

بررسی و مقایسه خصوصیات مکانیکی ملات و بتن حاوی پوزولان و بدون پوزولان سیرجان

علی اکبر مقصودی^۱، حامد احمدی مقدم^۲

۱- عضو هیات علمی، بخش عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، بخش عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

hamed283@yahoo.com

خلاصه

به منظور تعیین کیفیت پوزولان سیرجان به عنوان جایگزین انواع سیمان، پس از تعیین میزان فعالیت پوزولانی، مخلوطهای مختلف ملات و بتن با درصدهای متفاوت پوزولان جایگزین با دو نوع سیمان متفاوت، تهیه و با انجام آزمایشات طولانی مدت گوناگون، خواص مکانیکی نمونه های پوزولانی با نمونه های شاهد (بدون پوزولان)، مقایسه شده است. همچنین با توجه به نقش مهم دوام، کلیه آزمایشات برای شرایط مختلف محیطی انجام و نتایج آنها گزارش شده است. نتایج بدست آمده حاکی از بهبود عملکرد بتن های پوزولانی نسبت به نمونه های شاهد می باشد.

کلمات کلیدی: پوزولان سیرجان، خواص مکانیکی، دوام، ملات و بتن.

مقدمه

آب دریا به عنوان آب حاوی املاح گوناگون، باعث پوکی و در نتیجه کاهش مقاومت سیمان و بتن حاصل از آن می گردد. سازه های در مجاورت آب دریا معمولاً خیلی زودتر از زمان پیش بینی شده فرسوده گردیده و متلاشی می شوند. برای بالا بردن مقاومت بتن در چنین شرایطی راههای گوناگونی پیشنهاد گردیده است. یکی از این راهها استفاده از سیمان تیپ ۵ و یا سیمان تیپ ۲ به اضافه افزودنیهاست. پوزولان قابلیت این را دارد که بصورت مستقیم با سیمان یا بتن مخلوط گردد این عمل باعث ارزان شدن بتن مصرفی با همان کیفیت اولیه می شود در نتیجه سبب پایین آوردن مصرف سیمان پرتلند می گردد که از نظر اقتصادی به صرفه می باشد، یعنی اینکه می توان بخشی از مقدار سیمان پرتلند مورد نیاز بتن را با پوزولان جایگزین کرده و در نهایت به نتیجه دلخواه رسید [۱].

انگیزه های مصرف پوزولانها شامل بهبود کیفیت خیم سیمان (شامل کاهش نفوذ پذیری کاهش آسیب پذیری به دلیل ترکیب شدن با هیدروکسید کلسیم حاصل از واکنش آبگیری سیمان و کاهش گرمایی جسم چسبنده) افزایش حجم تولید سیمان، بدون کاهش کیفیت بلکه با ارتقاء آن کاهش مصرف انرژی و در نتیجه کمک به کاهش آلودگی هوا و کمک به حفظ محیط زیست می باشد [۲]. امروزه گسترش مصرف پوزولانها در صنعت سیمان، کمک به توسعه پایدار به طور اعم و گامی به سوی صنعت سیمان پایدار به طور اخص، تلقی می شود.

مشخصات آیین نامه ASTM C618 [۳] مواد پوزولانی را چنین توصیف می نماید: «یک ماده سیلیسی یا سیلیسی آلومیناتی که به خودی خود ارزش سیمانی شدن ندارد، اما به صورت پودر شده و در مجاورت رطوبت و در دمای معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی داشته و ترکیباتی را که دارای خواص سیمانی شدن می باشند، بوجود می آورد».

موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به منظور استفاده از پوزولان در سیمان و بتن، دو استاندارد ۳۴۳۳ [۴] با عنوان «ویژگیهای پوزولانهای طبیعی» و ۳۴۳۲ [۵] با عنوان «ویژگیهای سیمان پرتلند پوزولانی» را تصویب کرده است.

استاندارد ۳۴۳۲ موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، سیمان پرتلند پوزولانی را اینگونه بیان می کند: «سیمان پرتلند پوزولانی، مخلوطی است از حداکثر ۱۵ درصد پوزولان طبیعی و دست کم ۸۵ درصد کلینکر یا سیمان پرتلند با نرمی مشخص که در مجاورت آب به صورت جسم چسبنده ای در

^۱ استادیار

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه

کارهای ساختمانی مصرف می شود». مطابق این استاندارد «نشانه (پ-پ) باید با خط درشت و بالای محل نشانه گذاری و واژه سیمان پرتلند پوزولانی، روی هر کیسه نوشته شود».

