مجله تحقیقات بتن
زمستان۸۷، شماره ۲، ص۶۳-۵۵
تاریخ دریافت:۸۷/۵/۲
تاریخ پذیرش:۸۷/۱۲/۲۰

بهبود خواص بتن های توانمند با استفاده از متاکائولن

محمد شکرچی زاده
سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران، استادیار دانشکده عمران دانشگاه تهران
علیرضا میردامادی
کارشناس ارشد انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران، کارشناس ارشد ژئوتکنیک دانشگاه تهران
mirdamad@gmail.com
ابوذر بنکدار
دانشجوی دکتری دانشگاه ایالتی آریزونا—آمریکا
مهدی بخشی
دانشجوی دکتری دانشگاه ایالتی آریزونا—آمریکا

چکیده

متاکائولن یکی از پوزولان های فعال است که در دهه های اخیر مورد استفاده قرار می گیرد. این ماده که از پختن رس کائولن بدست می آید به منظور افزایش مقاومت مکانیکی و پایایی بتن و در مواردی بهبود ویژگی های ظاهری بتن های تزئینی کار برد دارد. در این تحقیق اثرات جایگزینی این پوزولان با سیمان با درصد های پنج، ده و پانزده بر مشخصات بتن تازه (روانی، درصد هوا، زمان گیرش، چگالی)، خواص مکانیکی (مقاومت فشاری، خمشی، کششی برزیلی) و پایایی (عمق نفوذ در برابر آب، نفوذ پذیری هوا، جذب آب، مقاومت الکتریکی، پتانسیل واکنش سیلیکاتی قلیایی و نفوذ یون کلر) با بتن شاهد (بدون پوزولان) مقایسه شده است. نتایج بدست آمده حاکی از بهبود خواص بتن با افزایش درصد متاکائولن بوده است.

واژه های کلیدی: **بتن، متاکائولن، خواص بتن تازه، آزمایشهای مکانیکی، آزمایشهای پایایی**

مقدمه

متاکالوئن از اواسط دهه۹۰ میلادی به صورت تجاری در صنعت راه و ساختمان وارد شده است و این پوزولان یکی از جدیدترین مصالح جایگزین سیمان برای تهیه بتن های توانمند محسوب می شود. متاکائولن از کلسینه شدن کائولن خالص در درجه حرارت زیاد بدست می آید. 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) می شود. متاکائولن به عنوان پوزولان کلاس N در تقسیم بندی ASTM قابل دسته بندی است.[۱]

متاکائولن به عنوان یک محصول با پایه سیلیسی می باشد که در واکنش با $Ca(OH)_2$ در دمای معمولی ژل CSH تولید می کند. متاکائولن همچنین دارای آلومینا (Alumina) می باشد که با CH واکنش داده و فازهای آلومیناتی که حاوی C_4AH_{13}, C_2ASH_8 و C_3AH_6 است را تولید می کند.[۲] و [۳]

فرآیند تولید متاکائولن کنترل شده است و در بعضی نتایج به عنوان پوزولان مهندسی شده شناخته می شود. این تولید با آلایندگی کمتر و مصرف انرژی محدودتر همراه است. در سالهای اخیر موضوع مصرف متاکائولن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در کشورهای مختلف به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است و این مطالعات نشان می دهد متاکائولن یک پوزولان بسیار فعال است و موجب ارتقاء خواص مکانیکی بتن در کوتاه مدت و دراز مدت می شود. استفاده از متاکائولن ریز ساختار بتن را بهبود می بخشد و مقاومت بتن را در برابر نفوذ سیالات مهاجم (یون کلر و یون های سولفات و ....) افزایش می دهد. همچنین استفاده از متاکائولن واکنش های قلیایی سنگدانه ها را کنترل می کند. با اینحال به دلیل حرارت هیدراتاسیون نسبتا زیاد، استفاده از آن در بتن ریزی حجیم توصیه نمی شود . آزمایشهای مقایسه ای نشان می دهد خواص این پوزولان در بهبود ویژگیهای مکانیکی و پایایی بتن با دوده سیلیس قابل رقابت است. علاوه بر آن با توجه به رنگ روشن این ماده، استفاده از بتن حاوی متاکائولن در کاربردهای خاص معماری توصیه می شود[۴].

در کشور ایران علی رغم وجود معادن متعدد و متنوع کائولن تا کنون، در مقیاس صنعتی متاکائولن تولید نشده است. در مطالعه حاضر خواص مکانیکی و پایایی بتن های حاوی متاکائولن موجود در بازار ایران مورد بررسی قرار گرفته است.

