

پارامترهای مؤثر بر طرح اختلاط سیمان ژئوپلیمری با استفاده از پوزولان معدن چکنه

بهزاد قانعی^۱، سعید ابریشمی^۲، میثم صمدی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

Behzad.ghanei@yahoo.com

چکیده

فرآیند تولید سیمان نیازمند مصرف بالای سوخت و انرژی است که علاوه بر صرف هزینه، سبب آلودگی محیط زیست شده است. لذا محققین در حال جستجو برای یافتن مصالحی نوین به عنوان جایگزین سیمان در بتن هستند. یکی از یافته‌ها در این زمینه، استفاده از پوزولان و تهیه بتن ژئوپلیمری است که به علت داشتن امتیازاتی از جمله ارزان تر بودن، تولید دی اکسید کربن کمتر و خواص مکانیکی مطلوب در مقایسه با سیمان و بتن معمولی، مورد توجه قرار گرفته است. اما استفاده و تولید بتن با این مصالح هنوز در مرحله تحقیق بوده و وارد آئین نامه نشده است. هر مصالح نوینی که قرار است به عنوان مصالح مهندسی مورد قبول قرار گیرد، باید به لحاظ شیمیایی، فیزیکی، مکانیکی و زیست محیطی مورد شناسایی و به لحاظ مسائل اقتصادی مورد ارزیابی قرار گیرد. علیرغم اینکه مطالعاتی روی مشخصات بتن‌های ژئوپلیمری صورت گرفته، ولی اولاً این مطالعات ناقص بوده و ثانیاً این مطالعات، اخیراً وارد حوزه مشخصات مکانیکی شده است. با توجه به موارد اخیر و این مهم که پوزولان نقش اصلی در تهیه این بتن را داراست، در تحقیق حاضر به بررسی پوزولان چکنه نیشابور و مقایسه آن با معیارها و دیگر نمونه‌های پوزولان گزارش شده پرداخته شده و به مطالعه مختصر مشخصات شیمیایی و فیزیکی و مطالعه مشخصات مکانیکی (مقاومت فشاری) بتن‌های ژئوپلیمری قابل تولید با مصالح موجود در استان خراسان رضوی، پرداخته شده است. با توجه به پارامترهای مختلف و مؤثر در تولید این نوع بتن، نسبت به ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی اقدام گردید تا طرح اختلاط مناسب بدست آمده و نتایج مقاومت فشاری ارائه گردد.

کلمات کلیدی: سیمان ژئوپلیمری، پوزولان طبیعی، طرح اختلاط، خاک آلومینوسیلیکات، مطالعات آزمایشگاهی

۱. مقدمه

فرآیند تولید سیمان نیازمند مصرف بالای سوخت و انرژی است که علاوه بر تحمیل هزینه‌های هنگفت، سبب تولید زیاد دی‌اکسید کربن، آزادسازی گازهای گلخانه‌ای، افزایش دمای جهانی، تغییرات اقلیمی و آب‌وهوایی در طبیعت شده است. از طرفی، امروزه تولید سیمان به عنوان ماده اصلی تشکیل‌دهنده بتن با محدودیت مواد خام مواجه شده است. لذا پیامدهای نامطلوب زیست‌محیطی همراه با ضرورت صرفه‌جویی در منابع و انرژی، مهندسان را با چالش یافتن جایگزینی برای سیمان مواجه ساخته است.

پوزولان‌ها که از دیرباز به عنوان مواد جایگزین و مکمل سیمان در ساخت‌وسازها مورد استفاده قرار گرفته‌اند، می‌توانند مشکلات و محدودیت‌های تولید سیمان را حل نمایند. این مواد به صورت طبیعی و مصنوعی قابل حصول هستند و توانسته‌اند با جایگزینی سیمان، ضمن ایجاد صرفه‌جویی در سوخت و کاهش آلودگی محیط‌زیست، برخی خواص بتن را نیز اصلاح نمایند و دوام آنها را به ویژه در محیط‌های خورنده افزایش دهند [۱].

