

## بهینه‌سازی طرح مخلوط بتن‌های حاوی ژئولیت طبیعی و دوده سیلیس

دکتر جعفر سبحانی<sup>۱</sup> و مهندس بابک احمدی<sup>۲</sup>  
<sup>۱</sup> عضو هیات علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی  
<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری مهندسی عمران دانشگاه امیرکبیر

\*

کد مقاله: C

### چکیده:

تولید سیمان به عنوان یکی از مواد اصلی تولید بتن، فرآیندی است که توأم با مصرف انرژی بسیار زیاد و تولید آلاینده‌های زیست محیطی است. استفاده از مواد جایگزین سیمان، یکی از راهکارهای اساسی در زمینه کاهش مصرف سیمان است که به واسطه آن از یک سو آلودگی زیست محیطی ناشی از تولید سیمان کاهش یافته و از سوی دیگر صرفه‌جویی اقتصادی مناسبی چه از نظر کاهش هزینه‌های تولید و چه از نظر کاهش هزینه‌های انرژی صنعت ساختمان و بهبود شاخص‌های دوام حاصل خواهد شد. در این مقاله سعی شده است طرح مخلوط بهینه برای کاربرد دو نوع ماده جایگزین سیمان شامل ژئولیت طبیعی و دوده سیلیس ارائه گردد. این مطالعه در دو مرحله شامل ۱- بهینه‌سازی طرح مخلوط‌های دو جزئی و سه جزئی حاوی این دو نوع ماده پوزولانی و ۲- مرحله بررسی خواص مقاومتی و انجام شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که کاربرد این نوع مواد تاثیر به سزایی در بهبود خواص دوام بتن‌های پیشنهادی به صورت دو جزئی و سه جزئی می‌شود.

**کلمات کلیدی:** بتن، مواد جایگزین سیمان، مشخصات مکانیکی، دوام، بهینه‌سازی، ژئولیت کوره آهن‌گدازی، ژئولیت طبیعی

### ۱- مقدمه

مواد سیمانی مکمل را می‌توان به دو دسته کلی طبقه‌بندی نمود. دسته اول شامل تمامی پوزولان‌های طبیعی و یا مصنوعی می‌شود که به دلیل پایین بودن مقدار اکسید کلسیم، خاصیت سیمانی از خود بروز نمی‌دهند مانند پوزولان‌های طبیعی نظیر پوزولان تراس. دسته دوم موادی را شامل می‌شود که علاوه بر داشتن خاصیت پوزولانی، به موقع ترکیب با آب، یعنی در حین فرآیند هیدراسیون، از خود خاصیت چسبندگی نشان می‌دهد که دلیل چنین رفتار حضور مقادیر زیاد اکسید کلسیم در آنها است که از جمله این مواد، می‌توان به خاکستر بادی کلاس F با بیش از ۲۰ درصد اکسید کلسیم در ترکیبات آن اشاره نمود.

تولید سیمان به عنوان یکی از مواد اصلی تولید بتن، فرآیندی است که توأم با مصرف انرژی بسیار زیاد و تولید آلاینده‌های زیست محیطی است. استفاده از مواد جایگزین سیمان، یکی از راهکارهای اساسی در زمینه کاهش مصرف سیمان است که به واسطه آن از یک سو آلودگی زیست محیطی ناشی از تولید سیمان کاهش یافته و از سوی دیگر صرفه‌جویی اقتصادی مناسبی چه از نظر کاهش هزینه‌های تولید و چه از نظر کاهش هزینه‌های انرژی صنعت ساختمان حاصل خواهد شد. همچنین مطالعات نشان داده است که علاوه بر مزایای ذکر شده، جایگزینی سیمان با چنین موادی موجب افزایش دوام بتن و عمر مفید سازه‌های بتنی می‌شود که این امر در بلند مدت مزایای اقتصادی زیادی را عاید کشور کرده و کاهش هزینه‌ها را به دنبال خواهد داشت.

امروزه مواد سیمانی مکمل<sup>۱</sup>، به دو روش در تولید بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند. در روش نخست این مواد در تولید سیمان آمیخته<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. بدین ترتیب که در برخی از کارخانه‌های تولید سیمان، این مواد به صورت مضاف و آسیاب شده برای تولید سیمان آمیخته مورد استفاده قرار می‌گیرد که این محصول بعداً برای تولید بتن استفاده می‌شود. در حالت دوم، این مواد را می‌توان به صورت جداگانه و به عنوان مواد جایگزین بخشی از سیمان<sup>۳</sup> در مخلوط‌های بتنی مورد استفاده قرار داد [۱]. جایگزینی بخشی از سیمان

<sup>۱</sup>-Supplementary cementitious materials

<sup>۲</sup>-Blended cement

<sup>۳</sup>- Partial replacement

پرتلند با مواد سیمانی مکمل همانند سرباره کوره آهنگدازی<sup>۴</sup>، خاکستر بادی<sup>۵</sup>، دوده سیلیس<sup>۶</sup> و انواع پوزولانهای طبیعی مانند پوزولان تراس، پوزولان خاش و.. یکی از مهمترین راهکارهای کاهش مصرف سیمان در صنعت بتن محسوب می‌شود [۱-۲]. تا به حال تحقیقات متمرکز بر روی جایگزینی یک و یا حداکثر دو نوع ماده جایگزین مطرح بوده است که نتایج مطالعات حاکی از بهبود نسبی خواص مکانیکی و دوام بتن با مخلوط‌های دوجزئی<sup>۷</sup> می‌باشد. با این وجود، استفاده از مخلوط‌های سه‌جزئی<sup>۸</sup> و چهار جزئی<sup>۹</sup>، سابقه زیادی در ادبیات بتن ندارد. با این دیدگاه، در این مقاله سعی شده است طرح مخلوط بهینه برای کاربرد دو نوع ماده پوزولانی شامل زئولیت طبیعی و دوده سیلیس ارائه گردد. این مطالعه در دو مرحله شامل بهینه‌سازی طرح مخلوط‌های دو جزئی و سه جزئی حاوی این دو نوع ماده پوزولانی و مرحله بررسی خواص مقاومتی و دوام انجام خواهد شد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مواد و مصالح

#### ۲-۱-۱ مواد سیمانی

سیمان مورد استفاده در این پروژه، سیمان پرتلند نوع دو تهیه شده از کارخانه سیمان تهران می‌باشد. که در جدول‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب مشخصات شیمیایی، مکانیکی و فیزیکی این سیمان در مقایسه با ملزومات استاندارد ۳۸۹ ایران ارائه شده است. همانطور که مشخص است کلیه مشخصات شیمیایی، مکانیکی و فیزیکی این سیمان منطبق با ملزومات استاندارد در خصوص سیمان نوع دو است.

