

بررسی نقش متاکائولین در افزایش مقاومت بتن

اکرم ذوالفقاری

کارشناس مهندسی عمران - سمنان - بلوار ۱۷ شهرپور - خیابان شهید منتظری - منتظری ۵ - پلاک ۱۱۲

Email: ak_zolfaghari@yahoo.com

خلاصه

بتن، رایج ترین ماده ایست که در صنعت ساختمان بکار می رود. در سالهای اخیر و به منظور بهبود خواص بتن از جمله: دوام، کارایی و مقاومت در برابر عوامل محیطی و آتش، تحقیقات متعددی انجام شده است. علاوه بر دگرگونی و تحول در مواد تشکیل دهنده بتن، افزودن مواد دیگری به بتن همچون افزودنیهای مختلف، انواع الیافها و حتی مواد افزودنی که ارزش خاصی نداشته و باعث آلودگی محیط زیست نیز می شوند، موجب پیدایش بتن های جدید با خواصی نو و بهبود یافته شده است. مانند نگرانیهای زیست محیطی در خصوص استخراج مواد خام و انتشار CO2 حین تولید سیمان، که ما را بر آن می دارد تا به کاهش سیمان مصرفی با افزودن مواد افزودنی روی آوریم. موادی با خاصیت سیمانی شناخته شده با نام پوزولان، بعنوان یکی از اجزاء اصلی بتن همراه با سیمان پرتلند مورد استفاده قرار می گیرند. متاکائولین یکی از فرآورده های رسی است که پس از شناسایی، در سالهای اخیر توسعه یافته است. متاکائولین یک پوزولان بسیار فعال با سطح ویژه زیاد است و به همین دلیل می تواند به عنوان جزئی از مواد تشکیل دهنده سیمان بعنوان یک ماده چسباننده، جایگزین بخشی از حجم سیمان گردد. در این مقاله به مواردی چون درصد بهینه جایگزینی متاکائولین و دمای بهینه تکلیس و همچنین مقایسه نتایج جایگزینی پوزولان هایی چون، متاکائولین، سرباره و دوده سیلیسی در بتن پرداخته شده است.

لغات کلیدی: متاکائولین ، تکلیس ، سرباره ، دوده سیلیسی ، پوزولان

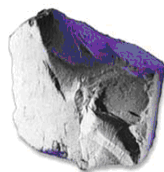
مقدمه

سالهای زیادی است که از بتن بعنوان یک ماده ساختمانی مهم و با مقاومت فشاری بالا جهت ساخت و ساز انواع سازه ها استفاده می شود. بتن مخلوطی از دو جزء اصلی مصالح ریزدانه و خمیر چسباننده می باشد. خمیر چسباننده معمولاً شامل سیمان پرتلند و آب است که دانه های ریز و درشت بتن را به هم می چسباند. مخلوط معمولی بتن شامل ۱۵-۱۰٪ سیمان، ۷۵-۶۰٪ سنگدانه، ۲۰-۱۰٪ آب و ۸-۵٪ هواست. در سالهای اخیر، تحقیقات و اصلاحات متعددی به منظور بهبود خواص بتن انجام شده و همچنین به منظور دستیابی به بتنی با مقاومت و پایایی بیشتر، ادامه دارد. نگرانیهای زیست محیطی در خصوص استخراج مواد خام و انتشار CO2 حین تولید سیمان، ما را وادار به کاهش سیمان مصرفی با افزودن مواد افزودنی می نماید. متاکائولین، بواسطه تکلیس کائولین خالص (رس معدنی) طی عملیات حرارتی کنترل شده ای در درجه حرارت ۸۰۰-۶۵۰ درجه سانتیگراد بدست می آید. این حرارت، آب شیمیایی کائولین را خارج نموده و ساختار کریستالی آن را از بین می برد و محصول به سیلیکات آلومینیوم آمورف (A2S) تبدیل می گردد. متاکائولین یک پوزولان بسیار فعال با سطح ویژه زیاد است و به همین دلیل می تواند به عنوان جزئی از مواد تشکیل دهنده سیمان بعنوان یک ماده چسباننده، جایگزین بخشی از حجم سیمان گردد. وقتی متاکائولین در بتن استفاده می شود طی واکنش پوزولانی با آهک هیدراته، تبدیل به سیلیکات کلسیم هیدراته می گردد. استفاده از متاکائولین به عنوان ماده جایگزین بخشی از سیمان در ملات و بتن در سالهای اخیر بطور گسترده ای مورد مطالعه قرار گرفته و اخیراً این موضوع، کلیه کانیهای سیلیسی-آلومینی را که دارای ذرات بسیار ریزی هستند در بر می گیرد که در کنار آب با هیدروکسید کلسیم واکنش داده و محصول، ترکیبی با خواص سیمانی می باشد اما با این وجود، هنوز ناشناخته های زیادی در خصوص استفاده از متاکائولین وجود دارد.