۲. بتن ژئوپلیمری

داویدویتس [۲] اعلام نمود که می‌توان با ایجاد واکنش شیمیایی بین یک مایع قلیایی با سیلیس و آلومینیوم موجود در خاک‌های آلومینوسیلیکاتی مانند پوزولان‌ها یا محصولات جانبی کارخانجات (مانند خاکستر بادی و پوسته برنج) تولید چسب نمود. با توجه به اینکه واکنش بوجود آمده فرآیند پلیمریزاسیون است، اصطلاحاً به چسب تولید شده ژئوپلیمر گفته می‌شود. باید توجه داشت که ژئوپلیمرها یکی از اعضاء خانواده پلیمرهای غیرآلی هستند و با وجود اینکه ساختاری کریستالی دارند، ترکیب شیمیایی آنها شبیه به مواد سیلیکات آبدار طبیعی است [۳ و ۴].

۳. مصالح و وسایل مورد نیاز برای ساخت سیمان ژئوپلیمری

مصالح مورد استفاده در این پژوهش شامل پوزولان (خاک آلومینوسیلیکات)، سدیم سیلیکات (چسب)، محلول قلیایی (سود سدیم هیدروکسید) و آب بوده است. از وسایل می‌توان به پن‌میکسر، قالب و گرم‌خانه نام برد. در ادامه به تشریح نحوه تهیه و مشخصات کلی هر یک از این مصالح پرداخته شده است.

۴. پوزولان

با توجه به اینکه پایه اصلی ساخت بتن ژئوپلیمر ماده آلومینوسیلیکاتی آن می‌باشد می‌توان گفت مهمترین عنصر تشکیل‌دهنده بتن ژئوپلیمری بوده و بالاترین اثر را بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی این نوع بتن دارد. برای تهیه پوزولان لازم، معدن طبیعی پوزولان روستای چکنه در بخش سروایت شهرستان نیشابور انتخاب گردید. از این معدن، پوزولان به صورت سنگدانه به میزان حدود ۲۵۰ کیلوگرم تهیه و به مشهد منتقل گردید.

۵. محلول قلیایی

محلول قلیایی مورد مصرف، مهمترین ماده پس از ماده آلومینوسیلیکاتی در فرآیند تولید بتن ژئوپلیمری می‌باشد. رایج‌ترین محلول قلیایی مورد استفاده ترکیبی از سدیم هیدروکسید (NaOH) و یا پتاسیم هیدروکسید (KOH) به همراه سدیم سیلیکات (Na_2SiO_3) یا پتاسیم سیلیکات (K_2SiO_3) است [۵ و ۶].

۶. سدیم سیلیکات

سدیم سیلیکات یا آب شیشه ترکیبی است از اکسید سدیم و سیلیکا که در شیوه‌های مختلف و با خلوص متفاوت قابل تهیه است. هر یک از این مشخصات دارای ترکیب شیمیایی منحصر بفردی بوده، کاربردهای صنعتی و مصرفی مخصوص به خود را داراست. نمونه مورد استفاده در این تحقیق در رابطه (۱) آمده است.

$$\text{Water} = 52\%, \text{Na}_2\text{O} = 11.5\%, \text{SiO}_2 = 36.5\% \quad (1)$$

۷. گزارش آزمایش‌های XRF و XRD

جهت تعیین دقیق مواد و ترکیبات تشکیل‌دهنده پوزولان و سهم هر یک، آزمایش‌های XRF و XRD توسط آزمایشگاه مواد معدنی زرازا در تهران روی حدود ۵ کیلوگرم از پوزولان انتخابی انجام شده است. نتایج بدست آمده از این آزمایش‌ها در جداول (۱ و ۲) نمایش داده شده است.

جدول ۱- نتایج آزمایش XRF پوزولان چکنه

نام	SiO ₂	Al ₂ O ₃	BaO	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	LoI
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
چکنه	۶۹/۵۴	۱۵/۶۸	۰/۰۸	۳/۷۷	۲/۳۰	۲/۲۲	۰/۸۳	۰/۰۹	۴/۶۰	۰/۱۱	-	۰/۲۹	-	۰/۴۸

جدول ۲- نتایج آزمایش XRD پوزولان چکنه

نام	نام ترکیب و فرمول شیمیایی								
	Albite NaAlSi ₃ O ₈	Orthoclase KAlSi ₃ O ₈	Montmorillonite Na _{0.3} (AlMg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	Muscovite-illite KAl ₂ Si ₅ AlO ₁₀ (OH) ₂	Hornblende Ca ₂ (Fe.Mg) ₄ Al(Si ₇ Al)O ₂₂ (OH) ₂	Biotite K(Mg,Fe) ₃ (Al,Fe)Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	Calcite CaCO ₃	Quartz SiO ₂	Amorphous
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
چکنه	۳۷/۷۴	۱۳/۱۲	-	-	۷/۴۷	-	-	۴۱/۴۷	-