خواص فیزیکی و ترکیبات شیمیایی

مواد خام ورودی در تولید متاکائولن، رس کائولن می‌باشد.کائولن یک ماده معدنی‌بسیار ریز سفید و رسی است که در دماهای ۱۰۰ الی ۲۰۰ درجه، این مواد رسی بیشتر آب جذب شده خود را از دست می‌دهند (رابطه ۱). دمایی که در آن کائولینیت که اصلی ترین جزء تشکیل دهنده کائولن است بواسطه دی هیدراکسیونیزاسیون آب از دست می‌دهد، بین ۵۰۰ الی ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. به منظور تولید متاکائولن رس کائولن را تا محدوده دمای ۷۰۰-۹۰۰ درجه حرارت می-دهند[۵]. این فعل و انفعالات حرارتی یک‌ماده معدنی را تقریباً به عنوان "کلسینه شدن" می‌شناسند.

رابطه ۱) فرآیند گرفتن آب از کائولن

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

در جدول ۱ مشخصات فیزیکی نمونه ای از متاکائولن و مقایسه آن با کائولن و سیمان پرتلند تیپ ۱ آمده است.

جدول ۱: خواص فیزیکی یک نوع متاکائولن در مقایسه با کائولن و سیمان[۶]

مشخصات فیزیکی	متاکائولن	کائولن	سیمان پرتلند تیپ I
وزن مخصوص (gr/cm^3)	2.38	2.26	3.12
بلین (cm^2/gr)	9169	3500	3211
افت ناشی از احتراق (LOI) (درصد)	1.0	15.0	0.98

مقدار یک درصد LOI در متاکائولن و مقایسه آن با افت ناشی از احتراق در کائولن اولیه (۱۵ درصد) نشان می دهد مقدار زیادی از آب کائولن در پروسه تبدیل کائولن به متاکائولن تبخیر شده است. این امر منجر به افزایش درصد اکسیدها نظیر سیلیس و آلومین در متاکائولن نسبت به کائولن می شود (جدول ۲).

مقایسه ترکیبات متاکائولن با سیمان نشان می دهد که مجموع درصد سیلیس و آلومین در متاکائولن بیش از سه برابر سیمان است. این در حالی است که درصد اکسید کلسیم (CaO) در متاکائولن ناچیز است.

جدول ۲: ترکیبات شیمیایی یک نوع متاکائولن در مقایسه با کائولن و سیمان (درصد)[۶]

ترکیب شیمیایی	سیمان پرتلند تیپ I	کائولن	متاکائولن
SiO_2	21.16	42.00	48.00
Al_2O_3	5.09	35.00	41.00
Fe_2O_3	3.01	1.30	1.30
CaO	66.22	3.10	3.10
MgO	1.27	1.80	1.80
K_2O+Na_2O	0.25+0.04	0.17+0.10	0.20+0.16
SO_3	2.42	0.10	0.20

خواص بتن حاوی پوزولان متاکائولن[۷]

در آزمایش های انجام شده در انستیتو مصالح ساختمانی نمونه های بتنی با درصد های متفاوت متاکائولن ساخته شده است و تاثیر افزودن متاکائولن بر مشخصات بتن تازه و پارامترهای مکانیکی و پایایی بررسی شده است. مشخصات طرح اختلاط بتن بر اساس جدول ۳ می باشد. در طرح های اختلاط MK0 ,MK5 ,MK10 و MK15 درصد متاکائولن به ترتیب۰، ۵، ۱۰و ۱۵ درصد وزن مواد سیمانی است همچنین در طرح های اختلاط رطوبت مصالح سنگی در حالت SSD (اشباع با سطح خشک) است. از فیلر از جنس پودر سنگ آهک به منظور اصلاح دانه بندی ماسه استفاده شده است.

جدول شماره ۳: طرح اختلاط نهایی بتن (کیلوگرم در مترمکعب)

کد طرح	MK0	MK5	MK10	MK15
سیمان (تیپ ۲)	۴۰۰	۳۸۰	۳۶۰	۳۴۰
متاکائولن	۰	۲۰	۴۰	۶۰
درصد جایگزینی متاکائولن	۰	۵	۱۰	۱۵
شن بادامی	۲۹۵	۲۹۵	۲۹۵	۲۹۵
شن نخودی	۴۴۲	۴۴۲	۴۴۲	۴۴۲
ماسه	۹۹۶	۹۹۶	۹۹۶	۹۹۶
فیلر	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۱
آب	۱۵۲	۱۵۲	۱۵۲	۱۵۲
فوق روان ساز	۳/۲	۳/۲	۴	۴/۸
نسبت فوق روان ساز به مصالح سیمانی	۰/۸	۰/۸	۱	۱/۲
(W/B)	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۳۸