ذرات متاکائولین تقریباً ۱۰ برابر کوچکتر از ذرات سیمان هستند که کاربرد آنها در بتن، منجر به چگالتر شدن بتن و نفوذناپذیرتر شدن بتن در برابر آب می شود. استفاده از متاکائولین، مقاومت و پایایی بتن را در برابر حمله های شیمیایی، سولفاتها و انبساط ASR و سیکل های یخ زدن و آب شدن افزایش می دهد. متاکائولین همچنین در بهبود برخی از خواص مکانیکی بتن شامل مقاومت فشاری، خواص کوتاه مدت و مقاومت خمشی موثر است. در این مقاله، عمده مطالعات بر روی تاثیر مقادیر مختلف متاکائولین در مقاومت بتن، متمرکز می باشد زیرا مقاومت، مهمترین مشخصه بتن است و در طراحی سازه، اولین توجه، به عناصر سازه ایست که بایستی توانایی تحمل و انتقال بارهای وارده را داشته باشند.

کائولین

قرنها پیش، از این ماده برای سرامیک سازی استفاده می شده است. در شکل ۱، نمونه ای از کائولین نشان داده شده است.



شکل ۱- کائولین

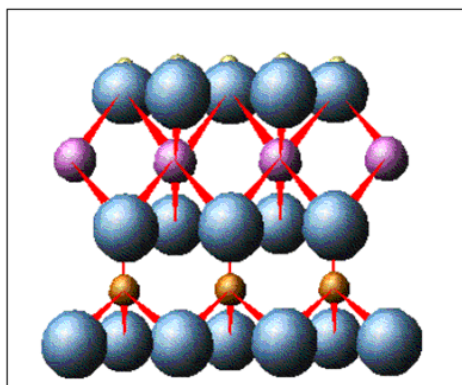
اجزای اصلی تشکیل دهنده کائولینیت، سیلیکات آلومینوم آبدار با ترکیب تقریبی $2\text{H}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ می باشد. کائولینیت، کانی رسی است که از مواد خام شکل پذیر بدست می آید و سپس طی گرمایش تبدیل به یک ماده پایدار می گردد. از لحاظ ساختاری، کائولینیت شامل صفحات هشت وجهی آلومین و صفحات چهار وجهی سیلیس می باشد که به طور یک در میان قرار گرفته اند. نحوه قرارگیری اتمها در گروه کائولینیت در شکل ۲ نشان داده شده است. اصلی ترین اجزای شیمیایی کائولین، سیلیس SiO_2 و آلومین Al_2O_3 است که بیش از ۷۰٪ جرم کائولین را تشکیل می دهند. سیلیس و آلومین اجزاء اصلی رس هستند.

۱- خواص فیزیکی و شیمیایی کائولین

کائولین معمولاً سفید، بی رنگ یا متمایل به سبز یا زرد رنگ است و وزن مخصوص آن ۲/۶ می باشد.

۲- اندازه ذرات

اندازه ذرات کائولین بین ۱/۵-۰/۲ میکرون متغیر و با سطح ویژه ۲۹۰۰۰-۱۰۰۰۰ m^2/kg می باشد.



