بتن های متاکائولنی با نسبت آب به مواد چسبنده کم

احسان رزاز [1]، پیام حسینی [2]، مجید دلکش [2]، عباس بوشهریان [2]

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 می‌کند. سیمان پرتلند حدود ۲۰٪ با متاکائولن جایگزین شده است. تست‌های صورت گرفته شامل مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته دینامیکی و تغییر طول می باشد. نمونه‌ها در آب و در دمای ۲۰ نگهداری شدند. نتایج نشان می‌دهد 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، ویژگی‌های مکانیکی

مقدمه

ناحیه انتقالی داخلی (ITZ) اثر قابل توجهی بر رفتار و ویژگی‌های بتن دارد. این ناحیه که به فضای بین سنگدانه‌ها و خمیر سیمان گفته می‌شود، در اصل به عنوان فاز سوم بتن در نظر گرفته می‌شود(۱). به طور کلی ITZ یک منطقه ضعیف است زیرا دارای ضریب تخلخل بیشتری نسبت به دو فاز دیگر یعنی سنگدانه‌ها 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 ویژگی‌های ITZ، از جمله افزایش نسبت آب به سیمان اثر می‌گذارد. ضخامت ITZ با افزایش نسبت آب به سیمان افزایش می یابد[3]. برای بهبود عملکرد ITZ تلاش هائی برای جایگزینی سیمان با ترکیبات معدنی از جمله خاکستر بادی و سرباره انجام شده است [4]. جایگزینی بخشی از سیمان با مواد پوزولانی از جمله میکروسیلیس یا متاکائولن نقش مهمی را در متراکم کردن ITZ ایفا می‌کند، زیرا این اثر ریزپرکنندگی به دلیل وجود ذرات ریز پوزولان می‌باشد[5,6]. همچنین به دلیل این فعالیت زیاد پوزولانی، ویژگی‌های بتن از نظر مکانیکی و خصلت‌های 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 می‌یابد[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 می‌گردد. پس با جایگزینی متاکائولن به جای سیمان تا حدود کمتر از ۲۰٪، حجم تخلخل ملات و قطر سوراخ‌ها در آستانه کاهش قرار می‌گیرند[6]. وجود متاکائولن به هر حال سبب اصلاح سوراخ‌های ماتریس بتن می‌شود. وجود متاکائولن سبب کاهش کلسیم هیدروکسید ($Ca(OH)_2$) به ویژه در دوران ابتدائی هیدراسیون می شود[11-9]. مقاومت ضد سوافاتی ملات با افزایش متاکائولن افزایش می یابد[12]. همان طور که قبلا ذکر شد، ناحیه انتقالی تحت تاثیر نسبت آب به سیمان می‌باشد. 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 بتن‌های متاکائولنی و مقایسه آن‌ها با بتن‌های متاکائولنی با نسبت آب به مواد چسبنده بالا، می‌پردازیم.

کار آزمایشگاهی

مصالح

مصالح به کار رفته شامل سیمان پرتلند معمولی، متاکائولن و شن و ماسه می‌باشد. فوق روان کننده مورد استفاده نیز سولفونات نفتالین با ۶۰٪ آب و چگالی ۱٫۱۹ gr/cm^3 می‌باشد. ترکیبات سیمان پرتلند و متاکائولن در جدول ۱ داده شده است.

جدول ۱- ترکیبات و ویژگی‌های سیمان و متاکائولن

	سیمان پرتلند	متاکائولن
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 جایزگین سیمان شد و نسبت آب به مواد چسبنده در تمام اختلاط‌ها برابر ۰,۳ می‌باشد. مواد چسبنده شامل سیمان پرتلند و متاکائولن می باشد. مقدار فوق روان کننده نیز مقدار ثابت ۱,۲۶٪ نسبت به مواد چسبنده در نظر گرفته شد.

