

# بررسی خواص مهندسی مخلوط‌های دو جزئی و سه جزئی حاوی زئولیت

## طبیعی و دوده سیلیس

دریافت مقاله: ۱۳۹۷-۰۹-۲۵

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷-۱۰-۲۲

جعفر سبحانی (نویسنده مسئول)

عضو هیات علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

Email: sobhani@bhrc.ac.ir

علیرضا پورخوشیدی

عضو هیات علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

بابک احمدی

عضو هیات علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

مهدی چینی

عضو هیات علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

### چکیده:

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 صرفه جویی 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 خواص مهندسی مخلوط بهینه برای کاربرد دو نوع ماده جایگزین سیمان 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 مهندسی انجام شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد 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. کلمات کلیدی: بتن، مواد جایگزین سیمان، زئولیت، دوده سیلیس.

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 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 [۱-۵].

در سال ۲۰۰۹، Oslakovic و همکاران [۶] دوام سیمان‌های آمیخته سه جزئی شامل خاکستر بادی، سرباره و پودر سنگ آهک در برابر نفوذ یون‌های کلراید را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، نفوذپذیری تسریع شده یون کلراید بتن‌های ساخته شده از جایگزینی ۳۵ و ۵۰ درصد با بتن مرجع مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج بهبود خواص بتن‌های مذکور از نظر نفوذپذیری در مقابل یون‌های کلراید می‌باشد.

در سال ۲۰۰۷، Yazici [۷]، تاثیر شرایط عمل‌آوری را بر مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی حاوی درصد بالای جایگزینی سیمان با مواد پوزولانی شامل سرباره، خاکستر بادی و دوده سیلیس را مورد بررسی قرار داد. نتیجه این مطالعه نشان داد که با استفاده از مواد سیمانی مکمل با درصد جایگزینی بالا، می‌توان به بتن‌های با مقاومت بالا دست یافت.

در سال ۲۰۱۱، Sinha و همکاران [۸]، نوعی مخلوط سه جزئی بتنی با عملکرد بالا شامل سیمان، خاکستر بادی و سرباره کوره آهنگدازی با حداکثر جایگزینی ۳۰ درصد را توسعه دادند. بر اساس نتایج این تحقیق مشخص گردید که مقاومت فشاری، مقاومت کششی دو نیم شدن و مقاومت خمشی نمونه‌های چند جزئی بهبود پیدا کرده است.

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

2-Blended cement

3- Partial replacement

4-Blast-furnace slag

5-Fly ash

6- Micro silica (Silica fume)

Hooton و Titherington [۹] در سال ۲۰۰۴، مقاومت بتن‌های ساخته شده از سیمانهای آمیخته سه جزئی با ترکیبی از سیمان، دوده سیلیس و سربراره کوره آهنگدازی، در برابر نفوذ یون‌های کلراید را تحت شرایط عمل‌آوری در دمای ۲۳ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار دادند. مقایسات نشان داد که مخلوط حاوی دوده سیلیس با جایگزینی ۷/۵ درصد مناسب‌ترین عملکرد در برابر نفوذ یون کلر که توسط آزمایش‌های RCPT و پروفیل نفوذ یون کلراید انجام شده بود نشان داده است.

در سال ۲۰۰۲، Long و همکاران [۱۰] نوعی بتن با عملکرد بسیار بالا را با استفاده از پودرهای بسیار ریز دو جزئی و سه جزئی حاوی خاکستر بادی، سربراره کوره آهنگدازی و دوده سیلیس را پیشنهاد دادند. در این مطالعه برای بهبود رفتار خمشی، از الیاف فولادی با انواع نسبت طول به قطر استفاده گردید. با توجه به نتایج این مطالعه مشخص گردید که با انجام بهینه‌سازی بر روی ترکیبات مواد پودری می‌توان به مقاومت ۲۰۰ مگاپاسکال با رفتار خمشی مناسب دست یافت.

