

## خواص بتن ساخته شده با متاکائولن در شرایط متفاوت عمل آوری

فرهاد مصباح ایراندوست<sup>۱</sup>، محمد هادی علیزاده الیزئی<sup>۲</sup>، سید حسین منتظری<sup>۳</sup>، محمدرضا زمانی

ابیانه<sup>\*۴</sup>

۱- کارشناسی ارشد عمران-سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد پرند، تهران، ایران

۲- عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رودهن، تهران، ایران

۳- کارشناسی ارشد عمران-سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رودهن، تهران، ایران

۴- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد پرند، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران

چکیده:

این مقاله به مطالعه آزمایشگاهی بتن حاوی درصد‌های مختلف متاکائولن خواهد پرداخت. نمونه‌های حاوی ۵،۰، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد متاکائولن مورد آزمایش‌های مقاومت فشاری، الکتریکی و جذب آب قرار گرفته‌اند. برای هر آزمایش ۹ نمونه قالب گیری شد، که سه تای آن ۲۸ روز در آب، سه تای دیگر ۷ روز در آب و بقیه ۲۸ روز در هوای آزاد عمل‌آوری شدند، تا تاثیر نوع عمل‌آوری نیز بر روی نمونه‌ها بررسی شود. نمونه‌های حاوی ۱۵٪ متاکائولن بهترین عملکرد را در آزمایش‌ها داشته‌اند و بالاترین مقاومت فشاری و الکتریکی و کمترین جذب آب را داشته‌اند. برای تمام نمونه‌های آزمایش شده بهترین عملکرد برای نمونه‌های ۲۸ روز عمل‌آوری شده در آب بدست آمد.

کلمات کلیدی: متاکائولن، شرایط عمل‌آوری، مقاومت الکتریکی، جذب آب

امروزه استفاده از مواد افزودنی در مخلوط‌های بتن مورد توجه قرار گرفته است. مواد افزودنی باعث اصلاح ساختار بتن شده و این اصلاحات در ساختار کامپوزیت‌های سیمانی موجب افزایش دوام و طول عمر بتن خواهند شد.

یکی از گسترده‌ترین افزودنی‌های مورد استفاده در بتن مواد پوزولانی می‌باشند که دارای دو دسته کلی هستند. دسته اول که از پسماندهای صنایع بدست می‌آیند مانند خاکستر بادی، میکروسیلیس و ... و دسته دوم مواد پوزولانی طبیعی می‌باشند مانند: تراس و ...

در دو دهه اخیر علاقه به استفاده از متاکائولن به عنوان ماده افزودنی بتن که خاصیت پوزولانی دارد افزایش یافته است.

رواج این پوزولان را می‌توان بدلیل فرآیند کنترل شده تولید آن و اثرات کم زیست محیطی آن دانست. [۱] ارزان بودن متاکائولن به نسبت برخی از پوزولان‌ها (مانند: میکروسیلیس) از دیگر عوامل توجه به این پوزولان می‌باشد. [۲]

متاکائولن جزء مواد آمورف با سطح مخصوص بسیار بزرگ و دارای اکسید اسیدی بالایی بوده و اصلی‌ترین اجزا آن آلومینا و سیلیکا می‌باشد.

متاکائولن، با گرما دادن به خاک رس کائولیت در دمای ۶۵۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی گراد بدست می‌آید. کلسیم هیدروکسید موجود در سیمان پرتلند با متاکائولن واکنش می‌دهد و C-S-H و C2ASH را تولید می‌کند. همین امر باعث بهبود و کاهش تخلخل در بتن می‌شود. [۳ و ۴]

تحقیقات زیادی بر روی متاکائولن صورت پذیرفته که شامل دو شاخه اصلی می‌باشد [۵ و ۶]. دسته اول به بررسی ساختمان کائولین و روش‌های تبدیل آن به متاکائولن پرداخته‌اند [۷-۹]. و دسته دوم به بررسی رفتار پوزولانی متاکائولن و تاثیرات آن روی خواص سیمان و بتن متمرکز شده‌اند. [۱۰-۱۲] تحقیقات استفاده از متاکائولن را موجب بهبود خواص مکانیکی بتن می‌دانند. [۱۳-۱۵] که این امر در سنین اولیه مشهودتر است.

