

بررسی خواص بتن سخت شده خودتراکم حاوی متاکائولن

- ملک محمد رنجبر^۱، رحمت مدندوست^۲، سامان یوسفی^۳، سید یاسین موسوی^۴
- ۱- عضو هیئت علمی گروه عمران دانشکده فنی دانشگاه گیلان، رشت
- ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشگاه گیلان، رشت
- ۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران-سازه، دانشگاه گیلان، رشت

mmranjbar@ymail.com

خلاصه

استفاده از اکثر پرکننده های موجود، باعث کاهش مقاومت فشاری کوتاه مدت بتن خودتراکم خواهند شد که می تواند باعث مشکلات متعددی در کارهای اجرایی شود. جهت رفع این مشکل در این مطالعه سعی بر آن است که استفاده از متاکائولن در بتن خودتراکم با نسبت های مختلف آب به چسباننده مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا، پانزده طرح اختلاط بتن خودتراکم با درصد های متفاوت جایگزینی متاکائولن (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) در نسبت های متفاوت آب به چسباننده (۰/۳۲، ۰/۳۸ و ۰/۴۵) در نظر گرفته شد. طرح اختلاط های بتن خودتراکم تحت آزمایش های مختلف شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سرعت عبور امواج مافوق صوت، جذب آب اولیه، جذب آب نهایی و مقاومت الکتریکی قرار گرفتند. نتایج نشان می دهد که حضور ۱۰ درصد متاکائولن را می توان به عنوان میزان مناسب جایگزینی در نظر گرفت.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، متاکائولن، کارائی، خواص بتن سخت شده

۱. مقدمه

بتن خودتراکم تقریباً از گروه بتن با کارائی بالا (بتن توانمند) محسوب می گردد. بتن خودتراکم قادر است بدون احتیاج به لرزاندن خارجی، در مکان هایی با حجم بالای آرمانتور بدون جداسازی و آب انداختگی جریان پیدا نموده، قالب را پر نماید، و فضای اطراف آرمانورها را در برگیرد. در مطالعات پیشنهاد شده است که برای تولید بتن خودتراکم با پایداری و قابلیت تراکم مطلوب، علاوه بر استفاده افزودنی های شیمیایی، می توان میزان پودر را افزایش و همچنین حجم درشت دانه را کاهش داد. بر طبق آیین نامه EFNARC [۱]، عبارت پودر به عناصری از بتن خودتراکم که دارای قطر کوچکتر از $125 \mu\text{m}$ هستند شامل کسری از ماسه،

سیمان و پرکننده، اطلاق می‌شود. در مطالعات جهت افزایش میزان پودر معمولاً افزایش میزان سیمان توصیه نمی‌گردد. زیرا که استفاده از میزان بالای سیمان می‌تواند سبب تنزل خواص مهندسی بتن، افزایش آلودگی زیست محیطی و مصرف بالای انرژی گردد [۲]. لذا معمولاً افزایش میزان پودر در ساخت بتن خودتراکم شامل افزایش میزان پرکننده‌ها می‌گردد. در این راستا مطالعات فراوانی برای استفاده از پرکننده‌های مختلف (مانند خاکستر بادی، روبره، پودر سنگ آهک و غیره) در بتن خودتراکم جهت جایگزینی با بخشی از سیمان مصرفی صورت پذیرفته است.

مطالعات گذشته نشان می‌دهد که استفاده از بیشتر پرکننده‌های موجود می‌تواند سبب کاهش مقاومت فشاری کوتاه مدت بتن شود. به عنوان مثال، Sahmaran و همکاران [۳] با بررسی خواص بتن خودتراکم حاوی خاکستر بادی نشان دادند که بتن خودتراکم حاوی خاکستر بادی مقاومت کمتری در مقایسه با بتن خودتراکم شاهد کسب می‌نماید. بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی پرکننده‌های مختلف توسط Guneyisi و همکاران [۴] نشان می‌دهد که جایگزینی سرباره کوره آهن‌گدازی در نسبت‌های مختلف تا ۶۰ درصد می‌تواند باعث کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن شود. نتایج Uysal و Yilmaz [۵] نشان می‌دهد که استفاده از پودر سنگ آهک می‌تواند باعث کاهش مقاومت فشاری بتن خودتراکم شود. تاثیر استفاده از پرکننده‌های متفاوت شامل خاکستر بادی، پودر آجر، پودر سنگ آهک و کائولینیت و همچنین افزودنی‌های شیمیایی بر روی خواص ملات خودتراکم توسط Sahmaran و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است [۶]. نتایج نشان می‌دهد بسته به نوع افزودنی شیمیایی مصرفی در بیشتر اختلاط‌ها مقاومت فشاری ملات خودتراکم کاهش می‌یابد. بررسی مقاومت فشاری ملات حاوی پودر مرمر توسط Guneyisi و همکاران [۷] نشان می‌دهد که در تمامی اختلاط‌ها جایگزینی پودر مرمر باعث کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات می‌شود.

