

موضوع : دوام و پایایی بتن و سازه های بتنی - کد 304D

بررسی اثر متاکائولین در مجاورت سیمان پرتلند آهکی بر دوام بتنهای توانمند

1. دکتر علی اکبر رضانیانپور 2. نیما افزلی (مسئول مکاتبات)

1. سرپرست مرکز تحقیقات و تکنولوژی دوام بتن 2. کارشناسی ارشد مهندسی مدیریت ساخت دانشگاه

امیرکبیر

1. aaramce@aut.ac.ir

تلفن: 02164543027

2. nima_afzali1981@yahoo.com

تلفن: 09111227297

چکیده :

امروزه اهمیت مسئله دوام در بتن‌ها بسیار بیشتر از فاکتورهای دیگر از جمله مقاومت فشاری است. آنچه در عصر ما از سازه های مسلح انتظار می‌رود این است که در برابر فاکتورهای مخرب محیطی، حداقل دوامی قریب به یکصد سال از خود نشان دهند و در طول این مدت یا به تعمیر محتاج نباشند یا با تعمیرات اندک بتوان به کاربرد آنها ادامه داد. برای نیل به این موضوع میبایست به بررسی عوامل موثر در دوام بتن‌ها پرداخت. در سازه های بتنی مسلح یکی از رایج ترین اشکال حمله های محیطی، مسئله نفوذ یونهای کلرید است که سبب خوردگی فولاد در بتن و در نهایت منتج به کاهش مقاومت فشاری و بار سرویس قابل تحمل برای سازه میشود و ممکن است به تعمیر فوری و یا تعویض نیاز پیدا کند. بنابر این توانایی یونهای کلراید برای نفوذ در داخل بتن باید به جهت طراحی و یا کنترل کیفیت مورد بررسی قرار گیرد.

یک روش معمول برای کاهش چنین خوردگی هایی، کاهش نفوذ پذیری بتن با کاربرد درصد های مناسبی از پوزولانهایی چون متاکائولین فعال (HRM) در بتن است. متاکائولن ماده ایست که از حرارت دهی رس کائولن در شرایط کنترل شده تولید میشود. همچنین مشخص شده است که با درصد های مناسبی از پودر سنگ آهک نیز میتوان به مقاومت فشاری و کاهش نفوذ پذیری بتن کمک کرد. اما بر اساس تحقیقات مهمی که صورت گرفته است، کاربرد 15٪ از پودر سنگ آهک در بتن اثرات مخربی بر دوام بتن دارد.

آنچه در این مقاله منحصر به فرد است بررسی اثر توامان درصدهای مختلفی از متاکائولن (10٪، 12/5٪، 15٪) و سیمان پرتلند تیپ (1-425) حاوی مقدار بیش از اندازه پودر سنگ آهک در بتن توانمند با مقاومتی بیش از 60 مگاپاسکال و حاوی خمیر سیمان بسیار بالا (530 کیلوگرم سیمان پرتلند آهکی) است. برای حصول اطمینان از ساخت سیمان پرتلند آهکی مناسب، آزمایشهای گوناگون دیگری از قبیل الک آلیپاین، مقاومت خمشی و فشاری و غلظت نرمال و غیره بر روی سیمان جدید در مقایسه با سیمان شاهد انجام گرفته است. نتایج حاصل از کاربرد متاکائولین فعال در بتن توانمند، در مجاورت پودر سنگ آهک و اثرات متقابل آن بر نفوذپذیری، مقاومت الکتریکی، مقاومت فشاری و شاخصهای آزمایش RCMT (مهاجرت یون کلراید) در نمونه های بتنی، از جمله فاکتورهای مهمی هستند که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته اند.

واژه های کلیدی : دوام بتن، بتن توانمند، متاکائولین، پودر سنگ آهک، سیمان پرتلند آهکی، نفوذ یون کلراید

1- مقدمه

تا به امروز آزمایش های مختلف بسیاری به صورت جداگانه بر روی خواص و عملکرد پودر سنگ و متاکائولن بر روی انواع مختلف بتن ها مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله این آزمایشها بررسی خواص فیزیکی و دوام بتن ها در برابر حمله کلرایدی و میزان نفوذ یون کلراید در آنها میباشد. در این مجموعه پس از انجام آزمایشهای لازم جهت بررسی خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی مصالح به کار گرفته شده، عملکرد توامان پودر سنگ و متاکائولن در بتنهای حاوی آب به سیمان کم (0/31) و خمیر سیمان زیاد توسط اندازه گیری مقاومت فشاری، نفوذ آب بلند مدت، مقاومت الکتریکی و ضریب مهاجرت یون کلراید (RCMT) مورد بررسی قرار گرفته است. این در حالی است که بزرگ ترین اندازه سنگ دانه به کار گرفته شده در طرح اختلاط بتن ها 12 میلیمتر و نسبت ماسه به درشت دانه 3 به 1 انتخاب شده است. این انتخابها از آن روست که تغییرات حاصل عملکرد پوزولانها یا ضعفهای حاصل از خمیر سیمان با کاهش نقش سنگدانه ها در این بتن ها به گونه روشن تری ظاهر گردد. از سوی دیگر محققان به ویژه در ارتباط با کاربرد پودر سنگ در بتن ها در آب به سیمانهای گوناگون نتایج بسیار متناقضی را گزارش کرده اند. از آنجایی که نتایج ارائه شده در این گزارش نشاندهنده جذب آب بالای پودر سنگ آهک به کار گرفته شده است، به کارگیری متاکائولن در این نوع از بتن توانمند در سنین اولیه سبب کاهش مقاومت فشاری همچنین دوام در همه آزمایشهای صورت گرفته شده است. این در حالی است که اگرچه فعالیت پوزولانی متاکائولن در طول سن 7-90 روز قابل مشاهده است اما این ماده اثر مناسب را نسبت به نمونه های شاهد در سن 90 روز از خود نشان داده است.

2- عملکرد پودر سنگ آهک بر دوام بتن

تا قبل از سال 1980 اینگونه فرض میشد که نقش پودر سنگ آهک در بتن تنها به عنوان فیلر و یک ماده پرکننده میباشد، اما امروزه نتایج مطالعات نشان میدهد که هیدراتهای کربو آلومینات کلسیم در هیدراتاسیون سیمانهای پرتلند آهکی مشارکت میکنند. و در واکنش بین C_3S و $CaCO_3$ ایفای نقش میکنند و در تسریع هیدراتاسیون C_3S موثرند. لازم به یادآوری است پودر سنگ آهک هیچگونه عملکرد پوزولانی ندارد و در تولید ژل C-S-H نقشی ایفا نمیکند اما تاثیرات فیزیکی گوناگونی مانند اثر رقیق کنندگی، اثر پر کنندگی و تشکیل هسته های غیر متجانس جاذب آب در سیستم دارند.

