اثر متاکائولن بعنوان ماده افزودنی در بتن‌های توانمند

علیرضا سوری[1]، فرهاد گلستانی‌فرد[1]، رحیم نقی‌زاده[1]، سهراب ویسه[2]

[1] دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران
[2] مرکز تحقیقات ساختمان و راه، مسکن و شهرسازی



مهندس علیرضا سوری نویسنده مسئول این مقاله، دانشجوی دکتری مهندسی مواد- سرامیک دانشگاه علم و صنعت ایران می‌باشند.

arsouri@gmail.com

چکیده: مواد مکمل سیمانی یکی از اجزاء ضروری در طراحی مخلوطهای بتن با استحکام و کارایی بالا می‌باشند. این‌ها می‌توانند مواد طبیعی، پسماندهای صنعتی یا محصولات فرعی باشند که برای فراوری آنها به انرژی کمتری نیاز است. خاکستر بادی، میکروسیلیس، سرباره کوره بلند و متاکائولن برخی از مواد مکمل سیمان هستند. استفاده از متاکائولن به عنوان یک ماده پوزولانی برای ملات و بتن توجه زیادی در سال‌های اخیر به خود جلب نموده است. بخشی از این تمایل توجه گسترده به سمت کاربرد موادی است که باعث کاهش مصرف سیمان پرتلند می‌شوند که تولید آن برای محیط زیست زیان‌آور است. دلیل دیگر آن تاثیر قابل ملاحظه متاکائولن در بهبود خواص مکانیکی و دوام ملات و بتن است. این مقاله مروری از کارهای انجام شده در بررسی خواص متاکائولن و استفاده از آن بصورت جایگزینی جزئی سیمان در ملات و بتن ارایه می‌دهد. منابع موجود نشان می‌دهند که متاکائولن یک ماده پوزولانی موثر است که موجب بهبود خواص مکانیکی بتن، اصلاح ساختار تخلخل‌ها و توزیع اندازه حفرات و همچنین مقاومت بتن در برابر واکنش سیلیس- قلیا، نفوذ یون کلریدی و حملات سولفات‌ها را افزایش می‌دهد.

کلمات کلیدی: پوزولان، متاکائولن، بتن‌های توانمند

۱- مقدمه

بتن پرکاربردترین ماده ساختمانی در جهان است. این ماده پس از آب بیشترین مصرف وزنی را دارد و سالیانه حدود شش میلیارد تن از آن به مصرف می‌رسد. این مساله بخاطر فراوانی مواد خام برای تولید سیمان، قیمت نسبتا پایین آن و نیز تنوع و سازگاری بتن در شرایط و سازه‌های مختلف است. نگرانی‌های زیست محیطی در مورد آسیب‌های ناشی از استخراج مواد خام و انتشار گاز CO_2 حین تولید سیمان موجب فشارهایی برای کاهش مصرف سیمان با استفاده از مواد کمکی به جای آن شده است. این مواد کمکی می‌توانند طبیعی، پسماندهای صنعتی، محصولات فرعی و یا موادی باشند که به انرژی خیلی کمتری برای تولید نیاز دارند. در پاسخ به این نگرانی‌ها، امروزه مخلوطهایی از سیمان پرتلند به همراه مواد پوزولانی به طور متداول در تولید بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند. در گذشته اصطلاح پوزولان به خاکستر آتشفشانی و خاک‌های کلسینه‌شده که بطور طبیعی شکل گرفته‌اند اطلاق می‌شد که با آهک در دمای محیط و حضور آب واکنش می‌دهند. در حال حاضر، این اصطلاح به تمام مواد سیلیسی/ آلومینی تعمیم پیدا کرده‌است که با اندازه دانه بسیار ریز و در حضور آب به طور شیمیایی با هیدروکسید کلسیم (CH) وارد واکنش می‌شوند تا ترکیباتی را شکل دهند که دارای خواص سیمانی هستند. این تعریف تعمیم یافته محصولات پسماند مثل خاکستر بادی، خاکستر سبوس برنج و میکروسیلیس را شامل می‌شود.

سیمان پرتلند اگر بطور کامل هیدراته شود حدود ۲۸ درصد وزن خود هیدروکسید کلسیم تشکیل می‌دهد. هیدروکسید کلسیم بوجود آمده بوسیله هیدراته‌شدن سیمان پرتلند نقش قابل توجهی در استحکام ندارد و برای دوام بتن مضر است. حذف یا کاهش هیدروکسید کلسیم از طریق واکنش با پوزولان می‌تواند منجر به استحکام و دوام بیشتری شود. به خاطر این مزایای فنی و در بعضی موارد مزایای اقتصادی است که در دهه گذشته با مصرف گسترده مواد پوزولانی در بتن مواجه بوده‌ایم. این روند در حال حاضر انگیزه خیلی بیشتری پیدا کرده و دلیل آن هم مزایای بارز زیست‌محیطی آن می‌باشد و باور بر اینست که حجم کاربرد آن‌ها با افزایش درک مزایای

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.5.9]

زیست‌محیطی افزایش پیدا می‌کند و به ساخت و ساز پایدار در آینده کمک خواهد کرد. لذا دلایل اجتناب ناپذیر در بلند مدت وجود خواهد داشت تا جایگزین کردن سیمان در ملات و بتن با پسماندها و مواد پوزولانی گسترش پیدا کند.

یک منبع برای ماده پوزولانی می‌تواند رس کلسینه‌شده باشد. استفاده از رس کلسینه‌شده به شکل متاکائولن به عنوان یک افزودنی پوزولانی برای ملات و بتن توانسته نگاه قابل توجهی در سال‌های اخیر بخود جلب کند. بخشی از این تمایل به حذف هیدروکسید کلسیم مربوط می‌شود. حذف هیدروکسید کلسیم تاثیر عمده‌ای بر مقاومت در برابر نفوذ سیالات (یون کلرید، یون‌های سولفاتی و....) و واکنش قلیایی سنگدانه‌ها داشته و استحکام بیشتری را بوجود می‌آورد و بخش دیگر مربوط به تولید متاکائولن در دمای پایین نسبت به سیمان پرتلند و مصرف انرژی و انتشار گاز CO_2 کمتر است.

۲- متاکائولن

متاکائولن (MK) یک ماده پوزولانی است که از کلسینه شدن کائولن در دمای ۶۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس با توجه به نوع کائولن بدست می‌آید. این پوزولان یکی از جدیدترین مصالح جایگزین سیمان برای تهیه بتن توانمند محسوب می‌شود. حرارت دادن آب شیمیایی کائولن را خارج کرده، ساختار کریستالی آن را از بین برده و محصول تبدیل به یک سیلیکات آلومینیوم آمورف می‌شود. متاکائولن در واکنش با هیدروکسید کلسیم (CH) ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) را در دمای محیط ایجاد نموده و فازهای حاوی آلومینات شامل C_4AH_{13}، C_3AH_6 و C_2ASH_8 را تولید می‌کند[۱].

متاکائولن در بسیاری از کاربردهای بتن به شرح زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد[۲]:

بتن‌های توانمند، استحکام بالا و سبک وزن – بتن‌های پیش‌ساخته، ملات‌ها، اندودکاری، مواد تعمیری و پلاسترهای استخری

و مزایای آن عبارتند از:

استحکام خمشی و فشاری بالاتر، نفوذپذیری کمتر، مقاومت بیشتر در مقابل نفوذ سیالات و دوام بیشتر، سطح با کیفیت‌تر بتن، رنگ و ظاهر بهتر، استعدادکمتر برای وقوع پدیده شوره‌زدنو کنترل بهتر واکنش قلیایی سنگدانه

۲-۱- خواص متاکائولن

متاکائولن دارای ۹۹/۹ درصد ذرات کوچکتر از ۱۶ میکرون است و متوسط اندازه ذرات آن حدود ۳ میکرون می‌باشد[۲]. ترکیب شیمیایی یک نوع متاکائولن در جدول ۱و برخی از خواص فیزیکی نوعی متاکائولن در جدول ۲ آمده است. جایگاه متاکائولن در مقایسه با پوزولان‌های دیگر در شکل ۱ نشان داده شده است.