در این مقاله، به بررسی مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی، جذب آب بتن حاوی متاکائولن پرداخته‌ایم. مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی نمونه‌های حاوی متاکائولن (۰.۵٪ و ۱.۰٪ و ۱.۵٪ و ۲.۰٪) انجام شد.

## برنامه آزمایشگاهی

بررسی‌های انجام شده بر روی درصد‌های مختلف متاکائولن انجام شد. آزمایش‌های مقاومت فشاری، جذب آب و مقاومت الکتریکی در شرایط مختلف عمل‌آوری روی نمونه‌ها صورت پذیرفت.

## خواص مواد

تمام مصالح استفاده شده در این تحقیق تولید شده در ایران می‌باشند. مواد سیمانی استفاده شده در این مطالعه سیمان تیپ دو تولید کارخانه سیمان تهران و متاکائولن از شرکت آسان سرام تهیه شد. جدول ۱ مواد تشکیل دهنده مواد سیمانی را نشان می‌دهد. همچنین از فوق روان کننده Glenium 110P با پایه کربوکسیلیک تولید شرکت BASF در مخلوط‌ها استفاده شد.

سنگدانه‌های مصرفی از شرکت متوساک تهیه شده‌اند که شامل شن شکسته با دانه‌بندی یکنواخت و ماکزیمم اندازه دانه‌های ۱۹ میلی‌متر، وزن مخصوص  $\frac{2.7}{\text{cm}^3}$  gr و ماسه رودخانه‌ای دارای وزن مخصوص  $\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$  ۲/۲۵ و جذب آب ۱/۴ درصد و مدول نرمی ۲/۹۶ و دانه بندی یکنواخت می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی و فیزیکی مواد سیمانی

	مشخصات شیمیایی (%)	
	سیمان	متاکائولن
SiO <sub>2</sub>	21	52.37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5	43.51
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	0.86
CaO	62	0.2
MgO	1.8	0.15
SO <sub>3</sub>	1.6	-
مشخصات فیزیکی		
جرم مخصوص	3.15	2.67
میانگین اندازه دانه ها	13μm	40nm
سطح ویژه (m <sup>2</sup> /g)	0.38	1.27

### روش اختلاط

مخلوط‌های بتنی آزمایش شده حاوی درصد‌های متفاوت متاکائولن با عیار ثابت ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان می‌باشند. برای بدست آوردن مقدار کارایی لازم، مقدار ثابت ۲ کیلوگرم بر متر مکعب فوق روان کننده در مخلوط‌ها استفاده شد. در جدول ۲ میزان مصالح مصرفی در مخلوط‌ها آورده شده است.

جدول ۲: طرح اختلاط	
۴۰۰	سیمان
۱۶۰	آب
۱۰۲۲	شن

۸۵۰	ماسه
۰/۴	نسبت آب به سیمان

میزان درصد آب به مواد سیمانی در این تحقیق ثابت و مقدار ۰,۴ می باشد. حداکثر مقدار جایگزینی مواد پوزولانی با سیمان حداکثر ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است که شامل ۰,۵٪، ۱,۰٪، ۱,۵٪ و ۲,۰٪ جایگزینی متاکئولن می باشد. جزئیات درصدهای جایگزینی پوزولان متاکئولن با سیمان در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳: درصدهای جایگزینی پوزولان های متاکئولن و میکروسیلیس با سیمان

