

بررسی آثار مواد پوزولانی بر دوام بتن‌های خودمتراکم

علی اکبر رمضانیانپور^{۱*}، مرتضی صمدیان^۲، مهدی مهدی‌خانی^۳، فرامرز مودی^۴

۱- استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر و رئیس مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۴- استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر و عضو مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

aaramce@aut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۰/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۳/۱۶

چکیده- بتن خودمتراکم می‌تواند به عنوان یکی از بتن‌های نوینی مطرح شود که بدون جداشدگی سنگ‌دانه یا آب‌انداختگی و بدون نیاز به عمل تراکم، قابلیت پرکنندگی فضاهای خالی میان آرماتورها را دارد. این نوع بتن به دلیل قابلیت‌های صنعتی و اقتصادی می‌تواند به کمک مواد پوزولانی که خود نقش مهمی در افزایش مقاومت و دوام سازه‌های بتنی دارند، ساخته شود. این مقاله، نتایج مطالعات آزمایشگاهی روی ویژگی‌های بتن تازه، انتشار یون کلراید و نفوذپذیری نمونه‌های بتن‌های پوزولانی خودمتراکم را در مقایسه با بتن‌های بدون پوزولان و بتن معمولی ارائه می‌دهد. دوده سیلیس، پوزولان‌های پومیس و خاکستر پسته برنج، مواد پوزولانی است که در این پژوهش جایگزین سیمان و موادپرکننده (فیلر) شده‌اند. آزمایش‌های گوناگونی، مانند نفوذ یون کلراید، جذب آب موئینه، نفوذ آب و مقاومت الکتریکی. روی نمونه‌های نام برده انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که بتن‌های خودمتراکم حاوی پوزولان به طور محسوسی مقدار نفوذ یون کلراید و نفوذ آب را کاهش می‌دهد.

کلیدواژگان: بتن خودمتراکم، پوزولان، خاکستر پسته برنج، پومیس، دوام.

۱- مقدمه

اوزاوا و ماکاوا [۲] در دانشگاه توکیو انجام شد. مدل اولیه بتن خودمتراکم در سال ۱۹۸۸ تکمیل و در همین سال برای اولین بار در کارگاه ساخته شد و نتایج قابل قبولی از نظر خواص فیزیکی و مکانیکی بتن ارائه داد [۳، ۴]. ارائه همین نتایج باعث آغاز تحقیقات گسترده در این زمینه به خصوص در مورد دوام بتن‌های خودمتراکم شد.

Leeman و همکارانش در مطالعه ریزساختار ناحیه انتقال بتن خودمتراکم و بتن معمولی نشان دادند که افزایش قابل توجهی در تخلخل و پهنای ناحیه انتقال در بتن

در اوایل دهه هشتاد میلادی به دنبال کاهش نیروی کار ماهر در صنعت ساخت و ساز ژاپن از یک سو و تراکم نامناسب ناشی از افزایش حجم آرماتورهای مصرفی به تبع عملکرد بهتر سازه‌ای که باعث کاهش کیفیت کارهای اجرایی شد از طرف دیگر [۱]، باعث شد تا نظریه بتن خودمتراکم به عنوان راه حلی برای رفع مشکل دوام سازه‌های بتنی به وسیله‌ی اوکامورا [۲] در سال ۱۹۸۶ مطرح شود. لازمه پژوهش روی بتن خودمتراکم، مطالعه عمیق کارایی بتن بود که به وسیله‌ی

معمولی نسبت به بتن خودمتراکم وجود دارد. Bartos و Zhu [6] نیز نشان دادند که مخلوط‌های بتن خودمتراکم به‌طور قابل ملاحظه‌ای نفوذپذیری کمتری برای اکسیژن و آب دارند. Diamantonis و همکاران [7] تأثیر مواد پوزولانی را در ویسکوزیته بتن خودمتراکم بررسی کرده و نشان دادند که افزودن پوزولان‌ها باعث افزایش ویسکوزیته نمونه‌های بتنی می‌شود. Memon و همکاران [15] نتایج مشابهی را در مورد خاکستر پسته برنج به‌دست آوردند. Yazici [8] با بررسی اثر میکروسیلیس و خاکستر بادی کلاس C بر نفوذپذیری یون کلراید نشان دادند که این مخلوط‌ها خواص مکانیکی و مقاومت خوبی در برابر نفوذ یون کلراید و مقاومت در برابر یخ زدن و آب شدن داشته است. علاوه بر این Persson [9] دوام بتن‌های خودمتراکم با حجم زیاد فیلر را در برابر ورود یون کلراید و کربناسیون و مقاومت در برابر آتش بررسی کرده است.

در این پژوهش به خصوصیات نفوذپذیری و دوام این بتن‌ها توجه شده است. پوزولان‌های استفاده شده در این پژوهش، میکروسیلیس و خاکستر پسته برنج به عنوان پوزولان‌های مصنوعی و پومیس به عنوان پوزولان طبیعی است.

۲- برنامه آزمایشها و ساخت نمونه‌ها

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

سنگ‌دانه‌های ریزدانه (ماسه) مصرفی در این پروژه از نوع طبیعی دوبارشوی و مصالح درشت‌دانه (شن) از نوع شکسته است (جدول ۱)، در آزمایش‌های اولیه، عملکرد مطلوب این دانه‌بندی از حیث خواص بتن تازه در مقایسه با بتن‌های خودمتراکم مشابه ولی با دانه‌بندی‌های متفاوت، تأیید شد. جدول ۲ معرف وضعیت دانه‌بندی انتخاب شده برای این مصالح سنگی است.

سیمان پرتلند مصرف شده در این پروژه، از نوع

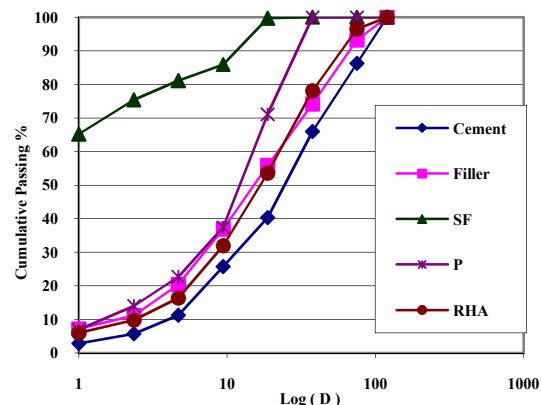
۱-۴۲۵ است که ترکیبات شیمیایی و خواص فیزیکی آن در جدول ۳ درج شده است. ترکیبات شیمیایی و خصوصیات میکروسیلیس، پوزولان تراس جاجرود و خاکستر پسته برنج مصرف شده در این پژوهش نیز در همین جدول آمده است. همچنین شکل ۱ چگونگی توزیع ذرات سیمان، میکروسیلیس، پومیس و خاکستر پسته برنج مصرفی در پروژه را نشان می‌دهد. برای مشخص کردن ویژگی‌های شیمیایی از الزامات استاندارد پوزولان‌های طبیعی برابر آیین‌نامه آمریکا - ASTM [10] C618 و ISIRI 3433 [11] ایران که بسیار به هم شباهت دارند استفاده شد. جدول ۴ به بررسی و مقایسه وضعیت پوزولانهای مصرفی در پروژه با الزامات موجود در این استاندارد پرداخته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود همه‌ی پوزولان‌های مصرف‌شده استانداردهای لازم را دارند. در این پروژه سعی شد تا با رسیدن به دانه‌بندی بهینه و استفاده از فیلرهای خنثی و غیرخنثی، تنها با افزودن فوق‌روان‌کننده، بتن خودمتراکم ساخته شود. در این پژوهش از فوق‌روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات‌های بهینه‌شده استفاده شده است که میزان مصرف آن در بتن‌های معمولی (بر اساس توصیه سازنده) بین ۰/۲ تا ۱/۲ درصد وزن سیمان است. این میزان را برای رسیدن به بتن خودمتراکم می‌توان تا بیش از ۳ برابر بیشینه‌ی مقدار مصرف شده در بتن‌های معمولی افزایش داد. وزن مخصوص این فوق‌روان‌کننده ۱/۰۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب و غلظت آن ۲۸ درصد است. آب مصرف شده در پروژه، آب شرب شهر تهران است.