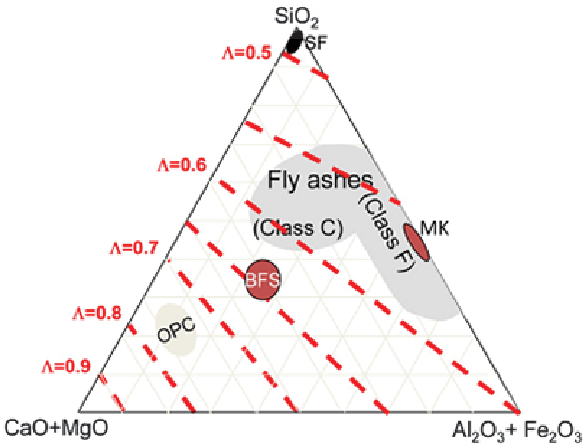
جدول ۱-آنالیز شیمیایی یک نوع متاکائولن [۲]

اجزاء	درصد وزنی
SiO_2	۵۱/۵۲
Al_2O_3	۴۰/۱۸
Fe_2O_3	۱/۲۳
CaO	۲/۰
MgO	۰/۱۲
K_2O	۰/۵۳
Na_2O	۰/۰۸
Ti_2O	۲/۲۷

جدول ۲- خواص فیزیکی یک نوع متاکائولن [۲]

خواص	مقدار
متوسط اندازه ذرات (میکرون)	۱/۰
وزن مخصوص	۲/۵
سطح ویژه، cm^2/g	۱۲
رنگ	سفید

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.5.9]



شکل ۱- جایگاه ترکیب متاکائولن در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی (OPC) و برخی از پوزولان‌ها مثل میکرو سیلیس (SF)، سرباره کوره بلند (BFS) و خاکستر بادی (FA)[۳]

۲-۲-مکانیزم واکنش هیدراسیون

تعدادی از روش‌های حرارتی، مکانیکی و شیمیایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند تا قابلیت واکنش‌پذیری مواد پوزولانی را فعال سازند. روش‌های فعال‌سازی حرارتی شامل پخت مواد اولیه می‌شود در حالیکه روش‌های مکانیکی روی آسیاکاری تکیه دارند و روش‌های شیمیایی از فعال‌کننده‌هایی مثل ترکیبات اسیدی و قلیایی استفاده می‌کنند.

آسیاکاری مواد رسی فرایند مهمی است که در صنعت و طبیعت اتفاق می‌افتد و باعث کاهش بلورینگی مواد رسی می‌گردد و در نهایت آلومینوسیلیکات‌های آمورف بدست می‌آیند. فعال‌سازی مکانوشیمیایی خواص سطحی رس‌ها را دستخوش تغییر می‌کند و ظرفیت تعویض یونی رس را افزایش می‌دهد و همچنین آسیا کاری باعث کاهش اندازه ذرات و افزایش مساحت سطح رس می‌شود.فعال‌سازی حرارتی مواد معدنی رسی بین ۶۰۰ تا ۹۰۰درجه سلسیوس بوسیله هیدروکسیل‌زدایی منجر به شکست کامل یا جزئی ساختار می‌گردد و فاز انتقالی با واکنش‌پذیری بالا بوجود می‌آورد. تولید متاکائولن ($Al_2O_3.2SiO_2$ یا AS_2) بوسیله کلسینه‌کردن رس‌هایی است که غنی از کائولینیت هستند (کائولینیت یک مینرال با ساختار دو لایه‌ای می‌باشد که در آن ورقه‌ای از آلومینیوم با چیدمان اکتاهدرال به یک ورقه سیلیکونی با چیدمان تتراهدرال متصل است) واکنش اصلی بین AS_2 و هیدورکسید کلسیم حاصل از هیدراته شدن سیمان در حضور آب می‌باشد. این واکنش ژل سیمانی C-S-H بیشتری را به همراه محصولات بلورین تشکیل می‌دهد که شامل هیدرات آلومینات کلسیم و هیدرات آلومینوسیلیکات می‌شود. محصولات بلورین بیشتر به نسبت AS_2/CH و دمای واکنش بستگی دارند[۴].

$C_3S/C_2S(clinker) \rightarrow Calcium\ Silicate\ Hydrates(C\text{-}S\text{-}H) + Ca(OH)_2$

$Ca(OH)_2 + \mathbf{MK(AS_2)} \rightarrow C\text{-}S\text{-}H\ Puzz. + Crystalline\ products\ (C_2ASH_8, C_4AH_{13}, C_3AH_6)$

مطالعات متعددی صورت پذیرفته است تا واکنش هیدراسیون را بررسی کرده و سطح واکنش‌پذیری متاکائولن را از نظر فرآوری و خلوص رس اولیه مورد سنجش قرار دهند. کائولن باید بطور طبیعی دارای خلوص بالا بوده یا اینکه بوسیله تکنیک‌های فراوری معدنی استاندارد پالایش شود. دمای فعال‌سازی حرارتی دارای اهمیت ویژه‌ای بوده و بستگی به ماده معدنی پایه استفاده شده دارد. بررسی‌ها نشان داده‌اند که افزایش استحکام و کاهش سطح CH در بتن سخت شده با رس‌هایی حاصل می‌شود که غنی از کائولینیت باشند. با تعیین سطح واکنش‌پذیری با استفاده از تست Chapelle نشان داده شده است که متاکائولن فراوری‌شده تحت شرایط مناسب می‌تواند دارای کارایی پوزولانی بسیار خوبی باشد.

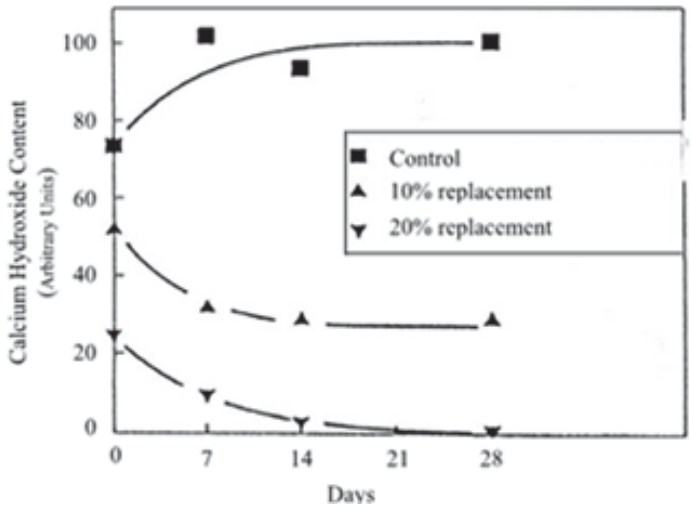
شکل ۲ تغییرات میزان CH بتن حاوی متاکائولن را بازمان عمل‌آوری ارائه می‌کند. مشاهده می‌شود که CH در تمام زمان‌های سخت‌شدن با میزان جایگزینی متاکائولن کاهش قابل توجهی داشته است.

گزارش‌ها در مورد میزان متاکائولن لازم برای حذف کامل CH متفاوت‌اند. گزارش Kostuch و همکارانش (۲۰۰۰)[۵] نشان می‌دهند که ۲۰ درصد جایگزینی سیمان با MK برای حذف تمام CH در بتن ۲۸ روزه کافی است. گزارش‌های دیگر [۶] مقادیر

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.5.9]

بالاتر MK را برای حذف تمام CH بیان می‌کنند این اختلاف‌ها عجیب نیستند چرا که محصولات هیدراسیون و فعالیت پوزولانی به میزان زیادی بستگی به ترکیب شیمیایی سیمان پرتلند، خلوص متاکائولن و نسبت آب به سیمان دارد.

Cabrera و Rojas (۲۰۰۱) کینتیک یک مخلوط متاکائولن و آهک در آب ۶۰ درجه سلسیوس را با استفاده از تحلیل حرارتی بررسی کردند. نتایج عددی آن برای تعیین نوع واکنش بکار رفته است. آن‌ها نشان داده‌اند که واکنش پوزولانی تحت تأثیر فرایند نفوذ کنترل شده و می‌تواند با معادله نفوذ Jander بیان گردد که بر اساس قانون سهمی‌گون فیک از نفوذ استوار است.



شکل ۲- اثر مقدار جایگزینی متاکائولن روی مقدار CH در بتن [۷]

آنها یک روش سریع جدید برای کنترل واکنش با استفاده از خشک‌کن ماکروویو پشنهاد کردند تا آن را بتوان در هر زمان دلخواهی از واکنش متوقف ساخت. آنها نوع و کمیت محصولات واکنش را به وسیله روش‌های DTA، TG و نیز XRD مشخص کردند. بر اساس آزمایشات چنین نتیجه‌گیری کردند[۷]:

۱- خشک کردن با امواج ماکروویو برای نگاه داشتن فرایند هیدراسیون یک روش عملی و مفید می‌باشد که نوع محصولات واکنش را دستخوش تغییر نمی‌کند.