استاندارد اروپا (EN 197-1-2000) 4 نوع سیمان پرتلند آهکی که حاوی 6-20٪ درصد پودر سنگ آهک هستند را معرفی نموده و تا 5٪ استفاده از آن را به عنوان جزء اصلی تشکیل دهنده سیمان مجاز می شمارد. استاندارد ASTM C-150-04 نیز استفاده حد اکثر 5٪ از پودر سنگ آهک را قابل قبول تلقی میکند. همچنین مطابق آیین نامه ها میزان کربنات کلسیم موجود در پودر سنگ آهک باید که بر اساس اکسید کلسیم موجود در آن محاسبه میشود باید بیش از 70٪ باشد.

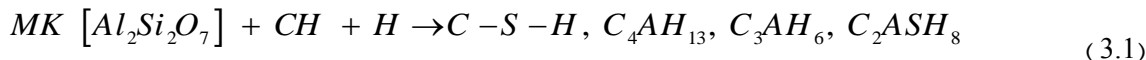
مطالعات Ramezaniapour و گروهش در سال 2009 [1] نشان میدهد که بتنهای حاوی حد اکثر 10٪ پودر سنگ میزان نفوذ آب کمتری نسبت به درصد های بالاتر جایگزینی از خود نشان میدهند. کاهش و یا افزایش عمق نفوذ آب، به خاصیت پر کنندگی پودر سنگ و تشکیل هسته های نامتجانس و همچنین خاصیت رقیق کنندگی بستگی مستقیم دارد.

در ارتباط با تاثیر پودر سنگ در زمان گیرش سیمان نظرات متناقض بسیاری موجود است. البته این موضوع عموماً پذیرفته شده است که نرمی پودر سنگ فاکتوری اثر گذار بر زمان گیرش است. Vu و همکاران در سال 2001 [2] آزمایشاتی را بر روی سیمانهای گوناگون با C_3S های گوناگون و با جایگزینی 0٪ و 5٪ با پودر سنگ آهک دارای نرمی های متفاوت انجام داده و به این نتیجه رسیدند که با افزایش نرمی زمان گیرش اولیه و ثانویه کاهش میابد. El-Didamony و همکاران در 1995 [3] به این موضوع اشاره نمودند که افزایش جایگزینی پودر سنگ در سیستم نیز سبب کاهش زمان گیرش اولیه و ثانویه خواهد شد و حتی در 20٪ جایگزینی، میزان 70 دقیقه کاهش در زمان گیرش اولیه را نیز گزارش نموده اند.

اما در سویی دیگر Guemmadi و همکاران در سال 2005 [3] اعلام کردند که رفتار مشخصی در تغییرات زمان گیرش مشاهده نکردند اما در گزارشات خود به نرمی پودر سنگ به عنوان یکی از عوامل تغییر در زمان گیرش اشاره کرده اند. Moir and Kelham در سال 1997 [3] گزارش کرده اند که افزایش نرمی پودر سنگ با جایگزینی 20٪، زمان گیرش را افزایش داده است. Tsvivilis در سال 1999 [3] نیز خبر از کاهش جزئی در زمان گیرش به واسطه افزایش جایگزینی داده اند.

3- عملکرد متاکائولین بر دوام بتن

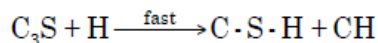
متاکائولین از فرآیند حرارتی رس حاوی کائولینیت، حاصل میشود. این ماده که از پوزولانهای فعال محسوب میشود در جهان به صورت گسترده و در صنایع مختلف مخصوصا به عنوان یک پوزولان موثر در بهبود مقاومت و دوام بتن مورد استفاده قرار میگیرد. ذخایر این ماده ارزشمند در سال 2001 در جهان 20 میلیارد تن تخمین زده شده که سهم کشور ما تقریبا 40 میلیون تن برآورد شده [10]. نتایج تحقیقین گویای اثر مثبت این ماده در بهبود مقاومت خمشی و پیچشی، کاهش نفوذ آب، افزایش مقاومت در برابر حمله های کلریدی و ASR و همچنین فواید دیگری از جمله کاهش خزش حکایت دارد.



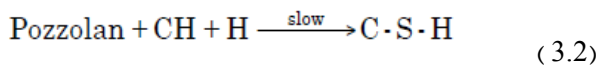
موادی چون متاکائولین که حاوی آلومینای بیشتری هستند تمایل زیادی به مصرف C-H و تشکیل C-A-H دارند و فعالیت بسیاری از خود نشان میدهند.

آنچه در ذیل ارائه شده است (رابطه 3.2) نمای دیگری از واکنش هیدراتاسیون سیمان و واکنش پوزولانی بعد از تولید C-H است. فعالیت متاکائولن در سیستم بستگی زیادی به میزان C-H تولید شده، میزان آب موجود در اختلاط، میزان C3A سیمان مصرفی و سطح جایگزینی آن دارد.

Portland Cement



Portland-Pozzolan Cement



Poon و همکاران در 2001 [4] به این نتیجه رسیدند که میزان عملکرد حاصل از فعالیت پوزولانی متاکائولن در کلیه سنین نسبت به نمونه های شاهد در سطح جایگزینی 5٪ بیشتر از 10٪ و 20٪ بوده است. که این فعالیت بهتر پوزولانی با میزان بیشتر کلینکر سیمان در سیستم و در نتیجه غلظت C-H بیشتر تولیدی در آن در ارتباط است.

Frías and Cabrera در سال 2000 [5] میزان C-H موجود در خمیرهای سیمانی حاوی متاکائولن را به روش TGA و DTA بررسی و در تمامی نمونه ها و همه درصد های جایگزینی تا سن 7 روز افزایش سطح $Ca(OH)_2$ به وضوح مشاهده شده و پس از آن تا سن 90 روز کاهش میابد. سپس با توقف فعالیت پوزولانی سطح C-H اندکی افزایش میابد.