جدول (۱) مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها

سنگ‌دانه	نوع	وزن مخصوص gr/cm ³	درصد جذب آب
شن	شکسته	۲/۵۸۴	۱/۸۳
ماسه	طبیعی	۲/۵۵۱	۲/۵۶

جدول (۲) دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها

درصد وزنی مانده روی الک	درصد تجمعی عبورکرده از الک	اندازه الک	
		ASTM	BS
۰	۱۰۰	۱/۲	۱۲/۷
۵	۹۵	۳/۸	۹/۵
۳۵	۶۰	# ۴	۴/۷۵
۲۰	۴۰	# ۸	۲/۳۶
۱۰	۳۰	# ۱۶	۱/۱۸
۱۰	۲۰	# ۳۰	۰/۶
۱۰	۱۰	# ۵۰	۰/۳
۱۰	۰	# ۱۰۰	۰/۱۵



شکل (۱) توزیع ریزی ذرات سیمان و پوزولانهای مصرفی

۲-۲- طرح اختلاط‌های بتن‌های دارای پوزولان

در این مرحله ملاک تأیید، برآورده شدن الزامات خواص بتن تازه خودمتراکم با استفاده از آزمایش‌های بتن تازه است. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، طرح اختلاط‌های بتن خودمتراکم مطابق جدول ۵ ساخته شد. همچنین برای

بررسی عملکرد بتن خودمتراکم در مقایسه با بتن‌های معمولی، یک طرح بتن معمولی (به عنوان شاهد) با نسبت ریزدانه و درشت‌دانه ۰/۵ نسبت به کل سنگ‌دانه با اسلامپ نرمال ۷-۱۰ سانتی‌متر و بدون استفاده از فیلر، با نام اختصاری CTL ساخته شد.

۲-۳- ساخت نمونه‌ها

بلافاصله بعد از پایان یافتن اختلاط، آزمایش‌های بتن تازه مورد نظر روی مخلوط انجام می‌شود و پس از طی این مراحل، مخلوط بدون هیچ‌گونه عملیات لرزاندن داخل قالب‌های مورد نظر و از قبل آماده‌شده ریخته می‌شود. نمونه‌های ساخته‌شده پس از قالب‌گیری حدود ۱۲ تا ۲۴ ساعت درون قالب باقی مانده و در این مدت دائماً سطح نمونه‌ها مرطوب نگه‌داشته می‌شود. نمونه‌ها پس از باز شدن قالب‌ها، بلافاصله در شرایط عمل‌آوری در محیط آب آهک اشباع، قرار می‌گیرند. دمای میانگین محیط آزمایشگاه در این مدت ۲۲ الی ۲۶ درجه سانتی‌گراد بوده است. برای ارزیابی مشخصات فیزیکی، مکانیکی، دوام و آزمایش‌های مربوط به بتن تازه و بتن سخت‌شده، نمونه‌هایی با ابعاد مورد نیاز بر اساس استانداردهای مربوط، ساخته شده است.

نمونه‌های مکعبی $10 \times 10 \times 10$ cm: این نمونه‌ها برای آزمایش‌های مکانیکی مقاومت فشاری و آزمایش مربوط به جذب آب مؤئنه در نظر گرفته شدند. نمونه‌های مکعبی $10 \times 10 \times 15$ cm: این نمونه‌ها برای آزمایش‌های نفوذپذیری تحت فشار آب در نظر گرفته شدند.

جدول (۳) ترکیبات شیمیایی سیمان و پوزولانهای مصرف شده

مشخصات فیزیکی		آنالیز شیمیایی (%)								قانون بوگ (%)				نوع افزودنی شیمیایی
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	LOI	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
وزن ویژه (gr/cm ³)	بلین (cm ² /gr)	۹۵/۱	۰/۶	۱/۱	۱/۰۲	۰/۶	—	۱/۲	—	—	—	—	—	میکروسیلیس
۲/۱۴	—	۶۴/۶	۱۷/۳	۳/۸۶	۴/۶	۱/۳۴	۴/۸	۰/۳۵	۱/۹۸	—	—	—	—	پومیس
۲/۱۲	—	۸۹/۶	۰/۰۴	۰/۲۲	۰/۹۱	۰/۴۲	۰/۰۷	۰/۱۵	۵/۹۱	—	—	—	—	خاکستر پسته برنج
۲/۱۵	—	۲۱/۵	۳/۶۸	۲/۷۶	۶۱/۵	۴/۸	۰/۱۲	۲/۵	۱/۳۵	۵۱/۱	۲۳/۱	۵/۱	۸/۴	سیمان
۳/۱۲	۳۲۰۰													

جدول (۴) الزامات استاندارد برای پوزولان‌ها

ردیف	ویژگیهای شیمیایی	میکرو سیلیس	پومیس	خاکستر	تراس	استاندارد
۱	$\% \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	۹۶/۸	۸۵/۷۶	۸۹/۹	۸۲/۲۲	حداقل ۷۰
۲	$\% \text{SO}_3$	۱/۲	۰/۳۵	۰/۱۵	۰/۰۶	حداکثر ۴
۳	رطوبت $\%$	–	۰/۴۵	۰/۲۳	۲/۴۶	حداکثر ۳
۴	$\% \text{LOI}$	–	۱/۹۸	۵/۹	۸/۵۲۵	حداکثر ۱۰

جدول (۵) طرح اختلاط مخلوط‌های نهایی

ردیف	mix	سیمان (C) (kg)	فیلر (kg)	$(\text{SF})^1$ (kg)	$(\text{P})^2$ (kg)	$(\text{RHA})^3$ (kg)	آب (kg)	شن (kg)	ماسه (kg)	SP^4 (%C)	Po^5 (kg)	W/C	W/b	W/p
۱	CTL	۴۵۰	–	–	–	–	۱۸۰	۸۲۹	۸۲۹	۰/۱۵	۴۵۰	۰/۴	۰/۴	۰/۴
۲	SCC	۴۵۰	۱۵۰	–	–	–	۱۸۰	۶۱۰	۹۱۶	۰/۸	۶۰۰	۰/۴	۰/۴	۰/۳
۳	SF1	۴۱۶	۱۵۰	۳۴	–	–	۱۸۰	۶۰۶	۹۱۰	۱/۱	۶۰۰	۰/۴۳	۰/۴	۰/۳
۴	SF2	۴۵۰	۱۱۶	۳۴	–	–	۱۸۰	۶۰۸	۹۱۲	۱	۶۰۰	۰/۴	۰/۳۷	۰/۳
۵	P1	۳۸۲/۵	۱۵۰	–	۶۷/۵	–	۱۸۰	۶۰۰	۹۰۰	۱/۶	۶۰۰	۰/۴۷	۰/۴	۰/۳
۶	P2	۴۵۰	۸۲/۵	–	۶۷/۵	–	۱۸۰	۶۰۴	۹۰۵	۱/۲	۶۰۰	۰/۴	۰/۳۵	۰/۳
۷	RHA1	۴۰۵	۱۵۰	–	–	۴۵	۱۸۰	۶۰۴	۹۰۵	۱/۹	۶۰۰	۰/۴۴	۰/۴	۰/۳
۸	RHA2	۴۵۰	۱۰۵	–	–	۴۵	۱۸۰	۶۰۶	۹۰۹	۱/۵	۶۰۰	۰/۴	۰/۳۶	۰/۳

