

بتن های متاکائولنی با نسبت آب به مواد چسبنده کم

احسان رزاز^۱، پیام حسینی^۲، مجید دلکش^۲، عباس بوشهریان^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۲- دانشجوی مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف

p.hosseini@civil.sharif.edu

خلاصه

این مقاله عملکرد بتن های حاوی متاکائولن را که دارای نسبت آب به مواد چسبنده کمتر از ۰.۳ می باشند، بررسی می کند. سیمان پرتلند حدود ۲۰٪ با متاکائولن جایگزین شده است. تست های صورت گرفته شامل مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته دینامیکی و تغییر طول می باشد. نمونه ها در آب و در دمای ۲۰ نگهداری شدند. نتایج نشان می دهد عملکرد بتن های حاوی متاکائولن با نسبت آب به مواد چسبنده کم تفاوت چندانی با نسبت زیاد آب به مواد چسبنده که قبلا آزمایش گردیده، ندارد.

کلمات کلیدی: متاکائولن، نسبت آب به سیمان کم، ویژگی های مکانیکی

مقدمه

ناحیه انتقالی داخلی (ITZ) اثر قابل توجهی بر رفتار و ویژگی های بتن دارد. این ناحیه که به فضای بین سنگدانه ها و خمیر سیمان گفته می شود، در اصل به عنوان فاز سوم بتن در نظر گرفته می شود (۱). به طور کلی ITZ یک منطقه ضعیف است زیرا دارای ضریب تخلخل بیشتری نسبت به دو فاز دیگر یعنی سنگدانه ها و خمیر سیمان می باشد که تا حدی به دلیل افزایش نسبت آب به سیمان در میان این دو بخش می باشد [2]. عوامل متفاوتی وجود دارد که روی ویژگی های ITZ، از جمله افزایش نسبت آب به سیمان اثر می گذارد. ضخامت ITZ با افزایش نسبت آب به سیمان افزایش می یابد [3]. برای بهبود عملکرد ITZ تلاش هایی برای جایگزینی سیمان با ترکیبات معدنی از جمله خاکستر بادی و سرپاره انجام شده است [4]. جایگزینی بخشی از سیمان با مواد پوزولانی از جمله میکروسیلیس یا متاکائولن نقش مهمی را در متراکم کردن ITZ ایفا می کند، زیرا این اثر ریزپرکنندگی به دلیل وجود ذرات ریز پوزولان می باشد [5,6]. همچنین به دلیل این فعالیت زیاد پوزولانی، ویژگی های بتن از نظر مکانیکی و خصلت های ماندگاری، بهبود می یابد. با افزایش زمان عمل آوری به ۱۴ روز، مقاومت بتن حاوی متاکائولن رو به افزایش است و بعد از آن کاهش می یابد [7]. وقتی مقدار متاکائولن نسبت به وزن سیمان کمتر از ۲۰٪ می باشد، مقدار کل تخلخل خمیر سیمانی کاهش می یابد [8]. البته افزودن بیش از ۳۰٪ متاکائولن نیز باعث افزایش در تخلخل بتن می گردد. پس با جایگزینی متاکائولن به جای سیمان تا حدود کمتر از ۲۰٪، حجم تخلخل ملات و قطر سوراخ ها در آستانه کاهش قرار می گیرند [6]. وجود متاکائولن به هر حال سبب اصلاح سوراخ های ماتریس بتن می شود. وجود متاکائولن سبب کاهش کلسیم هیدروکسید ($Ca(OH)_2$) به ویژه در دوران ابتدایی هیدراسیون می شود [9-11]. مقاومت ضد سوفاتی ملات با افزایش متاکائولن افزایش می یابد [12]. همان طور که قبلا ذکر شد، ناحیه انتقالی تحت تاثیر نسبت آب به سیمان می باشد. بنابراین در این مقاله به بررسی تحقیقات انجام شده توسط محققین و خود نویسندگان این مقاله در مورد تاثیر نسبت آب به مواد چسبنده (سیمان و متاکائولن) کم (۰.۳) بر روی خواص بتن های متاکائولنی و مقایسه آن ها با بتن های متاکائولنی با نسبت آب به مواد چسبنده بالا، می پردازیم.

