

ارزیابی کمی و بهینه‌سازی پارامترهای اثرگذار بر خواص مکانیکی و رئولوژیکی بتن‌های قلیا فعال سرباره‌ای

اصغر قلی‌زاده وایقان^۱، محمد حسین نوفلاح^{۲*}

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران- سازه دانشگاه آزاد اسلامی- واحد تهران مرکز

Mh.nofallah@gmail.com

چکیده

در این تحقیق، پارامترهای تاثیرگذار بر روی مقاومت فشاری و خواص رئولوژیکی (عمدتاً تنش تسلیم) بتن قلیا فعال سرباره‌ای مورد مطالعه آزمایشگاهی و تحلیل آماری قرار گرفته‌اند. متغیرهای نسبت وزنی آب به مواد چسباننده، نسبت وزنی محلول فعال کننده به سرباره و غلظت محلول هیدروکسید سدیم در ابتدا به عنوان پارامترهای اولیه تحقیق مبنای طراحی مخلوط‌ها قرار گرفتند. در مجموع ۷۵ طرح مخلوط با در نظر گرفتن پنج سطح برای نسبت وزنی آب به مواد چسباننده (۰/۳۵، ۰/۳۸، ۰/۴۰، ۰/۴۱ و ۰/۴۳)، سه سطح برای غلظت محلول هیدروکسید سدیم (۰/۲۵، ۱۱/۲۵ و ۱۵ و ۱۸/۷۵ مولار) و پنج سطح برای نسبت وزنی محلول فعال کننده به سرباره (۰/۲۵، ۰/۳۵، ۰/۴۵، ۰/۵۰ و ۰/۵۵) ساخته شد. آزمایش اسلامپ یا جریان اسلامپ (حسب میزان غلظت مخلوط‌های تازه بدست آمده) بر روی بتن تازه هر طرح صورت پذیرفته و نتایج به دست آمده با استفاده از مدل‌های موجود به تنش تسلیم تبدیل شدند. نمونه‌های قالب‌گیری شده پس از ۲۸ روز عمل‌آوری مستغرق مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند.

نتایج بدست آمده توسط نرم افزار Minitab مورد تحلیل آماری قرار گرفته‌اند و در آنالیزهای آماری صورت گرفته مشخص گردید که پارامترهای غلظت کل محلول فعال کننده، مدول محلول فعال کننده (نسبت مولی SiO_2 به Na_2O) و نسبت حجمی محلول به سرباره متغیرهای تعیین کننده تغییرات در تنش تسلیم و مقاومت فشاری می‌باشند. نتایج تحلیل‌ها نشان دهنده آن است که مدول محلول فعال کننده حداقل در بازه مورد مطالعه تاثیر محسوسی بر مقاومت فشاری نمونه‌ها و تنش تسلیم بتن تازه نمی‌گذارد. همچنین مشخص گردید که نسبت حجمی محلول به سرباره رابطه معکوس و غلظت محلول فعال کننده رابطه مستقیم با مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده دارند. همچنین تحلیل‌های آماری نشانگر این امر می‌باشند که با افزایش هر یک از این دو متغیر اخیر تنش تسلیم بتن کاهش می‌یابد. مدل‌های آماری بدست آمده از دقت بسیار بالایی در پیش‌بینی مقاومت فشاری و تنش تسلیم برخوردار بوده و جهت بهینه‌سازی یا هدف‌گذاری مقاومت فشاری و غلظت بتن قلیا فعال بخوبی قابل استفاده می‌باشند.

کلمات کلیدی: بتن قلیا فعال سرباره‌ای، مقاومت فشاری، تنش تسلیم، مدلسازی آماری

Quantitative characterization and optimization of parameters influencing the mechanical and rheological properties of alkali-activated slag concrete

Asghar Gholizadeh-Vayghan¹, Mohammad-Hossein Nofallah^{2*}

1- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Khajeh-Toosi University of Technology

2- Master of Science in Structural Engineering, Islamic Azad University, Central Tehran Branch

* Corresponding author: Contact at Mh.nofallah@gmail.com

Abstract

In the present work, the parameters affecting the compressive strength and rheological properties (primarily yield strength) of alkali-activated slag concrete are investigated. Water-to-cementitious materials and liquid-to-slag weight ratios as well as the sodium hydroxide solution concentration were adopted as the initial research variables to design the mixture proportions. A total of 75 mixtures were designed where 5 levels of water-to-cementitious materials weight ratio (0.35, 0.38, 0.4, 0.41 and 0.43), 3 levels of sodium hydroxide solution (11.25, 15 and 18.75 Molar) and five levels of liquid-to-slag ratio (0.25, 0.35, 0.45, 0.5, 0.55) were plugged into a full factorial design of experiments. The slump or slump flow of the fresh mixtures were measured (after deciding on the more appropriate one based on the mixtures level of consistency), and the results were then translated to yield stress using the available models. The 28-day compressive strength of the mixtures were also measured and averaged on three specimens. The obtained results were then statistically analyzed using the Minitab software and it was found out that the liquid concentration, activator modulus (i.e., SiO_2 to Na_2O molar ratio) and liquid to slag volumetric ratios are the main three factors predicting the variations in yield stress and compressive strength. The analyses results suggest that the activator modulus has little effect of compressive strength and yield stress in the studied range. The liquid-to-slag volumetric ratio and the activator concentration respectively have inverse and direct effects on compressive strength, while increase in both of these parameters causes a drop in concrete yield strength. The developed regression models were found to have exceptionally high precisions and can be successfully used in optimizing or targeting the compressive strength and/or yield stress of concrete.

Keywords: Alkali-activated concrete, Ground granulated blast furnace slag, compressive strength, yield stress, statistical modeling

۱. مقدمه

با پیشرفت روز افزون صنعت ساختمان و بروز مشکلات زیست محیطی ناشی از مصرف سیمان های پرتلند، نیاز به مصرف مصالح جایگزین دوستدار محیط زیست بیش از پیش احساس می شود. بتن های فعال شده قلیایی از این دست مصالح هستند که در کسب مشخصات مورد نظر به عنوان مصالح ایده آل برای جایگزینی بسیار مناسب بوده و آلودگی های زیست محیطی و مصرف انرژی بسیار پایین تری نسبت به سیمان های پرتلند دارند [۷،۶،۵،۴،۳،۲،۱]. بتن قلیا فعال خاکستر بادی و سرباره ای دو دسته اصلی این نوع بتن ها بوده و تحقیقات گسترده ای جهت تعیین عوامل موثر بر خواص تازه و سخت شده این بتن ها و بهینه سازی این خواص صورت پذیرفته است.

در تحقیقاتی که در کشورهای اروپایی و آمریکای شمالی انجام گرفته، عموماً از خاکستر بادی به عنوان ماده چسباننده استفاده شده است. اما در کشور ما از حیث وجود منابع بسیار غنی و کثیر از مواد دیگر چون سرباره کوره آهن گدازی و کمبود منبع خاکستر بادی استفاده از سرباره در تحقیقات بسیار رایج تر است. سرباره کوره آهن گدازی در بتن سیمان پرتلند به عنوان ماده شبه سیمانی بعنوان جایگزین جزئی سیمان پرتلند استفاده می گردد اما نقشی که سرباره در بتن سیمان پرتلند ایفا می کند (کاهش هزینه، کاهش حرارت هیدراسیون، افزایش مقاومت در برابر حملات سولفاتی) بسیار متفاوت از عملکرد آن در بتن قلیا فعال بعنوان چسب اصلی بتن و در حضور محلول قلیایی-سیلیکاتی است [۹،۸].

استفاده از بتن های فعال شده قلیایی نیازمند وجود یک روش طراحی مناسب و هدفمند است که در برخی تحقیقات گذشته به آنها پرداخته شده است [۱۷،۱۶،۱۵،۱۴،۱۳،۱۲،۱۱،۱۰]. بدون شک تفاوت های اساسی بین نوع چسباننده ها در بتن قلیا فعال با بتن های سیمان پرتلند منجر به ایجاد تفاوت هایی در رفتار این بتن ها شده و نتیجتاً ارائه طرح مخلوط جهت رسیدن به خواص مکانیکی و کارایی مطلوب در بتن های قلیا فعال با استفاده از روش های مرسوم میسر نخواهد بود. لذا پارامترهای موثر بر خواص مذکور بتن های قلیا فعال باید به طور جداگانه باید مورد بررسی قرار گیرد [۱۹،۱۸]. محققان تحقیقات متعددی درباره تاثیر نسبت آب به مواد چسباننده بر مشخصات بتن های فعال شده قلیایی مانند مقاومت مکانیکی و کارایی آن انجام داده اند [۲۰]. همچنین عواملی چون نسبت حجمی محلول فعال کننده قلیایی-سیلیکاتی، نسبت مقدار آب به مواد چسباننده و غلظت محلول قلیایی هر یک به صورت جداگانه و یا ترکیبی مورد بحث قرار گرفته اند [۲۰]، اما هیچگاه تاثیر این پارامترها بطور همزمان و بصورت کمی بر خواص مذکور بتن های قلیا فعال (خصوصاً سرباره ای) مورد بررسی قرار نگرفته اند. انجام چنین تحقیقی می تواند گام مهمی در ارائه روشی جهت طراحی مخلوط بتن های قلیا-فعال باشد.

هدف این پژوهش، مطالعه آزمایشگاهی و تحلیل آماری پارامترهای تاثیرگذار بر روی مقاومت فشاری و خواص رئولوژیکی (عمدتاً تنش تسلیم) بتن قلیا فعال سرباره ای و مدلسازی آماری این خواص برحسب پارامترهای اثرگذار می باشد. مدل های آماری بدست آمده در ادامه تبدیل به نمودارهای کانتوری شده اند که جهت ارائه روش هایی ساده برای طراحی مخلوط بتن های قلیا فعال سرباره ای با مقاومت فشاری و کارایی مورد نظر قابل استفاده می باشند.