۱: میکروسیلیس ۲: پومیس ۳: خاکستر پوسته برنج ۴: فوق روان کننده ۵: مواد پودری

۳-۲- آزمایش‌های بتن سخت‌شده

۳-۲-۱- آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها

نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری که متوسط سه عدد است در جدول ۷ نشان داده شده است. از نتایج مقاومت فشاری دیده می‌شود که در تمام موارد مقاومت فشاری بتن با سن آن افزایش می‌یابد. مقایسه کلی مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته‌شده نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی دوده سیلیس بیشترین مقاومت را دارند و پس از آن‌ها نمونه‌های حاوی خاکستر پوسته برنج قرار می‌گیرند. نمونه‌های حاوی پوزولان پومیس در حالت جایگزین فیلر رفتار بهتر و در حالت جایگزین سیمان رفتار متفاوتی نسبت به بتن‌های خودمتراکم و معمولی شاهد دارند که روند آن در طی گذشت زمان قابل بررسی است.

نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ cm و ارتفاع ۲۰ cm: این نمونه‌ها برای استفاده در آزمایش تسریع‌شده یون کلراید در نظر گرفته شده‌اند. نمونه‌های قابل استفاده در دستگاه RCPT^1 به صورت استوانه‌های ۱۰×۵ است.

۳- جزئیات آزمایش‌ها و نتایج آنها

۳-۱- آزمایش‌های بتن تازه

برای رفتارشناسی بتن خودمتراکم، آزمایش‌های جریان اسلامپ، آزمایش قیف ۷ شکل، آزمایش جعبه L شکل و آزمایش حلقه Z برای تمامی مخلوط‌های نهایی بتن خودمتراکم ساخته‌شده انجام شد که نتایج آن‌ها در جدول ۶ آمده است.

1- Rapid Chloride Penetration Test

میانگینی از مقادیر مختلف نفوذ آب در طول ۱۵ سانتی متری بعد نمونه باشد. نتایج این آزمایش در جدول ۸ آورده شده است.

جدول (۸) نتایج آزمایش نفوذ آب نمونه‌های مکعبی (mm)

	روزه ۷	روزه ۲۸	روزه ۹۰
CTL	۱۶/۳	۱۲/۶	۹/۱
SCC	۱۷/۹	۱۱/۵	۷/۸
SF1	۱۲/۲	۷/۱	۲/۵
SF2	۷/۸	۴/۷	۱
P1	۲۳/۵	۱۶/۴	۶/۷
P2	۱۵/۷	۱۰/۵	۵/۵
RHA1	۱۵/۸	۹/۳	۴/۷
RHA2	۱۳/۲	۶/۵	۲/۲

۳-۲-۳- آزمایش جذب آب مویینه

در این آزمایش نمونه‌های مکعبی $10 \times 10 \times 10$ cm، ۱۴ روز در آون دارای تهویه با دمای $50 \pm 5^\circ\text{C}$ قرار گرفتند تا نمونه‌ها کاملاً خشک شوند و تمامی حفرات آن‌ها از آب خالی شود. پس از گذشت ۱۴ روز وزن نمونه خشک، (m) بر حسب گرم به دست آمد، سپس نمونه‌های آزمایش شده روی پایه درون ظرف به گونه‌ای قرار داده شدند که کف نمونه‌ها در تماس با آب قرار گیرد. ارتفاع آب در ظرف به گونه‌ای است که فقط 1 ± 5 میلی متر بالاتر از کف نمونه باشد. اندازه‌گیری جذب آب مویینه به وسیله اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها در فواصل زمانی ۳، ۶، ۲۴ و ۷۲ ساعت از زمان قرار دادن نمونه‌ها در آب انجام شد و بدین وسیله وزن m_i به دست آمد. پس از آخرین اندازه‌گیری یعنی m_{72} ، با استفاده از دستگاه پرس و با قرار دادن آرماتور بین فک دستگاه و قراردادن نمونه در جهت عمود بر سطح خیس شده، شکسته و میزان بالآمده‌گی آب در نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

جدول (۶) نتایج آزمایشهای بتن تازه

عنوان طرح	جریان اسلامپ	جعبه L شکل		قیف V شکل		حلقه z
		t_{40} (s)	t_{20} (s)	قیف v (s)	اسلامپ (cm)	
SCC	۷۱	۰/۹	۳	۴/۵	۸	۶۹/۵
SF1	۷۱	۰/۹۵	۲	۳/۵	۶/۵	۷۰
SF2	۷۰	۰/۹۸	۱/۵	۲/۷	۶	۶۸/۵
P1	۷۲	۰/۹۵	۲/۸	۴/۲	۷/۲	۷۰/۵
P2	۷۱/۵	۰/۸۶	۲	۴	۷/۵	۶۹/۵
RHA1	۷۲	۰/۹۲	۳/۲	۵	۸/۶	۷۰
RHA2	۷۲	۰/۹۵	۲/۵	۴/۵	۸/۲	۷۰/۵
CTL	اسلامپ معمولی = ۸ cm					

جدول (۷) نتایج کلی آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی (MPa)

	روز ۷	روز ۲۸	روز ۴۲	روز ۹۰	روز ۱۸۰	روز ۲۷۰
CTL	۴۰/۲	۵۲/۸	۵۷/۴	۶۲/۹	۶۳/۷	۶۴/۳
SCC	۴۶/۸	۵۶/۷	۶۱/۵	۶۷/۲	۶۸/۱	۶۸/۷
SF1	۴۸/۷	۶۵/۹	۷۱/۴	۷۹/۸	۸۲/۹	۸۴
SF2	۵۱/۷	۶۹/۵	۷۷/۳	۸۵/۳	۸۸/۹	۹۰/۲
P1	۳۶/۷	۴۶/۵	۵۴/۱	۶۲/۴	۶۶/۴	۶۸/۵
P2	۴۸/۲	۵۸/۲	۶۳/۹	۷۱/۴	۷۴/۳	۷۵/۴
RHA1	۴۲/۲	۵۵/۹	۶۲/۸	۷۰/۸	۷۴	۷۴/۸
RHA2	۴۷/۲	۶۱/۳	۶۹/۱	۷۸/۳	۸۱/۵	۸۲/۴

۳-۲-۲- آزمایش نفوذ آب

نفوذپذیری بتن معمولاً از طریق محاسبه‌ی مقدار آب تحت فشار که برای جریان یافتن به درون یک نمونه‌ی بتنی داخل می‌شود، در یک فاصله‌ی زمانی مشخص تعیین می‌شود. با اندازه‌گیری عمق نفوذ آب پس از شکستن نمونه‌ها، می‌توان به معیاری برای نفوذپذیری بتن دست یافت. در روش اخیر بر اساس BS EN-12390-8:2000 [۱۱]، نمونه‌های مکعبی $15 \times 15 \times 15$ سانتی متری بتن تحت فشار ثابت ۵ اتمسفر، قرار می‌گیرند. پس از گذشت ۳ روز نمونه‌ها به دو نیم تقسیم شده و مقدار نفوذ آب اندازه‌گیری می‌شود. در تعیین مقدار نفوذ آب در نمونه‌ها سعی شد تا عدد معرفی شده،

۹۰ روز به دست آمد که در جدول ۱۱ ارائه شده است.