نتایج آنالیزهای XRF و XRD نمونه‌های مختلف تهیه شده می‌توان دریافت که نمونه پوزولان منطقه چکنه قابلیت استفاده در ساخت بتن ژئوپلیمری را داراست. با توجه به نتایج دالی بندار، دانه‌بندی خاک‌های مورد استفاده بایستی در حدود میکرون باشد و تمامی نمونه‌های مورد استفاده ابتدا باید آسیاب گشته سپس به گونه‌ای که به ذرات بسیار ریز (عبوری از الک #۲۰۰) پودر شود [۷].

پوزولان‌ها به صورت سنگدانه بوده و برای آسیاب شدن دو مرحله خردایش و نرمایش روی آنها صورت پذیرفت تا به پودر لازم (مش ۲۰۰) برسد. شایان ذکر است پوزولان‌ها به دلیل وجود مقادیر بالای کوارتز در آنها از سختی بالایی برخوردار بوده و فرآیند آسیاب کردن آنها بسیار دشوار است.

بر اساس آئین‌نامه ASTM C618 [۸] پوزولان‌هایی که مقدار سیلیس آنها از ۶۱٪ بیشتر باشد، به عنوان پوزولان خوب شناخته می‌شوند. همچنین محققین معتقدند که برای تولید بتن ژئوپلیمری با خواص مطلوب، می‌بایست ماده آلومینوسیلیکاتی مصرفی دارای LOI در حدود ۲٪ و Fe_2O_3 کمتر از ۱۰٪ باشد و مقدار CaO بالا نباشد [۶]. بنابراین، از نتایج آزمایش‌های XRF و XRD می‌توان به مناسب بودن مقدار و نسبت سیلیس (SiO_2) و آلومینا (Al_2O_3) در این مصالح پی برد و پیش‌بینی نمود که پوزولان مذکور شرایط اولیه خاک آلومینوسیلیکاتی و ویژگی‌های یک پوزولان خوب را داراست.

۸. عوامل موثر بر طرح اختلاط

دالی بندار و همکاران [۵] به این نتیجه رسیدند که پارامترهای اصلی مؤثر بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری شامل نسبت سدیم‌سیلیکات به سدیم‌هیدروکسید، غلظت سدیم‌هیدروکسید، زمان و دمای عمل‌آوری، میزان و نوع روان‌کننده، آب موجود در نمونه‌ها، نسبت مایع (سیلیکات و سود) به جامد (ماده آلومینوسیلیکاتی) و نوع ماده آلومینوسیلیکاتی (پوزولان) هستند.

۹. روش اختلاط

یکی از مراحل اختلاط مصالح، انجام واکنش‌های پلیمریزاسیون است. ترتیب اختلاط مصالح (افزودن مصالح به مخلوط) و مدت زمان اختلاط روی واکنش‌ها تأثیرگذار است. لذا تعیین روش و مدت زمان اختلاط سدیم‌هیدروکسید و سدیم‌سیلیکات و خاک آلومینوسیلیکاتی جهت انجام واکنش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [۵ و ۶]. منظور از طرح اختلاط، نسبت وزنی کل مصالح مورد استفاده جهت تولید سیمان ژئوپلیمری است. بر خلاف بتن معمولی، استاندارد یا راهنمایی جهت انتخاب طرح اختلاط بهینه یا مناسب برای سیمان ژئوپلیمری وجود ندارد و با توجه به ناشناخته بودن رفتار خاک پوزولان منطقه چکنه در فرآیند ساخت سیمان ژئوپلیمری و عدم وجود هرگونه نتیجه آزمایش مشابه با این خاک، می‌بایست جهت تعیین محدوده مصرفی تمامی پارامترهای وابسته نسبت به انجام آزمایش‌های اولیه اقدام گردد. در تمامی طرح‌ها به محض افزودن محلول قلیایی سدیم‌هیدروکسید به خاک آلومینوسیلیکاتی (پوزولان) ترکیب گل‌مانند بوجود می‌آید که پس از مدتی اختلاط از این حالت خارج شده و کل نمونه تبدیل به گلوله‌های کوچک می‌گردد. پس از افزودن سلیکات سدیم به ترکیب به جهت خاصیت چسبی بودن آن، تمامی گلوله‌ها به هم چسبیده و در حین فرآیند اختلاط از حالت گلوله‌ای خارج شده و تبدیل به مخلوط خمیری شکل می‌شود. شایان ذکر است که تمامی نمونه‌های ساخته شده از لحاظ ظاهری همانند ژله براق بوده و به بدنه قالب نمی‌چسبد و در هنگام قالب‌گیری به جهت ویبره زدن حباب‌های ریز بسیار زیادی از عمق نمونه به سطح می‌آید که نشان‌دهنده حباب‌زا بودن سیمان ژئوپلیمری است. حجم این حباب‌ها با توجه به طرح اختلاط‌ها متفاوت است.