جدول ۱- ویژگی‌های شیمیایی سیمان پرتلند در مقایسه با ملزومات استاندارد ۳۸۹ ایران

نوع سیمان		مرحله دوم (%)	مرحله اول (%)	آزمون‌های شیمیایی
نوع ۲	حدود تعیین شده			
۲۰/۰۰	حداقل (%)	۲۱/۶۸	۲۱/۷۲	SiO <sub>2</sub>
۶/۰۰	حداکثر (%)	۴/۹۵	۴/۲۵	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۶/۰۰	حداکثر (%)	۳/۲۰	۴/۰۰	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۵/۰۰	حداکثر (%)	۳/۰۰	۱/۸۵	MgO
-	-	۶۱/۶۰	۶۲/۶۸	CaO
۳/۰۰	حداکثر (%)	۲/۱۱	۱/۹۵	SO <sub>3</sub>
-				C <sub>3</sub> A < 8%
-				C <sub>3</sub> A > 8%
۳/۰۰	حداکثر (%)	۱/۷۸	۱/۶۳	کسر وزن در اثر سرخ شدن
۰/۷۵	حداکثر (%)	۰/۷۵	۰/۷۲	باقیمانده نامحلول
-	حداکثر (%)	۴۲/۱۶	۵۰/۲۷	C <sub>3</sub> S
-	حداقل (%)	۳۰/۳۶	۲۴/۳۵	C <sub>2</sub> S
۸/۰۰	حداکثر (%)	۷/۷۰	۴/۴۹	C <sub>3</sub> A
-	حداکثر (%)	۲۵/۱۴	۲۱/۱۶	C <sub>4</sub> AF+2C <sub>3</sub> A یا C <sub>4</sub> AF+C <sub>2</sub> F
۰/۱۶	حداکثر (%)	۰/۷۷	۰/۷۴	*Na <sub>2</sub> O+.658K <sub>2</sub> O

4-Blast-furnace slag

5-Fly ash

6- Micro silica (Silica fume)

7 - Binary

8- Ternary

9- Quaternary

جدول ۲- مشخصات مکانیکی سیمان پرتلند در مقایسه با ملزومات استاندارد ۳۸۹ ایران

نوع سیمان	مقاومت فشاری	نتایج آزمایش-مرحله اول (MPa)	نتایج آزمایش-مرحله دوم (MPa)	نوع سیمان	
				حدود تعیین شده	نوع ۲
۲ روزه	-	-	-	حداقل	-
۳ روزه	۱۳/۸	۲۰/۴	۲۰/۴	حداقل	۱۰
۷ روزه	۲۶/۵	۲۲/۷	۲۲/۷	حداقل	۱۷/۵
۲۸ روزه	۴۱/۷	۳۹/۱	۳۹/۱	حداقل	۳۱/۵

جدول ۳- ویژگی‌های فیزیکی سیمان پرتلند در مقایسه با ملزومات استاندارد ۳۸۹ ایران

نوع آزمایش	نتیجه بدست آمده مرحله اول	نتیجه بدست آمده مرحله دوم	محدودیت
سطح مخصوص (بلین) (cm <sup>2</sup> /gr)	۲۸۱۰	۲۸۱۰	حداقل (cm <sup>2</sup> /gr) ۲۸۰۰
انبساط به روش اتوکلاو (درصد)	۰/۱۱	۰/۷۸	حداکثر (درصد) ۰/۸۰
زمان گیرش به وسیله سوزن ویکات ابتدایی (دقیقه)	۱۹۵	۱۹۸	حداقل (دقیقه) ۴۵
انتهایی	۴ ساعت و ۴۰ دقیقه	۴ ساعت و ۱۰ دقیقه	حداکثر (ساعت) ۶

دوده سیلیس مورد مطالعه در این تحقیق، محصول شرکت فروسیلیس ازنا است. در جدول ۴، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این ماده در مقایسه با ملزومات استاندارد ملی ایران به شماره ۱۳۲۷۸ نشان داده شده است. با توجه به این جدول، مشخصات دوده سیلیس به کار رفته در این تحقیق در محدوده مجاز استاندارد است.

جدول ۴- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی دوده سیلیس ازنا در مقایسه با ملزومات استاندارد ملی ۱۳۲۷۸

آزمون شیمیایی	ملزومات استاندارد	نتایج آزمون	آزمون فیزیکی	ملزومات استاندارد	نتایج آزمون
SiO <sub>2</sub> (درصد)	حداقل ۸۵/۰	۸۷/۳	اندیس هیدرولیکی (درصد) (۷ روزه)	حداقل ۱۰۵	۱۲۹
رطوبت در دمای ۱۱۰°C (درصد)	حداکثر ۳/۰	۰/۰۷	سطح مخصوص (m <sup>2</sup> /g)	حداقل ۱۵	-
افت سرخ شدن در ۷۵۰ ± ۵۰°C (درصد)	حداکثر ۶/۰	۱/۸۹	مانده روی الک ۴۵ میکرون (%)	حداکثر ۱۰	۴/۷۴
			الزامات یکنواختی مانده روی الک ۴۵ میکرون (درصد تغییرات)	حداکثر ۵	۰/۲
			چگالی انبوهی (kg/m <sup>3</sup> )	-	۳۰۷/۵

به علاوه در این تحقیق، از ژئولیت معدن افتر سمنان محصول شرکت افترند توسکا استفاده شد. ژئولیت نوعی ماده آلومینو سیلیکات هیدراته با ساختار شبکه‌ای است که به طور وسیعی به عنوان پوزولان در مخلوط‌های سیمانی و بتن در نقاط مختلف دنیا استفاده می‌شود.

در جدول ۵، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زئولیت مورد مطالعه در مقایسه با ملزومات استاندارد ASTM C618 ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشخص است، خواص فیزیکی و شیمیایی زئولیت الزامات استاندارد ASTM C618 را برآورده می‌کند.

