# بررسی برخی اثرات استفاده از متاکائولین بعنوان پوزولان در بتن

غلامرضا صغیر شمس آبادی*
دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران (مهندسی عمران)، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
عبدالکریم عباسی دزفولی
عضو هیات علمی، گروه عمران (مهندسی عمران)، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
Gh.s.shamsabadi@Gmail.com
تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۱۱ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۵/۰۳/۰۸

**چکیده :**

امروزه در اکثر نقاط دنیا تحول عظیمی در تکنولوژی بتن برای دستیابی به بتن‌های با مقاومت بالا پدید آمده است. کاربرد متاکائولین در بتن برای دستیابی به بتن‌های با مقاومت بالا و با دوام، چند سال است که در صنعت بتن جا باز نموده است. ریزی نسبی بسیار زیاد و فعالیت پوزولانی قابل ملاحظه و ایجاد واکنش با هیدروکسید کلسیم موجود در سیمان، این ماده سبب کاهش تخلخل و نفوذپذیری و افزایش دوام و مقاومت در بتن‌ها شده است. در این تحقیق نقش متاکائولین و تأثیر آن بر خواص مکانیکی و پایایی بتن و رسیدن به درصد بهینه استفاده از متاکائولین جهت کسب مقاومت بالا و دوام مناسب مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق تست‌های آزمایشگاهی که شامل بررسی روانی، درصد جذب آب، وزن مخصوص بتن، تست مقاومت الکتریکی (که نشان دهنده‌ی میزان خوردگی و نفوذپذیریست) و تست مقاومت فشاری بر روی نمونه‌هایی با ۰،۱۰،۱۵و۲۰ درصد متاکائولین جایگزین سیمان در شرایط سنی ۷ و ۲۸ روزه بر روی نمونه ۱۵ x ۱۵ سانتیمتری ساخته شده صورت پذیرفته است. نتایج بدست آمده نشانگر آن بوده که افزودن ۱۰ درصد متاکائولین جایگزین سیمان در آزمایش اسلامپ، ۱۵ درصد متاکائولین جایگزین سیمان در آزمایش مقاومت فشاری و۲۰ درصد متاکائولین جایگزین سیمان در آزمایش مقاومت الکتریکی بیشترین مقادیر و افزودن ۱۵ درصد متاکائولین جایگزین سیمان در آزمایش وزن مخصوص بتن و ۲۰ درصد متاکائولین جایگزین سیمان در آزمایش درصد جذب آب کمترین میزان را نسبت به دیگر طرح‌های ساخته شده از خود نشان داده‌اند.

**کلید واژگان:** پوزولان، متاکائولین، دوام، خواص مکانیکی، آزمایش‌های پایایی، درصد جذب آب، وزن مخصوص بتن

## ۱) مقدمه

درسال‌های اخیر متاکائولین که حاصل فعال‌سازی حرارتی رس کائولن است به عنوان یک ماده جایگزین سیمان مورد توجه قرار گرفته و مقادیر مصرفی این ماده در صنعت سیمان رو به افزایش است[۱،۲]. متاکائولین از اواسط دهه ۹۰ میلادی به صورت تجاری در صنعت راه و ساختمان وارد شده است و این پوزولان یکی از جدیدترین مصالح جایگزین سیمان برای تهیه بتن‌های توانمند محسوب می شود [۳].

اولین استفاده مستند از این ماده در بتن در سال ۱۹۶۲ میلادی و در سد جوپیای برزیل بوده است. استفاده از متاکائولین در صنعت بتن عمر کوتاهی دارد، ولی به سرعت به عنوان یک ماده پوزولانی مؤثر

پذیرفته شده، به طوری که از سال ۱۹۹۴ میلادی متاکائولین وارد بازار شده است[۲].

استفاده از متاکائولین در تولید بتن‌های با دوام و با عملکرد بالا روز به روز در حال افزایش است. تحقیقات گسترده‌های در مقالات در زمینه خصوصیات مختلف متاکائولین در خمیر و بتن از جمله واکنش پوزولانی، ساختار حفرات، مقاومت فشاری و دوام بتن گزارش شده است [۱،۲].

متاکائولین به عنوان پوزولان کلاس N (پوزولان های خام یا تکلیس شده مانند مواد کلیسنه شده) در تقسیم بندی ASTM C618 قابل دسته‌بندی است [۳،۴].

ار آنجائی‌که فرآیند تولید متاکائولین کنترل شده است و در بعضی نتایج به عنوان پوزولان مهندسی شده شناخته می‌شود. این تولید با آلایندگی کمتر و مصرف انرژی محدودتر همراه است. در سال‌های اخیر موضوع مصرف متاکائولین به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در کشورهای مختلف به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است و این مطالعات نشان می‌دهد متاکائولین یک پوزولان بسیار فعال است و موجب ارتقاء خواص مکانیکی بتن در کوتاه مدت و دراز مدت می‌شود. علاوه بر آن با توجه به تأثیر در رنگ بتن ساخته شده بدلیل رنگ روشن این ماده، و جذابیت آن همانطور که در شکل (۳) قابل مشاهده است، استفاده از بتن حاوی متاکائولین در کاربردهای خاص معماری توصیه می‌شود [۱،۳]. در کشور ایران علی رغم وجود معادن متعدد و متنوع کائولن تا کنون، در مقیاس صنعتی متاکائولین تولید نشده است[۲،۴]. در مطالعه حاضر برخی از خواص مکانیکی و پایایی بتن‌های حاوی متاکائولین موجود در بازار مورد ارزیابی قرار گرفته است.

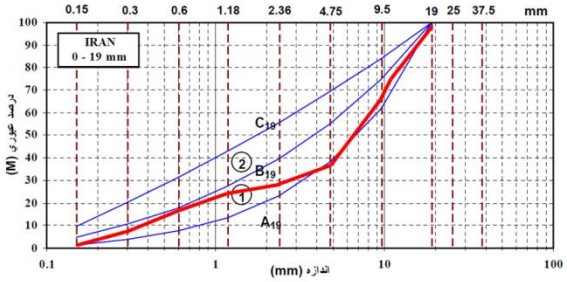
## ۲) مصالح مصرفی

ماسه مصرفی از منطقه شوشتر از نوع ماسه شسته طبیعی رودخانه‌ای، و شن‌های مصرفی از منطقه رامهرمز از نوع شکسته نامنظم در دو سایز ۹/۵ و ۱۹ میلیمتر، که در آن الزامات مربوط به استاندارد ASTM C33 رعایت شده است می‌باشد. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی در جدول(۱) ارائه شده است.

