

بررسی آزمایشگاهی و عددی خصوصیات رئولوژیکی و مکانیکی بتن‌های خودتراکم حاوی الیاف فولادی و PET با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)

حامد باصر

دانشجوی دکتری مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز ایران

طالب مرادی شقاقی*

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز ایران

حسن افشین

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

رضا صالح اهری

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز ایران

سید سعید میررضایی

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز ایران

Ta.moradi@iaut.ac.ir*

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۰/۲۰ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۹/۱۲/۱۱

چکیده

در شاخصه‌های مدرن طراحی بتن براساس نیازهای روزمره استفاده از مصالح بازیافتی یک اصل مهم و اساسی است. بدین جهت در تحقیق حاضر PET (Polyethylene Terephthalate) جایگزین ریزدانه در بتن خودتراکم شده است. هدف از مطالعه حاضر تولید و بهینه‌سازی مشخصات مکانیکی و رئولوژیکی بتن‌های خودتراکم سازگار با محیط زیست است. متغیرهای ورودی در مخلوط‌ها، شامل PET به عنوان جایگزین درصدی از ریزدانه‌ها، الیاف فولادی، پودرسنگ به عنوان جایگزین درصدی از وزن سیمان و روان‌کننده به صورت، درصدی از وزن مواد پودری می‌باشد. پاسخ‌های مورد مطالعه جریان اسلامپ، نسبت جعبه $L(H2/H1)$ ، مقاومت فشاری و مقاومت کششی می‌باشد. طرح‌های اختلاط با استفاده از روش معکب مرکزی CCD (Central Composite Design) که یکی از روش‌های سطح پاسخ RSM (Response Surface Methodology) می‌باشد طراحی و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش PET مشخصات روانی و مکانیکی مخلوط‌ها کاهش می‌یابد در حالی که الیاف به طور موثری کاهش مقاومت‌ها را بهبود می‌بخشد. با استفاده از مدل‌های ریاضی ارائه شده توسط ANOVA بهینه‌سازی‌های چند هدفه به منظور ماکزیمم سازی مقاومت فشاری توسط روش RSM صورت گرفته و یک طرح اختلاط بهینه براساس نتایج آزمایشگاهی پیشنهاد شده است.

کلید واژگان: بتن خودتراکم، PET، الیاف فولادی، RSM، خواص رئولوژیکی و مکانیکی

۱- مقدمه

بشر به دلیل عملکردهای خود در سالیان اخیر با چالش‌های زیست محیطی مهمی نظیر تغییرات آب‌وهوا، کاهش منابع و از بین رفتن تنوع زیست محیطی روبه‌رو است [۱]. فراوانی مسائل زیست‌محیطی و وجود مواد زاید حاصل از فرایندهای مختلف، یکی از معضلات مهم کشورهای صنعتی و در حال توسعه در عصر حاضر می‌باشد [۲]. یکی از این مواد پلاستیک‌ها می‌باشند که بسیار طولانی مدت در محیط زیست باقی مانده و موجب خطرات زیست‌محیطی فراوانی می‌شوند، پس می‌طلب راه‌کارهایی برای مدیریت این مواد صورت پذیرد. روش‌های مختلفی برای دفع چنین موادی وجود دارد از جمله می‌توان به روش‌های دفن، سوزاندن و بازیافت اشاره نمود. مناسب‌ترین این روش‌ها بازیافت و استفاده در صنایع دیگر بوده که نقش مهمی در مدیریت پایدار پسماندهای جامد دارد [۳].