از مطالعات گذشته در ارتباط با استفاده از پرکننده‌های مختلف در بتن خودتراکم می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از اکثر پرکننده‌ها در بتن خودتراکم باعث کاهش مقاومت فشاری کوتاه مدت بتن خواهد شد. کاهش مقاومت فشاری اولیه بتن می‌تواند در پروژه‌های اجرایی باعث ایجاد مشکلاتی شود. به عنوان مثال کاهش مقاومت اولیه برای پروژه‌هایی که در آنها نیاز به کاهش زمان اجرا می‌باشد غیر قابل قبول است. لذا می‌بایست برای جبران کاهش مقاومت اولیه تمهیدات خاصی اندیشید. در این مطالعه برای حل این مشکل استفاده از متاکائولن به عنوان پرکننده‌ای با فعالیت پوزولانی بالا پیشنهاد خواهد گردید. متاکائولن یک ماده آلومینوسیلیکاتی با فعالیت پوزولانی بالا است که از کلسینه نمودن خاک کائولن در دمای بین ۷۰۰ تا ۸۵۰ درجه سانتیگراد بدست می‌آید. هرچند متاکائولن در دمای پایین تری نسبت به کلینکر تولید می‌شود، اما حجم کم تولید آن باعث قیمت بالاتر آن نسبت به سیمان گردیده است [۸]. با این وجود با توجه به خواص مثبت متاکائولن از لحاظ بهبود مقاومت و مشخصه‌های دوام بتن و همچنین اثرات مثبت زیست محیطی، استفاده از متاکائولن جهت جایگزینی با بخشی از سیمان مصرفی منطقی به نظر می‌رسد.

مطالعات گذشته حاکی از افزایش مقاومت فشاری بتن معمولی با افزودن متاکائولن بویژه در روزهای اولیه عمل‌آوری است. توسط Poon و همکاران [۹] گزارش شده است که در روزهای اولیه عمل‌آوری، فعالیت بالای پوزولانی متاکائولن باعث افزایش سرعت کسب مقاومت فشاری و همچنین بهتر شدن وضعیت تخلخل خمیر سیمان نسبت به حالتی که در خمیر سیمان از دوده سیلیس و یا خاکستر بادی استفاده شده باشد، دارد. هر چند در ۲۸ روزگی بتن حاوی متاکائولن مقاومتی مشابه را با بتن حاوی دوده سیلیس دارا می‌باشد [۱۰]. در مطالعه‌ای Zhang و Malhotra [۱۰] نشان دادند که بتن معمولی حاوی ۱۰ درصد متاکائولن وضعیت بسیار مناسبی را در چرخه‌های ذوب و یخ شدن از خود نشان می‌دهد. اخیراً Shekarchi و همکاران [۱۱] نشان دادند که با جایگزینی ۱۵ درصد متاکائولن با سیمان مصرفی، نفوذپذیری آب، نفوذپذیری گاز، میزان جذب آب و مقاومت الکتریکی به ترتیب به میزان ۵۰، ۳۷، ۲۸ و ۴۵۰ درصد کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه‌ای از مطالعات انجام پذیرفته در ارتباط با تاثیر مثبت متاکائولن در مقاومت در برابر خوردگی آرماتور، Batis و همکاران [۱۲] نشان دادند که استفاده از متاکائولن به عنوان جایگزین بخشی از سیمان و یا به عنوان جایگزین بخشی از ماسه می‌تواند سبب بهبود مقاومت در برابر خوردگی شود.

با توجه به خواص مثبت متاکائولن در بهبود مقاومت فشاری کوتاه مدت و مشخصات دوام به نظر می‌رسد که استفاده از متاکائولن در بتن خودتراکم می‌تواند مشکل کاهش مقاومت کوتاه مدت اولیه بتن خودتراکم حاوی پرکننده‌های متعارف را تا حدود زیادی مرتفع نماید. لذا هدف این مطالعه بررسی خواص بتن سخت شده خودتراکم حاوی متاکائولن می‌باشد. پس از انجام آزمایشات اولیه بتن تازه شامل جریان اسلامپ، قیف V شکل و جعبه L شکل، خواص بتن سخت شده خودتراکم توسط مقاومت فشاری در سنین مختلف،

سرعت عبور امواج مافوق صوت، مقاومت کششی، جذب آب اولیه (۳۰ دقیقه)، جذب آب نهایی و مقاومت الکتریکی مورد سنجش قرار گرفته است.

۲. برنامه آزمایشگاهی

۱.۲. مصالح مصرفی

در این مطالعه سیمان پرتلند معمولی تیپ ۱ ساخت کارخانه هگمتانه و همچنین متاکائولن به عنوان مواد چسباننده استفاده شد که ترکیبات شیمیایی مربوط به آنها در جدول ۱ موجود می‌باشد. ماسه از نوع رودخانه‌ای و همچنین شن از نوع شکسته با بزرگترین اندازه اسمی ۱۲/۵ میلی‌متر و درصد جذب آب ۰/۷۳ می‌باشد. برای ایجاد روانی در محدوده مطلوب از کاهنده شدید آب با نام تجاری Glenium51 با چگالی مابین $1/06 \text{ g/cm}^3$ و $1/08 \text{ g/cm}^3$ استفاده شده است.