۳-۲-۴- آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید

مهم‌ترین عامل زنگ‌زدگی و خوردگی آرماتور در بتن، وجود یون کلراید است. در این آزمایش شار عبوری از نمونه بتنی، اندازه‌گیری و از آن برای درجه‌بندی بتن طبق معیار استاندارد استفاده می‌شود. نتایج آزمایش تسریع شده یون کلراید در مورد همه نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸، ۴۲ و ۹۰ روز در جدول ۱۲ نشان داده شده است.

۴- تجزیه و تحلیل و تفسیر نتایج

۴-۱- آزمایش‌های بتن تازه

همه‌ی نتایج به دست آمده نه تنها الزامات آیین‌نامه‌های موجود در این زمینه [۱۲، ۱۳] را برآورده می‌سازند، بلکه در محدوده‌های فوق نزدیک به شرایط ایده‌آل محسوب می‌شوند. همچنین نتایج بالا در مورد همه‌ی مخلوط‌ها با تقریب خوبی در یک محدوده و نزدیک به هم است.

جدول (۹) مقادیر جذب آب موئینه نمونه‌های بتنی در سن ۴۲ روز ($\text{gr}/\text{cm}^2 \times \text{h}^{0.5}$)

	CTL42	SCC42	SF1-42	SF2-42	P1-42	P2-42	RHA1-42	RHA2-42
a_3	0/28	0/2875	0/2225	0/215	0/28	0/2575	0/235	0/225
a_6	0/365	0/3475	0/2625	0/2525	0/365	0/3175	0/305	0/265
a_{24}	0/7	0/65	0/4475	0/4225	0/65	0/5825	0/555	0/465
a_{72}	1/1	1/035	0/66	0/61	0/955	0/89	0/82	0/695
S	12/22	11/23	6/56	5/92	10	9/47	8/7	7/06

جدول (۱۰) مقادیر جذب آب موئینه نمونه‌های بتنی در سن ۹۰ روز ($\text{gr}/\text{cm}^2 \times \text{h}^{0.5}$)

	CTL90	SCC90	SF1-90	SF2-90	P1-90	P2-90	RHA1-90	RHA2-90
a_3	0/27	0/235	0/205	0/185	0/24	0/225	0/205	0/175
a_6	0/345	0/405	0/255	0/225	0/305	0/27	0/27	0/215
a_{24}	0/66	0/595	0/405	0/355	0/565	0/48	0/455	0/375
a_{72}	1/035	0/945	0/54	0/495	0/86	0/77	0/64	0/555
S	11.42	10.5	4.94	4.58	8.58	8.16	6.39	5.67

جدول (۱۱) مقادیر بالآمدگی آب در نمونه‌های بتنی در سنین آزمایش (cm)

	CTL	SCC	SF1	SF2	P1	P2	RHA1	RHA2
۴۲ روز	۶/۶	۶	۳/۸	۳/۴	۵/۳	۵	۴/۶	۴/۱
۹۰ روز	۵/۸	۵/۳	۳	۲/۵	۴/۳	۴/۲	۳/۷	۲/۹

نتایج جذب آب بتن به روش موئینه بر حسب gr/cm^2 از رابطه زیر به دست می‌آید. A سطح مقطع کف نمونه در تماس با آب و $M_i - M_0$ افزایش جرم نمونه در زمان i پس از شروع آزمایش است:

$$a_i = \frac{M_i - M_0}{A} \quad (۱)$$

به طور کلی بین جذر زمان و مقدار آب جذب شده به وسیله‌ی نمونه رابطه خطی مشاهده می‌شود:

$$a_i = c + s\sqrt{t} \quad (۲)$$

در این رابطه s مقدار جذب موئینه است. در این پژوهش a_i برای همه‌ی نمونه‌ها در زمان‌های ۳، ۶، ۲۴ و ۷۲ ساعت بر حسب gr/cm^2 به دست آمد (a_3, a_6, a_{24}, a_{72}). شیب خط به دست آمده S به عنوان مقدار جذب موئینه بر حسب $\text{gr}/\text{cm}^2 \times \text{h}^{0.5}$ برای همه‌ی نمونه‌ها و در سنین ۴۲ و ۹۰ روز به دست آمد که در جداول ۷ و ۸ مشاهده می‌شود. عمق نفوذ آب پس از ۷۲ ساعت برای همه‌ی نمونه‌ها در سنین ۴۲ و

نتایج مشابهی نیز به وسیله‌ی سایرین به دست آمده است. Diamantonis [۷] و همکاران تأثیر مواد پوزولانی را در ویسکوزیته بتن خودمتراکم بررسی کرده و نشان دادند که افزودن پوزولان‌ها باعث افزایش ویسکوزیته نمونه‌های بتنی می‌شود. Memon و همکاران [۱۵] نتایج مشابهی را در مورد خاکستر پوسته برنج به دست آورده‌اند.

جدول (۱۲) نتایج آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید بر حسب کولمب

	۷ روز	۲۸ روز	۴۲ روز	۹۰ روز
CTL	۵۵۵۱	۴۱۲۴	۳۶۹۶	۲۶۷۵
SCC	۵۱۲۹	۳۸۵۶	۳۴۴۹	۲۴۵۳
SF1	۴۶۵۴	۱۷۵۶	۱۱۹۲	۷۲۵
SF2	۴۲۱۲	۱۶۴۴	۱۰۳۶	۵۳۹
P1	۵۷۳۷	۳۸۳۶	۳۲۴۰	۱۸۵۰
P2	۵۱۱۷	۳۲۸۶	۲۷۰۱	۱۴۵۷
RHA1	۴۸۵۷	۲۵۶۲	۲۰۷۷	۱۲۴۶
RHA2	۴۳۴۲	۱۹۱۸	۱۵۰۲	۹۲۹

سیمانی یکسان، طی زمان، مشابه است. در مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های SF1، P1 و RHA1، یعنی مخلوط‌های حاوی میزان مواد سیمانی، آب به مواد سیمانی (w/b) و میزان فیلر خشی یکسان، با نمونه‌های شاهد و همچنین با یکدیگر مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری نمونه SF1 حاوی ۷/۵ درصد دوده سیلیس جایگزین سیمان، بهترین میزان را دارد که از همان سنین اولیه (۷ روز) از نمونه‌های بتن خودمتراکم شاهد و بتن معمولی شاهد بیشتر است؛ در صورتی که در مورد P1 و RHA1 چنین رفتاری مشاهده نمی‌شود. شروع فعالیت پوزولانی سریع دوده سیلیس و تبدیل کریستال‌های هیدروکسید کلسیم به ژل و نیز خاصیت پرکنندگی آن به خاطر شکل کروی و اندازه ریزذراتش و در نتیجه توزیع یکنواخت محصولات به دست آمده از هیدراتاسیون، سبب کسب مقاومت سریع و بیشتر نمونه‌های حاوی دوده سیلیس می‌شود و این روند صعودی کسب مقاومت به صورت چشمگیری ادامه می‌یابد. روند چنین تغییراتی به وسیله‌ی سایر محققین هم نشان داده شده است [۶-۸، ۱۵، ۱۴].