در سال ۲۰۱۳، Raj و همکاران [۱۱] مخلوط‌های بتنی سه جزئی با استفاده از متاکائولن و لجن قرمز (redmud) را برای تولید بتن پرمقاومت مطالعه کردند. انواع آزمون‌های تعیین مشخصات مکانیکی بر روی نمونه‌های مربوطه انجام و نتیجه‌گیری شد که این مخلوط‌ها قادر به تامین الزامات بتن پرمقاومت بودند.

در سال ۱۳۹۵، نوروزی فر و مدنی [۱۲] خواص مکانیکی و دوام بتن‌های سبب حاوی سیمان سه جزئی با مواد پوزولانی و دوده سیلیسی را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس مطالعات صورت گرفته مشخص گردید با افزایش سن تا ۹۰ روز علی‌رغم آنکه در درصد‌های بالای جایگزینی پوزولان حجم منافذ قابل نفوذ افزایش یافته است، پوزولان طبیعی به واسطه بهبود ریزساختار، تأثیر قابل توجهی بر ارتقاء دوام بتن در برابر نفوذ کلراید و نفوذ موئینه داشته است.

در سال ۱۳۹۰، باقری و همکاران [۱۳] بتن توانمند سه جزئی حاوی پوزولان طبیعی پومیس و دوده سیلیسی برای ساخت سازه‌های بندری در شرایط محیطی خلیج فارس را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. بر این اساس مشخص گردید که با استفاده از ترکیب مناسب پومیس و دوده سیلیسی دست‌یابی به خواص مناسب مقاومت و دوام در سن ۲۸ روز و ارتقای بسیار قابل توجه دوام دراز مدت، امکان پذیر می‌باشد.

در سال ۱۳۹۰، باقری و همکاران [۱۴] دوام بتن‌های توانمند سه جزئی حاوی سربراره داخلی و دوده سیلیسی با استفاده از آزمایش‌های نفوذ یون کلراید را بررسی کردند. در این مقاله نتیجه‌گیری شد که با افزودن دوده سیلیسی به بتن حاوی سربراره روند کسب خواص بتن بهبود قابل ملاحظه‌ای می‌یابد بطوریکه در سن ۲۸ روزه دوام بتن توانمند سه جزئی حاوی دوده سیلیسی و سربراره بهتر از بتن کنترل می‌باشد. همچنین در بلند مدت نیز دوام بتن توانمند سه جزئی حاوی سربراره و دوده سیلیسی بهتر از بتن دوجزئی حاوی سربراره می‌باشد.

با توجه به مطالب فوق ملاحظه می‌گردد با وجود انجام برخی تحقیقات بر روی مواد جایگزین سیمانی، لیکن در داخل کشور 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>۱</sup> می‌باشد. با این وجود، استفاده از مخلوط‌های سه‌جزئی<sup>۲</sup> و چهار جزئی<sup>۳</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.

<sup>1</sup> - Binary

<sup>2</sup> - Ternary

<sup>3</sup> - Quaternary

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
۰/۶	حداکثر (%)	۰/۷۷	۰/۷۴	*Na <sub>2</sub> O+.658K <sub>2</sub> O

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

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

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

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

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

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

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 ژئولیت مورد مطالعه در مقایسه با ملزومات استاندارد ASTM C618 ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشخص است، خواص فیزیکی و شیمیایی ژئولیت 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	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (درصد)
۷۵	۷۵	۷ روزه	۰/۰۰	حداکثر ۴/۰	$\text{SO}_3$ (درصد)
۹۹	۷۵	۲۸ روزه			
۲۹/۸۷	حداکثر ۳۴	مانده روی الک ۴۵ میکرون (درصد)	۲/۷۴	حداکثر ۳/۰	رطوبت در دمای $110^\circ\text{C}$ (درصد)
۰/۰۶	حداکثر ۰/۸	انبساط اتوکلاو (درصد)	۴/۶۷	حداکثر ۱۰/۰	افت سرخ شدن در $50^\circ\text{C} \pm$ 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 غرب استان تهران 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 ۲/۵ کیلوگرم در متر مکعب و ۲/۵ درصد و شن بادامی 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 ملی ۴۹۷۷ قرار گیرند. همانطور که در شکل ۲ مشخص است دانه بنده شن ترکیبی در محدوده استاندارد قرار گرفته است.