**جدول ۵- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زئولیت سمنان در مقایسه با ملزومات استاندارد ASTM C618**

نتایج آزمون	ملزومات استاندارد	آزمون فیزیکی	نتایج آزمون	ملزومات استاندارد	آزمون شیمیایی
	حداقل	اندیس هیدرولیکی (درصد)	۸۷/۸	حداقل ۷۰/۰	SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (درصد)
۷۵	۷۵	۷ روزه	۰/۰۰	حداکثر ۴/۰	SO <sub>3</sub> (درصد)
۹۹	۷۵	۲۸ روزه			
۲۹/۸۷	حداکثر ۳۴	مانده روی الک ۴۵ میکرون (درصد)	۲/۷۴	حداکثر ۳/۰	رطوبت در دمای ۱۱۰°C (درصد)
۰/۰۶	حداکثر ۰/۸	انبساط اتوکلاو (درصد)	۴/۶۷	حداکثر ۱۰/۰	افت سرخ شدن در ۵۰°C ± ۷۵۰ (درصد)

#### ۲-۱-۲ مصالح سنگی

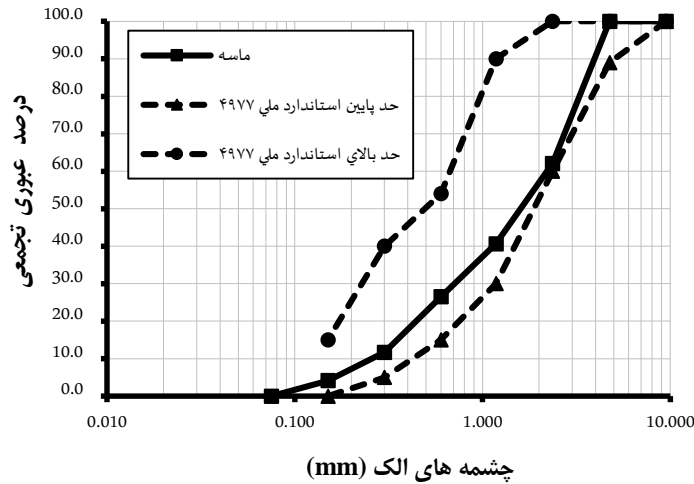
مصالح سنگی به کار رفته در این مطالعه به صورت رودخانه‌ای و شامل ماسه، شن نخودی و شن بادامی می‌باشد. این مصالح سنگی از معدن شرکت متوساک تهیه شده است. مدول نرمی، چگالی و جذب آب ماسه به ترتیب برابر با ۳/۵، ۲/۶ کیلوگرم در متر مکعب و ۲/۹ درصد می‌باشد. همچنین، شن نخودی دارای چگالی و جذب آب برابر با ۲/۶ کیلوگرم در متر مکعب و ۲/۰ درصد می‌باشند. در شکل ۱ دانه بندی ماسه نشان داده شده است. با توجه به این شکل، دانه بندی ماسه مورد مصرف در محدوده مجاز استاندارد ملی ۴۹۷۷ می‌باشد. همچنین در شکل ۲ دانه بندی شن‌های نخودی و بادامی نشان داده شده است. نسبت‌های این دوشن (بادامی: ۸۰ و نخودی: ۲۰) به گونه‌ای انتخاب شد که دانه بندی ترکیب آن دو شن در محدوده دانه بندی استاندارد استاندارد ملی ۴۹۷۷ قرار گیرند. همانطور که در شکل ۲ مشخص است دانه بندی شن ترکیبی در محدوده استاندارد قرار گرفته است.

#### ۲-۱-۳ آب و فوق روان کننده

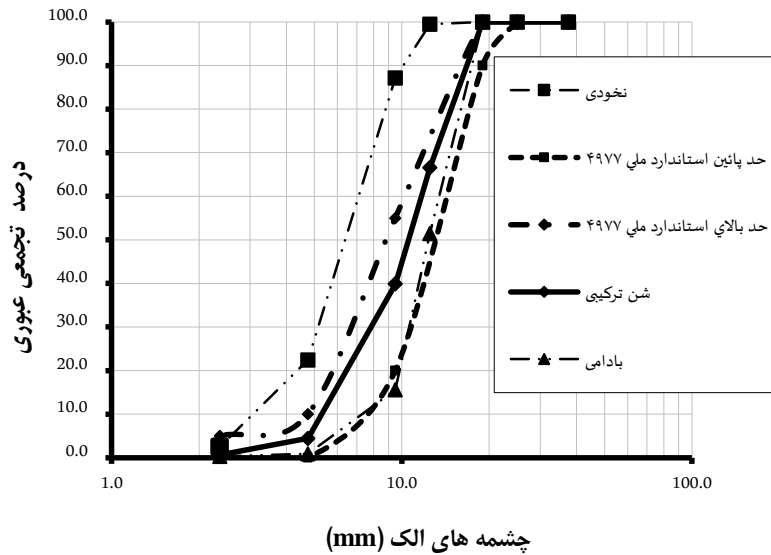
در این پروژه برای ساخت نمونه‌ها از آب شرب شهر تهران استفاده شد. فوق روان کننده مورد مصرف با پایه پلی کربوکسیلات می‌باشد.

#### ۲-۲-۲ آزمون‌ها و روش‌ها

برای تعیین فعالیت پوزولانی کلیه مواد جایگزین سیمان مورد مطالعه از روش آزمایش وزن‌سنجی حرارتی (TG) با استفاده از دستگاه STA-449 C، استفاده شده است. برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری، جذب آب در ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعت و مقاومت الکتریکی بتن از نمونه‌های مکعب مستطیلی به ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شد. نمونه‌های بتنی برای آزمایش نفوذ آب نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵ سانتیمتر می‌باشد.



شکل ۱ دانه بندی سنگدانه ریز



شکل ۲ دانه بندی سنگدانه درشت

### ۳- مطالعات آزمایشگاهی، تحلیل و تفسیر نتایج

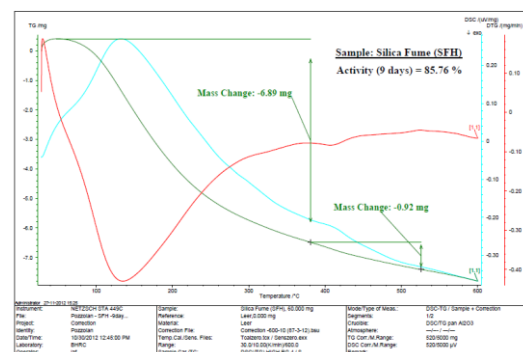
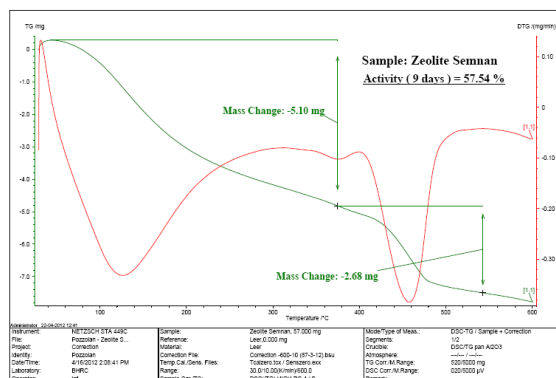
#### ۳-۱ تحلیل نتایج واکنش پذیری دوده سیلیس و زئولیت

