تحقیقات بتن
سال سیزدهم، شمارهٔ سوم
پائیز ۹۹
ص ۹۱ – ۷۷
تاریخ دریافت: ۹۸/۷/۲۵
تاریخ پذیرش: ۹۹/۵/۳

بررسی آزمایشگاهی اثر پوزولان زئولیت بر کارایی و دوام بتن خودتراکم در معرض یون کلراید

سید شهاب امامزاده *
استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه خوارزمی تهران.

چکیده

تکنولوژی ساخت بتن خودتراکم به‌دلیل کیفیت بالا در نواحی پرمیلگرد در سال‌های اخیر در دنیا مطرح شده است. چون این نوع بتن مصرف سیمان بالایی دارد یکی جایگزین‌های سیمان که مورد توجه محققین نیز بوده است، پوزولان زئولیت است. با اینحال تاکنون دوام این نوع بتن در نواحی کلرزا مانند سواحل خلیج فارس کمتر مورد توجه قرار گرفته است. برنامه مطالعاتی در این مقاله شامل آزمایش های بتن تازه و سخت شده برای درصدهای مختلف جایگزینی پوزولان زئولیت است. برای این منظور، بر روی نمونه‌های بتن خودتراکم تازه حاوی زئولیت آزمایش‌های جعبه Uشکل، قیف Vشکل، جریان اسلامپ، حلقه J و پایداری الک انجام شده است. همچنین برای بررسی دوام نمونه‌ها، آزمایش جذب آب، نفوذ یون کلر و عمق نفوذ آب تحت فشار برای بتن سخت شده انجام گردیده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزودن پوزولان زئولیت به طور قابل توجهی باعث افزایش لزجت بتن تازه و بهبود خواص رئولوژی آن می‌گردد. طبق نتایج آزمایش‌ها، جایگزینی ۵ تا ۱۵ درصدوزنی سیمان با زئولیت باعث بهبود شرایط عملکردی بتن تازه خود تراکم می‌شود. بهترین نتایج برای دوام بتن در درصدهای ۱۰و ۱۵ بدست می‌آید. از طرفی دیگر، افزایش بیش از حد درصد زئولیت باعث کاهش کارایی و اسلامپ شده و موجب بالاتر رفتن مصرف فوق روان‌کننده و آب می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: زئولیت، دوام، بتن خود تراکم، بتن تازه، بتن سخت شده.

* نویسنده مسئول: resan55@gmail.com

۱- مقدمه

امروزه استفاده از بتن خودتراکم در ساخت سازه‌های بتنی رو به افزایش است. طبق تعریف مؤسسه PCI بتن SCC بتنی با کارایی بالا است که می‌تواند بدون جداشدگی دانه‌ها و آب انداختگی در میان تراکم زیادآرماتورها تحت اثر وزن خود و بدون هیچگونه لرزاننده داخلی یا خارجی فضاهای خالی را پر نماید[1]. بتن خودتراکم نخست در سال ۱۹۸۶ توسط Okamura. H در ژاپن پیشنهاد گردید و در سال ۱۹۸۸ این نوع بتن در کارگاه ساخته شد و نتایج قابل قبولی از نظر خواص مکانیکی بتن کسب نمود. در راستای توسعه تکنولوژی اجرای بتن خودتراکم در سایر کشورها دستورالعمل‌هایی مانند EFNARC اروپا، Brite EU Ram سوئد، AFGC فرانسه و NCS نروژ تدوین شد. در ایران استفاده از بتن خودتراکم از چندین سال قبل آغاز شده است. برای مثال می توان از مصرف بتن خود تراکم در تونل رسالت تهران نام برد. مزیت اصلی بتن خودتراکم نسبت به بتن معمولی،کاهش هزینه نیروی انسانی و عدم نیاز به لرزاننده و سرعت زیاد اجرا است. از طرف دیگر، بتن خودتراکم برای ایجاد لزجت بیشتر و جلوگیری از جدائی دانه‌ها نیاز به مصرف زیاد سیمان دارد که این خود باعث افزایش هزینه می‌شود. یکی از مسائل بهینه‌سازی مصرف سیمان، استفاده از پوزولان‌ها به عنوان جایگزین سیمان برای کاهش هزینه و ارتقای کیفیت آن است. هدف این تحقیق بررسی امکان استفاده از پوزولان زئولیت به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در بتن خود تراکم و افزایش دوام و مقاومت بتن در پروژه‌های حاشیه خلیج فارس و بندرکنگان است.

صمیمی (۲۰۱۸) تاثیر زئولیت و پودر پومیس را بر دوام بتن خود تراکم بررسی نمود. در این تحقیق، با جایگزینی ۱۰ درصد پودر پومیس مقاومت بتن کوتاه مدت و بلند مدت بتن افزایش یافت. با جایگزینی ۱۵ درصد از سیمان با پوزولان زئولیت و پودر پومیس پیشترین مقاومت در برابر حمله اسید سولفوریک بدست آمد[۱]. رنجبر (۲۰۱۳) در پژوهشی تاثیرات پوزولان طبیعی روی خصوصیات بتن تازه و سخت بتن خود تراکم را مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق اثر پوزولان زئولیت بر روی بتن تازه و رفتار این بتن در حالت تازه و همچنین حالت سخت شده بررسی شد. آزمایش‌های جریان اسلامپ، شاخص پایداری، T_{50}، قیف V بر روی بتن تازه انجام شد. در طرح ها مشاهده شد که نتایج آزمایش‌های جریان پذیری و قابلیت عبور و ویسکوزیته بتن تازه افزایش داشته و خصوصیات مکانیکی بتن سخت شده بهبود یافته است[۲]. ثابت(۲۰۱۳) در تحقیق دیگری دوام بتن خودتراکم توانمند را با افزودن پوزولان زئولیت و خاکستر بادی بررسی نمود. در این تحقیق اثر پوزولان زئولیت و خاکستر بادی بر روی بتن خود تراکم در حالت تازه و سخت مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که پوزولان‌های مصرفی باعث بهبود خواص مکانیکی و رئولوژی بتن خود تراکم می‌شوند[۳].

رمضانیان‌پور و همکاران (۲۰۱۲)کاربرد زولیت را در ساخت بتن خود تراکم و بادوام بررسی نمود. آنها نشان دادند که با درصد جایگزینی ۱۰ الی ۲۵ درصد به مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال می توان رسید. همچنین دوام نمونه‌ها در برابر یون کلر نیز بررسی شد. با اینحال یکی از تفاوت های تحقیق حاضر با تحقیق رمضانیانپور، استفاده از سنگدانه های موجود در خلیج فارس و استفاده از سیمان شرکت ساروج کنگان است[۴].

احمدی(۱۳۹۴) تاثیر کاربرد زئولیت را بر مقاومت و نفوذپذیری بتن با عیارهای سیمانی مختلف بررسی نمود. برای این منظور آزمایش‌های مقاومت فشاری، جذب آب مویینه، تعیین پروفیل یون کلر و پراش پرتو ایکس بر روی نمونه‌های بتن انجام شد. در ساخت نمونه‌ها از عیارهای مختلف سیمان و همچنین درصد های مختلف، زئولیت و آب به سیمان استفاده شد. اسلامپ مخلوط ها بین ۸ تا ۱۰ سانتیمتر بدست آمد و برای رسیدن به کارایی مناسب از یک نمونه فوق روان کننده پلی کربکسیلات استفاده شد. از سه عیار مختلف ۳۰۰،۳۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب وهمچنین درصد مختلف زئولیت(۰،۱۰،۱۵ درصد) به عنوان جایگزین سیمان و دونسبت آب به سیمان ۰/۵و۰/۴ استفاده شد. بر اساس نتایج بدست آمده به نظر می رسد۱۵ درصد زئولیت به طور قابل توجهی موجب بهبود خواص نفوذپذیری بتن می‌شود. به گونه‌ای که نفوذ آب و نفوذ یون کلر در بتن با توجه به آزمایش‌های جذب آب حجمی و مویینه و تعیین پروفیل یون کلر، به طور قابل توجهی کاهش یافت. تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی نشان داد که ریزساختار مربوط به نمونه‌های دارای زئولیت و نسبت آب به سیمان پایین متراکم تر از نمونه‌های بدون زئولیت است و علاوه بر خلل و فرج کمتر، نمونه‌های همگن تری بدست می‌آید[۴].