۲. برنامه آزمایشگاهی

در ابتدا طرح مخلوط ها بر اساس تغییرات سه پارامتر نسبت وزنی آب به مواد چسباننده، غلظت محلول مولار هیدروکسید سدیم و نسبت وزنی محلول فعال کننده به سرباره (به دلیل آنکه از نقطه نظر اجرایی و طراحی آزمایش ها، استفاده از این سه پارامتر سهولت اجرایی به همراه دارد) طراحی و ساخته شدند. این سه پارامتری به تفصیل در ادامه توضیح داده شده اند.

پارامتر نسبت وزنی آب به مواد چسباننده، به نسبت وزن کل آب موجود در بتن (اعم از آب ترکیبی، آب موجود در هیدروکسید سدیم - بسته به غلظت هیدروکسید سدیم متغیر است، و آب موجود در سیلیکات سدیم - ۵۰٪ ثابت) به مواد چسباننده (مجموع مقدار سرباره، مقدار ماده جامد محلول در هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم) اطلاق می گردد. غلظت محلول سود در واقع

غلظت مولار این ماده در آب می‌باشد. همچنین پارامتر نسبت وزنی محلول به سرباره عملاً نسبت مجموع وزن مواد فعال‌کننده (محلول هیدروکسید سدیم و محلول سیلیکات سدیم) به وزن خشک سرباره می‌باشد. اطلاعات بیشتر در ارتباط با مواد و مصالح استفاده در این تحقیق در بخش بعدی آمده است.

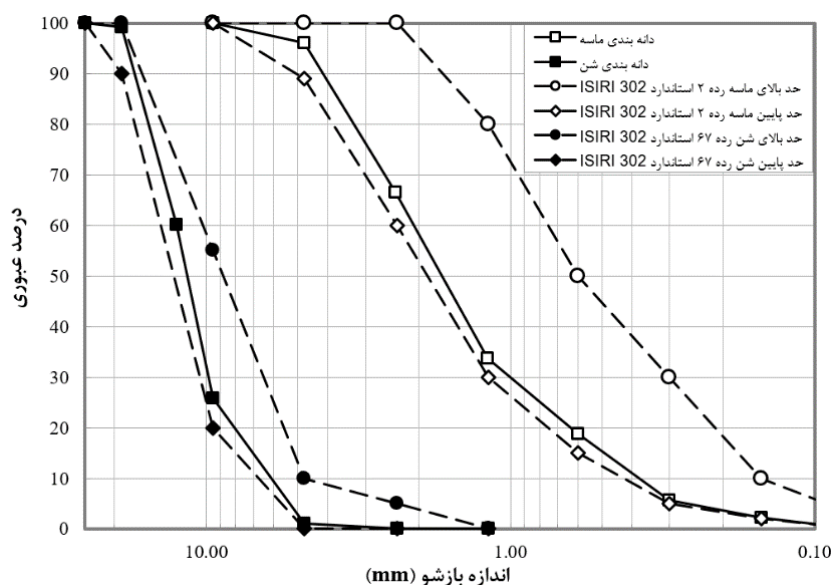
۲-۱. مواد و مصالح

جدول ۱ مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های ریزدانه و درشت‌دانه را نمایش می‌دهد. در این تحقیق از ماسه طبیعی گردگوشه و شن شکسته کربناتی تهیه شده از مجتمع تولید شن و ماسه شهید صنیع خانی استفاده شده است. دو نوع شن درشت و ریز مذکور دارای شماره ردیف دانه‌بندی به ترتیب ۶ و ۷ طبق استاندارد ملی ایران شماره ۳۰۲ [۲۱] می‌باشند که در ترکیب با یکدیگر در نسبت‌های وزنی مساوی، شن مخلوط با شماره ردیف دانه‌بندی ۶۷ را بدست می‌دهند. در شکل ۱ منحنی‌های دانه بندی شن و ماسه مصرفی همراه با حدود استاندارد ملی ایران شماره ۳۰۲ ارائه گردیده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سنگدانه های مصرفی

ماسه	شن نخودی	شن بادامی
۳/۳۸	—	—
۲	۷	۶
۲/۵۶	۲/۶	۲/۵۶
۳/۳	۲/۱	۱/۷
ضریب نرمی		
رده/ شماره ردیف دانه بندی		
وزن مخصوص (gr/cm^3)		
درصد جذب آب (درصد)		

محلول سیلیکات سدیم استفاده شده در این تحقیق تولید شرکت باوند شیمی بوده و دارای غلظت وزنی مواد جامد ($\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O}$) برابر با ۵۰٪ و مدول (نسبت مولی SiO_2 به Na_2O) ۲/۳ می‌باشد. در مقالات متعدد استفاده از سیلیکات سدیم با نسبت ۱/۵ تا ۲ برای فعال سازی خاکستر بادی توصیه شده است [۲۰]. همچنین در برخی از مطالعات گذشته از نسبت برابر با ۲ برای ساخت بتن فعال شده قلیایی پایه سرباره استفاده شده است [۲۲]. اما با انجام آزمایش‌های اولیه و مقایسه انواع محلول سیلیکات سدیم با یکدیگر، نسبت ۲/۳ به عنوان نسبت بهینه انتخاب گردید. هیدروکسید سدیم به صورت محلول آماده به مصرف از صنایع پتروشیمی بندر امام خمینی (ره) با خلوص ۹۸٪ و غلظت ماده جامد ۵۰٪ تهیه گردیده است. این مقدار ماده جامد برابر با غلظت حدود ۱۹ مولار است که برای برخی طرح‌ها غلظت آن با اضافه نمودن آب به مقدار مشخص کاهش داده شده است. سرباره مورد استفاده در این تحقیق پسماند کارخانه ذوب آهن اصفهان است که در کارخانه سیمان سپاهان آسیاب گردیده است. سطح ویژه بلین این سرباره برابر با $4500 \text{ m}^2/\text{kg}$ بوده و نتایج آنالیز شیمیایی آن به روش فلوئورانس پرتوی ایکس (XRF) در جدول ۲ آمده است.



شکل ۱- منحنی دانه بندی سنگدانه‌های مصرفی

جدول ۲- نتیجه آزمایش XRF سرباره مورد استفاده

ترکیب	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	SO ₃
درصد وزنی (%)	۳۲/۰۹	۱۵/۱۴	۱/۵۳	۳۹/۳۲	۱/۵۳	۰/۴۲	۸/۷۵	۲/۲۸

۲-۲. طرح مخلوط‌ها

به منظور طراحی مخلوط‌ها و بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر خواص مکانیکی و رئولوژیکی بتن‌های قلیا فعال سرباره‌ای، ۷۵ طرح مخلوط با در نظر گرفتن پنج سطح برای نسبت وزنی آب به مواد چسباننده (۰/۳۵، ۰/۳۸، ۰/۴۰، ۰/۴۱ و ۰/۴۳)، سه سطح برای غلظت محلول هیدروکسید سدیم (۱۱/۲۵، ۱۵ و ۱۸/۷۵ مولار) و پنج سطح برای نسبت وزنی محلول فعال کننده به سرباره (۰/۲۵، ۰/۳۵، ۰/۴۵، ۰/۵۰ و ۰/۵۵) ساخته شد. آزمایش‌های اسلامپ یا جریان اسلامپ بر روی بتن‌های تازه ساخته شده انجام گردید. بتن‌های ساخته شده دارای روانی مختلف بودند تا جایی که برای سنجش کارایی برخی از آزمایش اسلامپ و برای سنجش آن دسته از بتن‌ها که روانی بالایی داشتند از آزمایش جریان اسلامپ استفاده گردیده است. از آنجایی که مقایسه روانی طرح‌ها با یکدیگر بدین صورت امکان پذیر نبود، با استناد به تحقیقات چیدیاک و همکاران [۲۳] نتایج آزمایش‌های اسلامپ و جریان اسلامپ به مقدار معادل تنش تسلیم آنها تبدیل شد تا مبنایی کمی برای مقایسه و تحلیل نتایج روانی همه بتن‌ها ایجاد گردد. روابط ارائه شده توسط محققین مذکور برای تبدیل اسلامپ و یا جریان اسلامپ به تنش تسلیم در معادله ۱ و معادله ۲ آمده‌اند.

$$\tau_Y = \frac{\alpha \rho g (H-S)}{\sqrt{3}} \quad \text{معادله ۱}$$

$$\tau_Y = \frac{4 \rho V \rho}{\pi \sqrt{3} S_F^3} \quad \text{معادله ۲}$$

در این روابط، τ_Y تنش تسلیم بتن برحسب پاسکال، ρ چگالی بتن برحسب کیلوگرم بر متر مکعب، g ضریب گرانشی زمین برحسب متر بر مجذور ثانیه، H ارتفاع مخروط اسلامپ برحسب متر، S اسلامپ بتن بر حسب متر، V حجم مخروط اسلامپ، و S_F جریان اسلامپ برحسب متر می‌باشد. همچنین در **Error! Reference source not found.** ضریب شکل α می‌باشد که

متأثر از هندسه آزمون بتنی (در اینجا مخروط اسلایپ) بوده و با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است. ضریب a از مقدار 0.5 تا 1.0 برای آزمونهای استوانه‌ای (توجه شود که مخروط ناقص نیز ذیل تعریف استوانه قرار می‌گیرد) قابل انتخاب است. با انتخاب مقدار 0.5 برای a [۲۴]، ضریب شکل برابر با $1/12$ بدست آمده و معادله ۱ به معادله ۴ تبدیل می‌شود.

$$\alpha = \frac{1+a+a^2}{3} \quad \text{معادله ۳}$$

$$\tau_Y = 3.3\rho(0.3-S) \quad \text{معادله ۴}$$

نمونه‌های ساخته شده از هر طرح در دمای آزمایشگاه به صورت مستغرق در حوضچه‌های آب-آهک عمل‌آوری گردیدند و پس از ۲۸ روز تمامی نمونه‌ها توسط جک هیدرولیکی بتن‌شکن مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند.

