

بررسی خواص انتقال در بتن‌های توانمند حاوی پوزولان متاکائولن در مقایسه با میکروسیلیس *

محمد شکرچی زاده^(۱) مهدی ولی پور^(۲) فرهاد پرگر^(۳)

چکیده امروزه استفاده از بتن‌های توانمند در صنعت ساخت‌وساز به یک ضرورت تبدیل شده است. همچنین با توجه به عدم دقت در طراحی و ساخت سازه‌های بتنی در مناطق خورنده، مشکلات متعددی را از جمله کاهش شدید عمر مفید و تخریب زودرس این سازه‌ها موجب شده است که استفاده از بتن‌های توانمند می‌تواند یکی از راه‌ها باشد. در سال‌های اخیر برای تولید بتن‌های با خواص مکانیکی و پایایی مناسب به صورت گسترده از پوزولان‌ها استفاده می‌شود. مهم‌ترین افزودنی مورد استفاده در کشور میکروسیلیس می‌باشد، در عین حال با توجه به گسترش استفاده از پوزولان‌ها در سطح دنیا بررسی عملکرد پوزولان‌های جایگزین نظیر متاکائولن اهمیت خاصی پیدا کرده است. در این مقاله با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، جذب آب، حجم حفرات، جذب آب موینه، مقاومت الکتریکی و نفوذپذیری گاز، خصوصیات مکانیکی و پایایی بتن‌های توانمند حاوی متاکائولن با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد جایگزینی سیمان در مقایسه با میکروسیلیس با ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد جایگزینی سیمان مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که متاکائولن در بهبود پارامترهای دوام بتن بخصوص در کاهش جذب آب موینه، افزایش مقاومت الکتریکی و مقاومت نفوذپذیری گاز بهتر از میکروسیلیس عمل کرده است.

واژه‌های کلیدی بتن توانمند، خواص انتقال، متاکائولن، میکروسیلیس، خواص مکانیکی، خواص پایایی.

Comparing the performance of metakaoline with silica fume on properties of high performance concrete

M. Shekarchizadeh M. Valipour F. Pargar

Abstract Nowadays, the use of high performance concrete is rapidly increasing due to its capability of being a good substitute for poorly constructed structures and also concrete structures in corrosive environments which suffer from short life span and immature failure. However, in the last decades the pozzolans are greatly used in order to produce concretes with improved mechanical properties and durability. One of the most usable pozzolans is silica fume and metakaoline. In present paper, the mechanical properties and durability of high performance concretes containing metakaolin of 5, 10 and 15% of cement replacement is compared to those containing silica fume with 5, 7.5 and 10 % of cement replacement using compressive strength test, water absorption, void volume, sorptivity, electrical resistance and gas permeability tests. According to the results, metakaoline showed better results compared to silica fume regarding improvement of mechanical properties and durability of high performance concretes and it is found that the optimum content of metakaoline is about 10 to 15% of cement replacement which can make it a good substitute for silica fume.

Keywords High performance concrete, Transport properties, Metakaoline, Silica fume, Mechanical properties, Durability properties

★ تاریخ دریافت مقاله ۸۹/۸/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۷/۱۴ می‌باشد.

(۱) دانشیار دانشکده مهندسی عمران و سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

(۲) کارشناس ارشد انستیتو مصالح ساختمانی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

(۳) کارشناس ارشد انستیتو مصالح ساختمانی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

مقدمه

استفاده شده است تا نتایج به دست آمده تا حد امکان با شرایط موجود در منطقه تطابق داشته باشد. در تحقیق حاضر عملکرد پوزولان متاکائولن (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد جایگزینی سیمان) در مقایسه با میکروسیلیس (۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد جایگزینی سیمان) با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، جذب آب، حجم حفرات، جذب آب مویینه، مقاومت الکتریکی و نفوذپذیری گاز بررسی شده است. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که در مجموع خواص انتقال بتن حاوی متاکائولن به‌تر از میکروسیلیس بوده است.

معرفی خواص بتن حاوی متاکائولن

متاکائولن یکی از جدیدترین پوزولان‌ها در تولید بتن‌های توانمند محسوب می‌شود. مواد خام ورودی در تولید متاکائولن، رس کائولن می‌باشد. کائولن یک ماده‌ی معدنی بسیار ریز سفید و رسی است که در دمای ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه بیش‌تر آب جذب شده‌ی خود را از دست می‌دهد [۱]. دمایی که در آن کائولینیت که اصلی‌ترین جزء تشکیل دهنده‌ی کائولن است، به‌واسطه‌ی دی‌هیدراکسیونیزاسیون آب از دست می‌دهد، بین ۵۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. به‌منظور تولید متاکائولن، رس کائولن را تا محدوده‌ی دمایی ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه حرارت می‌دهند [۲]. متاکائولن به‌عنوان یک محصول با پایه‌ی سیلیسی می‌باشد که در واکنش با $\text{Ca}(\text{OH})_2$ در دمای معمولی ژل C-S-H تولید می‌کند. متاکائولن هم‌چنین دارای آلومینا می‌باشد که با CH واکنش داده و فازهای آلومیناتی حاوی C_3AH_6 و C_2ASH_8 ، C_4AH_{13} را تولید می‌کند [3,4]. مطالعات متعددی توسط محققان در خصوص اثرات جایگزینی سیمان با پوزولان متاکائولن بر بهبود خصوصیات مکانیکی و پایایی بتن انجام شده است که در زیر به مختصری از نتایج حاصل اشاره می‌شود:

امروزه به دلایل مختلف استفاده از پوزولان‌ها در صنعت بتن یک ضرورت محسوب می‌شود. از یک سو با توجه به ضرورت مصرف متعادل و کاهش مصرف انرژی، منابع طبیعی و حفظ محیط زیست، و از سوی دیگر به دلیل آلاینده بودن تولید سیمان ایجاب می‌شود که از مصرف سیمان در کشور کاسته شود بدون آن‌که لطمه‌ای به حجم ساخت و سازها وارد شود. هم‌چنین نیاز به بتن مقاوم و با دوام در ساخت سازه‌های بتنی به‌ویژه در مناطق خورنده، برای افزایش عمر مفید این سازه‌ها و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری آن‌ها حس می‌شود که از جمله دلایل ضرورت استفاده از پوزولان‌ها در ساخت بتن می‌باشد. میکروسیلیس از جمله افزودنی‌های شناخته شده و پر کاربرد می‌باشد که اثرات مثبت آن بر بهبود خصوصیات مکانیکی و دوام بتن مشخص شده است. با این حال میکروسیلیس، خاکستربادی، روباره و غیره محصولات فرعی صنایع دیگر هستند، به همین جهت اقدام خاصی در خصوص بهینه‌سازی آن‌ها نمی‌توان انجام داد. بنابراین الزامات و معایب ذکر شده، شناخت و استفاده از نسل جدید پوزولان‌ها را ضروری می‌سازد. از جمله این پوزولان‌ها متاکائولن می‌باشد که فرآیند تولید آن کنترل شده است و به‌عنوان یک پوزولان مهندسی شده شناخته می‌شود. تولید متاکائولن با آلایندگی کم‌تر و مصرف انرژی محدودتر همراه است [۱]. در چند سال اخیر مطالعات گسترده‌ای در مورد استفاده از متاکائولن به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان انجام شده است [۵-۱]. این مطالعات نشان می‌دهند که جایگزینی متاکائولن با سیمان، موجب بهبود خصوصیات مکانیکی و پایایی بتن می‌شود. هم‌چنین با توجه به مشکلات دوام سازه‌های بتنی موجود در منطقه خلیج فارس، متاکائولن می‌تواند گزینه‌ی مناسبی برای بهبود شرایط موجود در منطقه‌ی خلیج فارس باشد. به‌همین منظور در انجام این تحقیق از مصالح موجود در منطقه‌ی خلیج فارس