۲- آهک با سرعت خیلی سریعی در زمان اولیه واکنش به مصرف می‌رسد. مکانیزم واکنش با کنترل نفوذی در ۱۲۰ ساعت اولیه سازگار بود. ثابت سرعت محاسبه شده واکنش از طریق معادله جاندر نشان داد که متاکائولن خیلی واکنش پذیر بوده و از نظر واکنش پذیری با میکروسلیس قابل مقایسه است.

۳- محصولات واکنش که از ۲ تا ۹ روز آشکار شدند نشان دادند که فازهای C_2ASH_8 و C_6AH_{13} تا مدت ۹ روز در دمای ۶۰ درجه سلسیوس تحت شرایط مورد بررسی نیمه پایدار بودند. با وجود این واقعیت که هیدروگارنت (C_3ASH_8) نیز از زمان ۳۰ ساعت تا ۹ روز موجود بوده است. این می‌تواند نشانه‌ای از آن باشد که هیدروگارنت از یک واکنش تبدیلی شکل نگرفته بلکه در اثر واکنش مستقیم بین متاکائولن و آهک حاصل می‌شود.

Poon و همکارانش (۲۰۰۱) میزان واکنش‌های پوزولانی سیستم سیمان/متاکائولن با میکروسیلیس (SF) و خاکستر بادی (FA) مقایسه کردند. نتایج واکنش پوزولانی خمیرها در زمان‌های مختلف در جدول۳ آمده است که به صورت مقادیر درصدی از پوزولان واکنش‌کرده نسبت به میزان اولیه پوزولان در خمیر بیان شده‌اند[۸].

بر اساس آزمایش‌ها نتیجه گرفتند که: ۱- میزان واکنش پوزولانی متاکائولن در هر مرحله، در سطح جایگزینی ۵ درصد نسبت به سطوح ۱۰و ۲۰ درصد بالاتر بوده‌است. سرعت واکنش پوزولانی بیشتر در خمیر سیمانی با سطح جایگزینی کمتر می‌تواند به غلظت بیشتر CH موجود برای واکنش پوزولانی نسبت داده شود. ۲- در مقایسه مواد پوزولانی مختلف، سرعت واکنش پوزولانی MK بیشتر از SF در ابتدا بود. ۳- واکنش‌پذیری اولیه بیشتر MK می‌تواند به فازهای Al_2O_3 آن نسبت داده شود که در تشکیل ژلینت (C_2ASH_8) و میزان اندک فاز بلوری C_4AH_{13} شرکت داده می‌شود.

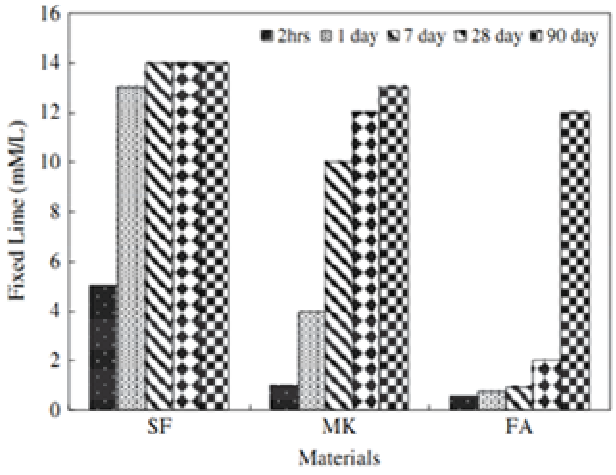
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.5.9]

جدول ۳- درجه واکنش پوزولانی سیستم‌های سیمان/ پوزولان [۸]

مخلوط	درجه واکنش پوزولانی، ٪			
	۳روز	۷روز	۲۸روز	۹۰روز
5%MK	۲۰/۵۶	۲۹/۵۲	۳۹/۴۴	۵۶/۲۸
10%MK	۱۵/۳۴	۲۶/۹۸	۳۶/۲۸	۵۰/۹۶
15%MK	۹/۳۸	۱۸/۶۴	۳۰/۸۲	۴۱/۲۹
5%SF	۱۵/۸۶	۲۴/۶۴	۳۸/۵۳	۵۴/۸۵
10%SF	۱۰/۳۲	۲۱/۲۵	۳۵/۳۸	۵۲/۰۶
20%FA	۳/۹۸	۷/۲۹	۱۷/۵۴	۲۸/۵۹

۲-۳- اثر دما

Frias و همکارانش (۲۰۰۰) اثر واکنش پوزولانی متاکائولن را بر تحول گرمایی در ملات‌های سیمان/ متاکائولن در مقایسه با دیگر مواد پوزولانی مثل میکروسیلیس و خاکستر بادی مورد بحث قرار دادند. نتایج نشان داد که ملات‌های متاکائولن موجب افزایش جزئی گرما در مقایسه با ملات ۱۰۰درصد سیمان پرتلند بخاطر فعالیت پوزولانی شدید متاکائولن می‌شوند. با توجه به گرمای هیدراسیون، ملات آمیخته با متاکائولن رفتاری نزدیک‌تر با میکروسیلیس نشان داد. نتایج بدست آمده برای فعالیت پوزولانی در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. پس از گذشت ۲ ساعت، هر دو مخلوط متاکائولن و میکروسیلیس فعالیت پوزولانی از خود نشان داده‌اند[۹].



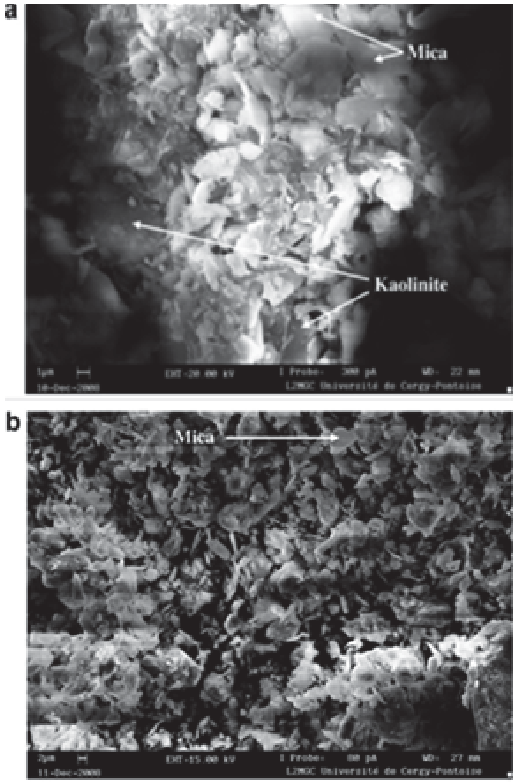
شکل ۳- مقایسه فعالیت پوزولانی متاکائولن، میکروسیلیکا و خاکستر بادی در زمان های مختلف برای مخلوط ملات سیمان/ پوزولان [۹]

۲-۴-اثر هیدروکسیل‌زدایی

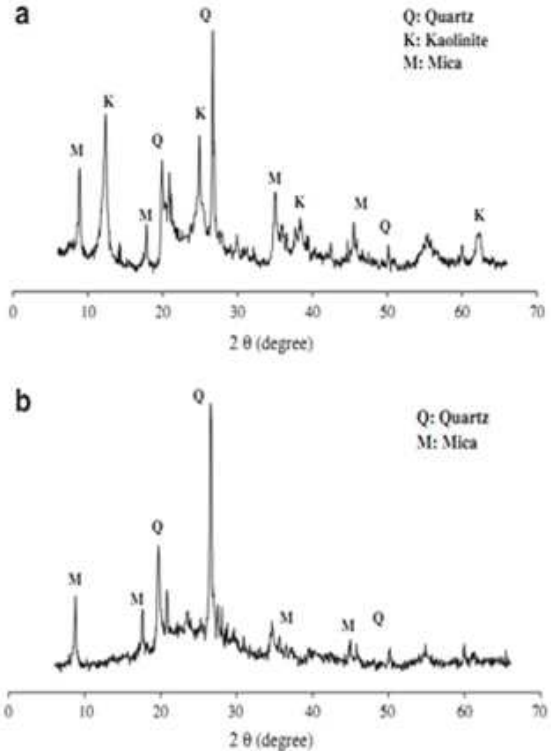
Said Kenai و همکارانش (۲۰۱۱) بمنظور بررسی ریز ساختار کائولن و متاکائولن پس از عملیات کلسینه‌شدن و هیدروکسیل‌زدایی نمونه‌ها را مورد آنالیز فازی قرار دادند. تصاویر پراش اشعه X نمونه‌های کائولن و متاکائولنکلسینه‌شده در ۸۵۰ درجه سلسیوس بمدت ۳ ساعت در شکل ۴ نشان داده شده است. فازهای کریستالی متاکائولن شامل کوارتز و میکا بوده‌است. عملیات حرارتی منجر به این نتایج شده است: ۱) از بین رفتن پیک مربوط به کائولینیت ۲) ظهور یک پیک بین ۲ تتا ۲۰ و ۳۰° که نشان از تشکیل فاز آمورف می‌باشد.