شکل ۲- ساختار کائولینیت

تکلیس

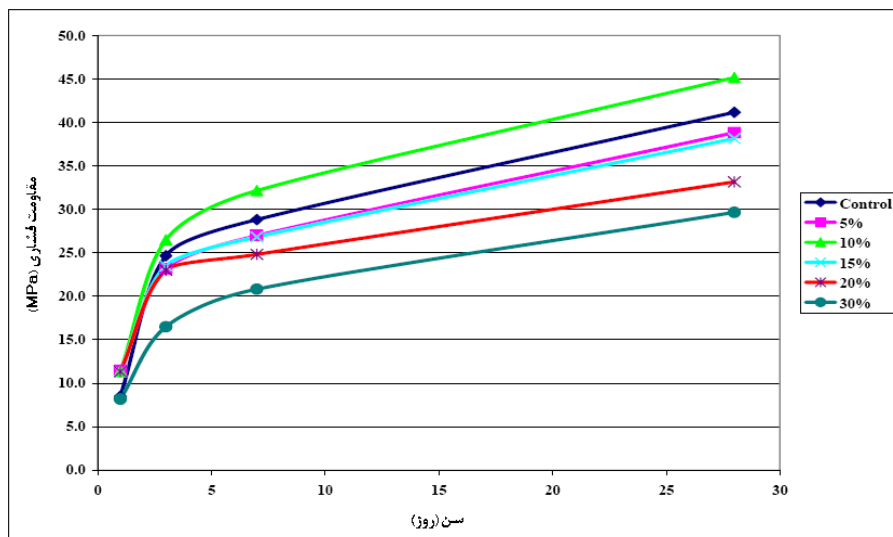
کائولینیت در دمای معمولی، به شکل کریستالی (بلوری) پایدار وجود دارد و با هیدروکسید کلسیم به منظور تولید مواد سیمانی، واکنش نمی دهد. به منظور تبدیل کائولین به یک پوزولان فعال، باید تحت عملیات حرارتی قرار گیرد که این فرآیند تکلیس نام دارد. احتراق یا کلسینه کردن کائولین، بر واکنش پذیری پوزولانی محصول بدست آمده تاثیر گذار است. حرارت، ابتدا آب جذب شده را از بین می برد. با افزایش درجه حرارت، آب بین لایه ای و آب ترکیبی از بین می رود. واکنش پذیری پوزولانی کلسینه شده، به از بین رفتن آب ساختاری لایه کائولینیت بلوری مربوط می شود که به تولید محصولی آمورف یا نیمه آمورف با مساحت ظاهری زیاد و واکنش پذیری شیمیایی زیاد منجر می گردد.

این موضوع نشان می دهد که طی عمل تکلیس، کائولینیت، آب شبکه (OH) خود را از دست می دهد و ساختار کائولینیت فرو می ریزد. کائولینیت فروپاشی شده تمایل به دوباره چیدن ساختار زنجیری خود دارد. این زنجیرها متاکائولینیت نام دارند. دمای تکلیس مورد نیاز به

ماهیت و نوع کانی رسی و انرژی حرارتی لازم برای آزادسازی یونهای هیدروکسیل بستگی دارد. همچنین خرد کردن، به منظور شکستن ذرات متراکم و افزایش سطح بیشتر برای واکنش، سودمند است. Ambroise و همکاران در سال ۱۹۸۵ تاثیر دمای تکلیس کائولینیت (۶۰۰-۸۰۰) درجه سانتیگراد) را بر افزایش مقاومت بتن تعیین نمودند. برای رسیدن به حداکثر مقاومت نمونه های ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، دمای بهینه تکلیس ۷۰۰ درجه سانتیگراد بود. آنها نشان دادند که دمای تکلیس کمتر از ۷۰۰ درجه سانتیگراد به دستیابی به متاکائولینیت با فعالیت کمتر و استفاده از کائولینیت رسوبی بیشتر منجر می گردد. در دمای بالاتر از ۸۵۰ درجه، تبلور رخ می دهد و واکنش پذیری کاهش می یابد.