جدول ۳- جدول مقادیر متغیرهای سه‌گانه طرح اختلاط به‌همراه مقادیر مولفه‌های بتن در هر متر مکعب

ماسه	شن ریز (نخودی)	شن درشت (بادامی)	آب	محلول هیدروکسید سدیم	محلول سیلیکات سدیم	نسبت وزنی محلول فعال کننده به سرباره	غلظت محلول هیدروکسید سدیم چسباننده	نسبت وزنی آب به مواد چسباننده	برچسب طرح
[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	(L/S) _{wt.}	[%]		
۱۰۶۳	۳۴۷	۳۴۶	۱۰۸	۲۵	۷۵	۰.۲۵	۱۸.۷۵	۰.۳۵	W ₃₅ N ₁₉ A ₂₅
۱۰۴۱	۳۴۰	۳۳۹	۹۵	۳۵	۱۰۵	۰.۳۵	۱۸.۷۵	۰.۳۵	W ₃₅ N ₁₉ A ₃₅
۱۰۲۰	۳۳۳	۳۳۲	۸۲	۴۵	۱۳۵	۰.۴۵	۱۸.۷۵	۰.۳۵	W ₃₅ N ₁₉ A ₄₅
۱۰۱۰	۳۲۹	۳۲۹	۷۵	۵۰	۱۵۰	۰.۵	۱۸.۷۵	۰.۳۵	W ₃₅ N ₁₉ A ₅₀
۹۹۹	۳۲۶	۳۲۵	۶۹	۵۵	۱۶۵	۰.۵۵	۱۸.۷۵	۰.۳۵	W ₃₅ N ₁₉ A ₅₅
۱۰۶۸	۳۴۸	۳۴۸	۱۰۴	۲۵	۷۵	۰.۲۵	۱۵	۰.۳۵	W ₃₅ N ₁₅ A ₂₅
۱۰۴۹	۳۴۲	۳۴۱	۹۰	۳۵	۱۰۵	۰.۳۵	۱۵	۰.۳۵	W ₃₅ N ₁₅ A ₃₅
۱۰۳۰	۳۳۶	۳۳۵	۷۵	۴۵	۱۳۵	۰.۴۵	۱۵	۰.۳۵	W ₃₅ N ₁₅ A ₄₅
۱۰۲۰	۳۳۳	۳۳۳	۶۸	۵۰	۱۵۰	۰.۵	۱۵	۰.۳۵	W ₃₅ N ₁₅ A ₅₀
۱۰۱۰	۳۳۰	۳۲۹	۶۱	۵۵	۱۶۵	۰.۵۵	۱۵	۰.۳۵	W ₃₅ N ₁₅ A ₅₅
۱۰۷۳	۳۵۰	۳۴۹	۱۰۱	۲۵	۷۵	۰.۲۵	۱۱.۲۵	۰.۳۵	W ₃₅ N ₁₁ A ₂₅
۱۰۵۶	۳۴۵	۳۴۴	۸۵	۳۵	۱۰۵	۰.۳۵	۱۱.۲۵	۰.۳۵	W ₃₅ N ₁₁ A ₃₅
۱۰۳۹	۳۳۹	۳۳۸	۶۹	۴۵	۱۳۵	۰.۴۵	۱۱.۲۵	۰.۳۵	W ₃₅ N ₁₁ A ₄₅
۱۰۲۶	۳۳۷	۳۳۶	۶۲	۵۰	۱۵۰	۰.۵	۱۱.۲۵	۰.۳۵	W ₃₅ N ₁₁ A ₅₀
۱۰۲۲	۳۳۴	۳۳۳	۵۴	۵۵	۱۶۵	۰.۵۵	۱۱.۲۵	۰.۳۵	W ₃₅ N ₁₁ A ₅₅
۱۰۴۲	۳۴۰	۳۳۹	۱۲۱	۲۵	۷۵	۰.۲۵	۱۸.۷۵	۰.۳۸	W ₃₈ N ₁₉ A ₂₅
۱۰۱۹	۳۳۳	۳۳۲	۱۰۹	۳۵	۱۰۵	۰.۳۵	۱۸.۷۵	۰.۳۸	W ₃₈ N ₁₉ A ₃₅
۹۹۷	۳۲۵	۳۲۵	۹۶	۴۵	۱۳۵	۰.۴۵	۱۸.۷۵	۰.۳۸	W ₃₈ N ₁₉ A ₄₅
۹۸۶	۳۲۲	۳۲۱	۹۰	۵۰	۱۵۰	۰.۵	۱۸.۷۵	۰.۳۸	W ₃₈ N ₁₉ A ₅₀
۹۷۵	۳۱۸	۳۱۷	۸۴	۵۵	۱۶۵	۰.۵۵	۱۸.۷۵	۰.۳۸	W ₃₈ N ₁₉ A ₅₅
۱۰۴۷	۳۴۲	۳۴۱	۱۱۸	۲۵	۷۵	۰.۲۵	۱۵	۰.۳۸	W ₃₈ N ₁₅ A ₂₅
۱۰۲۷	۳۳۵	۳۳۴	۱۰۴	۳۵	۱۰۵	۰.۳۵	۱۵	۰.۳۸	W ₃₈ N ₁₅ A ₃₅
۱۰۰۷	۳۲۹	۳۲۸	۹۰	۴۵	۱۳۵	۰.۴۵	۱۵	۰.۳۸	W ₃₈ N ₁₅ A ₄₅
۱۰۰۲	۳۲۶	۳۲۴	۸۳	۵۰	۱۵۰	۰.۵	۱۵	۰.۳۸	W ₃₈ N ₁₅ A ₅₀
۹۸۷	۳۲۲	۳۲۱	۷۶	۵۵	۱۶۵	۰.۵۵	۱۵	۰.۳۸	W ₃₈ N ₁₅ A ₅₅
۱۰۵۲	۳۴۳	۳۴۳	۱۱۴	۲۵	۷۵	۰.۲۵	۱۱.۲۵	۰.۳۸	W ₃₈ N ₁₁ A ₂₅
۱۰۳۴	۳۳۸	۳۳۷	۹۹	۳۵	۱۰۵	۰.۳۵	۱۱.۲۵	۰.۳۸	W ₃₈ N ₁₁ A ₃₅
۱۰۱۷	۳۳۲	۳۳۱	۸۴	۴۵	۱۳۵	۰.۴۵	۱۱.۲۵	۰.۳۸	W ₃₈ N ₁₁ A ₄₅
۱۰۰۹	۳۲۹	۳۲۸	۷۶	۵۰	۱۵۰	۰.۵	۱۱.۲۵	۰.۳۸	W ₃₈ N ₁₁ A ₅₀
۹۹۹	۳۲۶	۳۲۵	۶۹	۵۵	۱۶۵	۰.۵۵	۱۱.۲۵	۰.۳۸	W ₃₈ N ₁₁ A ₅₅
۱۰۲۷	۳۳۵	۳۳۴	۱۳۰	۲۵	۷۵	۰.۲۵	۱۸.۷۵	۰.۴	W ₄₀ N ₁₉ A ₂₅
۱۰۰۵	۳۲۸	۳۲۷	۱۱۸	۳۵	۱۰۵	۰.۳۵	۱۸.۷۵	۰.۴	W ₄₀ N ₁₉ A ₃₅
۹۸۲	۳۲۰	۳۲۰	۱۰۶	۴۵	۱۳۵	۰.۴۵	۱۸.۷۵	۰.۴	W ₄₀ N ₁₉ A ₄₅
۹۷۱	۳۱۷	۳۱۶	۱۰۰	۵۰	۱۵۰	۰.۵	۱۸.۷۵	۰.۴	W ₄₀ N ₁₉ A ₅₅
۹۵۹	۳۱۳	۳۱۲	۹۴	۵۵	۱۶۵	۰.۵۵	۱۸.۷۵	۰.۴	W ₄₀ N ₁₉ A ₅₅