تصاویر SEM نیز تغییر ریز ساختار متاکائولن نسبت به کائولن را نشان می‌دهد (شکل ۵). حضور کائولینیت و میکا در کائولن فعال‌نشده بطور آشکار در شکل ۵a نشان داده شده است. در حالیکه شکل ۵b عدم حضور کائولینیت را نشان می‌دهد[۱۰].

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.5.9]



شکل ۵- تصاویر a SEM) کائولن b) متاکائولن [۱۰]



شکل ۴- الگوهای a XRD) کائولن b) متاکائولن [۱۰]

Shrarzmum و همکارانش (۲۰۰۳) اثر پارامترهای عملیات حرارتی را بر فرایند هیدروکسیل‌زدایی/ آمورف شدن مواد پایه کائولینیت مورد تحقیق قرار دادند. فرایند هیدروکسیل‌زدایی/آمورف‌شدن بوسیله DTA/TGA با طیف‌سنجی جرمی و پراش اشعه ایکس پودر تشخیص داده شد. بر اساس این پژوهش نتیجه‌گیری کردند که[۱۱]:

۱- در دمای کلسینه شدن کمتر از ۴۵۰ درجه سانتیگراد کائولن سطح نسبتا پایینی از میزان هیدروکسیل‌زدایی را نشان داد. در محدوده ۴۵۰ تا ۵۷۰ درجه سلسیوس، میزان هیدروکسیل‌زدایی به شدت افزایش یافته است و در نهایت در دمای ۵۷۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس کائولن کاملا هیدروکسیل‌زدایی شده است.

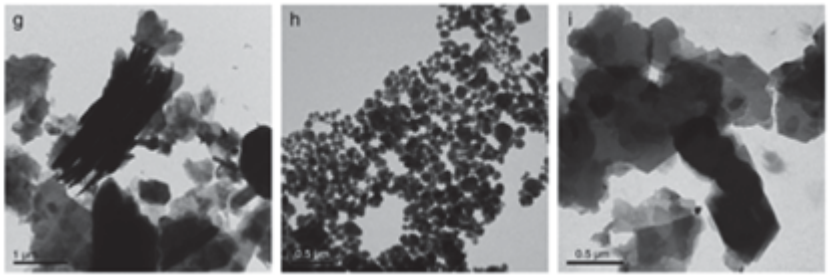
۲- هیدروکسیل‌زدایی با آمورف‌شدن همراه بوده است که فعالیت افزودنی را تحت تاثیرخود قرار داده است.

۳- نشان داده شد که فعالیت شیمیایی تابع خطی از میزان فاز آمورف در محدوده ۵۰ تا ۱۰۰ درصد است

۴- شاخص استحکام فعالیت مخلوط‌های سخت شده (۷، ۲۸، و ۹۰روزه) بستگی زیادی به میزان فاز آمورف و نیز میزان هیدروکسیل‌زدایی دارد.

۲-۵-اثر نوع فرآوری روی مورفولوژی ذرات

شکل ۶ مورفولوژی کائولن طبیعی و آنهایی که مورد عملیات حرارتی و مکانوشیمیایی قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد. آسیا کاری به شدت شکل ذرات را به لبه‌های گرد تغییر می‌دهد (شکل۶-h) و عملیات حرارتی تاثیری روی مورفولوژی ذرات نگذاشته است (شکل ۶-i) [۱۲].



شکل ۶- ریزنگاره‌های g TEM) کائولن طبیعی h) ۱۲۰ دقیقه آسیاکاری شده i) کلسینه شده در ۷۰۰°C [۱۲]

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.5.9]

۳- بتن‌های توانمند

بدلیل تقاضای صنعت ساخت و ساز نیاز به بتن‌های توانمند افزایش یافته است. برخی از ویژگی‌های بتن‌های توانمند به شرح زیر است: * استحکام اولیه و نهایی بالاتر * نفوذپذیری کمتر، دوام و طول عمر بالاتر * مدول الاستیسیته بالاتر * مقاوم‌تر در برابر حملات شیمیایی و در برابر تخریب ناشی از سرما

خواص بتن‌های توانمند مطابق با استاندارد ASTM در جدول ۴ نشان داده شده است[۱۳].

جدول ۴- خواص بتن‌های توانمند مطابق با استاندارد ASTM

خواص	روش آزمون	ضوابط مشخص‌شده
استحکام فشاری	ASTM C 39	۷۰-۱۴۰MPa در ۲۸ تا ۹۰ روز
استحکام خمشی	ASTM C 78	۲-۴MPa در ۱ تا ۳ روز
مقاومت سایشی	ASTM C 944	۰-۱ mm عمق سایش
نفوذپذیری کم	ASTM C 1202	۵۰۰-۲۰۰۰ Coulombs
نفوذ کلرید	AASHTO T 259/260	کمتر از ٪ ۰/۰۷ کلر در ۶ ماه
جذب کم	ASTM C 642	۲ تا ۵ درصد

۴- کارپذیری بتن تازه حاوی متاکائولن

در این حالت خواص بتن از زمانی که آب به سیمان و سنگدانه اضافه می‌شود تا وقتی که بتن گیرش پیدا کرده و سخت می‌شود مورد توجه قرار می‌گیرد. بسیار مهم است که کارپذیری و سیالیت بتن تازه در حدی باشد که بتوان آن را با سهولت کافی ریخته، متراکم، پرداخت و یا حمل کرد.

Brooks و Johari (۲۰۰۱) زمان‌های گیرش و اسلامپ بتن‌های حاوی ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ درصد متاکائولن را بررسی کردند. نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۲۸ بود. نتایج مربوط به زمان گیرش و اسلامپ در جدول۵ آمده است.

جدول ۵- کارپذیری و زمان‌های گیرش بتن‌های حاوی متاکائولن [۱۴]

درصد متاکائولن	اسلامپ، mm	گیرش اولیه، h	گیرش نهایی، h
۰	۱۰۰	۵	۷/۷
۵	۳۰	۶/۴۲	۸/۸۲
۱۰	۲۰	۶/۹۸	۹/۴۲
۱۵	۵	۶/۴۵	۹/۳۱

می‌توان مشاهده کرد که میزان اسلامپ با افزایش مقدار MK کاهش یافته در حالیکه زمان‌های گیرش با افزایش MK افزایش یافته‌اند [۱۴].

۵- خواص بتن‌های سخت شده حاوی متاکائولن

۵-۱- توزیع اندازه حفرات

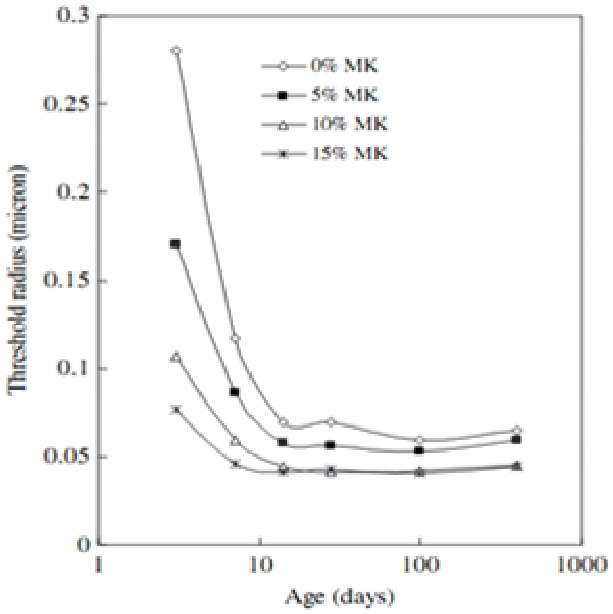
رفتار خوردگی، سایش، مقاومت به شوک، نفوذ پذیری از جمله خواص مهم بتن‌ها می‌باشند. علاوه بر میزان تخلخل، شکل و توزیع حفرات در بتن تأثیر زیادی روی این خواص دارند. خواص ذکر شده عمدتاً با کاهش اندازه حفرات بهبود می‌یابند.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.5.9]

Khatib و Wild(۱۹۹۶) میزان تخلخل و توزیع اندازه حفرات خمیر عمل‌آورده شده متاکائولن–سیمان را تعیین نمودند. خمیرها حاوی ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵درصد متاکائولن با نسبت آب/سیمان ۰/۵۵ تهیه شدند. نمونه‌ها برای دوره‌های ۳ الی ۳۶۵ روز عمل‌آوری شدند. حجم و ساختار حفرات بوسیله نفوذدهی جیوه اندازه‌گیری شد. نسبت تخلخل‌های با شعاع کمتر از ۲۰ میکرون در جدول۶ آمده است. نسبت تخلخل با شعاع کمتر از ۲۰ میکرون با افزایش مقدار MK افزایش یافته است[۱۵]. مقدار شعاع آستانه‌ای برای خمیرها با افزایش مقدار MK کاهش یافته است. شکل ۸ شعاع آستانه را برای خمیرهای با و بدون MK در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. استفاده از MK در خمیر سیمان منجر به اصلاح ساختار تخلخل شده است.