مشخصات بتن تازه

الف- روانی (Slump)

متاکائولن به دلیل ریزتر بودن ذرات آن نسبت به سیمان آب بیشتری جذب می کنند و این باعث کاهش روانی بتن تازه می شود. البته نمونه هایی از متاکائولن نیز وجود دارند که حتی میزان اسلامپ بتن را افزایش می دهند. در تحقیق حاضر به منظور یکسان کردن اسلامپ طرح اختلاط ها از درصدهای مختلف روان کننده استفاده شده است. در جدول ۴ مقادیر اسلامپ و درصد هوای بتن تازه نشان داده شده است. بر اساس این جدول در بتن بدون متاکائولن با کمترین مقدار فوق روان کننده (۰/۸درصد مواد سیمانی) اسلامپ بیشتر از حالتهای دیگر است و در بتن های حاوی متاکائولن با افزایش درصد متاکائولن برای حفظ روانی باید درصد فوق روانساز را افزود. این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C143 انجام پذیرفته است.

ب- درصد هوای بتن تازه

در مطالعات انجام شده با جایگزین کردن متاکائولن اثر زیادی روی درصد هوای بتن تازه مشاهده نشد. روش تعیین درصد هوا مطابق روش B ارائه شده در استاندارد ASTM C 231 بوده و نتایج آن در جدول ۴ آمده است.

ج- وزن مخصوص بتن تازه

با اینکه چگالی متاکائولن (۲/۵) نسبت به چگالی سیمان (۳/۱) کمتر می باشد ولی به دلیل ایجاد تراکم بیشتر در بتن حاوی متاکائولن چگالی بتن تازه با جایگزینی متاکائولن تغییر زیادی نمی کند. نتایج بدست آمده از تعیین وزن مخصوص بتن تازه در جدول ۴ قابل مقایسه می باشد.

جدول شماره ۴: آزمایش های بتن تازه

کد نمونه	وزن مخصوص (Kg/m^3)	درصد هوا (%)	اسلامپ (mm)
MK0	۲۴۰۰	۳	۱۲۰
MK5	۲۳۸۰	۳	۷۵
MK10	۲۳۸۰	۳	۸۵
MK15	۲۳۹۰	۳/۱	۷۰

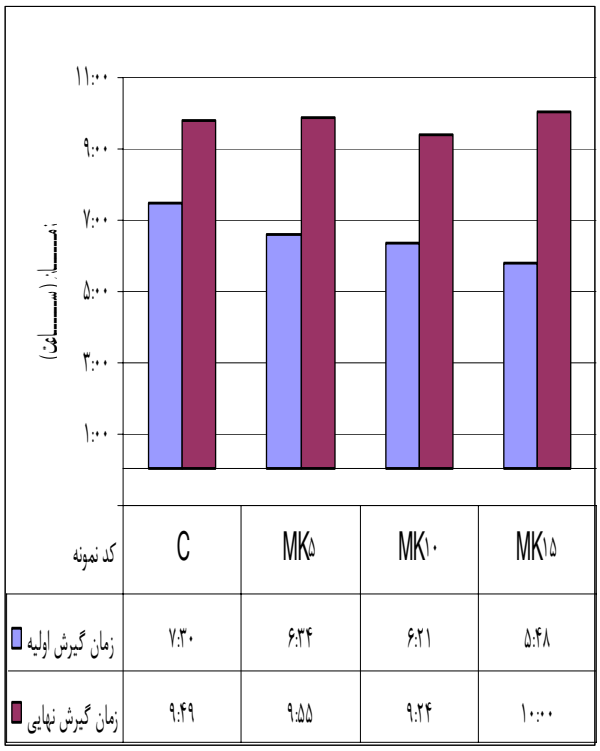
د- زمان گیرش بتن

با توجه به اینکه متاکائولن یک پوزولان با واکنش دهی سریع می باشد باعث کاهش زمان گیرش اولیه بتن می گردد، ولی در زمان گیرش نهایی بتن تغییری ایجاد نمی کند. این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C403 بر روی ملاتی که از مخلوط بتن الک شده به روش تر فراهم می شود صورت گرفته است. نتایج بدست آمده در نمودار شماره ۱ قابل مشاهده است.