شماره اختلاط	متاکئولن	سیمان
۱	۰	۱۰۰
۲	۵	۹۵
۳	۱۰	۹۰
۴	۱۵	۸۵
۵	۲۰	۸۰

روند اختلاط به این صورت می باشد که ابتدا شن و ماسه در مخلوط کن ریخته شده و سپس مخلوط سیمان و پوزولان که با آب و فوق روان کننده مخلوط شده اند به اختلاط اضافه می شود. از هر طرح اختلاط ۱۸ نمونه استوانه ای و مکعبی گرفته شد. ۲۷ نمونه گرفته شده شامل ۹ نمونه استوانه ایی ۱۰۰\*۲۰۰ میلی متر برای آزمایش مقاومت فشاری و ۹ مکعب ۱۰۰\*۱۰۰\*۱۰۰ برای آزمایش مقاومت اکتريکی و جذب آب می باشد. برای بررسی تاثیر شرایط عمل آوری بر روی نمونه ها، یک سوم نمونه ها برای مدت ۲۸ روز در آب و یک سوم دیگر برای مدت ۷ روز در آب و بقیه نمونه ها ۲۸ روز در هوای آزاد رها شدند.

### روند آزمایش

آزمایش های مقاومت فشاری، جذب آب و مقاومت الکتریکی بر روی نمونه های بتنی صورت گرفت.

#### مقاومت فشاری

برای هر طرح اختلاط ۹ نمونه استوانه ایی ۱۰۰\*۲۰۰ میلی متر تهیه شد که تمام آن ها در سن ۲۸ روزگی در شرایط متفاوت عمل آوری مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. ۳ نمونه در هوای آزاد، ۳ نمونه ۷ روز در آب و ۳ نمونه دیگر ۲۸ روز در آب عمل آوری شده بودند. مقاومت فشاری اعلام شده برای هر طرح اختلاط میانگین مقاومت ۳ نمونه می باشد.

## جذب آب

انجام آزمایش جذب آب بر روی نمونه‌ها در سن ۲۸ روز انجام شد. ابتدا نمونه‌ها در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد قرار گرفته اند تا کاملاً خشک شوند ( یعنی بعد از ۲۴ ساعت بیشتر ۰,۵ درصد کاهش وزن نداشته باشند). بعد وزن شده، و سپس درون آب با دمای ۲۰ درجه قرار می‌گیرند. پس از اینکه نمونه کاملاً اشباع شد ( یعنی بعد از ۲۴ ساعت بیشتر ۰,۵ درصد افزایش وزن نداشته باشند). از آب خارج شده و پس از خشک کردن سطح نمونه، وزن می‌شود. طبق ASTM C642 حداقل زمان قرارگیری نمونه‌ها در کوره و آب بترتیب ۳ و ۲ روز می‌باشد. با استفاده از تفاضل وزن خشک و خیس نمونه‌ها، میزان درصد جذب آب تعیین می‌گردد. [۲۶]

## مقاومت الکتریکی

از هر طرح اختلاط ۹ مکعب ۱۰\*۱۰\*۱۰ سانتی متری جهت تعیین مقاومت الکتریکی بتن در نظر گرفته شد قالب گیری شد در هر محیط عمل آوری ۳ مکعب نگهداری شد. [۳۷-۳۵] آزمایش طبق روش AC Impedance Spectrometry (ACIS) انجام شد. در آزمایش از فراکنس ۱,۵ KHz و در شرایط اشباع با سطح خشک نمونه های بتنی استفاده شد.

مقاومت الکتریکی از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\rho = \frac{A \cdot R}{L}$$