متاکائولن به طور قابل ملاحظه ای جذب سطحی، جذب آب و جذب مویینه را کاهش می دهند.

مشخصات مکانیکی. Wild و همکارانش [5] اثر درصد های مختلف متاکائولن را بر مقاومت فشاری بتن های حاوی این پوزولان مورد بررسی قرار دادند. درصد های جایگزینی متاکائولن شامل ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ می باشد. نتایج نشان می دهد که متاکائولن باعث افزایش مقاومت در همه ی سنین می شود اما درصد جایگزینی بهینه در حدود ۲۰ درصد می باشد. هم چنین Curcio و همکارانش [11] نقش متاکائولن را در ملات های پر مقاومت مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها نشان از افزایش مقاومت نمونه های حاوی متاکائولن نسبت به نمونه های حاوی میکروسیلیس تا سن ۲۸ روز دارد. در حالی که در سنین ۹۰ تا ۱۸۰ روز نمونه های حاوی میکروسیلیس و متاکائولن مقاومت های فشاری یکسانی از خود نشان داده اند. در تحقیقی دیگر Brooks و Johari [6] مقاومت فشاری نمونه های حاوی ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد متاکائولن را با نسبت آب به سیمان ۰/۲۸ مورد بررسی قرار دادند. نتایج گزارش شده نشان می دهد که مقاومت فشاری نمونه ها با افزایش درصد جایگزینی متاکائولن افزایش می یابد [6]. از طرفی Poon و همکارانش [12] نشان دادند که مقاومت فشاری خمیر سیمان حاوی ۵ تا ۲۰ درصد متاکائولن در همه ی سنین ۳ تا ۹۰ روز بیش تر از نمونه ی شاهد است. با این حال نمونه ی حاوی ۱۰ درصد متاکائولن به ترین عملکرد را در بین سایر نمونه ها داشته است. در این تحقیق نمونه های حاوی SF و FA در سنین اولیه، مقاومت فشاری کمتری نسبت به نمونه ی شاهد دارا بودند. ولی در دراز مدت تمامی نمونه های حاوی پوزولان افزایش مقاومت داشته اند. بنابراین در سنین اولیه ی عملکرد متاکائولن در بهبود مقاومت به تر از میکروسیلیس بوده است. در همین راستا Potgieter-

کارپذیری. Wild و همکارانش [5] کارپذیری بتن های حاوی متاکائولن را مورد مطالعه قرار دادند. نمونه های بتنی با جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد متاکائولن برای این منظور ساخته شد. نتایج نشان دهنده ی افزایش میزان اسلامپ با افزایش مقدار جایگزینی متاکائولن به همراه افزایش فوق روان کننده است [5]. هم چنین Brook و Johar [6] اسلامپ و زمان گیرش بتن های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد متاکائولن را در مقایسه با بتن شاهد و با نسبت آب به سیمان ۰/۲۸ گزارش کرده اند. نتایج نشان می دهد که با افزایش میزان جایگزینی پوزولان، اسلامپ کاهش و زمان گیرش افزایش می یابد [6].

ریز ساختار. Bredy و همکارانش [7] تخلخل و اندازه ی حفرات خمیر سیمان حاوی متاکائولن را مورد بررسی قرار دادند. خمیر سیمان با مقادیر جایگزینی صفر تا ۵۰ درصد آماده شد. نتایج نشان داد که جایگزینی کم تر از ۲۰ درصد، تخلخل کل را کاهش می دهد. ولی افزایش جایگزینی به بیش از ۳۰ درصد موجب افزایش تخلخل می شود. در تحقیقی دیگر Khatib و Wild [8] تخلخل و اندازه ی حفرات خمیر سیمان حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد را با نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ تعیین کردند. نتایج این تحقیق نشان می دهد که با افزایش سن عمل آوری حجم حفرات کاهش و خمیر سیمان حاوی متاکائولن ریز ساختار به تری پیدا می کند. هم چنین Courard و همکارانش [9] جذب آب ملات های حاوی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد متاکائولن را بررسی کردند. نتایج آن ها نشان داد که کم ترین مقدار جذب آب در بین تمامی نمونه ها، مربوط به نمونه ی حاوی ۱۰ درصد متاکائولن می باشد. Razak و همکارانش [10] نیز در سال ۲۰۰۴ اثر متاکائولن و میکروسیلیس را در مورد جذب آب سطحی، جذب آب و جذب مویینه مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که میکروسیلیس و

کرد. در تحقیق دیگری Boddy و همکارانش [15] نفوذ یون کلر را در ۳۶۵ و ۱۰۹۵ روز پس از رویارویی اندازه‌گیری کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با گذشت زمان رویارویی و کاهش نسبت آب به سیمان و با افزایش درصد جایگزینی HRM میزان نفوذ یون کلر کاهش می‌یابد. هم‌چنین Courard [9] اثر افزودن متاکائولن با جایگزینی ۰، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد را بر میزان نفوذ یون کلر در ملات مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج حاصل به‌ترین عملکرد مربوط به متاکائولن با ۲۰ درصد جایگزینی بوده به طوری که بعد از یکسال تقریباً نفوذ یون کلر مشاهده نشده است. از طرفی با افزایش درصد جایگزینی متاکائولن از ۱۰ به ۱۵ درصد شاهد کاهش ۱۷۰ درصدی در ضریب انتشارپذیری بودند. هم‌چنین اثر متاکائولن بر مقاومت خوردگی ملات نیز توسط Batis [۱۶] مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های مسلح حاوی درصد‌های مختلف متاکائولن پس از عمل‌آوری در معرض محلول NaCl با غلظت ۳/۵ درصد قرار داده شدند. برای نمونه‌های مورد نظر آزمایش مختلفی انجام شد که نتایج حاصل نشان می‌دهند که نمونه‌های حاوی متاکائولن با ۱۰ درصد جایگزینی بیش‌ترین افزایش مقاومت فشاری و مقاومت در برابر خوردگی را نشان داده‌اند. در حالی در درصد‌های جایگزینی بیش‌تر در مقایسه با ۱۰ درصد جایگزینی، عملکرد مطلوب نبوده است. در همین زمینه Shekarchi و همکارانش [17] اثرات جایگزینی متاکائولن ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد را بر خواص دوام بتن مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که جایگزینی متاکائولن موجب بهبود ۰/۵۰، ۰/۳۷، ۰/۲۸، ۰/۴۵ و ۰/۴۷ به‌ترتیب در پارامترهای نفوذ آب، نفوذپذیری گاز، جذب آب، مقاومت الکتریکی و نفوذ یون کلر می‌شود.