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی سیمان و متاکائولن

متاکائولن	سیمان	ترکیبات شیمیایی (%)
۵۲/۱	۲۱/۴۶	SiO ₂
۴۲/۸	۵/۵۵	Al ₂ O ₃
۱/۶	۳/۴۶	Fe ₂ O ₃
۰/۲	۶۳/۹۵	CaO
۰/۲۱	۱/۸۶	MgO
۰/۰۰	۱/۴۲	SO ₃
۰/۳۲	۰/۵۴	K ₂ O
۰/۱۱	۰/۲۶	Na ₂ O

۲.۲. طرح‌های اختلاط بتن و آماده سازی نمونه‌ها

اختلاط های بتن خودتراکم حاوی متاکائولن در سه گروه با نام های G1، G2 و G3 تقسیم بندی شده اند. در گروه اول (G1)، دوم (G2) و سوم (G3) به ترتیب نسبت آب به چسباننده ۰/۳۲، ۰/۳۸ و ۰/۴۵ در نظر گرفته شده است. در هر گروه، سیمان مصرفی با درصدهای وزنی ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ با متاکائولن جایگزین گردید. این میزان از جایگزینی بر مبنای مطالعات گذشته و همچنین طرح های آزمایشگاهی اولیه انتخاب شده است. در گروه اول برای نگهداری میزان روانی در حد مطلوب مابین ۶۵۰ تا ۷۵۰ میلی‌متر (بر اساس رده دوم EFNARC [۱])، میزان کاهنده شدید آب بین ۲/۴۷ تا $9/96 \text{ kg/m}^3$ تنظیم شده است. این مقدار برای گروه دوم و سوم نیز به ترتیب بین $1/73$ تا $4/89 \text{ kg/m}^3$ و بین $1/63$ تا $3/91 \text{ kg/m}^3$ نتیجه شده است. از طرفی در اختلاط های شاهد هر گروه از اصلاح کننده لزجت جهت حفظ خواص رئولوژیک بتن خودتراکم استفاده شده است. در مجموع به منظور دستیابی به اهداف این مطالعه، پانزده اختلاط بتن خودتراکم حاوی متاکائولن طراحی شده است که در جدول ۲ جزئیات آنان نمایش داده شده است.

جدول ۲- جزئیات طرح اختلاط بتن خودتراکم حاوی متاکائولن

نام گروه	نام اختلاط	سیمان (kg/m ³)	متاکائولن		آب (kg/m ³)	آب به چسباننده	ماسه (kg/m ³)	شن (kg/m ³)	کاهنده شدید آب (kg/m ³)	اصلاح کننده لزجت (kg/m ³)
			(%)	(kg/m ³)						
G1	SCCL	۴۹۰	۰	۰	۱۵۷	۰/۳۲	۹۶۷	۸۱۷	۲/۴۷	۱/۳۱
	SCCL5	۴۶۶	۵	۲۴/۵	۱۵۷	۰/۳۲	۹۶۷	۸۱۵	۴/۵۷	-
	SCCL10	۴۴۱	۱۰	۴۹	۱۵۷	۰/۳۲	۹۷۵	۸۰۵	۷/۰۲	-
	SCCL15	۴۱۷	۱۵	۷۳/۵	۱۵۷	۰/۳۲	۹۸۰	۸۰۰	۷/۳۵	-
	SCCL20	۳۹۲	۲۰	۹۸	۱۵۷	۰/۳۲	۹۸۵	۷۹۵	۹/۹۶	-
G2	SCCM	۴۶۰	۰	۰	۱۷۵	۰/۳۸	۹۴۰	۸۱۵	۱/۷۳	۱/۹۶
	SCCM5	۴۳۷	۵	۲۳	۱۷۵	۰/۳۸	۹۴۷	۸۱۰	۳/۳۱	-
	SCCM10	۴۱۴	۱۰	۴۶	۱۷۵	۰/۳۸	۹۵۸	۸۰۰	۳/۶۰	-
	SCCM15	۳۹۱	۱۵	۶۹	۱۷۵	۰/۳۸	۹۶۴	۷۹۰	۴/۸۹	-
	SCCM20	۳۶۸	۲۰	۹۲	۱۷۵	۰/۳۸	۹۷۰	۷۸۱	۴/۸۹	-
G3	SCCH	۴۳۵	۰	۰	۱۹۵	۰/۴۵	۹۲۰	۸۱۵	۱/۶۳	۲/۱۲
	SCCH5	۴۱۴	۵	۲۱/۸	۱۹۵	۰/۴۵	۹۲۵	۸۰۵	۱/۹۵	-
	SCCH10	۳۹۲	۱۰	۴۳/۵	۱۹۵	۰/۴۵	۹۳۳	۸۰۰	۲/۹۳	-
	SCCH15	۳۷۰	۱۵	۶۵/۲	۱۹۵	۰/۴۵	۹۴۰	۷۹۵	۳/۲۶	-
	SCCH20	۳۴۸	۲۰	۸۷	۱۹۵	۰/۴۵	۹۴۵	۷۸۵	۳/۹۱	-