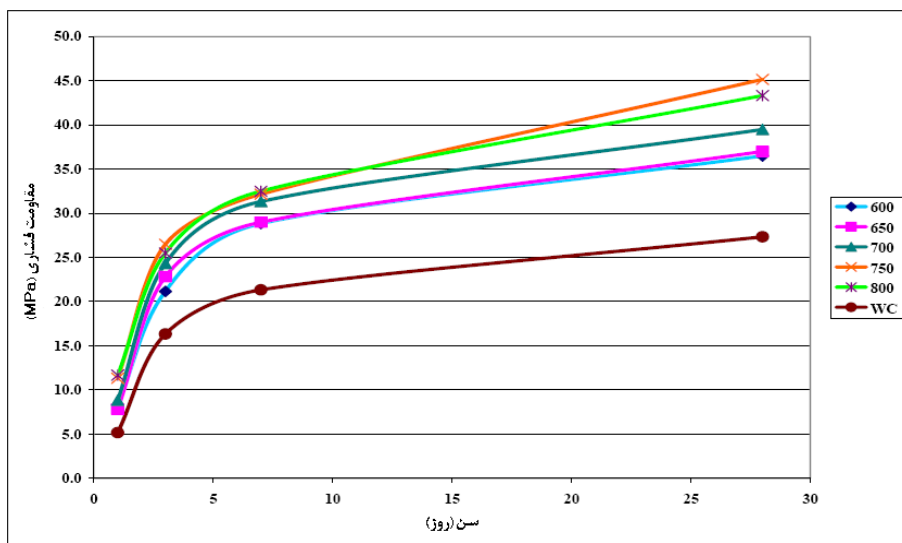
متاکائولین

متاکائولین که رس "کلسینه شده" نامیده می شود، یک پوزولان سیلیکات آلومینیوم فعال است که بر اثر حرارت کائولینیت در رژیم دمایی مشخصی بدست می آید. ترکیب شیمیایی کائولینیت به صورت $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ است که در اثر عملیات حرارتی در محدوده $400-500^\circ C$ ، آب آن بیرون رانده می شود تا سیلیکات آلومینیوم آمورف که متاکائولین نام دارد، بدست آید. محدوده حرارتی به ویژگیهای کائولین (کائولینیت با مقداری ناخالصی) از قبیل درجه تبلور و اندازه ذرات بستگی دارد. متاکائولین رفتار پوزولانی دارد و می تواند با هیدروکسید کلسیم واکنش دهد و محصول مرکب آبدار سیلیکات کلسیم و آلومینیات کلسیم بدست آید. بعنوان ترکیبی جدید برای تولید بتن با کارایی بالا، با جایگزینی متاکائولین بجای بخشی از سیمان مخلوط، می توان بتنی با مقاومت فشاری بتن ۱۱۰ مگاپاسکال بالاتر، تولید کرد. آزمایشها نشان داد که با استفاده از متاکائولین به مقدار ۵٪ تا ۱۰٪ جرمی، بتنی به دست می آید که با خواص و کارایی بتن تولید شده با دوده سیلیسی از نظر افزایش مقاومت و نفوذ یون کلرید و انقباض و مقاومت در برابر درجات و سیکل های یخ زدن-آب شدن، برابری می کند. برای دستیابی به اهداف تعیین شده، ابتدا دمای تکلیس تعیین گردید و کائولین کلسینه طبق نسبتهای تعیین شده، در طرح اختلاط بتن استفاده گردید و بر روی نمونه های مکعبی بتن، تست مقاومت انجام شد و در آخر، به منظور نتیجه گیری، بر روی نتایج به دست آمده آنالیز انجام شد. نمودار مربوط به آزمایش های تعیین مقاومت فشاری نمونه های مکعبی بتنی با درصدهای مختلف (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰٪) جایگزینی متاکائولین در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- مقایسه مقاومت فشاری نمونه های بتنی با جایگزینی مقادیر متقاومت متاکائولین

شکل ۴، مقایسه مقاومت نمونه های بتنی ساخته شده با جایگزینی ۱۰٪ متاکائولین کلسینه شده در دماهای مختلف (۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد) را نشان می دهد.