Vermaak [13] مقاومت فشاری را در ملات‌های حاوی متاکائولن با درصد جایگزینی ۱۰ تا ۳۰ و نسبت آب به سیمان ۰/۳۷ مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق بدین صورت گزارش شده است که به‌ترین حرارت اکتیواسیون برای تولید متاکائولن از کائولن با دمای بیش از ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است. هم‌چنین مقاومت فشاری با افزایش زمان عمل‌آوری و درجه‌ی حرارت هیدراتاسیون افزایش می‌یابد. Li و Qian [14] نیز در سال ۲۰۰۱ مقاومت کششی و خمشی ۲۸ روزه‌ی بتن حاوی ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد متاکائولن را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش میزان جایگزینی متاکائولن مقاومت کششی نمونه‌های بتنی افزایش می‌یابد. هم‌چنین جایگزینی ۵ درصد متاکائولن کم‌ترین اثر را در بهبود مقاومت خمشی داشته است. در حالی که در جایگزینی ۵ و ۱۰ درصد در سن ۲۸ روز به‌ترتیب ۳۲ و ۳۸ درصد و در ۸۰ روز ۱۳ و ۲۴ درصد افزایش مقاومت خمشی مشاهده شده است. بنابراین بهبود محسوس در مقاومت خمشی در درصد جایگزینی ۱۰ تا ۱۵ حاصل گردیده است. در تحقیقی دیگر Courard و همکارانش [9] اثر متاکائولن بر مقاومت خمشی ملات را با جایگزینی ۵ تا ۲۰ درصد مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهند که با جایگزینی متاکائولن مقاومت خمشی بتن بهبود می‌یابد. **دوام بتن.** Brooks و Johari [۶] اثر متاکائولن را بر خزش و جمع‌شدگی در بتن‌های حاوی ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد جایگزینی متاکائولن و با نسبت آب به سیمان ۰/۲۸ مطالعه کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در کوتاه‌مدت جمع‌شدگی خودبه‌خودی با افزایش مقدار جایگزینی متاکائولن کاهش می‌یابد. در حالی که در درازمدت این مقدار با افزایش مقدار متاکائولن افزایش می‌یابد. هم‌چنین حضور متاکائولن باعث کاهش خزش می‌شود که این کاهش را می‌توان با متراکم کردن ریز ساختار و حفرات بتن، ماتریس خمیر مستحکم و بهبود سطح بین خمیر و سنگدانه توسط متاکائولن توجیه

مطالعات آزمایشگاهی

در راستای مطالعات آزمایشگاهی قبل از ساخت بتن آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان هرمزگان و افزودنی های میکروسیلیس و متاکائولن مورد استفاده در طرح های اختلاط مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده است. هم چنین مطابق جدول (۲) طرح های اختلاط طراحی و آزمون های بتنی ساخته شد. نسبت آب به مواد سیمانی در طرح های اختلاط ۰/۴ و مقدار آب ۱۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب می باشد. مصالح سنگی ریز دانه به صورت گردگوشه و سیلیسی - آهکی و مصالح سنگی درشت دانه به صورت شکسته و آهکی با بزرگترین اندازه ۱۹ میلی متر و با نسبت ۶۲ درصد درشت دانه به ۳۸ درصد ریزدانه می باشند که از منابع موجود در منطقه خلیج فارس (شهر بندرعباس) تهیه شده است. هم چنین به منظور تأمین روانی بتن تازه از مواد فوق روان کننده با پایه ی کربوکسیلاتی استفاده شده و اسلامپ طرح ها بین ۵ تا ۸ سانتی متر است. پس از بتن ریزی و قالب گیری، آزمون های بتنی به مدت سه روز عمل آوری مرطوب شده و پس از آن آزمون ها تا سن ۲۸ روز در شرایط محیطی آزمایشگاه قرار گرفتند (عمل آوری خشک). انتخاب این نوع روش عمل آوری به منظور شبیه سازی ساخت و عمل آوری بتن با شرایط محیطی در پروژه های جاری کشور می باشد.

تشریح آزمایش ها و ارائه ی نتایج

آزمایش مقاومت فشاری. مقاومت فشاری بتن مهم ترین مشخصه ی مکانیکی بتن می باشد. در این تحقیق آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد BS

116-1881 بر آزمون های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلی متر انجام گرفته است [18]. مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه ی طرح های اختلاط مختلف در نمودار (۱) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود مقاومت فشاری کلیه ی طرح های اختلاط حاوی متاکائولن و میکروسیلیس از آزمون های شاهد بیش تر است. دلیل این افزایش بهبود ریزساختار بتن با انجام واکنش های ثانویه ی پوزولان ها می باشد. به طوری که آزمون های شاهد C2 کم ترین و آزمون های SF10 بیش ترین مقدار مقاومت فشاری را در سن ۲۸ روز دارا می باشد. میزان مقاومت فشاری در بین آزمون های حاوی میکروسیلیس و متاکائولن با افزایش درصد جایگزینی پوزولان مقاومت فشاری افزایش می یابد. با این حال افزایش مقاومت فشاری آزمون های حاوی میکروسیلیس بیش تر از آزمون های حاوی متاکائولن در سن ۲۸ روز می باشد. در درصد جایگزینی مشابه ۵ درصد، آزمون های SF5 با افزایش ۷ درصد در هر دو سن ۷ و ۲۸ روز نسبت به آزمون های MK5 مقاومت فشاری بیش تری دارد. با این حال هر دو آزمون با ۴۲ درصد، افزایش مقاومت یکسانی از سن ۷ به ۲۸ روز داشته اند. در درصد جایگزینی مشابه ۱۰ درصد نیز آزمون های SF10 در هر دو سن ۷ و ۲۸ روز به ترتیب با ۷ و ۲۷ درصد افزایش مقاومت فشاری نسبت به آزمون های MK10 عملکرد به تری داشته است. هم چنین بیش ترین روند افزایش مقاومت از سن ۷ به ۲۸ روز در بین آزمون های حاوی پوزولان مربوط به آزمون های SF10 با ۵۲ درصد و کم ترین آن مربوط به آزمون های SF7.5 و MK15 با ۳۰ درصد افزایش مقاومت می باشد.