برای ساخت نمونه ها روندی مشابه با آنچه که Khayat و همکاران [۱۳] استفاده نموده اند، بکار گرفته شد. بر این مبنا، ابتدا سنگدانه ها شامل شن و ماسه بمدت ۳۰ ثانیه در بتونیر مخلوط شد. پس از آن، نصف آب مصرفی بمدت ۱ دقیقه در حالیکه که بتونیر روشن بود به مخلوط اضافه گردید. بعد از این مرحله بتونیر ۱ دقیقه خاموش شده و سپس مواد چسباننده شامل متاکائولن و سیمان اضافه گردید و بمدت ۱ دقیقه دیگر در بتونیر مخلوط شد. در حالیکه که بتونیر بمدت ۳ دقیقه روشن بود، آب باقیمانده و ماده افزودنی کاهنده شدید آب به مخلوط اضافه گردید. در نهایت بعد از ۲ دقیقه استراحت، بتن به میزان ۳ دقیقه دیگر مخلوط گردید.

۳.۲. آزمایش های انجام شده

در این مطالعه آزمایش های بتن تازه خودتراکم شامل جریان اسلامپ، شاخص پایداری چشمی، قیف V شکل و جعبه L شکل بر مبنای EFNARC انجام شده است [۱]. پس از اتمام آزمایش های بتن تازه نمونه ها در داخل قالب ها مربوطه بدون هرگونه تراکم خارجی ریخته شدند. مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی متاکائولن در سنین مختلف شامل ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۵۶ روزگی بر روی نمونه های مکعبی ۱۰ سانتیمتری مورد ارزیابی قرار گرفته است. قبل از انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی قالب های مکعبی، سرعت

عبور امواج مافوق صوت توسط دستگاهی که اصطلاحاً آن را PUNDIT^۱ می نامند، انجام پذیرفت. علاوه بر مقاومت فشاری، نمونه های استوانه ای ۱۵×۳۰cm جهت بررسی مقاومت کششی بتن خودتراکم حاوی متاکائولن در سن ۲۸ روزگی بر مبنای آزمایش شکافت استفاده گردید. برای هر طرح اختلاط میانگین مقاومت فشاری و کششی ۳ نمونه ملاک قرار گرفته است. جذب آب بتن خودتراکم در سن ۲۸ روزگی بر اساس ASTM C 642 اندازه گیری شد. بر این مبنای، برای هر اختلاط ۳ نمونه در اون در دمای ۱۰۰-۱۱۰ درجه سانتیگراد تا رسیدن به وزن ثابت نگهداری شدند و سپس جذب آب اولیه (۳۰ دقیقه) و نهایی (زمانی که تفاضل جرم بعد از فاصله های زمانی ۱۲ ساعته قابل چشم پوشی است) گزارش شده است. مقاومت الکتریکی نمونه های بتن خودتراکم حاوی متاکائولن نیز در سن ۲۸ روزگی و با استفاده از دستگاه مقاومت الکتریکی چهار نقطه ای اندازه گیری شده است.

۳. نتایج آزمایش ها و بررسی آنها

۳.۱. بتن تازه

خواص بتن تازه خودتراکم توسط جریان اسلامپ، قیف V شکل و همچنین جعبه L شکل مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج در جدول ۳ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می شود با افزایش میزان متاکائولن جریان اسلامپ بتن خودتراکم کاهش پیدا نموده است که علت این امر را می توان در سطح مخصوص ویژه بالاتر متاکائولن در مقایسه با سیمان جستجو نمود. از طرفی نتایج قیف V شکل نیز دلالت بر افزایش لزجت بتن خودتراکم با افزایش متاکائولن دارد. بر اساس EFNARC، بتن خودتراکم با زمان عبور از قیف V شکل بالاتر از ۲۵ ثانیه توصیه نمی گردد. بر این مبنای، وجود ۱۰ درصد متاکائولن در تمامی نسبت های آب به چسباننده می تواند این توصیه را ارضاء نماید. نتایج جعبه L شکل نیز نشان می دهد که هر چند در بعضی از اختلاط ها نسبت انسداد کمتر از ۰/۸ تخمین زده شده است، ولی هیچ گونه نشانه ای از انسداد و یا جداسازی در اطراف آرما تور ها دیده نشد.