احمدی(۱۳۹۶) در پژوهش دیگری به بررسی تأثیر استفاده از درصدهای مختلف زئولیت، متاکائولین و میکروسیلیس بر کارایی

و خواص بتن خودمتراکم سخت شده مورد پرداخت. برای این کار از ۳۱ طرح اختلاط استفاده شد. آزمایش‌های جریان اسلامپ، قیف V و جعبه L و نیز مشخصات سخت شده آن با مقاومت فشاری بررسی شده است. به طور کلی نتایج آزمایش نشان می‌دهد که استفاده از زئولیت، میکروسیلیس ومتاکائولین در بتن خود متراکم در کنار استفاده از روان کننده مناسب، مشکلات ناپایداری از قبیل انسداد، جداشدگی،آب انداختگی را کاهش می‌دهد، افزایش لزجت در درصدهای بالا، در کنار قابلیت عبورو قابلیت جریان در محدوده قابل قبول بوده است و مقاومت فشاری اکثر بتن‌ها نیز نسبت به طرح شاهدافزایش می یابد[۶] .

چان و جی (۱۹۹۹) نشان دادند که جایگزینی بخشی از سیمان با مواد مکمل، راه حلی عملی در کاهش قیمت بتن خودمتراکم است، به خصوص اگر این مکمل‌ها مواد جانبی صنایع باشند.گزارش شده که با جایگزینی تا ۵۰ درصد از سیمان پرتلند با مواد مکمل معدنی، بتن خود متراکم با هزینه مقرون به صرفه قابل تولید خواهد بود[۷]. گسگلو (۲۰۰۹) از مواد مکمل معدنی مانند خاکستر بادی، روباره کوره آهنگدازی و دوده سیلیس به طور موفقیت آمیزی در بتن خودمتراکم استفاده نمود[۸]. فنگ و پنگ(۲۰۰۵) تحقیقاتی را روی خواص زئولیت بر بتن معمولی انجام دادن و نشان می دادند که این ماده می‌تواند از آب انداختگی و جداشدگی بتن تازه جلوگیری کند، نفوذپذیری بتن سخت شده را کاهش دهد و سبب افزایش مقاومت و پایایی بتن شود[۹]. پون و همکاران (۲۰۰۱) از دیگر پوزولان‌ها مانند متاکائولن که یک ماده آلومیناسیلیکاتی با فعالیت بسیار بالا است در تحقیقات خود استفاده نمودند. و نشان دادند که مقاومت بتن معمولی با افزودن متاکائولن به‌ویژه در روزهای اولیه عمل‌آوری افزایش می‌یابد. آنها نشان دادند 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 سیلیسی و یا خاکستر بادی استفاده شده است، می‌شود[۱۰].

تاکنون تحقیقات انجام شده اثر زئولیت را بر پارامترهای مقاومتی بتن خودتراکم نشان دادند. اما در زمینه اثر زئولیت بر دوام و خواص رئولوژیکی بتن تحقیقات خاصی انجام نشده است. در این تحقیق با ساخت چند نمونه آزمایشگاهی با طرح اختلاطی بر اساس دستورالعمل EFNARC[۱۱]، اثر زئولیت با در صدهای مختلف بر نفوذپذیری بتن و خواص کارایی آن مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مصالح مصرفی و طرح اختلاط

مواد مورد نیاز برای ساخت SCC به شرح زیر است:

سیمان: نوع و مقدار سیمان بر اساس خواص و دوام مورد نیاز تعیین می‌گردد. معمولا مقدار سیمان در بتن خود تراکم بین ۳۵۰-۴۵۰ kg/m^3 است.

سنگدانه درشت: تمام سنگدانه‌های درشت که برای بتن معمولی استفاده می‌شود، قابل مصرف در SCC است. اندازه حداکثر معمولا بین 16~20 mm است. بطور کلی مقدار سنگدانه درشت در SCC کمتر از بتن معمولی است. زیرا سنگدانه درشت انرژی زیادی مصرف می‌کند که باعث کاهش جاری شدن بتن می شود و در هنگام عبور از موانع مانند آرماتور سبب مسدود شدن بتن می‌گردد.

سنگدانه ریز: تمام سنگدانه‌های ریز که برای بتن معمولی استفاده می شود، برای SCC نیز مناسب است. هر دو نوع ماسه شامل شکسته و گردگوشه قابل استفاده است.

مواد مکمل معدنی: انواع مواد مکمل معدنی یا پوزولان‌ها را می‌توان در SCC مصرف کرد. این مواد برای بهبود خواص بتن تازه و یا بتن سخت شده و دوام مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله این مواد می‌توان میکروسیلیس، سرباره و روباره را نام برد.

فوق کاهنده‌آب: فوق کاهنده آب یا فوق روان کننده ها از مواد بسیار مهم برای ساخت SCC محسوب می‌شوند.

مواد اصلاح‌کننده ویسکوزیته: مواد اصلاح‌کننده برای افزایش مقاومت جداشدگی در SCC مصرف می‌شود. استفاده از این مواد نه تنها ویسکوزیته مخلوط را افزایش می‌دهد بلکه اثر تغییر در آب مخلوط را کاهش می دهد. به هر حال مخلوط‌های بتن خودتراکمی که عملکرد عالی پایداری از خود نشان می‌دهند و از سطح کافی ویسکوزیته برخوردار هستند تا از جدا شدگی جلوگیری کنند، نیاز به مواد اصلاح کننده ویسکوزیته ندارند.

فیلرها: به‌دلیل الزامات رئولوژی خاص SCC، هر دو مواد افزودنی فعال و خنثی برای بهبود کارایی و همچنین برای تعادل در مقدار مصرف سیمان، مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از فیلرها مانند پودر سنگ گرانیت سبب پایداری مخلوط بتن خودتراکم

می‌شود، در نتیجه می‌توان جایگزین مواد اصلاح کننده ویسکوزیته مصرف نمود. اندازه فیلرها معمولا کمتر از ۰/۱۲۵ mm است.

سیمان مصرفی: برای ساخت نمونه‌ها از سیمان پرتلند تیپ ۲ کنگان استفاده شده است که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است. این سیمان شرایط استاندارد[۱۲] ASTM C150 را دارد.

زئولیت مصرفی: زئولیت مورد استفاده در این تحقیق از معدنی در شمال سمنان استخراج شده است. آنالیز شیمیایی و خواص فیزیکی این نوع زئولیت در جدول۱ آورده شده است. پوزولان زئولیت به رنگ کرم روشن بوده و جذب آب آن تا ۶۰٪ است.

جدول۱- ترکیب شیمیایی سیمان و زئولیت

ترکیبات	سیمان	زئولیت
SiO_2	۲۰٫۳	۶۸٫۵
Fe_2O_3	۵٫۱	۰٫۸۹
Al_2O_3	۴٫۱	۱۱٫۱
CAO	۶۲٫۵	۴٫۸۳
MgO	۳٫۵	۰٫۷۹
NA_2O	۰٫۴	۳٫۲
SO_3	۲٫۲	۰٫۰۶۸

با توجه به استفاده از سیمان شرکت ساروج کنگان آزمایش‌های دقیق‌تری بر روی این نوع سیمان انجام شد که مشخصات فیزیکی آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

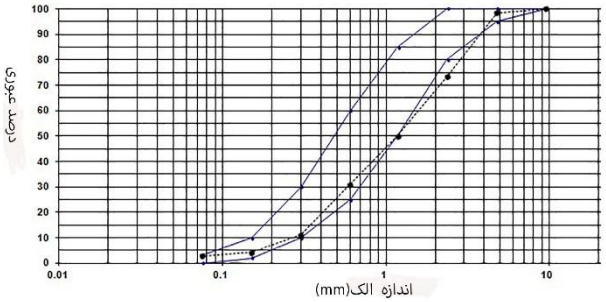
جدول۲- مشخصات فیزیکی سیمان پرتلند تیپ۲ کنگان

ویژگی‌های فیزیکی		نمونه	ASTM C150
مقاومت فشاری (Kg/cm^2)	۳ روزه	۱۳۷	۱۰۰
	۷ روزه	۲۴۲	۱۷۵
	۲۸ روزه	۳۳۱	۳۱۵
زمان گیرش (دقیقه)	ابتدایی	۱۲۳	حداقل ۴۵
	نهایی	۱۸۵	حداکثر ۳۶۰