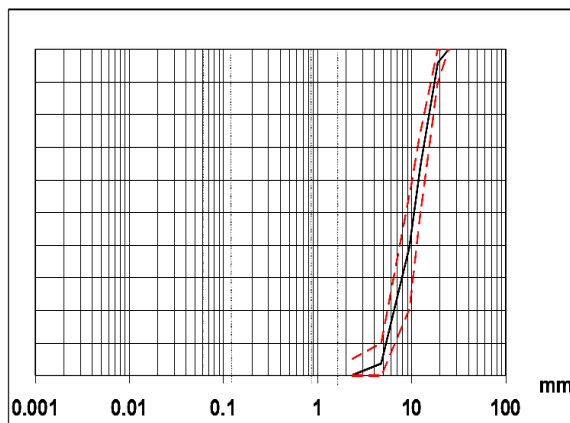
هدف از این تحقیق

هدف از این تحقیق، بررسی و مقایسه مقاومت فشاری نمونه های ملات، مقاومت فشاری و خمشی نمونه های بتنی و روانی بتن در صورت تغییر پارامترهای درصد پوزولان جایگزین سیمان، نوع پوزولان و نوع سیمان با طرح اختلاط و نسبت آب به مواد سیمانی ثابت در شرایط محیطی متفاوت، می باشد.

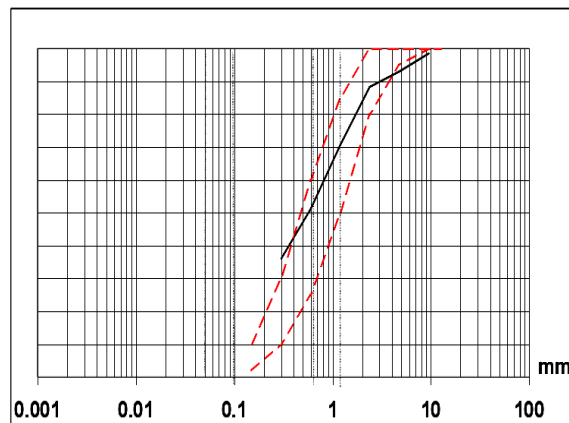
مصالح مورد استفاده

برای ساخت کلیه ملاتها از ماسه استاندارد کشور آلمان استفاده شده است که ویژگی های آنها با استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۴۰ [۶] مطابقت دارد. سیمان مورد استفاده در این طرح، دو نوع سیمان تیپ ۲ و ۵ کارخانه سیمان کرمان می باشد که هر نوع از یک خط تولید این کارخانه تهیه، و بصورت یکجا در آزمایشگاه تکنولوژی بتن پیشرفته دانشگاه شهید باهنر کرمان، دپو شده است. آب مورد استفاده در این مطالعه آب آشامیدنی شهر کرمان است.

برای طرحهای بتنی از شن و ماسه شکسته، تهیه شده از معادن شهر کرمان استفاده شده است که برای جلوگیری از تغییر دانه بندی حین انجام کار، کلیه مصالح مورد نیاز طرح در ابتدا تهیه و بصورت یکجا دپو شده و آزمایشهای مربوط به تعیین منحنی دانه بندی درشت دانه و ریز دانه روی آنها انجام گرفت. شکل های (۱) و (۲) به ترتیب منحنی دانه بندی درشت دانه و ریزدانه را در مقایسه با محدوده مجاز ارائه شده در استاندارد ASTM C33 [۷] نشان می دهد.