مشخصات مکانیکی بتن سخت شده

الف- چگالی بتن سخت شده

با جایگزینی متاکائولن در چگالی بتن سخت شده تغییر زیادی مشاهده نمی شود. نتایج این آزمایش که بر اساس استاندارد ASTM C 642 انجام شده است در جدول شماره ۵ آمده است.



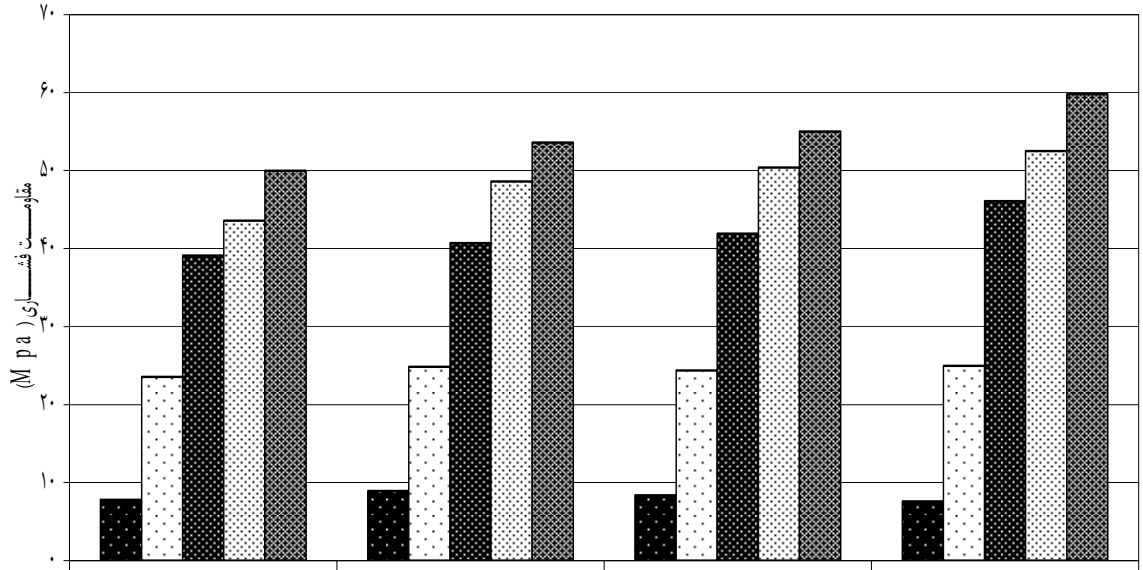
نمودار شماره ۱: زمان گیرش بتن

جدول شماره ۵ : چگالی بتن سخت شده

کد نمونه	چگالی Kg/m^3
MK0	۲۳۶۰
MK5	۲۳۴۵
MK10	۲۳۵۰
MK15	۲۳۷۰

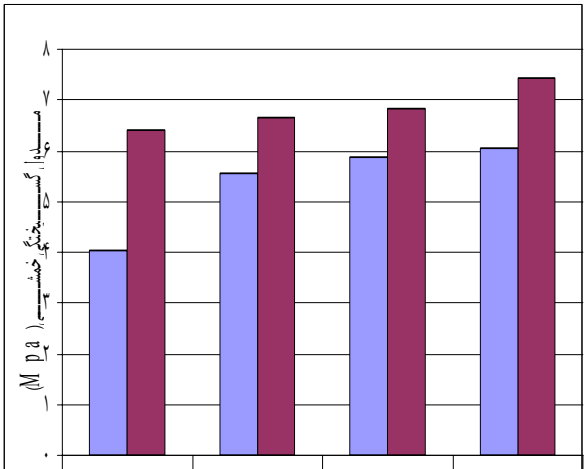
ب- مقاومت فشاری

با توجه به اینکه مهمترین ویژگی که به عنوان مشخصه مکانیکی بتن بیان می شود مقاومت فشاری می باشد. مقاومت فشاری نمونه ها در تاریخ های ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز اندازه گیری شده است. این آزمایش مطابق استاندارد BS-1881 بر روی آزمونه های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلمتر انجام گرفته است. همان طور که از نمودار ۲ قابل مشاهده است با افزایش درصد جایگزینی متاکائولن میزان مقاومت فشاری نیز افزایش می یابد. این تغییر مقاومت در کوتاه مدت (۱، ۳ روزه) ناچیز است و در درازمدت افزایش می یابد.