در تحقیقاتی دیگر که بر روی اثر متاکائولن در بهبود ریز ساختار نمونه های بتنی انجام گرفته است (Shvarzman در سال 2003 و Arikan در سال 2003) نیز به نتایج مشابهی دست یافته اند و به طور کل از نقش متاکائولن در بهبود ریزساختار بتن خبر داده اند اما به این نکته اشاره کرده اند که عملکرد متاکائولن ناشی از فعالیت پوزولانی، خاصیت پر کنندگی و افزایش سرعت هیدراتاسیون و همچنین خاصیت رقیق کنندگی و انتشار است و در نظر گرفتن هر یک از این خصوصیات جدای از دیگر موارد امری غیر ممکن است. [6-7]

Vaishali و گروهش در سال 2011 [9] با آزمایش بر نسبتهای مختلف آب به مواد سیمانی از 0/3 الی 0/5 مناسب ترین جایگزینی را برای متاکائولن 10٪ تشخیص داده اند که در تمامی موارد مقاومتی بالاتر از سایر نمونه ها کسب کرده بودند. آنها همچنین با کار بر روی میزان نفوذ یون کلراید در بتنهای توانمند، در آزمایش (RCPT) کمترین شار عبوری را برای آب به مواد سیمانی 0/3 و جایگزینهای 20٪ و 30٪ اعلامی کرده که این بخاطر کاهش میزان کلینکر و همچنین کاهش غلظت یونهای حاصل از هیدراتاسیون کلینکر سیمان گزارش شده است [9]. [Bahrami در 2011 و Courard در 2003] نیز جایگزینی مقدار مناسبی از متاکائولن با کلینکر سیمان را برای بهبود مقاومت الکتریکی و مقاومت در برابر حمله کلریدی مفید ارزیابی کرده اند. [8-11]

Safavizadeh در سال 2009 [10] نیز مناسبترین میزان برای کسب بهترین مقاومتها را در جایگزینی 5-10٪ پیشنهاد کرده است.

4- تجهیزات و وسایل آزمایش

در انجام آزمایشهایی که به آنها به تفضیل اشاره خواهد شد، از وسایل گوناگونی همچون جک بتن شکن کالیبره شده تا دستگاه سنجش مقاومت الکتریکی Wenner، و دستگاه RCMT برای سنجش ضریب مهاجرت یون کلراید به کار گرفته شد. جهت ساخت و عمل آوری آزمونها از انواع قالبها، دستگاهها و حوضچه های عمل آوری که برای ساخت و عمل آوری ملات و بتن عمومیت دارد استفاده شد.

5- نحوه انجام آزمایش

5-1- شرح آزمایشها و استانداردها

در این برنامه آزمایشگاهی علاوه بر آزمایشهایی که بر روی مصالح مورد استفاده صورت گرفته، بر روی نمونه های ملات و بتن نیز آزمایشهای گوناگونی مطابق آنچه پیشتر ذکر شد صورت پذیرفته است.

برای ساخت سیمان جدید که حاوی 15٪ درصد پودر سنگ آهک باشد (LPC) آزمایشهای غلظت نرمال (ASTM C-305) و زمان گیرش اولیه و ثانویه (ASTM C-187-98)، مقاومت خمشی و فشاری (Iran Standard Code-393) بر روی نمونه های ملات انجام پذیرفته و با نتایج حاصل از نمونه های شاهد حاوی سیمان پرتلند معمولی تیپ 1-425 (OPC) مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین برای سنجش ضریب فعالیت فیزیکی متاکائولن آزمایش مقاومت فشاری جداگانه ای مطابق (ASTM C-109) بر روی نمونه های ملات با طرح اختلاط مشخص صورت پذیرفته است.

آزمایش جذب آب بلند مدت بر روی نمونه های بتن بر اساس استاندارد (ASTM C-642-97) صورت گرفت که آزمونهای استوانه ای به قطر 100 میلیمتر و به ضخامت 50 میلیمتر که هر کدام بیش از 800 گرم وزن داشتند.

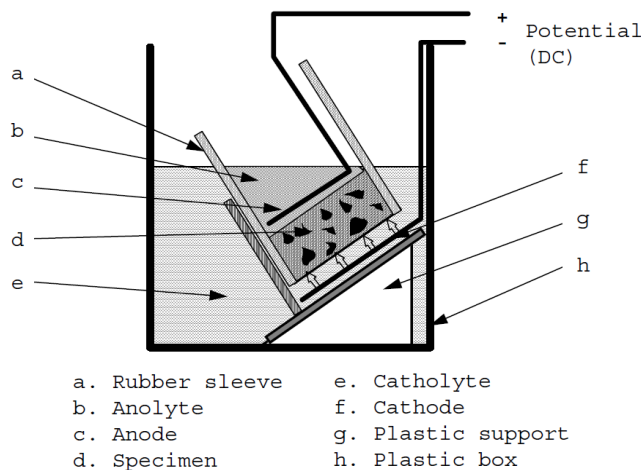
سنجش مقاومت الکتریکی توسط دستگاه Wenner اندازه گیری و مطابق استاندارد (ASHTO T08) مورد ارزیابی قرار گرفت. این اندازه گیری بر روی آزمونهای استوانه ای با عرض 100 میلیمتر و ارتفاع 200 میلیمتر انجام گرفته است.

محاسبه ضریب مهاجرت یون کلراید بر اساس آزمایش (Rapid Chloride Migration Test) و مطابق استاندارد (NT Build 492) به شرح ذیل بر روی نمونه های استوانه ای با قطر 100 میلیمتر و ضخامت 50 میلیمتر صورت پذیرفته است. این نمونه ها ابتدا در دستگاه دسیکاتور خلا قرار گرفته و در آن مجدداً اشباع میشوند، و پس از قرار گرفتن در دستگاه (RCMT) و اعمال پتانسیل 30 ولت جریانی از آنها عبور داده میشود که توسط دستگاه اندازه گیری میگردد. قرائت این اندازه گیری ها مطابق جدول استاندارد، ولتاژ مناسب را معرفی و پس از اعمال ولتاژ مناسب بعد از گذشت 24 ساعت و شکستن آزمونها میزان نفوذ یون کلر در نمونه ها به کمک نیترات نقره اندازه گیری میگردد. در آخر با قرار گرفتن در فرمول ذیل ضریب مهاجرت یون کلراید محاسبه میگردد. در دستگاه (RCMT) محلول 10٪ NaCl در آب مقطر به عنوان کاتولیت و محلول 0/3 مول NaOH در آب مقطر به عنوان آنولیت مورد استفاده قرار میگیرد.

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}} \right) \quad (5.1)$$

U: میزان ولتاژ اعمال شده T: میانگین دمای اولیه و ثانویه آنولیت L: ضخامت قطعه بر حسب میلیمتر x_d: میانگین نفوذ یون کلر در قطعه مورد آزمایش t: زمان آزمایش بر حسب ساعت.