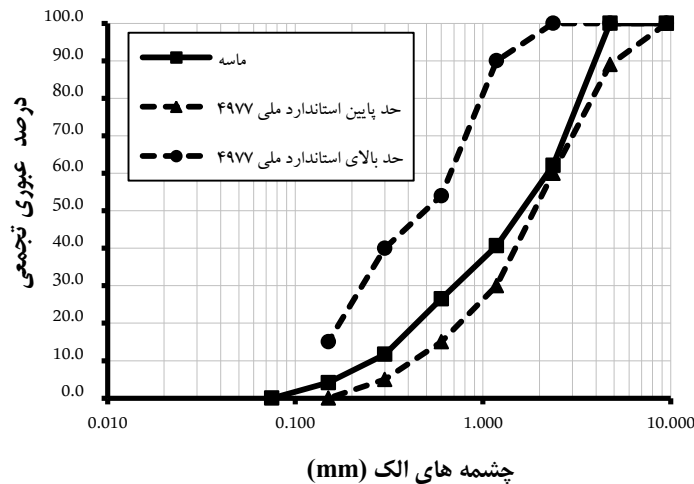
### ۳-۱-۲ آب و فوق روان کننده

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

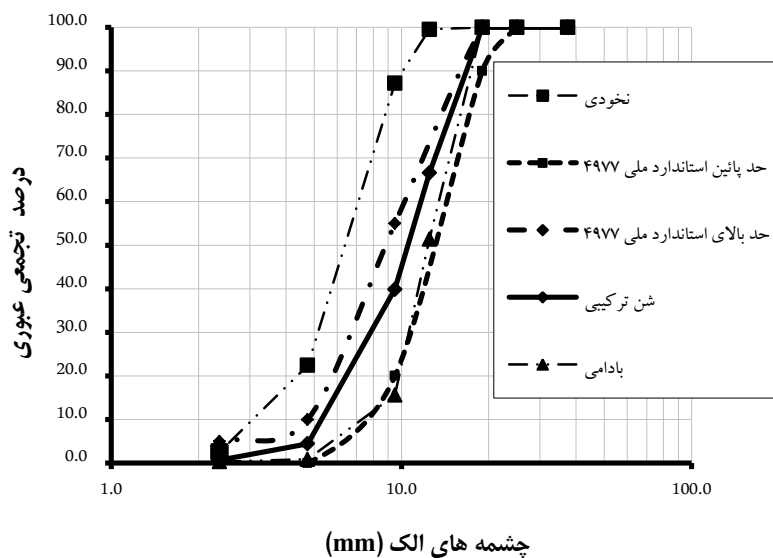
### ۲-۲-۲ آزمون‌ها و روش‌ها

برای تعیین فعالیت پوزولانی کلیه مواد جایگزین سیمان مورد مطالعه از روش آزمایش وزن‌سنجی حرارتی (TG)<sup>۱</sup> 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.

<sup>1</sup>-Thermogravimetry



شکل ۱ دانه بندی سنگدانه ریز



شکل ۲ دانه بندی سنگدانه درشت

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

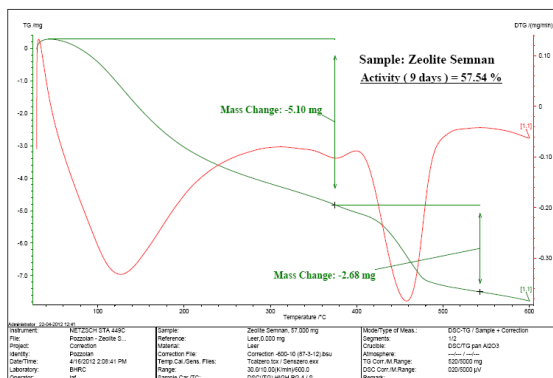
#### ۳-۱ تحلیل نتایج واکنش پذیری دوده سیلیس و زئولیت

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.