جدول ۱– مشخصات فیزیکی سنگدانه های مصرفی در ساخت نمونه ها

| سنگدانه | حداکثر قطر سنگدانه ها (mm) | چگالی | درصد جذب آب | مدول نرمی | وزن مخصوص ($gr/cm^3$) در حالت SSD |
|---|---|---|---|---|---|
| شن درشت | ۱۹ | ۲/۶۴ | ۰/۴۸ | ۵/۲ | ۲/۶۳ |
| شن ریز | ۹/۵ | ۲/۶۲ | ۰/۹۱ | | ۲/۶۱ |
| ماسه | ۴/۷۵ | ۲/۵۹ | ۱/۶۷ | | ۲/۵۸ |

## ۳) نمودار دانه بندی مصرفی




شکل ۱– منحنی دانه‌بندی استفاده شده در طرح ساخت‌ها (نمودار روش ملی طرح مخلوط بتن[۵])

سیمان مصرفی در این تحقیق جهت ساخت تمامی طرح‌های اختلاط از نوع سیمان پرتلند نوع دو از شرکت سیمان خوزستان تهیه گردیده که در آن الزامات مربوط به استاندارد ASTM C150-84 رعایت شده است می‌باشد. آب مصرفی جهت ساخت بتن و عمل آوری نمونه‌های بتنی، آب آشامیدنی شهر اهواز می‌باشد که ضوابط استاندارد ASTM D1129 را برآورده می‌نماید.

متاکائولین استفاده شده به عنوان مواد افزودنی معدنی از شرکت آسان تجارت تهران تهیه شده است که مشخصات آنالیز عنصری آن طبق آزمایش XRF در جدول (۲) ارائه شده است.

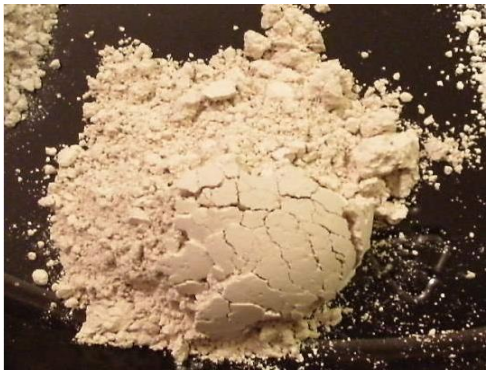
جدول ۲ – نتایج آنالیز عنصری آزمایش XRF متاکائولین

| مشخصات | Blaine ($cm^2/gr$) | $SiO_2$ % | $Al_2O_3$ % | $Fe_2O_3$ % | CaO % | MgO % | $TiO_2$ % | $Na_2O$ % | $K_2O$ % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| متاکائولین | ۲۲۰۰۰-۲۵۰۰۰ | ۵۲-۵۴ | ۴۴-۴۶ | ۰/۶-۱/۲ | ۰/۰۹ | ۰/۰۳ | ۰/۶۵ | ۰/۱۰ | ۰/۰۳ |

## ۴- کائولن

کائولن یک نوع خاک معدنی بسیار ریز است که عموماً بر اساس تجزیه فلدسپارها، گرانیت و آلومینیوم سیلیکات‌ها شکل می‌گیرد. همان‌طور که در شکل‌های (۱) و (۲) مشاهده می‌شود رنگ این ماده سفید، خاکستری مایل به سفید و یا اندکی رنگین بوده و ذرات بشقابی شکل دارد و به طور معمول در تهیه چینی و سرامیک استفاده می‌شود [۶].

شکل ۲- معدن کائولن


شکل ۳-کائولن

**۵- متاکائولین**

مواد خام اولیه در تولید متاکائولین، رس کائولن می‌باشد. رس‌ها پوزولان نیستند و واکنش زایی محسوسی با آهک نمی‌توانند از خود نشان دهند، مگر آنکه ساختمان متبلور کانی‌های آلومینوسیلیکات موجود در رس، به وسیله فرآوری حرارتی به یک ساختمان آمورف یا نامنظم تبدیل شود [۷].

لذا برای تولید متاکائولین رس کائولن را تا محدوده ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد حرارت می‌دهند که محصول نهایی آن متاکائولین می‌باشد [۱،۳،۸]. رنگ این ماده همانگونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود سفید رنگ می‌باشد.

شکل۴-متاکائولین

این ماده که از پوزولان‌های فعال محسوب می‌شود در جهان به صورت گسترده و در صنایع مختلف مخصوصاً به عنوان یک پوزولان مؤثر در بهبود مقاومت و دوام بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. ذخایر این ماده ارزشمند در سال ۲۰۰۱ در جهان ۲۰ میلیارد تن تخمین زده شده که سهم کشور ما تقریبا ۴۰ میلیون تن برآورد شده است [۹].

تفاوت اصلی بین متاکائولین و سایر پوزولان‌های مصرفی مصنوعی مانند دوده سیلیس و خاکستر بادی این است که این مواد محصولات فرعی یا ثانویه هستند در حالی که متاکائولین یک محصول اولیه است، بنابراین متاکائولین را می‌توان با یک فرآیند کنترل شده به منظور دستیابی به محصول مطلوب تولید کرد[۲].

**۵-۱ ) بررسی خواص متاکائولین**

آزمایش‌های مقایسه‌ای نشان می‌دهد خواص این پوزولان در بهبود ویژگی‌های مکانیکی و پایایی بتن با دوده سیلیس قابل رقابت است[۱] و می‌تواند موجب ارتقاء خواص مکانیکی بتن در کوتاه مدت و بلند مدت شود [۸،۳]. همچنین استفاده از این ماده در بتن‌ریزی حجیم به دلیل حرارت هیدراتاسیون نسبتاً کم، توصیه می‌شود.