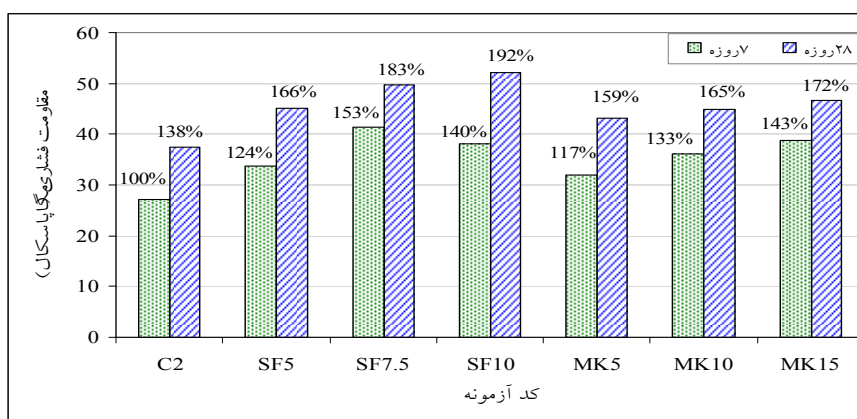
جدول ۱ آنالیز شیمیایی سیمان و پوزولان های مصرفی

L.O.I	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	نوع مواد سیمانی
۲	۰/۶	۰/۵	۱/۶	۱/۸	۶۳	۳/۵	۵	۲۱	سیمان
۱/۵۸	-	-	۰/۰۵	۱/۶	-	۰/۷۲	۱/۱۳	۹۳/۱۶	میکروسیلیس
۰/۵۷	۰/۱۲	۰/۰۱	-	۰/۱۸	۰/۲	۰/۹۹	۴۳/۸۷	۵۱/۸۵	متاکائولن

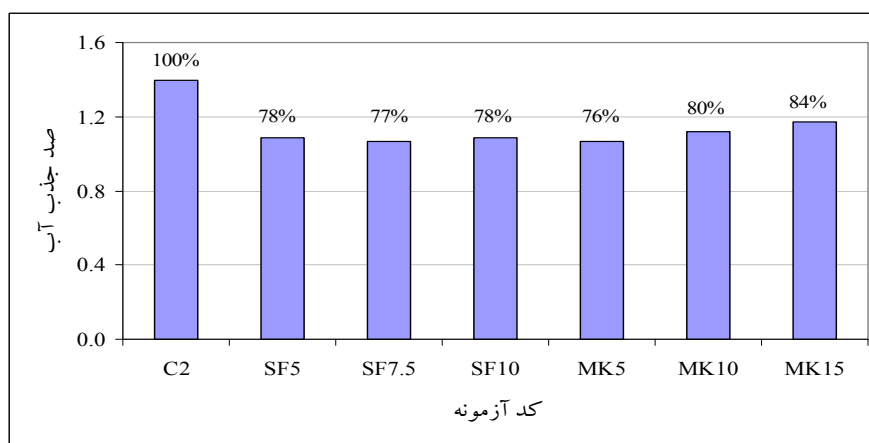
جدول ۲ مشخصات نسبت‌های اختلاط

کد نمونه	عیار سیمان (kg/m^3)	پوزولان جایگزین (kg/m^3)	فوق روان کننده (kg/m^3)	اسلامپ (cm)
C2	۴۰۰	-	۰/۲	۷
SF5	۳۸۰	۲۰	۱/۲	۶
SF7.5	۳۷۰	۳۰	۱/۴	۵
SF10	۳۶۰	۴۰	۱/۶	۸
MK5	۳۸۰	۲۰	۰/۸	۵
MK10	۳۶۰	۴۰	۱/۴	۵/۵
MK15	۳۴۰	۶۰	۱/۶	۸

C: سیمان
SF: میکروسیلیس
MK: متاکائولن



نمودار ۱ نتایج مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزهی طرح‌های اختلاط مختلف



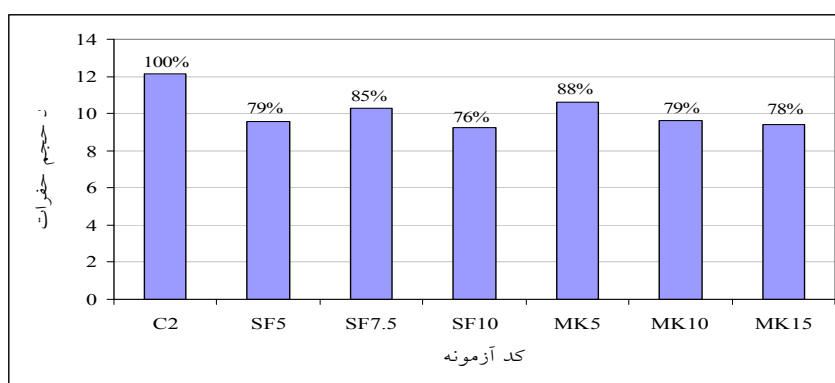
نمودار ۲ نتایج تعیین جذب آب طرح‌های اختلاط مختلف

میکروسیلیس بیشترین حجم حفرات را دارد. در حالی که در بین آزمون‌های حاوی متاکائولن با افزایش درصد جایگزینی متاکائولن، حجم حفرات بتن کاهش می‌یابد به طوری که آزمون‌های MK15 با ۲۲ درصد کاهش نسبت به آزمون‌های شاهد دارای کمترین میزان حجم حفرات می‌باشد. در هر دو درصد جایگزینی مشابه ۵ و ۱۰ درصد نیز آزمون‌های حاوی میکروسیلیس به ترتیب با ۹ و ۳ درصد کاهش نسبت به درصد مشابه آزمون‌های حاوی متاکائولن حجم حفرات کمتری را دارا هستند.