کار آزمایشگاهی

مصالح

مصالح به کار رفته شامل سیمان پرتلند معمولی، متاکائولن و شن و ماسه می باشد. فوق روان کننده مورد استفاده نیز سولفونات نفتالین با ۶۰٪ آب و چگالی

۱.۱۹ $\frac{gr}{cm^3}$ می باشد. ترکیبات سیمان پرتلند و متاکائولن در جدول ۱ داده شده است.

جدول ۱- ترکیبات و ویژگی‌های سیمان و متاکائولن

متاکائولن	سیمان پرتلند	
SiO_2	۲۰,۲	۵۲,۱
Al_2O_3	۴,۲	۴۱,۰
Fe_2O_3	۲	۴,۳۲
CaO	۶۳,۹	۰,۰۷
MgO	۲,۱	۰,۱۹
SO_3	۳	-
Na_2O	۰,۱۴	۰,۲۶
K_2O	۰,۶۸	۰,۶۳
افت ناشی از سرخ شدن (/)	۲,۸۱	۰,۶
مقدار آهک آزاد (/)	۲,۳۷	-
سطح ویژه (m^2/kg)	۳۶۷,۸	۱۲۰۰۰

نسبت اختلاط

از ۶ طرح اختلاط برای انجام تست‌های مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته دینامیکی استفاده شد. جزئیات طرح‌های اختلاط در جدول ۲ آورده شده است. طرح اختلاط کنترلی (M1) که شامل متاکائولن نمی‌باشد، دارای نسبت سیمان به درشتدانه به ریزدانه‌ی ۱:۲,۶:۱,۲۶ است. در طرح اختلاط‌های دیگر (M2-M6) به ترتیب ۵٪، ۷,۵٪، ۱۲,۵٪ و ۱۵٪ متاکائولن جایگزین سیمان شد و نسبت آب به مواد چسبنده در تمام اختلاط‌ها برابر ۰,۳ می‌باشد. مواد چسبنده شامل سیمان پرتلند و متاکائولن می‌باشد. مقدار فوق روان کننده نیز مقدار ثابت ۱,۲۶٪ نسبت به مواد چسبنده در نظر گرفته شد.

جدول ۲- جزئیات طرح‌های اختلاط

شماره طرح اختلاط	متاکائولن (/)	سیمان پرتلند	متاکائولن	آب	ریزدانه	درشتدانه	فوق روان کننده (/)
۱	۰	۴۸۲	۰	۱۴۵	۶۰۸	۱۲۵۴	۱,۳۶
۲	۵	۴۷۴	۲۴	۱۵۰	۶۲۹	۱۲۹۸	۱,۳۶
۳	۷,۵	۴۷۰	۳۶	۱۵۳	۶۴۱	۱۳۲۲	۱,۳۶
۴	۱۲,۵	۴۶۲	۶۰	۱۵۸	۶۶۵	۱۳۷۲	۱,۳۶
۵	۱۵	۴۵۷	۷۲	۱۶۱	۶۷۸	۱۳۹۸	۱,۳۶
۶	۲۰	۴۴۷	۹۶	۱۶۸	۷۰۵	۱۴۵۴	۱,۳۶

* مقادیر موجود در جدول بر حسب کیلوگرم در یک متر مکعب بتن می‌باشد.