از طرف دیگر صنعت ساختمان بزرگترین مصرف‌کننده مواد روی زمین است، لذا بهره‌برداری بیش از حد از منابع طبیعی برای تولید بتن موجب کمبود مصالح طبیعی و کاهش منابع برای نسل‌های آینده شده است. بدین منظور محققین تحقیقات متعددی برای استفاده از مواد دیگر در بتن انجام داده‌اند که استفاده از ضایعات پلاستیک یکی از آنهاست. این امر موجب حفظ منابع طبیعی و همچنین موجب ذخیره انرژی لازم برای فرایند بازیافت می‌شود [۴]. علاوه بر این استفاده از پلاستیک‌ها در بتن موجب بهبود برخی از ویژگی‌های بتن از جمله شکل‌پذیری آن می‌گردد [۵]. یکی از انواع بتن‌های مورد استفاده در حال حاضر که از مقبولیت بالایی نیز برخوردار است، بتن خودتراکم می‌باشد. بتن خودتراکم، یک بتن با روانی بسیار بالا است که می‌توان به راحتی در مقاطع پر خاموت و با تراکم میلگرد بالا از آن استفاده نمود [۶]. مقاومت فشاری بالا و مقاومت کششی پایین بتن از مزایا و معایب خصوصیات مکانیکی بتن می‌باشند که می‌توان با استفاده از مصالحی سعی بر بهبود این نقص نمود. یکی از مصالحی که می‌توان با استفاده از آن مشخصات مکانیکی بتن رو بهبود بخشید الیاف‌های فولادی است. الیاف‌های فولادی موجب افزایش مقاومت کششی، مقاومت خمشی، شکل‌پذیری و کاهش ترک‌ها در بتن می‌شوند [۷]. استفاده از PET و الیاف‌های فولادی در بتن‌های خودتراکم مشخصات رئولوژیکی آن را تحت تاثیر قرار داده و می‌تواند با استفاده از روش‌های آماری و آزمایش‌های مورد نیاز یک طرح اختلاط بهینه ارائه داد. به منظور انجام تحلیل‌های عددی و بررسی تاثیر هر یک از پارامترهای مورد بررسی بر روی نتایج آزمایشات از روش طراحی آزمایشات RSM «Response Surface Methodology» استفاده شده است. پژوهش‌های زیادی در خصوص تولید بتن‌های دوست‌دار محیط زیست صورت پذیرفته که این امر اهمیت بالایی این نوع بتن‌ها و تاثیر آنها در مدیریت مواد زائد و توسعه پایدار را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، Hama و همکاران در مطالعه‌ای مشخصات رئولوژیکی بتن‌های خودتراکم حاوی ضایعات پلاستیک را مورد بررسی قرار دادند. محققان ضایعات پلاستیک در سه حالت ریز، درشت و ترکیب این ۲ در سطوح ۰، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰٪

۱۲/۵ جایگزین ماسه کردند. نتایج نشان داد که ضایعات پلاستیک به نحو مطلوبی می‌تواند جایگزین قسمتی از ریزدانه‌ها گردد [۸].

Aziminezhad و همکاران به بهینه‌سازی مشخصات رئولوژیکی بتن‌های خودتراکم با استفاده از روش RSM پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که روش RSM شیوه‌ای مناسب برای ارزیابی رفتار رئولوژی و سخت شده بتن خودتراکم است. علاوه بر این میکروسلیس برخلاف سربازه آهن‌گذاری تاثیر زیادی بر روی کارایی بتن خودتراکم داشته و موجب بهبود کارایی و مقاومت فشاری می‌شود [۹].

در تحقیقی دیگر Elemam و همکاران در مطالعه‌ای به بهینه‌سازی مشخصات تازه و مقاومت فشاری بتن‌های خودتراکم پرداختند. نتایج نشان دادند که با افزایش مقدار خاکستر بادی مشخصات روانی بتن خودتراکم افزایش و مقاومت فشاری آن کاهش می‌یابد [۱۰].

Aldahdooh و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی تاثیر شکل هندسی ضایعات پلاستیک بر روی کارایی و مقاومت فشاری بتن‌های معمولی پرداختند. بدین منظور از ۲ نوع ضایعات پلاستیک با اشکال منظم و نامنظم استفاده گردید. نتایج نشان داد که کاهش کارایی در بتن‌های حاوی ذرات پلاستیک با اشکال نامنظم نسبت به پلاستیک‌های با شکل منظم بیشتر است [۱۱].

Rezaeifar و همکاران در پژوهشی به بهینه‌سازی بتن‌های حاوی ضایعات پلاستیک و متاکائولین با استفاده از روش RSM پرداختند. در این پژوهش ضایعات لاستیک جایگزین قسمتی از ریزدانه‌ها گردید [۱۲].

Khashaa Mohammed و همکاران در مقاله‌ای به تولید و بهینه‌سازی بتن‌های خودتراکم دوست‌دار محیط زیست با پودر سنگ و PET پرداختند. آنها برای بهینه‌سازی‌های مورد نیاز از روش RSM استفاده کرده و PET، پودر سنگ و روان‌کننده را نیز به عنوان فاکتورهای خود انتخاب کردند [۱۳].

Sultana و همکاران در مقاله‌ای با استفاده از الگوریتم جستجوی کلانگ و روش RSM یک طرح اختلاط بهینه برای بتن‌های حاوی الیاف jute ارائه دادند [۱۴].