$W_{40}N_{15}A_{25}$	۰.۴	۱۵	۰.۲۵	۷۵	۲۵	۱۲۷	۳۳۶	۳۳۷	۱۰۳۳
$W_{40}N_{15}A_{35}$	۰.۴	۱۵	۰.۲۵	۱۰۵	۳۵	۱۱۳	۳۳۰	۳۳۰	۱۰۱۲
$W_{40}N_{15}A_{45}$	۰.۴	۱۵	۰.۴۵	۱۳۵	۴۵	۱۰۰	۳۲۳	۳۲۴	۹۹۲
$W_{40}N_{15}A_{50}$	۰.۴	۱۵	۰.۵	۱۵۰	۵۰	۹۳	۳۲۰	۳۲۱	۹۸۱
$W_{40}N_{15}A_{55}$	۰.۴	۱۵	۰.۵۵	۱۶۵	۵۵	۸۶	۳۱۶	۳۱۷	۹۷۱
$W_{40}N_{11}A_{25}$	۰.۴	۱۱.۲۵	۰.۲۵	۷۵	۲۵	۱۲۳	۳۳۸	۳۳۹	۱۰۳۸
$W_{40}N_{11}A_{35}$	۰.۴	۱۱.۲۵	۰.۲۵	۱۰۵	۳۵	۱۰۸	۳۳۲	۳۳۳	۱۰۲۰
$W_{40}N_{11}A_{45}$	۰.۴	۱۱.۲۵	۰.۴۵	۱۳۵	۴۵	۹۳	۳۲۶	۳۲۷	۱۰۰۱
$W_{40}N_{11}A_{50}$	۰.۴	۱۱.۲۵	۰.۵	۱۵۰	۵۰	۸۶	۳۲۳	۳۲۵	۹۹۲
$W_{40}N_{11}A_{55}$	۰.۴	۱۱.۲۵	۰.۵۵	۱۶۵	۵۵	۷۹	۳۲۰	۳۲۱	۹۸۳
$W_{41}N_{19}A_{25}$	۰.۴۱	۱۸.۷۵	۰.۲۵	۷۵	۲۵	۱۳۵	۳۳۲	۳۳۳	۱۰۲۰
$W_{41}N_{19}A_{35}$	۰.۴۱	۱۸.۷۵	۰.۲۵	۱۰۵	۳۵	۱۲۳	۳۲۵	۳۲۵	۹۹۷
$W_{41}N_{19}A_{45}$	۰.۴۱	۱۸.۷۵	۰.۴۵	۱۳۵	۴۵	۱۱۱	۳۱۷	۳۱۸	۹۷۴
$W_{41}N_{19}A_{50}$	۰.۴۱	۱۸.۷۵	۰.۵	۱۵۰	۵۰	۱۰۵	۳۱۳	۳۱۴	۹۶۳
$W_{41}N_{19}A_{55}$	۰.۴۱	۱۸.۷۵	۰.۵۵	۱۶۵	۵۵	۹۹	۳۱۰	۳۱۰	۹۵۱
$W_{41}N_{15}A_{25}$	۰.۴۱	۱۵	۰.۲۵	۷۵	۲۵	۱۳۱	۳۳۴	۳۳۵	۱۰۲۶
$W_{41}N_{15}A_{35}$	۰.۴۱	۱۵	۰.۲۵	۱۰۵	۳۵	۱۱۸	۳۲۷	۳۲۸	۱۰۰۵
$W_{41}N_{15}A_{45}$	۰.۴۱	۱۵	۰.۴۵	۱۳۵	۴۵	۱۰۵	۳۲۰	۳۲۱	۹۸۴
$W_{41}N_{15}A_{50}$	۰.۴۱	۱۵	۰.۵	۱۵۰	۵۰	۹۸	۳۱۶	۳۱۷	۹۷۵
$W_{41}N_{15}A_{55}$	۰.۴۱	۱۵	۰.۵۵	۱۶۵	۵۵	۹۱	۳۱۴	۳۱۴	۹۶۳
$W_{41}N_{11}A_{25}$	۰.۴۱	۱۱.۲۵	۰.۲۵	۷۵	۲۵	۱۲۷	۳۳۶	۳۳۷	۱۰۳۱
$W_{41}N_{11}A_{35}$	۰.۴۱	۱۱.۲۵	۰.۲۵	۱۰۵	۳۵	۱۱۳	۳۳۰	۳۳۰	۱۰۱۳
$W_{41}N_{11}A_{45}$	۰.۴۱	۱۱.۲۵	۰.۴۵	۱۳۵	۴۵	۹۸	۳۲۴	۳۲۴	۹۹۴
$W_{41}N_{11}A_{50}$	۰.۴۱	۱۱.۲۵	۰.۵	۱۵۰	۵۰	۹۱	۳۲۱	۳۲۲	۹۸۵
$W_{41}N_{11}A_{55}$	۰.۴۱	۱۱.۲۵	۰.۵۵	۱۶۵	۵۵	۸۴	۳۱۷	۳۱۸	۹۷۵
$W_{43}N_{19}A_{25}$	۰.۴۳	۱۸.۷۵	۰.۲۵	۷۵	۲۵	۱۴۴	۳۳۸	۳۳۸	۱۰۰۶
$W_{43}N_{19}A_{35}$	۰.۴۳	۱۸.۷۵	۰.۲۵	۱۰۵	۳۵	۱۳۲	۳۲۰	۳۲۱	۹۸۳
$W_{43}N_{19}A_{45}$	۰.۴۳	۱۸.۷۵	۰.۴۵	۱۳۵	۴۵	۱۲۱	۳۱۲	۳۱۳	۹۵۹
$W_{43}N_{19}A_{50}$	۰.۴۳	۱۸.۷۵	۰.۵	۱۵۰	۵۰	۱۱۵	۳۰۸	۳۰۹	۹۴۵
$W_{43}N_{19}A_{55}$	۰.۴۳	۱۸.۷۵	۰.۵۵	۱۶۵	۵۵	۱۰۹	۳۰۴	۳۰۵	۹۳۵
$W_{43}N_{15}A_{25}$	۰.۴۳	۱۵	۰.۲۵	۷۵	۲۵	۱۴۰	۳۲۹	۳۳۰	۱۰۱۲
$W_{43}N_{15}A_{35}$	۰.۴۳	۱۵	۰.۲۵	۱۰۵	۳۵	۱۲۷	۳۲۲	۳۲۳	۹۹۰
$W_{43}N_{15}A_{45}$	۰.۴۳	۱۵	۰.۴۵	۱۳۵	۴۵	۱۱۴	۳۱۵	۳۱۶	۹۶۹
$W_{43}N_{15}A_{50}$	۰.۴۳	۱۵	۰.۵	۱۵۰	۵۰	۱۰۸	۳۱۲	۳۱۳	۹۶۰
$W_{43}N_{15}A_{55}$	۰.۴۳	۱۵	۰.۵۵	۱۶۵	۵۵	۱۰۱	۳۰۸	۳۰۹	۹۴۷
$W_{43}N_{11}A_{25}$	۰.۴۳	۱۱.۲۵	۰.۲۵	۷۵	۲۵	۱۳۶	۳۳۱	۳۳۲	۱۰۱۸
$W_{43}N_{11}A_{35}$	۰.۴۳	۱۱.۲۵	۰.۲۵	۱۰۵	۳۵	۱۲۲	۳۲۵	۳۲۶	۹۹۸
$W_{43}N_{11}A_{45}$	۰.۴۳	۱۱.۲۵	۰.۴۵	۱۳۵	۴۵	۱۰۸	۳۱۹	۳۱۹	۹۷۹
$W_{43}N_{11}A_{50}$	۰.۴۳	۱۱.۲۵	۰.۵	۱۵۰	۵۰	۱۰۱	۳۱۵	۳۱۶	۹۷۰
$W_{43}N_{11}A_{55}$	۰.۴۳	۱۱.۲۵	۰.۵۵	۱۶۵	۵۵	۹۴	۳۱۲	۳۱۳	۹۶۰

۳- نتایج و بحث

نتایج مربوط به انجام آزمایش‌ها به همراه مقادیر و نسبت‌های موجود در هر طرح مخلوط در جدول ۴ ذکر گردیده است. همانگونه که قبلاً گفته شد، نسبت آب به مواد چسباننده (W/S) مهمترین عامل در تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها بوده و با افزایش این نسبت، مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد. کاهش مقاومت فشاری بتن قلیا فعال به جهت افزایش مقدار آب به مواد چسباننده به آن دلیل است که با افزایش مقدار آب، میزان حفرات و فضای خالی داخل بتن افزایش می‌یابد. برخلاف نسبت (W/S)، با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. افزایش هیدروکسید بیشتر شدن میزان pH محیط را به همراه دارد و افزایش pH منجر به انحلال بیشتر و بهتر سیلیس در طول واکنش می‌گردد. با افزایش نسبت محلول فعال کننده به سرباره از مقدار ۰/۲۵ تا حدود ۰/۴۰ مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. این موضوع از جهت افزایش مقدار محلول و تامین آن به مقدار کافی برای انحلال سرباره و انجام واکنش‌ها می‌باشد اما با بیشتر شدن این نسبت از مقدار ۰/۴۵ مقاومت فشاری دچار کاهش می‌گردد. این رفتار در تمام نسبت‌های (W/S) و غلظت‌های هیدروکسید سدیم قابل مشاهد است. با بررسی نتایج مشاهده می‌گردد

که در (W/S) و غلظت‌های هیدروکسید سدیم ثابت، افزایش نسبت محلول به سرباره از ۰/۲۵ تا حدود ۰/۴۰، باعث افزایش تقریبی ۲۰ مگاپاسکال (۴۰ تا ۴۰۰ درصد) در مقاومت فشاری نمونه‌ها و ادامه روند افزایش این نسبت باعث کاهش کمتر از ۶/۵ مگاپاسکال (بین ۳ تا ۱۰ درصد مقاومت) می‌گردد.

جدول ۴- جدول مقادیر متغیرهای سه گانه آنالیز آماری و نتایج اسلامپ، جریان اسلامپ، تخمین تنش تسلیم، و مقاومت فشاری ۲۸ روزه