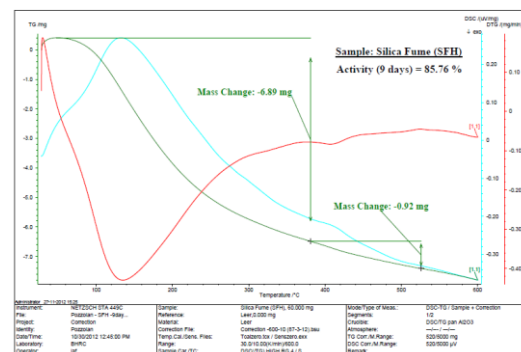
از جمله مهمترین عوامل تاثیر گذار بر واکنش‌پذیری مواد پوزولانی می‌توان به وجود مقادیر کافی اکسیدهای واکنش دهنده و نرمی مناسب آنها اشاره کرد. به طور کلی، وجود مقادیر کافی  $SiO_2$  و  $Al_2O_3$  و  $Fe_2O_3$  برای انجام واکنش‌پذیری پوزولانی مناسب لازم است. به همین علت در استاندارد ASTM C618، حداقل مجموع 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 واکنش

پذیری 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 (ژئولیت) 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  $\text{SiO}_2$  (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 ژئولیت نسبت به دوده سیلیس را می‌توان ناشی از کم بودن مجموع اکسیدهای اصلی دانست.



شکل ۴- نمودار TG برای نمونه ژئولیت 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
۵۷/۵	ژئولیت

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 + ژئولیت) 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  $20 \pm 18$  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 ژئولیت نیاز کمتر به فوق روان کننده نسبت به سیمان پرتلند برای دستیابی به روانی برابر می‌شود.

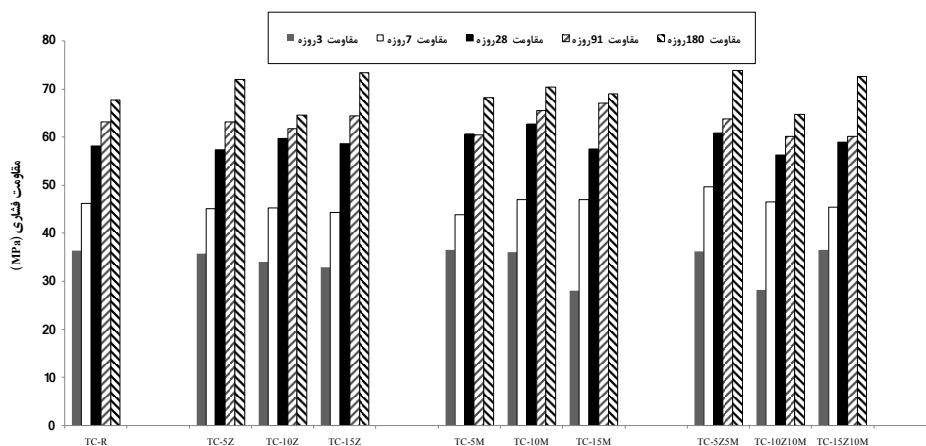


جدول ۷- مشخصات طرح‌های مخلوط بتن در مرحله اول مطالعه

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-5Z	زئولیت، ۵	۰/۵۶	۱۸۰
۶	TC-10Z	زئولیت، ۱۰	۰/۶۳	۱۸۰
۷	TC-15Z	زئولیت، ۱۵	۰/۹۴	۱۶۰
۸	TC-5Z5M	زئولیت، ۵ و دوده سیلیس، ۵	۰/۶۶	۱۹۰
۹	TC-10Z10M	زئولیت، ۱۰ و دوده سیلیس، ۱۰	۰/۶۲	۲۰۰
۱۰	TC-15Z10M	زئولیت ۱۵ و دوده سیلیس، ۱۰	۱/۱	۱۸۰

