاهش جذب آب داشته است.

- on Concrete", ACI Materials Journal, 2009, 106 (3), 258-264.
- [19] NT BUILD 492, "Chlorid Emigration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments", published by NORDTEST, 1999.
- [20] Horsakulthai, V., Paopongpaiboon, K., "Strength, Chloride permeability and Corrosion of Coarse Fly Ash Concrete with Bagassrice Husk-Wood Ash Additive", American Journal of Applied Sciences, 2013, 10, 239-246.
- [۲۱] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، "آیین‌نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان (پیشنهادی)"، نشریه شماره ض-۴۲۸، تهران، ایران، ۱۳۸۴.
- [22] CIRIA, "The CIRIA Guide for Concrete Construction in the Gulf Region", Construction Industry Research and Information Association, Ministry of Housing and Construction, Department of the Environment, London, 1984.
- [23] Song, W. H., Saraswathy, V., "Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures - A Review", International Journal of Electrochemical Science, 2007, 2, 1-28.
- [24] Ijsseling, F. P., "Application of Electrochemical Methods of Corrosion rate Determination to System Involving Corrosion Product Layers", Br Corrosion Journal, 1986, 21 (2), 95-101.
- [8] Ramezaniapour, A. A., Bahrami Jovein, H., "Influence of Metakaolin as Supplementary Cementing Material on Strength and Durability of Concretes", Construction and Building Materials, 2012, 30, 470-479.
- [9] Vejmelkova, E., et al., "igh Performance Concrete with Czech Metakaolin: Experimental Analysis of Strength, Toughness and Durability Characteristics", Construction and Building Materials, 2010, 24, 1404-1411.
- [10] ASTM C 33-03, "Standard Specification for Concrete Aggregates", Annual Book of ASTM Standards, ASTM, US, 2003.
- [11] ASTM C188-03., "Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement", American Society for Testing and Materials, US, 2003.
- [12] Ambrose, J., Rols, S., Pera, I., "Self-Leveling Concrete Design and Properties", Concrete Science and Engineering, 1999, 1, 140-147.
- [13] EFNARC, "Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete", European Federation, 2002.
- [14] Hsi-Wen, C., "Design and Testing of Self-Compacting Concrete", PhD, Thesis, University of London, London, UK, 1998.
- [15] BS 1881 Part 117, "Method for Determination of Tensile Splitting Strength", BS, UK, 1993.
- [16] DIN 1048, "Concrete Hardendetermination of the Depth of Penetration Water under Pressure", 1974.
- [17] BS 1881 Part 122, "Test for Determining the Initial Surface Absorption", British Standards Institution, UK, 1983.
- [18] McCarter, W. J., Starrs, G., Kandasami, S., Jones, R., Chrisp, M., "Electrode configurations for Resistivity Measurements