$\rho$ : مقاومت الکتریکی برحسب کیلو اهم سانتی متر

$A$ : مساحت سطح نمونه برحسب سانتی متر مربع

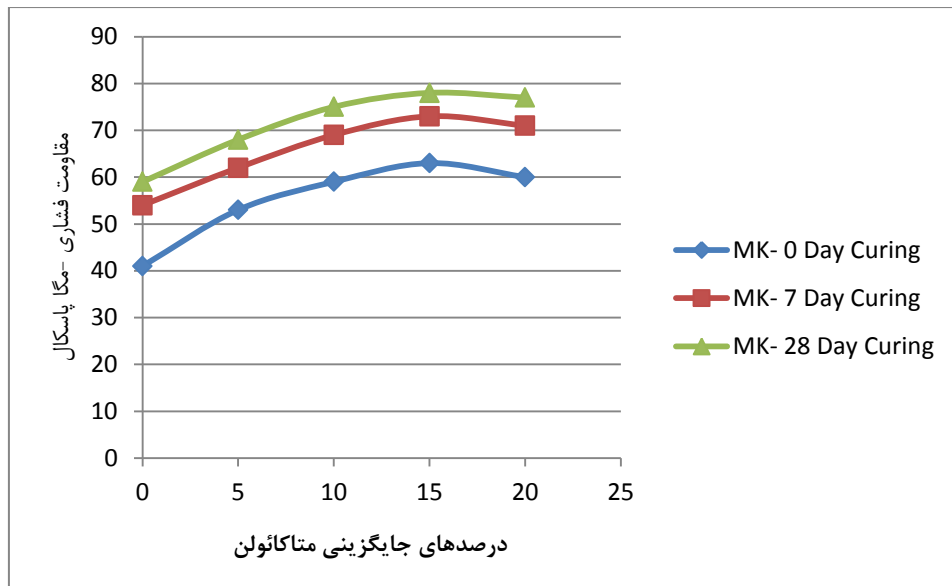
$L$ : مقاومت برحسب کیلو اهم

$R$ : طول نمونه‌ها برحسب سانتی متر

## نتایج آزمایش‌ها و بحث بروی آن

### مقاومت فشاری

مقادیر بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی درصد‌های متفاوت متاکائولن در شکل ۱ آمده است.

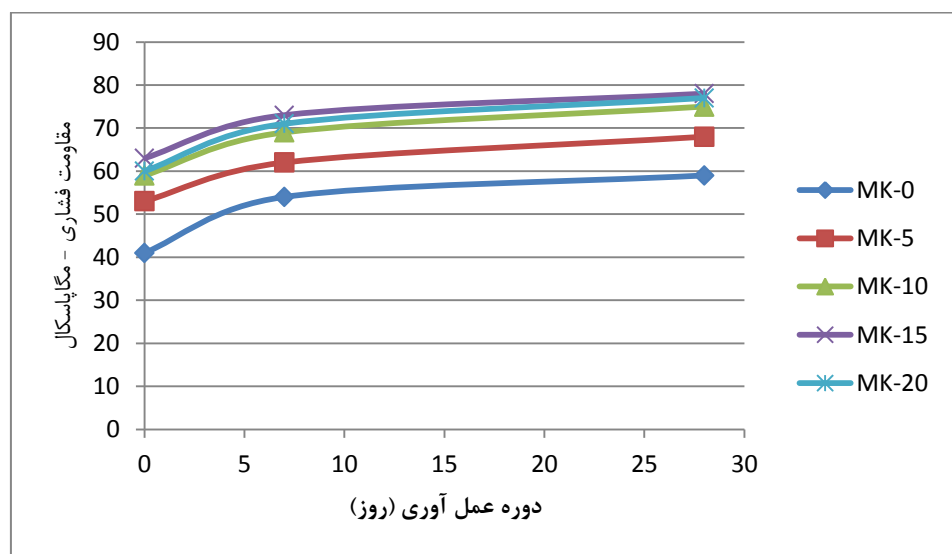


شکل ۱: مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی درصدهای متفاوت متاکائولن

مقاومت فشاری به طور قابل ملاحظه‌ای با افزودن متاکائولن افزوده خواهد شد که این افزایش در مقاومت را در هر سه نوع عمل‌آوری مشاهده می‌کنیم. درصدی از متاکائولن که منجر به بیشترین مقاومت در نمونه های بتنی شده است با توجه به شکل ۱ برابر ۱۵٪ می‌باشد.

همانطور که انتظار می‌رود در تمام نمونه‌ها با افزایش طول عمل‌آوری در آب مقاومت فشاری نیز افزایش می‌یابد.

مقادیر مقاومت فشاری بر دوره‌های عمل‌آوری آن‌ها را نشان می‌دهد. در این نمودارها می‌توان مشاهده کرد که برای تمام نمونه‌ها بالاترین مقاومت فشاری برای نمونه‌هایی بدست آمده که ۲۸ روز در آب عمل‌آوری شده‌اند و سپس مربوط به نمونه‌هایی با ۷ روز عمل‌آوری و در نهایت برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در هوا می‌باشد.