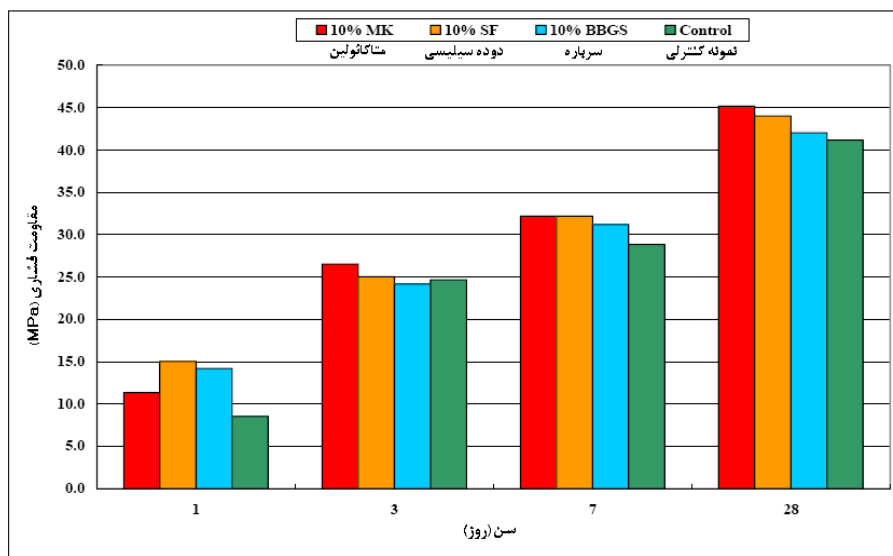
شکل ۴- مقایسه مقاومت نمونه های بتنی حاوی ۱۰٪ متاکائولین تکلیس شده در دماهای مختلف

مقایسه متاکائولین با سایر پوزولانها در مقاومت بتن

نتایج آزمایش مقایسه ای بر روی سه نمونه در جدول زیر آمده است. در روز اول، بتن حاوی دوده سیلیسی و سرپاره، نسبت به بتن متاکائولینی مقاومت بیشتری از خود نشان دادند. همانطور که در جدول نشان داده شده است مقاومت متوسط بتن حاوی دوده سیلیسی و سرپاره به ترتیب ۱۵ و ۱۴/۲ مگاپاسکال است در صورتیکه برای بتن متاکائولینی این مقدار ۱۱/۳ می باشد. اما در روزهای بعدی، شرایط تغییر کرده و مقاومت بتن متاکائولینی در روزهای ۷، ۲۸ و ۲۸ در مقایسه با بتن حاوی دوده سیلیسی و سرپاره، بیشتر است. شکل ۵، نمودار میله ای مقایسه مقاومت نمونه های بتنی ساخته شده از مواد مختلف (متاکائولین MK و دوده سیلیسی SF و سرپاره BBGS) را در سنین ۱ تا ۲۸ روز، نشان می دهد.

جدول ۵-۱- مقاومت فشاری نمونه های پیش ساخته با جایگزینی ۱۰٪ (MK-SF-BBGS)

ترکیب	دمای تکلیس (°C)	سن (روز)	مقاومت فشاری (MPa)			
			نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	میانگین
10% MK	750	1	11.0	11.5	11.5	11.3
		3	26.5	27.0	26.0	26.5
		7	32.5	32.0	32.0	32.2
		28	48.0	44.0	43.5	45.2
10% SF	-	1	15.0	16.0	14.0	15.0
		3	25.0	25.0	25.0	25.0
		7	32.5	33.0	31.0	32.2
		28	43.5	46.0	42.5	44.0
10% BBGS	-	1	13.5	14.0	15.0	14.2
		3	24.5	24.0	24.0	24.2
		7	31.5	31.0	31.0	31.2
		28	42.5	40.5	43.0	42.0



شکل ۵- مقایسه مقاومت فشاری نمونه ای با جایگزینی مقادیر یکسان متاکائولین (MK)، دوده سیلیسی (SF) و سربراره (BBS)