### 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 سنن 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:

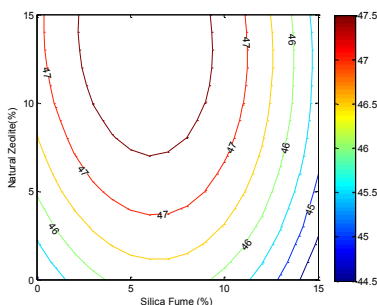
$$CS = a_0 + a_1 \times X + a_2 \times Y + a_3 \times X \times Y + a_4 \times X^2 + a_5 \times Y^2 + a_6 \times X \times Y \quad (1)$$

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

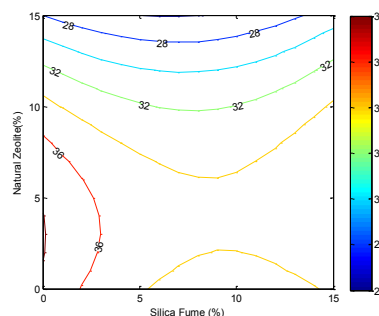
بر این اساس، منحنی هم‌تراز مقاومتی برای مخلوط‌های بتن سه جزئی حاوی دوده سیلیس و زئولیت در سنین ۳ روزه، ۷ روزه، ۲۸ روزه، ۹۱ روزه و ۱۸۰ روز در شکل‌های ۶ (الف تا ه) نشان داده شده است.

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

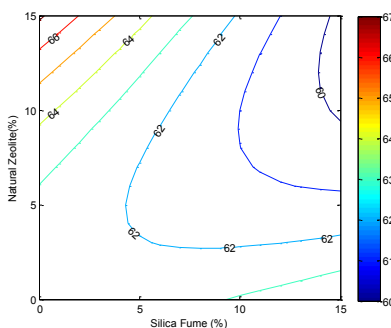
سطح بهینه جایگزینی زئولیت و دوده سیلیس در محدوده ۵ درصد از هر کدام از این نوع پوزولان‌ها می‌باشد. اثرگذاری ترکیب مواد دوده سیلیس و زئولیت در مخلوط سه جزئی با افزایش سن نمود بیشتری دارد.



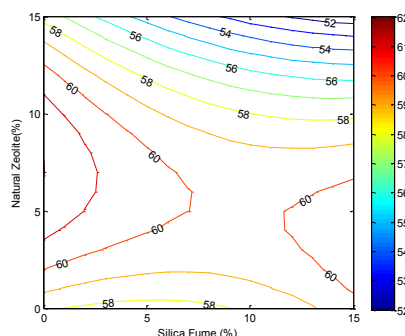
(ب)



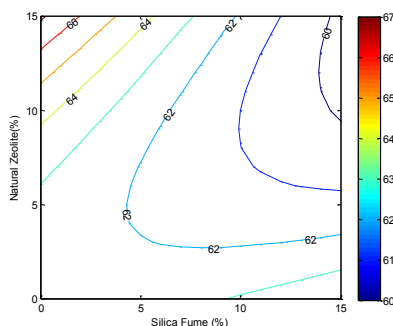
(الف)



(د)



(ج)

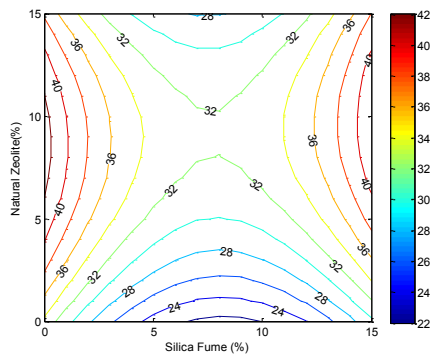


(ه)