جدول ۳- نتایج بررسی خواص بتن تازه خودتراکم حاوی متاکائولن

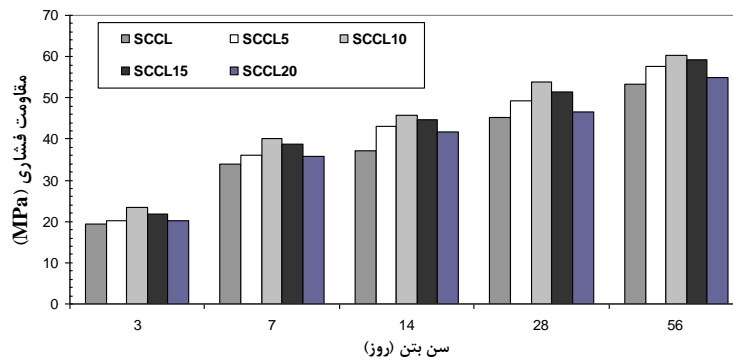
نام گروه	نام اختلاط	جریان اسلامپ (میلیمتر)	قیف V شکل (ثانیه)	نسبت انسداد	نام گروه	نام اختلاط	جریان اسلامپ (میلیمتر)	قیف V شکل (ثانیه)	نسبت انسداد
G1	SCCL	۶۸۰	۶/۱	۰/۸۴	G2	SCCM	۶۷۰	۵/۲	۰/۹۱
	SCCL5	۶۶۰	۱۱/۵	۰/۸		SCCM5	۶۸۰	۸/۴	۰/۸۸
	SCCL10	۷۰۰	۱۹/۶	۰/۸۱		SCCM10	۶۷۵	۱۴/۸	۰/۸
	SCCL15	۷۰۵	۳۵/۱	۰/۷۳		SCCM15	۶۹۰	۱۶/۳	۰/۸۵
	SCCL20	۶۷۵	۳۷/۱	۰/۶۷		SCCM20	۶۷۰	۲۷/۱	۰/۷۵
G3	SCCH	۶۹۰	۵	۰/۹۲					
	SCCH5	۶۷۵	۶/۱	۰/۸۲					
	SCCH10	۷۱۵	۹/۱	۰/۸۵					
	SCCH15	۷۰۵	۱۱/۲	۰/۸۳					
	SCCH20	۶۸۵	۱۲/۹	۰/۷۶					

¹ Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester

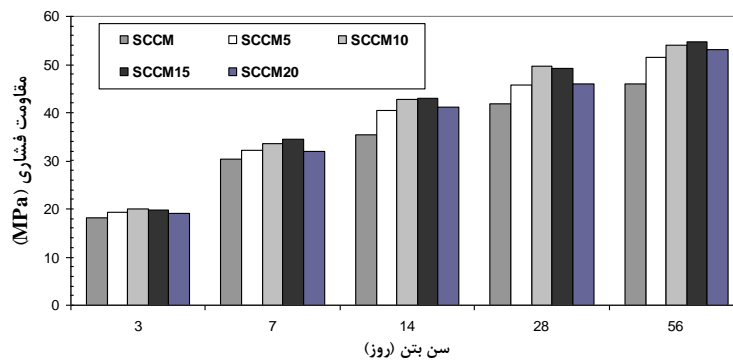
۲.۳. بتن سخت شده خودتراکم

۱.۲.۳. مقاومت فشاری

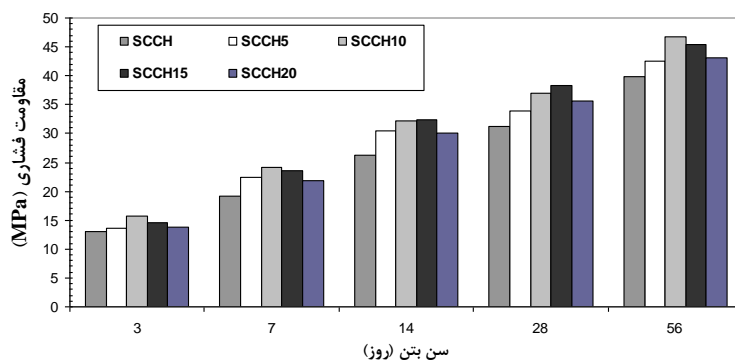
مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی متاکائولن در سنین ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۵۶ روز مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در اشکال ۱ تا ۳ برای میزان های مختلف آب به چسباننده نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می گردد، در تمامی اختلاط ها مقاومت فشاری نمونه ها با افزایش سن بتن افزایش می یابد. از طرفی، بسته به میزان متاکائولن و یا نسبت آب به چسباننده، افزودن متاکائولن باعث افزایش مقاومت فشاری بتن تا ۲۷ درصد می گردد. در مطالعات افزایش مقاومت فشاری بتن در حضور متاکائولن را به سه علت (۱) خاصیت پرکنندگی ذرات متاکائولن، (۲) افزایش سرعت هیدراتاسیون سیمان و همچنین (۳) فعالیت پوزولانی متاکائولن مرتبط دانسته اند [۱۴-۱۵].