شکل شماره (1) نمای شماتیک دستگاه (RCMT) است.



شکل 1- تصویر شماتیک دستگاه سنجش ضریب مهاجرت یون کلراید

5-2- آماده سازی نمونه ها

مراحل ساخت، قالبگیری، عمل آوری و آماده سازی کلیه نمونه ها مطابق استانداردهای ذکر شده صورت پذیرفته و همه آزمونه ها تا سن آزمایش، در آب آهک و دمای تقریبی 18-20 درجه سانتیگراد عمل آوری شده اند.

6- برنامه آزمایشگاهی

برای بررسی مقاومت فشاری و آزمایشهای دوام نمونه های بتنی، از 4 طرح اختلاط مختلف شامل بتن حاوی 0٪ متاکائولن به عنوان نمونه های شاهد و بتن حاوی 10٪ و 12/5٪ و 15٪ متاکائولن استفاده گردید که ساخت همه نمونه ها با سیمان (LPC) صورت پذیرفته است.

6-1- مصالح مصرفی

برای ساخت نمونه های بتنی از سیمان تیپ 1-425 حاوی 15٪ پودر سنگ آهک (LPC) استفاده شده که سنگ آهک مورد نیاز بر اساس مانده روی الک 90 میکرون در آزمایش آلپاین مطابق سیمان پرتلند معمولی آسیاب شده است و در کنار آن از متاکائولن فعال به عنوان پوزولان مصرفی جایگزین سیمان (LPC) مورد استفاده قرار گرفته است. در بخشهای بعدی ترکیبات شیمیایی این مواد آورده شده است. برای تمامی طرح ها از درشت دانه شکسته شده با حداکثر قطر 12 میلی متر و سنگدانه ریز طبیعی به عنوان ماسه استفاده گردید. برای رسیدن به کارایی مطلوب از فوق روان کننده با نام تجاری TamCem 23SSR به میزان 0/4 درصد وزنی مواد چسباننده استفاده شده است. فوق روان کننده مورد استفاده از نوع پایه پلی کربوکسیلات بوده است.

برای ساخت و عمل آوری نمونه های بتنی از آب شرب شهر تهران استفاده گردید. قابل ذکر است که اندازه گیری تمامی نسبتها وزنی بوده است.

6-2- تعیین ضریب فعالیت فیزیکی متاکائولن

این آزمایش که بر روی نمونه های ملات مکعبی 5 سانتیمتری ملات صورت گرفته است. با تقسیم حاصل مقاومت فشاری 7 روزه و 28 روزه نمونه های حاوی 15٪ متاکائولن بر نمونه های (OPC) بدون حضور پودر سنگ اندازه گیری شده است. جدول شماره (1) معرف طرح اختلاط نمونه های ملات است.

Materials	OPC	15% MK
Sand	1667	1667
Cement	556	472
MK	0	83
Water	278	278

در این طرح اختلاط نسبت آب به مواد سیمانی برابر با 0/5 و نسبت میزان ماسه به مواد چسباننده 3 به 1 انتخاب شده است. جدول شماره (2) دانه بندی ماسه به کار گرفته شده را نشان میدهد. لازم به ذکر است که شاخص افزایش مقاومت فشاری توسط 15٪ متاکائولن برای سن 7 روز 0/97 و برای 28 روز 1/095 حاصل شده است.

6-3- نتایج آزمایشها و تجزیه و تحلیل آنها

جدول 1- طرح اختلاط (kg/m³)

در این بخش علاوه بر آزمایشهای صورت گرفته بر روی مصالح به تجزیه و تحلیل نتایج مربوط به آزمایشهای صورت گرفته بر روی نمونه های ملات و بتن خواهیم پرداخت.

Sieve Number	% amount of Sand
Remained on #16	30%
Remained on #30	20%
Remained on #50	24%
Remained on #100	19%
Passed of #100	7%

Aggregates	Water absorption ratio	Density (gr/cm ³)	Fineness modulus	Maximum size
Fine	2.2	2.55	3.44	12 mm
Coarse	1.8	2.58		

جدول 3- خصوصیات فیزیکی ریزدانه و درشت دانه به کار رفته در ملات و بتن

جدول 2- دانه بندی ماسه در آزمایش ضریب فعالیت

Number and size of the sieves (mm)	Remained on sieves (gr)	Remained on sieves %	accumulative remained %	Passed of the sieves %	Code limitations ISIRI302	
					min	max
3/8 "	9.5	0	0.0	100	100	
۴	4.75	94	13.5	86	89	
۸	2.36	133.7	19.2	67	60	100
۱۶	1.18	142.8	20.5	47	30	90
۳۰	0.6	93.04	13	33	15	54
۵۰	0.3	112.15	16	17	5	40
۱۰۰	0.15	86.6	12	5	0	15
Pan + 200	33.99	5	100.0	-		
(FM) :			3.44			

جدول 4- دانه بندی ماسه به کار رفته در طرحهای اختلاط بتن

Oxide Elements	(%)Weight	Compounds	(%)Weight
SiO ₂	21.61	C3S	52.18
Al ₂ O ₃	4.50	C2S	22.59
Fe ₂ O ₃	3	C3A	6.85
CaO	63.02	C4AF	9.13
SO ₃	1.97		
MgO	3.40	ALM	1.50
Na ₂ O	0.151	SIM	2.88
K ₂ O	0.48	LSF	92.99
LOI	1.84		
Physical Specifications			
Density (gr/cm ³)	3.18		
Blaine (cm ² /g)	3200		

جدول 5- مشخصات شیمیایی سیمان تیپ 1-425

Chemical Components of limestone

Calcium oxide (CaO) (%)	54.77
Silicon dioxide (SiO ₂) (%)	1.47
Magnesium oxide (MgO) (%)	0.3
Aluminium oxide (Al ₂ O ₃) (%)	0.22
Ferric oxide (Fe ₂ O ₃) (%)	0.29
Sulphate oxide (SO ₃) (%)	0.06
Potassium oxide (K ₂ O) (%)	0.08
Sodium oxide (Na ₂ O) (%)	0.05
Titanium oxide (TiO ₂) (%)	0.05
Phosphorus oxide (P ₂ O ₅) (%)	0.01
LOI (%)	42.23

Chemical Characteristics of Limestone:

CaCO ₃ content (%)	97.8
Total organic carbon (TOC) (%)	0.05
Methylene blue adsorption (MBA) (gr/100 gr)	0.07
Moisture content (%)	0.37

جدول 6- مشخصات شیمیایی پودر سنگ آهک

آنچه در جدول (7) مشاهده میشود مقایسه نتایج مربوط به خصوصیات فیزیکی نمونه های ملات و خمیر سیمان ساخته شده با سیمان پرتلند آهکی (LPC) و سیمان تیپ 1 معمولی (OPC) است.