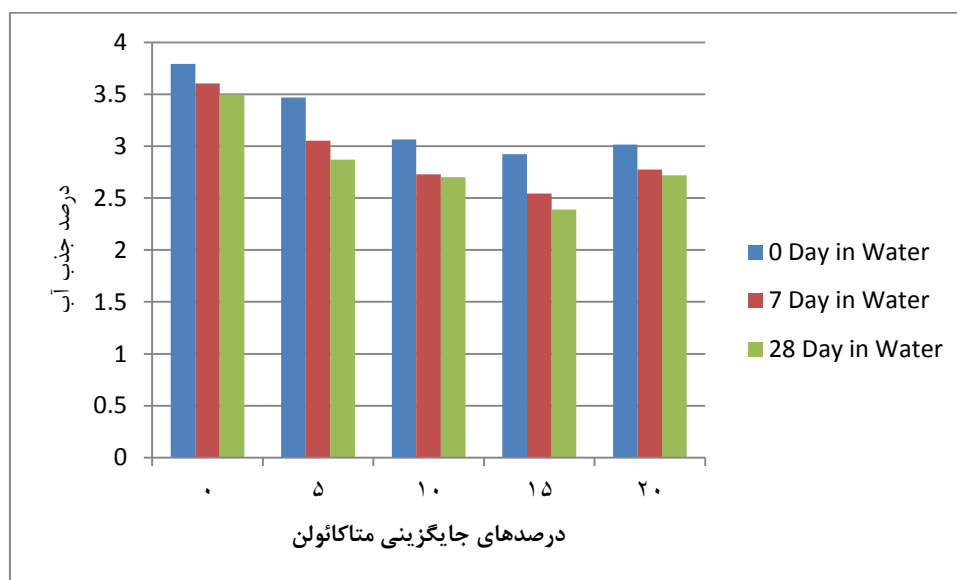


شکل ۲: تاثیر شرایط عمل‌آوری روی مقاومت فشاری

## آزمایش جذب آب

آزمایش جذب آب یکی از روش‌هایی می‌باشد که در تعیین نفوذپذیری بتن استفاده می‌شود. از مزایای این روش در دسترس بودن وسایل مورد نیاز برای این آزمایش است. از شکل ۳ می‌شود متوجه شد که در تمام نمونه‌های حاوی متاکائولن دارای درصد جذب آب کمتری نسبت به نمونه شاهد هستند. دلیل این کاهش را می‌توان مربوط به اثرپرکننده‌گی و واکنش‌های پوزولانی متاکائولن دانست.

در تمام نمونه‌ها با افزایش درصد پوزولان درصد جذب آب کاهش می‌یابد و تنها استثنا نمونه حاوی ۲۰٪ متاکائولن می‌باشد که از این روند تبعیت نکرده و کمی جذب آب آن نسبت به نمونه با ۱۵٪ متاکائولن بیشتر می‌باشد. اثر رقیق‌سازی کلینکر را می‌توان دلیل این امر دانست. کمترین درصد جذب آب مربوط به نمونه حاوی ۱۵٪ متاکائولن با ۲۸ روز عمل‌آوری در آب به مقدار ۲/۳۹ درصد می‌باشد.



شکل ۳: مقدار جذب آب نمونه‌های حاوی متاکائولن

## آزمایش مقاومت الکتریکی

آزمایش مقاومت الکتریکی یکی از آزمایش‌ها رایج در بررسی پایایی بتن می‌باشد. بتن تحت اثر میدان الکتریکی همانند یک خازن به همراه مقاومت عمل می‌کند. با تغییر فرکانس جریان الکتریکی می‌توان به مقاومت حقیقی بتن دست یافت. بتن‌هایی با مقاومت ویژه بیشتر از ۲۰ کیلو اهم سانتی متر در برابر نفوذ یون کلر مقاوم هستند.

طبق معیارهای موجود در ACI-222، خطر خوردگی براساس مقاومت الکتریکی به چهار بخش تقسیم می‌شود که در جدول زیر آمده است.