به طور کلی نتایج نشان می دهد، کارایی متاکائولین در بالا بردن مقاومت بتن با سایر پوزولانها قابل مقایسه است. در واقع، مقاومت فشاری بتن متاکائولینی در روزهای اول در مقایسه با سایر پوزولانها بیشتر است. دوده سیلیسی و متاکائولین در مقایسه با سربراره، دانه بندی ریزتری دارند و به این دلیل، مقاومت بتن آمیخته شده با آنها به سرعت افزایش می یابد. سطح ظاهری زیاد ذرات متاکائولین، باعث می شود تا سیلیس آمورف سریع تر از دوده سیلیسی فاسد شود و همین، دلیل واکنش پذیری بیشتر متاکائولین نسبت به دوده سیلیسی و سربراره است. Malhorta در سال ۱۹۹۵ دریافت که بیشترین سرعت افزایش مقاومت در سنین اولیه بتن مخصوصاً بین ۳ و ۱ روز می باشد و او این پدیده را به سرعت بالای جذب آب در بتن متاکائولینی نسبت داد. در بتن متاکائولینی، متاکائولین با واکنش سریع پوزولانی، در مقاومت کوتاه مدت بتن شرکت می کند.

نتایج

از این تحقیق، می توان نتایج زیر را بدست آورد:

- I. جایگزینی ۱۰ درصد متاکائولین، بهترین جایگزینی است که مقاومت فشاری بتن را در تمامی سنین، افزایش می دهد.
- II. چنانچه دمای تکلیس به دمای بهینه نزدیک باشد، بتن متاکائولینی بهتر عمل خواهد کرد. دمای بهینه تکلیس، ۷۵۰ درجه سانتیگراد تعیین شد.
- III. چنانچه درصدهای جایگزینی متاکائولین بیشتر از درصد بهینه گردد، از تاثیر دمای تکلیس بر عملکرد مقاومتی کاسته می شود.
- IV. در مقایسه با دوده سیلیسی و سربراره، متاکائولین پوزولان موثرتری در بالا بردن مقاومت بتن می باشد.
- V. در حال حاضر، متاکائولین و حتی کائولین، گرانتز از سیمان پرتلند و همچنین دوده سیلیسی است، اما فرآیند آن در دمای نسبتاً پایین انجام می شود. برای مطالعه روی کارایی و عملکرد بتن متاکائولینی به ویژه از نظر پایایی، می بایست تحقیقات بیشتری صورت گیرد. یافته های بیشتر در زمینه مزایای متاکائولین در ملات و بتن، منجر به افزایش تقاضا می گردد و به ناچار قیمت آن کاهش می یابد.

مراجع

1. ONG CHEE HUAT, NOVEMBER, (2006), PERFORMANCE OF CONCRETE CONTAINING METAKAOLIN AS CEMENT REPLACEMENT MATERIAL
2. Ambroise, J., Murat, M. and Pera J. (1985), Hydration Reaction and Hardening of Calcined Clays and Related Minerals: V. Extension of the Research and General Conclusions. Cement Concrete Res. 15, pp. 261–268.
3. Changling, He (1994). Thermal Stability and Pozzolanic Activity of Calcined Kaolin, Applied Clay Science.
4. Dunster, A.M., Parsonage, J.R. and Thomas, M.J.K. (1999). Pozzolanic Reaction of Metakaolinite and Its Effects on Portland Cement Hydration. J. Mater. Sci: 1345–1350

5. Ambroise, J., Murat, M. and Pera J. (1985), Hydration Reaction and Hardening of Calcined Clays and Related Minerals: V. Extension of the Research and General Conclusions. *Cement Concrete Res.* 15, pp. 261–268.
6. Changling, He (1994). Thermal Stability and Pozzolanic Activity of Calcined Kaolin, *Applied Clay Science*.
7. Dunster, A.M., Parsonage, J.R. and Thomas, M.J.K. (1999). Pozzolanic Reaction of Metakaolinite and Its Effects on Portland Cement Hydration. *J. Mater. Sci:* 1345–1350
8. Malhotra, V.M. (1983). Fly Ash, Silica Fume, Slag, & Other Mineral By-product in Concrete, Publication SP-79, American Concrete Institute.
9. Malhotra, V.M. (1986). Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans In Concrete, Proceedings Second International Conference, Madrid, Spain.
10. Malhotra, V.M. (1995). Characteristics of A Thermally Activated Alumino-silicate Pozzolanic Material and Its Use in Concrete, *Cement Concrete Res* 25: 1713–1725
11. Marwan, T., Pera, J. and Ambroise J. (1992). The Action of Some Aggressive Solutions on Portland and Calcined Laterite Blended Cement Concretes. Proceedings of the Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, vol. I. Istanbul, Turkey.