جدول ۶- درصد تخلخل با شعاع کمتر از ۲۰ میکرون در بتن حاوی متاکائولن در زمان‌های مختلف [۱۵]

درصد حفرات کمتر از ۲۰ میکرون				
روز	۰٪ MK	۵٪ MK	۱۰٪ MK	۱۵٪ MK
۳	۲۲/۲	۲۸/۳	۳۱/۰	۳۹/۹
۷	۲۶/۵	۳۲/۱	۴۱/۰	۵۰/۴
۲۸	۳۰/۳	۴۳/۰	۵۳/۹	۵۵/۷
۹۰	۳۳/۷	۴۳/۵	۴۸/۷	۵۴/۹
۳۶۵	۳۷/۳	۴۴/۷	۴۹/۹	۵۷/۶



شکل ۷- تغییرات شعاع آستانه‌ای در زمان‌های مختلف برای خمیرهای با و بدون متاکائولن [۱۵]

Poon و همکارانش (۲۰۰۶) تخلخل و توزیع اندازه حفرات خمیر سیمان–متاکائولن را با خمیرهای سیمان مخلوط با میکروسیلیس و خاکستربادی مقایسه کردندکه نتایج مربوطه در جدول۷خلاصه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که برای تمام نمونه‌ها، تخلخل و متوسط اندازه حفرات با طولانی‌تر شدن زمان عمل‌آوری کاهش یافته‌اند. نمونه‌های حاوی MK دارای تخلخل کمتری با قطر حفرات متوسط کوچکتر از نمونه کنترلی و نیز نمونه حاوی میکروسیلیس با همان درصد جایگزینی در تمام مدت زمان‌های آزمایش بوده‌اند. این مسأله نشان داد که متاکائولن نسبت به میکروسیلیس در اصلاح ساختار تخلخل موثرتر بوده است اگرچه هر دوی آن‌ها تخلخل و اندازه حفرات خمیرهای سیمانی را کاهش داده‌اند[۱۶].

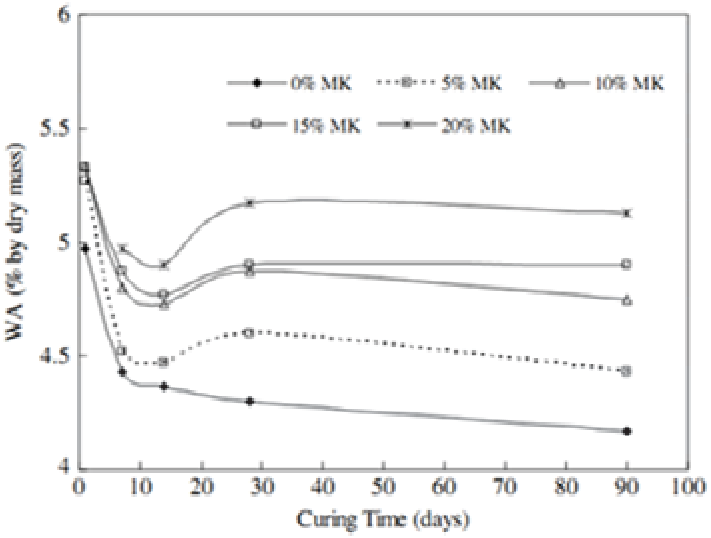
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.5.9]

جدول ۷- قطر متوسط حفرات خمیر سیمان‌های آمیخته[۱۶]

مخلوط	متوسط قطر حفرات (میکرون)			
	۳ روز	۷ روز	۲۸ روز	۹۰ روز
کنترل	۰/۰۳۸۰	۰/۰۳۷۱	۰/۰۳۶۲	۰/۰۳۴۸
۵٪ MK	۰/۰۳۵۷	۰/۰۲۷۹	۰/۰۲۵۷	۰/۰۲۴۳
۱۰٪ MK	۰/۰۲۸۷	۰/۰۲۵۱	۰/۰۱۹۷	۰/۰۱۸۶
۲۰٪ MK	۰/۰۲۰۴	۰/۰۱۴۳	۰/۰۱۲۲	۰/۰۱۱۴
۵٪ SF	۰/۰۳۶۶	۰/۰۳۷۰	۰/۰۳۶۷	۰/۰۳۴۹
۱۰٪ SF	۰/۰۳۵۳	۰/۰۳۴۱	۰/۰۳۲۵	۰/۰۳۰۶
۲۰٪ FA	۰/۰۳۶۸	۰/۰۳۵۶	۰/۰۳۴۷	۰/۰۳۳۹

۵-۲-جذب آب و جذب سطحی

Clay و همکارانش (۲۰۰۴) ویژگی‌های جذب آب بتن حاوی متاکائولن را مورد بررسی قرار دادند. جذب آب از طریق غوطه‌وری بتن حاوی MK انجام شد. جذب آب برای تمام نمونه‌ها در زمان‌های مختلف عمل‌آوری در شکل ۹ نشان داده شده است. این روند به صورت یک افزایش سیستماتیک کوچک در جذب آب با افزایش میزان MK در تمام زمان‌های عمل‌آوری دیده می‌شود. بین ۱۴ تا ۲۸ روز افزایش کمی در جذب آب در اثر حضور متاکائولن ایجاد گردیده است. این افزایش می‌تواند بخاطر تشکیل فاز هیدراته چگال‌تر باشد. اما پس از گذشت ۲۸ روز، ۵ و ۱۰ درصد متاکائولن در بتن کاهش کوچکی در جذب آب آشکار ساخت، در حالیکه در سطوح جایگزینی بالاتر متاکائولن (۱۵ و ۲۰ درصد) تغییر در مقدار جذب آب ناچیز بوده است[۱۷].



شکل ۸- تغییرات جذب آب در زمان‌های مختلف عمل‌آوری بتن‌های حاوی متاکائولن [۱۷]

۵-۳- استحکام فشاری بتن

از مهمترین خصوصیات بتن مقاومت فشاری آن است. بررسی‌های متعددی روی بهبود استحکام بتن‌های حاوی متاکائولن صورت گرفته است. Brooks و همکارانش (۲۰۰۱) استحکام فشاری بتن‌های حاوی ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ درصد متاکائولن را تعیین کردند. نسبت آب به چسب برابر ۰/۲۸ بود. نتایج استحکام ۲۸ روزه بتن‌های MK در جدول ۸ خلاصه شده است. از جدول پیداست که استحکام فشاری با افزایش متاکائولن افزایش یافته است[۱۸].

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.5.9]

جدول ۸- استحکام فشاری بتن‌های حاوی متاکائولن [۱۸]

مخلوط‌های بتن	استحکام فشاری، MPa
سیمان پرتلند معمولی	۸۷/۰
۵ درصد متاکائولن	۹۱/۵
۱۰ درصد متاکائولن	۱۰۴/۰
۱۵ درصد متاکائولن	۱۰۳/۵

پژوهشگران سه عامل اصلی را شناسایی کردند که نقش متاکائولن در استحکام بتن را تحت تأثیر قرار می‌دهند[۱۸]:

۱- اثر پرکنندگی متاکائولن که بلافاصله است.

۲- شتاب در هیدراسیون سیمان پرتلند که در طی ۲۴ ساعت رخ می‌دهد.

۳- واکنش پوزولانی با هیدروکسید کلسیم که بیشترین تأثیر را طی ۷ تا ۱۴ روز نخست برای تمام سطوح جایگزینی متاکائولن می‌گذارد.