۴-۲- آزمایش‌های بتن سخت شده

۴-۲-۱- آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها

مقایسه بین بتن خودمتراکم شاهد (SCC) و بتن معمولی شاهد (CTL) نشان از عملکرد بهتر SCC نسبت به CTL دارد. چنان که مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری بتن‌های SCC به طور میانگین ۷ درصد بیشتر از بتن معمولی است. تفاوت مقاومت بتن SCC و CTL مخصوصاً در سنین اولیه یعنی ۷ روزه قابل تأمل است که نشان از تراکم بهتر و پخش مناسب تر ذرات سیمان در نتیجه مصرف فوق‌روان کننده و در ادامه هیدراتاسیون بهتر در خمیر سیمان دارد. همچنین مشاهده می‌شود که نسبت مقاومت فشاری SCC به CTL در تمام سنین (بجز ۷ روز) تقریباً ثابت و همان ۷ درصد است که نشان می‌دهد روند کسب مقاومت در هر دو بتن با مواد

۴-۲-۲- آزمایش نفوذ آب

همان‌طور که مشاهده می‌شود به طور کلی می‌توان گفت که نفوذپذیری همه‌ی نمونه‌ها در برابر آب از همان سنین اولیه بر اساس استاندارد DIN، در رده‌ی "نفوذپذیری کم" قرار گرفته است. با مقایسه بتن خودمتراکم شاهد (SCC) و بتن معمولی شاهد (CTL) مشاهده می‌کنیم که نفوذپذیری بتن خودمتراکم نسبت به بتن معمولی هم‌عیار مشابه آن، کمتر است که این میزان کاهش در ۹۰ روز به ۱۸ درصد می‌رسد. نفوذپذیری کمتر مخلوط‌های بتن خودمتراکم را می‌توان به کمتر بودن آب به مواد پودری (w/b) این بتن‌ها، تراکم بهتر به دلیل خودمتراکم‌شوندگی، نیاز نداشتن به لرزش و درجه هیدراتاسیون بالاتر به دلیل پخش ذرات سیمان در حضور

فوق روان‌کننده‌ها و تخلخل کمتر هم در خمیر سیمان و هم در ناحیه انتقال نسبت داد. چنین نتیجه‌ای به‌وسیله‌ی لیمان (Leemann) و همکارانشان [۵] نیز در مورد دو بتن خودمتراکم و معمولی تقریباً مشابه گزارش شده است.

۴-۲-۳- آزمایش جذب آب مویینه

همان‌طور که از نتایج مقدار جذب آب مویینه و مقدار بالآمدگی آب (عمق نفوذ) مشخص است، مقدار جذب آب در بتن خودمتراکم شاهد (SCC) نسبت به بتن معمولی مشابه آن (CTL) کمتر است که این کاهش هم در سن ۴۲ روز و هم در سن ۹۰ روز، ثابت و حدود ۱۰ درصد است. نمونه حاوی پومیس به صورت جایگزین سیمان (P1) در سن ۴۲ روز ۱۲ درصد کاهش عمق نفوذ نسبت به بتن SCC دارد که این میزان در ۹۰ روز به ۱۹ درصد می‌رسد. با توجه به رفتار پومیس و ادامه واکنش‌های پوزولانی آن تا سنین بالاتر به نظر می‌رسد که بهبود نفوذناپذیری آن نسبت به بتن خودمتراکم شاهد با میزان مواد سیمانی یکسان، روند رو به رشد بهتری در پی بگیرد. این میزان کاهش در نفوذپذیری با وجود کاهش میزان سیمان مخلوط نشان می‌دهد که علاوه بر تأثیر خودمتراکمی بر کاهش نفوذپذیری، واکنش‌های پوزولانی هم در کاهش مقدار حفرات مویینه یا اندازه آن‌ها و نیز شکل و ساختار و انقطاع خطوط ارتباطی این حفرات مؤثر بوده است. میزان کاهش برای نمونه P2 با جایگزینی پومیس به جای فیلر بیشتر بوده و عمق نفوذ در ۴۲ روز، ۱۷ درصد و در ۹۰ روز ۲۱ درصد کاهش نشان داده است. همان‌طور که ملاحظه می‌کنیم میزان جذب آب و عمق نفوذ در سنین بالا یعنی ۹۰ روز در P1 و P2 تقریباً نزدیک شده و با توجه به تفاوت آن‌ها در میزان سیمان و فیلر به اندازه مقدار پومیس و یکسانی میزان پوزولان، نتیجه می‌گیریم که در درازمدت بیشتر آثار

مواد پوزولانی، روی خصوصیات تراوایی غالب می‌شود و تفاوت در عیار سیمان تأثیر ناچیزی بر نفوذپذیری دارد. دوده سیلیس به خاطر شکل و اندازه ذراتش یک پوزولان فعال و پرکننده بسیار مؤثر است و سرانجام ترکیب دو خاصیت پرکنندگی و پوزولانی دوده سیلیس در ایجاد یک جسم بسیار متراکم و کم‌تخلخل خود را نشان می‌دهد، به‌گونه‌ای که در مورد SF1 حاوی ۷/۵ درصد دوده سیلیس جایگزین سیمان در طرح SCC شاهد، ۴۲ درصد کاهش در ۴۲ روز و ۵۳ درصد کاهش در ۹۰ روز در میزان جذب آب مویینه نسبت به بتن SCC شاهد مشاهده می‌شود؛ در صورتی که در مورد SF2 با میزان سیمان مشابه SCC و ۷/۵ درصد دوده سیلیس جایگزین فیلر خشی در طرح مزبور حدود ۴۸ درصد کاهش جذب آب در ۴۲ روز و ۵۷ درصد در ۹۰ روز مشاهده می‌شود. در مورد نمونه‌های حاوی خاکستر پسته برنج هم تأثیر مطلوب آن قابل مشاهده است. در نمونه RHA1 با ۱۰ درصد جایگزینی خاکستر به جای سیمان در طرح SCC، ۲۴ درصد کاهش عمق نفوذ و جذب آب در سن ۴۲ روز و ۳۰ درصد در ۹۰ روز مشاهده می‌شود. این میزان در نمونه RHA2 با ۱۰ درصد جایگزینی خاکستر به جای فیلر خشی در طرح SCC شاهد، ۳۷ درصد کاهش در ۴۲ روز و ۴۵ درصد کاهش جذب آب مویینه در ۹۰ روز را نسبت به بتن خودمتراکم شاهد (SCC) نشان می‌دهد.

Zhu و Bartos نیز نشان دادند که مخلوط‌های بتن خودمتراکم گونه‌ای قابل ملاحظه‌ای نفوذپذیری کمتری آب دارند [۶].