همانگونه که ذکر شد، برای اندازه‌گیری واکنش‌پذیری پوزولان‌های مصرفی از روش آنالیز ترموگراویمتری (TG) استفاده گردید. در شکل‌های ۳ تا ۴ به ترتیب نمودار TG مربوط به دوده سیلیس و زئولیت ارائه شده است. بر این اساس، در جدول ۶، درصد فعالیت پوزولانی ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشخص است، ترتیب میزان واکنش‌پذیری دوده سیلیس به مراتب از زئولیت طبیعی بالاتر است. این نتایج، با توجه به نتایج مشخصات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی این مواد پوزولانی قابل توجیه است.

از جمله مهمترین عوامل تاثیر گذار بر واکنش‌پذیری مواد پوزولانی می‌توان به وجود مقادیر کافی اکسیدهای واکنش دهنده و نرمی مناسب آنها اشاره کرد. به طور کلی، وجود مقادیر کافی  $SiO_2$ ،  $Al_2O_3$  و  $Fe_2O_3$  برای انجام واکنش‌پذیری پوزولانی مناسب لازم است. به همین علت در استاندارد ASTM C618، حداقل مجموع مقدار این سه اکسید اصلی برابر با ۷۰ درصد برای پوزولان‌های طبیعی و در استاندارد ASTM C1240، حداقل مقدار  $SiO_2$  در دوده سیلیس برابر با ۸۵ درصد مشخص شده است. البته باید در نظر داشت که وجود حداقل اکسیدهای اصلی به معنی قطعیت واکنش‌پذیری مناسب پوزولانی نیست، بلکه باید آزمایش‌های تکمیلی دیگری برای ارزیابی واکنش‌پذیری پوزولانی انجام گیرد. زیرا بسیاری از مواد خصوصاً مواد کریستالی مانند انواع رس‌ها با آنکه ممکن است دارای مقادیر زیادی از اکسیدهای اصلی باشند، خاصیت پوزولانی ناچیزی دارند. عموماً بخش‌های کریستالی مواد پوزولانی به عنوان ناخالصی و

بخش‌های آمورف و شیشه‌ای به عنوان اجزای واکنش‌زای این مواد شناخته می‌شوند. علاوه بر این، ذرات مواد پوزولانی باید به اندازه کافی ریز باشند تا سرعت واکنش پوزولانی در حد مطلوب باشد. به همین علت، در استانداردهای ASTM C1240، ASTM C618 و ASTM C989 به ترتیب، مقدار حداکثر برای مانده بر روی الک ۴۵ میکرون برای دوده سیلیس، پوزولان‌های طبیعی (زئولیت) مشخص شده است. حداکثر مانده مجاز بر روی الک ۴۵ میکرون برای دوده سیلیس، برابر با ۱۰ درصد است.

با توجه به نتایج مشخصات شیمیایی مواد سیمانی این مطالعه و مقایسه مقادیر اکسیدهای اصلی مواد پوزولانی مورد بررسی، مشخص می‌گردد که دوده سیلیس دارای مقدار زیادی  $SiO_2$  (۸۷/۲۶ درصد) به عنوان مهمترین اکسید در واکنش پوزولانی و ریزترین اندازه ذرات (مانده بر روی الک ۴۵ میکرون برابر با ۴/۷۴ درصد) می‌باشد. همچنین از آنجا که تقریباً تمام سیلیس موجود در دوده سیلیس به صورت بی‌شکل است، بیشترین فعالیت پوزولانی در مقایسه با مواد پوزولانی مورد بررسی دیگر متعلق به دوده سیلیس می‌باشد. واکنش‌پذیری کمتر زئولیت نسبت به دوده سیلیس را می‌توان ناشی از کم بودن مجموع اکسیدهای اصلی دانست.



شکل ۴- نمودار TG برای نمونه زئولیت سمنان

شکل ۳- نمودار TG برای نمونه دوده سیلیس

### جدول ۶- نتایج تعیین فعالیت پوزولانی به روش وزن سنجی حرارتی

فعالیت پوزولانی (درصد)	نوع ماده جایگزین سیمان
۷۸/۴	دوده سیلیس
۲۲/۶	روباره

### ۳-۲- طرح مخلوط‌های بتنی در مرحله اول مطالعه آزمایشگاهی

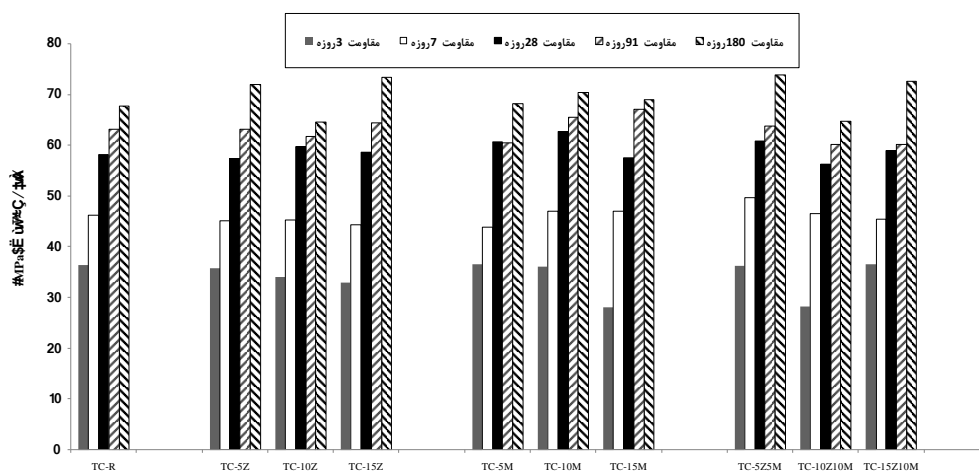
برای بررسی اولیه تاثیر انواع پوزولان و تعیین درصد بهینه در ترکیب چند جزئی، در مرحله اول انجام مطالعه، در مجموع ۷ طرح مخلوط بتنی پیش‌بینی شد. طرح‌های بتن شامل یک مخلوط یک جزئی شاهد (حاوی سیمان پرتلند)، ۶ مخلوط دوجزئی (سیمان پرتلند+دوده سیلیس یا روباره) و ۳ مخلوط سه جزئی (شامل سیمان پرتلند + دوده سیلیس + زئولیت) طراحی و ساخته شد. در کلیه این طرح‌های اختلاط، مقدار کل مواد سیمانی برابر با ۴۰۰ کیلوگرم در متر مکعب و نسبت آب به مواد سیمانی برابر با ۰/۴ در نظر گرفته شد. با تنظیم مقدار فوق روان کننده، میزان اسلامپ اولیه کلیه طرح‌ها در محدوده  $180 \pm 20$  میلیمتر تنظیم شد. در جدول ۷، می‌توان به طور کلی اظهار نمود که استفاده از دوده سیلیس سبب نیاز بیشتر به فوق روان کننده و استفاده از زئولیت نیاز کمتر به فوق روان کننده نسبت به سیمان پرتلند برای دستیابی به روانی برابر می‌شود.