تنش فشاری تنش تسلیم جریان اسلامپ	نسبت حجمی محلول فعال کننده	غلظت محلول فعال کننده	مدول محلول فعال کننده	برجسب طرح	تنش فشاری ۲۸ روزه	تنش تسلیم [Pa]	جریان [cm]	اسلامپ [cm]	نسبت حجمی (L/S) _{vol.}	به سرباره
					[MPa]					
$W_{35}N_{19}A_{25}$	۱.۲۸	۰.۲۴	۱.۲۸۳	۱	—	۱۶۸۰	۴۷.۸	۱۳۶۲.۴	۶	۰.۳
$W_{35}N_{19}A_{35}$	۱.۲۸	۰.۳۴	۱.۴۸۴	—	۴۲	۳۷۹.۲	۶۷.۲	۳۱۲.۹	—	۰.۳۶
$W_{35}N_{19}A_{45}$	۱.۲۸	۰.۳۶	۱.۵۳۴	—	۴۶	۲۹۶.۵	۶۱.۲	۱۶۲۹.۹	۲	۰.۲۳
$W_{35}N_{19}A_{50}$	۱.۲۸	۰.۳۸	۱.۵۸۴	—	۴۷	۱۳۷۲	۶۳.۵	۳۶۵.۲	۶	۰.۲۹
$W_{35}N_{19}A_{55}$	۱.۲۸	۰.۳۸	۱.۵۸۴	—	۴۷	۳۰۳	۶۴.۴	۲۷۶	—	۰.۳۷
$W_{35}N_{15}A_{25}$	۱.۴۱	۰.۲۳	۱.۲۶۷	۲	—	۱۶۳۸	۴۴.۷	۱۴۳۹.۲	۵	۰.۲۸
$W_{35}N_{15}A_{35}$	۱.۴۱	۰.۲۹	۱.۳۶۱	۶	—	۴۰۵.۴	۶۴.۵	۳۰۵.۳	—	۰.۳۲
$W_{35}N_{15}A_{45}$	۱.۴۱	۰.۳۳	۱.۴۵۴	—	۴۳	۲۷۹.۱	۵۸	۱۵۸۹.۷	۲	۰.۲۳
$W_{35}N_{15}A_{50}$	۱.۴۱	۰.۳۵	۱.۵۰۱	—	۴۷	۱۲۲۲.۴	۴۵	۲۷۲.۳	۸	۰.۲۸
$W_{35}N_{15}A_{55}$	۱.۴۱	۰.۳۷	۱.۵۴۸	—	۴۹	۲۳۹.۲	۴۸.۵	۲۲۷.۶	—	۰.۳۶
$W_{35}N_{11}A_{25}$	۱.۵۷	۰.۲۲	۱.۲۵۳	۲	—	۱۶۳۸	۴۴.۷	۱۴۳۹.۲	۵	۰.۲۸
$W_{35}N_{11}A_{35}$	۱.۵۷	۰.۲۸	۱.۳۴۱	۵	—	۴۰۵.۴	۶۴.۵	۳۰۵.۳	—	۰.۳۲
$W_{35}N_{11}A_{45}$	۱.۵۷	۰.۳۲	۱.۴۲۹	—	۴۱	۲۷۹.۱	۵۸	۱۵۸۹.۷	۲	۰.۲۳
$W_{35}N_{11}A_{50}$	۱.۵۷	۰.۳۴	۱.۴۷۳	—	۴۷	۱۲۲۲.۴	۴۵	۲۷۲.۳	۸	۰.۲۸
$W_{35}N_{11}A_{55}$	۱.۵۷	۰.۳۶	۱.۵۱۸	—	۴۹	۲۳۹.۲	۴۸.۵	۲۲۷.۶	—	۰.۳۶
$W_{38}N_{19}A_{25}$	۱.۲۸	۰.۲۳	۱.۳۸۳	۲	—	۱۵۸۹.۷	۳۰.۵	۱۲۲۲.۴	۸	۰.۲۸
$W_{38}N_{19}A_{35}$	۱.۲۸	۰.۲۸	۱.۴۸۸	۸	—	۲۷۲.۳	۵۱.۲	۲۳۹.۲	—	۰.۳۴
$W_{38}N_{19}A_{45}$	۱.۲۸	۰.۳۳	۱.۵۹۲	—	۴۹	۲۲۷.۶	۵۶.۲	۱۵۴۰.۹	۳	۰.۲۲
$W_{38}N_{19}A_{50}$	۱.۲۸	۰.۳۴	۱.۶۴۵	—	۵۲	۱۲۸۷.۵	۴۲.۵	۲۴۴.۲	۷	۰.۲۷
$W_{38}N_{19}A_{55}$	۱.۲۸	۰.۳۶	۱.۶۹۷	—	۵۳	۲۴۴.۲	۴۸.۲	۱۷۶.۳	—	۰.۳۲
$W_{38}N_{15}A_{25}$	۱.۴۱	۰.۲۲	۱.۳۶۶	۳	—	۱۵۴۰.۹	۲۷	۱۲۸۷.۵	۷	۰.۲۷
$W_{38}N_{15}A_{35}$	۱.۴۱	۰.۲۷	۱.۴۶۴	۷	—	۲۴۴.۲	۴۸.۲	۱۷۶.۳	—	۰.۳۲
$W_{38}N_{15}A_{45}$	۱.۴۱	۰.۳۲	۱.۵۶۲	—	۵۲	۱۷۶.۳	۴۶	۱۶۳	—	۰.۳۴
$W_{38}N_{15}A_{50}$	۱.۴۱	۰.۳۴	۱.۶۱۱	—	۶۱	۱۶۳	۴۳	۱۶۰۶.۲	۲	۰.۲۱
$W_{38}N_{15}A_{55}$	۱.۴۱	۰.۳۵	۱.۶۶	—	۶۳	۱۶۳	۴۳	۱۱۸۴.۱	۹	۰.۲۶
$W_{38}N_{11}A_{25}$	۱.۵۷	۰.۲۱	۱.۳۵۱	۲	—	۱۶۰۶.۲	۲۵.۷	۱۱۸۴.۱	۹	۰.۲۶
$W_{38}N_{11}A_{35}$	۱.۵۷	۰.۲۶	۱.۴۴۴	۹	—	۲۴۶.۵	۴۵	۱۹۰	—	۰.۳۳
$W_{38}N_{11}A_{45}$	۱.۵۷	۰.۳۱	۱.۵۳۶	—	۵۲	۲۴۶.۵	۴۵	۱۹۰	—	۰.۳۳
$W_{38}N_{11}A_{50}$	۱.۵۷	۰.۳۳	۱.۵۸۲	—	۵۹	۱۹۰	۴۲.۵	۱۸۱.۹	—	۰.۳۴
$W_{38}N_{11}A_{55}$	۱.۵۷	۰.۳۴	۱.۶۲۸	—	۶۰	۱۸۱.۹	۴۱.۸	۱۲۸۸.۲	۷	۰.۲۲
$W_{40}N_{19}A_{25}$	۱.۲۸	۰.۲۲	۱.۴۴۹	۷	—	۱۲۸۸.۲	۲۱.۳	۹۳۱	—	۰.۲۷
$W_{40}N_{19}A_{35}$	۱.۲۸	۰.۲۷	۱.۵۵۷	۱۳	—	۹۳۱	۳۱.۹	۲۹۱.۵	—	۰.۳۱
$W_{40}N_{19}A_{45}$	۱.۲۸	۰.۳۱	۱.۶۶۵	—	۴۷	۲۹۱.۵	۴۰.۲	۱۷۶.۹	—	۰.۳۳
$W_{40}N_{19}A_{55}$	۱.۲۸	۰.۳۳	۱.۷۱۹	—	۶۰	۱۷۶.۹	۴۳.۱	۱۶۳.۶	—	۰.۳۵
$W_{40}N_{19}A_{55}$	۱.۲۸	۰.۳۵	۱.۷۷۲	—	۶۲	۱۶۳.۶	۴۱.۵			

$W_{40}N_{15}A_{25}$	۱.۴۱	۰.۲۱	۱.۴۳۲	۷	—	۱۲۹۵.۱	۱۹
$W_{40}N_{15}A_{35}$	۱.۴۱	۰.۲۶	۱.۵۳۳	۱۴	—	۸۸۲.۹	۳۰.۱
$W_{40}N_{15}A_{45}$	۱.۴۱	۰.۳۱	۱.۶۳۳	—	۴۸	۲۸۲.۳	۳۷.۶
$W_{40}N_{15}A_{50}$	۱.۴۱	۰.۳۲	۱.۶۸۴	—	۵۷	۱۹۸.۲	۴۰.۳
$W_{40}N_{15}A_{55}$	۱.۴۱	۰.۳۴	۱.۷۳۴	—	۶۰	۱۷۶.۹	۳۸
$W_{40}N_{11}A_{25}$	۱.۵۷	۰.۲	۱.۴۱۷	۱۱	—	۱۰۷۵.۵	۱۶.۹
$W_{40}N_{11}A_{35}$	۱.۵۷	۰.۲۵	۱.۵۱۲	۱۶	—	۷۷۸.۴	۲۸.۸
$W_{40}N_{11}A_{45}$	۱.۵۷	۰.۳	۱.۶۰۷	—	۵۰	۲۶۲.۷	۳۴.۹
$W_{40}N_{11}A_{50}$	۱.۵۷	۰.۳۱	۱.۶۵۴	—	۵۸	۱۹۳.۵	۳۷.۸
$W_{40}N_{11}A_{55}$	۱.۵۷	۰.۳۳	۱.۷۰۲	—	۶۱	۱۷۳.۲	۳۴.۵
$W_{41}N_{19}A_{25}$	۱.۲۸	۰.۲۱	۱.۴۸۲	۱۴	—	۸۹۰	۱۸.۹
$W_{41}N_{19}A_{35}$	۱.۲۸	۰.۲۷	۱.۵۹۲	۱۸	—	۶۵۲.۴	۲۵
$W_{41}N_{19}A_{45}$	۱.۲۸	۰.۳۱	۱.۷۰۱	—	۵۶	۲۰۳.۷	۳۲.۹
$W_{41}N_{19}A_{50}$	۱.۲۸	۰.۳۳	۱.۷۵۵	—	۶۱	۱۶۹.۶	۳۶.۸
$W_{41}N_{19}A_{55}$	۱.۲۸	۰.۳۴	۱.۸۱	—	۶۲	۱۶۲.۲	۳۵
$W_{41}N_{15}A_{25}$	۱.۴۱	۰.۲۱	۱.۴۶۵	۱۴	—	۸۹۴.۸	۱۷
$W_{41}N_{15}A_{35}$	۱.۴۱	۰.۲۶	۱.۵۶۷	۱۹	—	۶۰۲.۶	۲۳.۱
$W_{41}N_{15}A_{45}$	۱.۴۱	۰.۳	۱.۶۶۹	—	۵۵	۲۱۳.۳	۳۰.۲
$W_{41}N_{15}A_{50}$	۱.۴۱	۰.۳۲	۱.۷۲	—	۶۰	۱۷۷.۳	۳۵.۸
$W_{41}N_{15}A_{55}$	۱.۴۱	۰.۳۴	۱.۷۷۱	—	۶۲	۱۶۴.۳	۳۳.۹
$W_{41}N_{11}A_{25}$	۱.۵۷	۰.۲	۱.۴۵	۱۶	—	۷۸۷.۲	۱۵.۴
$W_{41}N_{11}A_{35}$	۱.۵۷	۰.۲۵	۱.۵۴۶	۲۰	—	۵۵۲	۲۱.۴
$W_{41}N_{11}A_{45}$	۱.۵۷	۰.۲۹	۱.۶۴۲	—	۵۵	۲۱۵.۵	۲۷.۸
$W_{41}N_{11}A_{50}$	۱.۵۷	۰.۳۱	۱.۶۹	—	۶۳	۱۶۲.۸	۳۳.۲
$W_{41}N_{11}A_{55}$	۱.۵۷	۰.۳۳	۱.۷۳۸	—	۶۴	۱۵۶.۱	۳۲
$W_{43}N_{19}A_{25}$	۱.۲۸	۰.۲۱	۱.۵۴۹	—	۴۲	۳۷۴.۱	۹
$W_{43}N_{19}A_{35}$	۱.۲۸	۰.۲۶	۱.۶۶۱	—	۴۸	۲۷۹.۷	۲۱.۳
$W_{43}N_{19}A_{45}$	۱.۲۸	۰.۳	۱.۷۷۳	—	۵۴	۲۱۵.۶	۳۰.۵
$W_{43}N_{19}A_{50}$	۱.۲۸	۰.۳۲	۱.۸۲۹	—	۶۰	۱۷۲.۳	۳۳.۸
$W_{43}N_{19}A_{55}$	۱.۲۸	۰.۳۳	۱.۸۸۵	—	۶۳	۱۵۴.۵	۳۱.۸
$W_{43}N_{15}A_{25}$	۱.۴۱	۰.۲	۱.۵۳۱	—	۴۱	۳۹۴.۸	۷.۹
$W_{43}N_{15}A_{35}$	۱.۴۱	۰.۲۵	۱.۶۳۶	—	۴۸	۲۸۱.۹	۱۹.۱
$W_{43}N_{15}A_{45}$	۱.۴۱	۰.۲۹	۱.۷۴۱	—	۵۵	۲۱۰.۱	۲۸
$W_{43}N_{15}A_{50}$	۱.۴۱	۰.۳۱	۱.۷۹۳	—	۵۹	۱۸۰.۸	۳۰.۵
$W_{43}N_{15}A_{55}$	۱.۴۱	۰.۳۳	۱.۸۴۶	—	۶۲	۱۶۱.۶	۲۹
$W_{43}N_{11}A_{25}$	۱.۵۷	۰.۱۹	۱.۵۱۶	—	۴۲	۳۷۸.۳	۶.۷
$W_{43}N_{11}A_{35}$	۱.۵۷	۰.۲۴	۱.۶۱۴	—	۴۹	۲۷۲.۷	۱۷.۸
$W_{43}N_{11}A_{45}$	۱.۵۷	۰.۲۸	۱.۷۱۳	—	۵۸	۱۹۰.۸	۲۷.۶
$W_{43}N_{11}A_{50}$	۱.۵۷	۰.۳	۱.۷۶۳	—	۶۱	۱۷۰.۸	۲۸.۷
$W_{43}N_{11}A_{55}$	۱.۵۷	۰.۳۲	۱.۸۱۲	—	۶۴	۱۵۳.۶	۲۷.۲