بتن ریزی، عمل آوری و تست‌ها

برای هر اختلاط ۱۵ مکعب ۱۰۰ میلی متری و چهار مکعب مستطیل در ابعاد ۱۰۰*۱۰۰*۵۰۰ آماده شد. قبل از بتن ریزی، اسلامپ، عامل تراکم و تست وی بی برای تعیین میزان کارایی بررسی شدند. تمام نمونه‌ها در اتاقی در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و رطوبت ۹۵٪ برای مدت ۲۴ ساعت نگهداری می‌شوند و سپس بعد از این مدت، قالب‌ها باز می‌شوند. بعد از آن، تمام مکعب‌ها و ۲ تا از مکعب مستطیل‌ها در آب ۲۰ درجه قرار داده می‌شوند. دو مکعب مستطیل باقی مانده در معرض هوا باقی می‌مانند و در دمای ۲۰ درجه و رطوبت ۵۵٪ قرار می‌گیرند. مکعب‌ها برای تعیین مقاومت فشاری استفاده می‌شوند در حالیکه مکعب مستطیل‌ها برای تعیین مدول الاستیسیته دینامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تست‌ها برای عمل آوری‌های ۱، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۵۶ روزه صورت

گرفت. تست‌های مقاومت فشاری و تعیین مدول الاستیسیته دینامیکی به ترتیب طبق استانداردهای BS 1881-Part 116:1983, Part 77:1977 انجام شدند.

نتایج و بحث

کارایی

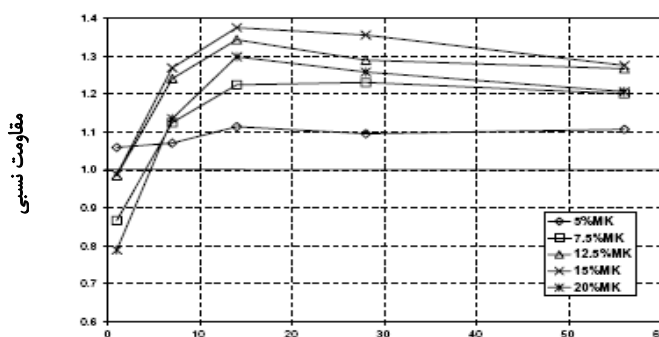
تمامی طرح‌ها (حتی طرح مینا) اسلامپ پایینی از خود نشان دادند. در مجموع تمامی اسلامپ‌ها کمتر از ۲۰ میلی‌متر بود. همچنین زمان وی‌بی و عامل تراکم به ترتیب بیشتر از ۲۴ ثانیه و کمتر از ۰,۸ بودند. نتایج تست‌های کارایی در جدول ۳ آورده شده است. بتن‌های حاوی متاکائولن با افت اسلامپ روبرو هستند [7] که از دلایل این امر می‌توان به سطح ویژه بالای متاکائولن نسبت به سیمان اشاره کرد. البته باید دقت کرد که این اسلامپ پایین در صورتی که بتوان با ایجاد شرایطی تراکم مناسب را ایجاد کرد، نمی‌تواند مانع از تراکم کامل بتن در قالب شود.

جدول ۳- کارایی مخلوط‌ها

شماره مخلوط	متاکائولن (%)	اسلامپ (میلی‌متر)	وی‌بی (ثانیه)	عامل تراکم
۱	۰	۱۷	۲۴	۰,۸۷
۲	۵	۱۲	۲۵	۰,۸۶
۳	۷,۵	۸	۲۷	۰,۸۳
۴	۱۲,۵	۳	۳۰	۰,۸۱
۵	۱۵	۲	۳۶	۰,۸۰
۶	۲۰	۰	۳۷	۰,۷۸

مقاومت فشاری

مقاومت فشاری نمونه‌های با عمل‌آوری مرطوب در روزه‌های عمل‌آوری گوناگون و چگالی متوسط هر اختلاط در جدول ۴ آورده شده است. به طور کلی چگالی با افزایش میزان متاکائولن، به مقدار اندکی افزایش می‌یابد که از دلایل این موضوع می‌توان به خاصیت پرکنندگی ذرات متاکائولن اشاره کرد. همانطور که انتظار داشتیم با افزایش روزه‌های عمل‌آوری مقاومت بتن‌ها افزایش می‌یابد. همچنین بعد از یک روز نیز با افزایش مقدار متاکائولن، مقاومت‌ها افزایش یافته است. تغییرات مقاومت نسبی بر حسب روزه‌های عمل‌آوری در نمودار ۱ نشان داده شده است. نسبت مقاومت به صورت نسبت مقاومت هر طرح اختلاط بر مقاومت طرح اختلاط کنترل در یک زمان عمل‌آوری خاص، بدست می‌آید.