**۵-۲) خواص فیزیکی و ترکیبات شیمیایی**

مواد خام ورودی در تولید متاکائولین، رس کائولن می‌باشد. در دمای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتیگراد، کائولینیت که اصلی‌ترین جزء تشکیل دهنده‌ی کائولن است به واسطه دی هیدراکسیونیزاسیون بیشتر آب جذب شده خود را طبق رابطه (۱) از دست می‌دهد [۳،۸].

رابطه (۱) : فرآیند گرفتن آب از کائولن[۳]

$$(OH)_4 \longrightarrow Al_2O_3 2SiO_2 + 2H_2O$$
$$Al_2Si_2O_5$$

این حرارت دادن آب شیمیایی کائولن را خارج نموده و ساختار کریستالی آن را از بین برده و محصول تبدیل به یک سیلیکات آلومینیوم آمورف ($A_2S$) می‌شود [۱،۳].
متاکائولین به عنوان یک محصول با پایه سیلیسی می‌باشد که در واکنش با $Ca(OH)_2$ در دمای معمولی ژل CSH تولید می‌کند. متاکائولین همچنین دارای آلومینا (Alumina) می‌باشد که طبق رابطه (۲) با CH واکنش داده و فازهای آلومیناتی که حاوی $C_4AH_{13}$، $C_2ASH_8$ و $C_3AH_6$ است را تولید می‌کند [۲،۳،۹].

رابطه (۲)

$$MK + CH + H \longrightarrow C\text{-}S\text{-}H\ ,\ C_4AH_{13}\ ,\ C_3AH_6\ ,\ C_2ASH_8$$

به منظور تولید متاکائولین رس کائولن را تا محدوده دمای ۷۰۰ الی ۹۰۰ درجه حرارت می‌دهد. این فعل و انفعالات حرارتی یک ماده معدنی را، به عنوان" کلسینه شدن" می‌شناسند [۳].
موادی چون متاکائولین که حاوی آلومینای بیشتری هستند تمایل زیادی به مصرف C-H و تشکیل C-A-H طبق رابطه (۲) دارند و فعالیت بسیاری از خود نشان می‌دهند. آنچه که در روابط (۳) و (۴) ارائه شده است واکنش هیدراتاسیون سیمان و واکنش پوزولانی بعد از تولید C-H است [۹].

رابطه (۳)

Portland Cement:

$$C_3S + H \xrightarrow{\text{Fast}} C\text{-}S\text{-}H + CH$$

رابطه (۴)

Portland – Pozzolan Cement:

$$\text{Pozzolan} + CH + H \xrightarrow{\text{Slow}} C\text{-}S\text{-}H$$

### ۳-۵ ) عملکرد متاکائولین بر دوام بتن

استفاده از متاکائولین ریز ساختار بتن را بهبود می‌بخشد و مقاومت و دوام بتن را در برابر نفوذ سیالات مهاجم (یون کلر و یون‌های سولفات) افزایش می‌دهد. همچنین استفاده از متاکائولین واکنش های قلیایی سنگدانه ها را کنترل می‌کند. بتنی که با متاکائولین ساخته شود احتیاج به مقدار کمی کاهنده آب دارد (در مقایسه با میکروسیلیس کاهنده آب کمتری نیاز دارد و یا حتی نیاز ندارد)[۱].
نتایج محققین گویای اثر مثبت این ماده در بهبود مقاومت خمشی و پیچشی، کاهش نفوذ آب، افزایش مقاومت در برابر حمله‌های کلرایدی و ASR و همچنین فواید دیگری از جمله کاهش خزش حکایت دارد. از سوی دیگر میزان جایگزینی متاکائولین در بتن باید در تناسب با میزان C-H تولید شده از هیدراتاسیون سیمان و آب موجود در سیستم، میزان $C_3A$ سیمان مصرفی و سطح جایگزینی آن باشد تا بهترین عملکرد را از خود نشان دهد [۱،۹] .
در جدول(۳) مشخصات فیزیکی و در جدول (۴) ترکیبات شیمیایی نمونه‌ای از متاکائولین و مقایسه آن با کائولن و سیمان پرتلند نوع ۲ ارائه شده است.

جدول ۳- خواص فیزیکی متاکائولین مصرفی در مقایسه با یک نوع کائولن و سیمان مصرفی

| مشخصات فیزیکی | متاکائولین | کائولن | سیمان پرتلند نوع ۲ خوزستان |
|---|---|---|---|
| وزن مخصوص ($gr/cm^3$) | ۲/۶ | ۲/۲۶ | ۳/۱ – ۳/۱۵ |
| بلین ($cm^2/gr$) | ۲۵۰۰۰– ۲۲۰۰۰ | ۳۵۰۰ | ۳۱۵۰ |
| درصد افت حرارتی ناشی از ( LOI ) | ۱/۰ | ۱۵/۰ | ۱/۱۰ |
| اندازه ذرات(µm) | ۱–۲ | --- | ۱۰–۱۵ |

مقایسه اعداد بلین و توزیع اندازه ذرات هر دو ماده سیمان پرتلند و متاکائولین در جدول (۳) بیانگر ریزی ذرات متاکائولین نسبت ذرات سیمان می‌باشد.
همچنین مقدار یک درصد LOI در متاکائولین و مقایسه آن با افت ناشی از احتراق در کائولن اولیه (۱۵درصد) نشان می‌دهد مقدار زیادی از آب کائولن در پروسه تبدیل کائولن به متاکائولین تبخیر شده است. این امر منجر به افزایش درصد اکسیدها نظیر سیلیس و آلومین در متاکائولین نسبت به کائولن می‌شود [۳]. مقایسه ترکیبات متاکائولین با سیمان نشان می‌دهد که مجموع درصد سیلیس و آلومین در متاکائولین بیش از سه برابر سیمان است. این در حالی است که درصد اکسید کلسیم (CaO) در متاکائولین ناچیز است و عیب اصلی متاکائولین در ترکیب شیمیایی آن محسوب می باشد [۱] و این مسئله به خوبی در جدول (۴) قابل مشاهده می باشد.