شکل ۲- منحنی دانه بندی ماسه طرح اختلاط



شکل ۱- منحنی دانه بندی شن طرح اختلاط

پوزولان مورد نیاز از معدن شهر سیرجان تهیه شده است که پس از حمل به کارخانه سیمان کرمان در آسیاب این کارخانه آسیاب شده و پس از الک کردن به دانه بندی مورد نظر استاندارد ۳۴۳۳ موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران [۴] رسیده است. به منظور اطمینان از ترکیبات تشکیل دهنده پوزولان تولید شده، مقداری از آن در آزمایشگاه شیمی کارخانه سیمان کرمان، تحت آزمون شیمیایی ترکیبات تشکیل دهنده قرار گرفته است که نتایج مربوط به این آزمایش به همراه نتایج مربوط به آنالیز شیمیایی دو نوع سیمان مورد استفاده، در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سیمانهای نوع ۲ و ۵ کارخانه سیمان کرمان و پوزولان سیرجان

	LOI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	F ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Total
سیمان نوع دو	۱/۴۰	۲۱/۹۰	۵/۰۹	۳/۹۰	۶۲/۴۰	۱/۹۰	۱/۸۳	۹۸/۴۲
سیمان نوع پنج	۱/۲۵	۲۱/۶۷	۳/۵۱	۴/۷۲	۶۳/۹۱	۱/۸	۲/۰۷	۹۸/۹۳
پوزولان سیرجان	۴/۱۸	۶۲/۰۸	۱۸/۳۸	۴/۱۶	۳/۳۳	۱/۵۹	۰/۰۵	۹۳/۷۷

بر اساس استاندارد ایران مجموع در صد های اکسید سیلیسیم، اکسید آلومینیوم و اکسید آهن نباید کمتر از ۷۰ درصد باشد [۵]. با توجه به جدول (۱) ملاحظه می گردد که نتایج پوزولان سیرجان، ارضاع کننده مشخصات استاندارد ایران می باشد. همچنین نتایج آزمایش بلین و مانده روی الک ۱۷۰ برای دو نوع سیمان، در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲- بلین سیمان و مانده روی الک ۱۷۰

نوع سیمان	بلین	باقیمانده روی الک ۱۷۰
سیمان نوع دو	۲۸۵۰	۳/۱
سیمان نوع پنج	۳۲۵۸	۰/۰

برای تعیین کیفیت پوزولان سیرجان، میزان فعالیت پوزولانی آن به دو روش ترموگراویمتری و فیزیکی تعیین گردیده است. نتایج آزمایش ترموگراویمتری در جدول (۳) آمده است. بر اساس نتایج این آزمایش که در آزمایشگاه نسوز شرکت تحقیق و توسعه صنعت سیمان انجام گرفته است و با مقایسه نتایج با نتایج پوزولان مرغوب جاجرود (سیمان تهران) و با توجه به اینکه پوزولانهای مرغوب دارای اکتیویته ۱۴ روزه حدود ۴۵٪ تا ۵۰٪ می باشند، نمونه مذکور به لحاظ اکتیویته جزو پوزولانهای مناسب و نسبتاً مرغوب محسوب می گردد.

جدول ۳- نتایج اکتیویته پوزولان به روش ترمو گراویمتری

ردیف	اکتیویته پوزولان				افت
	۳ روزه	۷ روزه	۹ روزه	۱۴ روزه	
نمونه پوزولان سیرجان	۲۶/۱۲	-	۳۵/۲۸	۴۶/۸۸	۲/۹۹
پوزولان مرغوب جاجرود (سیمان تهران)	۴۰/۶۸	۵۰/۵۱	۵۳/۱۹	۶۰/۱۹	۱۱/۶۱

نتایج آزمایشات فیزیکی تعیین فعالیت پوزولانی که در آزمایشگاه کارخانه سیمان کرمان انجام گرفته است در جدول (۴) آمده است. در این جدول کلیه نمونه ها از مخلوط سیمان نوع دو به اضافه ۳۰ درصد پوزولان بوده و فعالیت پوزولانی از تقسیم مقاومت فشاری سیمان پوزولانی به مقاومت فشاری سیمان شاهد به دست می آید.