جدول۲- 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 وی‌بی برای تعیین میزان کارایی بررسی شدند. تمام نمونه ها 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 مکعب ها و ۲تا از مکعب مستطیل ها در آب ۲۰ درجه قرار داده می‌شوند. دو مکعب مستطیل باقی مانده در معرض هوا باقی می‌مانند و در دمای ۲۰درجه و رطوبت ۵۵٪ قرار می‌گیرند. مکعب‌ها برای تعیین مقاومت فشاری استفاده می شوند در حالیکه مکعب مستطیل ها 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 مبنا) اسلامپ پایینی از خود نشان دادند. در مجموع تمامی اسلامپ‌ها کمتر از ۲۰میلیمتر 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.

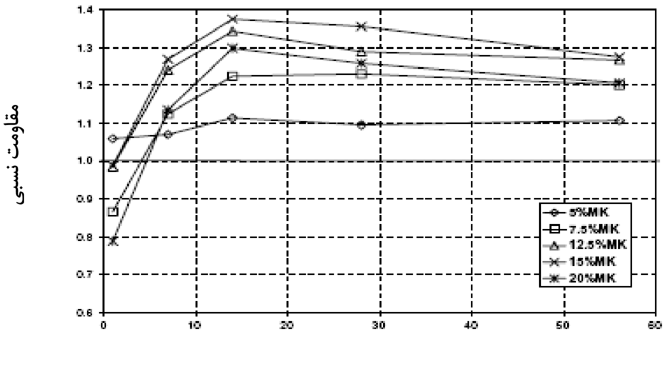
جدول ۳- کارایی مخلوط‌ها

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 روزهای 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 روزهای عمل‌آوری مقاومت بتن‌ها افزایش می‌یابد. همچنین بعد از یک روز نیز با افزایش مقدار متاکائولن، مقاومت‌ها افزایش یافته است. تغییرات مقاومت نسبی بر حسب روزهای 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.

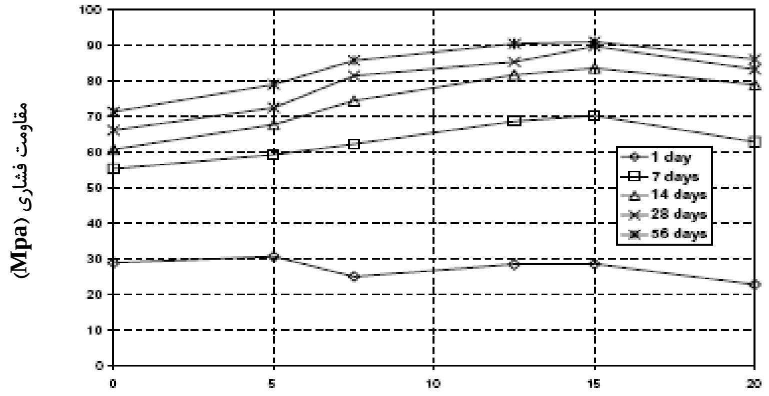


شکل ۱- مقاومت نسبی فشاری نمونه‌ها بر حسب روزه‌های مختلف عمل‌آوری

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 می یابد که این موضوع در تطابق با نتایج بدست آمده در مورد تغییرات در واکنش متاکائولن و هیدروکسید کلیسم ($Ca(OH)_2$) 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 تقریبا در حدود مقداری است (کمی کمتر از ۲۰٪) که در تحقیقات قبلی با نسبت آب به سیمان ۰٫۴۵ انجام شده‌اند[6].

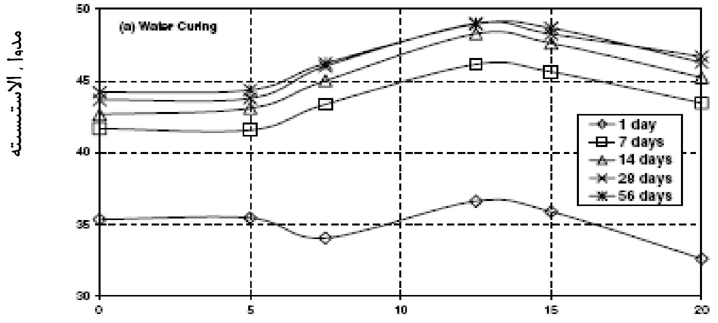


مقدار متاکائولن (٪)