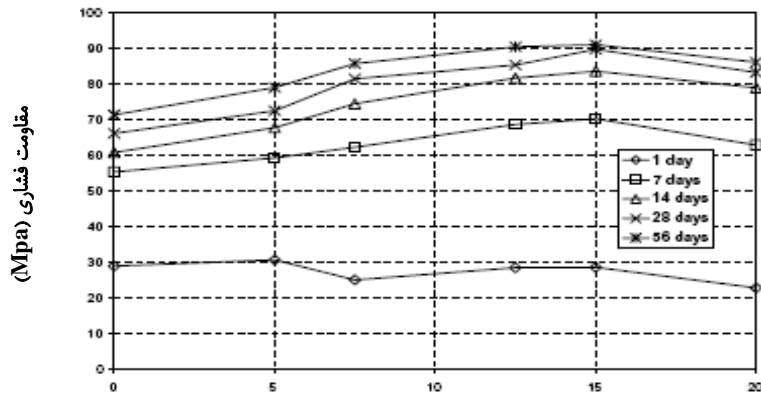
عمل‌آوری (روز)

شکل ۱- مقاومت نسبی فشاری نمونه‌ها بر حسب روزه‌های مختلف عمل‌آوری

در روز اول عمل‌آوری با جایگزینی سیمان با بیش از ۵٪ متاکائولن، کاهش در مقاومت نمونه‌ها نسبت به مقاومت طرح کنترل مشاهده می‌شود. یعنی نسبت مقاومت کمتر از یک می‌شود. گرچه در روز اول عمل‌آوری، بین طرح‌های دارای مقدار بیشتر از ۵٪ متاکائولن، در طرح دارای ۱۵٪ متاکائولن نسبت مقاومت

به بیشترین مقدار خود می‌رسد. علاوه بر این بیشترین سهم متاکائولن در ۱۴ روز عمل‌آوری مشاهده می‌شود که بیش از ۳۵٪ افزایش مقاومت بدست آمده است (بیشترین نسبت مقاومت که ۱،۳۵ است در ۱۴ روز عمل‌آوری بدست می‌آید). پس از ۱۴ روز مقدار نسبت مقاومت کاهش می‌یابد که این موضوع در تطابق با نتایج بدست آمده در مورد تغییرات در واکنش متاکائولن و هیدروکسید کلسیم ($Ca(OH)_2$) بعد از ۱۴ روزه عمل‌آوری می‌باشد [11]. مقدار بهینه متاکائولن در شکل ۲ مشخص شده است.

طبق شکل ۲ و نتایج بدست آمده، مقدار بهینه افزودن متاکائولن در حدود ۱۵٪ می‌باشد که تقریباً در حدود مقداری است (کمی کمتر از ۲۰٪) که در تحقیقات قبلی با نسبت آب به سیمان ۰،۴۵ انجام شده‌اند [6].