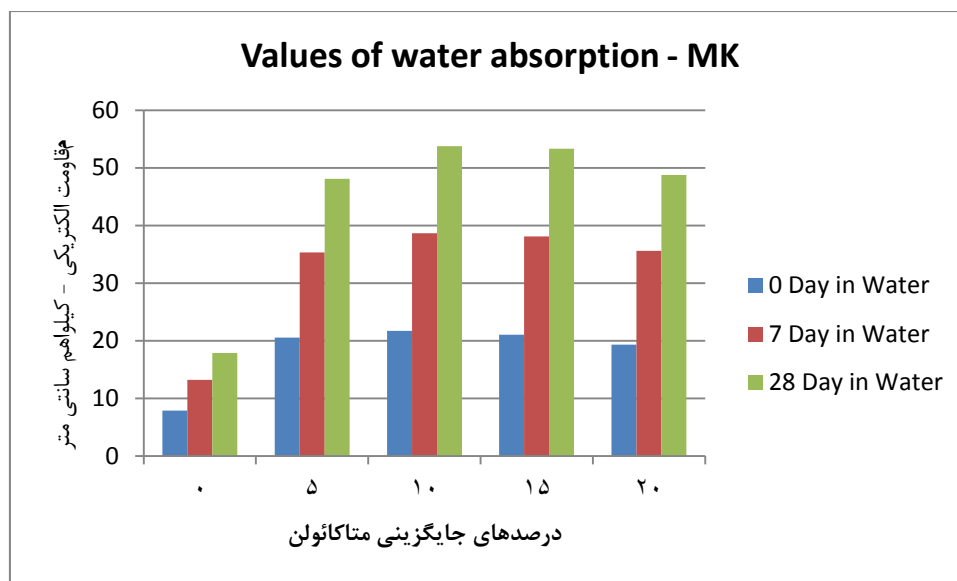
جدول ۱: تاثیر مقاومت الکتریکی بتن بر آهنگ خوردگی آرماتور

مقاومت ویژه الکتریکی (kΩ-cm)	آهنگ خوردگی
<۵	خیلی زیاد
۵ تا ۱۰	زیاد
۱۰ تا ۲۰	متوسط تا کم
>۲۰	ناچیز

آزمایش مقاومت الکتریکی برای تمام نمونه ها در شرایط مختلف عمل آوری در شکل ۴ آورده شده است. نمونه ها قبل از آزمایش ۴۸ ساعت در آب قرار گرفته و پس از اینکه کاملاً اشباع شدند از داخل آب خارج و سطح آن ها کاملاً خشک می شدند و آزمایش مقاومت الکتریکی روی آن ها انجام می شد. همانطور که از نتایج مشخص است نمونه های حاوی پوزولان متاکائولن در هر سه شرایط عمل آوری مقداری مقاومت الکتریکی بیشتری از نمونه شاهد دارا می باشند. به طور مثال نمونه های حاوی ۵ درصد متاکائولن دارای ۲۰ کیلو اهم سانتی متر مقاومت الکتریکی در شرایط عمل آوری خشک می باشد که از نمونه شاهد که دارای مقاومت الکتریکی ۷.۹ کیلو اهم سانتی متر می باشد تقریباً ۲.۵ برابر مقاومت بیشتری از خود نشان دادند.

با توجه به معیار مقاومت الکتریکی برای آهنگ خوردگی ارائه شده در جدول ۱ و با توجه به بیش تر بودن مقاومت ویژه الکتریکی آزمونه های حاوی متاکائولن از معیار ۲۰ کیلو اهم-سانتیمتر، می توان انتظار داشت که آزمونه های حاوی متاکائولن در برابر خوردگی نیز مقاومت خوبی داشته باشند. با توجه به نمودارهای زیر می توان متوجه شد که تمام نمونه های عمل آوری شده در آب دارای مقاومت الکتریکی بیشتری می باشند. همچنین با افزایش مقادیر جایگزین شده پوزولان در نمونه ها شاهد افزایش مقاومت الکتریکی خواهیم بود.