بر اساس تحقیقات متعدد مورد اشاره، غالباً رفتار نمونه‌های بتنی متاثر از یک یا دو متغیر و اغلب در قالب مطالعات آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. لذا، تاثیر استفاده همزمان ذرات پت، پودر سنگ، روان‌کننده و الیاف فولادی بر خصوصیات رئولوژیکی و مکانیکی بتن‌های خودتراکم با استفاده از روش RSM مدلسازی و بهینه‌سازی نشده است. هدف اصلی تحقیق حاضر، تهیه بتن خودتراکم همسو با محیط زیست بوده که بدین منظور ذرات PET به صورت وزنی جایگزین قسمتی ریزدانه گردیده و برای جبران کاهش مشخصه‌های مکانیکی بتن ساخته شده از الیاف فولادی استفاده شده است. همچنین با استفاده از مدل‌های رگرسیونی، آنالیز واریانس و جداول ANOVA میزان تاثیر هر یک از پارامترهای مورد بررسی بر روی پاسخ آزمایش سنجیده شده و در آخر یک طرح اختلاط بهینه برای دستیابی به بتن خودتراکم با مشخصات مکانیکی مناسب با در نظر گرفتن

۳- مصالح

در این مقاله برای اختلاط بتن از سیمان تیپ ۲ بوکان آذربایجان غربی با وزن مخصوص 3.1 ton/m^3 استفاده شده است که ترکیبات شیمیایی آن در جدول ۱ آورده شده است. حداکثر اندازه سنگدانه‌های درشت مورد استفاده $12/5$ میلی‌متر است. ریزدانه‌های مورد استفاده در این تحقیق از نوع رودخانه‌ای بوده و وزن مخصوص درشت دانه و ریزدانه به ترتیب $2/68$ و $1/39$ و همچنین چگالی انبوهی آنها به ترتیب $1/39$ و $1/49$ واحد می‌باشد. درصد جذب آب درشت دانه و ریزدانه به ترتیب $2/7\%$ و $2/7\%$ می‌باشد. نمودار دانه‌بندی طبق مرکز تحقیقات مسکن ایران در شکل ۱ آورده شده است. برای ایجاد کارایی‌های لازم از پودر سنگ باریت با عبوری از الک ۱۰۰ به عنوان پرکننده در درصد‌های مختلف جایگزین وزن سیمان شده است. PET مورد بررسی در درصد‌های مختلف بصورت وزنی جایگزین قسمتی از ماسه شده است. فوق روان‌کننده پلی کربکسیلات محصول شرکت البرز شیمی آسیا با وزن مخصوص 1.08 gr/cm^3 برای افزایش روانی بتن در مقاله استفاده شده است. الیاف مورد استفاده ساخت شرکت عرفان بوده دارای طول ۳۵ میلی‌متر و قطر $0/6$ میلی‌متر و دو انتهای آن بصورت قلاب است، که مشخصات آن در جدول ۲ آورده شده است. شکل ۲ الیاف و PET مورد استفاده در این مطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۱ - مشخصات شیمیایی سیمان و پودر سنگ

Items	Cement (%)	Barite (%)
SiO ₂	21.66	0.4
Al ₂ O ₃	4.67	-
Fe ₂ O ₃	3.63	0.06
BaSO ₄	-	96.5
SrSO ₄	-	0.62
CaO	65.94	0.36
MgO	1.58	0.1
SO ₃	1.08	-
LOI	0.25	1.16

جدول ۲ - مشخصات الیاف مصرفی

نوع	طول (mm)	قطر (mm)	وزن مخصوص	مقاومت کششی (Mpa)
الیاف فولادی	۳۵	۰/۶	۷۸۵۰	۲۴۸۰

محدوده‌های ارائه شده در آیین‌نامه EFNARC برای بتن‌های خودتراکم ارائه شده است.

۲- روش سطح پاسخ Rsm

Wilson و Box در سال ۱۹۵۱ روش سطح پاسخ را برای بهینه‌سازی تعداد و پاسخ آزمایش‌ها مطرح گردیده و امروزه به طور گسترده در طراحی آزمایش‌های یک فرایند از آن استفاده می‌شود. در روش سطح پاسخ از مجموعه‌ای از ریاضیات و تکنیک‌های آماری به منظور مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ فرایند متاثر از چندین متغیر ورودی است مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین منظور ابتدا باید متغیرهای تاثیرگذار بر روی پاسخ آزمایش تعیین گردد [۱۵]. بعد از انجام آزمایشات و تحلیل‌های لازم یک رابطه ریاضی بین پاسخ و مجموعه متغیرهای ورودی ارائه می‌گردد [۱۶]. روش سطح پاسخ دارای مزیت‌های زیر می‌باشد:

۱- تابع ضمنی در این روش، شامل متغیرهای ورودی است که محقق نسبت به متغیرهای مورد بررسی آنها را تعیین نموده که بعد از انجام آنالیز ANOVA مشخص خواهد شد که کدام یک از این متغیرها، مهم و بر روی پاسخ تاثیرگذار هستند.