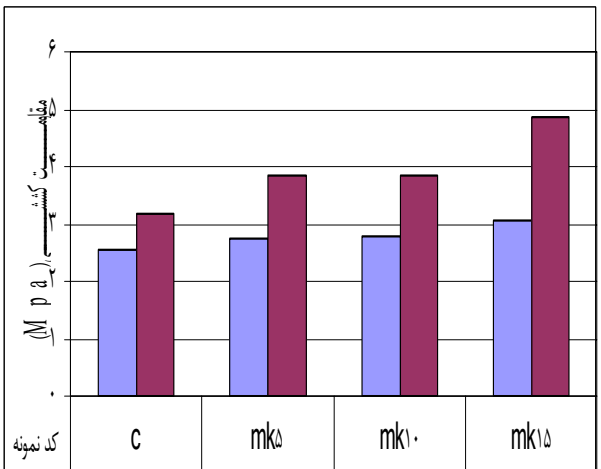
کد نمونه	c	MK۵	MK۱۰	MK۱۵
روز ۱	۷.۸	۸.۹	۸.۴	۷.۶
روز ۳	۲۳.۶	۲۴.۸	۲۴.۴	۲۵.۰
روز ۷	۳۹.۱	۴۰.۷	۴۱.۹	۴۶.۱
روز ۱۴	۴۳.۶	۴۸.۶	۵۰.۴	۵۲.۵
روز ۲۸	۵۰.۰	۵۳.۶	۵۵.۰	۵۹.۸

نمودار شماره ۲: نتایج مقاومت فشاری



کد نمونه	c	MK۵	MK۱۰	MK۱۵
روز ۷	۴.۰	۵.۶	۵.۹	۶.۱
روز ۲۸	۶.۴	۶.۷	۶.۸	۷.۴

نمودار ۳:نتایج مقاومت خمشی



کد نمونه	c	mk۵	mk۱۰	mk۱۵
روز ۷	۲.۵	۲.۷	۲.۸	۳.۱
روز ۲۸	۳.۲	۳.۸	۳.۸	۴.۸

نمودار شماره ۴: نتایج مقاومت کششی برزیلی

ج- مقاومت خمشی

آزمایش تعیین مقاومت خمشی بتن مطابق استاندارد ASTM C293 برروی آزمونه های منشوری به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۵۰۰ میلیمتری برای نمونه های ۷ و ۲۸ روزه انجام گرفته است. نتایج بدست آمده در نمودار شماره ۳ آمده است. نحوه تاثیرپذیری نتایج از درصد متاکائولن در آزمایشهای مقاومت خمشی متفاوت است و تغییرات در کوتاه مدت بیشتر است.

د- مقاومت کشش برزیلی

آزمایش تعیین مقاومت کشش برزیلی بتن مطابق استاندارد ASTM C496 برروی آزمونه‌های استوانه‌ای استاندارد به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلیمتر برای نمونه های ۷ و ۲۸ روزه انجام گرفته است و نتایج بدست آمده در نمودارشماره ۴ آمده است.

مشخصات پایایی بتن

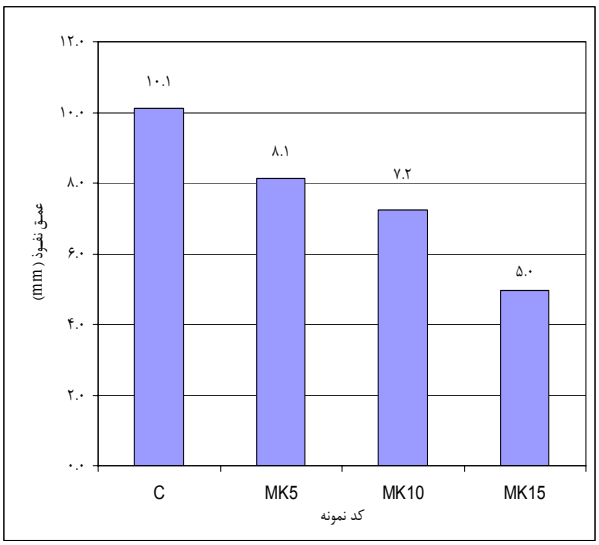
الف- عمق نفوذ آب در بتن

نفوذ پذیری، یک ویژگی مربوط به ریز ساختار بتن است که میزان قابلیت بتن را برای عبور سیالی با ویسکوزیته مشخص، تحت یک گرادیان فشار نشان می دهد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که نفوذ سیالات به صورت مایع و یا گاز به داخل بتن اثرات نامطلوبی بر پایایی بتن دارد.