۵-۴- استحکام کششی و خمشی

Qian و Li (۲۰۰۱) استحکام کششی بتن‌های حاوی ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ درصد متاکائولن به عنوان جایگزین سیمان مورد تحلیل قرار دادند. متاکائولن استفاده شده دارای سطح ویژه ۱۲۰۰۰m^2/kg و قطر متوسط ذرات آن ۲/۲۳ میکرون بود. نمونه‌ها به ابعاد ۲۰mm×۱۰۰×۳۰۰ تحت کشش مستقیم مورد آزمایش قرار گرفتند. این آزمایشات برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در زمان ۲۸ روز انجام گرفت. نتایج آزمون کشش در جدول ۹ آمده است[۱۹].

جدول ۹-استحکام کششی بتن با سطوح مختلف جایگزینی متاکائولن [۱۹]

زمان، روز	استحکام کششی، MPa			
	۰٪ MK	۵٪ MK	۱۰٪ MK	۱۵٪ MK
۲۸	۳/۳۵	۲۸	۳/۳۵	۲۸

نتایج حاکی از آن بودند که استحکام کششی بتن با افزایش سطح جایگزینی متاکائولن افزایش یافته است. افزایش استحکام کششی متوسط عبارت بودند از ۷٪، ۱۶٪ و ۲۸٪ و افزایش کرنش نهایی عبارت بودند از ۳٪ ، ۱۹٪ و ۲۷٪ که به ترتیب برای ۵، ۱۰، ۱۵ درصد متاکائولن ارائه شده‌اند.

Qian و Li استحکام خمشی بتن‌های حاوی متاکائولن با شرایط مذکور را بررسی کردند. نمونه‌ها به ابعاد ۱۰۰mm×۱۰۰×۳۰۰ تحت خمش ۴ نقطه‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج در جدول ۱۰ آمده است. آنها نتیجه‌گیری کردند[۱۹]:

- سطح جایگزینی ۵ درصد اثر کمی بر استحکام خمشی بتن داشته است.
- در ۱۰ و ۱۵ درصد جایگزینی متاکائولن، استحکام خمشی ۲۸ روزه به ترتیب ۳۲ و ۳۸ درصد افزایش پیدا کرده است. بنابراین ارتقای قابل توجه در استحکام خمشی بتن را می‌توان برای سطوح جایگزینی ۱۰ و ۱۵ درصد متاکائولن بدست آورد.

جدول ۱۰-استحکام خمشی بتن با سطوح مختلف جایگزینی متاکائولن [۱۹]

زمان، روز	استحکام خمشی، MPa			
	۰٪ MK	۵٪ MK	۱۰٪ MK	۱۵٪ MK
۲۸	۴/۶۵	۴/۷۴	۶/۱۶	۶/۴۰
۸۰	۵/۷۰	۵/۸۱	۶/۴۶	۷/۰۶

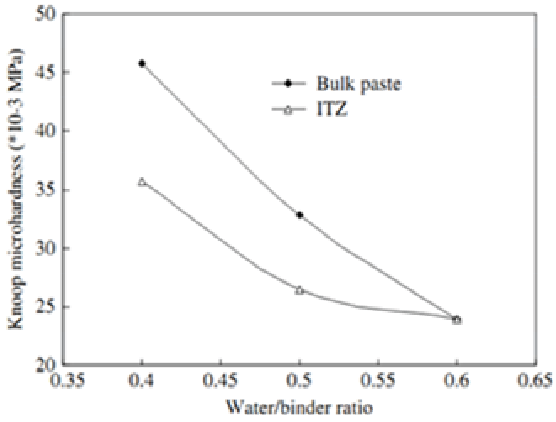
۵-۵- میکرو سختی

ناحیه انتقال یا ناحیه بین خمیر سیمان و سنگدانه از اهمیت قابل توجهی در خصوص خواص بتن برخوردار است. ناحیه انتقال به

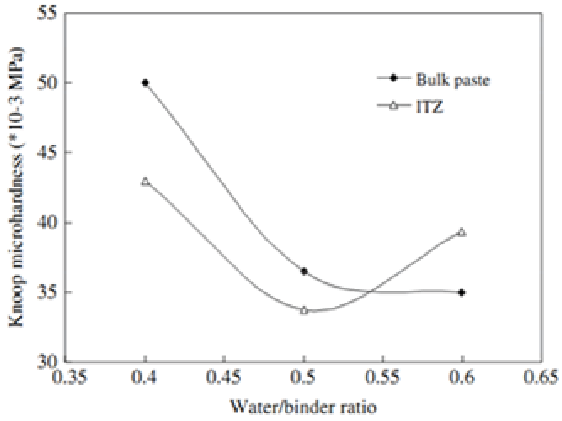
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.5.9]

صورت یک پوسته نازک به دور دانه‌های درشت قرار گرفته و عموما ضعیف‌تر از دو بخش دیگر بتن است و در نتیجه تاثیر بسزایی در خواص مکانیکی بتن دارد. آزمون میکروسختی ابزاری برای تعیین گرادیان میکروساختار در سرتاسر منطقه فصل مشترک انتقالی (ITZ) بدست می‌دهد. اندازه‌گیری میکروسختی می‌تواند به تشخیص خواص ITZ نسبت به زمینهخمیر سیمان کمک کرده و وسیله‌ای برای تخمین وسعت ITZ می‌باشد.

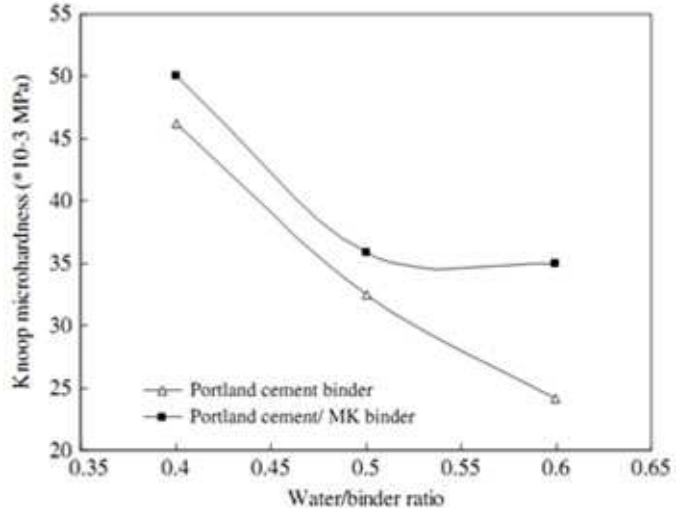
Asbidge و همکارانش (۲۰۰۲) تغییرات در میکروسختی اجرای هیدراته زمینه سیمانی را به صورت توابعی از فاصله تا سطح اگریگیت (مصالح دانه‌ای) برای نمونه‌های حاوی متاکائولن بدست آوردند. اندازه‌گیری‌ها با استفاده از بارگذاری g ۲۵ انجام شد. تغییرات در میکروسختی خمیر / ITZ در شکل‌های ۱۰تا ۱۲نشان داده شده‌اند. از شکل ۱۰ به نظر می‌رسد که در نمونه‌های سیمان پرتلند ITZ نرم‌تر از (متخلخل‌تر) زمینه بالک در نسبت‌های کمتر آب به چسب بوده است[۲۰]. میکروسختی ITZ به میزان ۲۲ درصد کمتر از زمینه بالک در نسبت آب به چسب ۰/۴ بود. شکل ۱۱نشان می‌دهد که در نمونه‌ایی که سیمان پرتلند با ۱۰ درصد متاکائولن جایگزین شده است، میکرو سختی منطقه ITZ مشابه با زمینه بالک بوده است.از شکل ۱۲ واضح است که میکروسختی زمینه بالک و ITZ وقتی متاکائولن بعنوان جایگزینی جزئی برای سیمان پرتلند بکار می‌رود افزایش یافته است.