۲- با انتخاب متغیرهای ورودی خاص برای تابع، احتمال تصادفی رخداد آن می‌تواند تحلیل گردد.

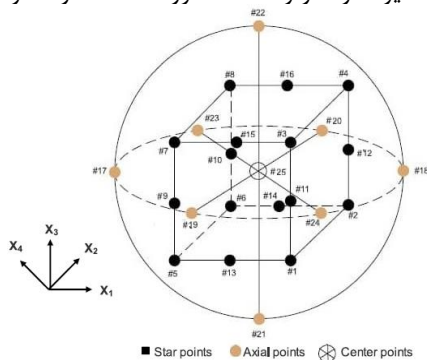
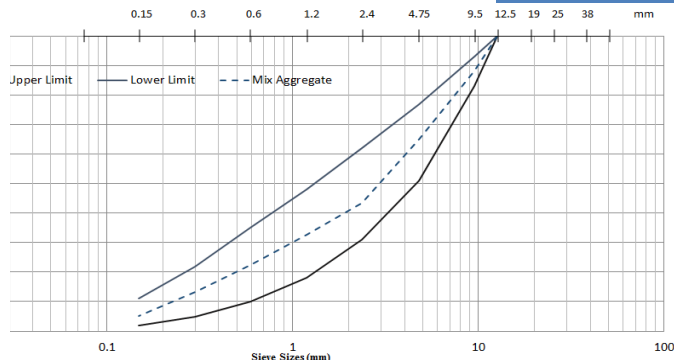
۳- با استفاده از روش حداقل مربعات برای ایجاد تابع سطح پاسخ، پیش‌بینی احتمال یک سیستم می‌تواند تحلیل گردد [۱۷].

روش سطح پاسخ انواع مختلفی دارد که مهم‌ترین آن روش مکعب مرکزی (CCD) می‌باشد. در روش سطح پاسخ، متداول‌ترین نوع طرح آزمایش برای یافتن رابطه بین پاسخ و فاکتورها، طرح مکعب مرکزی (CCD) است [۱۱]، که در این مقاله از این روش استفاده شده است.

در این مقاله، نتایج آزمایش‌های جریان اسلامپ، جبهه L از مشخصات بتن تازه و مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه و مقاومت کششی ۲۸ روزه از مشخصات مکانیکی بتن سخت شده نقش پاسخ را در روش طراحی آزمایش برعهده دارد. همچنین ذرات PET، پودر سنگ، الیاف و روان‌کننده فاکتورها و متغیرهای ورودی در طراحی آزمایش هستند. مدل پیش‌بینی کننده درجه دومی که برای تعیین شرایط بهینه پاسخ استفاده شده در قسمت زیر آورده شده است:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i,j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

در این معادله، y پاسخ پیش‌بینی شده، x_i و x_j مقادیر کدی متغیرها، i ضریب خطی، j ضریب خطی درجه دوم، B ضریب رگرسیون، k تعداد فاکتورها و ε خطای تصادفی می‌باشد [۱۶، ۱۱].

شکل ۳- ماتریس طراحی آزمایشات برای $k=4$ 

شکل ۱- نمودار دانه بندی سنگدانه‌ها

در این تحقیق PET در محدوده ۱۶٪-۰ بصورت وزنی جایگزین ماسه، الیاف در محدوده ۴٪-۰/۰ جایگزین حجم بتن، پودر سنگ ۱۶٪-۰ بصورت وزنی جایگزین سیمان و فوق روان کننده نیز در محدوده ۱۵٪-۰/۵ وزن مواد پودری براساس آزمایشات اولیه و پیشینه تحقیق انتخاب گردیده‌اند. براساس پیشینه تحقیق، انتظار می‌رود که محدوده مقادیر انتخاب شده، نتایج کاملی را در برگرفته و الگوی تاثیر ذرات PET و الیاف را مشخص خواهد نمود. بدین ترتیب استفاده از ذرات PET با مقادیر بیش از ۱۶٪ به دلیل افت شدید مقاومت فشاری و الیاف فولادی