جدول ۷- مشخصات طرح‌های مخلوط بتن در مرحله اول مطالعه

ردیف	کد طرح	ماده جایگزین سیمان و مقدار جایگزینی (درصد)	مقدار فوق روان کننده، (درصد وزنی مواد سیمانی)	اسلامپ (mm)
۱	TC-R	-	۰/۴۴	۱۸۰
۲	TC-5M	دوده سیلیس، ۵	۰/۴۴	۱۶۰
۳	TC-10M	دوده سیلیس، ۱۰	۰/۵۶	۲۰۰
۴	TC-15M	دوده سیلیس، ۱۵	۰/۷۰	۱۶۰
۵	TC-20S	روبار، ۲۰	۰/۵۶	۱۶۰
۶	TC-30S	روبار، ۳۰	۰/۲۵	۱۸۰
۷	TC-40S	روبار، ۴۰	۰/۲۳	۲۰۰
۸	TC-20S10M	روبار، ۲۰ و دوده سیلیس، ۱۰	۰/۶۵	۲۰۰
۹	TC-30S10M	روبار، ۳۰ و دوده سیلیس، ۱۰	۰/۶۱	۱۸۰
۱۰	TC-40S10M	روبار، ۴۰ و دوده سیلیس، ۱۰	۰/۵۰	۱۷۰

### ۳-۳- نتایج مرحله اول

در شکل ۵ نتایج مقاومت فشاری کلیه طرح مخلوطها در مرحله اول مطالعه ارائه شده است. بر اساس این شکل، در کلیه سنین مقاومت فشاری مخلوطهای سه جزئی حاوی زئولیت و دوده سیلیس مابین مخلوطهای دو جزئی متناظر بوده است. تقریباً در همه موارد مقاومت فشاری مخلوط سه جزئی حاوی زئولیت و دوده سیلیس کمتر از طرح شاهد بوده است. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت فشاری مخلوطهای سه جزئی مابین مقاومت فشاری مخلوطهای دو جزئی متناظر آنها است.



شکل ۵- نتایج مقاومت فشاری طرح مخلوطها در مرحله اول مطالعه

### ۳-۴- تحلیل و بهینه‌سازی نتایج مقاومت فشاری مرحله اول

نتایج به دست آمده بر اساس متوسط سه آزمون ارائه شده است. در ادامه برای تحلیل رفتار ترکیبی انواع پوزولانها در مخلوطهای بتنی، از نمودارهای هم‌تراز مقاومتی استفاده شده است. برای بررسی تاثیرات اندرکنشی، با توجه به نتایج بدست آمده مدل چند جمله‌ای مرتبه دوم طبق رابطه زیر استفاده شد:

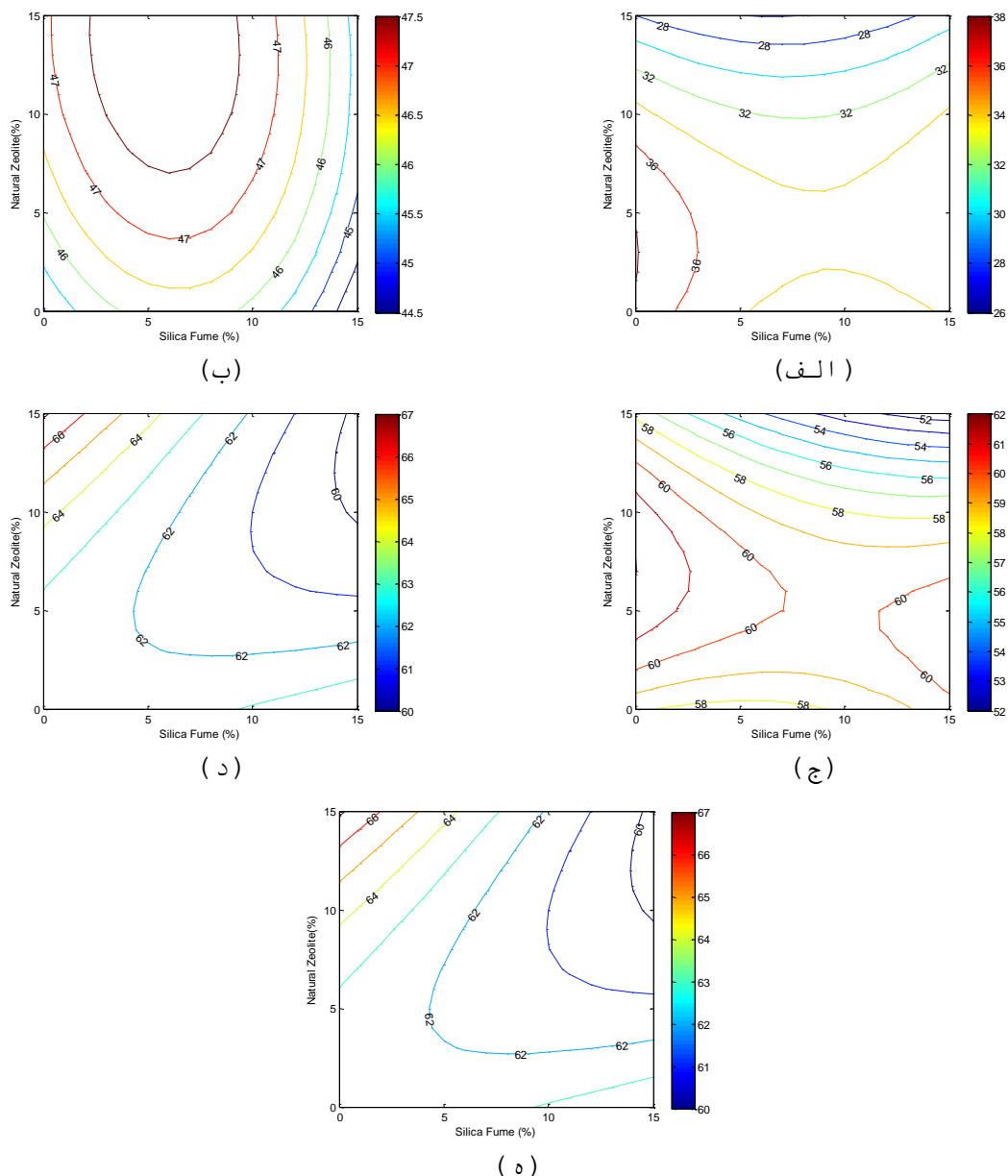
$$CS = a_0 + a_1 \times X + a_2 \times Y + a_3 \times X \times Y + a_4 \times X^2 + a_5 \times Y^2 + a_6 \times X \times Y \quad (1)$$