جدول۴- ترکیبات شیمیایی متاکائولین مصرفی در مقایسه با یک نوع کائولن و سیمان مصرفی (درصد)

| ترکیب شیمیایی | متاکائولین | کائولن | سیمان پرتلند تیپ ۲ خوزستان |
|---|---|---|---|
| $SiO_2$ | ۵۲-۵۴ | ۴۲/۰۰ | ۲۲/۰۸ |
| $Al_2O_3$ | ۴۴-۴۶ | ۳۵/۰۰ | ۵/۰۲ |
| $Fe_2O_3$ | ۰/۶-۱/۲ | ۱/۳۰ | ۳/۲۲ |
| Cao | ۰/۰۹ | ۳/۱۰ | ۶۳/۵۴ |
| Mgo | ۰/۰۳ | ۱/۸۰ | ۲/۵۰ |
| $K_2O+Na_2O$ | ۰/۰۳+۰/۱۰ | ۰/۱۷+۰/۱۰ | ۰/۵۸+۰/۲۴ |
| $So_3$ | ۰/۲۰ | ۰/۱۰ | ۱/۹۷ |

## ۶ ) برنامه آزمایشگاهی

### ۶-۱) مشخصات طرح‌های اختلاط

طرح اختلاط استفاده شده در ساخت بتن کنترل در این تحقیق طبق استاندارد ACI-211-89 می‌باشد[۱۰]. در این تحقیق از ۴ طرح اختلاط استفاده گردیده است که یکی از آنها به عنوان بتن شاهد و ۳ طرح دیگر با ثابت نگه داشتن نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۵و تغییر در مقدار سیمان که درصدهایی از متاکائولین با مقادیر۱۰، ۱۵ و۲۰ درصد جایگزینی سیمان شده نمونه‌ها ساخته شده است. مشخصات کلی این طرح‌ها در جدول(۵) ارائه گردیده است.

جدول ۵ – مشخصات طرح‌ها

| مشخصات | MK0% | MK10% | MK15% | MK20% |
|---|---|---|---|---|
| ماسه $Kg/m^3$ | ۷۸۰ | ۷۸۰ | ۷۸۰ | ۷۸۰ |
| شن نخودی $Kg/m^3$ | ۵۱۰ | ۵۱۰ | ۵۱۰ | ۵۱۰ |
| شن بادمی $Kg/m^3$ | ۵۱۰ | ۵۱۰ | ۵۱۰ | ۵۱۰ |
| آب Lit | ۱۸۵ | ۱۸۵ | ۱۸۵ | ۱۸۵ |
| سیمان $Kg/m^3$ | ۳۷۰ | ۳۳۳ | ۳۱۴/۵ | ۲۹۶ |
| متاکائولین $Kg/m^3$ | ۰ | ۳۷ | ۵۵/۵ | ۷۴ |
| نسبت آب به سیمان | ۰/۵ | ۰/۵ | ۰/۵ | ۰/۵ |

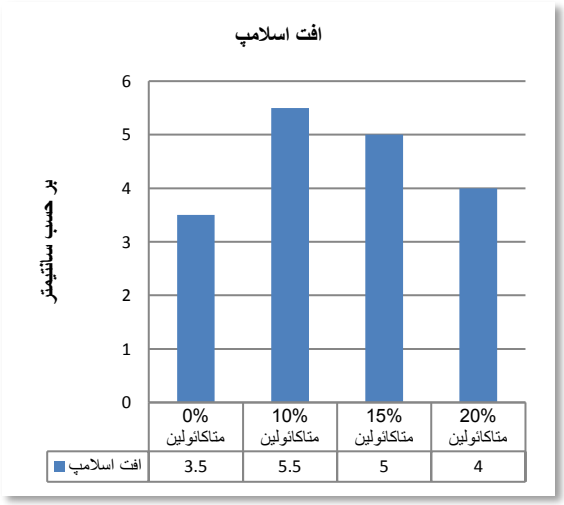
### ۶-۲ ) جزئیات نمونه‌ها

در این تحقیق تست‌های آزمایشگاهی مختلفی بر روی بتن معمولی به عنوان بتن شاهد و با درصدهای (۱۵،۱۰و۲۰) متاکائولین جایگزین سیمان مصرفی در شرایط سنی ۷ و ۲۸ روزه و بصورت جداگانه بر روی نمونه مکعبی ۱۵X۱۵ سانتیمتری صورت پذیرفته است. بعد از قالب‌گیری، نمونه‌ها بوسیله پارچه خیس جهت جلوگیری از تبخیر آب بر روی نمونه ها قرار داده شد و پس از ۲۴ ساعت و در شرایط مرطوب در محیط آزمایشگاه از قالب خارج شدند و بصورت مستغرق در آب قرار داده شدند. سپس عمل‌آوری برخی نمونه‌ها تا ۷ روز و برخی دیگر تا ۲۸ روز براساس نوع آزمایش و بر طبق استاندارد صورت پذیرفت. بعد از ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری در آب، نمونه‌ها به ترتیب برنامه‌ریزی جهت انجام آزمایش‌ها از آب بیرون آورده شدند.

## ۷) نتایج آزمایش ها و تفسیرآنها

### ۷-۱)روانی

متاکائولین به دلیل ریزتر بودن ذرات آن نسبت به سیمان آب بیشتری جذب می‌کنند و این باعث کاهش روانی بتن تازه می‌شود [۲،۳]. البته نمونه‌هایی از متاکائولین نیز وجود دارند که حتی میزان اسلامپ بتن را افزایش می‌دهند [۳]. ولی علی رغم این موضوع نتایج آزمایشهای انجام شده در این تحقیق طبق استاندارد ASTM C143 نشان از، تغییرات روانی و کارآیی بتن‌های حاوی درصدهای مختلف متاکائولین نسبت به بتن کنترل می‌باشد. نتایج این آزمایش در نمودار (۲) ارائه شده است.

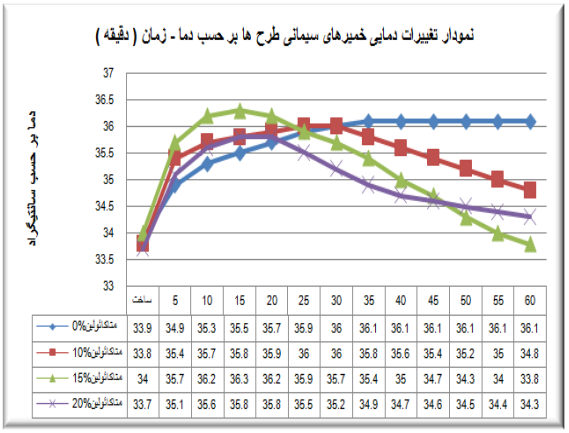



شکل ۵- میزان اسلامپ طرح ها

علی رغم اینکه انتظار می‌رفت با توجه به آبگیری ذرات ریز متاکائولین و همچنین افت کارایی در بتن‌های پوزولانی افت اسلامپ مشاهده شود ولی چنین نشد و این نشان از حفظ کارایی بتن با افزودن متاکائولین دارد. پس می‌توان گفت متاکائولین در خود خاصیت روان کنندگی دارد و می‌تواند تأثیرات مثبتی در کارایی بتن داشته باشد.