شکل ۹- تغییرات در میکروسختی با نسبت آب/چسب (چسب سیمان پرتلند) [۲۰]



شکل ۱۰-تغییرات در میکروسختی با نسبت آب/ چسب (چسب سیمان پرتلند/ متاکائولن) [۲۰]



شکل ۱۱-تغییرات در میکروسختی با نسبت آب/ چسب مختلف [۲۰]

۶- دوام بتن‌های حاوی متاکائولن

دوام بتن به مقاومت آن در برابر عوامل هوازدگی، حمله شیمیایی، سایش و یا هر فرایندی که موجب آسیب دیدگی شود، گفته می‌شود. بنابراین بتن با دوام، بتنی است که شکل اولیه، کیفیت و قابلیت سرویس‌دهی خود را در شرایط محیطش حفظ کند.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.5.9]

۶-۱- واکنش سیلیس – قلیا

انبساط و ترک خوردگی‌ای که منجر به کاهش مقاومت و دوام بتن می‌شوند، می‌توانند به علت واکنش‌های شیمیایی بین یون‌های قلیایی ناشی از سیمان پرتلند و مواد سیلیسی سنگدانه بوجود آیند، که این پدیده را واکنش سیلیس – قلیا می‌گویند. Ramlochan و همکارانش (۲۰۰۰) کارائی متاکائولن را در جلوگیری از واکنش سیلیس- قلیا برای کنترل انبساط زیان‌آور ارزیابی کردند. انبساط بتن‌های حاوی ۰ تا ۲۰ درصد متاکائولن بعنوان جایگزین جزئی سیمان پرتلند تعیین گردید. آزمایش‌ها تا مدت ۲ سال ادامه پیدا کردند. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که[۲۱]:

۱- وارد ساختن ۱۰ تا ۱۵ درصد متاکائولن بعنوان جایگزین سیمان می‌تواند برای کنترل انبساط زیان‌آور در اثر واکنش سیلیس- قلیا در بتن بسته به طبیعت مصالح بکار رفته کافی باشد.

۲- میزان متاکائولن مورد نیاز برای کنترل انبساط در مقادیر زیر ۰/۰۴ درصد بمدت ۲ سال بسته به نوع مصالح بین ۱۰ تا ۱۵ درصد بدست آمد.

مکانیزمی که متاکائولن می‌تواند انبساط را بخاطر واکنش سیلیس- قلیا کنترل کند شامل حبس مواد قلیایی بوسیله هیدرات‌های اضافی، کاهش در pH محلول و همچنین کم کردن میزان CH و کاهش نسبت CH/SiO_2 بوده و لذا از تشکیل ژل باد کننده جلوگیری به عمل می‌آید.

۶-۲-اثر متاکائولن روی نفوذ کلرید در بتن

Poon و همکارانش (۲۰۰۶) نفوذپذیری کلرید در مخلوط‌های بتنی حاوی متاکائولن و میکروسیلیس را در نسبت آب به چسب ۰/۳ و ۰/۵ بدست آوردند. دو سری مخلوط بتنی در نسبت‌های آب/چسب از ۰/۳ و ۰/۵ تهیه شدند و هر سری شامل سه مخلوط MK با ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد و دو مخلوط میکروسیلیس با ۵ و ۱۰ درصد بود و یک نمونه کنترلی بدون هیچگونه افزودنی معدنی وجود داشت. نفوذپذیری کلریدی بتن نیز با استفاده از دستورالعمل ASTMC1202 صورت گرفت. آزمایش نفوذپذیری کلریدی تا ۹۰ روز ادامه یافت و نتایج آن در جدول ۱۱ آورده شده است. آنها نتیجه‌گیری کردند که[۲۲]:

جدول ۱۱- نفوذپذیری کلرید بتن حاوی متاکائولن و میکروسیلیس[۲۲]

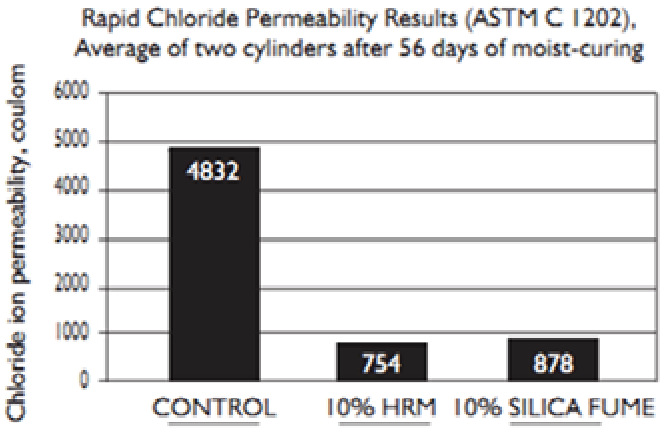
w/b	آمیز، ٪	بار عبوری کل، Coulombs			
		۳روز	۷ روز	۲۸روز	۹۰روز
۰/۳۰	کنترل	۲۴۶۱	۲۱۵۱	۱۰۳۵	۹۳۱
	5MK	۱۳۲۷	۱۲۴۴	۸۶۲	۶۴۶
	10MK	۴۱۷	۳۴۷	۱۹۹	۱۳۵
	20MK	۴۰۶	۳۹۵	۲۴۰	۱۲۴
	5SF	۱۰۶۰	۹۴۵	۶۶۵	۴۲۶
	10SF	۵۶۷	۴۴۵	۳۶۰	۳۳۶
۰/۵۰	کنترل	۵۳۱۲	۴۰۵۴	۲۹۷۱	۲۷۸۹
	5MK	۴۲۱۵	۳۷۶۵	۲۰۷۹	۱۰۶۵
	10MK	۱۵۸۰	۱۲۴۷	۹۱۸	۷۵۲
	20MK	۷۵۱	۷۴۰	۶۴۰	۵۸۰
	5SF	۳۱۵۶	۲۰۴۷	۱۶۴۱	۱۲۳۵
	10SF	۳۱۴۰	۱۸۷۷	۱۲۲۳	۱۰۵۳

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.5.9]

۱- هم بتن‌های متاکائولن و هم میکروسیلیس بار مجموع (Total Charge) کمتری را نسبت به نمونه کنترلی از خود عبور دادند. در نسبت آب/ چسب۰/۳، بتن با ۱۰ درصد جایگزینی MK بهترین عملکرد را داشت در حالیکه وقتی این نسبت به ۰/۵ می‌رسید با ۲۰ درصد جایگزینی عملکرد بهتری داشت. جایگزینی ۱۰ درصد MK باعث بار مجموع عبوری کمتری نسبت به ۱۰ درصد جایگزینی با میکروسیلیس شده است.

۲- در نسبت بالاتر آب/چسبو درصد جایگزینی بیشتر، استفاده از MK موثرتر از میکروسیلیس برای بهبود مقاومت بتن‌ها در برابر نفوذ یون کلرید است. در شکل ۱۳ اثر متاکائولن روی نفوذپذیری یون کلرید آمده است. نتایج نشان می‌دهند که متاکائولن سرعت نفوذ یون کلریدی را از طریق زمینه سیمان هیدراته کاهش می‌دهد و همچنین مقاومت ناحیه فصل مشترک را در مقابل نفوذ کلرید بهبود می‌دهد.



شکل ۱۲- اثر متاکائولن روی نفوذپذیری یون کلرید

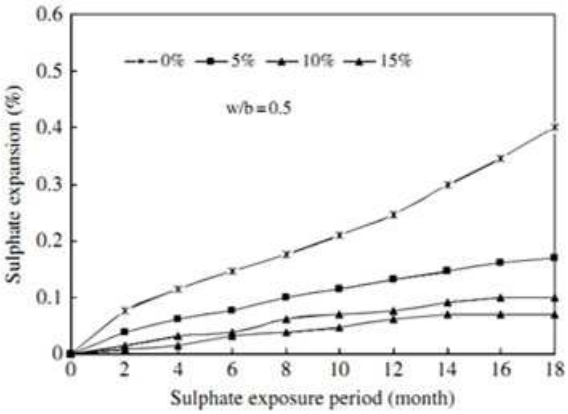
۶-۳- اثر متاکائولن روی مقاومت سولفات در بتن

حمله سولفات یکی از خشن و مهاجم‌ترین تخریب محیطی است که دوام بلند مدت سازه‌های بتنی را تهدید می‌کند. حمله سولفات روی بسیاری از سازه‌های مهندسی عمران که در معرض محیط‌های سولفات مثل اسکله‌ها، پل‌ها، فونداسیون‌ها، لوله‌های بتنی و غیره قرار دارند اتفاق می‌افتد و باعث انبساط بتن و ترک خوردگی و غیره می‌شود. حمله سولفات‌ها معمولاً به واکنش‌های یون‌های سولفات با هیدروکسید کلسیم و هیدرات آلومینات کلسیم برای تشکیل سنگ گچ واترینگایت (ettringite) نسبت داده می‌شود. سنگ گچ واترینگیت شکل گرفته در نتیجه حمله سولفات‌ها به مراتب حجیم‌تر از واکنش دهنده‌های اولیه است. تشکیل گچ واترینگایت موجب انبساط، ترک خوردگی، تخریب و شکست سازه‌های بتنی می‌شود.