۴-۲-۴- آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید

نگاهی کلی به نتایج آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید، نشان می‌دهد که نفوذ یون کلراید همه‌ی نمونه‌ها در سن ۷ روز در محدوده "نفوذپذیری زیاد" قرار می‌گیرند که این

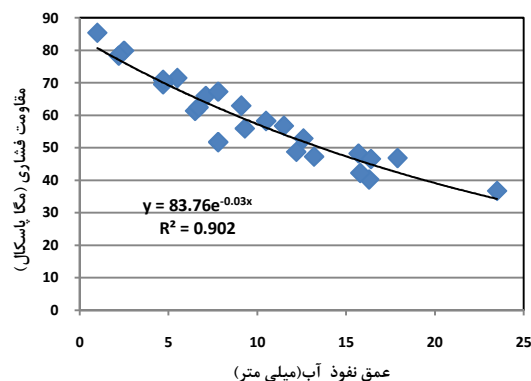
نتایج با بهبود مطلوبی، در سن ۲۸ روز در مورد همه‌ی نمونه‌ها بجز بتن معمولی شاهد، به زیر مرز محدوده با نفوذ زیاد می‌رسند. به بیان دیگر همه‌ی مخلوط‌های بتن خودمتراکم بررسی شده در این پژوهش در سن ۲۸ روز در محدوده با نفوذپذیری یون کلراید متوسط یا حتی کم قرار می‌گیرند و در ادامه قابل مشاهده است که همه‌ی مخلوط‌های بتن خودمتراکم حاوی مواد فیلری غیرخشتی شامل انواع پوزولان‌ها، در سن ۹۰ روز، از نظر نفوذ یون کلراید در محدوده کم یا خیلی کم قرار گرفته است.

مقایسه نتایج نمونه‌های SF1، P1 و RHA1 و بتن خودمتراکم شاهد (SCC) که میزان سیمان یا مواد سیمانی، آب به مواد سیمانی w/b و میزان فیلر خشتی در همه آن‌ها ثابت است و تفاوت تنها در نوع ماده پوزولانی جایگزین سیمان در SCC است، نشان می‌دهد که در SF1 از همان سنین اولیه یعنی ۷ روز، به دلیل خاصیت پرکنندگی مناسب و نیز فعالیت سریع پوزولانی آن، کاهش ۹ درصدی نفوذ یون کلرید نسبت به SCC وجود دارد. چنین رفتاری از P1 مشاهده نمی‌شود و نمونه حاوی پومیس به دلیل کاهش میزان سیمان مخلوط و نداشتن فعالیت مناسب مواد پوزولانی جایگزین در سنین اولیه، حتی رفتاری بدتر از بتن معمولی شاهد نشان می‌دهد و ۱۲ درصد نفوذ یون کلراید بیشتر نسبت به SCC شاهد گزارش شده است. چنین رفتاری در نتایج دیگر آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش نیز گزارش شده است. در مورد RHA1 یعنی نمونه بتنی حاوی خاکستر پوسته برنج، با وجود کاهش سیمان، ۵ درصد کاهش نفوذ یون کلر در همان سن ۷ روز نشان می‌دهد؛ در صورتی که چنین رفتاری در مورد آزمایش‌های مکانیکی مانند مقاومت فشاری مشاهده نمی‌شود. با توجه به روند رو به رشد بهبود رفتار بتن‌های خودمتراکم حاوی پوزولان با گذشت زمان، می‌توان پیش‌بینی کرد که بهبود

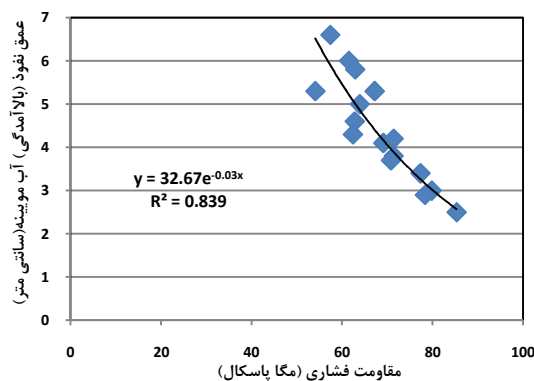
عملکرد این بتن‌ها نسبت به بتن SCC شاهد و بتن معمولی شاهد، در سنین بالاتر بیشتر شود.

با بررسی نتایج بین طرح‌های مختلف مشاهده می‌شود، نمونه‌های حاوی دوده سیلیس یعنی SF1 و SF2 بیشتر مقاومت خود در برابر نفوذ یون کلراید، یعنی بیش از ۷۰ درصد آن را تا سن ۲۸ روز کسب کرده است. نمونه‌های حاوی پومیس ۵۰ درصد تا سن ۲۸ روز و آن هم بعد از سنین اولیه یعنی ۷ روز، کسب مقاومت داشته است بیشتر مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید نمونه‌های حاوی پومیس هم به صورت جایگزین سیمان و هم به صورت جایگزین فیلر، بعد از ۲۸ روز و مخصوصاً بعد از ۴۲ روز کسب شده است. این رفتار در دیگر آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش مخصوصاً آزمایش‌های مربوط به نفوذ مشاهده می‌شود و نشان از دیربازده بودن پوزولان پومیس به دلیل تأخیر در شروع و تأثیر واکنش‌های پوزولانی آن در بتن دارد. با توجه به نتایج آزمایش تسریع شده نفوذ یون کلراید انجام شده روی مخلوط‌ها در این پژوهش و تفسیر آن‌ها، تأثیر بسیار مطلوب استفاده از پوزولان‌ها با خواص فیزیکی و فعالیت شیمیایی مختلف ثابت می‌شود. خودمتراکمی همان‌طور که مقایسه بتن خودمتراکم شاهد و بتن معمولی شاهد مؤید این مطلب بود، تأثیر مطلوبی در کاهش نفوذ یون کلراید دارد ولی این تأثیر در مقابل تأثیر حضور مواد فیلری غیرخشتی یعنی همان پوزولان‌ها بسیار کم است. چنانچه دلایل کسب این نتایج مطلوب در مورد مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید بتن‌های خودمتراکم حاوی مواد پوزولانی را تنها ناشی از خودمتراکم بودن آن‌ها نسبت به بتن معمولی و در نتیجه‌ی مصرف فوق‌روان‌کننده‌ها، تحریک روانی بتن و تراکم مواد پودری بسیار ریز مضاف، و پخش مناسب‌تر ذرات سیمان و مواد سیمانی و در نتیجه ارتقا و بهبود هیدراتاسیون در سنین اولیه و با گذشت زمان

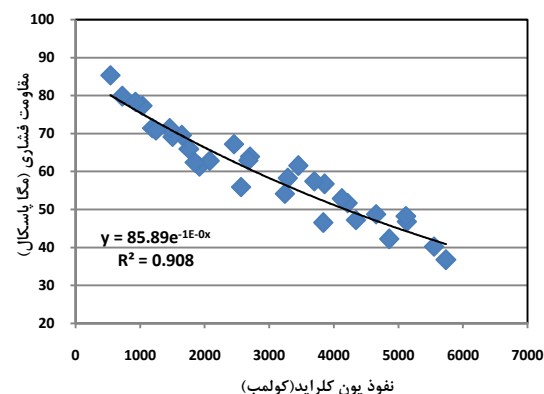
دیگر برای بتن‌های مشابه با نمونه‌های ساخته‌شده برای آزمایش بهره گرفت.