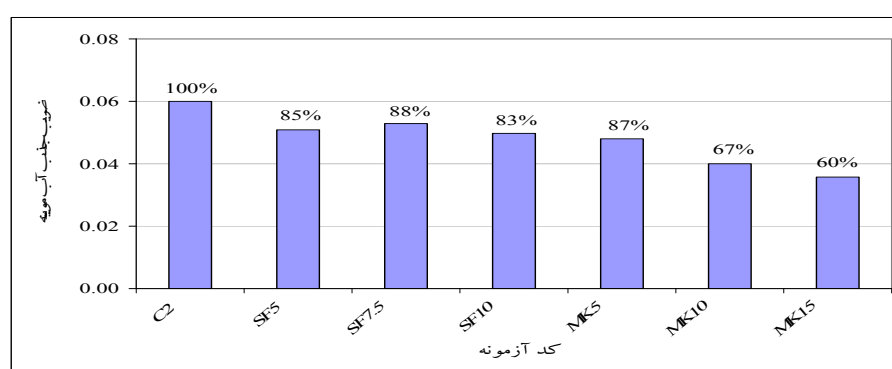
آزمایش جذب آب مویینه. جذب آب مویینه نیز یکی از پارامترهای مهم ارزیابی دوام بتن می‌باشد. این آزمایش بر اساس استاندارد RILEM-CPC-11.2 انجام شده است و نتایج آن در نمودار (۴) ارائه شده است [20]. همان‌طور که مشاهده می‌شود آزمون‌های شاهد بیشترین مقدار جذب آب مویینه را در بین طرح‌های اختلاط مختلف دارا می‌باشد. آزمون‌های SF7.5 با ۱۲ درصد کاهش نسبت به آزمون‌های شاهد در بین آزمون‌های حاوی میکروسیلیس دارای جذب آب مویینه‌ی بیش‌تری می‌باشد. جذب آب مویینه آزمون‌های حاوی متاکائولن نیز با افزایش درصد جایگزینی کاهش می‌یابد، به طوری که آزمون‌های MK15 با ۴۰ درصد کاهش نسبت به آزمون‌های شاهد دارای کمترین میزان جذب آب مویینه می‌باشد. در درصد جایگزینی مشابه ۵ درصد با اختلاف ناچیز ۲ درصد آزمون‌های حاوی هر دو پوزولان جذب آب مویینه تقریباً یکسانی داشته‌اند. ولی در درصد جایگزین‌های مشابه ۱۰ درصد آزمون‌های MK10 با ۲۱ درصد کاهش نسبت به آزمون‌های SF10 مقدار جذب آب مویینه کمتری داشته است.

آزمایش جذب آب. آب می‌تواند هم به صورت مایع و هم بخار از طریق حفرات مویینه به درون جسم متخلخل وارد شود. منظور از جذب روندی است که طی آن بتن آب را به درون منافذ و حفرات مویینه می‌کشاند. میزان جذب کل معیاری برای پایایی بتن محسوب می‌شود. این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C642 انجام شده و نتایج آن در نمودار (۲) ارائه شده است [19]. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان جذب آب کلیه‌ی آزمون‌های حاوی پوزولان کم‌تر از آزمون‌های شاهد می‌باشد. آزمون‌های حاوی میکروسیلیس در هر سه درصد جایگزینی مقادیر جذب آب یکسانی را نشان می‌دهند. در بین آزمون‌های حاوی متاکائولن نیز آزمون‌های MK5 مقدار جذب آب کمتری را نسبت به درصد‌های دیگر جایگزینی دارد. مقایسه‌ی درصد‌های جایگزینی مشابه ۵ و ۱۰ درصد با اختلاف ناچیز ۲ درصد نشان از میزان جذب آب تقریباً یکسان آزمون‌های SF5، MK5 و SF10، MK10 دارد. دلیل عدم تأثیرگذاری درصد‌های بیش‌تر جایگزینی پوزولان‌های میکروسیلیس و متاکائولن می‌تواند مربوط به عمل‌آوری کوتاه‌مدت باشد که پوزولان‌ها امکان تأثیرگذاری و انجام کامل عمل هیدراتاسیون را در کوتاه‌مدت نداشته‌اند.

آزمایش تعیین حجم حفرات. نفوذپذیری، یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی کیفیت و پایایی بتن می‌باشد که رابطه‌ی مستقیمی با تخلخل دارد. بنابراین بررسی حجم حفرات بتن اهمیت خاصی دارد. در این تحقیق حجم حفرات آزمون‌ها مطابق استاندارد ASTM C642 تعیین شده است [19]. نتایج این آزمایش در نمودار (۳) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حجم حفرات آزمون‌های شاهد نسبت به دیگر آزمون‌های حاوی پوزولان بیش‌ترین مقدار را دارد. آزمون‌های SF7.5 در بین آزمون‌های حاوی



نمودار ۳ نتایج تعیین حجم حفرات طرح‌های اختلاط مختلف

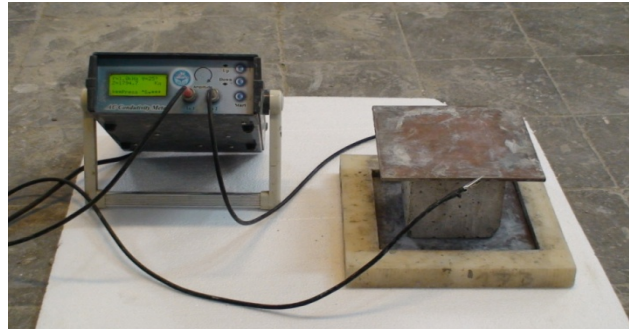


نمودار ۴ نتایج تعیین جذب آب مویینه طرح‌های اختلاط مختلف

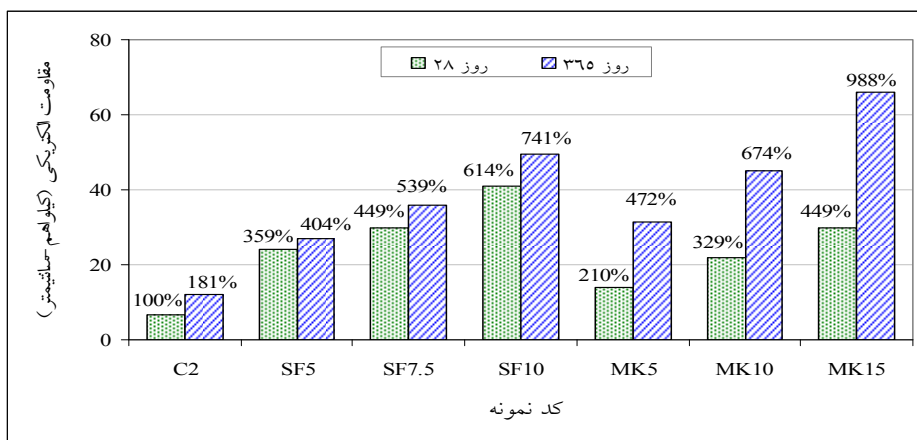
می‌شود و طرح‌های حاوی متاکائولن مقاومت الکتریکی بیشتری دارند. بنابراین مشاهده می‌شود که نرخ افزایش مقاومت ویژه الکتریکی از سن ۲۸ به ۳۶۵ روز در آزمون‌های حاوی متاکائولن بیش‌تر از آزمون‌های حاوی میکروسیلیس می‌باشد.