از منظر روانی این نکته حائز اهمیت است که با افزایش نسبت (W/S) و به تبع آن مقدار آب در طرح مخلوطها، روانی بتن های ساخته شده افزایش می یابد. اما این افزایش روانی با کاهش شدید مقاومت فشاری بتن همراه است. افزایش نسبت (W/S) از ۰/۳۵ به ۰/۴۳ منجر به کاهش پیوسته ۴۰ الی ۸۰ درصدی در تنش تسلیم بتن می گردد که این کاهش در درصدهای پایین تر نسبت محلول فعال کننده به سرباره بیشتر بوده و کاهش مقاومت فشاری تا چهار برابر را نیز بدنبال دارد. افزایش نسبت محلول فعال کننده به سرباره نیز منجر به کاهش ۶۰ تا ۹۰ درصدی تنش تسلیم بتن می گردد. اما برخلاف متغیر اول (نسبت W/S)، این کاهش در تنش تسلیم در مواردی منجر به افزایش مقاومت فشاری تا سه برابر نیز گردیده است ($W_{43}N_{11}A_{55}$ با $W_{43}N_{11}A_{25}$) مقایسه شود).

همبستگی متغیرهای بکار رفته در طراحی مخلوطها (یعنی نسبت آب به مواد چسباننده، غلظت محلول هیدروکسید سدیم و نسبت محلول به سرباره) امکان مدلسازی آماری مقاومت فشاری و تنش تسلیم بتن را میسر نمی‌سازد. بهمین دلیل و با عنایت به پارامترهایی که محققین قبلی بعنوان متغیرهای مستقل موثر بر خواص مکانیکی بتن‌های قلیا فعال معرفی نموده‌اند، از پارامترهای مدول محلول فعال کننده، غلظت محلول فعال کننده و نسبت حجمی محلول فعال کننده به سرباره برای مدلسازی آماری در ادامه این تحقیق استفاده شده است.

۱-۳. تحلیل آماری نتایج

برای تحلیل آماری نتایج بدست آمده، از نرم افزار Minitab و ابزار رگرسیون خطی چند متغیره استفاده شده است. با استفاده اصول رگرسیون و آنالیز واریانس، تمامی پارامترهایی که بطور بالقوه امکان تاثیرگذاری بر روی مقاومت فشاری و یا تنش تسلیم دارند مورد بررسی قرار گرفته و نهایتاً پارامترهایی که از نظر آماری دارای اهمیت معناداری بودند مشخص و در مدلسازی آماری (یعنی ایجاد رابطه رگرسیون) این دو پارامتر پاسخ (مقاومت فشاری و تنش تسلیم) مورد استفاده قرار گرفتند. طی بررسی آماری مشخص گردید که پارامترها غلظت کل محلول فعال کننده (C)، مدول محلول فعال کننده (n) و نسبت حجمی محلول به سرباره $(L/S)_{vol.}$ متغیرهای تعیین کننده‌تر و مناسب‌تری برای مدلسازی پارامترهای پاسخ می‌باشند. پارامتر اول (غلظت کل محلول فعال کننده) با محاسبه نسبت وزنی مجموع مواد جامد محلول‌های فعال کننده (یعنی مجموع وزنی Na_2O و SiO_2 موجود در هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم) به مجموع وزنی محلول‌های مورد استفاده در بتن (یعنی مجموع وزنی محلول‌های هیدروکسید سدیم، سیلیکات سدیم و آب ترکیبی افزوده شده به طرح‌ها) بدست می‌آید. پارامتر دوم یعنی مدول محلول فعال کننده با محاسبه نسبت مولی SiO_2 موجود در محلول سیلیکات سدیم به مجموع Na_2O موجود در محلول‌های سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم محاسبه می‌گردد. همچنین پارامتر سوم (نسبت حجمی محلول به سرباره) برابر با نسبت حجم کل محلول (یعنی مجموع حجم آب ترکیبی، محلول هیدروکسید سدیم و محلول سیلیکات سدیم) به حجم سرباره می‌باشد. در ادامه نتایج آنالیز واریانس و رگرسیون مقاومت فشاری و تنش تسلیم برحسب این سه پارامتر و اندرکنش‌های آن‌ها آمده است.

۱-۱-۳. تحلیل رگرسیون مقاومت فشاری

جدول ۵ نتایج آنالیز واریانس یا تغییرات مقاومت فشاری را برحسب متغیرهای مختلف نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که غلظت محلول فعال کننده (C) و نسبت حجمی محلول به سرباره $(L/S)_{vol.}$ نقش تعیین کننده‌ای بر مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده دارند، اما با توجه به ثابت بودن بازه مقدار مصرف آب شیشه (سیلیکات سدیم) به سود در محلول فعال کننده، دامنه تغییرات مدول محلول فعال کننده (n) چندان گسترده نبوده و عملاً در بازه مناسبی برای مشاهده اثر این متغیر بر مقاومت فشاری قرار نمی‌گیرد. تغییرات در n از ۱/۲۸ الی ۱/۵۷ مجموعاً پاسخگوی ۱/۴۷٪ کل تغییرات در مقاومت فشاری می‌باشد. این درحالیست که تغییرات در متغیر غلظت محلول فعال کننده (C) به‌مراه عبارت غیرخطی آن CXC مجموعاً ۵۵/۰۲٪ از این تغییرات را رقم می‌زند. بعلاوه تغییرات در نسبت حجمی محلول به سرباره و عبارت غیر خطی آن ۴۱/۲۸٪ کل تغییرات در مقاومت فشاری را توضیح می‌دهد. از مجموع تمام تغییرات مشاهده شده در نتایج مقاومت فشاری، تنها ۲/۲۳٪ آن توسط مدل رگرسیون قابل توضیح نمی‌باشد که بعنوان خطا تلقی می‌شود. لذا ضریب قطعیت یا نیکویی برازش مدل رگرسیون ارائه شده برابر با ۹۷/۷۷٪ یا ۰/۹۷۷۷ می‌باشد که مقداری بسیار بالا بوده و موید دقت بالای معادله رگرسیون می‌باشد. همچنین می‌توان توسط نرم‌افزار Minitab نیکویی معادله رگرسیون را در پیش‌بینی نقاط جدید بدست آورد. این عبارت که به $Predicted R^2$ معروف است از نظر کاربردی به نیکویی برازش $(Regular R^2)$ ترجیح داده می‌شود. شایان ذکر است، مقادیر F-Value در واقع آماره‌هایی با توزیع فشر هستند که به نوعی نشان‌دهنده احتمال عدم اهمیت آماری متغیرهای موجود در معادله رگرسیون می‌باشند. هرچه

F-Value بزرگتر باشد احتمال مذکور به صفر نزدیکتر شده و اهمیت آماری متغیر مرتبط مشهودتر خواهد بود. به زبان ساده می‌توان گفت معمولاً F-Value بزرگتر از ۴ همواره احتمال اشتباه در تشخیص اهمیت یک متغیر آماری را (که در علم آمار همان P-Value می‌باشد) به ۰/۰۵ محدود می‌نماید. مقادیر بسیار بزرگ F-Value در جدول آنالیز واریانس نشان داده شده در جدول ۵ خبر از اهمیت و تاثیرگذاری قطعی این پارامترها بر مقاومت فشاری دارند.

جدول ۵- نتایج تحلیل رگرسیون σ_c ، n ، c و $(L/S)_{vol.}$

Source	Contribution [%]	F-Value
Regression	۹۷/۷۷	۶۰۴/۹۰
n	۱/۴۷	۴۵/۶۳
c	۵۱/۰۴	۱۵۷۸/۹۸
(L/S) _{vol.}	۳۹/۵۶	۱۲۲۳/۷۵
c×c	۳/۹۸	۱۲۳/۰۳
(L/S) _{vol.} ×(L/S) _{vol.}	۱/۷۵	۵۳/۱۱
Error	۲/۲۳	—
Total	۱۰۰/۰۰	—

معادله ۵ رابطه رگرسیون مقاومت فشاری ۲۸ روزه (σ_c) را برحسب نسبت حجمی محلول به سرباره (L)، غلظت محلول (C) و مدول محلول فعال کننده (n) نمایش می‌دهد. با استفاده از این رابطه می‌توان مقاومت فشاری بتن قلیا فعال سرباره‌ای ساخته شده با مصالح مذکور در بخش ۲-۱ و عیار سرباره 400 kg/m^3 را پیش‌بینی نمود. با جایگذاری مقادیر دلخواه برای n، L و c (در محدوده مطالعه شده طبق بخش ۲-۲) می‌توان به تخمین‌های دقیقی از مقاومت فشاری رسید.