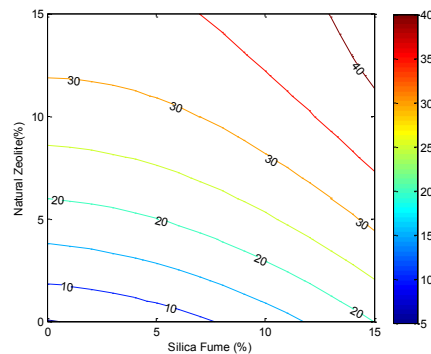
شکل ۶- منحنی اندرکنش (الف) مقاومت ۳ روزه، (ب) مقاومت ۷ روزه، (ج) مقاومت ۲۸ روزه، (د) مقاومت ۹۱ روزه و (ه) مقاومت ۱۸۰ روزه برای مخلوط‌های سه جزئی حاوی زئولیت طبیعی و دوده سیلیس

### 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 روزه 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

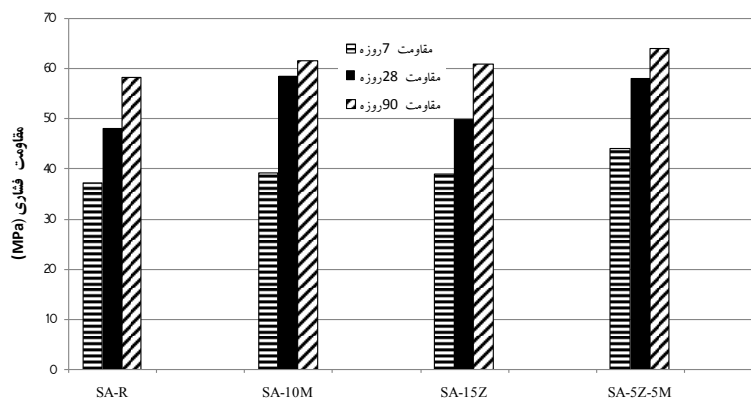
همانگونه که ذکر شد، پس از ارزیابی اولیه و بر اساس مقایسه نتایج مقاومت فشاری و همچنین مقاومت الکتریکی طرح مخلوط‌های دو جزئی و سه جزئی، برای بررسی نهایی انتخاب گردید. جدول ۸ جزئیات طرح مخلوط‌های نهایی و مشخصات بتن در حالت تازه را ارائه می‌دهد. قابل ذکر است همانگونه که در این جدول ملاحظه می‌گردد مقدار مصرف 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 روان کننده (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

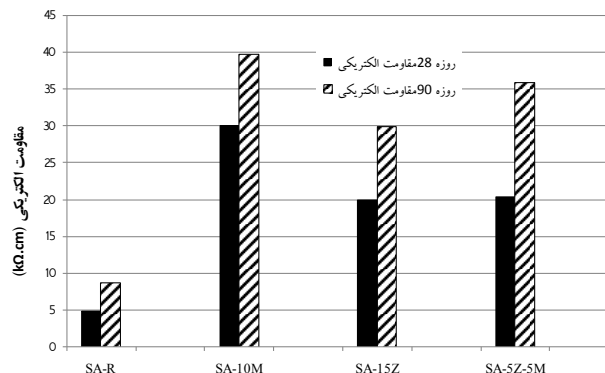
جدول ۹- تغییرات مقاومت طرح مخلوط بتن‌های ترکیبی نسبت به بتن مرجع

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

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٪ زئولیت در سنین ۲۸ و ۹۰ روز شاهد افزایش مقاومتی تا ۴ درصد نسبت به بتن مرجع می‌باشد. همچنین مخلوط سه جزئی حاوی ۱۵ درصد زئولیت 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.