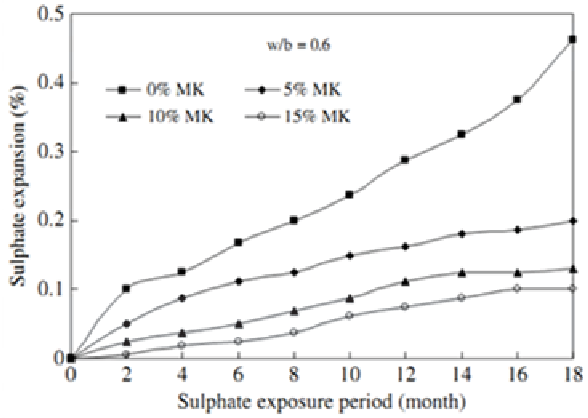
Al-Akhras (۲۰۰۶) اثر متاکائولن بر دوام بتن در معرض حمله سولفات را مورد تحقیق قرار داد. درجه حمله سولفاته با اندازه‌گیری انبساط منشورهای بتنی ارزیابی شد. اندازه‌گیری حمله سولفات با غوطه‌وری نمونه‌های بتنی در مخزن آبی حاوی ۵ درصد سولفات سدیم برای یک دوره ۱۸ ماهه انجام گرفت. اثر سطح جایگزینی متاکائولن بر تغییرات انبساط ناشی از در معرض‌گذاری سولفات در شکل‌های ۱۴ و ۱۵نمایش داده شده است. ایشان نتیجه گرفتند که مقاومت بتن MK بیشتر از بتن معمولی بود و مقاومت سولفاته با افزایش سطوح جایگزین MK افزایش یافت. بتن ۱۰ و ۱۵ درصد متاکائولن در هر دوی نسبت‌های آب/چسبدارای دوام عالی در برابر حمله سولفاته از خود نشان دادند. بتن حاوی ۵ درصد MK دوام متوسطی در برابر حمله سولفاته از خود نشان داد. افزایش مقاومت سولفاته بتن حاوی متاکائولن را می‌توان با مکانیزهای زیر توضیح داد. نخست، جایگزینی بخشی از سیمان پرتلند باMK موجب کاهش میزان کل هیدرات آلومینات تری کلسیم از خمیر سیمانی زمینه بتن می‌شود. دومین مکانیزم از طریق واکنش پوزولانی بتن MK و هیدرواکسید کلسیم آزاد شده طی هیدراسیون سیمان می‌باشد که بخشی از هیدروکسید کلسیم را به مصرف می‌رساند. بنابراین مقدار گچ انبساط یافته حاصل از واکنش هیدروکسید کلسیم در بتن MK نسبت به بتن معمولی کمتر خواهد شد. بعلاوه تشکیل C-S-H ثانویه از واکنش پوزولانی اگرچه تراکم کمتری نسبت به ژل C-S-H اولیه دارد ولی با پرکردن و ناپیوسته کردن حفرات از طریق اصلاح اندازه تخلخل موجب کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.5.9]

علاوه بر واکنش پوزولانی، اثر پرکنندگی MK بخاطر اندازه ذرات ریز آن در مقایسه با سیمان، تراکم ساختار بیشتری ایجاد می‌کند و مقاومت بتن را در برابر حمله سولفات‌ها افزایش می‌دهد[۲۳].



شکل ۱۳- اثر متاکائولن روی تغییرات انبساط ناشی از حمله سولفاته (نسب آب/چسب ۰/۵) [۲۳]



شکل ۱۴- اثر متاکائولن روی تغییرات انبساط ناشی از حمله سولفاته (نسب آب/چسب ۰/۶) [۲۳]

۷- نتیجه‌گیری

- استفاده از متاکائولن در بتن توجه زیادی بخاطر الزامات زیست محیطی و ساخت و ساز پایدار در آینده به خود جلب کرده است.
- متاکائولن یک ماده پوزولانی است که از کلسینه‌شدن کائولن در دمای ۶۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس با توجه به نوع کائولن بدست می‌آید. حرارت دادن آب شیمیایی کائولن را خارج کرده، ساختار کریستالی آن را از بین برده و محصول تبدیل به یک سیلیکات آلومینیوم آمورف می‌شود.
- متاکائولن به بهبود خواص مکانیکی در زمان‌های کوتاه و بلند مدت بتن کمک می‌کند و باعث اصلاح ساختار تخلخل و توزیع اندازه ذرات بتن شده و در نتیجه بطور قابل ملاحظه‌ای نفوذپذیری را در مقابلیون‌های مضر از قبیل یون کلرید کاهش می‌دهد.
- متاکائولن باعث کاهش چشم‌گیر انبساط ناشی از حمله سولفات‌ها به زیر ۰/۱ درصد در بتن شده و موجب دوام بلند مدت بتن می‌گردد.
- جایگزینی جزئی متاکائولن با سیمان موجب کنترل قابل قبول انبساط زیان‌بار ناشی از واکنش سیلیس- قلیا در بتن می‌گردد.

مراجع

[1] Rafat Siddique, Juvas Klaus," Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review", Applied Clay Science 2009, 43, 392–400.
[2] Rafat sedigh, "Waste Materials and By-Products in Concrete" , 2008, pp 41-92.
[3] Ellis M. Gartner,Donald E. Macphee, "A physico-chemical basis for novel cementitious binders", Cement and Concrete Research, 2011, 41 736–749.
[4] B. Sabir, S. Wild, J Bai, "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review", Cemenet and concrete Composites 23, 2001, 441-454.
[5] Kostuch, J.A., Walters, G, V., Jones, T. R.: High performance concrete incorporating metakaolin- a review, pp. 1799–1811. Concrete 2000.
[6] Oriol, M., Pera, J.: Pozzolanic activity of metakaolin under microwave treatment. Cem.Concr. Res. 25(2), 265–270 (1995).
[7] Rojas MF, Cabrera J, " The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin–lime–water systems", Cement and Concrete Research 32, 2002, 133-138.
[8] Poon CS, Lam L, Kou SC, Wong YL, Wong R, "Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes", Cement and Concrete Research 31, 2001, 1301–1306.
[9] Frıas M, Sanchez de Rojas MI, Cabrera J , "The effect that the pozzolanic reaction of metakaolin has on the heat evolution in metakaolin-cement mortars", Cement and Concrete Research 30, 2000, 209–216.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.5.9]

[10] Said Kenai ,Mohamed Said-Mansour, Mohamed Ghric, Rachid Bennaceur, , El-Hadj Kadri, “Influence of calcined kaolin on mortar properties”, Construction and Building Materials 25, 2011, 2275–228.
[11] Shvarzman A, Kovler K, Grader GS, Shter GE, “ The effect of dehydroxylation/ amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite”, Cement and Concrete Research 33, 2003, 405–416.
[12] C. Vizcayno, R. Castello, E. Rodriguez, C.E. Guerrero , R.M. de Gutiérrez , “Pozzolan obtained by mechanochemical and thermal treatments of kaolin”, Applied Clay Science 49 2010, 405–413.
[13] Florence Sanchez, Konstantin Sobolev, “Nanotechnology in concrete – A review”, Construction and Building Materials 24, 2010, 2060–2071.
[14] Brooks JJ, Johari MMA , “Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete”, Cement & Concrete Composites 23, 2001, 495–502.
[15] Khatib JM, Wild S, “Pore size distribution of metakaolin paste” Cement and Concrete Research 26, 1996, 1545–1553.
[16] Poon CS, Kou SC, Lam L, “Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete”, Construction and Building Materials 20, 2006, 619-623.
[17] Clay RM, Khatib JM, “Absorption characteristics of metakaolin concrete”, Cement and Concrete Research. 34, 2004, 19–29.
[18] Brooks JJ, Johari M, “Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete”, Cement and Concrete Composites 23, 2001, 495–502.
[19] Qian X, Li Z , “The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin”, Cement and Concrete Research 31, 2001, 1607–1611.
[20] Asbridgeo AH, Page CL, Page MM “Effects of metakaolin, water/binder ratio and interfacial transition zones on the micro hardness of cement mortars” , Cement and Concrete Research 32, 2002, 1335-1369.
[21] Ramlochan T, Thomas M, Gruber KA ,”The effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete”, Cement and Concrete Research 30, 339–344.
[22] Poon CS, Kou SC, Lam L, “Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete”, Construction and Building Materials 20, 2006, 858-865.
[23] Al-Akhras NM, “Durability of metakaolin to sulfate attack”, Cement and Concrete Research 39, 2006, 1727-1734.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.5.9]