No.	Specimen	Code	Setting time (min)		Normal Consistency %	Bending Strength (Mpa)			Compressive Strength (Mpa)		
			initial	final		3	7	28	3	7	28
1	OPC	343	180	219	24	5.3	6.9	7.7	27.8	36.8	46.4
2	LPC	343/1	131	155	24	4.9	6.5	7.6	25.7	34.1	43.0

جدول 7- مقایسه مشخصات فیزیکی حاصل از نمونه های ملات و خمیر سیمان

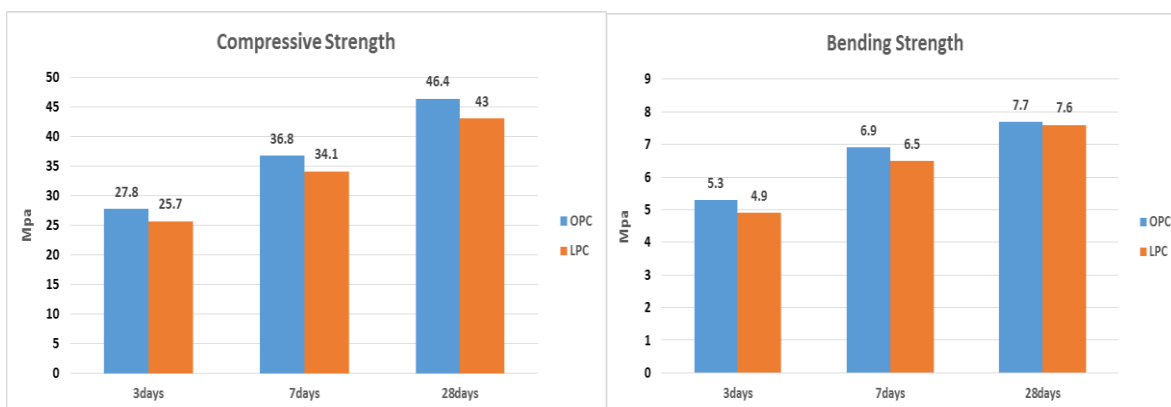
همانطور که پیش تر گفته شد برای تولید سیمان پرتلند آهکی که دارای ریزی مشابه با سیمان معمولی باشد پودر سنگ به اندازه ای آسیاب شد که میزان مانده روی الک 90 میکرون در آزمایش آلباین (جدول شماره (8)) مشابه سیمان نوع 1 به کار رفته باشد. آزمایش غلظت نرمال که بر روی خمیر سیمان صورت گرفته و عدد یکسان 24٪ را نشان میدهد میتواند تایید دیگری از تشابه ریزی ذرات در هر دو سیمان باشد.

No.	Material	Remained on 90 micron (%)
1	OPC	4.3
2	LPC	4.1

همچنین نتایج بالا بیانگر این مطلب است که مقاومت خمشی نمونه ها در 28 روز با یکدیگر تفاوت چندانی ندارد اما در آزمایش مقاومت فشاری نمونه ها، 7/3٪ کاهش مقاومت به علت استفاده از (LPC) مشاهده شد. همچنین همانطور که پیش تر نیز اشاره شد، نتایج متناقض بسیاری در مورد نقش پودر سنگ در زمان گیرش سیمان وجود دارد و بر اساس جدول (7) استفاده 15٪ درصدی از این نوع پودر سنگ کاهشی بین 27-30٪ در زمان گیرش ایجاد کرده است که خود میتواند نشانگر جذب آب بالای آن باشد.

جدول 8- نتایج آزمایش الک آلباین

(7) استفاده 15٪ درصدی از این نوع پودر سنگ کاهشی بین 27-30٪ در زمان گیرش ایجاد کرده است که خود میتواند نشانگر جذب آب بالای آن باشد.



نمودار 1- نتایج آزمایش مقاومت فشاری و خمشی نمونه های ملات

آنچه در جدول شماره (9) مشاهده میکنید نشان دهنده طرح اختلاط نمونه های بتنی است که آزمایشهای مقاومت فشاری، جذب

Materials (kg)	Reference Sample 0%	MK 10%	MK 12.5%	MK 15%
Coarse Agg.	410.5	410.5	410.5	410.5
Fine Agg.	1216	1216	1216	1216
LPC	530	477	464	451
MK	0	53	66	79
Water	164	164	164	164
Agg. Water absorption	22.2	22.2	22.2	22.2
Super Plasticizer	2.12	2.12	2.12	2.12

آب، مقاومت الکتریکی و ضریب مهاجرت یون کلراید بر روی آنها صورت گرفته است. نسبت آب به مواد سیمانی در کلیه طرح ها 0/31 و نسبت ریز دانه به درشت دانه 3 به 1 در نظر گرفته شده است و اسلامپ کلیه طرحهای ساخته شده بین 7 تا 10 سانتیمتر اندازه گیری شد.

جدول 9- طرح اختلاط نمونه های بتن

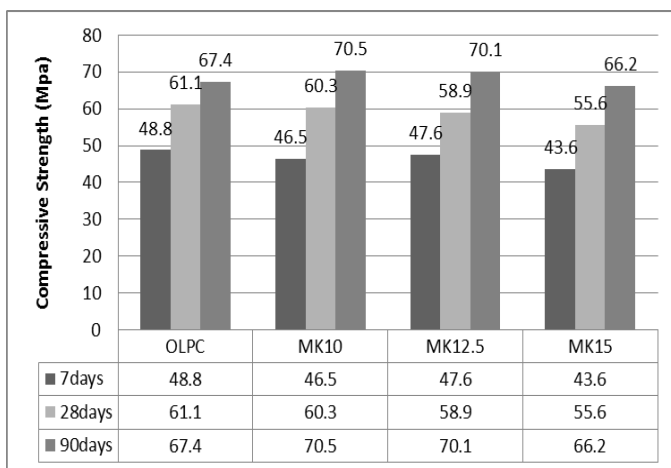
در نمودار (2) نتایج مقاومت فشاری که بر روی آزمون‌های مکعبی 10 سانتیمتری انجام گرفته نشان داده است که با رشد سن نمونه‌ها مقاومت فشاری افزایش میابد و تفاوت بین نمونه‌های حاوی متاکائولن و نمونه‌های شاهد کاهش یافته و سرانجام در سن