#### ۲-۴ مقاومت الکتریکی

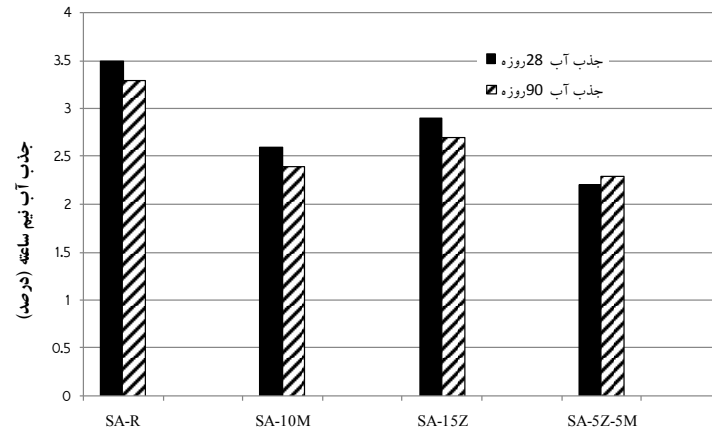
در شکل ۹، مقاومت الکتریکی طرح مخلوط‌های بتن در دو سن ۲۸ و ۹۰ روز نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، استفاده از مواد پوزولانی باعث افزایش مقاومت الکتریکی بتن شده است. مقاومت الکتریکی با توجه به افزایش سن از ۲۸ روز تا ۹۰ روز نیز افزایش یافته است. بر این اساس، طرح مخلوط‌های حاوی ۱۰ درصد دوده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

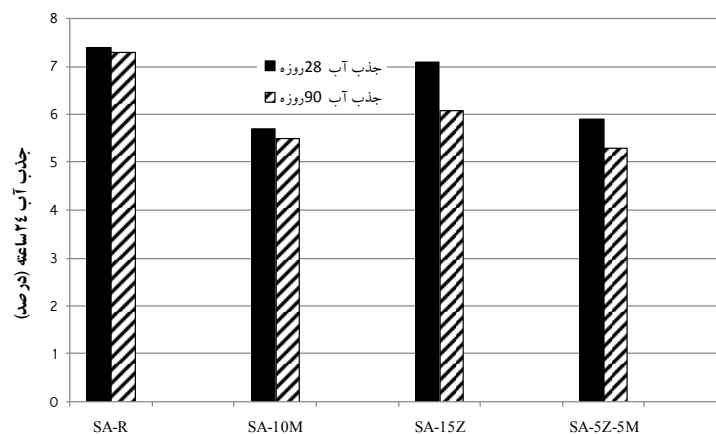
در شکل ۱۰، جذب آب بتن‌های مورد مطالعه در ۳۰ دقیقه ارائه شده است. همانگونه که در نتایج مشاهده می‌شود، با افزایش سن، جذب آب نمونه‌ها کاهش می‌یابد. از سویی ملاحظه می‌شود که عموماً استفاده از مواد پوزولانی در ترکیب‌های دو جزئی و سه جزئی موجب کاهش درصد جذب آب می‌شود. با مقایسه نتایج مشاهده می‌شود جذب آب مخلوط‌های 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

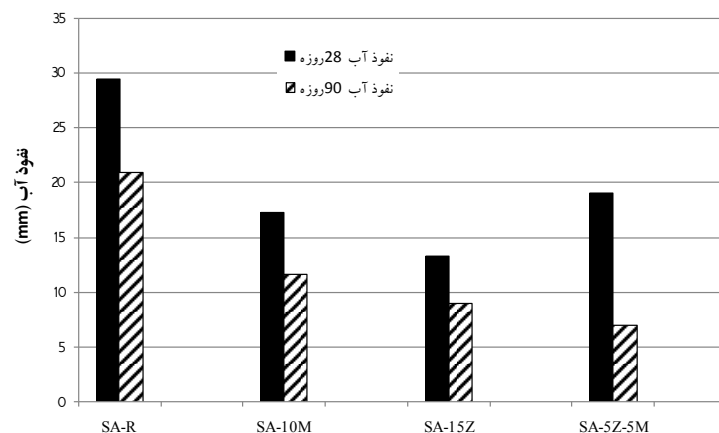
شکل ۱۱، نتایج جذب آب حجمی ۲۴ ساعته طرح مخلوط‌های مورد مطالعه را در سنین مختلف نشان داده شده است. به‌طور کلی استفاده از مواد پوزولانی در ترکیب‌های دو و سه جزئی باعث کاهش درصد جذب نهایی بتن می‌شود. همانگونه ملاحظه می‌شود، طرح مخلوط شاهد و بتن دو جزئی حاوی ۱۵ درصد زئولیت بیشترین جذب آب را در هر دو سن ۲۸ 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 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 ۱۳- 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 پایایی بتن داشته باشد.