جدول ۴- نتایج تست روانی نمونه های پوزولان و آزمون فیزیکی تعیین فعالیت پوزولانی

فعالیت پوزولانی	مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)			روانی	علامت اختصاری	نوع سیمان
	۳ ماهه	۲۸ روزه	۷ روزه			
-	۴۴۲	۳۷۲	۳۰۰	۱۲۸	II	سیمان شاهد نوع دو
۱/۰۱	۴۴۸	۳۴۶	۲۲۸	۱۴۴	S	نمونه معدن پوزولان سیرجان

ساخت و نگهداری نمونه ها

در اجرای این پژوهش، برای ساخت نمونه های ملات، کلیه طرحها، قالبها و شرایط آزمایشگاهی با استاندارد ملی ایران به شماره ۳۹۳ [۶] مطابقت دارد. در این نمونه ها، درصد های مختلفی از پوزولان شامل ۵٪، ۱۰٪، ۱۲٪، ۱۴٪، ۱۵٪ و ۱۸٪ جایگزین سیمان گردیده است که تعداد طرحها با ملات شاهد، رویهمرفته ۷ طرح می باشد پس از قالب گیری، آزمونها در محیط مرطوب به مدت ۲۴ ساعت نگهداری و سپس نمونهها را از قالب خارج کرده و تا سن ۲۸ روز در آب و پس از آن نگهداری در محیط مرطوب مطابق استاندارد، نگهداری شدند. سپس در سن موردنظر آزمونها از آب خارج گشته و هر کدام از دو سر آن برای مقاومت فشاری مورد آزمون قرار گرفتند.

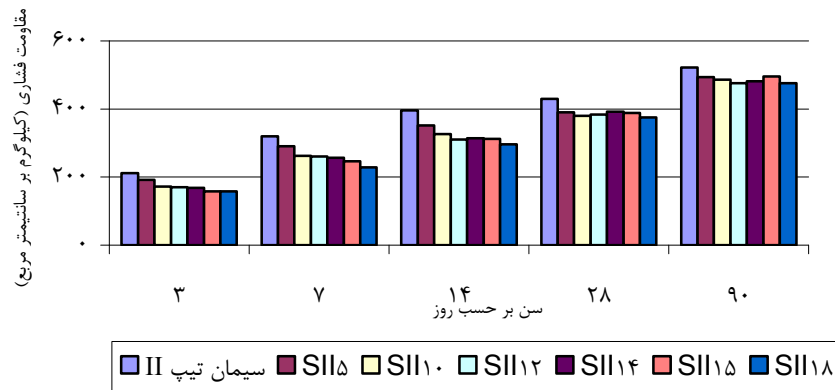
برای ساخت نمونه های بتنی، پس از تهیه مصالح و تعیین مشخصات مورد نیاز، طرح اختلاط بتن به روش ACI۲۱۱ [۸] به دست آمد، و بر این اساس، نمونه های آزمایشگاهی برای شش شرایط اختلاط متفاوت با بکارگیری سیمانهای نوع دو و پنج کارخانه سیمان کرمان، در دو شرایط محیطی متفاوت (تا سن ۲۸ روز در آب و پس از آن نگهداری در محیط مرطوب مطابق استاندارد ایران و شرایط نگهداری در محلول ۵ درصد سولفات سدیم) طراحی، ساخته و مطابق استاندارد [۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳] آزمایش گردید. بتن یکی از طرحها بدون پوزولان (به عنوان بتن کنترل) به شرح جدول (۵) و بتن پنج حالت دیگر شامل کاهش سیمان به ۹۵، ۹۰، ۸۸، ۸۶ و ۸۴ درصد وزن سیمان بتن کنترل و جایگزین کردن پوزولان سیرجان به میزان ۵، ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ درصد به جای سیمان حذف شده است. نسبت آب به مواد سیمانی در کلیه طرحها ثابت و برابر ۰/۵ می باشد.

جدول ۵- ویژگیهای طرح بتن شاهد (بدون افزودنی) به روش ACI۲۱۱

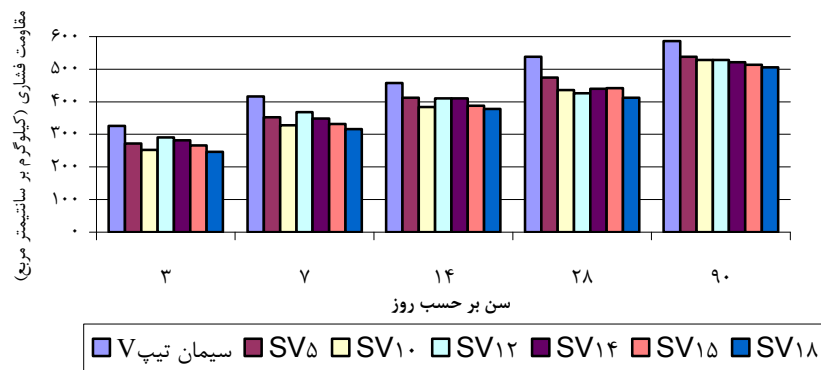
نوع نمونه	سیمان	درشت دانه	ریز دانه	آب
مقدار بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب بتن	۳۵۰	۸۰۰	۹۳۷	۱۷۵