شکل (۲) نمودار رابطه بین نتایج آزمایش مقاومت فشاری و عمق نفوذ آب



شکل (۳) نمودار رابطه بین نتایج آزمایش مقاومت فشاری و جذب آب مویینه



شکل (۴) نمودار رابطه بین نتایج آزمایش مقاومت فشاری و نفوذ تسریع شده یون کلراید

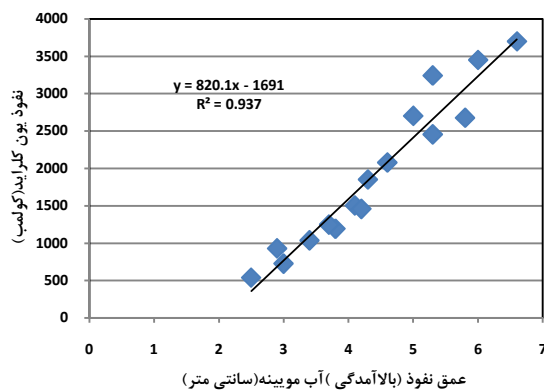
تا سنین نهایی و به طور کلی بهبود ساختار منفذی ماتریس سیمان و ناحیه انتقال اطراف ذرات سنگ‌دانه جستجو کنیم و نیز کاهش میزان و شکل و قطر و نحوه ارتباط حفرات مویینه در خمیر ماتریس سیمان و ناحیه انتقال ناشی از خواص فیزیکی و میکروفیلری پوزولان‌ها و فعالیت پوزولانی آن‌ها و در نتیجه تشکیل محصولات هیدراتاسیون ثانویه را دلایل دیگر بشماریم، به نظر می‌رسد که نتایج بالا کمی دور از واقعیت است. چرا در آزمایش‌های مربوط به نفوذپذیری با وجود کسب نتایج مطلوب، بهبود در شرایط، چنین روند رو به رشدی را چه از نظر مقدار و چه از نظر سرعت دستیابی، نسبت به نمونه‌های شاهد نشان نمی‌دهد.

۵- مقایسه نتایج آزمایش‌های مختلف با یکدیگر

نمودارهای شکل‌های ۲ تا ۴، ارتباط و همبستگی نتایج آزمایش‌های مربوط به همه‌ی نمونه‌ها را در مقایسه با مقاومت فشاری تا سن ۹۰ روز نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج آزمایش‌های انجام‌شده با ضرایب همبستگی خوب و به شکل نمایی با نتایج مقاومت فشاری در ارتباط است. چنان‌که در شکل‌ها آورده شده است این ارتباط به صورت معکوس است؛ یعنی با افزایش مقدار مقاومت، میزان نفوذ کاهش پیدا کرده است.

از آن‌جا که نفوذ آب و بالآمدگی آب در نمونه بتنی در آزمایش جذب مویینی، هر دو به مقدار تخلخل بتن و مقدار فضاهای خالی در بتن و شکل و ارتباط این فضاها مرتبط است، تشابه روند تغییرات نتایج آزمایش‌های نفوذ آب و جذب مویینی آب منطقی به نظر می‌رسد.

این ارتباط با یک رابطه خطی و ضریب همبستگی بسیار خوب در مورد همه‌ی نمونه‌ها در سن ۹۰ روز در شکل ۵ نشان داده شده است. از این نمودار می‌توان در تخمین نتایج هر کدام از این دو آزمایش بر اساس آزمایش



شکل (۷) نمودار رابطه بین نتایج آزمایش نفوذ یون کلراید و جذب آب مویینه

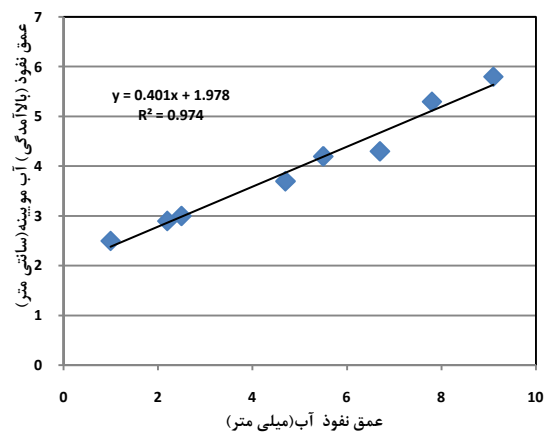
۶- نتیجه گیری

بر اساس تحقیقات انجام شده و با استفاده از تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمدین گونه نتیجه گرفته می شود:

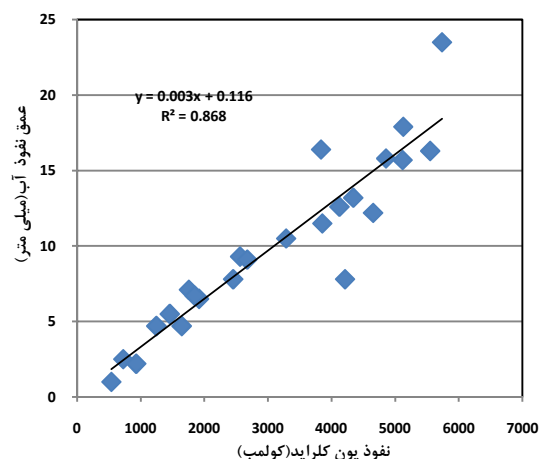
۱. علاوه بر دوده سیلیس که استفاده از آن در ساخت بتن های خودمتراکم متداول است، نتایج آزمایش ها نشان می دهد که امکان استفاده از پوزولان پومیس به عنوان پوزولان طبیعی و خاکستر پوسته ی برنج به عنوان پوزولان مصنوعی در بتن خودمتراکم وجود دارد و دستیابی به چنین بتنی با کیفیت مطلوب، با توانایی برآورده ساختن الزامات بتن خودمتراکم از نظر شرایط بتن تازه [مانند قابلیت و سرعت تغییر شکل مناسب، بدون بروز جداشدگی و آب انداختگی]، میسر است.

۲. از نتایج آزمایش بر خواص مکانیکی مخصوصاً مقاومت فشاری بتن های خودمتراکم حاوی مواد پوزولانی (دوده سیلیس، پومیس و خاکستر پوسته ی برنج) چنین برمی آید که هم در حالت جایگزین سیمان و هم در حالت جایگزین فیلر خنثی، نمونه های حاوی دوده سیلیس بهترین رفتار و بیشترین مقاومت را دارند و پس از آن ها نمونه های حاوی خاکستر پوسته ی برنج قرار می گیرد. نمونه های حاوی پوزولان پومیس در حالت جایگزین فیلر رفتار بهتر

در نمودارهای ۶ و ۷ ارتباط بین نتایج آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید با آزمایش های نفوذ آب در ۷، ۲۸ و ۹۰ روز و جذب آب مویینه در سنین ۴۲ و ۹۰ روز به صورت جداگانه برای همه ی نمونه ها بررسی شده است. با وجود برخی تفاوت ها در سازوکار نفوذ در این آزمایش ها، به دلیل تأثیر یکسان مهم ترین عامل در نفوذ که همان کاهش و افزایش تخلخل و شکل و ارتباط فضاهای خالی در بتن است، ارتباط خوبی با ضرایب همبستگی بالا بین این آزمایش ها برقرار است.



شکل (۵) نمودار رابطه بین نتایج آزمایش نفوذ آب و جذب آب مویینه در سن ۹۰ روز



شکل (۶) نمودار رابطه بین نتایج آزمایش نفوذ یون کلراید و نفوذ آب

این که این کاهش نفوذپذیری با افزایش سن نمونه‌ها چشم‌گیرتر بوده و کمترین روند بهبود مقاومت، به بتن‌های خودمتراکم و معمولی شاهد بدون حضور مواد پوزولانی مربوط می‌شود.