در این رابطه،  $X$  و  $Y$  پارامتر متغیر شامل درصد پوزولان مورد استفاده می‌باشد.

بر این اساس، منحنی هم‌تراز مقاومتی برای مخلوط‌های بتن سه جزئی حاوی دوده سیلیس و زئولیت در سنین ۳ روزه، ۷ روزه، ۲۸ روزه، ۹۱ روزه و ۱۸۰ روز در شکل‌های ۶ (الف تا ه) نشان داده شده است.

با توجه به این منحنی‌ها می‌توان موارد ذیل را استنتاج نمود:

سطح بهینه جایگزینی زئولیت و دوده سیلیس در محدوده ۵ درصد از هر کدام از این نوع پوزولان‌ها می‌باشد. اثرگذاری ترکیب مواد دوده سیلیس و زئولیت در مخلوط سه جزئی با افزایش سن نمود بیشتری دارد.

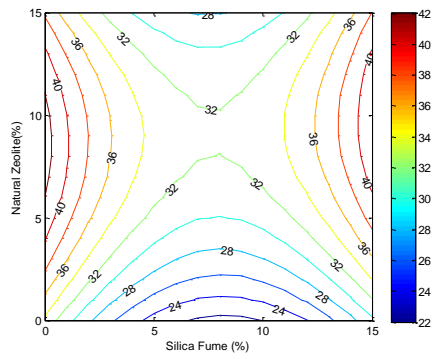


شکل ۶- منحنی اندرکنش (الف) مقاومت ۳ روزه، (ب) مقاومت ۷ روزه، (ج) مقاومت ۲۸ روزه، (د) مقاومت ۹۱ روزه، (ه) مقاومت ۱۸۰ روزه برای مخلوط‌های سه جزئی حاوی زئولیت طبیعی و دوده سیلیس

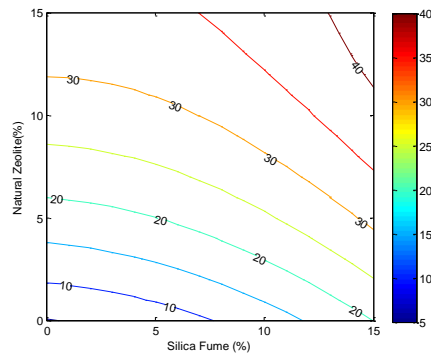
### ۳-۵- تحلیل نتایج مقاومت الکتریکی در مرحله اول

نتایج به دست آمده بر اساس متوسط سه آزمون ارائه شده است. در ادامه برای تحلیل رفتار ترکیبی انواع پوزولان‌ها در مخلوط‌های بتنی، از نمودارهای هم‌تراز استفاده شده است. برای بررسی تاثیرات اندرکنشی، با توجه به نتایج بدست آمده مدل چند جمله‌ای مرتبه دوم طبق رابطه (۱) زیر استفاده شد. بر اساس این رابطه منحنی هم‌تراز مقاومتی برای مخلوط‌های بتن سه جزئی حاوی دوده سیلیس و زئولیت در سنین ۲۸ روز و ۹۱ روز در شکل‌های ۷ (الف تا ب) نشان داده شده است.





(ب)



(الف)

شکل ۷- منحنی اندرکنش مقاومت الکتریکی (الف) ۲۸ روزه و (ب) ۹۰ روزه برای مخلوط‌های سه جزئی حاوی دوده سیلیس و زئولیت طبیعی

با توجه به نتایج مرحله اول و با توجه به مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های انجام شده، برای مرحله دوم طرح مخلوط‌های با درصد جایگزینی بهینه شامل ۱۵ درصد زئولیت و ۱۰ درصد دوده سیلیس برای طرح‌های دو جزئی و ۵ درصد دوده سیلیس، ۵ درصد زئولیت برای طرح‌های سه جزئی در نظر گرفته می‌شود.

#### ۴- مرحله دوم مطالعات آزمایشگاهی

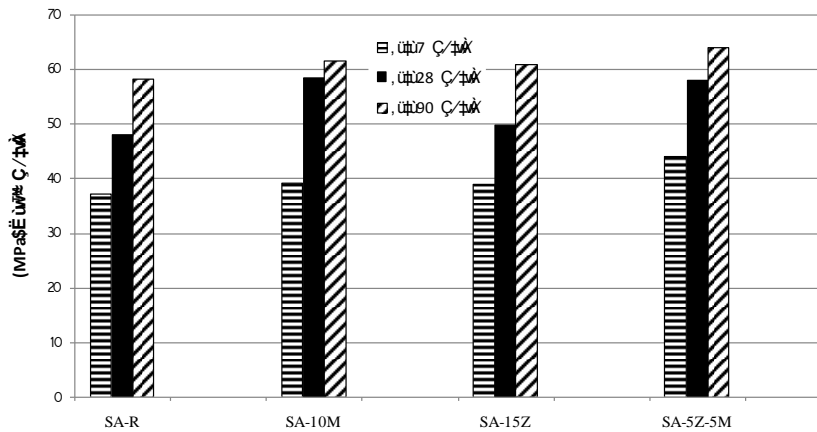
همانگونه که ذکر شد، پس از ارزیابی اولیه و بر اساس مقایسه نتایج مقاومت فشاری و همچنین مقاومت الکتریکی طرح مخلوط‌های دو جزئی و سه جزئی، برای بررسی نهایی انتخاب گردید. جدول ۸ جزئیات طرح مخلوط‌های نهایی و مشخصات بتن در حالت تازه را ارائه می‌دهد. قابل ذکر است همانگونه که در این جدول ملاحظه می‌گردد مقدار مصرف روان‌کننده در مرحله دوم با مرحله اول متفاوت است. علت این تفاوت را می‌توان به تغییر عوض شدن مشخصات سیمان و همچنین تفاوت حجم ساخت بتن در دو مرحله نسبت داد.