## ۷-۲) بررسی تغییرات دمایی

نتایج حاصل از این آزمایش که در مدت زمان یک ساعت بر روی خمیرهای حاوی (۰،۱۰،۱۵،۲۰) متاکائولین اندازه‌گیری شده طبق استاندارد ASTM C1064/C1064M-03 صورت گرفته است و در نمودار (۳) ارائه شده است. دمای محیط آزمایش در زمان انجام آزمایش بین ۳۰ الی ۳۵ درجه سانتیگراد بصورت متغیر، دمای آب مصرفی بین ۳۰ الی ۳۲ درجه سانتیگراد و رطوبت هوا در حدود ۵۵ درصد ثبت شده گردید.



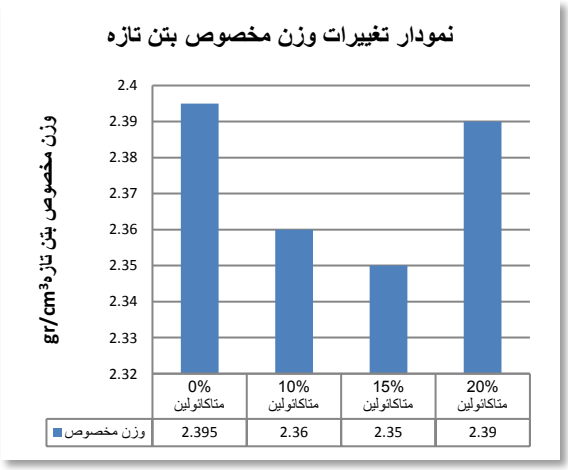

| ساعت | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| متاکائولین0% | 33.9 | 34.9 | 35.3 | 35.5 | 35.7 | 35.9 | 36 | 36.1 | 36.1 | 36.1 | 36.1 | 36.1 |
| متاکائولین10% | 33.8 | 35.4 | 35.7 | 35.8 | 35.9 | 36 | 36 | 35.8 | 35.6 | 35.4 | 35.2 | 35 | 34.8 |
| متاکائولین15% | 34 | 35.7 | 36.2 | 36.3 | 36.2 | 35.9 | 35.7 | 35.4 | 35 | 34.7 | 34.3 | 34 | 33.8 |
| متاکائولین20% | 33.7 | 35.1 | 35.6 | 35.8 | 35.8 | 35.5 | 35.2 | 34.9 | 34.7 | 34.6 | 34.5 | 34.4 | 34.3 |

شکل ۶ – تغییرات دمایی خمیرهای سیمانی طرح ها

نتایج حاصل از این آزمایش با توجه به خط نمودارهای به دست آمده در نمودار (۳)، در خمیر سیمان نوع ۲ بیانگر حرارت زایی افزایشی، ولی با تغییرات دمایی ناچیزی می‌باشد که بعد از گذشت ۳۵ دقیقه افزایش دما متوقف می‌شود. ولی با اضافه کردن درصدهای (۱۰–۱۵–۲۰) متاکائولین جایگزین سیمان شاهد کاهش دما در خمیر سیمان می‌باشیم که این کاهش دما در خمیر ۱۵ درصد متاکائولین بیشترین تغییرات کاهشی دما را تا ۲/۵ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد و بعد از آن به ترتیب شاهد کاهش دما در درصدهای ۲۰ و ۱۰ به ترتیب با ۱/۵ و ۱/۲ درجه سانتیگراد می‌باشیم.

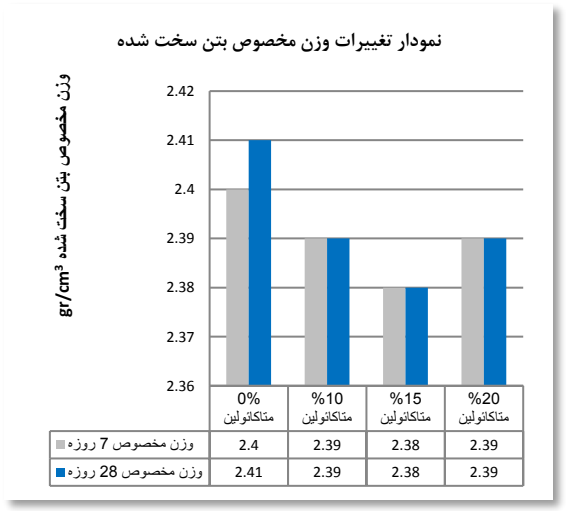
## ۷-۳) وزن مخصوص بتن تازه و سخت شده

نتایج به دست آمده از این آزمایش که طبق استاندارد BS EN 12390-1:2012 صورت گرفته است، در نمودارهای (۴) و (۵) مشاهده می‌شود.




| | 0% متاکائولین | 10% متاکائولین | 15% متاکائولین | 20% متاکائولین |
|---|---|---|---|---|
| وزن مخصوص | 2.395 | 2.36 | 2.35 | 2.39 |

شکل ۷ – تغییرات وزن مخصوص بتن تازه




| | 0% متاکائولین | %10 متاکائولین | %15 متاکائولین | %20 متاکائولین |
|---|---|---|---|---|
| وزن مخصوص 7 روزه | 2.4 | 2.39 | 2.38 | 2.39 |
| وزن مخصوص 28 روزه | 2.41 | 2.39 | 2.38 | 2.39 |