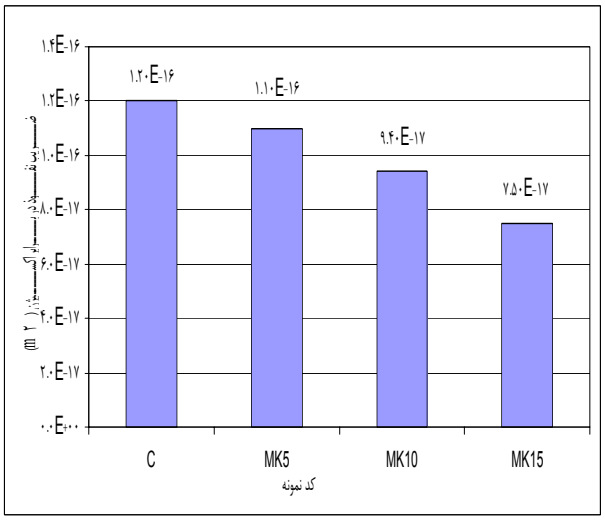
آزمایش عمق نفوذ آب در بتن مطابق استاندارد آلمان DIN 1048-part 1 بر روی آزمونه های ۲۸ روزه استوانه ای به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۱۵۰ میلیمتر که از استوانه های بتنی استاندارد به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلیمتر بریده شده اند، بدست می آید. مقادیر بدست آمده در نمودار شماره ۵ آمده است .

ب- نفوذ پذیری بتن در برابر هوا

روش متداول اندازه گیری ضریب نفوذپذیری بتن بوسیله آب است که معمولا انجام آن به زمان طولانی نیاز دارد. با استفاده از دستگاه نفوذپذیری موجود در آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشکده فنی بر اساس توصیه RILEM-TC116 ضریب نفوذپذیری بتن در برابر اکسیژن قابل اندازه گیری است. مزایای کاربرد این روش سرعت، دقت و امکان برآورد ضریب نفوذپذیری بتن در برابر آب می باشد. نتیجه این آزمایش در نمودار شماره ۶ ارائه شده است.



نمودار ۵: نتایج نفوذ آب



نمودار شماره ۶: نتایج نفوذپذیری در برابر گاز

ج- جذب آب

آب می تواند هم به صورت مایع و هم بخار از طریق حفرات موئینه به درون جسم متخلخل داخل شود. منظور از جذب، روندی است که طی آن بتن آب را به درون منافذ و حفرات موئینه می کشاند. میزان جذب کل معیاری برای پایایی بتن در نظر گرفته می شود. آزمایش تعیین جذب آب بتن مطابق استاندارد ASTM C 642 بر روی آزمونه های ۲۸ روزه و بر

روی مغزه گرفته شده انجام گرفته است. میانگین نتایج در نمودار شماره ۷ ارائه شده است.

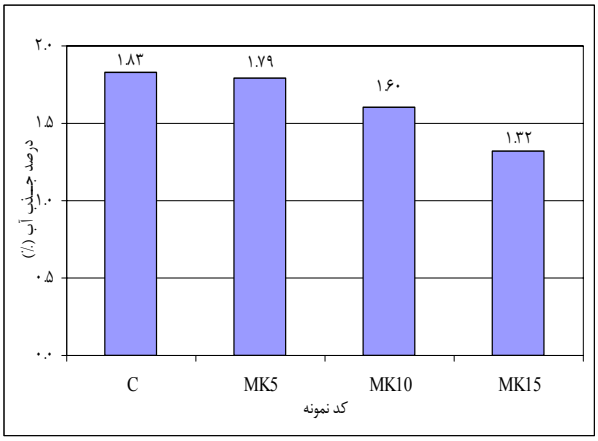
د- مقاومت الکتریکی بتن

از مقاومت الکتریکی بتن می توان اطلاعات مناسبی در خصوص مقاومت بتن در رویارویی با عوامل مهاجم بدست آورد. بتن تحت اثر میدان الکتریکی یک رفتار الکتریکی را ارائه می نماید (مقاومت الکتریکی + خازن الکتریکی). با تغییر فرکانس جریان الکتریکی می توان به مقاومت حقیقی بتن دست یافت و با استفاده از مقاومت حقیقی بتن می توان مقدار مقاومت ویژه را بدست آورد. بتن های با مقاومت ویژه بیشتر از ۲۰ kΩ.cm در برابر نفوذ یون کلر به شدت مقاوم هستند[۶]. آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی بتن بر اساس روش Impedance Spectroscopy بر روی مغزه گرفته شده از نمونه های ۲۸ روزه انجام گرفته است. این آزمایش به وسیله دستگاهی که توسط انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران طراحی و ساخته شده است انجام می گیرد. نتایج و مقادیر مقاومت الکتریکی حاوی متاکائولن در جدول شماره ۶ و رابطه مقاومت الکتریکی بتن با آهنگ خوردگی بر اساس پیشنهاد ACI 222 در جدول ۷ ارائه شده است.