با مقادیر بیش از ۴٪ به منظور کاهش شدید روانی بتن توصیه نمی‌شود. در همه طرح‌های اختلاط مقادیر سیمان، ریزدانه‌ها، درشت‌دانه‌ها و آب به صورت ثابت بوده و مقادیر روان کننده، PET، پودر سنگ و الیاف نسبت به سطوح ارائه شده توسط روش CCD تغییر می‌کند. با استفاده از رابطه (۲) تعداد آزمایش‌های مورد مطالعه تعیین می‌گردد [۱۶]:

$$\text{Number-of-Experiments} = 2^k + 2k + N_c \rightarrow 2^4 + (2 \times 4) + 6 = 30(2)$$

در رابطه فوق پارامتر k تعداد متغیرهای مستقل و N_c تعداد نقاط مرکزی که تکرار این آزمایشات به منظور بهبود دقت و کاهش خطاهای احتمالی است. ۳۰ طرح با استفاده از روش RSM طراحی شده و به منظور تحلیل‌های مورد نیاز از نرم افزارهای Minitab 19 و Design Expert 12 استفاده شده است. شکل ۴ به صورت شماتیک مراحل اصلی تحقیق را نشان می‌دهد.

مخلوط‌های بتنی در میکسر به مدت کل ۱۰ دقیقه مخلوط شدند که ۴ دقیقه آن شامل مخلوط کردن مصالح به صورت خشک بود. سطح داخلی مخزن میکسر ابتدا با آب مرطوب گردید تا آب مخلوط‌های بتنی را به خود جذب نکند. PET ها بعد از ریزدانه‌ها به مخلوط اضافه شده و به صورت خشک با سنگدانه‌ها مخلوط گردید این روش ترکیب باعث می‌گردد PET به طور یکنواخت در تمام مخلوط پخش شود. در ادامه ۲۵٪ آب به همراه فوق‌روان کننده به مخلوط اضافه شد. سپس مواد پودری و بقیه آب و فوق‌روان کننده به مخلوط اضافه گردید. در آخر الیاف‌ها به آرامی به مخلوط اضافه شدند. در فرایند قالب‌گیری نمونه‌ها، هر نمونه در دولایه قالب‌گیری شد. برای ساخت نمونه‌ها مکعبی از قالب‌های ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر و برای نمونه‌های استوانه‌ای از قالب‌های ۱۵×۳۰ استفاده گردید.



شکل ۲- الیاف و PET مورد استفاده

۴- طرح اختلاط و آماده‌سازی نمونه‌ها

در این تحقیق چهار فاکتور PET، الیاف فولادی، پودر سنگ و روان کننده در پنج سطح متفاوت مطابق جدول ۳ تغییر می‌کند. آزمایشات جریان اسلامپ و جعبه L به منظور بررسی خصوصیات رئولوژیکی بتن- خودتراکم و مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه و مقاومت کششی ۲۸ روزه به عنوان مشخصات مکانیکی بتن خودتراکم مورد بررسی قرار گرفتند. طرح های اختلاط مورد بررسی در جدول ۴ و شکل ۳ آورده شده است.

جدول ۳- فاکتورهای مورد بررسی

متغیرها	سطوح				
	-۲	-۱	۰	۱	۲
PET (%) X1	۰	۴	۸	۱۲	۱۶
الیاف (%) X2	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴
پودر سنگ (%) X3	۰	۴	۸	۱۲	۱۶
روان کننده (%) X4	۰/۵	۰/۷۵	۱	۱/۲۵	۱/۵

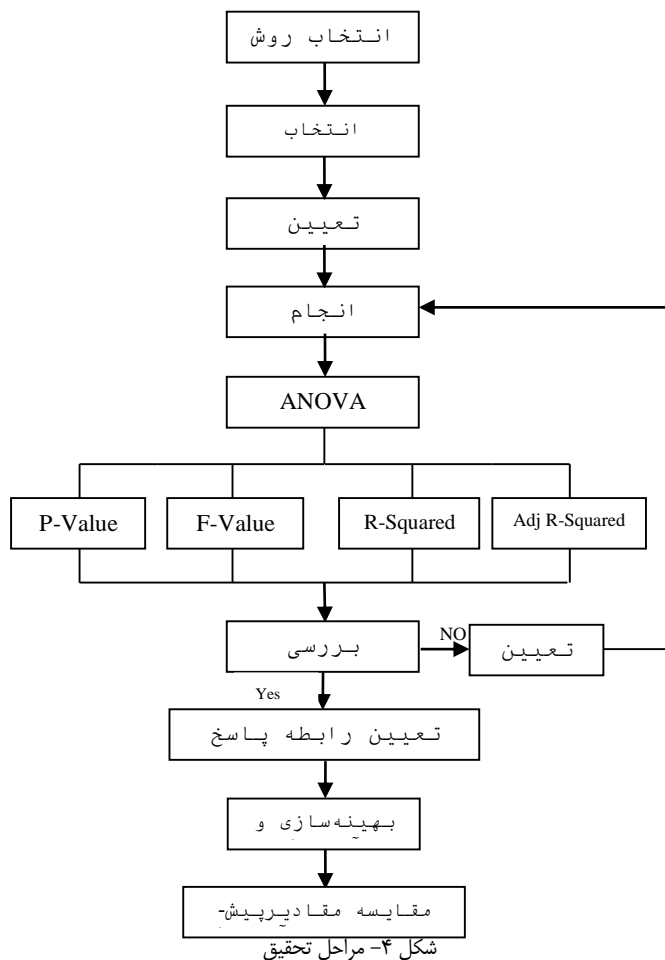
همه نمونه‌ها در دمای حدود ۲۱ درجه سانتی‌گراد نگهداری شده و بعد از ۲۴ ساعت از قالب‌ها خارج و در حوضچه آب با دمای ۲۱ سانتی‌گراد تا زمان آزمایش نگهداری شدند.