شکل ۸– تغییرات وزن مخصوص بتن سخت شده

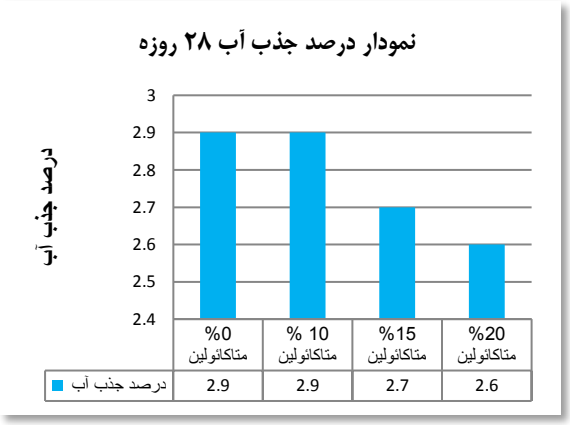
نتایج این آزمایش نشان‌دهنده کاهش وزن مخصوص بتن تازه و سخت شده با افزایش میزان ۱۰ و ۱۵ درصد متاکائولین در بتن نسبت به بتن شاهد می‌باشد و بیشترین مقدار کاهش وزن مخصوص بتن تازه مربوط به طرح ۱۵ درصد متاکائولین می‌باشد. ولی مشاهده شده در افزودن ۲۰ درصد متاکائولین جایگزین سیمان و با افزایش میزان

متاکائولین وزن مخصوص بتن تازه افزایش یافته، ولی همچنان از وزن مخصوص بتن تازه و سخت شده شاهد کمتر است.

### ۷-۴) درصد جذب آب

این آزمایش طبق استاندارد BS 1881 – Part122 صورت گرفته و نتایج به دست آمده از روش مغزه‌گیری برای به دست آوردن درصد جذب آب ۲۸ روزه در نمودار (۶) ارائه شده است.

شکل ۹- مغزه‌گیری از نمونه‌های مکعبی




شکل ۱۰- درصد جذب آب ۲۸ روزه

با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق، با افزایش میزان متاکائولین بجای سیمان تا ۲۰ درصد، شاهد کاهش میزان درصد جذب آب در نمونه‌ها می‌باشیم. بطوریکه کمترین درصد جذب آب مربوط به بتن حاوی ۲۰ درصد متاکائولین می‌باشد. بنابراین جایگزینی ۲۰ درصد متاکائولین به جای سیمان به عنوان درصد بهینه، از نظر جذب آب در نظر گرفته می‌شود. بنابراین وجود متاکائولین در بتن می‌تواند باعث کاهش جذب آب می‌گردد.

همچنین با مقایسه اعداد به دست آمده در این آزمایش با استانداردهای جدول (۶)، شاهد نتایج مثبت مبنی بر تأثیرات مثبت اثر متاکائولین در ساخت بتن‌های با دوام با نفوذپذیر کم برای شرایط محیطی شدید B و C خواهیم بود.

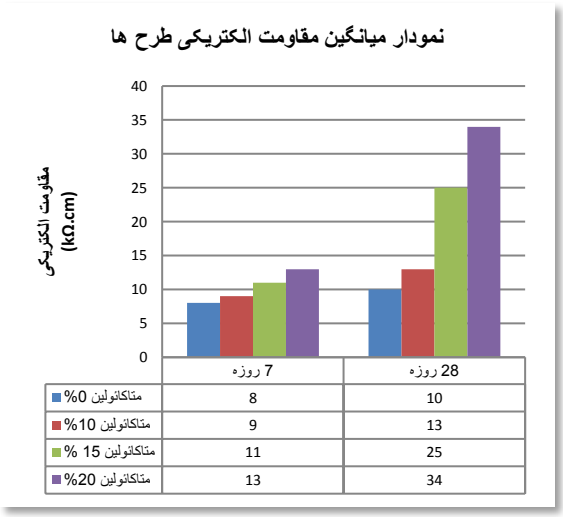
جدول ۶-مقادیر مجاز تعیین شده از آزمایش‌های نفوذپذیری بتن مسلح برای اعمال دوام در شرایط محیطی منطقه [۱۱]

| آزمایش | محدوده مجاز | | |
|---|---|---|---|
| | شرایط- A | شرایط – B و C | شرایط - D و E |
| جذب آب نیم ساعته (در سن۲۸روز) BS 1881,Part122,1983 | حداکثر ۴درصد | حداکثر ۳درصد | حداکثر ۲درصد |
| نفوذ آب (در سن۲۸روز) BS EN 12390-8:2000 | حداکثر ۵۰ میلیمتر | حداکثر ۳۰ میلیمتر | حداکثر ۱۰ میلیمتر |
| نفوذ کلرید (در سن۲۸روز) ASTM C 1202,1994 | حداکثر ۳۰۰۰ کولن | حداکثر ۳۰۰۰ کولن | حداکثر ۲۰۰۰و۱۵۰۰ کولن به ترتیب در شرایط D وE |

### ۷-۵) مقاومت الکتریکی بتن

برای تعیین مقاومت الکتریکی نمونه‌ها در سن ۷ و ۲۸ روزه از استاندارد ASTM C470 استفاده گردیده است. دستگاه استفاده شده در این تحقیق برای سنجش مقاومت الکتریکی نمونه‌ها، مقاومت سنج چهار شاخه‌ای به نام کنین بوده که ابزار متداول جهت بررسی هدایت الکتریکی بتن می‌باشد. از مقاومت الکتریکی بتن می‌توان اطلاعات مناسبی در خصوص مقاومت بتن در رویارویی با عوامل مهاجم بدست آورد. نحوه قرائت اعداد این آزمایش به این صورت بوده که بر روی سه ضلع از هر نمونه سه قرائت صورت گرفت و میانگین به دست آمده ملاک مقاومت الکتریکی هر نمونه در نظر گرفته شده است. نحوه قرائت و استفاده از دستگاه در شکل (۵) و نمودار مقایسه‌ای مقاومت الکتریکی طرح‌ها در نمودار (۷) ارائه شده است.

شکل ۱۱– دستگاه سنجش مقاومت الکتریکی و نحوه استفاده از آن




شکل ۱۲– میانگین مقاومت الکتریکی طرح ها

رابطه مقاومت الکتریکی بتن با آهنگ‌خوردگی بر اساس استاندارد ACI 222 در جدول (7) و براساس استاندارد ASTM C470 در جدول (8) جهت مقایسه نتایج به دست آمده ارائه شده است.