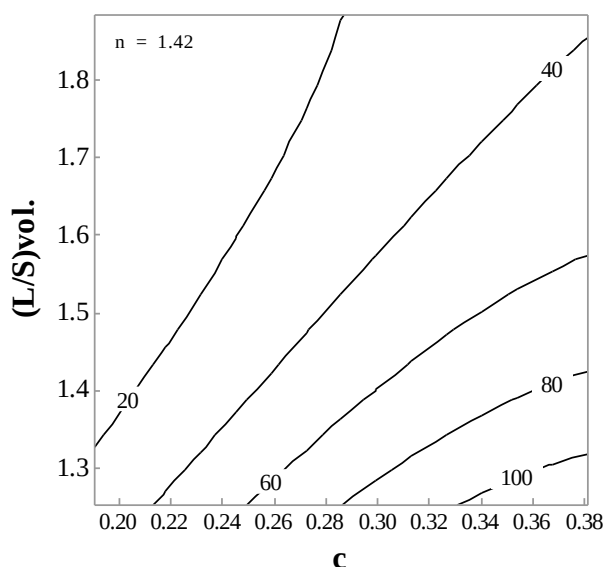
$$\sigma_c [\text{MPa}] = [6.939 \times L^2 - 10 \times c^2 - 28.87 \times L + 86.6 \times c + 0.899 \times n - 19]^2 \quad \text{معادله ۵}$$

در شکل ۲ میزان تاثیرگذاری هریک از متغیرها نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که اثر تغییرات (n) بر روی مقاومت فشاری ناچیز می‌باشد. همچنین مقاومت فشاری با نسبت حجمی محلول به سرباره $(L/S)_{vol.}$ رابطه معکوس داشته و با غلظت محلول فعال کننده (C) رابطه مستقیم دارد.



شکل ۲- میزان تاثیر مقادیر مورد بررسی بر مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده

با استفاده از رابطه رگرسیون بدست آمده می‌توان نموداری کانتوری مقاومت فشاری را برحسب دو متغیر اصلی اثرگذار (یعنی غلظت و نسبت حجمی محلول فعال کننده به سرباره) برای حد وسط مدول محلول فعال کننده (n) ترسیم نمود (به شکل ۳ مراجعه شود). لازم به یادآوری است که متغیر n تاثیر چندانی بر مقاومت نداشته و کانتورپلات‌های ترسیم شده برای مقادیر مختلف n تفاوت ملموسی با یکدیگر ندارند. در واقع علی‌رغم وجود سه متغیر، تنها دو متغیر عملاً برای پیش‌بینی مقاومت کفایت می‌نماید. لذا این شکل به تنهایی برای تخمین مقاومت فشاری کافی بوده و نیاز به استفاده از معادله رگرسیون را تا حد زیادی از بین می‌برد.



شکل ۳- نمودار کانتوری مقاومت فشاری برحسب غلظت محلول فعال کننده (C) و نسبت حجمی محلول به سرباره ($(L/S)_{vol.}$)

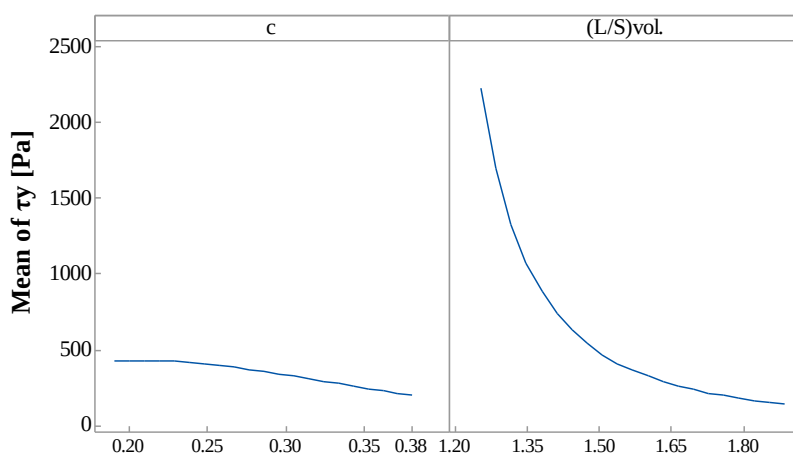
۳-۱-۲. تحلیل رگرسیون تنش تسلیم

در ادامه بررسی‌های آماری، آنالیزهای مشابهی بر روی پارامترهای موثر و میزان تاثیر این پارامترها بر تنش تسلیم بتن‌های ساخته شده صورت گرفت. جدول ۶ نتایج آنالیز واریانس تنش تسلیم را برحسب پارامترهایی که به لحاظ آماری از اهمیت کافی برخوردار می‌باشند نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که متغیر n تاثیری بر غلظت بتن نمی‌گذارد. از سوی دیگر، پارامترهای غلظت محلول و نسبت حجمی محلول به سرباره از بالاترین اهمیت برخوردارند. نیکویی برازش رابطه رگرسیون نشان داده شده در معادله ۶ برابر با ۸۶٫۶۸٪ و نیکویی این معادله در پیش‌بینی نقاط جدید ($Predicted R^2$) برابر با ۸۵٫۰۸٪ محاسبه گردید.

جدول ۶- نتایج تحلیل رگرسیون τ_y [Pa]، C و $(L/S)_{vol.}$

Source	Contribution [%]	F-Value
Regression	۸۶/۶۸	۱۵۳/۹۹
C	۴۷/۰۲	۲۵۰/۶۲
$(L/S)_{vol.}$	۳۸/۹۴	۲۰۷/۵۲
$C \times C$	۰/۷۲	۳/۸۵
Error	۱۳/۳۲	—
Total	۱۰۰	—

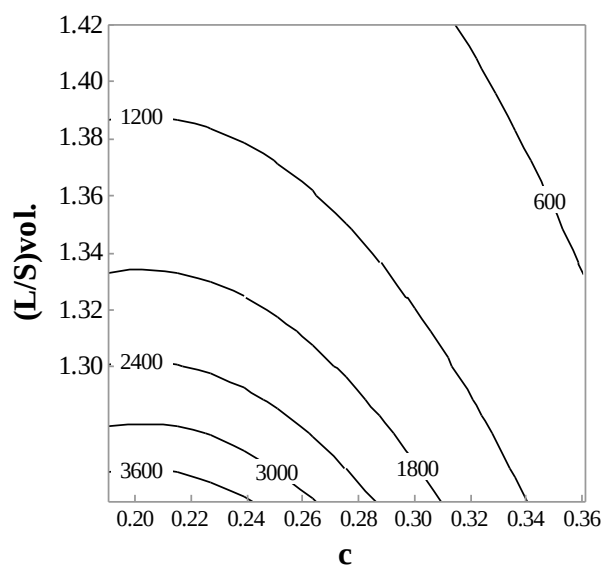
از آنالیز نرم افزار این موضوع مبین می گردد که تغییرات مدول محلول فعال کننده (η) هیچگونه تاثیری بر تنش تسلیم (روانی) بتن قلیا فعال تازه ندارد و به همین دلیل نموداری از تاثیرگذاری آن رسم نشده و جز منابع تغییرات در تنش تسلیم در تحلیل رگرسیون محسوب نگردیده است. در مورد دو پارامتر دیگر دیده می شود که تاثیر پارامتر غلظت محلول فعال کننده (c) تاثیر کمی بر روانی بتن داشته اما پارامتر موثر اصلی و تعیین کننده روانی بتن تازه نسبت حجمی محلول فعال کننده به سرباره است که با افزایش مقدار این نسبت روانی بتن افزایش می یابد.



شکل ۴- نمودار تاثیرات غلظت محلول و نسبت حجمی محلول به سرباره بر تنش تسلیم بتن

$$\tau_y = \frac{1}{[0.693 \times c^2 + 0.09855 \times L - 0.28 \times c - 0.0795]^2}$$

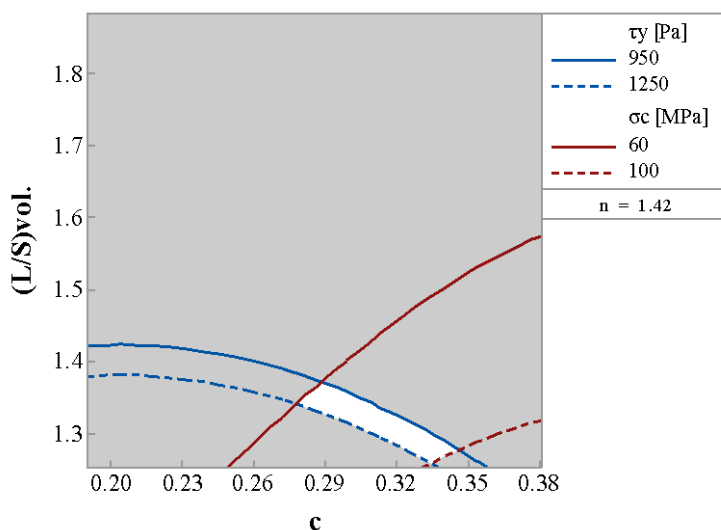
معادله ۶



شکل ۵- نمودار کانتوری تنش تسلیم بتن تازه [Pa] بر حسب غلظت محلول فعال کننده (c) و نسبت حجمی محلول به سرباره ($(L/S)vol.$)