نتایج آزمایشات

مقاومت فشاری ملاتها براساس اندازه‌گیری تاب فشاری آزمونه‌های منشوری به ابعاد $40 \times 40 \times 160$ میلی متر (برای هر یک از سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز) تعیین گردیده که نتایج آن در شکل‌های (۳) و (۴) آمده است. در این اشکال و جداول هر یک از مخلوطها با علامت اختصاری ABCD معرفی شده است. حرف A نوع پوزولان، حرف B نوع سیمان و حروف C و D درصد جایگزینی سیمان با پوزولان را نشان می دهند. به عنوان نمونه SII۱۵ نشان دهنده نمونه حاوی پوزولان سیرجان با سیمان نوع II و ۱۵٪ پوزولان جایگزین می باشد.

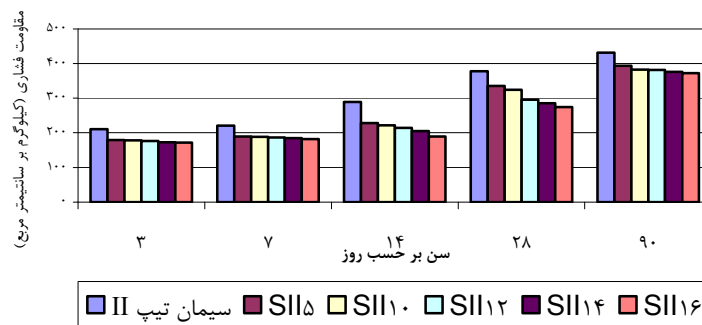


شکل ۳- نمودار مقاومت فشاری نمونه های ملات با سیمان نوع ۲ برای مخلوطهای مختلف بر حسب زمان (تا سن ۲۸ روز در آب)

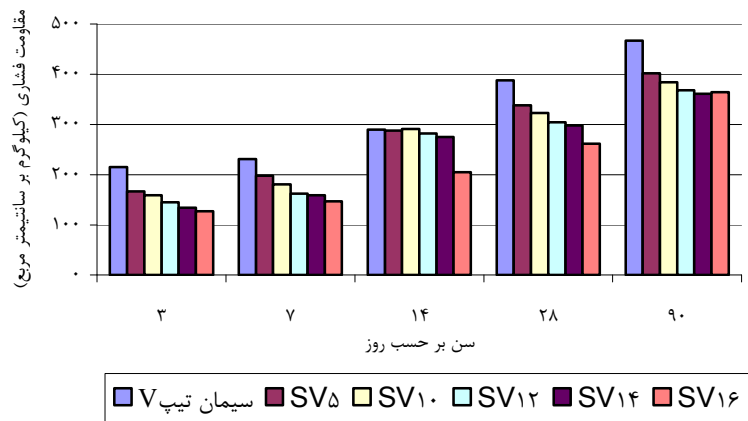


شکل ۴- نمودار مقاومت فشاری نمونه های ملات با سیمان نوع ۵ برای مخلوطهای مختلف بر حسب زمان (تا سن ۲۸ روز در آب)

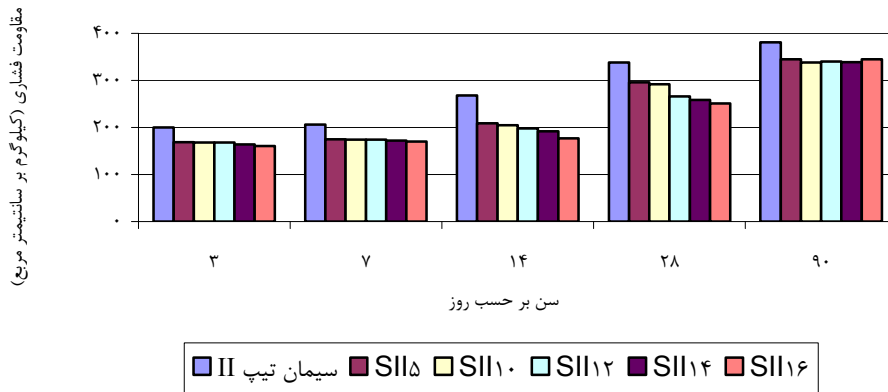
در نمونه های بتنی آزمایشات مقاومت فشاری برای نمونه های مکعبی به ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی متر برای سنین ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز و آزمایشات مقاومت خمشی برای کلیه طرحها در سنین ۲۸ و ۹۰ روز انجام شده که نتایج آن در شکل‌های (۵) تا (۸) و جدول (۶) آمده است. نتایج آزمایش روانی نیز در شکل (۹) نشان داده شده است.