### تقدیر و تشکر

این مقاله در راستای پروژه تحقیقاتی و با حمایت مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی صورت گرفته است.

### 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.
- [4] قدوسی، پ. و همکاران، فن‌آوری بتن در شرایط محیطی خلیج فارس، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه ۱۳۷۸، ۲۸۳.
- [5] رمضانپور، ع.، پیدایش، م.، دوام بتن و نقش سیمان‌های پوزولانی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه ۱۳۷۶، ۲۷۴.
- [6] I. S. Oslakovic, R. Roskovic and D. Bjegovic, *Concrete ability to resist chloride ions using ternary blended cement*, *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II – Alexander et al (Eds)*, CRC Press, Taylor & Francis Group, London, UK.
- [7] Yazici] Halit Yazıcı, *The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures*, *Building and Environment* 42 (2007) 2083–2089.
- [8] D. A. Sinha, A. K. Verma, and K. B. Prakash, *Development of Ternary blends for High Performance Concrete*, *National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology*, 13-14 May 2011, B.V.M. Engineering College, V.V.Nagar, Gujarat, India.
- [9] R.D. Hooton, M.P. Titherington, *Chloride resistance of high-performance concretes subjected to accelerated curing*, *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 1561–1567.

[10] G. Long, X. Wang, Y. Xie, *Very-high-performance concrete with ultrafine powders*, *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 601–605.

[11] R. Rathan Raj, E.B. Perumal Pillai, A.R. Santhakumar, *Evaluation and Mix Design for Ternary Blended High Strength Concrete*, *Procedia Engineering* 51, (2013) 65-74.

[۱۲] محمدناصر نوروزی فرو سیدحسام مدنی، خواص مکانیکی و دوام بتن های سبز حاوی سیمان سه جزئی با مواد پوزولانی و دوده سیلیسی، سمینار ملی بتن های سازگار با محیط زیست، گرمسار، ایران ۱۳۹۵.

[۱۳] باقری علیرضا، زنگانه حامد، صانعی محمدجواد، توسعه بتن توانمند سه جزئی حاوی پوزولان طبیعی پومیس و دوده سیلیسی برای ساخت سازه های بندری در شرایط محیطی خلیج فارس، پژوهشنامه حمل و نقل، ۱۳۹۰ دوره ۸ شماره ۲ صفحه ۱۳۳ تا ۱۴۴.

[۱۴] باقری علیرضا، زنگانه حامد، محمد مهدی معلمی، بررسی دوام بتن های توانمند سه جزئی حاوی سرباره داخلی و دوده سیلیسی با استفاده از آزمایش های RCPT و RCMT، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، ایران، ۱۳۹۰.

## Properties of Binary and Ternary Mixtures Containing Natural Zeolite and Silica Fume

*J. Sobahni\*, A. Pourkhorshidi, B. Ahmadi, M. Chini*  
Faculty Member, Concrete Technology Department, Road, Housing and  
Urban Development Research Center (BHRC), Tehran, Iran  
Email: 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 subside the 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:** *Supplementary Cementitious Materials; Micro Silica; Natural Zeolite; Mechanical Properties; Durability; Optimization*