جدول ۸- نسبت‌های طرح مخلوط و خواص بتن در حالت تازه برای طرح مخلوط بتن‌های مورد مطالعه در مرحله دوم

کد طرح	ماده جایگزین سیمان و مقدار جایگزینی (درصد)	مقدار فوق روان‌کننده (درصد وزنی مواد سیمانی)	اسلامپ (mm)	درصد هوا	وزن مخصوص ( $\text{kg/m}^3$ )
SA-R	بتن شاهد	۰/۲۵	۱۷۵	۳/۲	۲۳۴۷
SA-15Z	زئولیت، ۱۵	۰/۹	۱۲۵	۲/۸	۲۲۸۴
SA-10M	دوده سیلیس، ۱۰	۰/۳۹	۱۵۰	۳/۱	۲۳۱۴
SA-5Z-5M	زئولیت ۵، دوده سیلیس ۵	۰/۶۳	۱۵۰	۲/۸	۲۳۲۶

#### ۴-۱ مقاومت فشاری

در شکل ۸، نتایج مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های مورد مطالعه در مرحله دوم در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ ارائه شده است. شایان ذکر است علت تفاوت در نتایج این مرحله با مرحله اول، تغییر در سیمان مصرفی و همچنین حجم ساخت بتن می‌باشد.



شکل ۸- مقاومت فشاری بتن‌های مورد مطالعه در مرحله دوم

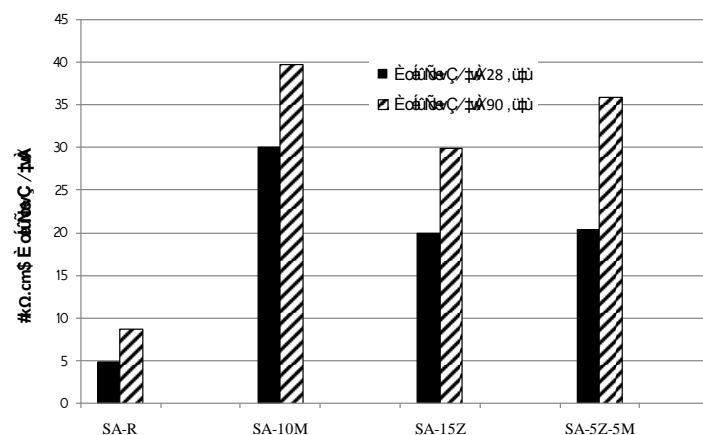
جدول ۹- تغییرات مقاومت طرح مخلوط بتن‌های ترکیبی نسبت به بتن مرجع

کد طرح	تغییرات مقاومت ۲۸ روزه نسبت به بتن مرجع (درصد)	تغییرات مقاومت ۹۰ روزه نسبت به بتن مرجع (درصد)
SA-15Z	۴	۴
SA-10M	۲۲	۵
SA-5Z-5M	۲۱	۱۰

بر اساس این شکل و نتایج جدول ۹، بیشترین افزایش مقاومت در سن ۲۸ روز نسبت به بتن شاهد مربوط به مخلوط دو جزئی حاوی ۱۰٪ دوده سیلیس به میزان ۲۲ درصد و ۵ درصد به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز می‌باشد. و مخلوط دو جزئی حاوی ۱۵٪ ژئولیت در سنین ۲۸ و ۹۰ روز شاهد افزایش مقاومتی تا ۴ درصد نسبت به بتن مرجع می‌باشد. همچنین مخلوط سه جزئی حاوی ۱۵ درصد ژئولیت و ۱۰ درصد دوده سیلیس در سن ۲۸ روز شاهد افزایش مقاومتی تا حدود ۲۱ درصد و در سن ۹۰ روز افزایش ۱۰ درصدی بوده است.

#### ۴-۲ مقاومت الکتریکی

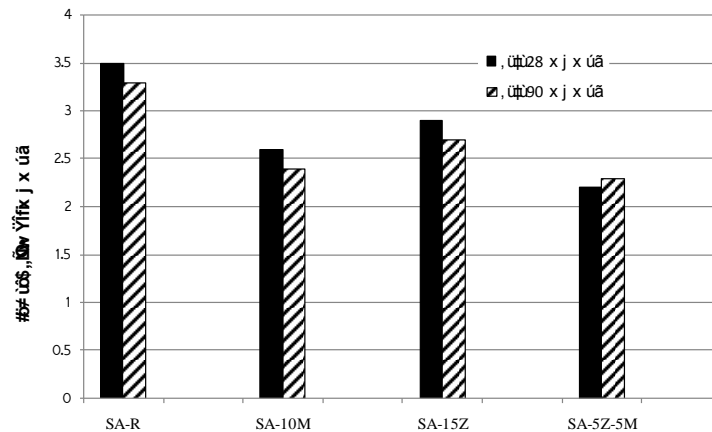
در شکل ۹، مقاومت الکتریکی طرح مخلوط‌های بتن در دو سن ۲۸ و ۹۰ روز نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، استفاده از مواد پوزولانی باعث افزایش مقاومت الکتریکی بتن شده است. مقاومت الکتریکی با توجه به افزایش سن از ۲۸ روز تا ۹۰ روز نیز افزایش یافته است. بر این اساس، طرح مخلوط‌های حاوی ۱۰ درصد دوده سیلیس بیشترین مقاومت الکتریکی را در هر دو سن ۲۸ روز و ۹۰ روز ارائه نموده است.