لازم به ذکر است که بر اساس تحقیقات انجام شده [۱] بتن‌های با مقاومت ویژه ۲۰ کیلو اهم سانتی‌متر در برابر نفوذ یون کلر به‌شدت مقاوم هستند. بر این اساس تمامی آزمون‌های حاوی میکروسیلیس و متاکائولن به‌دلیل داشتن مقاومت ویژه الکتریکی بیش‌تر از ۲۰ کیلو اهم سانتی‌متر در مقابل نفوذ یون کلر نیز مقاوم می‌باشند. هم‌چنین جدول (۳) بیانگر رابطه‌ی مقاومت الکتریکی بتن با آهنگ خوردگی بر اساس پیشنهاد ACI 222 می‌باشد. با توجه به بیش‌تر بودن مقاومت الکتریکی از مقدار ۲۰ کیلو اهم سانتی‌متر، تمامی آزمون‌های حاوی هر دو پوزولان در برابر خوردگی نیز مقاومت لازم را خواهند داشت [21].

آزمایش مقاومت الکتریکی. آزمایش مقاومت الکتریکی در این تحقیق بر اساس روش Impedance Spectroscopy انجام شده است شکل (۱). نمودار (۵) بیانگر نتایج مقاومت ویژه الکتریکی طرح‌های مختلف در سنین ۲۸ و ۳۶۵ روز می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقاومت ویژه الکتریکی کلیه‌ی طرح‌های اختلاط حاوی پوزولان در هر دو سن بیش‌تر از آزمون‌های شاهد می‌باشد. در آزمون‌های حاوی پوزولان نیز با افزایش درصد جایگزینی پوزولان مقدار مقاومت ویژه الکتریکی نیز در هر دو سن افزایش می‌یابد به‌طوری‌که آزمون‌های SF10 و MK15 به‌ترتیب در بین طرح‌های حاوی میکروسیلیس و متاکائولن دارای بیش‌ترین مقاومت الکتریکی می‌باشند. نکته‌ی قابل توجه این است که در سن ۲۸ روزه کلیه‌ی طرح‌های حاوی میکروسیلیس مقاومت الکتریکی بیش‌تری نسبت به طرح‌های متاکائولن دارند در صورتی که در سن ۳۶۵ روز این روند برعکس



شکل ۱ دستگاه اندازه گیری مقاومت الکتریکی



نمودار ۵ نتایج مقاومت الکتریکی طرح های اختلاط مختلف

جدول ۳ اثر مقاومت الکتریکی بتن بر آهنگ خوردگی آرماتور (ACI 222)

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

از سطح بتن عبور می کند، با رابطه ی (۱) به دست می آید:

$$k = \frac{2.Q.P_a.L.\eta}{A(P^2 - P_a^2)} \quad (m^2) \quad (1)$$

که در آن k ضریب نفوذپذیری ویژه (m^2)، Q دبی جریان (m^3s^{-1})، A سطح مقطع آزمون (m^2)،

آزمایش نفوذپذیری گاز. در این تحقیق، آزمایش نفوذپذیری در مقابل گاز اکسیژن با دستگاه نفوذپذیری انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران و روش Cembureau مطابق استاندارد RILEM-TC116 انجام شده است شکل (۲) [22,23]. در این روش ضریب نفوذپذیری ویژه (K) برای گاز اکسیژن که تحت فشار

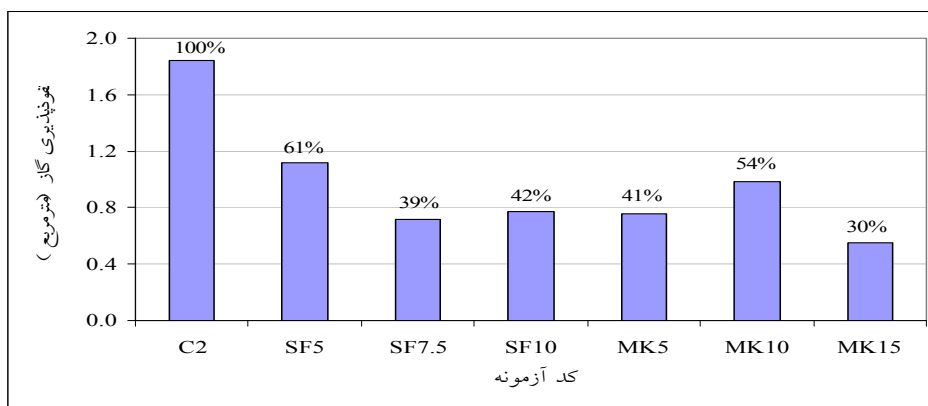
اساس متوسط نتایج مربوط به سه دیسک از هر طرح محاسبه گردیده و نتایج آن در نمودار (۶) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نفوذپذیری گاز آزمون‌های حاوی پوزولان کم‌تر از آزمون‌های شاهد (C2) می‌باشد. در بین آزمون‌های حاوی پوزولان نیز آزمون‌های SF7.5 و MK15 به ترتیب با ۶۱ و ۷۰ درصد کاهش نسبت به آزمون‌های شاهد در بین آزمون‌های حاوی میکروسیلیس و متاکائولن به‌ترین عملکرد را داشته‌اند. در درصد جایگزینی مشابه ۵ درصد نیز آزمون‌های MK5 با ۲۰ درصد کاهش بیش‌تر نسبت به آزمون‌های SF5 عملکرد به‌تری داشته است. ولی در آزمون‌های جایگزینی مشابه ۱۰ درصد آزمون‌های SF10 با ۱۲ درصد کاهش بیش‌تر نسبت به آزمون‌های MK10 به‌تر عمل کرده است.

ضخامت جریان در جهت جریان (m)، η ویسکوزیته گاز ($2/02 \times 10^{-5}$ N.s.m⁻² برای اکسیژن)، P فشار درونی (N.m⁻²)، Pa فشار بیرونی (N.m⁻²) می‌باشد [13,14].