۶- مراجع

- [1] Skarendahl, A. and Petersson, O., "State of the Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC, Self-Compacting Concrete", Report No.23, pp141, 2001.
- [2] Hajime Okamura and Masahiro Ouchi, "Self-Compacting Concrete", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No.1, pp.5-15, 2003.
- [3] Bartos, P.J.M., and Grauers, M., "Self-Compacting Concrete", Concrete, Vol.33, No.4, pp.9-14, 1999.
- [4] Kahn Lawrence, F., Kurtis Kimberly, E. and Horta, A., "Evaluation of Self-Compacting Concrete for Bridge Structure Applications", Georgia Tech Department of Transportation, Project no. 2042, URI: <http://hdl.handle.net/1853/7159>, 2007.
- [5] Leemann, A., Munch, B., Gasser, P. and Holzer, L., "Influence of Compaction on the Interfacial Transition Zone and the Permeability of Concrete", Cement and Concrete Research, Vol.36, pp 1425-1433, 2006.
- [6] Zhu, W., and Bartos, J.M., "Permeation Properties of Self-Compacting Concrete", Cement and Concrete Research, Vol 33, pp 921-926, 2003.
- [7] Yazici, H., "The Effect of Silica Fume and High-Volume Class C Fly Ash on Mechanical Properties, Chloride Penetration and Freeze-Thaw Resistance of Self-Compacting Concrete", Construction and Building Materials, Vol 22, pp 456-462, 2009.
- [8] N. Diamantonis, I. Marinos, M.S. Katsiotis, A. Sakellariou, A. Papathanasiou, V. Kaloidas, M. Katsioti, "Investigations about the influence of fine additives on the viscosity of cement paste for self-compacting concrete" Construction and Building Materials, Article in Press, 2010.

و در حالت جایگزین سیمان مقاومت کمتری نسبت به بتن خودمتراکم شاهد نشان می‌دهند، هرچند که با گذشت زمان این اختلاف کمتر می‌شود.

۳. نتایج آزمایش‌های مربوط به نفوذپذیری آب (آزمایش نفوذ آب و جذب آب موینه) نشان دهنده‌ی کیفیت بالای نمونه‌های بتن خودمتراکم حاوی مواد پوزولانی است. از آزمایش‌های نفوذپذیری نتیجه گرفته می‌شود که همه‌ی نمونه‌های حاوی دوده سیلیس و خاکستر پسته‌ی برنج از همان سنین اولیه (۷ روز) نفوذپذیری کمتری نسبت به بتن خودمتراکم شاهد نشان می‌دهند و این رفتار را در سنین بالاتر ادامه می‌دهند به‌طوریکه با گذشت زمان، افزایش این اختلاف با روند صعودی مخصوصاً در مورد نمونه‌های حاوی دوده سیلیس مشهود است. این اختلاف به دلیل فعالیت پوزولانی شدید دوده سیلیس و خاصیت پرکنندگی خوب آن است.

۴. نکته‌ی قابل توجه، نفوذپذیری بسیار کم نمونه‌های بتن خودمتراکم حاوی خاکستر پسته‌ی برنج هم در حالت جایگزین سیمان و هم در حالت جایگزین فیلر خشتی در آزمایش‌های نفوذپذیری است. به‌طوری‌که نمونه‌های حاوی خاکستر پسته‌ی برنج مخصوصاً در حالت جایگزین فیلر خشتی، رفتار بسیار خوب و تقریباً مشابه نمونه‌های حاوی دوده سیلیس نشان می‌دهند. تأثیرات فیزیکی و شیمیایی خاکستر پسته‌ی برنج، کانال‌های آزاد جریان در خمیر سیمان و ناحیه‌ی انتقال بتن را اصلاح می‌کند که منجر به ایجاد ساختار منفذی غیریپوسته با تخلخل کلی و مخصوصاً موینگی کمتر می‌شود.

۵. با توجه به نتایج آزمایش‌های تسریع‌شده نفوذ یون کلراید و مقاومت الکتریکی می‌توان گفت نمونه‌های بتن خودمتراکم حاوی مواد پوزولانی در محدوده‌ی نفوذپذیری متوسط و کم و حتی خیلی کم قرار گرفته است؛ ضمن

- [13] Skarendahl, A. Petersson, O., "State of the Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC, Self-Compacting Concrete", Report No. 23, 2001, 141pp, 2010.
- [14] Shazim Ali Memon, Muhammad Ali Shaikh, Hassan Akbar, "Utilization of Rice Husk Ash as viscosity modifying agent in Self Compacting Concrete" Article in Press, 2010.
- [15] Akram T, Memon SA, Obaid H. Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash. Constr Build Mater 2009; 23(2): 703-12.
- [9] Persson, B., "Sulphate Resistance of Self-Compacting Concrete", Cement and Concrete Research, Vol 33, pp 1933-1938, 2003.
- [۱۰] آیین نامه استانداردها پوزولان های طبیعی ایران،
موسسه ملی استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، تهران،
۱۳۷۶.
- [11] ASTM C 618-03. Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. Philadelphia (PA): American Society for Testing and Materials; 2003.
- [12] EFNARC, "Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete", Feb. 2002, <http://efnarc.org>

Evaluation of Durability of Self-consolidating Concrete Containing Pozzolanic Materials

A.A. Ramezaniapour^{1*}, M. Samadian², M. Mahdikhani³, F. Moodi⁴

1- Prof., Amirkabir University

2- M.Sc., Amirkabir University

3- Ph.D Student., Amirkabir University

4- Assistant Prof., Amirkabir University

aaramce@aut.ac.ir

Abstract:

Self-consolidating concrete (SCC) has been used increasingly over the last two decades, especially in the pre-cast concrete industry because of its ability to consolidate without vibration even in congested areas. The development of SCC mixture design has been driven mostly by private companies who desired to utilize advantages of SCC. Consequently, there exists limited public information regarding the performance of SCC mixtures. In addition, SCC can be characterized as flowing concrete without segregation and bleeding, capable of filling spaces and dense reinforcement. Further it should be able to flow through, and completely fill the form without vibration. Due to the technical and economic advantages that can be accrued by the use of pozzolans, they play an important role when added to Portland cement by usually increasing the mechanical strength and durability of concrete structures.

This paper presents an experimental study on the properties of different self-consolidating concrete mixes containing three types of pozzolanic materials in comparison with SCC mixtures without any pozzolanic materials and conventionally vibrated concrete mixtures. Silica fume, pumice powder and rice husk ash were used for both cement and filler replacements. Various experiments such as slump-flow, J-ring, L-box, V-funnel and sieve segregation resistance were investigated for fresh concrete. Further, compressive strength, water and chloride-ion permeability and capillary water absorption at various days were carried out to determine the properties of self-consolidating concretes.

The test results indicated that pozzolanic materials such as RHA and VP can be used to produce SCCs. Regarding the strength properties, the test results showed that the 270-day compressive strength of ordinary SCC is about 70 MPa, while SCC mixtures containing SF, RHA and VP have strengths more than 90, 77 and 76 MPa, respectively. In addition, the results proved that artificial and natural pozzolans enhanced the durability of SCC and reduced the penetration, significantly. For instance, adding 15% pumice and 7% silica fume in the SCC specimen reduced the water depth at 90 days by 19% and 54%, respectively.

Keywords: Self-consolidating concrete (SCC), Pozzolan, Rice husk ash (RHA), Pumice, Durability.