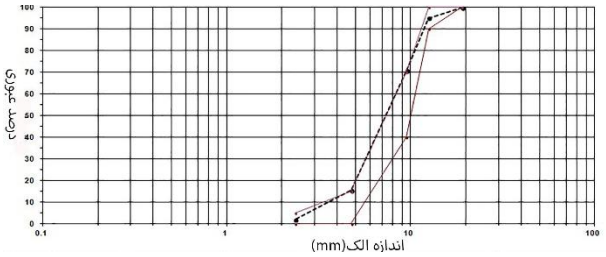
سنگدانه‌های مصرفی: آزمایش دانه‌بندی طبق استاندارد [۱۳] ASTM C33 انجام شد و نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌ها به تفکیک شن درشت، شن ریز و ماسه مشخص گردید. نمودار دانه‌بندی بدست آمده در محدوده قابل قبول این استاندارد قرار دارد. ماسه مورد استفاده از معادن اطراف بندر کنگان تهیه شده است. بر روی این ماسه آزمایش‌های دانه‌بندی طبق شکل۱، جذب آب، تعیین سلامت سنگدانه (ساندس)،هم ارز ماسه‌ای(SE) انجام شده است. ماسه مصرفی دارای ضریب نرمی ۳/۳۲ بوده و ساندس آن ۳/۲ درصد بدست آمد. شکل ۲ و ۳ نمودار دانه‌بندی شن ریز و درشت را نشان می‌دهد. ضریب نرمی را طبق استاندارد ملی شماره ۳۰۲ ایران[۱۴]،از مجموع درصدهای تجمعی مانده روی الک‌های mm ۴/۷۵ ، ۲/۳۶ mm ، ۱/۱۸ mm ، ۶۰۰µm، ۳۰۰µm، ۱۵۰µmو تقسیم عدد بدست آمده بر صد می‌توان بدست آورد. طبق این نمودارها، حدود ۱۳٪ از مصالح روی الک ۱۹ میلیمتر باقی مانده و حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ۲۵ mm است. این نوع شن دارای جذب آب ۲/۵ درصد و وزن مخصوص $2528 kg/cm^3$ است.

Sieve Size		Weight Retained (gr)	Percentage Retained	Cumulative Percentage Retained	Percentage Passing	Specification Limit (ASTM C-33)	
	mm					Min	Max
3/8"	9.5	0.0	0.0	0.0	100.0	100	100
No. 4	4.75	75.5	1.5	1.5	98.5	95	100
No. 8	2.36	1255.9	25.2	26.7	73.3	80	100
No. 16	1.18	1163.4	23.3	50.0	50.0	50	85
No. 30	0.6	954.0	19.1	69.2	30.8	25	60
No. 50	0.3	985.0	19.8	88.9	11.1	10	30
No.100	0.15	341.9	6.9	95.8	4.2	2	10
No. 200	0.075	73.4	1.5	97.2	2.8	0	3
Pan		137.8	2.8	100.0			
Total		4987.0					
					3.32		
Soundness value			3.2%				

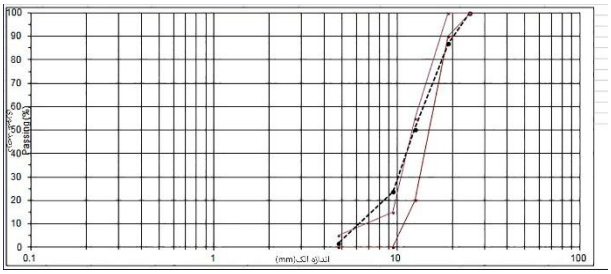
شکل ۱- دانه‌بندی ماسه



ادامه شکل ۱- دانه‌بندی ماسه



شکل۲- دانه‌بندی شن ریز(نخودی)



شکل۳- دانه‌بندی شن درشت(بادامی)

آزمایش وزن مخصوص و جذب آب سنگدانه‌ها بر اساس استاندارد[۱۵] ASTM C29-17 انجام شده و نتایج آزمایش آن در جدول ۳ آورده شده است.

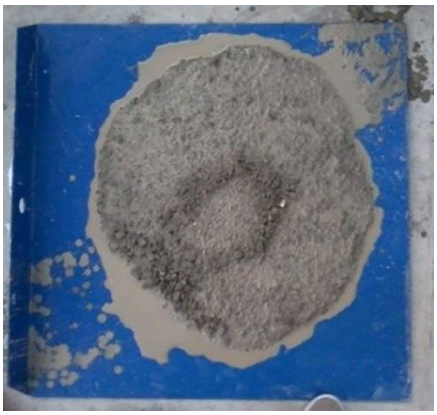
جدول۳- مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها

سنگدانه	جذب آب SSD%	چگالی(gr/cm^3)
شن‌درشت(بادامی)	۲/۵	۲/۵۳
شن‌ریز(نخودی)	۲/۹	۲/۵
ماسه	۲/۴	۲/۶۰

فوق‌روان‌کننده: ماده فوق روان ساز بر پایه پلی‌کربکسیلات به صورت مایع استفاده شده و برای بتن‌های توانمند به‌طور کامل روان ساز بوده ولی چسبندگی اجزای آن را حفظ می‌کند. این ماده به رنگ شفاف تا کمی کدر با وزن مخصوص gr/cm^3 ۱/۱ در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد استفاده می‌شود. این فوق روان‌کننده با توان زیاد پخش‌کنندگی و پراکنده کنندگی ذرات سیمان باعث افزایش چشمگیر روانی بتن می‌شود.

۳- آماده سازی نمونه ها

برای تعیین اثر زئولیت بر مشخصات بتن، تعداد ۳۶ نمونه ساخته شد. نمونه‌ها با جایگزینی وزنی سیمان با زئولیت به میزان ۵، ۱۰،۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد ساخته شدند. طرح اختلاط بر اساس دستورالعمل EFNARC و با سعی وخطا و انجام آزمایش‌های متعدد انتخاب شد. برای پایداری طرح اولیه و کنترل جداشدگی و آب‌انداختگی بتن به مقدار جزیی از پودر سنگ‌آهک به‌عنوان یک ماده پرکننده استفاده شد. ساخت نمونه‌ها در آزمایشگاه وزارت راه استان بوشهر شعبه بندر کنگان واحد محلی بندر خدماتی تمبک انجام گرفت. تمام آزمایش‌های بتن تازه و مقاومت فشاری در همین واحد انجام گرفت.آزمایش‌های مربوط به دوام هم در آزمایشگاه وزارت راه استان هرمزگان انجام شده است.



شکل۴- آب انداختگی بتن

نام‌گذاری طرح‌ها: در سیستم دو جزئی ابتدا نام مخفف پوزولان سپس درصد جایگزینی پوزولان آورده می‌شود. پوزولان زئولیت(Zeolite) با Z نشان داده می‌شود. برای مثال 10Zیعنی سیستم دو جزئی با ۱۰ درصد جایگزینی زئولیت. در سیمان پرتلند پوزولانی، ماده پوزولانی حداقل ۵٪ و حداکثر ۱۵٪ وزنی سیمان را تشکیل می‌دهد و این سیمان با نشانه پ. پ. عرضه می‌گردد. در سیمان پرتلند پوزولانی ویژه، ماده پوزولانی حداقل ۱۵٪ و حداکثر ۴۰٪ سیمان را تشکیل داده و این سیمان با نشانه پ. پ. و. عرضه می‌گردد. جدول ۴ مشخصات طرح‌های استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول۴- طرح اختلاط طرح ها برحسب کیلوگرم

طرح	شن درشت	شن ریز	ماسه	سیمان	آب	فوق روان‌کننده	زئولیت
CTRL	۲۱۴	۵۰۸	۱۰۵۲	۴۰۰	۱۸۶	۳	-
5 Z	۲۱۴	۵۰۸	۱۰۵۲	۳۸۰	۱۸۶	۵/۱	۲۰
10 Z	۲۱۴	۵۰۸	۱۰۵۲	۳۶۰	۱۸۶	۵/۷	۴۰
15 Z	۲۱۴	۵۰۸	۱۰۵۲	۳۴۰	۱۸۶	۶/۴	۶۰
20 Z	۲۱۴	۵۰۸	۱۰۵۲	۳۲۰	۱۸۶	۷/۲	۸۰
25 Z	۲۱۴	۵۰۸	۱۰۵۲	۳۰۰	۱۸۶	۸	۱۰۰

پس از ساخت نمونه‌ها آزمایش‌های جریان اسلامپ، جی رینگ، قیف Vشکل، جعبه Uشکل و پایداری الک بر روی نمونه‌های بتن تازه و آزمایش‌های مقاومت فشاری، عمق نفوذ آب تحت فشار، انتشارنفوذ یون کلر و جذب آب بر روی نمونه‌های بتن سخت شده انجام شد.