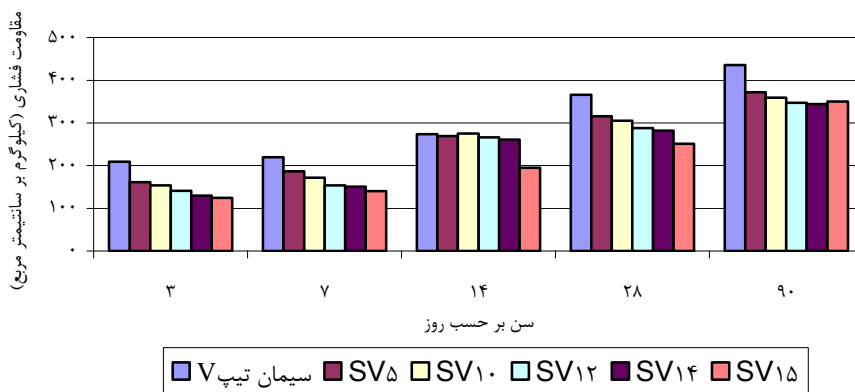
شکل ۵- نمودار مقاومت فشاری نمونه های بتنی با سیمان نوع ۲ برای مخلوطهای مختلف بر حسب زمان (تا سن ۷ روز در آب)



شکل ۶- نمودار مقاومت فشاری نمونه های بتنی با سیمان نوع ۵ برای مخلوطهای مختلف بر حسب زمان (تا سن ۷ روز در آب)



شکل ۷- نمودار مقاومت فشاری نمونه های بتنی با سیمان نوع ۲ برای مخلوطهای مختلف بر حسب زمان (محیط سولفاتی)

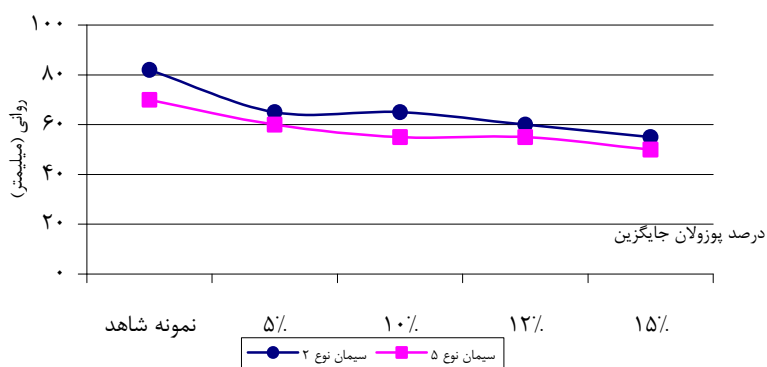


شکل ۸- نمودار مقاومت فشاری نمونه های بتنی با سیمان نوع ۵ برای مخلوطهای مختلف بر حسب زمان (محیط سولفاتی)