هـ- پتانسیل واکنش سیلیکاتی قلیایی سنگدانه ها (ASR)

بعضی از انبساط ها و ترک خوردگی ها که منجر به کاهش مقاومت، الاستیسیته و دوام بتن می شوند، می‌تواند به علت واکنشهای شیمیایی بین اکسیدهای قلیایی موجود در سیمان پرتلند (یا از منابع دیگر)، با بعضی از کانی های سیلیسی که ممکن است در سنگدانه ها موجود باشند، بوجود آید. از این پدیده به عنوان واکنش قلیایی- سیلیسی سنگدانه ها یاد می شود.

در تحقیق حاضر روش آزمایش تعیین پتانسیل واکنش قلیایی های سیمان با سنگدانه ها تحت استاندارد ASTM C1260 انجام شده است. این آزمایش بر روی سنگدانه های واکنش زا و برای نمونه شاهد (بدون متاکائولن) و ۱۰ درصد جایگزینی متاکائولن صورت گرفته است و نتایج آن در جدول شماره ۸ و نمودار شماره ۸ آمده است. بر اساس نتایج بدست آمده ملاحظه می شود اضافه کردن متاکائولن درصد قابل توجهی انبساط های ناشی از واکنش های قلیایی سنگدانه ها را کاهش می دهد.



نمودار شماره ۷: نتایج جذب آب بتن

جدول شماره ۶ : نتایج مقاومت الکتریکی

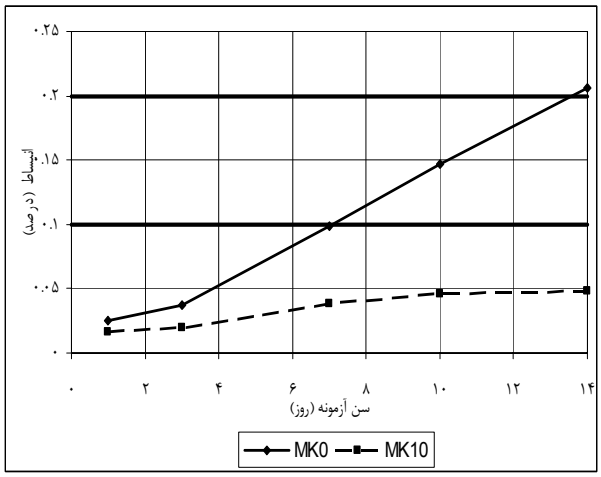
کد نمونه	مقاومت (KΩ)	مقاومت ویژه (kΩ.cm)
C	2.7	9.9
MK5	4.3	15.6
MK10	7.0	25.5
MK15	13.0	46.4

جدول شماره ۷: تاثیر مقاومت الکتریکی بتن بر آهنگ خوردگی آرماتور (ACI 222) [۸]

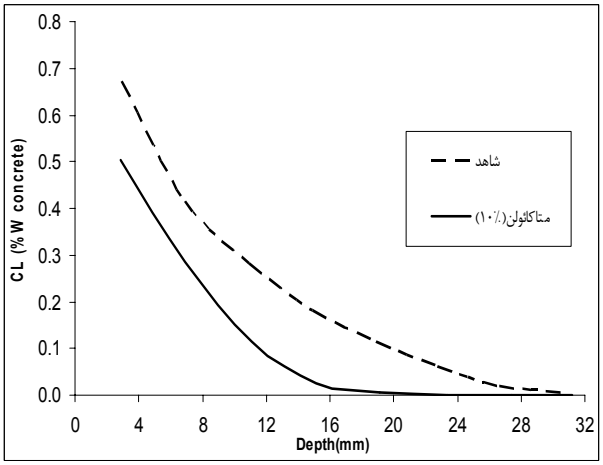
آهنگ خوردگی	مقاومت ویژه الکتریکی (kΩ.cm)
خیلی زیاد	<۵
زیاد	۵ تا ۱۰
متوسط تا کم	۱۰ تا ۲۰
ناچیز	>۲۰

جدول شماره ۸ : میانگین انبساط آزمونه ها در سنین مختلف

زمان قرائت (روز)	انبساط (٪) نمونه MK0	انبساط (٪) نمونه MK10
1	0.025	0.016
3	0.037	0.020
7	0.099	0.037
10	0.147	0.046
14	0.207	0.048