۵- آنالیز آزمایش‌ها

نتایج آزمایشات جریان اسلامپ، قیف ۷، جعبه L، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه و مقاومت کششی در جدول ۵ آورده شده است. توضیح این نکته لازم است که مدل‌ها با توجه به مقادیر نتایج آزمایشات ارائه شده در جدول ۵ ساخته شده‌اند.

جدول ۴- طرح اختلاط‌های مورد بررسی (Kg/m³)

	سیمان	پودر سنگ	آب	روان کننده	ماسه	PET	شن	الیاف
1	475	57	210	3.99	1000	41	516	7.85
2	475	38	210	5.13	965	83	468	15.7
3	475	57	210	3.99	914	124	413	23.55
4	475	38	210	2.56	969	84	470	15.7
5	475	57	210	6.65	992	41	512	23.55
6	475	38	210	5.13	968	84	470	0
7	475	76	210	5.51	944	82	458	15.7
8	475	0	210	4.75	986	85	478	15.7
9	475	38	210	7.69	961	83	466	15.7
10	475	57	210	6.65	913	124	412	7.85
11	475	19	210	3.70	1021	42	527	7.85
12	475	57	210	6.65	996	41	514	7.85
13	475	57	210	6.65	909	124	411	23.55
14	475	38	210	5.13	881	167	366	15.7
15	475	38	210	5.13	965	83	468	15.7
16	475	19	210	3.70	936	127	423	7.85
17	475	19	210	6.17	932	127	421	7.85
18	475	38	210	5.13	965	83	468	15.7
19	475	38	210	5.13	962	83	467	31.4
20	475	19	210	3.70	1018	42	525	23.55
21	475	19	210	6.17	1017	42	525	7.85
22	475	38	210	5.13	1049	0	571	15.7
23	475	38	210	5.13	965	83	468	15.7
24	475	19	210	3.70	933	127	422	23.55
25	475	19	210	6.17	929	126	420	23.55
26	475	38	210	5.13	965	83	468	15.7
27	475	57	210	3.99	917	125	414	7.85
28	475	19	210	6.17	1014	42	523	23.55
29	475	38	210	5.13	965	83	468	15.7
30	475	57	210	3.99	997	41	514	23.55



مدلسازی آماری نتایج آزمایش‌ها، همراه با تحلیل ANOVA توسط نرم‌افزارهای Design Expert¹² و Minitab¹⁹ انجام شده است. اطلاعات کلی مدل و نحوه اثرگذاری هر کدام از متغیرهای مستقل بر مقدار پاسخ، در جدول ANOVA هر یک از آزمایش‌ها ارائه شده است. مدل‌سازی نتایج آزمایشگاهی و تحلیل ANOVA با سطح خطای ۵٪ اجرا شده است. مقدار p-value بیانگر معنی‌داری پارامترهای تعریف شده مورد آزمایش در مقادیر نتایج می‌باشد. چنانچه مدلی دارای p-value کمتر از ۰/۰۵ باشد، به عنوان یک متغیر معنی‌دار بر نتایج آزمایش شناخته شده و نشان می‌دهد مشارکت متغیر پیشنهادی دارای تاثیر قابل توجهی بر پاسخ مورد آزمایش می‌باشد. همچنین، ضریب تعیین R² نشان دهنده همبستگی بین داده‌های آزمایشگاهی و پاسخ‌های پیش‌بینی شده بوده، که مقدار این ضریب هرچقدر به عدد یک نزدیک‌تر باشد مدل ارائه شده از دقت کافی برخوردار است [۱۸].