٤- نتایج آزمایشگاهی

برای تعیین مشخصات بتن خودتراکم آزمایش‌هایی پیشنهاد می‌شود که لیستی از آزمایش‌های متداول این نوع بتن طبق استاندارد EFNARC و هدف هر آزمایش در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول۵- آزمایش‌های تعیین کارایی بتن خودتراکم

Method	Property
Slump-flow by Abrams cone	Filling ability
T_{50cm}slumpflow	Filling ability
J-ring	Passing ability
V-funnel	Filling ability
V-funnel at $T_{5minutes}$	Segregation resistance
L-box	Passing ability
U-box	Passing ability
Fill-box	Passing ability
GTM screen stability test	Segregation resistance
Orimet	Filling ability

٤-١- آزمایش جریان اسلامپ (SF)

این آزمایش یکی از آزمایش‌های رایج برای سنجش خصوصیات بتن خودتراکم است و به منظور تعیین توانایی تغییر شکل بتن تحت اثر وزن خود بدون وجود هیچ قیدی بجز اصطکاک صفحه جریان تعریف شده است. این روش برای اولین بار در ژاپن برای استفاده در برآورد کارایی بتن‌های اجرا شده در زیر آب مورد استفاده قرار گرفت. طبق شکل(۵)، آزمایش جریان اسلامپ با مخروط آبرام جهت ارزیابی قابلیت پرکنندگی بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. قطر دایره بتن معیاری برای قابلیت جریان و پرکنندگی است. هر چه مقدار جریان اسلامپ به بیشتر باشد معرف قابلیت بیشتر پر کردن قالب و روان شدگی بتن تحت وزن خود است، همچنین باعث بالاتر رفتن فشار قالب می‌شود. در نتیجه طراحی مخلوط باید به‌گونه‌ای باشد که با جریان اسلامپ فشار قالب زیاد نشود. جریان اسلامپ بتن خود تراکم طبق طبقه‌بندی مؤسسه EFNARC در جدول ۶ آورده شده است.

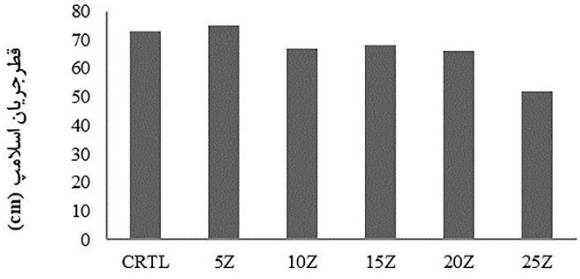
جدول۶- طبقه‌بندی جریان اسلامپ بتن خودتراکم

قطر جریان اسلامپ(mm)	رده بتن
۵۵۰-۶۵۰	SF 1
۶۵۰-۷۵۰	SF 2
۷۵۰-۸۵۰	SF 3

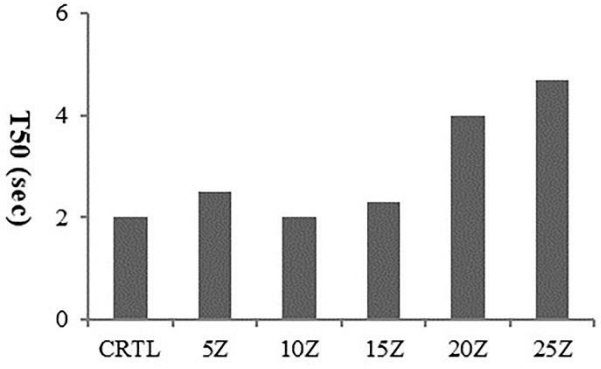
قطرجریان اسلامپ برای نمونه بدون زئولیت ۷۳cm بوده،که در طرح 5Z با جایگزینی مقدار ۵٪ زئولیت قطرجریان اسلامپ به cm ۷۵ می‌رسد که نشان دهنده افزایش کارائی است. در نسبت‌های جایگزینی ۱۰٪، ۱۵٪ زئولیت، قطر جریان اسلامپ به ترتیب cm ۶۷و۶۸ بدست آمد که تقریبا با هم برابر هستند. اما در طرح 20Z با نسبت جایگزینی۲۰٪ زئولیت در قطر جریان اسلامپ کاهش مشاهده می شود که نشان دهنده بالاتر رفتن میزان لزجت در طرح ها با افزایش نسبت جایگزینی می باشد. در طرح 25Z قطر جریان اسلامپ ۵۲ cm بدست آمد که کمتر از مقدار قابل قبول استاندارد EFNARC است. دلیل کاهش جریان اسلامپ را می‌توان بالا بودن جذب آب زئولیت دانست که باعث بالا رفتن ویسکوزیته به مقدار خیلی زیادی می‌شود. شکل(۷) پارامتر T_{50} که مدت زمان رسیدن جریان اسلامپ به قطر cm ۵۰ است را نشان می‌دهد. این

زمان با افزایش درصد زئولیت به علت افزایش ویسکوزیته به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. نهایتا می‌توان گفت، بالاتر رفتن مقدار جایگزینی زئولیت باعث بالا رفتن ویسکوزیته شده و در نتیجه باعث بالا رفتن مدت زمان پهن شدگی می‌گردد.

شکل۵- آزمایش جریان اسلامپ



شکل ۶- تاثیر زئولیت در قطر جریان اسلامپ



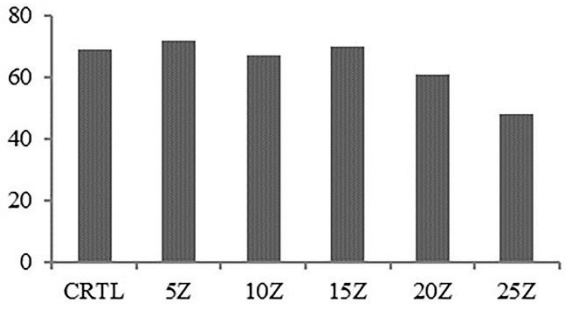
شکل ۷- تاثیر زئولیت در زمان رسیدن به قطر ۵۰ cm

٤-۲- آزمایش حلقه J-Ring

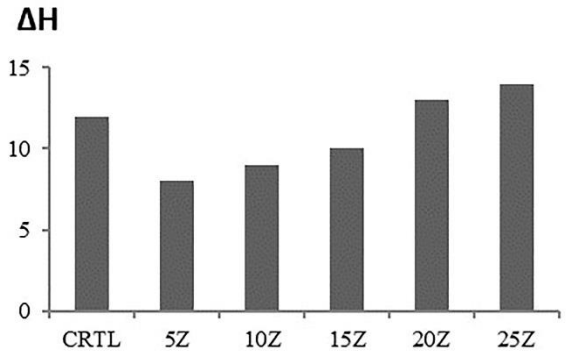
این آزمایش عبور بتن از بین موانع به خصوص آرماتورهای متراکم موجود در قالب را شبیه‌سازی می‌کند. از این آزمایش می توان برای تعیین ویژگی قابلیت عبور بتن تازه که خود متأثر از دو پارامتر اساسی تنش تسلیم و لزجت خمیری می باشد استفاده نمود. این آزمایش همراه با آزمایش های قیف V شکل نیز مورد استفاده قرار می گیرد. ترکیب آزمایش جی رینگ با اسلامپ از نظر قابلیت عبور حائز اهمیت است. هر چند قابلیت پر کردن و روانی را نیز نمایش می دهد. نتایج این آزمایش را می‌توان با اسلامپ مقایسه و تفاوت‌ها را مشاهده کرد. قابلیت انسداد کمتر تحت تاثیر ویژگی-های روانی است و اختلاف بیشتر در اختلاف ارتفاع‌ها نشانه قابلیت عبور کم بتن است. اگر مقادیر اختلاف بیشتر از ۱۰میلیمتر باشد احتمال بروز پدیده انسداد افزایش می‌یابد. در جدول ۷ و شکل‌های ۸ و ۹ نتایج نشان داده شده است.