بر پایه این روش آزمون‌های استوانه‌ای، با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر به‌ازای هر طرح ساخته می‌شوند و پس از آن عمل‌آوری مرطوب به مدت ۲۸ روز انجام می‌پذیرد. پس از آن، با استفاده از دستگاه برش برای هر آزمون، سه دیسک با ارتفاع ۵۰ میلی‌متر از سطح بالای هر استوانه بریده می‌شود. سپس دیسک‌های به‌دست آمده به مدت هفت روز در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری می‌شود (رژیم B، پیشنهاد شده در روش Cembureau). پس از این مقدمات اولیه، ضریب نفوذپذیری ویژه‌ی هر طرح بر



شکل ۲ دستگاه اندازه‌گیری نفوذپذیری گاز اکسیژن

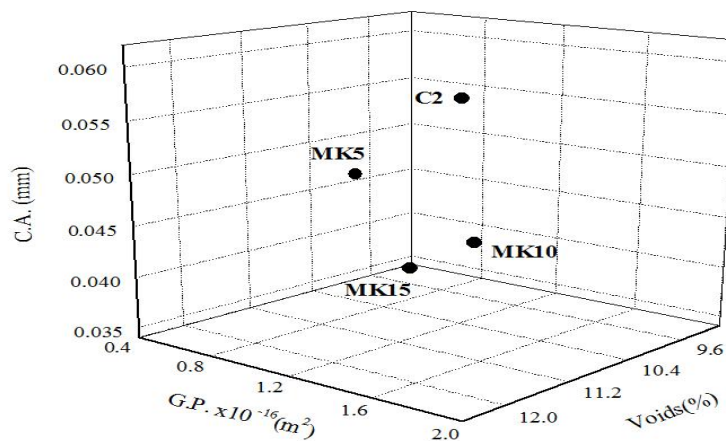


نمودار ۶ نتایج نفوذپذیری در برابر گاز طرح‌های اختلاط مختلف

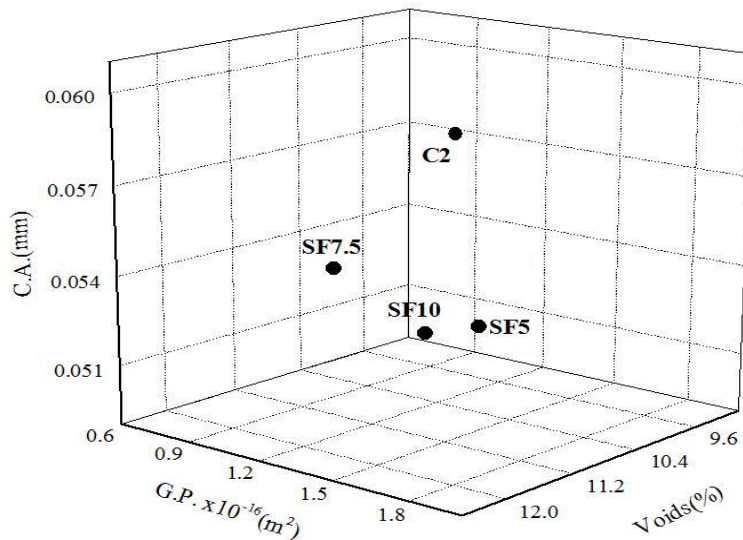
جمع بندی

بیشترین مقادیر بیانگر ضعف در دوام آزمون‌های مورد نظر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن سه پارامتر مذکور به‌طور هم‌زمان و سه‌بعدی، آزمون‌های شاهد در هر دو شکل ضعیف‌ترین عملکرد و آزمون‌های MK15 و SF10 به ترتیب در بین آزمون‌های حاوی متاکائولن و میکروسیلیس به‌ترین عملکرد را داشته‌اند.

برای بررسی دقیق‌تر عملکرد خصوصیات انتقال بتن‌های توانمند، اثرات هم‌زمان نفوذ گاز، جذب آب موئینه و حجم حفرات به‌صورت سه‌بعدی در آزمون‌های حاوی متاکائولن و میکروسیلیس به ترتیب در شکل‌های (۳ و ۴) ارائه شده است. در این شکل‌ها کم‌ترین مقادیر نشان‌دهنده بهبود پارامترهای دوام و



شکل ۳ بررسی سه‌بعدی اثرات نفوذ گاز، جذب آب موئینه و حجم حفرات در آزمون‌های حاوی متاکائولن



شکل ۴ بررسی سه‌بعدی اثرات نفوذ گاز، جذب آب موئینه و حجم حفرات در آزمون‌های حاوی میکروسیلیس

جدول ۴ اثر افزایش درصد جایگزینی پوزولان بر پارامترهای مختلف بتن

اثر افزایش درصد جایگزینی متاکائولن	اثر افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس	آزمایش
↑	↑	مقاومت فشاری
↑	-	جذب آب
↓	-	جذب آب موینه
↓	↓	حجم حفرات
↑	↑	مقاومت الکتریکی
↓	↓	نفوذپذیری گاز

↑: افزایش نسبت به درصد جایگزینی پایین‌تر

↓: کاهش نسبت به درصد جایگزینی پایین‌تر

نتیجه‌گیری

همان‌طور که اشاره شد این تحقیق با دیدگاه بررسی خصوصیات انتقال بتن‌های توانمند حاوی متاکائولن و میکروسیلیس به‌عنوان راه‌حلی برای بهبود دوام سازه‌های بتنی در منطقه‌ی خلیج فارس انجام شده است به همین منظور مصالح مورد استفاده برای انجام تحقیق از مصالح موجود در منطقه انتخاب و شرایط عمل‌آوری آزمون‌ها با توجه به شرایط اجرایی در منطقه در نظر گرفته شده است تا نتایج به‌دست آمده قابلیت اجرایی را در منطقه‌ی خلیج فارس داشته باشد. هم‌چنین در این تحقیق اکثر آزمایش‌های رایج برای بررسی خصوصیات انتقال در آزمون‌های بتنی انجام شده است تا جمع‌بندی کامل‌تری از نتایج حاصل به‌دست آید. حال با توجه به توضیحات ارائه شده در متن مقاله می‌توان مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده را به‌صورت زیر خلاصه کرد:

- ۱) بررسی خصوصیات مکانیکی آزمون‌های بتنی نشان می‌دهد که در هر دو سن ۷ و ۲۸ روز عملکرد مقاومت فشاری آزمون‌های حاوی میکروسیلیس با اختلاف اندکی به‌تر از آزمون‌های حاوی متاکائولن بوده است.
- ۲) نتایج آزمایش‌های جذب آب و تعیین حجم حفرات نشان می‌دهد که آزمون‌های حاوی متاکائولن و میکروسیلیس عملکرد تقریباً یکسانی داشته‌اند. در

هم‌چنین اثر افزایش درصد جایگزینی پوزولان بر پارامترهای مختلف دوام بتن که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته در جدول (۴) خلاصه شده است. بر اساس این جدول، در اغلب آزمایش‌ها با افزایش درصد جایگزینی پوزولان بهبود عملکرد را شاهد بودیم که دلیل این امر افزایش فعالیت‌های پوزولانی و کامل‌تر شدن واکنش‌های ثانویه می‌باشد. به‌طور کلی باید توجه داشت که بر اساس تحقیقات انجام گرفته در کاربرد پوزولان‌ها و با توجه به کارایی مورد نظر باید مقدار بهینه‌ی مصرف آن را تعیین نمود.