شرح کامل طرح اختلاط نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق در جدول (۳) به طور کامل ارائه شده‌است.

جدول ۳- طرح اختلاط و مقاومت نمونه‌های سری ۱ تا ۱۲

مقاومت فشاری ۲۸ روزه در آب	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	مقاومت فشاری ۷ روزه	میانگین وزن نمونه‌ها	زمان قرارگیری در گرم‌خانه	دمای گرم‌خانه	جرم سدیم هیدروکسید	جرم سدیم سیلیکات	مولاریته سود	جرم آب	جرم سیمان	جرم پوزولان	نسبت جرمی سیلیکات به سود	نسبت جرمی مایع به جامد	ابعاد نمونه	تعداد	ردیف
μPa	μPa	μPa	gr	hr	°c	gr	gr	mol	gr	gr	gr			cm		
۱۲/۴	۰/۴۴	۰/۴	۲۳۸	۴۸	۶۰	۲۰۰	۱۰۰	۱۴	۰	۶۰	۵۴۰	۰/۵	۰/۵	۵×۵×۵	۳	۱
۱۶/۰	۸/۴	۸/۴	۲۵۶	۴۸	۶۰	۲۰۰	۱۰۰	۱۴	۰	۱۲۰	۴۸۰	۰/۵	۰/۵	۵×۵×۵	۳	۲
۱۸/۶	۱۲/۴	۱۴/۴	۲۵۴	۴۸	۶۰	۲۰۰	۱۰۰	۱۴	۰	۱۸۰	۴۲۰	۰/۵	۰/۵	۵×۵×۵	۳	۳
-	۷/۴	۱۲/۸	۱۶۶	۴۸	۶۰	۰	۰	۰	۳۰۰	۶۰۰	۰	-	۰/۵	۵×۵×۵	۳	۴
۹/۳	۸/۴	۲۵۴	۰	۲۵	۲۰۰	۱۰۰	۱۴	۰	۰	۱۸۰	۴۲۰	۰/۵	۰/۵	۵×۵×۵	۳	۵
۱۱/۶	۱۱/۶	۲۶۸	۴۸	۶۰	۲۴۰	۱۲۰	۱۴	۰	۱۲۰	۱۸۰	۴۲۰	۰/۵	۰/۵	۵×۵×۵	۳	۶
۸/۴	۷/۶	۲۶۷	۴۸	۶۰	۲۴۰	۱۲۰	۱۴	۰	۱۲۰	۱۲۰	۴۸۰	۰/۵	۰/۵	۵×۵×۵	۳	۷
۱۷/۲	۱۶/۰	۱۲۶	۰	۲۵	۰	۰	۰	۳۰۰	۰	۶۰۰	۰	-	۰/۵	۵×۵×۵	۳	۸
۱۳/۶	۱۵/۲	۲۰۰	۴۸	۶۰	۰	۰	۰	۳۶۰	۱۲۰	۶۰۰	۰	-	۰/۵	۵×۵×۵	۳	۹
۸/۴	۷/۶	۲۳۶	۴۸	۶۰	۲۰۰	۱۰۰	۱۴	۶۰	۱۲۰	۱۸۰	۴۲۰	۰/۵	۰/۵	۵×۵×۵	۳	۱۰
۱۳/۶	۱۳/۶	۲۶۲	۴۸	۶۰	۲۴۰	۱۲۰	۱۴	۰	۱۲۰	۲۴۰	۳۶۰	۰/۵	۰/۵	۵×۵×۵	۳	۱۱
۱۲/۴	۱۲/۸	۲۶۳	۴۸	۶۰	۲۴۰	۱۲۰	۱۴	۰	۱۲۰	۳۰۰	۳۰۰	۰/۵	۰/۵	۵×۵×۵	۳	۱۲