جدول ۷- نتایج آزمایش جی رینگ و اختلاف ارتفاع داخل و خارج حلقه جی رینگ

کد طرح	CTRL	5Z	10Z	15Z	20Z	25Z
Slamp(cm)	۶۹	۷۲	۶۷	۷۰	۶۱	۴۸
ΔH (mm)	۱۲	۸	۹	۱۰	۱۳	۱۴



شکل ۸- قطر جریان اسلامپ با وجود حلقه جی رینگ



شکل ۹- اختلاف ارتفاع داخل و خارج حلقه جی رینگ

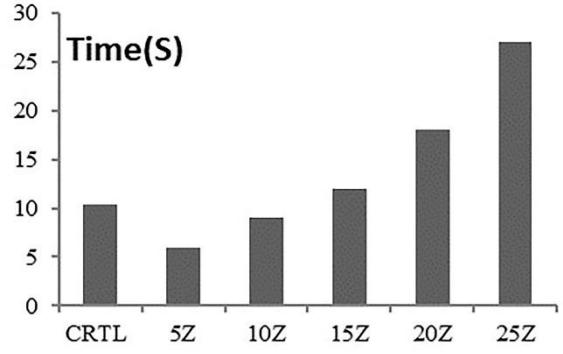
٤-۳- آزمایش قیف V شکل

این آزمایش در ژاپن توسعه‌یافته و توسط Ozawa و همکاران مورد استفاده قرار گرفته است. مدت زمان خروج بتن از یک قیف V‌شکل استاندارد اندازه‌گیری شده و به

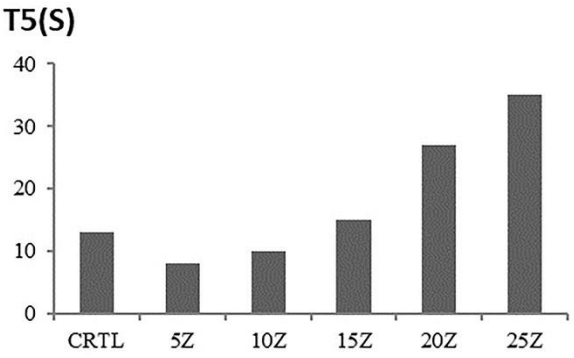
عنوان معیاری برای تعین قابلیت پرکنندگی و لزجت خمیری بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین این آزمایش می تواند به عنوان معیاری برای تعیین جدا شدگی بتن مورد استفاده قرار بگیرد. علاوه بر مدت زمان خروج بتن که در این آزمایش اندازه گیری می‌شود نحوه خروج بتن از قیف و یکنواختی بتن خارج شده نیز مهم است. این دستگاه می‌تواند شاخص مناسبی برای میزان همگنی بتن به صورت شهودی باشد. آزمایش قیف V شکل قابلیت جریان بتن خودتراکم را نشان می‌دهد. وسیله آزمایش دارای شکل ساده‌ای است. در این آزمایش اثر زاویه قیف و اثر جدار بر جریان روشن نیست ولی می توان گفت زمان تخلیه کمتر نشانه قابلیت روانی بیشتر است. زمان مناسب تخلیه بتن از دستگاه قیف بتن خود تراکم ۶ الی ۱۲ ثانیه است. البته بررسی‌های انجام گرفته نشان می دهند که بتن‌های خود تراکم با زمان تخلیه کاملا متفاوت در محدوده کمتر از ۶ ثانیه یا بیشتر از ۱۲ ثانیه با موفقیت به کار برده شده اند. اگر زمان تخلیه بتن بیشتر از ۱۲ ثانیه باشد بیانگر لزجت خمیری زیاد است.زمان تخلیه در نمونه کنترلی ۱۰/۳ ثانیه بدست آمد. در طرح 5Z مقدار آن ۶ ثانیه بود که نشانه جریان پذیرتر شدن بتن است. نتایج در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول۸- نتایج آزمایش قیف V شکل

	CTRL	5Z	10Z	15Z	20Z	25Z
T(s)	۱۰/۳	۶	۹	۱۲	۱۸	۲۷
T5(min)	۱۳	۸	۱۰	۱۵	۲۷	۳۵



شکل ۱۰- زمان تخلیه بتن از قیف V



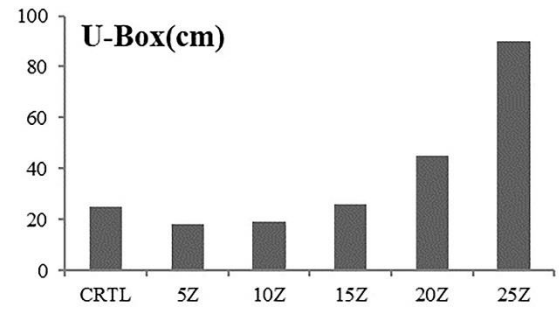
شکل۱۱-زمان تخلیه بتن از قیف Vشکل ۵دقیقه پس از ساخت

٤-٤- آزمایش جعبه U شکل

این آزمایش در مرکز تحقیقات تکنولوژی شرکت Taisei ژاپن توسعه یافته است و برای اندازه‌گیری قابلیت پر کردن و قابلیت عبور بتن خودتراکم استفاده می‌شود. قالب این آزمایش ظرفی به شکل U است. این دستگاه شامل مجرایی است که توسط یک تیغه جداکننده و یک دریچه متحرک در وسط به دو قسمت تقسیم می‌شود. میلگردهایی با قطر اسمی ۱۳mm در قسمت دریچه با فاصله مرکزبه‌مرکز ۵۰mm نصب شده‌اند. درنتیجه فاصله بین میلگردها ۳۵mm است. کلاً این فاصله بر مبنای سه برابر اندازه حداکثر درشت دانه تعیین می‌گردد. این آزمایش برای سنجش توانایی عبور بتن خود تراکم از خروجی‌های تنگ و باریک تحت ارتفاع مشخص طراحی شده است. میزان اختلاف ارتفاع بتن در دو مجرا $(H_2 - H_1)$ باید کمتر از ۳۰ mm باشد. این اختلاف ارتفاع در جدول ۹ و شکل ۱۲ نشان داده شده است.

جدول۹- آزمایش جعبه U شکل

طرح	CTRL	5Z	10Z	15Z	20Z	25Z
U-BOX (mm)	۲۵	۱۸	۱۹	۲۶	۴۵	۹۰



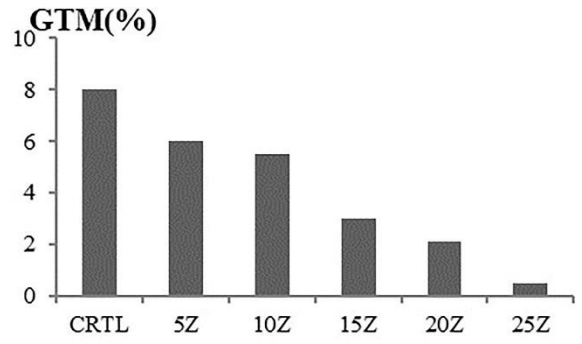
شکل۱۲- اختلاف ارتفاع درون جعبه U

٤-٥- آزمایش پایداری الک

این آزمایش توسط پیمانکار فرانسوی به‌نام GTM برای ارزیابی مقاومت در برابر جدایی (پایداری) گسترش یافته است. این آزمایش بیشتر برای تعیین میزان آب انداختگی بتن پیشنهاد می‌شود. هر چند به نظر می‌رسد نتایج این آزمایش به تنهایی نشان دهنده تمام انواع ناپایداری‌های بتن نیست. دستور العمل EFNARC محدوده ۵ تا ۱۵درصد را برای درصد عبوری توصیه کرده است. جدول ۱۰ و شکل ۱۳ نتایج آزمایش پایداری الک را نشان می‌دهند.

جدول۱۰- نتایج آزمایش پایداری الک (GTM)

طرح	CTRL	5Z	10Z	15Z	20Z	25Z
GTM(%)	۸	٦	۵/۵	۳	۲/۱	۰/۵



شکل ۱۳- نتایج آزمایش پایداری الک

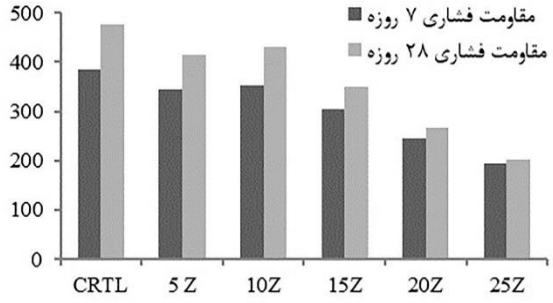
٤-٦- آزمایش‌های بتن سخت

٤-٦-١- مقاومت فشاری

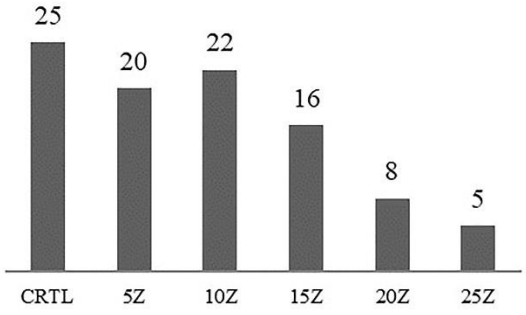
آزمایش تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها بر اساس استاندارد[۱۶] BS EN 12390-3 انجام می‌شود. این آزمایش برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی با چگالی بیش از $۸۰۰ kg/cm^3$ مورد استفاده قرار می‌گیرد. طبق جدول ۱۱ و شکل ۱۴، نتایج نمونه شاهد نشان داد که مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به نمونه ۷ روزه ۲۵ درصد رشد داشته است که برای بتن‌های معمولی رشد مناسبی است. با افزایش درصد پوزولان این نرخ رشد کمتر شده است، به طوری که در طرح 25Z رشد مقاومت فشاری در این بازه زمانی به مقاومت kg/cm^2 ۲۰۳ کیلوگرم بر سانتیمترمربع رسید که عدد پایینی است و رشد مقاومت ۵ درصد بود که رشد کمی است. طرح 10Z با مقاومت فشاری kg/cm^2 ۴۱۴ بیشترین مقاومت فشاری را بین نمونه‌های حاوی پوزولان زئولیت بدست آورد. این نمونه رشد ۲۲ درصد نسبت به نمونه ۷ روزه داشت. به طور کلی مقاومت فشاری نمونه‌های 5Z،10Z، 15Z از نظر مقاومت قابل قبول هستند. ولی طرح های 20Z،25Z به علت بالاتر رفتن حجم زئولیت و همچنین کاهش مقدار سیمان، مقاومت پایین‌تری دارند.