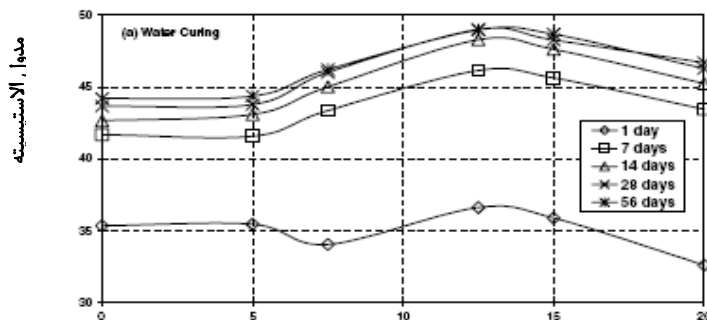


مقدار متاکائولن (%)

شکل ۲- تاثیر مقدار متاکائولن بر مقاومت فشاری

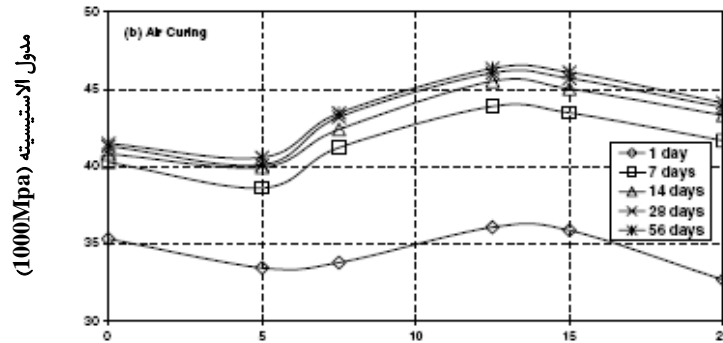
مدول الاستیسیته دینامیکی

مدول الاستیسیته برای نمونه‌های با عمل‌آوری مرطوب و در معرض هوا در شکل‌های ۳ الف و ب آورده شده است. با بررسی دو شکل متوجه می‌شویم که درصد بهینه برای بیشترین مدول الاستیسیته برای هر دو نوع عمل‌آوری تقریباً یکسان و مقداری بین ۱۲،۵٪ و ۱۵٪ می‌باشد. به جز نتایج بدست آمده برای روز اول عمل‌آوری، می‌توان گفت مدول الاستیسیته نمونه‌هایی که تحت عمل‌آوری مرطوب قرار گرفته‌اند بیشتر از نمونه‌هایی است که در معرض هوا عمل‌آوری شده‌اند.



مقدار متاکائولن (%)

شکل ۳ الف- تغییرات مدول الاستیسیته بر حسب مقدار متاکائولن برای عمل‌آوری مرطوب



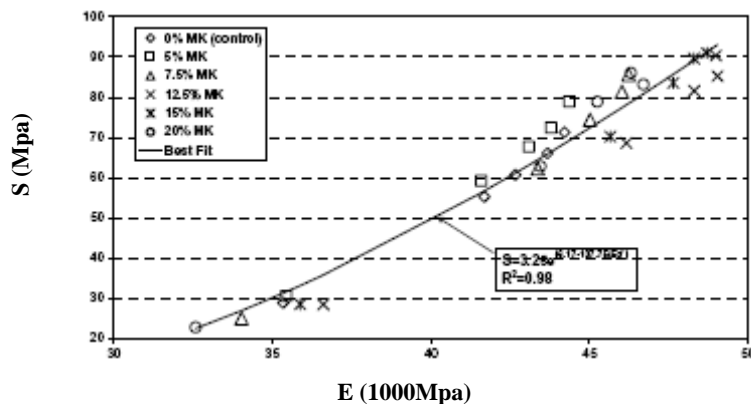
شکل ۳-ب- تغییرات مدول الاستیسیته بر حسب مقدار متاکائولن برای عمل آوری در معرض هوا

شکل ۳-ب- تغییرات مدول الاستیسیته بر حسب مقدار متاکائولن برای عمل آوری در معرض هوا

با توجه به رسم نمودار مقاومت فشاری بر حسب مدول الاستیسیته دینامیکی و رسم بهترین منحنی گذرنده از داده‌ها (شکل ۴)، منحنی رسم شده یک منحنی نمایی طبیعی می‌باشد که معادله آن در رابطه ۱ داده شده است، این نتیجه بدست آمده با نتایج تحقیقات قبلی مطابقت دارد [13,14].

$$S = ae^{(b - c/E_d)} \quad (1)$$

در رابطه بالا S نشان دهنده مقاومت فشاری، E_d مدول الاستیسیته دینامیکی و a ، b و c به ترتیب اعداد ثابت ۳،۲۵، ۱۷، ۶ و ۱۳۷،۵ می‌باشند.