شکل ۴: مقادیر مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی متاکائولن

#### نتیجه گیری

این مقاله به ارائه یک برنامه آزمایشگاهی برای توصیف اثر شرایط عمل آوری بر بتن با درصدهای مختلف متاکائولن برای تعیین بهترین درصد متاکائولن با توجه به مقاومت فشاری، جذب آب و مقاومت الکتریکی می‌پردازد. با توجه به نتایج بدست آمده، نتیجه‌گیری‌های اصلی زیر قابل بیان است:

بیشترین درصد متاکائولن که دارای بالاترین مقاومت فشاری شد ۱۵٪ می‌باشد. تمام نمونه‌های حاوی متاکائولن دارای درصد جذب آب کمتری نسبت به نمونه شاهد هستند. کمترین درصد جذب آب مربوط به نمونه حاوی ۱۵٪ متاکائولن با ۲۸ روز عمل آوری در آب به مقدار ۲/۳۹ درصد می‌باشد.

بالاترین مقاومت الکتریکی در نمونه‌های حاوی ۱۰٪ متاکائولن بدست آمد. بالاترین مقاومت فشاری و الکتریکی و کمترین جذب آب برای تمام نمونه‌های آزمایش شده برای نمونه‌های ۲۸ روز عمل آوری شده در آب بدست آمد و کمترین مقادیر مقاومتی و بیشترین جذب آب برای نمونه‌های عمل آوری شده در هوا بدست آمد.

#### منابع:

- [1] C.S. Poon, S.C. Kou, L. Lam, Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete, *Construction and Building Materials* 20 (2006) 858–865
- [2] Hong-Sam Kim, Sang-Ho Lee, Han-Young Moon, Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin, *Construction and Building Materials* 21 (2007) 1229–1237
- [3] Poon CS, Lama L, Koua SC, Wonga YL, Wong R. Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes. *Cement Concrete Res* 2001;31(9):1301–6.

- [4] Khatib JM, Clay RM. Absorption characteristics of metakaolin concrete. *Cement Concrete Res* 2004;34(1):19–29.
- [5] J.T. Wolsiefer Sr., Silica fume concrete: A solution to steel reinforcement corrosion in concrete, 2nd International Conference on Concrete Durability, Montreal Canada, Am. Concr. Inst., SP126 (1991) 527–553.
- [6] Brooks JJ, Megat Johari MA. Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete. *Cement Concrete Comp* 2001;23(6):495–502.
- [7] Sha W, Pereira B. Differential scanning calorimetry study of ordinary Portland cement paste containing metakaolin and theoretical approach of metakaolin activity. *Cement Concrete Compos* 2001;23:455–61.
- [8] Kaloumenou M, Badogiannis E, Tsivilis S, Kakali G. Effect of the kaolin particle size on the pozzolanic behavior of the metakaolinite produced. *J Thermal Anal Calorimetry* 1999;56: 901–7.
- [9] Shvarzman A, Kovler K, Schamban I, Grader GS, Shter GE. Influence of chemical and phase composition of mineral admixtures on their pozzolanic activity. *Adv Cement Res* 2002;14(1):35–41.
- [10] Brooks JJ, Megat Johari MA, Mazloom M. Effect of admixtures on the setting times of high strength concrete. *Cement Concrete Compos* 2000;22:293–301.
- [11] Gruber KA, Ramlochan T, Boddy A, Hooton RD, Thomas MDA. Increasing concrete durability with high-reactivity meta-kaolin. *Cement Concrete Compos* 2001;23:479–84.
- concretematerials and construction. UK: Dundee; 2002. p. 357–66.
- [12] Badogiannis E, Tsivilis S, Papadakis V, Chaniotakis E. The effect of metakaolin on concrete properties. In: Dhir RK, Hewlett PC, Cetenyi LJ, editors. *Innovations and developments in concrete materials and construction*. UK: Dundee; 2002. p. 81–9.
- [13] Roy DM, Arjunan P, Silsbee MR. Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete. *Cement Concrete Res* 2001;31(12):1809–13.
- [14] Li Z, Ding Z. Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag. *Cement Concrete Res* 2003;33(4):579–84.
- [15] Ding JT, Li Z. Effects of metakaolin and silica fume on properties of concrete. *ACI Mater J* 2002;99(4):393–8.