جدول ۶- مقاومت خمشی نمونه های بتنی حاوی پوزولان سیرجان در دو شرایط محیطی متفاوت

نمونه	شرایط نگهداری	روزه ۲۸		شرایط نگهداری	نمونه	روزه ۹۰		روزه ۲۸		شرایط نگهداری	نمونه
		مقاومت خمشی	فعالیت پوزولانی*			مقاومت خمشی	فعالیت پوزولانی*	مقاومت خمشی	فعالیت پوزولانی*		
II	۲۸ روز در آب	۳۹	-	۴۵	-	V	۲۸ روز در آب	۴۰	-	۴۷	-
	محلول سولفات	۳۵	-	۳۹	-	V	محلول سولفات	۳۶	-	۳۸	-
SII۵	۲۸ روز در آب	۳۸	۰/۹۷	۴۷	۱/۰۴	SV۵	۲۸ روز در آب	۴۱	۱/۰۲	۴۹	۱/۰۴
	محلول سولفات	۳۴	۰/۹۷	۴۱	۱/۰۵	SV۵	محلول سولفات	۳۷	۱/۰۲	۴۳	۱/۱۳
SII۱۰	۲۸ روز در آب	۳۵	۰/۸۹	۴۶	۱/۰۲	SV۱۰	۲۸ روز در آب	۴۴	۱/۱	۵۲	۱/۱
	محلول سولفات	۳۱	۰/۸۸	۴۰	۱/۰۲	SV۱۰	محلول سولفات	۴۰	۱/۱۱	۴۶	۱/۲۱
SII۱۲	۲۸ روز در آب	۳۷	۰/۹۵	۴۶	۱/۰۲	SV۱۲	۲۸ روز در آب	۴۵	۱/۱	۵۳	۱/۱۲
	محلول سولفات	۳۲	۰/۹۱	۴۱	۱/۰۵	SV۱۲	محلول سولفات	۴۱	۱/۱۳	۴۸	۱/۲۶
SII۱۴	۲۸ روز در آب	۴۱	۱/۰۵	۴۹	۱/۰۸	SV۱۴	۲۸ روز در آب	۴۶	۱/۱۵	۵۴	۱/۱۴
	محلول سولفات	۳۳	۰/۹۴	۳۹	۱	SV۱۴	محلول سولفات	۴۲	۱/۱۶	۴۹	۱/۲۸
SII۱۶	۲۸ روز در آب	۴۴	۱/۱۲	۵۱	۱/۱۳	SV۱۶	۲۸ روز در آب	۴۸	۱/۲	۵۹	۱/۲۵
	محلول سولفات	۳۳	۰/۹۴	۴۰	۱/۰۲	SV۱۶	محلول سولفات	۴۳	۱/۱۹	۵۴	۱/۴۲

* منظور از فعالیت پوزولانی نسبت مقاومت نمونه به مقاومت نمونه شاهد (بدون پوزولان) می باشد.



شکل ۹- نتایج آزمایش روانی

تحلیل نتایج

- ۱- مقدار مقاومت بتن های حاوی سیمان تیپ ۵ بیشتر از سیمان تیپ ۲ می باشد.
- ۲- با سیمان ثابت با افزایش پوزولان، مقاومت بتن در سنین اولیه کم می شود اما این نقصان در سنین بالا جبران می گردد.
- ۳- در یک بررسی کلی با توجه رشد مقاومت در سنین کم (تا ۲۸ روز) می توان چنین نتیجه گرفت که مقاومت فشاری نمونه های دارای پوزولان در سنین اولیه از آهنگ رشد کندتری نسبت به نمونه های شاهد برخوردار بوده، در حالی که در فاصله زمانی ۲۸ تا ۹۰ روز مقاومت فشاری نمونه های دارای پوزولان، از آهنگ رشد بالاتری برخوردار است. چنین رفتاری در پوزولان، تاییدی بر این موضوع است که تعیین درصد بهینه پوزولان براساس مقاومت های دراز مدت می تواند با اطمینان بیشتری نسبت به نتایج آزمایش های مقاومتی کوتاه مدت (چند هفته اول عمر نمونه) همراه باشد.
- ۴- عملکرد سیمان تیپ ۵ در محیط سولفاتی بهتر از سیمان تیپ ۲ می باشد.
- ۵- تاثیر محیط سولفاتی با افزایش زمان بر مقاومت نمونه های بتنی بیشتر می باشد.
- ۶- بتن های حاوی پوزولان و سیمان تیپ ۵ بهترین عملکرد را در محیط سولفاتی دارا می باشند.
- ۷- میزان روانی در شرایط مشابه برای بتن حاوی سیمان تیپ ۵ کمتر از سیمان تیپ ۲ می باشد.
- ۸- افزایش درصد پوزولان سبب کاهش میزان روانی می گردد.
- ۹- مقاومت خمشی نمونه های بتن ساخته شده با پوزولان سیرجان در سن ۹۰ بیشتر از نمونه های شاهد می باشد. این امر حاکی از آن است که استفاده از پوزولان رفسنجان در بتن سبب افزایش مقاومت کششی آن می شود.