جدول۱۱- مقاومت فشاری نمونه‌ها (kg/cm^3)

کد طرح	۷ روزه	۲۸ روزه	درصد
CRTL	۳۸۴	۴۷۶	۲۵
5Z	۳۴۵	۴۱۴	۲۰
10Z	۳۵۴	۴۳۱	۲۲
15Z	۳۰۳	۳۵۱	۱۶
20Z	۲۴۶	۲۶۶	۸
25Z	۱۹۴	۲۰۳	۵



شکل۱۴- مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه برحسب kg/cm^2



شکل۱۵-درصد رشد مقاومت فشاری۲۸ روزه نسبت به ۷ روزه

٤-٧- آزمایش‌های نفوذپذیری و دوام

بتن از مصالح متخلخل و نفوذپذیر محسوب می‌شود. نفوذپذیری بتن باعث تهاجم یون‌های مخربی مانند Cl^- , So_3^- و Co_2 می‌شود. نفوذپذیری متأثر از ماهیت منافذ، اندازه منافذ و ارتباط بین منافذ است. با افزایش اندازه منافذ و ارتباط بیشتر منافذ، نفوذپذیری بتن افزایش می‌یابد. منافذ مویینه و منافذ هوای ناخواسته (تا حدود ۳ میلیمتر) اثر چشمگیری در نفوذپذیری دارد. خرابی سازه‌های بتنی

مسلح در محیط‌های دریایی غالبا بر اثر نفوذ یون کلراید از خارج به داخل بتن و رسیدن آن به میزان لازم در سطح میلگردها برای خوردگی صورت می‌پذیرد. از آنجا که نفوذ یون‌ها و گازها و مایعات از سطح بتن به داخل آن مهمترین مشخصه تعیین دوام سازه-های بتنی در شرایط مختلف از جمله محیط‌های دریایی است، روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری نفوذ در بتن ارائه شده است. در این پژوهش آزمایش نفوذ کلر، جذب آب، عمق نفوذ آب تحت فشار در حالت های معمول و تسریع شده انجام شده است. تعریف شرایط محیطی و مقادیر مجاز آزمایش‌های نفوذپذیری بتن مسلح در جداول ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.

جدول۱۲- دسته بندی شرایط محیطی [۱۷]

طبقه	دسته	شرایط
متوسط	A	سازه های روزمینی که در معرض خطر نفوذ یون کلرید بر اثر وزش بادهای دارای یون های نمکی نیستند .
شدید	B	سازه های روزمینی در نواحی نزدیک به ساحل ودر معرض وزش بادهای حاوی یون کلرید
شدید	C	قسمت‌هایی از سازه در تماس با خاک است و بالای ناحیه موینگی خاک واقع شده است. یا قسمت‌هایی که دائما در زیر آب دریا واقع اند.
فوق العاده شدید	D	قسمت‌هایی از سازه که در تماس با خاک مهاجم بوده ودر زیر سطح آب زیرزمینی واقع شده (آب می‌تواند از سطح به داخل نفوذ پیدا کند)
فوق العاده شدید	E	سازه های دریایی (دارای قسمت های در ناحیه جذر و مدی و ناحیه پاشش)
فوق العاده شدید	F	سازه های نگهدارنده های آب و تصفیه فاضلاب

جدول۱۳- محدوده مجاز نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری در شرایط محیطی مختلف،جدول ۹-۶-۱ مبحث نهم[۱۷]

شرایط محیطی	A	C و B	F و E, D
جذب آب نیم ساعته(در سن ۲۸ روز)	حداکثر ۴ درصد	حداکثر ۳ درصد	حداکثر ۲ درصد
عمق نفوذ آب تحت فشار (در سن ۲۸ روز)	حداکثر ۵۰ میلیمتر	حداکثر ۳۰ میلیمتر	حداکثر ۱۰ میلیمتر
نفوذ کلرید (در سن ۲۸ روز)	حداکثر ۳۰۰۰ کولن	حداکثر ۳۰۰۰ کولن	حداکثر ۲۰۰۰ کولن

٤-۷-۱- آزمایش نفوذ پذیری در مقابل آب

این آزمایش بر اساس استاندارد BS EN 12390-8:2000 انجام می شود[۱۸]. هدف تعیین عمق نفوذ آب در بتن سخت شده نمونه های استوانه‌ای یا مکعبی ۱۵×۱۵ سانتی متری است در این آزمایش طبق شکل ۱۶، نمونه‌هایی با حداقل سن ۲۸ روز در دستگاه قرار می‌گیرند به نحوی که آب محفظه دستگاه ، با فشار به نمونه اعمال شده و از کنار نمونه خارج نگردد.

فشار آب طبق استاندارد روی ۵ تنظیم شده و آزمایش شروع می‌شود پس از ۷۲ ساعت نمونه از وسط شکسته شده و میزان عمق نفوذ آب در داخل بتن بر حسب میلی متر اندازه گیری شده و بیشترین میزان ارتفاع آب نفوذ کرده به عنوان نفوذ آب در بتن است.

شکل۱۶- دستگاه آزمایش نفوذ آب تحت فشار

٤-٧-٢- آزمایش جذب آب بتن سخت‌شده

هدف این آزمایش، تعیین درصد جذب آب بتن سخت‌شده طبق استاندارد ASTM C642 است[۱۹]. در این آزمایش آزمونه های عمل آوری شده، پس از خشک شدن در محیط آزمایشگاه توزین می‌شوند (وزن خشک اولیه). با ثبت دقیق زمان به مدت تقریبا ۳ روز داخل آب غوطه‌ور می‌شوند تا به یک وزن ثابت برسند. در این مدت در زمان هایی، از داخل آب خارج شده و سطح آنها با یک پارچه خشک می گردد و سپس توزین می شوند. معمولا پس از گذشت یک روز روند تغییرات وزن آزمونه‌ها اندک است. مقدار درصد جذب آب آزمونه ها در هر زمان با استفاده از رابطه (۱) بدست می آید. سپس بارسم نمودار زمان - درصد جذب آب می توان نحوه تغییر وزن و جذب آب طرح ها را مشاهده نمود.

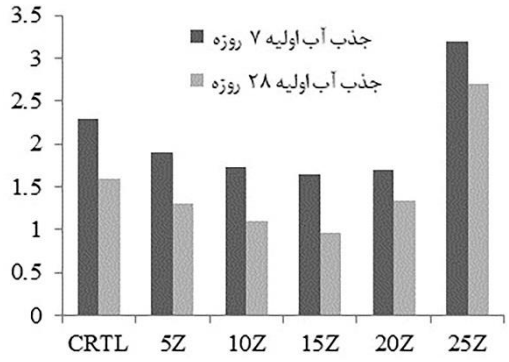
$$\text{درصد آب جذب شده} = \frac{m-m_0}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

در رابطه فوق، m وزن نمونه مرطوب و m_0 وزن نمونه خشک می‌باشد.

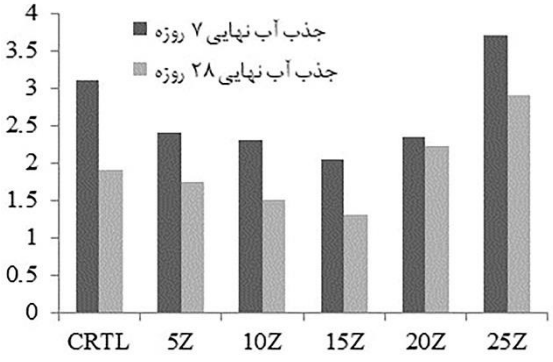
طبق جدول ۱۴و شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مشخص می‌شود که درصد جذب آب نیم‌ساعته بتن در نمونه شاهد در سن ۷ روزه ۲٫۳ درصد است.