شکل ۱- مقاومت فشاری نمونه های بتن خودتراکم حاوی متاکائولن در گروه اول (نسب آب به چسباننده برابر با ۰/۳۲)



شکل ۲- مقاومت فشاری نمونه های بتن خودتراکم حاوی متاکائولن در گروه دوم (نسب آب به چسباننده برابر با ۰/۳۸)

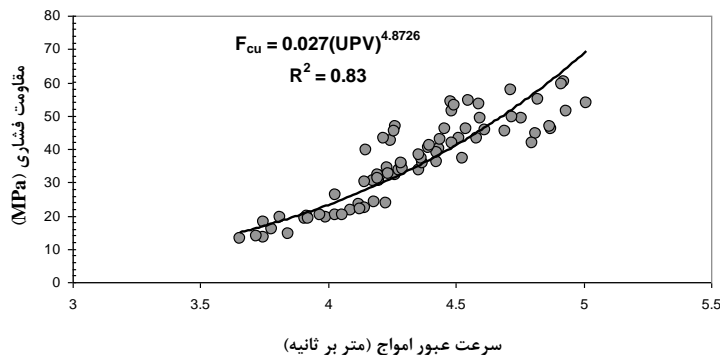


شکل ۳- مقاومت فشاری نمونه های بتن خودتراکم حاوی متاکائولن در گروه سوم (نسب آب به چسباننده برابر با ۰/۴۵)

در گروه های مختلف بیشترین افزایش مقاومت فشاری برای حضور ۱۰ تا ۱۵ درصد متاکائولن اتفاق افتاده است. با توجه به قیمت نهایی بتن خودتراکم حاوی متاکائولن و همچنین خواص بتن تازه خودتراکم بنظر می رسد، حضور ۱۰ درصد متاکائولن را بتوان به عنوان میزان مناسب در نظر گرفت. از طرفی، هرچند حضور متاکائولن توانسته است باعث افزایش مقاومت فشاری کوتاه مدت (۳ تا ۱۴ روز) و همچنین بلند مدت (۲۸ تا ۵۶ روز) بتن خودتراکم شود، اما سرعت افزایش مقاومت فشاری در روزهای اولیه بالاتر می باشد. تاثیر نسبت آب به چسباننده بر روی مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی متاکائولن از اشکال ۱ تا ۳ قابل استنباط است. در یک مقدار ثابت متاکائولن، مقاومت فشاری بتن خودتراکم با مقادیر بالاتر نسبت آب به چسباننده پایین تر می باشد.

۲.۲.۳. سرعت عبور امواج مافوق صوت

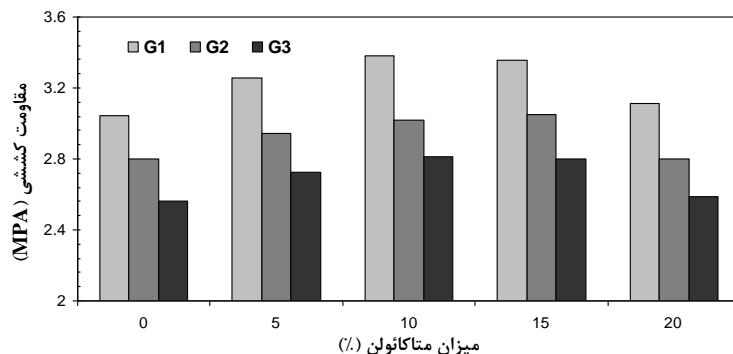
سرعت عبور امواج در نمونه های مختلف بتن خودتراکم در سنین مختلف در مقابل مقاومت فشاری معادل آن در شکل ۴ نشان داده شده است. بر این مبنای، روندی مشابه با آنچه که در مقاومت فشاری دیده شده است، در میزان سرعت عبور امواج نیز دیده می شود. هر چند سرعت کسب سرعت عبور امواج مافوق صوت در نمونه های بتن خودتراکم از مقاومت فشاری کمتر می باشد. بر طبق طبقه بندی Whitehurst [۱۶] کیفیت بتن بر مبنای سرعت عبور امواج در محدوده $4/5 \text{ m/s}$ و بیشتر، $4/5$ تا $3/5 \text{ m/s}$ ، $3/5$ تا 3 m/s و 2 m/s و پایین تر به ترتیب به پنج رده "عالی"، "خوب"، "مشکوک"، "ضعیف" و "خیلی ضعیف" رده بندی شده است. بر این مبنای، بتن خودتراکم حاوی متاکائولن در رده عالی و یا خوب تقسیم بندی می شوند.