Contents	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	CaO	TiO2	K2O	Na2O
%	59.12	33.84	2.27	0.37	2.45	0.18	0.54	0.37

90 روز، MK10 و MK12.5 از نمونه‌های شاهد پیشی میگیرند. البته MK10 مناسب ترین مقاومت 90 روزه را نسبت به بقیه از خود نشان میدهد. این موضوع بخاطر این حقیقت است که در آب به سیمانهای بسیار کم میزان

جدول 10- نتایج XRF متاکائولن

افزایش مقاومت ناشی از واکنش‌های کلینکری بسیار بیشتر از واکنشهای پوزولانی متاکائولن است مخصوصا در سیمان تیپ یک، و سبب میشود خاصیت رقیق کنندگی بر دیگر مسائل غلبه کند. اگرچه این نوع از متاکائولن در نمونه‌های ملات با نسبت آب به مواد سیمانی 0/5 ضریب فعالیتی برابر با 1/095 در 28 روز از خود نشان داده به نظر میرسد وجود پودر سنگ به عنوان ذرات جاذب آب در سیستم که آب خود را به تدریج از دست میدهد، سرعت



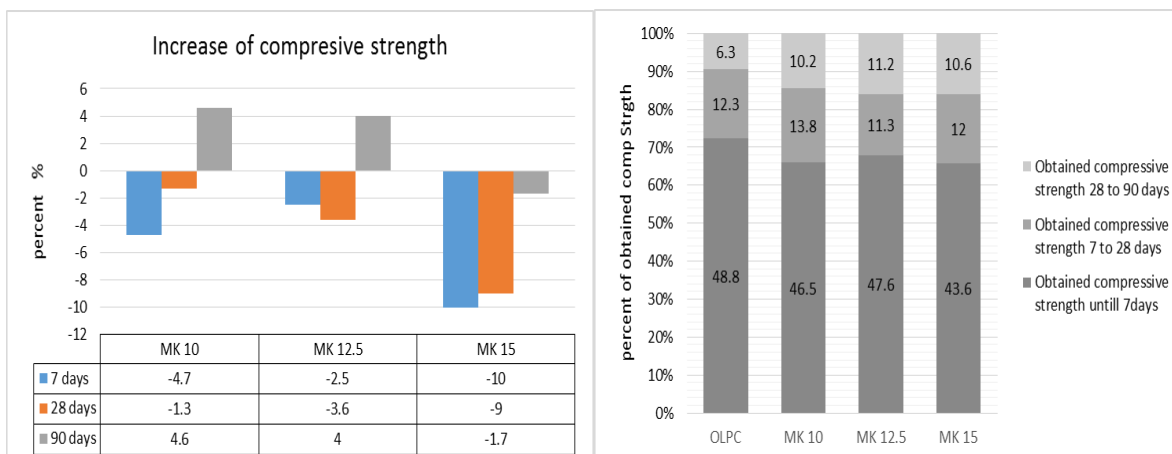
واکنشهای پوزولانی را کاهش میدهد. چون از طرفی واکنشهای پوزولانی متاکائولن نسبت به واکنشهای کلینکری کمتر است و از طرف دیگر باید تناسب درستی بین میزان سطح جایگزینی، همچنین C-H تولید شده در سیستم در مجاورت آب زیاد وجود داشته باشد تا شاهد فعالیت مناسب این ماده پوزولانی باشیم. کاهش مقاومت MK15 نسبت به سایر نمونه‌ها حتی در سن 90 روز نیز به خاطر غلبه خاصیت رقیق کنندگی است که حتی واکنشهای پوزولانی در آن سن نیز نتوانستند بر آن غلبه کنند. نمودار (3) این مطلب را به خوبی نشان میدهد. نمودارهای (3و4) نیز متعلق به اندازه گیری مقاومت فشاری آزمون‌های بتنی است.

نمودار 2- مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی

آزمایش جذب آب حجمی بلند مدت نیز به نوعی میتواند

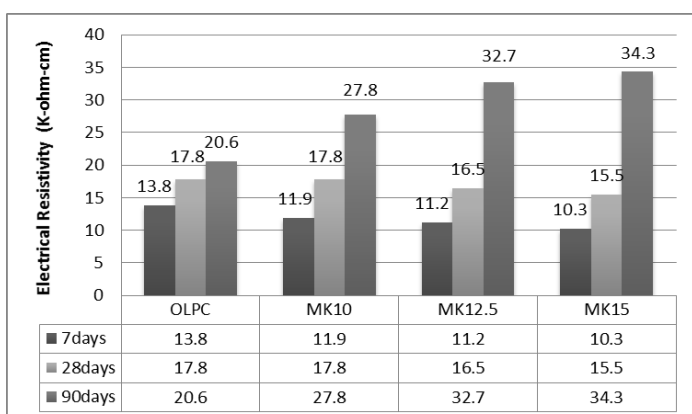
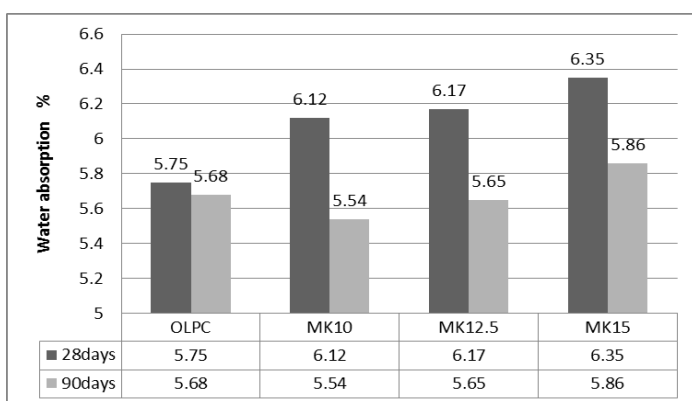
مبین مطالب بالا باشد. همانطور که در نمودار شماره (5) مشاهده میشود در سن 28 روز تمامی درصدهای جایگزینی سبب ضعف در نمونه‌های بتنی نسبت به نمونه شاهد و افزایش جذب آب گردیده اند و این به سبب رقیق کنندگی متاکائولن است. گرچه با افزایش سن و بهبود ریز ساختار جذب آب کاهش یافته اما MK15 نسبت به سایر نمونه‌ها ضعف بیشتری نشان میدهد. در میان نمونه‌ها MK10 مناسب ترین عملکرد را از خود نشان داده و این بخاطر تشکیل ژل ثانویه و بهبود ریز ساختار است. لازم به ذکر است در مجموع درصد جذب آب بالای این نوع از بتن میتواند به خاطر خمیر سیمان بسیار زیاد موجود در سیستم (530 کیلوگرم LPC)، نسبت ریزدانه به درشت دانه بسیار بالا (3 به 1) اندازه بزرگترین سنگدانه 12 میلیمتر، وجود پودر سنگی با جذب آب بالا و همچنین بلند مدت بودن آزمایش باشد. لازم به ذکر است که نمونه‌ها از هر دو سمت توسط کاتر برش خورده اند تا به نمونه‌های استوانه با ضخامت 5 سانتیمتر تبدیل شوند.