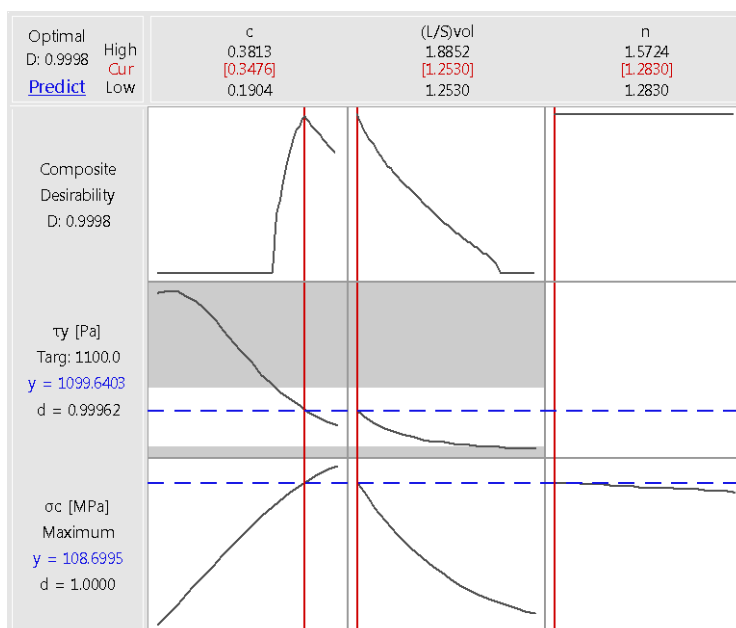
۲-۳. بهینه سازی عملکرد مکانیکی و رئولوژیکی

مدل‌های ایجاد شده به منظور هدف‌گذاری مقاومت فشاری و روانی بتن نیز قابل استفاده می‌باشند. بدان معنی که با استفاده از این مدل‌ها می‌توان با تعیین نمودن روانی و مقاومت فشاری مد نظر میزان محدوده مناسب برای غلظت محلول و نسبت حجمی محلول به سرباره را یافت و نهایتاً طرح مخلوط مورد نظر را با استفاده از معادلات و جداول مشخص نمود. با بررسی نتایج تجربی و مدلسازی آنها مشخص گردید که برای ساخت بتن قلیا فعال سرباره‌ای با مقاومت بین ۶۰ الی ۱۰۰ مگاپاسکال و اسلامپ در محدوده ۹ الی ۱۱ سانتیمتر (تنش تسلیم حدود ۱۱۰۰ پاسکال) مقدار پارامترهای (c) و $(L/S)_{vol.}$ در محدوده سفید رنگ مشخص شده در نمودار شکل ۶ ذیل قرار گیرند. نمودار نشان داده شده در این شکل به overlaid contour plot یا نمودار کانتوری برهم‌گذاری شده معروف است که از ترکیب یا روی هم گذاری کانتورپلات‌های شکل ۴ و شکل ۵ بدست می‌آید.



شکل ۶- نمودار کانتوری تعیین محدود تغییرات پارامتر برای کسب اسلامپ ۱۰ سانتیمتر و مقاومت بیش از ۶۰ [MPa]

نهایتاً با استفاده از نرم‌افزار و مدلسازی انجام شده می‌توان مقادیر و نسبت‌ها اختلاط را برای کسب روانی دلخواه و مقاومت بیشینه محاسبه نمود. در شکل ۷ مشاهده می‌شود میزان مطلوبیت بهینه‌سازی ترکیبی تنش تسلیم و مقاومت فشاری در حدود ۱۰۰ درصد می‌باشد (Composite desirability). نحوه قرائت این نمودار بدین ترتیب است که برای تنش تسلیم هدف‌گذاری شده در ۱۱۰۰ پاسکال، حداکثر مقاومت فشاری قابل تولید برابر با ۱۰۸/۷ MPa می‌باشد. این مقاومت و تنش تسلیم در نسبت‌های $(L/S)_{vol.}$ و c به ترتیب برابر ۱/۲۸۳، ۰/۳۴۷۶ و ۱/۲۵۳ بدست می‌آیند.



شکل ۷- نمودار بهینه‌سازی مقاومت فشاری برای تنش تسلیم ۱۱۰۰ پاسگال (۱۰ سانتیمتر)

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نتیجه‌گیری‌های زیر از این تحقیق بدست می‌آیند:

- پارامترها غلظت کل محلول فعال کننده (C)، مدول محلول فعال کننده (n) و نسبت حجمی محلول به سرباره $(L/S)_{vol}$ متغیرهای تعیین‌کننده تغییرات در مقاومت فشاری بتن قلیا فعال سرباره‌ای می‌باشند. در حالیکه n تاثیر کاهنده جزئی بر مقاومت بتن دارد، افزایش $(L/S)_{vol}$ و کاهش غلظت محلول منجر به کاهش جدی در مقاومت بتن می‌گردد.
 - در صورت پراکندگی زیاد نتایج روانی بتن می‌توان از آزمایش اسلامپ و یا جریان اسلامپ برای دست یافتن به شاخصی از روانی یا غلظت بتن استفاده نموده و سپس با استفاده از مدل‌های تحلیلی انتخاب شده در این تحقیق این نتایج را به تنش تسلیم تبدیل نمود.
 - مدول محلول فعال کننده بر تنش تسلیم بتن بی‌تاثیر می‌باشد. تنش تسلیم با افزایش غلظت محلول افزایش و با افزایش نسبت حجمی محلول به سرباره کاهش می‌یابد.
 - مدل‌های آماری بدست آمده برای مقاومت فشاری و تنش تسلیم با دقت بالایی این پاسخ‌ها را برای مقادیر مختلف n، C و $(L/S)_{vol}$ پیش‌بینی نموده و ابزاری برای هدف‌گذاری و بهینه‌سازی این پارامترها بدست می‌دهند.
- همچنین نظر به وجود منابع وافر سرباره کوره آهن‌گدازی در کشور توصیه می‌شود تحقیقات مشابه بیشتری در این خصوص برای عیارهای دیگر سرباره با شاخص فعالیت مختلف (طبق تعریف ASTM C989) صورت گرفته و نتایج بدست آمده با استفاده از روش مطرح شده در این مقاله مدلسازی آماری شده و نهایتاً با تولید کانتورپلات‌های برهم‌گذاری شده برای رده‌های مختلف اسلامپ (S_1 ، S_2 و ...) و نیز تکنیک‌های مطرح شده در روش ملی طرح مخلوط بتن روشی برای ارائه طرح مخلوط بتن قلیا فعال سرباره‌ای مطرح گردد.

۵. مراجع

- [۱] Dassekpo, J.B.M., Zha, X., Zhan, J. and Ning, J., 2017. Results in Physics.
- [۲] Davidovits, J., 1994. Global warming impact on the cement and aggregates industries. World Resource Review, 6(2), pp.263-278.
- [۳] Aïtcin, P.C., 2000. Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow. Cement and Concrete research, 30(9), pp.1349-1359.
- [۴] Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C. and Meida, L.O., 2001. Carbon dioxide emissions from the global cement industry. Annual review of energy and the environment, 26(1), pp.303-329.
- [۵] Gartner, E., 2004. Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. Cement and Concrete research, 34(9), pp.1489-1498.
- [۶] Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C. and Van Deventer, J.S., 2007. The role of inorganic polymer technology in the development of ‘green concrete’. Cement and Concrete Research, 37(12), pp.1590-1597.
- [۷] Kayali, O., Haque, M. and Khatib, J.M., 2008. Sustainability and emerging concrete materials and their relevance to the Middle East. Open Constr Build Technol J, 2, pp.103-10.
- [۸] Neville, A.M., 1995. Properties of concrete (Vol. 4). London: Longman.
- [۹] Junaid, M.T., 2006. Reducing bleeding in mix for bored pile application without affecting other fresh concrete properties: methodology and procedure. In The Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Bangkok, Thailand (p. 38).
- [۱۰] Bakharev, T., 2006. Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. Cement and Concrete Research, 36(6), pp.1134-1147.
- [۱۱] Hardjito, D. and Rangan, B.V., 2005. Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete.
- [۱۲] Kong, D.L. and Sanjayan, J.G., 2010. Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. Cement and concrete research, 40(2), pp.334-339.
- [۱۳] Kong, D.L., Sanjayan, J.G. and Sagoe-Crentsil, K., 2007. Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. Cement and concrete research, 37(12), pp.1583-1589.
- [۱۴] Lloyd, N. and Rangan, V., 2010. Geopolymer concrete with fly ash. In Proceedings of the Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (pp. 1493-1504). UWM Center for By-Products Utilization.
- [۱۵] Rangan, B.V., 2008. Design and manufacture of flyash-based geopolymer concrete. Concrete in Australia, 34(2), pp.37-43.
- [۱۶] De Vargas, A.S., Dal Molin, D.C., Vilela, A.C., Da Silva, F.J., Pavao, B. and Veit, H., 2011. The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers. Cement and concrete composites, 33(6), pp.653-660.
- [۱۷] Wallah, S. and Rangan, B.V., 2006. Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties.
- [۱۸] Rangan, B.V., 2007. Concrete construction engineering handbook.

-
- [۱۹] Diaz-Loya, E. Ivan, Erez N. Allouche, and Saiprasad Vaidya. "Mechanical properties of fly-ash-based geopolymer concrete." *ACI materials journal* 108.3 (2011): 300.
- [۲۰] Junaid, M.T., Kayali, O., Khennane, A. and Black, J., 2015. A mix design procedure for low calcium alkali activated fly ash-based concretes. *Construction and Building Materials*, 79, pp.301-310.
- [۲۱] استاندارد ملی ایران شماره ۳۰۲ (۱۳۹۴). سنگدانه های بتن - ویژگی ها. ICS:91.100.15
- [۲۲] Davidovits, J., 1988, June. Soft mineralogy and geopolymers. In *Proceedings of the of Geopolymer 88 International Conference*.
- [۲۳] Chidiac, S.E., Habibbeigi, F. and Chan, D., 2006. Slump and slump flow for characterizing yield stress of fresh concrete. *ACI materials journal*, 103(6), p.413.
- [۲۴] Kurokawa, Y., 1996. Study on Slump Test and Slump-Flow Test of Fresh Concrete. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 16, pp.25-32.