طرح اولیه مخلوط و روش انتخابی برای عمل‌آوری آن، با استفاده از نتایج گذشتگان، تعیین شده است. پس از ساخت سری اول نمونه‌ها و بررسی مشخصات فیزیکی و مکانیکی آنها نسبت به اصلاح طرح اختلاط، روش ساخت و یا روش عمل‌آوری اقدام شده است. روند سعی و خطا در نهایت منجر به ساخت ۱۲ سری نمونه شده که در ادامه، روند سعی و خطا و جزئیات آن، تشریح شده است. لازم به توضیح است که هر سری خود شامل ۳ نمونه بوده است.

در ابتدا چهار سری نمونه که تنها در نسبت سیلیکات به سود تفاوت داشتند، ساخته شدند. پس از قرارگیری نمونه‌ها در گرم‌خانه، بیرون آوردن آنها و باز کردن قالب‌ها مشخص شد که فقط سطح نمونه‌ها دچار گیرش شده و در قسمت انتهایی قالب گیرش مناسب رخ نداده است (شکل ۱). از این‌رو، نگهداری نمونه‌ها در قالب تا ۱۰ روز پس از ساخت آنها ادامه یافت. پس از این مدت، بدلیل عدم وقوع گیرش مناسب (یعنی خیس بودن و کامل سفت نشدن)، نمونه‌ها مجدداً (بدون قالب) به مدت ۲۴ ساعت درون گرم‌خانه قرار داده شدند که پس از آن ظاهری تقریباً سخت و سفت یافتند. از هر سری، ۲ نمونه در دمای محیط و ۲ نمونه دیگر، در حوضچه آب نگهداری شدند. نمونه‌هایی که در آب بودند، پس از گذشت چند روز از هم باز و متلاشی شدند. اما نمونه‌هایی که در دمای اتاق نگهداری شده بودند، ظاهر مناسبی نداشتند و دچار تغییرشکل شده بودند و ترک‌های

زیادی در سطح‌شان وجود داشت. این نمونه‌ها نیز پس از گذشت ۲۸ روز مقاومتی از خود نشان ندادند، لذا جزئیات این چهار سری در جدول (۳) آورده نشده است.

لازم به توضیح است که در هنگام ساخت این نمونه‌ها، خمیر تشکیل شده به شدت سفت و چسبنده بود، به طوری که سبب چسبندگی زیاد به ظرف شده و از طرفی همزدن در میکسر و قالب‌گیری را مشکل کرده بود. لذا در این مرحله نتیجه گرفته شد که نمونه‌های بعدی با نسبت سیلیکات به سود ۰/۵ ساخته شوند. به دلیل وجود ترک‌های زیاد در سطح تمامی نمونه‌ها، پیش‌بینی شد علت این امر، ماندگاری زیاد نمونه‌ها در گرم‌خانه بوده است. لذا در سری‌های بعدی، زمان نگهداری نمونه‌ها در گرم‌خانه کاهش داده شد تا تأثیر آن بررسی گردد.



شکل ۱- عدم گیرش نمونه‌های اولیه بعد از گذشت ۴ روز

با توجه به نتایج حاصله و مشاهدات صورت گرفته در نمونه‌های اولیه (چهار سری فوق الذکر)، برای ساخت نمونه‌های جدید تغییراتی شامل: استفاده از میز ویبره، افزایش زمان اختلاط از ۵ دقیقه در هر مرحله به ۱۰ دقیقه و افزودن سیمان اعمال گردید.

در سری ۱ تا ۴ کلیه تغییرات ذکر شده (غیر از کاهش غلظت سود) اعمال شد. در سری ۱ تا ۳ جهت کاهش زمان گیرش نمونه‌ها و افزایش مقاومت آنها، سیمان پرتلند تیپ ۱ با نسبت‌های وزنی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزن کل مصالح خاکی، به طرح اختلاط افزوده شده است. در ساخت سری ۴ صرفاً از سیمان استفاده شده که هدف مقایسه با سری ۱ تا ۳ بود (نمونه شاهد) تا بتوان تأثیر پوزلان را به عنوان جایگزینی برای سیمان مشاهده کرد. در سری‌های ۱ تا ۳ حساب هوای زیادی حین ویبره‌زنی خارج گردید، در حالیکه در سری ۴ که تنها ترکیب آب و سیمان بود، حساب هوای قابل مشاهده‌ای ایجاد نشد. با اعمال تغییرات مشاهده شد که نمونه‌های سری ۱ تا ۳ که با سیمان ترکیب شده بودند، گیرش کاملی داشتند و سفت و سخت شده بودند و مقاومت قابل قبولی داشتند. البته پس از باز کردن قالب‌ها و گذشت چند روز در نمونه‌های سری ۱ ترک‌های زیادی مشاهده گردید. در نمونه‌های سری ۲ این ترک‌ها کمتر بوده و نمونه‌های سری ۳ ظاهری سالم و بدون ترک داشتند (شکل ۲).