نمودار شماره (6) معرف آزمایش مقاومت الکتریکی است که بر روی نمونه‌های بتنی صورت گرفته است.



نمودار 4- درصد مقاومت فشاری کسب شده در سنین گوناگون نمودار 3- درصد افزایش مقاومت فشاری

نمودار 5- نتایج آزمایش جذب آب حجمی

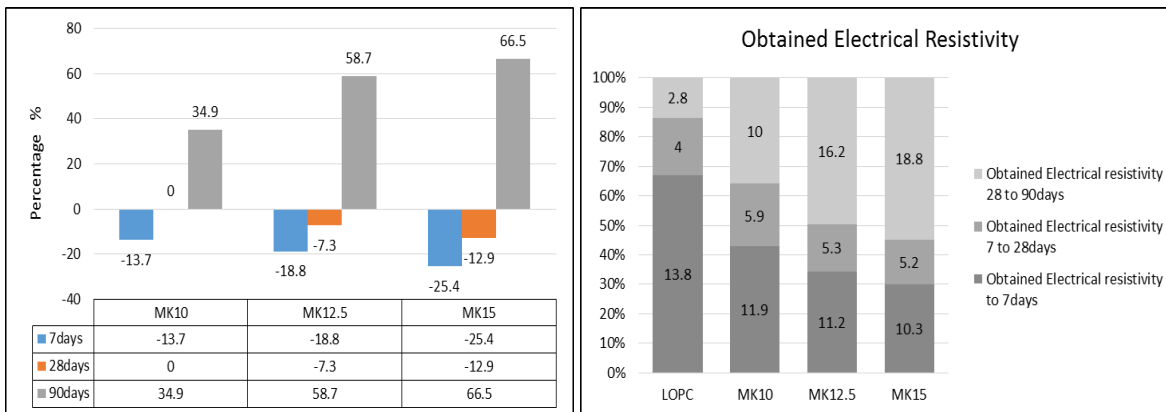


نمودار 6- نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی

این آزمایش همانطور که پیشتر ذکر شد بر اساس دستور العمل ASHTO T-08 انجام گرفته متعاقباً نشان از کاهش مقاومت در سنین 7 و 28 روز به ازای تمامی مقادیر جایگزینی دارد. البته میزان مقاومت الکتریکی در سن 28 روز برای MK10 با نمونه شاهد برابر شده است. که خود نشان دهنده این مطلب است که فعالیت پوزولانی در فاصله 7 تا 28 روز وجود دارد. مقاومت الکتریکی و همینطور ضریب مهاجرت یون کلر در (RCMT) بستگی به غلظت یونی درون سیستم بتن، رسانایی مایع منفذی و همچنین ریز ساختار دارد. چرا که آب اشباع که از طریق ضعف در ریز ساختار به داخل نفوذ میکند جابجایی یونها را در داخل تسریع مینماید. بدین سبب است که هنگامی که انتظار داریم تا به خاطر خاصیت رقیق کنندگی با جایگزینی های گوناگون MK و کاهش غلظت یونی داخل سیستم، مقاومت الکتریکی افزایش پیدا کند اما ضعف در ریزساختار سبب کاهش مقاومت الکتریکی میشود.

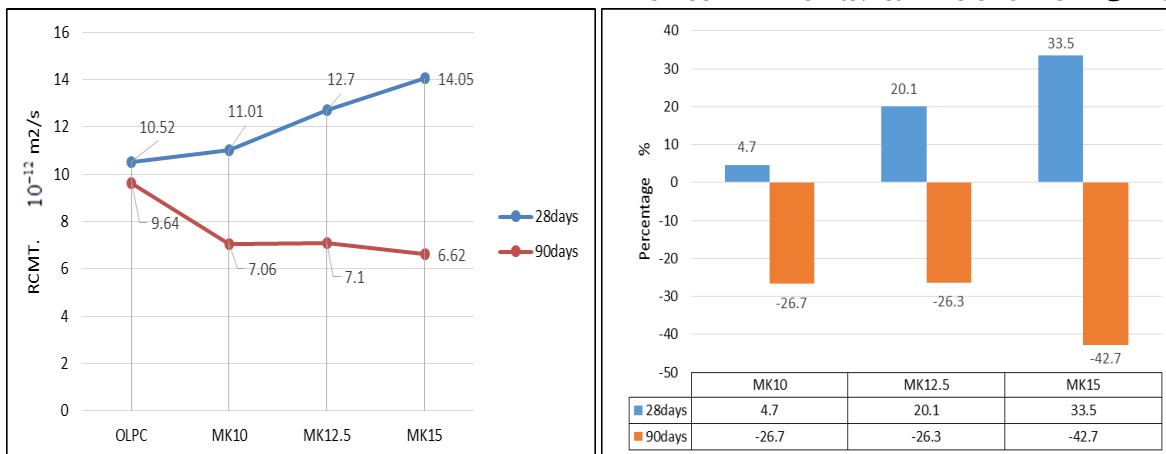
این مسئله در اندازه گیری شاخصهای (RCMT) هم که با نفوذ یون کلر در ساختار بتن در ارتباط است مشاهده شده است. همانطور که در کلیه نمودارها

نمایان است مناسب ترین میزان جایگزینی برای بالاترین مقاومت الکتریکی در سن 90 روز برای MK15 حاصل شده است. در واقع اثر توامان سه عامل رقیق کنندگی و کاهش غلظت یونی از طرفی و فعالیت پوزولانی و مصرف یون OH در سیستم و همچنین بهبود نسبی ریز ساختار، سبب پیشی گرفتن MK15 از سایرین شده است. از آنجایی که عوامل موثر در مقاومت الکتریکی و مهاجرت یون کلراید یکسان است، نتایج مشابهی در هردو آزمایش مشاهده شده و به شکل مشابه قابل توجیه است. در هردو آزمایش در حالی که بدترین نتیجه در سن 28 روز متعلق به MK15 میباشد، این میزان از جایگزینی در سن 90 روز بهترین نتیجه را از آن خود کرده است.