۱۰- نتایج آزمایش های مقاومت فشاری و خمشی در محیط سولفاتی، مزیت استفاده از پوزولان را در بتن به خوبی آشکار می کند. با توجه به نتایج بدست آمده ملاحظه می گردد که در محیط سولفاتی، روند کاهش مقاومت بتن کنترل بیشتر از سایر بتن هایی می باشد که در آنها از پوزولان استفاده شده است.

۱۱- پوزولان نقش مهمی در کاهش نفوذپذیری بتن دارد. با توجه به اینکه پس از سخت شدن سیمان حفره هایی برجا می ماند، بنابراین محصولات واکنش های پوزولانی باعث پر شدن حفره ها و یا کاهش ابعاد آنها خواهد شد و در نتیجه باعث بهبود دوام بتن در برابر حمله سولفات ها می گردد.

۱۲- با توجه به نتایج بدست آمده از این پژوهش، اگر مقاومت زیاد در روزهای اولیه مورد نیاز نباشد نظیر سد های بتنی و مخازن آب بتنی می توان از پوزولان به عنوان یک عامل کاهش تاثیر حمله سولفات ها بر بتن استفاده نمود.

۱۳- وقتی که خواص پوزولانی و یا سیمان کننده یک ماده طوری باشد که به عنوان جایگزین نسبی برای سیمان پرتلند در بتن بتواند استفاده شود صرفه جویی زیادی در انرژی و هزینه، نتیجه خواهد شد.

۱۴- منافع مهندسی ای که ممکن است از کاربرد مواد افزودنی معدنی در بتن حاصل شود عبارتند از بهبود مقاومت در برابر ترک خوردگی حرارتی به علت حرارت کمتر هیدراتاسیون، زیادتیر شدن مقاومت نهایی و نفوذ ناپذیری بخاطر بهبود وضعیت منافذ، و در نتیجه کاهش قلیائیت، دوام بهتر در مقابل حملات شیمیایی مانند آب سولفاتی و انبساط قلیایی سنگدانه.

منابع

۱. رضانیانپور، علی اکبر. "ریز ساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)". انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر. ۱۳۸۵.
۲. قالیبافیان، مهدی. "مروری بر تولید و مصرف مواد افزودنی در بتن با تاکید بر مصرف میکروسیلیس و نقش آن در جلوگیری از خورده شدن میلگردهای آرماتور در داخل بتن". نشریه پیام آبادگران، شماره ۱۹۹.
3. ASTM C618-78. "Specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete".
۴. موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران؛ استاندارد شماره ۳۴۳۳، "ویژگیهای سیمان پرتلند پوزولانی"، تهران، ۱۳۷۳.
۵. موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران؛ استاندارد شماره ۳۴۳۲، ویژگیهای پوزولانهای طبیعی"، تهران، ۱۳۷۳.
۶. موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران؛ استاندارد شماره ۳۰۴۰، "مسه مرجع مورد مصرف در تعیین مقاومت خمشی و فشاری سیمان - ویژگیها و روشهای آزمون"، تهران.
7. ASTM C 33-99a, "Standard Specification for Concrete Aggregates".
8. ACI Committee 211, "Standard Practice for Selection of Properties for Normal, Heavy weight and Mass Concrete" (ACI 211.1-Reapproved 1997)
۹. موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران؛ استاندارد شماره ۳۹۳، "سیمان-تعیین مقاومت فشاری و خمشی- روش آزمون"، تهران، ۱۳۷۳.
۱۰. موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران؛ استاندارد شماره ۵۸۱، "بتن- ساخت و عمل آوری نمونه های بتن در آزمایشگاه- آیین کار"، تهران.
۱۱. موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران؛ استاندارد شماره ۳۲۰۶، "تعیین مقاومت فشاری نمونه های بتن"، تهران.
۱۲. موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران؛ استاندارد شماره ۴۹۰، "روش تعیین مقاومت خمشی بتن"، تهران.
۱۳. موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران؛ استاندارد شماره ۳۲۰۳، "تعیین روانی بتن تازه - آزمایش اسلامپ"، تهران.