جدول ۷– تأثیر مقاومت الکتریکی بتن بر آهنگ خوردگی آرماتور [۳]ACI 222

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

جدول ۸ : تأثیر مقاومت الکتریکی بتن بر آهنگ خوردگی آرماتور ASTM C470

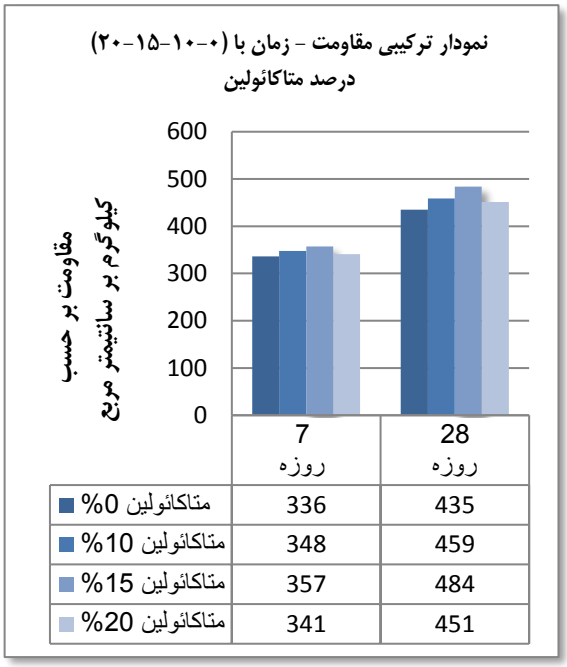
| آهنگ خوردگی | مقاومت الکتریکی (kΩ.cm) |
|---|---|
| خوردگی قطعی | < ۸ |
| خوردگی محتمل | ۸ تا ۱۲ |
| احتمال خوردگی وجود ندارد | > ۱۲ |
| خوردگی غیر ممکن | > ۶۰ |

نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که با افزودن متاکائولین مقاومت الکتریکی در همه‌ی طرح‌ها در کوتاه‌مدت و بلندمدت افزایش یافته است، که علت آن می‌تواند کاهش تخلخل و نفوذ پذیری بتن باشد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که این مقاومت در کوتاه مدت کم ولی با افزایش سن نمونه‌ها به طرز چشمگیری در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین طرح های ۱۵ و ۲۰ درصد بیشترین رشد مقاومتی را در بلند مدت از خود نشان می‌دهند به طوریکه برای بتن‌های حاوی ۲۰ درصد متاکائولین حدود ۲/۶ برابر و برای طرح ۱۵ درصد ۲/۲ برابر نسبت به مقاومت الکتریکی ۷ روزه خود، شاهد افزایش مقاومت الکتریکی هستیم.

بنابراین در این آزمایش بیشترین مقدار مقاومت الکتریکی را طرح حاوی ۲۰ درصد متاکائولین دارا می‌باشد و به نظر می‌رسد که با افزایش بیشتر از ۲۰ درصد متاکائولین همچنان شاهد رشد مقاومت الکتریکی در بتن باشیم.

### ۷-۶) مقاومت فشاری بتن

برای هر طرح ساخت میانگین مقاومت فشاری ۳ نمونه در سنین ۷ و ۲۸ روزه و در شرایط نگهداری یکسان به عنوان معیار مقاومت فشاری قرار گرفت. نتایج به دست آمده از این آزمایش در نمودار (۸) ارائه شده است.




شکل ۱۳- ترکیبی مقاومت فشاری میانگین بتن با (۰-۱۰-۱۵-۲۰) درصد متاکائولین

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری طرحها همان‌طور که از نمودارهای (۸) قابل مشاهده است، بیانگر بهبود و رشد نرخ مقاومت فشاری در همه ی طرح‌های پوزولانی نسبت به بتن شاهد است، که این رشد در کوتاه مدت (۷ روزه) رشد کمی نسبت به بتن شاهد از خود نشان می‌دهد و در بلند مدت (۲۸ روزه) بیشتر قابل شهود است. با افزایش درصد جایگزینی متاکائولین به جای سیمان تا میزان ۱۵ درصد مقاومت فشاری بتن نسبت به بتن شاهد افزایش می‌یابد. بنابراین بیشترین افزایش مقاومت فشاری مربوط به طرح ۱۵ درصد متاکائولین جایگزین سیمان با رشد ۶ درصد در ۷ روزه و با رشد ۴۴ درصد در ۲۸ روزه نسبت به بتن شاهد ۷ روزه می‌باشد. همچنین مشاهده گردید با افزودن ۲۰ درصد متاکائولین جایگزین سیمان مصرفی مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد ولی این کاهش مقاومت از مقاومت فشاری به دست آمده از بتن شاهد بیشتر است. پس می‌توان گفت در کلیه طرح‌های پوزولانی استفاده شده از متاکائولین شاهد بهبود مقاومت فشاری نسبت به بتن شاهد هستیم. بنابراین جایگزینی ۱۵ درصد متاکائولین به جای سیمان به عنوان درصد بهینه، در نظر گرفته می‌شود.

## ۸) نتیجه گیری

۱- در افزودن ۱۰ درصد متاکائولین، شاهد کارایی بیشتر نسبت به دیگر طرح‌ها می‌باشیم.

۲- افزودن متاکائولین باعث کاهش دما نسبت به بتن شاهد می‌باشد، که این کاهش دما در طرح ۱۵ درصد متاکائولین جایگزین سیمان مصرفی بیشترین مقدار کاهش را با ۲/۵ درجه سانتیگراد در مدت یک ساعت از خود نشان می‌دهد. بنابراین استفاده از ماده افزودنی معدنی با مقدار کنترل شده امکان کاهش بالا رفت دما را تقریباً به نسبت مستقیم با سیمان پرتلند جایگزین شده به مواد افزودنی، بوجود می آورد. دلیل این امر آن است که تحت شرایط معمولی، مواد افزودنی معدنی به مقدار زیادی برای چندین روز واکنش انجام نمی‌دهند. بنابراین به دلیل حرارت هیدراتاسیون نسبتاً کم، استفاده از آن در بتن ریزی حجیم توصیه می‌شود.

۳- جایگزینی ۱۵ درصد متاکائولین به جای سیمان بهینه ترین طرح در کاهش وزن مخصوص در نظر گرفته می‌شود.