شکل ۹- مقاومت الکتریکی طرح مخلوط‌های مورد مطالعه در سنین ۲۸ و ۹۰ روز

#### ۳-۴ جذب آب نیم ساعته

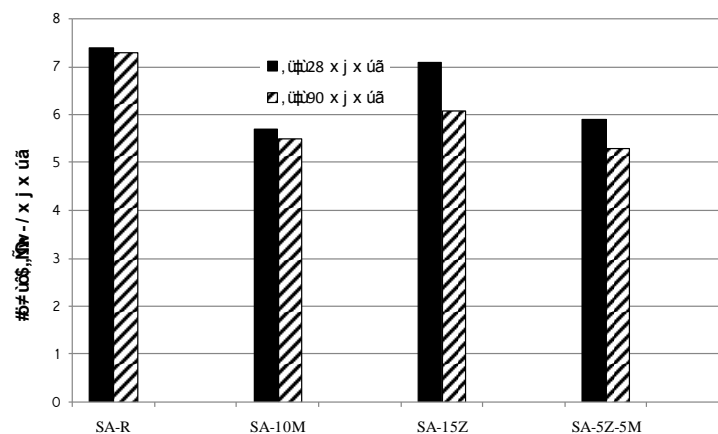
در شکل ۱۰، جذب آب بتن‌های مورد مطالعه در ۳۰ دقیقه ارائه شده است. همانگونه که در نتایج مشاهده می‌شود، با افزایش سن، جذب آب نمونه‌ها کاهش می‌یابد. از سویی ملاحظه می‌شود که عموماً استفاده از مواد پوزولانی در ترکیب‌های دو جزئی و سه جزئی موجب کاهش درصد جذب آب می‌شود. با مقایسه نتایج مشاهده می‌شود جذب آب مخلوط‌های سه جزئی بین طرح‌های دو جزئی و یک جزئی می‌باشد. مشاهده می‌شود مخلوط شاهد بیشترین جذب آب را در سنین ۲۸ و ۹۰ روز داشته است.



شکل ۱۰- جذب آب نیم ساعته

#### ۴-۴ جذب آب ۲۴ ساعته

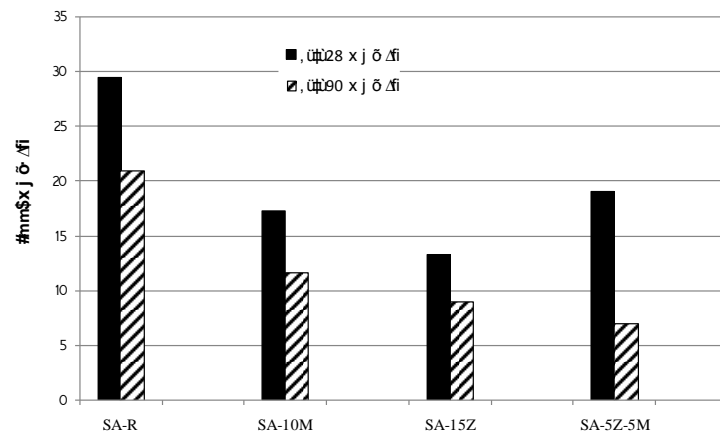
شکل ۱۱، نتایج جذب آب حجمی ۲۴ ساعته طرح مخلوط‌های مورد مطالعه را در سنین مختلف نشان داده شده است. به‌طور کلی استفاده از مواد پوزولانی در ترکیب‌های دو و سه جزئی باعث کاهش درصد جذب نهایی بتن می‌شود. همانگونه ملاحظه می‌شود، طرح مخلوط شاهد و بتن دو جزئی حاوی ۱۵ درصد زئولیت بیشترین جذب آب را در هر دو سن ۲۸ و ۹۰ روز داشته‌اند. کمترین درصد جذب آب ۲۴ ساعته نیز مشابه با جذب آب نیم ساعته در مورد طرح مخلوط سه جزئی حاوی ۱۰ درصد دوده سیلیس ثبت شده است.



شکل ۱۱- جذب آب ۲۴ ساعته (نهایی)

#### ۵-۴ نفوذ آب تحت فشار

در شکل ۱۲، مقادیر عمق نفوذ آب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز برای طرح‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود استفاده از مواد پوزولانی در ترکیب‌های دو و سه جزئی باعث کاهش چشمگیر عمق نفوذ آب شده است.



شکل ۱۲- نفوذ آب تحت فشار

### ۵- نتیجه گیری

پس از تحلیل نتایج مشخص شد که استفاده از مواد پوزولانی در ترکیب‌های چند جزئی بر حسب نوع ماده پوزولانی رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد. بر این اساس مشخص شد استفاده از پوزولان‌های دوده سیلیس و زئولیت به علت واکنش‌پذیری مناسب می‌تواند تاثیر مثبتی بر بهبود رفتار مقاومتی بتن در ترکیب‌های دو و یا سه جزئی داشته باشد. به طور کلی طرح مخلوط بتن‌های سه جزئی حاوی دوده سیلیس نسبت به طرح مخلوط‌های دو جزئی آنها بهبود نسبی داشته است. در مورد زئولیت، استفاده از ترکیب سه جزئی باعث بهبود چشمگیری در عملکرد مقاومتی و دوام داشته است. نتایج بدست آمده از آزمون‌های دوام نشان داد که عموماً استفاده از این نوع مواد می‌تواند بهبود چشمگیری در رفتار دوام و پایداری بتن داشته باشد.

### مراجع

- [1] B. Lothenbach, K. Scrivener, R.D. Hooton, Supplementary cementitious materials, *Cement and Concrete Research* 41 (2011) 1244–1256.
- [2] A.R. Pourkhorshidi, M. Najimi, T. Parhizkar, F. Jafarpour, B. Hillemeier, Applicability of the standard specifications of ASTM C618 for evaluation of natural pozzolans, *Cement & Concrete Composites* 32 (2010) 794–800.
- [3] M.G. Alexander, B.J. Magee, Durability performance of concrete containing condensed silica fume, *Cement and Concrete Research* 29 (1999) 917–922.
- [۴] قدوسی، پ. و همکاران، فن آوری بتن در شرایط محیطی خلیج فارس، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه ۲۸۳، ۱۳۷۸.
- [۵] رمضانپور، ع.، پیدایش، م.، دوام بتن و نقش سیمان‌های پوزولانی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه ۲۷۴، ۱۳۷۶.

**Paper code: C**

**J. Sobahni and B. Ahmadi**

Faculty Member, Concrete Technology Department, Road, Housing and  
Urban Development Research Center (BHRC), Tehran, Iran

PhD Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering,  
Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Email: [sobhani@bhrc.ac.ir](mailto:sobhani@bhrc.ac.ir)

**Abstract:**

Production of cement as the main components of concrete is an energy consumption process with environmental pollutions. Application of cementitious materials is one of the major solutions for mitigation of subsidence environmental problems and economics of concrete production leading to more durable concrete structures. This paper tries to assess the application of pozzolanic materials, namely micro silica and natural zeolite for this means. A two-phase experimental study conducted which at the first stage, an optimization process utilized to verify the proper blended binder system in binary and ternary terms. At the second phase the mechanical and durability aspects of the blended system experimentally investigated which propose the enhancements on the durability of concrete mixtures.

**Keywords:** Concrete; Supplementary cementitious materials; micro silica; natural zeolite; mechanical properties; durability; optimization