جدول۱۴-نتایج درصد جذب آب اولیه و نهایی در سنین مختلف (درصد) نمونه های مکعبی ۱۵ سانتی

نمونه	درصد جذب آب				محدوده مجاز در شرایط محیطی مختلف		
	نیم ساعته ۷ روزه	نهایی ۷ روزه	نیم ساعته ۲۸ روزه	نهایی ۲۸ روزه	A	B,C	D,E,F
CTRL	۲٫۳	۳٫۱	۱٫۶	۱٫۹	حداکثر۴ درصد	حداکثر ۳ درصد	حداکثر ۲ درصد
5Z	۱٫۹	۲٫۴	۱٫۳	۱٫۷۴			
10Z	۱٫۷۳	۲٫۳۱	۱٫۱	۱٫۵			
15Z	۱٫۶۵	۲٫۰۵	۰٫۹۶	۱٫۳			
20Z	۱٫۷	۲٫۳۴	۱٫۳۴	۲٫۲۳			
25Z	۳٫۲	۳٫۷	۲٫۷	۲٫۹			



شکل۱۷- درصد جذب آب اولیه ۷ و ۲۸ روزه



شکل۱۸- درصد جذب آب نهایی ۷ و ۲۸ روزه

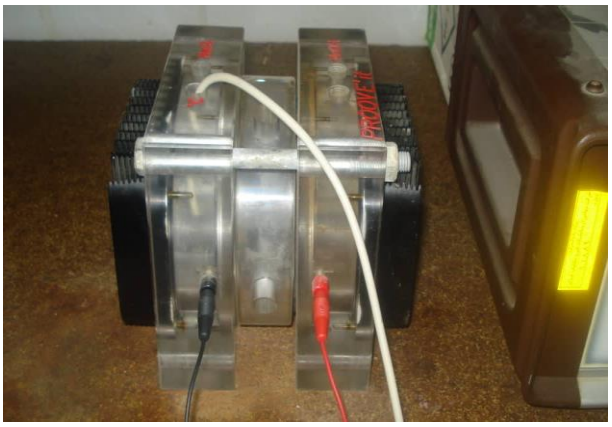
در نمونه‌های 5Z, 10Z و 15Z با افزایش درصد زئولیت جذب آب کاهش یافته ولی در نمونه‌های 20Z و25Z با افزایش درصد زئولیت جذب آب افزایش داشته است. به نظر می‌رسد باکم شدن میزان سیمان واکنش هیدراتاسیون کاهش یافته و در نتیجه امکان تشکیل ژل‌سیلیکات کلسیم کمتر شده و باعث جذب بیشتر آب می‌شود. نکته دیگر اینکه درصد جذب آب نهایی بتن در درصدهای مختلف جایگزینی زئولیت با سیمان بیشتر از جذب آب اولیه (نیم ساعته) است، چون نمونه

بتنی مدت زمان بسیار کمی(۳۰ دقیقه) درون آب قرار می گیرد درنتیجه به طور کلی جذب آب کمتر می‌شود. در نمونه‌های ۲۸ روزه جذب آب به طور کلی درصد پایین‌تری نسبت به نمونه های ۷ روزه دارد و این امر را می‌توان به این دلیل دانست که پوزولان زئولیت (به طور کلی پوزولان) مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا وارد واکنش‌های بتن گردد، در نتیجه هر چه زمان بیشتری از ساخت بتن بگذرد امکان کمتر شدن نفوذ پذیری بیشتر می‌شود.

بهترین درصد بهینه پوزولان در این آزمایش ۱۵ درصد زئولیت بدست آمد که میزان جذب آب نهایی آن در سن ۲۸ روزه ۱٫۳ درصد است. باتوجه به محدودیت آیین نامه ملی پایایی بتن که برای شرایط محیطی فوق العاده شدید حداکثر جذب آب ۲ درصد را در نظر گرفته است این شرط برای این طرح بدست آمده است و می توان از این طرح برای این مناطق استفاده نمود، البته باید بقیه پارامترهای دوام بررسی گردد. هرچند که طرح ها به طور کلی نتیجه قابل قبولی را برای این شرایط دارند ولی طرح های حاوی ۲۰ و ۲۵ درصد زئولیت از نظر جذب آب، جذب بالایی نسبت به شرایط محیطی گروه‌های D,E,F دارند، با این وجود برای شرایط محیطی A,B,C مناسب هستند. لذا کلیه طرح ها از نظر جذب آب برای شرایط محیطی A,B,C مناسب هستند.

٤-۷-۳- آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید

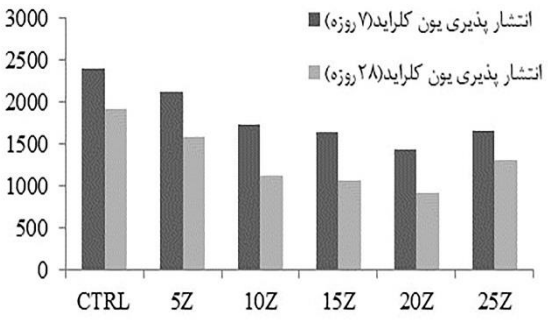
مقدار جریان الکتریکی عبوری (بر اساس کولمب) می‌تواند معیاری جهت تعیین میزان نفوذ یون کلراید در آن نمونه بتنی باشد. به این معنی که هر چقدر جریان الکتریکی کمتری رد شده باشد، بتن مقاومت بیشتری در برابر نفوذ یون کلراید خواهد داشت. هدف این آزمایش تعین مقدار جریان عبوری از بتن در مجاورت محلول کلریدسدیم و هیدروکسیدسدیم است. از نتایج این آزمایش برای درجه بندی بتن طبق معیار ذکر شده در استاندارد[۲۰] ASTM C1202 استفاده می‌شود. حداکثر مجاز برای شرایط A,B,C برابر ۳۰۰۰ کولمب و شرایط D,E,F برابر ۲۰۰۰ کولمب است. تصاویری از تجهیزات آزمایشگاهی در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده است.



شکل۱۹- دستگاه آزمایش انتشار پذیری یون کلراید

شکل ۲۰- انجام آزمایش انتشار پذیری یون کلراید

طبق شکل ۲۱، برای نمونه مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵، جریان الکتریکی در نمونه‌های هفت روزه شاهد و نمونه 5Z به ترتیب۲۴۱۲ و ۲۱۲۹ کولمب بوده که نسبت به دیگر نمونه‌ها عدد بالاتری است. برای نمونه شاهد که بدون زئولیت ساخته شده است و قاعدتا نفوذ پذیری بالاتری، نسبت به نمونه‌های حاوی پوزولان دارد و همچنین نمونه 5Z به این دلیل که میزان کمتری پوزولان زئولیت دارد،مقدار نفوذپذیری بالاتر رفته است. ولی در بقیه نمونه‌ها میزان نفوذ کمتر از ۲۰۰۰ کلمب است که بر اساس آیین نامه پایایی بتن برای شرایط محیطی شدید و فوق-العاده شدید مناسب است . البته در سن ۲۸ روزه به طور کلی میزان نفوذ کلیه طرح ها پایین تر از ۲۰۰۰ کولمب بدست آمد که این مقدار برای کلیه شرایط محیطی قابل استفاده است. بیشترین تاثیر در میزان پوزولان ۲۰ درصد با مقدار نفوذ ۹۲۱ کولمب است. با توجه به سن ۲۸ روزه نمونه‌ها مقدار نفوذ کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته که دلیل آن را می‌توان دیرتر وارد شدن پوزولان به واکنش‌ها و سرعت پایین‌تر واکنش پوزولان‌ها به هیدراتاسیون سیمان دانست.



شکل ۲۱- نتایج انتشارپذیری یون کلراید

٤-۸- صحت سنجی نتایج

جهت صحت سنجی و مقایسه با سایرتحقیقات، نتایج با تعدادی از آزمایش‌های انجام شده در این زمینه مقایسه گردید که حاکی از صحت انجام آزمایش‌ها بود. این نتایج به طور خلاصه در جدول ۱۵ نشان داده شده است.