شکل ۲- تاثیر مقدار متاکائولن بر مقاومت فشاری

مدول الاستیسیته دینامیکی

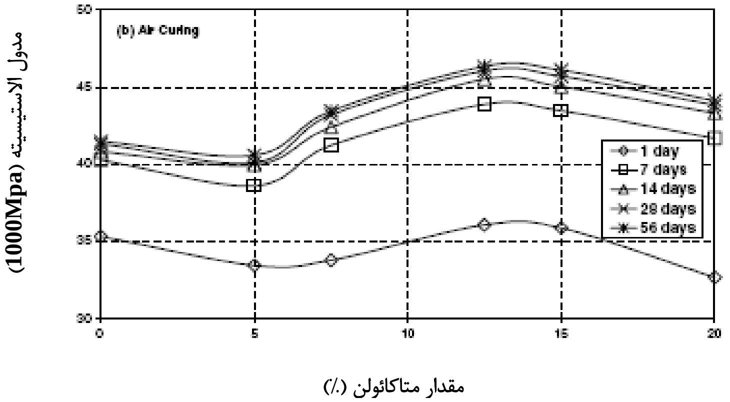
مدول الاستیسیته برای نمونه‌های با عمل‌آوری مرطوب و در معرض هوا در شکل‌های ۳ الف و ب آورده شده است. با بررسی دو شکل متوجه می‌شویم که درصد بهینه برای بیشترین مدول الاستیسته برای هر دو نوع عمل‌آوری تقریبا یکسان و مقداری بین ۱۲٫۵٪ و ۱۵٪ می‌باشد. به جز نتایج بدست آمده برای روز اول عمل‌آوری، می‌توان گفت مدول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

Computer For Civil Softeare Engineering Group : www.CCSofts.com , www.CompCivil.com

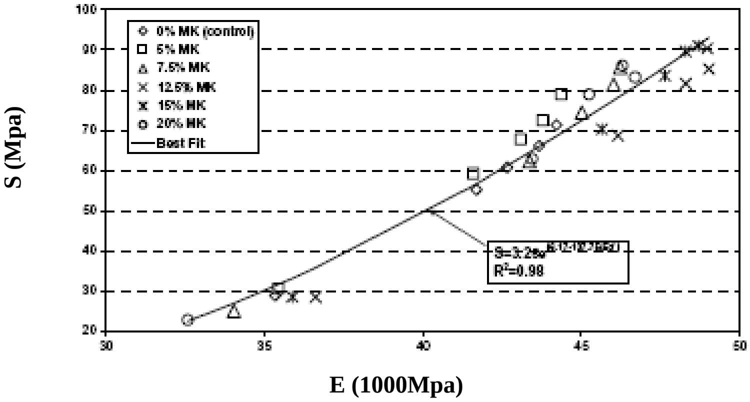


شکل ۳ ب- تغییرات مدول الاستیسیته بر حسب مقدار متاکائولن برای عمل‌آوری در معرض هوا

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].

$$S = ae^{(b-c/E_d)} \qquad (۱)$$

در رابطه بالا S نشان دهنده مقاومت فشاری، E_d مدول الاستیسیته دینامیکی و a، b و c به ترتیب اعداد ثابت ۳,۲۵، ۶,۱۷ 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 تقریبا 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 عمل‌آوری 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 عمل‌آوری متاکائولن به بیشترین بازدهی خود می‌رسد می‌توان به تغییرات اساسی در واکنش بین متاکائولن و هیدروکسید کلسیم بعد از ۱۴ روز عمل‌آوری اشاره کرد.

منابع

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

Computer For Civil Softeare Engineering Group : www.CCSofts.com , www.CompCivil.com

[2] Scriviner, K.L. and Nemati, 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.

Computer For Civil Softeare Engineering Group : www.CCSofts.com , www.CompCivil.com