۴- کمترین درصد جذب آب مربوط به بتن حاوی۲۰ درصد متاکائولین می‌باشد. بنابراین جایگزینی ۲۰ درصد متاکائولین جایگزین سیمان به عنوان درصد بهینه در نظر گرفته می‌شود.

۵- بتن‌های حاوی متاکائولین در هر دو سن کوتاه و بلند مدت نسبت به نمونه‌ی شاهد مقاومت فشاری بیشتری را کسب کرده‌اند. پس استفاده از متاکائولین منجر به بهبود خواص مکانیکی از جمله مقاومت فشاری بتن می‌شود. اما محدود و کنترل شده، پس بهترین درصد بهینه در جهت بهبود خواص مکانیکی استفاده از ۱۵درصد متاکائولین جایگزین سیمان به دست آمده است.

۶- افزودن متاکائولین به بتن موجب افزایش مقاومت الکتریکی در نمونه‌ها شده و با افزایش سطح جایگزینی این افزایش ادامه می‌یابد و افزایش قابل ملاحظه مقاومت الکتریکی تا حدود ۳/۴ برابر نسبت به بتن شاهد در سن ۲۸ روزه، سرعت گسترش خوردگی را در سازه های بتنی که در معرض نفوذ یون کلر هستند را تا حدود زیادی کاهش خواهد داد. بیشترین مقدار مقاومت الکتریکی را طرح حاوی ۲۰ درصد متاکائولین دارا می‌باشد که می‌توان آن را درصد بهینه در نظر گرفت.

۷- مواد افزودنی حتماً می‌توانند خواص بتن را بهبود بخشند، اما نباید انتظار داشت که این مواد، کیفیت ضعیف مواد متشکله بتن یا نسبت نامناسب طرح اختلاط را جبران کنند.

۸- اثر شاخص متاکائولین بر بتن در پایایی آن مشاهده می‌شود به طوری که می‌توان به عنوان جایگزینی مناسب برای پوزولان‌ها مورد استفاده در محیط‌های خورنده‌ای که در معرض عوامل مهاجم هستند در نظر گرفته شوند.

**۹) منابع**


1-Zongjin, l, Advanced Concrete Technology, John Wiley&Sons, 1nd Edition, 2011, pp 477-478

۲- بهرامی جوین، ح، مودی، ف، ارزیابی دوام و مقاومت فشاری بتن های حاوی متاکائولین، نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، ۱۹-۲۱ اردیبهشت ماه، ۱۳۹۱.

۳- شکرچی زاده، م، میردامادی، ع، بنکدار، ا، بخشی، م، بهبود خواص بتن های توانمند با استفاده از متاکائولین، مجله تحقیقات بتن، شماره دو، زمستان ۱۳۸۷، صفحات از۵۵ تا ۶۳ .

۴- بهفرنیا، ک، حسن زاده، م، اعتمادی، م، عظیمی فر، ف، قوامی، س، بررسی خصوصیات مکانیکی بتن حاوی متاکائولین، اولین کنفرانس ملی بتن، مرکز همایش‌های سازمان اسناد و کتابخانه ملی، تهران، ایران، ۱۵ مهرماه، ۱۳۸۸.

۵- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، راهنمای روش ملی طرح مخلوط بتن، تهران، نشر مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، چاپ دوم، ۱۳۸۸، صفحه ۱۵.

۶- طریقت، ا، سلطانی، ا، زمانی دوست، م، ارزیابی اثر متاکائولین در خواص مکانیکی و دوام بتن مناسب برای خطوط راه آهن، سومین کنفرانس بین المللی پیشرفت‌های اخیر در مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، اردیبهشت ماه، ۱۳۹۲.

۷- مهتا، ک، مونته ئیرو، پ، ریز ساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی پیشرفته بتن)، رمضانیانپور، ع، قدوسی، پ،گنجیان، ا، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر، چاپ ششم، ۱۳۹۴،صفحات ۳۶۵ و ۳۶۷.

۸- شکرچی زاده، م، ولی پور، م، پرگر، ف، بررسی تأثیر استفاده پوزولان های میکروسیلیس، متاکائولین، زئولیت و الیاف‌های پروپیلن بر مقاومت در برابر نفوذ یون کلر در بتن در شرایط محیطی جزیره قشم، نشریه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد، سال ۲۲، شماره یک، ۱۳۸۹، صفحات از ۸۳ تا ۹۶.

۹- رمضانیانپور، ع، افضلی، ن، بررسی اثر متاکائولین درمجاورت سیمان پرتلند بر دوام بتن‌های توانمند، ششمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، تهران، ایران، ۱۵ مهرماه، ۱۳۹۳.

۱۰- مستوفی‌نژاد، د، تکنولوژی و طرح اختلاط بتن، اصفهان، انتشارات ارکان دانش، چاپ سی و نهم، تابستان۱۳۹۳، صفحات ۱۰۲ تا ۱۱۰.

۱۱- دفتر امور مقررات ملی ساختمان، مقررات ملی ساختمان مبحث نهم، تهران، نشر توسعه ایران، چاپ نهم،۱۳۹۴، ص۴۹.

# Investigating some effects of using Metakaolin as pozolan in concrete

Gholamreza Saghir Shamsabadi
Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
Abdolkarim Abbasi dezfuli
Assistant Professor, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

## Abstract

Development of concrete technology is undergoing for achieving high strength concrete. Metakaolin (MK) for obtaining high strength and durable concrete recently is used in industry. The relatively high micro particles and pozolan activity and reaction with calcium hydroxide of cement, causes lower voids, permeability and increasing durability. In the present research the history of pozolans and their materials specially MK and their effects on mechanical properties to achieve an optimize percentage of MK instead of cement were investigated. The tests are included as workability, absorbing water, relative density, electric resistance (that shows permeability and corrosion resistance) and compressive strength. The tests were carried out on 0%, 10%, 15% and 20% of MK in replacement of cement on 150x150 mm samples on 7 and 28 days after casting. The results show that 10% of MK has better workability. 15% of MK higher compressive strength and 20% higher electric resistance and lower absorbing water and 15% have a reduced relative density

## Keywords:

pozolan, metakaolin, relative density, permeability, mechanical properties