شکل ۴- سرعت عبور امواج در نمونه های مختلف بتن خودتراکم در مقابل مقاومت فشاری معادل آن

۳.۲.۳. مقاومت کششی

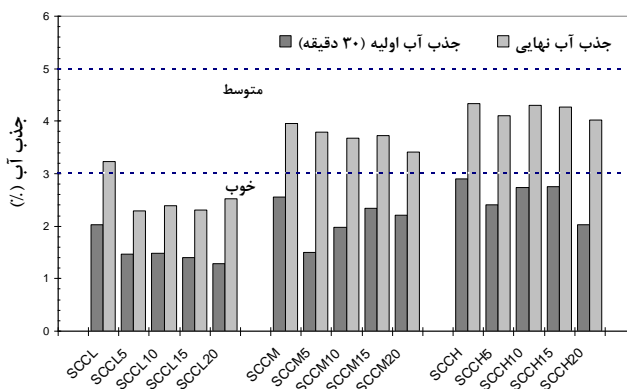
نتایج مقاومت کششی نمونه های بتن خودتراکم حاوی متاکائولن ناشی از آزمایش شکافت در سن ۲۸ روز در شکل ۵ نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می گردد، افزایش میزان متاکائولن همراه با افزایش مقاومت کششی می باشد. در روندی مشابه با مقاومت فشاری، بسته به نسبت آب به چسباننده، نتایج مقاومت کششی نیز برای حضور ۱۰ یا ۱۵ درصد متاکائولن به بیشترین مقدار خود می رسد. از طرفی در میزان ثابت متاکائولن، کاهش میزان آب به چسباننده باعث افزایش مقاومت کششی نمونه ها می گردد.



شکل ۵- مقاومت کششی نمونه های بتن خودتراکم حاوی متاکائولن در نسبت های متفاوت آب به چسباننده

۴.۲.۳. جذب آب اولیه (۳۰ ثانیه) و نهایی

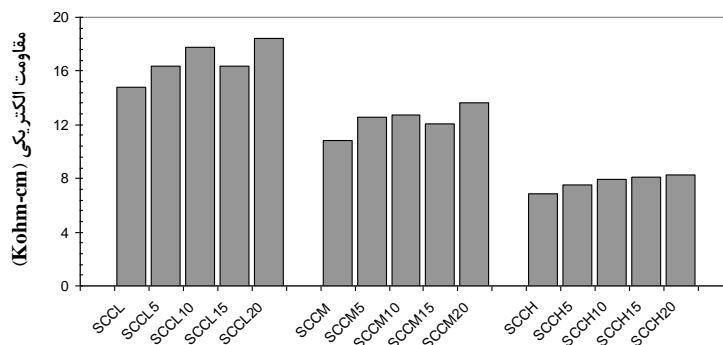
در این مطالعه جذب آب اولیه و نهایی بتن خودتراکم حاوی متاکائولن در سن ۲۸ روز محاسبه گردیده و نتایج در شکل ۶ نشان داده شده است. کیفیت بتن توسط CEB [۱۷] به سه رده "ضعیف"، "متوسط" و "خوب" به ترتیب بر مبنای جذب آب ۵ درصد و بالاتر، بین ۳ تا ۵ درصد و کمتر از ۳ درصد تقسیم بندی شده است. بر این مبنای، اغلب نمونه ها دارای جذب آب اولیه در رده کیفیتی "خوب" هستند. همچنین جذب آب نهایی بتن خودتراکم نیز در محدوده ۲/۳ تا ۴/۳۳ درصد متغیر می باشد که نسبتاً پایین می باشد. با توجه به شکل ۵ حضور متاکائولن در بتن خودتراکم می تواند سبب کاهش میزان جذب آب شود. روندی مشابه توسط Shekarchi و همکاران [۱۱] نیز گزارش شده است. از طرفی اثر مثبت متاکائولن در کاهش جذب آب بتن در نسبت های پایین تر آب به چسباننده محسوس تر می باشد.



شکل ۶- جذب آب اولیه و نهایی بتن خودتراکم حاوی متاکائولن در نسبت های متفاوت آب به چسباننده

۵.۲.۳. مقاومت الکتریکی

شکل ۷ نتایج مقاومت الکتریکی ۲۸ روزه بتن خودتراکم حاوی متاکائولن را در نسبت های متفاوت آب به چسباننده نشان می دهد. مقاومت الکتریکی برای گروه اول، دوم و سوم به ترتیب در محدوده ۱۴/۸ تا ۱۸/۴ KΩ-cm، ۱۰/۸ تا ۱۳/۶ KΩ-cm و ۶/۹ تا KΩ-cm تغییر یافت. همچنین، حضور متاکائولن باعث افزایش مقاومت الکتریکی بتن خودتراکم تا ۲۶ درصد بسته به میزان آب به چسباننده خواهد شد.



شکل ۷- مقاومت الکتریکی بتن خودتراکم حاوی متاکائولن در نسبت های متفاوت آب به چسباننده

۴. نتیجه گیری

در این مطالعه تاثیر متاکائولن بر خواص بتن سخت شده خودتراکم حاوی متاکائولن در نسبت های متفاوت آب به چسباننده مورد بررسی قرار گرفت که نتایج زیر قابل استنباط می باشد.