۵-۱- آزمایش جریان اسلامپ

جدول ۵- نتایج آزمایشات

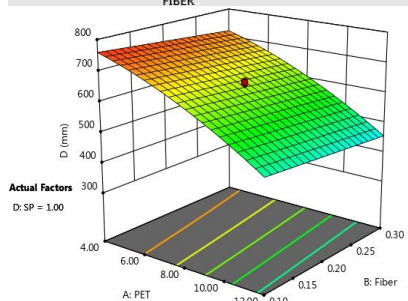
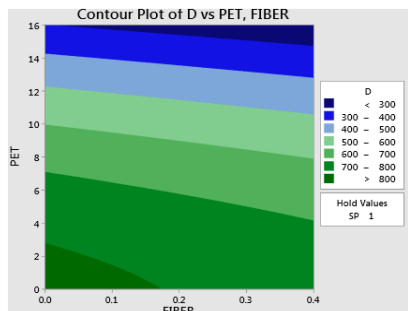
جعبه L	V (s)	جریان اسلامپ (mm)	مقاومت فشاری ۷ (روزه) (kg/cm^2)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm^2)	مقاومت کششی (kg/cm^2)
1	0.91	4.77	775	317	380
2	0.8	6.39	645	265	396
3	0.5	9.21	400	244	303
4	0.5	3.75	620	260	331
5	0.55	5.08	730	341	416
6	0.92	4.81	655	256	343
7	0.75	6.4	650	270	391
8	0.8	5.44	655	270	301
9	0.84	6.34	710	282	391
10	0.81	7.47	680	272	342
11	0.86	4.73	775	290	363
12	0.94	5.89	745	336	400
13	0.6	10.37	450	267	320
14	0.5	13.35	350	238	333
15	0.8	6.33	650	266	380
16	0.7	8.77	395	266	299
17	0.77	9.78	390	322	336
18	0.82	6.21	655	269	374
19	0.4	9.19	600	290	392
20	0.47	6.18	705	320	436
21	0.92	5.83	750	333	417
22	0.8	6.44	770	412	561
23	0.84	6.58	650	270	399
24	0.61	8.31	400	277	310
25	0.6	9.52	450	221	333
26	0.8	6.11	650	262	416
27	0.7	7.2	400	218	331
28	0.65	6.6	730	312	431
29	0.85	6.4	650	266	388
30	0.8	4.85	705	305	367

مطابق مدل ارائه شده در جدول ۶ مقدار جریان اسلامپ با استفاده از یک تابع چند جمله‌ای درجه دو قابل برآورد خواهد بود. مقدار ضریب R^2 بدست آمده برای این آزمایش %۹۰/۶۳ و R^2 تعدیل یافته %۸۶/۰۵ بوده که بیانگر قابلیت بالای پیش‌بینی پاسخ در محدوده مطالعات انجام شده می‌باشد. مدل و ضرایب ارائه شده در جدول ۶ با سطح معنی‌داری $p\text{-value} < 0.05$ معنی‌دار است. پس از انجام تحلیل و تعیین مقدار $p\text{-value}$ برای هر یک از فاکتورهای مورد بررسی، پارامترهایی که مقدار $p\text{-value}$ آنها بیشتر از ۰/۰۵ بوده و تاثیر زیادی بر روی پاسخ نداشته برای بهبود کفایت مدل حذف شده‌اند. کانتور شکل ۴، برای متغیرهای PET و روان‌کننده با در نظر گرفتن ۰/۲ درصد الیاف رسم شده است. با دقت در نمودار یاد شده می‌توان دریافت که مقدار PET تاثیر بیشتری بر روی جریان اسلامپ دارد. بطوری که با افزایش درصد جایگزینی PET به بیش از ۱۰ درصد، جریان اسلامپ به ۴۰۰ میلی‌متر کاهش می‌یابد. نتیجه‌ای که در تحقیقات مشابه نیز گزارش شده است [۱۳]. نمودار ب شکل ۴ تاثیر افزایشی روان‌کننده بر روی جریان اسلامپ را نشان می‌دهد.