با توجه به اینکه نمونه‌ها پس از گذشت ۲۸ روز مقاومت نسبتاً خوبی از خود نشان دادند، این نتیجه گرفته شد که افزودن سیمان در مخلوط علاوه بر ایجاد سفتی و سختی لازم و کاهش زمان گیرش، جهت افزایش مقاومت نیز مناسب است. همچنین از طرح اختلاط نمونه‌های سری ۳ به دلیل چسبندگی بیشتر در زمان اختلاط و قالب‌گیری، ترک‌های سطحی کمتر پس از گیرش و مقاومت بیشتر نسبت به سایر نمونه‌ها، برای ساخت سری‌های بعدی استفاده شد.

مقاومت نمونه‌های ۷ روزه بیشتر از ۲۸ روزه‌ی عمل‌آوری شده در هوا و کمتر از ۲۸ روزه عمل‌آوری شده در آب بود که تأثیر آب جبران کاهش مقاومت به دلیل قرارگیری در گرم‌خانه و یا تبخیر آب با گذشت زمان را نشان می‌دهد.



شکل ۲- گیرش و شکل مناسب نمونه‌های سری ۱ تا ۴

برای کاهش حباب‌های هوا و همچنین دستیابی به مقاومت بالاتر در سری بعدی آزمایش‌ها از سنگدانه در نمونه استفاده گردید. بدین منظور از ماسه با ابعاد کوچکتر از ۶ میلی‌متر در مخلوط استفاده گردید.

در سری ۵ تا ۹، اقدام به ساخت نمونه‌هایی مشابه سری‌های قبل ولی با اضافه شدن سنگدانه در داخل مخلوط گردید. برای این منظور به نمونه‌های ۲۰٪ و ۳۰٪ سیمان و نمونه آب و سیمان به تنهایی (سری‌های ۲ تا ۴) که مقاومت بهتری داشتند سنگدانه افزوده شد. از طرفی با توجه به گیرش و ظاهر مناسب و همچنین مقاومت مطلوب نمونه‌های سری ۳ و ۴، یک سری نمونه مشابه این سری ساخته گردید ولی با این تفاوت که پس از ساخت در دمای اتاق (۲۵ درجه) نگهداری شد تا اثر دما بر این نمونه‌ها نیز مشخص گردد.

نمونه‌های این سری به هنگام ویبره‌زنی حباب هوای کمتری داشتند ولی اکثر سنگدانه‌ها به دلیل عدم وجود درشت‌دانه (بادامی و نخودی) در مخلوط و جرم بیشترشان نسبت به آب، سیمان و پوزولان، ته‌نشین شده و در قسمت انتهایی نمونه قرار گرفته بودند که در دیواره‌ها و سطح، این پدیده کمتر مشاهده شد. این امر سبب عدم یکنواختی در نمونه‌ها شد. همچنین به دلیل قرارگیری در گرم‌خانه که منجر به کاهش آب موجود در نمونه‌ها می‌شد، ترک‌های ریزی در سطح‌شان مشاهده گردید و از طرفی نسبت به نمونه‌هایی که بدون سنگدانه ساخته شده بودند، مقاومت کمتری داشتند.

وجود سنگدانه‌ها باعث جلوگیری از انجام واکنش‌ها و چسبندگی مخلوط شد. سنگدانه‌ها در هنگام اختلاط در ظرف ته‌نشین شده و به راحتی مخلوط نمی‌شد. لذا مخلوط همگن نبود و کارایی پایینی داشت.

در سری ۱۰ برای بررسی تأثیر آب، طرح اختلاطی با در نظر گرفتن مقداری آب طراحی شد. در نمونه‌های این سری، حباب هوای کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها در زمان ویبره‌زنی مشاهده گردید ولی پس از باز کردن قالب‌ها ترک‌های زیادی در سطح نمونه وجود داشت.