جدول۱۵- صحت سنجی و مقایسه با سایرین

آزمایش	درصد بهینه زئولیت نتایج این تحقیق	درصد بهینه زئولیت نتایج قویدل[۲۱]	درصد بهینه زئولیت نتایج احمدی[۶]
جریان اسلامپ	۱۰ و ۱۵	۱۰	۵ و ۱۰ و ۱۵
حلقه جی رینگ	۵ و ۱۰ و ۱۵	*	۱۰
قیف V شکل	۵ و ۱۰ و۱۵	۱۵	۱۰ و ۱۵
جعبه U	۵ و ۱۰ و ۱۵	*	*
پایداری الک	۵ و ۱۰	۱۵	*
مقاومت فشاری	۱۰	۱۰	۱۵
جذب آب	۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۲۰	۱۰	۱۰ و ۱۵
انتشار پذیری یون کلراید	۵ و ۱۰ و۱۵و۲۰	۱۰	۱۵

۵- نتایج

در این پژوهش با سعی و خطا طرح بهینه‌ای برای بتن خودتراکم با افزودن پوزولان زئولیت جهت کاهش مصرف سیمان، افزایش دوام و همچنین بتن تازه با کارایی مناسب ساخته شد که نتایج کلی به شرح زیر به دست آمد:

- پوزولان زئولیت به‌طور قابل توجهی باعث افزایش لزجت بتن تازه و بهبود خواص رئولوژی بتن تازه می‌شود. جایگزینی ۵ تا ۱۵ درصد زئولیت بجای سیمان باعث بهبود شرایط عملکردی بتن تازه خود تراکم می‌شود. صمیمی [۱] نیز در تحقیق خود ۵ تا ۱۵ درصد جایگزینی را استفاده نمود با اینحال در این تحقیق بصورت جامع‌تری درصد ۰ و ۵ و ۱۵ و ۲۰ و ۲۵ به عنوان درصدهای جایگزین زئولیت با سیمان در نظر گرفته شد.

- بهترین نتایج برای دوام بتن در درصدهای جایگزینی ۱۰ و ۱۵ بدست آمد که می‌تواند نتایج قابل قبولی را برای بتن با عملکرد بالای دوام در دراز مدت داشته باشد. افزایش مصرف پوزولان زئولیت باعث کم شدن میزان کارایی و کاهش جریان اسلامپ شد که همین دلیل باعث بالاتر رفتن مصرف فوق روان‌کننده گردید. به علت اینکه مصرف پوزولان باعث کم شدن جریان پذیری بتن شده و همچنین محدودیت استفاده از فوق روان کننده، مصرف آب کمی بالاتر رفت. در تایید نتایج تحقیق حاضر، رنجنبر [۲] نیز نشان داد استفاده از پوزولان زئولیت جریان پذیری، قابلیت عبور از میلگردها و لزجت بتن را به حد قابل قبولی می‌رساند و با افزایش درصد زئولیت نرخ جریان اسلامپ کاهش می‌یابد.

- نتایج آزمایش عمق نفوذ آب در بتن نشان می‌دهد که دستیابی به حداکثر عمق نفوذ آب ۱۰ میلیمتر عملا بسیار مشکل است و با ضوابط دیگر انطباق مناسبی ندارد و تجدیدنظر در معیار آن ضروری به نظر می‌رسد. البته در بتن حاوی زئولیت با افزایش درصد زولیت تا ۲۰ درصد می‌توان حداکثر عمق نفوذ آب برای طبقه D را ۲۰ میلیمتر و برای E و F حداکثر ۱۰ یا ۱۵ میلیمتر منظور نمود.

- در نمونه‌های 5Z, 10Z و 15Z با افزایش درصد زئولیت جذب آب کاهش یافته ولی در نمونه‌های 20Z و25Z با افزایش درصد زئولیت جذب آب افزایش داشته است.

در تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود بر روی استفاده از انواع دانه بندی و همچنین شرایط عمل‌آوری کارگاهی جهت بررسی اثر پوزولان زئولیت بر روی بتن خود تراکم مطالعاتی صورت گیرد.

٦- مراجع

[1] Samimi K, Kamali-Bernard S, Maghsoudi A.A, " Durability of self-compacting concrete containing pumice and zeolite against acid attack, carbonation and marine environment", Construction and Building Materials, pp. 247-263, 2018.

[2] Ranjbar M.M , Madandoust R., Mousavi S. Y., Yosefi S., "Effects of natural zeolite on the fresh and hardened properties of self-compacted concrete," Construction and Building Materials,Vol. 47, pp. 806- 813, 2013.

[3] Sabet F, Libre N.A and Shekarchizadeh M., "Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite silica fume and fly ash." Construction and Building Materials, No. 44, pp. 175-184. 2013.

[4] AA Ramezanianpour, A Kazemian, M Sarvari, B Ahmadi, Use of Natural Zeolite to Produce Self-Consolidating Concrete with Low Portland Cement Content and High Durability. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 25, No. 5, May 1, 2013.

[۵] احمدی،ج.، عزیزی،ح.، کوهی،م. «بررسی تأثیرزئولیت درعیارهای مختلف سیمان برروی مقاومت ونفوذپذیری بتن»، مجله تحقیقات بتن، دوره۸، شماره۲، صفحه ۱۸-۵، ۱۳۹۴.

[۶] احمدی،ج.، بیگدلو،ا.، سلیمانی راد، س. «تأثیراستفاده از زئولیت، میکروسیلیس ومتاکائولین برکارایی ومقاومت بتن خودمتراکم»، نشریه مهندسی عمران ومحیط زیست، دوره ۳، شماره ۴۷، صفحه ۷-۱، ۱۳۹۶.

[7] Chan YN, Ji X, "Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes", Cement and Concrete Composites, 21 (4), 293-300, 1999.

[8] Gesoğlu M, Güneyisi E, Özbay E, "Properties of selfcompacting concretes made with binary, ternary,and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume", Construction and Building Materials, 23 (5), 1847-1854, 2009.

[9] Feng NQ, Peng GF, "Applications of natural zeolite to construction and building materials in china",Construction and Building Materials, 19, 579-584, 2005.

[10] Poon CS, Lam L, Kou S, Wong YL, Wong R, "Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in highperformance cement pastes", Cement and Concrete Research, 31 (9), 1301-1306, 2001.

[11] EFNARC,"Specification and Guideline for Self-Compacting Concrete", European Federtion ,2005.

[12] ASTM C150/ C150M-20, "Standard Specification for Portland Cement", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.

[13] ASTM C33, "Standard Specification for Concrete Aggregates", American Society for Testing and Materials Standards, West Conshohocken, 2004.

[۱۴] استاندارد ملی شماره ۳۰۲ ؛ «سنگدانه‌های بتن- ویژگی‌ها»، ۱۳۹۴.

[15] ASTM C29, "Standard test method for bulk density(Unit Weight) and voids in aggregate", American Society for Testing and Materials Standards, West Conshohocken, 2017.

[16] BS EN 12390-3, "Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens", British Standard Institution, 2019.

[۱۷] مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، طرح و اجرای ساختمان-های بتن آرمه، ۱۳۹۲

[18] BS EN 12390-8:2000, Testing hardened concrete. Depth of penetration of water under pressure, British Standard Institution, 2019.

[19] ASTM C642-13. "Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete." Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2013.

[20] ASTM C1202. "Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete." Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2013.

[۲۱] قویدل شهرکی، م.، میری، م.، رخشانی مهرمهدی م. «بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از ترکیب زئولیت و متاکائولین بر دوام و خوردگی میلگرد در بتن خودتراکم»، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دوره ۴۶,۱، شماره ۸۲، صفحه ۵۸-۴۹ . بهار ۱۳۹۵.

An Experimental Study on Workability and Durability Properties of Zeolite-based Self Compact Concrete

Seyed Shahab Emamzadeh *
Assistant Professor, Civil Engineering Group, Engineering Department, Kharazmi University, Tehran.

Abstract

The technology of making self-compacting concrete has been introduced in the world in recent years due to its high quality in high-strength areas. Because this type of concrete has a high cement consumption, one of the cement alternatives that has been considered by researchers is zeolite pozzolan. However, so far the persistence of this type of concret in chloride areas such as the coasts of the Persian Gulf has received less attention.The study program in this paper includes fresh and hardened concrete tests for different percentages of zeolite replacement. The method of this research is to create mixtures for determining the extent of cement materials in order to meet the conditions for acceptance of fresh and hardened concrete behavior according to the existing regulations. U-shaped box, V-shaped funnel, slump flow, J-ring and GTM screen stability have been tested on fresh zeolite-based self compact concrete specimens(SCC). Also, the water absorption, chlorine ion penetration and water pressure penetration depth for hardened concrete were performed. The results of this study indicate that the addition of zeolite pozzolan significantly increases the viscosity of fresh concrete and improves its rheological properties. According to the results of experiments, the replacement of 5 to 15 percent cement with zeolite improves the performance conditions of fresh concrete itself. The best results for concrete durability at 10 and 15 percent are obtained. On the other hand, an excessive increase in zeolite levels results in lower workability and slump, leading to higher levels of excess superplasticizer and water.

Keywords: Zeolite, Durability, Self Compacte Concrete, Fresh concrete, Hardened conctere.

* Corresponding Author: resan55@gmail.com