نمودار 7- درصد مقاومت الکتریکی کسب شده در سنین گوناگون نمودار 8- درصد افزایش مقاومت الکتریکی

آنچه مسلم است، نتایج حاصل از این آزمایشها مسلما با تغییر نوع سنگ آهک مورد استفاده، یا متاکائولن مصرفی و یا حتی با کاهش یا افزایش میزان خمیر سیمان و نسبت درشت دانه ها به ریزدانه در ساختار بتن تغییر خواهد کرد لذا ضروریست برنامه های آزمایشی دیگری در این راستا مورد پژوهش مضاعف قرار گیرد.



نمودار 10- درصد افزایش ضریب مهاجرت یون کلراید نمودار 11- نتایج آزمایش مهاجرت تسریع شده یون کلراید

7- نتیجه گیری

بر اساس مجموعه نتایج بدست آمده، استفاده از متاکائولن با درصدهای جایگزینی پایین در بتنهای حاوی آب به سیمانهای بسیار کم توصیه میشود. همچنین بالا بودن میزان خمیر سیمان در بتن به علت بالا بردن غلظت یونی موجود در سیستم سبب ضعف در برابر حملات الکترو شیمیایی گشته و مقاومت الکتریکی بتن را به شدت کاهش دهد. از سوی دیگر میزان جایگزینی متاکائولن در بتن باید در تناسب با میزان C-H تولید شده از هیدراتاسیون سیمان و آب موجود در سیستم باشد تا بهترین عملکرد را از خود نشان دهد. لازم به ذکر است که نمیتوان نقش پودر سنگ، خواص فیزیکی و میزان جایگزینی آن را در بتنهای با نسب آب به سیمان بسیار پایین نادیده گرفت.

8- مراجع

1. Ali A. Ramezani pour, E.ghiasvand, Nickseresht, M. Mahdikhani, F. Moodi "Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes" ELSEVIER Cement & Concrete Composites 31, 20 Agust 2009; 715-720
2. Vu, D.D., Stroeven, P. and Bui, V.B., "Strength and durability aspects of calcined kaolin-blended Portland cement mortar and concrete", Cement and Concrete Composites, 2001; 23(6): 471-478.
3. Cement association of Canada. by R. D. Hooton, M. Nokken, and M. D. A.Thomas "Portland-Limestone Cement: State-of-the-Art Report and Gap Analysis for CSA A 3000".
4. Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C., Wong, Y.L. and Wong, R., "Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes", Cement and Concrete Research, 2001; 31(9): 1301-1306.
5. Frías, M. and Cabrera, J., "Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin-cement pastes", Cement and Concrete Research, 2000; 30(4): 561-569.
6. Shvarzman, A., Kovler, K., Grader, G.S., Shter, G.E., "The effect of dehydroxylation/ amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite", Cement and Concrete Research, Vol. 33(3), 2003;
7. Arikan, M., Sobolev, K., Ertuün, T., Yeginobali, A., Albayrak, M., Aras, A., "Development of cement and concrete additives based on thermally activated kaolin". TUB_ITAK project proposal_IC,TAG , 2003; 680:55.
8. بهرامی جوین ، پایان نامه کارشناسی ارشد " بررسی اثر متاکائولن در خوردگی سولفاتی و نفوذ یون کلراید در بتنها" پروفیسور علی اکبر رمضانپور- دکتر فرامرز مودی، دانشگاه امیر کبیر - پاییز 1390
9. Dr.Vaishali. G.Ghorpade, Dr.H.Sudarsana Rao, "Chloride-Ion permeability studies of metakaolin based high performance concrete" International Journal of Engineering Science and Technology", Feb 2011;
10. صفوی زاده ، پایان نامه کارشناسی ارشد " امکان سنجی تولید متاکائولین در ایران و بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن های ساخته شده با دو متاکائولین داخلی " پروفیسور علی اکبر رمضانپور، دانشگاه امیر کبیر - تابستان 1388
11. Courard, L., Darimont, A., Schouterden, M., Ferauche, F., Willem, X. and Degeimbre, R., Durability of mortars modified with metakaolin, Cement and Concrete Research, 2003; 33(9): 1473-1479.

The evaluation of applying Metakaolin in adjacent with Limestone Portland Cement to durability of HPC Concrete

1. Ali Akbar Ramezani pour 2. Nima Afzali

1. Head of Concrete Technology & Durability Research Center

2. Master of engineering of construction management. Amirkabir Uni.

1. aaramce@aut.ac.ir

Tel : 021-64543027

2. nima_afzali1981@yahoo.com

Tel : 09111227297

Abstracts:

Now a days, the importance of the durability in concretes is many more than the other factors like the compressive strength, because the researchers obviously have discovered the effects of environmental conditions on the durability and strength of concretes during time. Reinforced concrete structures which are exposed to harsh environments yet is often expected to last with little or no repair or maintenance for long periods of time. To do this, a durable structure needs to be produced. Especially for reinforced concrete structures, one of the major forms of environmental attack is chloride penetration, which leads to corrosion of the reinforcing steel and a subsequent reduction in the strength, serviceability of the structure. This may lead to early repair or replacement of the structure. The ability of chloride ions to penetrate the concrete must then be known for design and quality control purposes.

A common method of preventing such deterioration is to prevent chlorides from penetrating the structure by using additives like *high reactivity Metakaolin* (HRM) in the system. Metakaolin is highly processed kaolinite clay that has been heat-treated under controlled conditions. Based on the important researches, also using appropriate portions of limestone contributes to improve compressive strength and permeability of concrete, But using 15% of limestone in concrete has severe effects on durability.

Which is unique In this paper is, the simultaneous effects of different percentages of Metakaolin (10% , 12.5% , 15%) with Type 1-425 Portland Cement containing 15% limestone at a high performance concrete (>60MPa) have been evaluated.

In order to produce appropriate limestone cement, additional tests like Alpine Sieve, Bending test, and Compressive Strength, etc. have been carried out in this investigation. Results of using a high reactivity Metakaolin in high performance concrete in adjacent with excessive amount of limestone, and the relative influences on the *Compressive Strength, Impermeability, Electrical Resistance, and RCMT indexes* (Rapid chloride Migration Test) are just some important factors presented in this paper.

Keywords: Concrete Durability, High Performance Concrete, Metakaolin, Limestone, chloride attack