در سری ۱۱ و ۱۲ جهت بررسی تأثیر مقدار سیمان بر مقاومت، از سیمان معمولی با درصد‌های ۴۰ و ۵۰ نسبت به کل وزن مصالح خاکی در نمونه استفاده شد. در سری ۱۱ علیرغم اینکه هیچ‌گونه ترکی در سطح نمونه وجود نداشت و نمونه ظاهری سالم و گیرشی مناسب داشت، مقاومت کمتری نسبت به نمونه‌های سری ۳ و ۷ که با نسبت ۳۰٪ سیمان ساخته شده بودند، حاصل شد. اما با وجود ترک خوردگی‌های زیاد و بزرگ در نمونه‌های سری ۱۲، مقاومت در حدود سری‌های با ۳۰٪ سیمان بود که با توجه به این مشاهدات، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر سیمان تنها تا یک مقدار مشخص در مقاومت و گیرش اثرگذار است.

۱۰. محل انجام آزمایشات

با همکاری شرکت فرآورده‌های سیمان شرق محل انجام آزمایش‌ها در آزمایشگاه کنترل کیفیت این شرکت انجام گردید.

۱۱. نتیجه‌گیری

در این تحقیق جزئیات ساخت ۱۲ سری نمونه‌های سیمان ژئوپلیمری ارائه شده است. این جزئیات شامل طرح اختلاط، روش ساخت و روش عمل‌آوری نمونه‌ها بوده است. همچنین مقادیر مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بدست آمده برای هر سری گزارش شده است. مجموعه موارد، روند دستیابی به روش ساخت و عمل‌آوری و طرح اختلاط مناسب برای سیمان ژئوپلیمری را نشان داده است. در نهایت طرح اختلاط سری ۳ که شامل نسبت ۳۰٪ سیمان معمولی بوده و منجر به مقاومت فشاری ۱۸/۶ مگاپاسکال شده، به عنوان بهترین طرح اختلاط شناخته شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که با توجه به مقاومت فشاری‌های بدست آمده، بخصوص مقاومت سری ۳ که بیش از حداقل مورد قبول در ساخت‌وساز است، می‌توان از پوزولان به عنوان جایگزین سیمان استفاده کرد و سیمان ژئوپلیمری را جایگزین سیمان معمولی نمود. لذا با توجه به محدودیت مواد خام و مسائل محیط زیستی و هزینه‌های بالا و ضرورت صرفه‌جویی در مصرف سوخت در تولید سیمان، استفاده از پوزولان‌های طبیعی پیشنهاد می‌گردد.

۱۲. مراجع

- [1] Mehta, P. K., and Monteiro, P., (1993). Concrete: Structure, Properties and Materials, Unpublished manuscript for revision of Mehta, PK and Monteiro, PJM Concrete: Structure, Properties, and Materials.
- [2] Davidovits, J. (1991). "Geopolymers: inorganic polymeric new materials". Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 37(8), pp. 1633-1656.
- [3] Palomo, A., Fernandez-Jimenez, A., Lopez-Hombrados, C., and Lleyda, J. L. (2004). "Precast elements made of alkali-activated fly ash concrete". Eighth CANMET. In ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Las Vegas, USA (pp. 530-545).
- [4] Xu, H. and Van Deventer, J. S. J. (2000). "The geopolymerisation of alumino-silicate minerals". International journal of mineral processing, 59(3), pp.247-266.
- [5] Bondar, D., Lynsdale, C. J., Milestone, N. B., Hassani, N., and Ramezani-pour, A. A. (2011). "Effect of heat treatment on reactivity-strength of alkali-activated natural pozzolans". Construction and Building Materials, 25(10), pp. 4065-4071.
- [6] Bondar, D., Lynsdale, C. J., Milestone, N. B., Hassani, N., and Ramezani-pour, A. A. (2011). "Effect of type, form, and dosage of activators on strength of alkali-activated natural pozzolans". Cement and Concrete Composites, 33(2), pp. 251-260.
- [7] Bondar, D. (2009). Alkali activation of Iranian natural pozzolans for producing geopolymer cement and concrete (Doctoral dissertation, University of Sheffield).
- [8] Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., and Lukey, G. C. (2002). "The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite-based geopolymers". Chemical Engineering Journal, 89(1), pp. 63-73.
- [9] ASTM C618-15, (2015). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.