در مجموع بر اساس آزمایش‌های انجام شده در قالب تحقیق حاضر، عملکرد آزمون‌های حاوی پوزولان به‌تر از آزمون‌های شاهد بوده است. دلیل این عملکرد انجام واکنش‌های ثانویه‌ی پوزولان‌های مصرفی با $Ca(OH)_2$ و تولید ژل C-S-H است که موجب متراکم‌تر شدن ریزساختار بتن و کاهش تخلخل و نفوذپذیری بتن می‌شود و نتیجه‌ی آن بهبود خصوصیات مکانیکی و دوام بتن می‌باشد. در نتیجه با توجه به وجود منابع کائولن در داخل کشور و محدودیت‌های تولید و استفاده از میکروسیلیس به‌خصوص عوارض زیست محیطی آن، متاکائولن می‌تواند جایگزین مناسبی برای میکروسیلیس در پروژه‌های جاری کشور به‌خصوص در مناطق حاد و خورنده‌ی جنوب کشور و منطقه‌ی خلیج فارس باشد.

۴) نتایج آزمایش نفوذپذیری گاز نیز نشان دهنده‌ی عملکرد بهتر آزمون‌های حاوی متاکائولن نسبت به میکروسیلیس به خصوص در درصد جایگزینی بیش‌تر است.

۵) با توجه به نتایج به دست آمده، درصد جایگزینی متاکائولن ۱۰ تا ۱۵ درصد می‌باشد.

۶) عملکرد مناسب متاکائولن در بهبود خواص پایایی بتن، با توجه به تنوع معادن کائولن موجود در کشور و محدودیت منابع پوزولان‌هایی مانند میکروسیلیس، می‌توان از آن به عنوان جایگزین مناسب برای پوزولان‌های مورد استفاده در محیط‌های خورنده‌ی خلیج فارس استفاده کرد.

صورتی که نتایج آزمایش جذب آب موینه نشان از عملکرد بهتر آزمون‌های حاوی متاکائولن در مقایسه با میکروسیلیس به خصوص در درصد جایگزینی‌های ۱۰ و ۱۵ درصد دارد.

۳) در بحث مقاومت الکتریکی، آزمون‌های حاوی میکروسیلیس در کوتاه مدت عملکرد بهتری نسبت به متاکائولن داشته‌اند در صورتی که عملکرد بلندمدت (یک سال) نشان از افزایش قابل ملاحظه‌ی مقاومت الکتریکی نسبت به سن ۲۸ روز دارد و در مقایسه با میکروسیلیس هم عملکرد بهتری داشته است. بنابراین با توجه به افزایش قابل ملاحظه‌ی مقاومت الکتریکی در آزمون‌های حاوی متاکائولن، این پوزولان می‌تواند سرعت گسترش خوردگی سازه‌های بتنی در معرض نفوذ یون کلر (به ویژه در منطقه‌ی خورنده‌ی خلیج فارس) را تا حدود زیادی کاهش دهد.

مراجع

۱. شکرچی زاده، محمد، میردامادی، علیرضا، بنکدار، ابوزر، بخشی، مهدی، "بهبود خواص بتن‌های توانمند با استفاده از متاکائولن"، مجله‌ی تحقیقات بتن، شماره ۲، صفحات ۵۵-۶۳، (۱۳۸۷).
2. Bonakdar, A., Bakhshi, M., Ghalibafian, M., "Properties of High-performance Concrete Containing High Reactivity Metakaolin", *7th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete, Washington DC. USA, Vol. 1, pp. 228-295, (2005).*
3. Changling, H., Osbaeck, B., Makovicky, E., "Pozzolanic reaction of six principal clay minerals: activation reactivity assessments and technological effects", *Cement and Concrete Research, 25 (8), pp. 1691-1702, (1995).*
4. Zhang, M.H., Malhotra, V.M., "Characteristics of a thermally activated aluminosilicate pozzolanic material and its use in concrete", *Cement and Concrete Research, 25 (8), pp. 1713-1725, (1995).*
5. Wild, S., Khatib, J.M., Jones, A., "Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete", *Cement and Concrete Research, 26 (10), pp. 1537-1544, (1996).*
6. Brooks, J.J., Johari, M.M.A., "Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete", *Cement and Concrete Composites, 23, pp. 495-502, (2001).*
7. Bredy, P., Chabannet, M., Pera, J., "Microstructural and porosity of metakaolin blended cements", *Material Research Society Symposium, 137, pp. 431-436, (1989).*

8. Khatib, J.M., Wild, S., "Pore size distribution of metakaolin paste", *Cement and Concrete Research*, 26 (10), pp. 1545–1553, (1996).
9. Courard, L., Darimont, A., Schouterden, M., Ferauche, F., Willem, X., Degeimbre, R., "Durability of mortars modified with metakaolin", *Cement and Concrete Research*, 33, pp. 473–147, (2003).
10. Razak, H.A., Chai, H.K., Wong, H.S., "Near surface characteristics of concrete containing supplementary cementing materials", *Cement and Concrete Composites*, 26, pp. 883–889, (2004).
11. Curcio, F., Deangelis, B.A., Pagliolico, S., "Metakaolin as pozzolanic micro filler for high-performance mortars", *Cement and Concrete Research*, 28 (6), pp. 803–809, (1998).
12. Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C., Wong, Y.L., Wong, R., "Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes", *Cement and Concrete Research*, 31, pp. 1301–1306, (2001).
13. Potgieter-Vermaak, S.S., Potgieter, J.H., "Metakaolin as an extender in South African cement", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (4), pp.619–623,(2006).
14. Qian, X., Li, Z., "The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin", *Cement and Concrete Research*, 31, pp. 1607–1611, (2001).
15. Boddy, A., Hooton, R.D., Gruber, K.A., "Long-term testing of the chloride-penetration resistance of concrete containing high-reactivity metakaolin", *Cement and Concrete Research*, 31 (5), pp. 759–765,(2001).
16. Batis, G., Pantazopoulou, P., Tsivilis, S., Badogiannis, E., "The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars", *Cement and Concrete Composites*, 27, pp. 125–130, (2005).
17. Shekarchi, M., Bonakdar, A., Bakhshi, M., Mirdamadi, A., Mobasher, B., "Near Transport properties in metakaolin blended concrete", *Construction and Building Materials*, (2010). (In press)
18. BS 1881-116, "Testing concrete Method for determination of compressive strength of concrete cubes", (1983).
19. ASTM C642-97, "Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete", (1997).
20. RILEM CPC-11.2, "Absorption of water by concrete by capillarity", (1994).
21. ACI 222, "Protection of Metals in Concrete Against Corrosion", (2001).
22. Kollek, J.J., "The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method – a recommendation", *Mater. Struct.*, 22(129), pp. 225–230, (1989).
23. RILEM TC 116-PCD, "Tests for gas permeability of concrete – preconditioning of concrete test specimens for the measurement of gas permeability and capillary absorption of water – measurement of the gas permeability of concrete by the RILEM – CEMBUREAU method – determination of the capillary absorption of water of hardened concrete", (1999).