شکل ۴- رابطه بین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته دینامیکی

نتیجه‌گیری

۱- در نسبت آب به مواد چسبنده ۰،۳ مقدار بهینه متاکائولن برای رسیدن به مقاومت بیشینه تقریباً برابر ۱۵٪ می‌باشد که این مقدار کمتر از مقدار بهینه بدست آمده برای نسبت آب به مواد چسبنده ۰،۴۵ می‌باشد.

۲- بیشترین اثر متاکائولن در ۱۴ روز عمل آوری بدست می‌آید که این نتیجه شبیه به نتیجه‌ای می‌باشد که در نسبت‌های بالای آب به مواد چسبنده بدست آمده است. از دلایل اینکه در ۱۴ روز از عمل آوری متاکائولن به بیشترین بازدهی خود می‌رسد می‌توان به تغییرات اساسی در واکنش بین متاکائولن و هیدروکسید کلسیم بعد از ۱۴ روز عمل آوری اشاره کرد.

منابع

(۱) رسولان، ایرج. (۱۳۸۵) بتن ماده سه فازه. سیزدهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی عمران، صفحه ۵۵۲.

- [2] Scriviner, K.L. and Nematı, K.M. (1996) *The percolation of pore space in the cement paste/aggregate interfacial zone of concrete*. Cem Concr Res. **26**. 35–40.
- [3] Elsharief, A., Cohen, M.D., Olek, J. (2003) *Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone*. Cem Concr Res. **33**. 1837–1849.
- [4] Kuroda, M., Watanabe, T., Terashi, N. (2000) *Increase of bond strength at interfacial transition zone by the use of fly ash*. Cem Concr Res. **30**. 253–258.
- [5] Asbridge, A.H., Page, C.L., Page, M.M. (2002) *Effects of metakaolin, water/ binder ratio and interfacial transition zones on the microhardness of cement mortars*. Cem Concr Res. **32**. 1365–1369.
- [6] Larbi, J.A. and Bijen, J.M. (1992) *Influence of pozzolans on the portland cement paste-aggregate interface in relation to diffusion of ions and water absorption in concrete*. Cem Concr Res. **22**. 551–562.
- [7] Wild, S., Khatib, J.M., Jones, A. (1996) *Relative strength pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised MK concrete*. Cem Concr Res. **26**. 1537–1544.
- [8] Bredy, P. Chabannet, M., Pera, J. (1989) *Microstructural and porosity of metakaolin blended cements*. Mat Res Soc Symp Proc. 137. 431–436.
- [9] Ambroise, J. Maxmilien, S. Pera, J. (1994) *Properties of MK blended cement*. Adv Cem Based Mats.**1**. 161–168.
- [10] De Silva, P.S. and Glasser, F.P. (1990) *Hydration of cements based on metakaolin: thermochemistry*. Adv Cem Res. **3**. 167–177.
- [11] Wild, S. Khatib, J.M. (1997) *Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars*. Cem Concr Res. **27**. 137–146.
- [12] Khatib, J.M. and Wild, S. (1998) *Sulfate resistance of metakaolin mortar*. Cem Concr Res. **28**. 120–132.
- [13] Khatib, J.M. (2005) *Properties of concrete containing fine recycled aggregates*. Cem Concr Res. **35**. 763-769.
- [14] Prassianakis, I.N. and Giokas, P. (2003) *Mechanical properties of old concrete using destructive and ultrasonic non-destructive testing methods*. Mag Concr Res. 55(2). 171–176.