- ۱- استفاده از متاکائولن باعث کاهش میزان جریان پذیری و همچنین افزایش لزجت بتن خودتراکم می شود. از طرفی خاصیت پرکنندگی مطلوب در بتن خودتراکم حاوی متاکائولن نیز از دیگر خواص بتن تازه می باشد.
- ۲- نتایج مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی متاکائولن نشان داد که متاکائولن قادر است مقاومت فشاری کوتاه مدت و بلند مدت بتن را افزایش دهد. از طرفی سرعت کسب مقاومت در سنین اولیه (تا ۱۴ روز) نسبت به سنین بالاتر (۲۸ یا ۵۶ روز) بالاتر می باشد.
- ۳- ارزیابی سرعت عبور امواج در نمونه های بتن خودتراکم حاوی متاکائولن روندی مشابه با مقاومت فشاری را نشان می دهد.
- ۴- بهبود مقاومت کششی نمونه های بتن خودتراکم با افزودن متاکائولن را می توان از دیگر مشخصه های مثبت حضور متاکائولن ارزیابی نمود. هرچند سرعت کسب مقاومت کششی نسبت به مقاومت فشاری پایین تر می باشد.
- ۵- بر مبنای طبقه بندی CEB جهت بررسی کیفیت بتن بر مبنای جذب آب، بتن خودتراکم حاوی متاکائولن در رده "خوب" قرار می گیرد. از طرفی هرچند وجود متاکائولن باعث کاهش جذب آب بتن خودتراکم شده است، میزان کاهش جذب آب در نسبت های پایین تر آب به چسباننده محسوس تر می باشد.
- ۶- مقاومت الکتریکی ۲۸ روزه نمونه های بتن خودتراکم با حضور متاکائولن و همچنین کاهش نسبت آب به چسباننده بهبود می یابد.
- ۷- با توجه به نتایج بتن تازه و سخت شده خودتراکم حاوی متاکائولن و همچنین قیمت نهایی بتن، ۱۰ درصد متاکائولن را می توان به عنوان میزان بهینه جایگزینی در نسبت های متفاوت آب به چسباننده در نظر گرفت.

- [1] The European guidelines for self-compacting concrete; specification production and use. EFNARC; May 2005.
- [2] Zerbino R, Giaccio G, Isaia, GC. Concrete incorporating rice-husk ash without processing. *Construction and Building Materials*, 25, 371-378, 2011.
- [3] Sahmaran M, Yaman İÖ, Tokyay M. Transport and mechanical properties of self consolidating concrete with high volume fly ash. *Cement & Concrete Composites*, 31, 99–106, 2009.
- [4] Guneyisi E, Gesoglu M, Ozbay E. Evaluating and forecasting the initial and final setting times of selfcompacting concretes containing mineral admixtures by neural network. *Materials and Structures*, 42, 469–484, 2009.
- [5] Uysal M, Yilmaz K. Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. *Cement & Concrete Composites*, 33, 771–776, 2011.
- [6] Sahmaran M, Christianto HA, Yaman IO. The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. *Cement & Concrete Composites*, 28, 432–440, 2006.
- [7] Guneyisi E, Gesoglu M, Ozbay E. Effects of marble powder and slag on the properties of self compacting mortars. *Materials and Structures*, 42, 813–826, 2009.
- [8] Vejmelkova E, Pavlikova M, Keppert M, Kersner Z, Rovnanikova P, Ondracek M, Sedlmajer, M. Cerny R. High performance concrete with Czech metakaolin: Experimental analysis of strength, toughness and durability characteristics. *Construction and Building Materials*, 24, 1404–1411, 2010.
- [9] 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, 1301–1306, 2001.
- [10] Zhang MH, Malhotra, VM. Characteristics of a thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete. *Cement and Concrete Research*, 25, 1713–1725, 1995.
- [11] Shekarchi M, Bonakdar A, Bakhshi M, Mirdamadi A, Mobasher B. Transport properties in metakaolin blended concrete. *Construction and Building Materials*, 24, 2217–2223, 2010.
- [12] Batis G, Pantazopoulou P, Tsivilis S, Badogiannis E. The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars. *Cement & Concrete Composites*, 27, 125–130, 2005.
- [13] Khayat KH, Bickley J, Lessard M. Performance of self-consolidating concrete for casting basement and foundation walls. *ACI Material Journal*, 97, 374–380, 2000.
- [14] Wild S, Khatib JM, Jones A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticized metakaolin concrete. *Cement and Concrete Research*, 26, 1537–1544, 1996.
- [15] Said-Mansour M, Kadri E, Kenai S, Ghrici M, Bennaceur R. Influence of calcined kaolin on mortar properties. *Construction and Building Materials*, 25, 2275–2282, 2011.
- [16] Whitehurst EA. Soniscope tests concrete structures. *Journal of the American Concrete Institute*, 47, 443–444, 1951.
- [17] CEB-FIP, Diagnosis and assessment of concrete structures-“State of the Art Report. *CEB Bulletin* 192,1989, 83–5.