نمودار شماره ۸: میانگین انبساط آزمونه ها در سنین مختلف



نمودار شماره ۹: مقایسه میزان کلر در اعماق مختلف

و- نفوذپذیری بتن در برابر یون کلر

خوردگی آرماتورهای بتن بر اثر نفوذ یون کلر در محیط های دریایی، نظیر خلیج فارس و دریای عمان یکی از مسائل و مشکلات اساسی سازه های بتن آرمه در این نواحی می باشد. بتن در نقش پوشش به عنوان عامل دفاعی در برابر نفوذ عناصر مخرب محسوب می شود و آسیب دیدگی سازه ها ناشی از عوامل محیطی کاملا به عملکرد و کیفیت بتن در مقابل نفوذ این عناصر بستگی دارد.

آزمایش نفوذ یون کلر براساس استاندارد نروژی NT BUILD 443 [۹] بر روی نمونه های ۲۸ روزه فقط برای بتن های حاوی ۱۰ درصد متاکائولن و بتن شاهد انجام شده است. در این آزمایش نمونه های ساخته شده بتنی که کلیه وجوه به غیر از وجه رویی آن با لایه نفوذ ناپذیر پوشیده شده در محلول با غلظت ۱۶۵ گرم نمک در لیتر به مدت پنج ماه قرار داده شدند و در پایان دوره از اعماق مختلف بتن ها نمونه یرداری و تعیین درصد یون کلر محلول در اسید شد. در نمودار شماره ۹ منحنی میانگین نفوذ یون کلر برای این دو نمونه شاهد و متاکائولن با هم مقایسه شده است.

جمع بندی و نتیجه گیری

بر اساس نتایج بدست آمده موارد زیر را می توان بیان کرد:

استفاده از متاکائولن منجر به بهبود خواص مکانیکی بتن می شود. افزایش مقاومت کششی نسبت به مقاومت خمشی و فشاری بیشتر است.

اثر شاخص متاکائولن بر بتن در پایایی آن مشاهده می شود به طوری که می توان به عنوان جایگزینی مناسب برای پوزولان ها مورد استفاده در محیط های خورنده خلیج فارس در نظر گرفت. افزایش قابل ملاحظه مقاومت الکتریکی تا سه برابر، سرعت گسترش خوردگی را در سازه های بتنی که در معرض نفوذ یون کلر هستند را تا حدود زیادی کاهش خواهد داد.

کاربرد متاکائولن در بتن با توجه به رنگ روشن این ماده می تواند دارای جذابیتهای معماری باشد.

با توجه به تنوع معادن موجود در کشور، محدودیت منابع پوزولانهای ممتاز (نظیر دوده سیلیس)، ضرورت استفاده از بتنهای توانمند در سازه های مهم واقع در محیطهای خورنده (نظیر سواحل خلیج فارس)، کاربردهای معماری تولید متاکائولن و مصرف آن در کشور توصیه می گردد.

مراجع

1.ASTM C 618 ‘Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete’.

2.Changling, H., Osbaeck, B., Makovicky, E., 1995.Pozzolanic reaction of six principal clay minerals:activation reactivity assessments and technological effects.Cement and Con - crete Research 25 (8), 1691–1702.

3.Zhang,M.H.,Malhotra,V.M.,1995.Characteri -stics of a thermally activated aluminosilicate pozzolanic material and its use in concrete.

Cement and Concrete Research 25 (8), 1713–1725.
4.Joy M. Justice‘Evaluation of Metakaolins for USE as supplementary cementitious materials’ master of science thesis in Georgia Institute of Technology April 2005
5.A.Bonakdar,M.Bakhshi,M.Ghalibafian‘Prop -erties of high-performance Concrete Contain -ing High Reactivity Metakaolin’7th Intern -ational Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete, 20-24 June 2005, Washington DC. USA,Vol.1 P.228
6.P.Nimityongskul S.Sayamipuk “Strength and Durability of Mortars Containing Metakaolin from Thailand”, 27-29 August 1999, EASEC-7, Kochi, Japan
۷. "انجام آزمایش‌های لازم برای تعیین مشخصات مکانیکی و پایایی بتن حاوی متاکائولن" ، انسیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران، مرداد ماه ۱۳۸۵، کارفرما: شرکت آسان سرام
8.American Concrete Institute, Protection of Metals in Concrete Against Corrosion, Report No. 222r-01, ACI Committee 222, September 2001.
9.Nordtest Method, "Accelerated Chloride Penetration", NT Build 443, Approved 1995