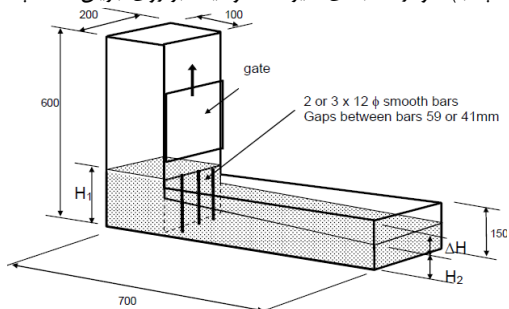
جدول ۶- تحلیل واریانس برای مدل درجه دوم جریان اسلامپ

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
جریان اسلامپ	473706.38	5	94741.28	34.00	< 0.0001
X1	424004.16	1	424004.2	152.17	< 0.0001
X2	8437.5	1	8437.50	3.03	0.0946
X4	12604.17	1	12604.17	4.52	0.0439
X1.X4	9025	1	9025.00	3.24	0.0845
X1.X1	19635.56	1	19635.56	7.05	0.0139
Residual	66873.61	24	2786.40		
R-Squared	90.63%				
Adj R-Squared	86.05%				
Pure Error	50.00	5	10.00		
Cor Total	5.406E+05	29			

$$\text{SlumpFlow}(mm) = 931 - 30.86X1 - 187.5X2 - 98.33X4 + 23.75X1 \times X4 - 1.632X1 \times X1$$



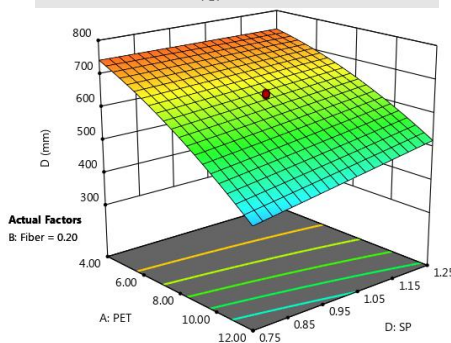
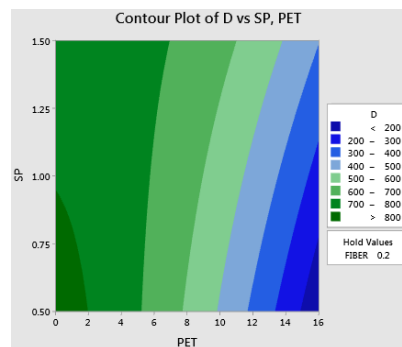
شکل ۵-الف) کانتور تاثیر برهمکنش PET و الیاف بر روی جریان اسلامپ (ب) نمودار سه بعدی تاثیر PET و الیاف بر روی جریان اسلامپ



شکل ۶- جعبه L

پاسخ این آزمایش آورده شده است. طبق جدول ۷ مقدار ضریب R^2 و R^2 تعدیل یافته برای مدل ارائه شده به منظور پیش‌بینی مقدار پاسخ جعبه L به ترتیب $90/79\%$ و $82/31\%$ حاصل شده است.

از بین متغیرهای سه‌گانه ارائه شده در جدول ۷، در سطح خطای 5% مدل خطی هر ۳ متغیر معنی‌دار شناخته شده و همچنین، توان دوم متغیرهای PET، الیاف و روان‌کننده معنی‌دار شده و براساس داده جدول ۱۱ تمامی اندرکنش‌های پارامترهای مورد بررسی معنی‌دار نیست. بررسی نمودارهای سطوح پاسخ نشان می‌دهد که تاثیرگذارترین متغیر بر پاسخ، سهم الیاف در مخلوط می‌باشد. با بررسی نمودار سه بعدی شکل ۷ مشاهده می‌گردد پاسخ مقادیر جعبه L به تغییرات مقدار الیاف بیشتر از پارامتر PET می‌باشد.



شکل ۴-الف) کانتور تاثیر برهمکنش PET و روان‌کننده بر روی جریان اسلامپ (ب) نمودار سه بعدی تاثیر PET و روان‌کننده بر روی جریان اسلامپ

اثرات ترکیبی برای فاکتورهای PET و الیاف با مقدار روان‌کننده 1% ، برای نتایج آزمایش جریان اسلامپ در شکل ۵ نشان داده شده است، با دقت در نمودار یاد شده می‌توان دریافت که مقدار PET در مقایسه با الیاف تاثیر بیشتری بر کاهش پاسخ جریان اسلامپ دارد. با بررسی کانتور شکل ۵ می‌توان دریافت که مقدار مطلوب برای جریان اسلامپ 10% PET، 1% روان‌کننده و الیاف $0/2\%$ می‌باشد. برای مخلوط‌های بیشتر از 12% PET نشانه‌هایی از پدیده جداشدگی دیده می‌شود. به نحوی که در مخلوط با 12% PET پدیده جداشدگی مشهود است.

۵-۲- آزمایش جعبه L:

آزمایش L به منظور بررسی قابلیت جریان بتن تازه و پدیده انسداد ناشی از حضور میلگردها طراحی شده است. طبق EFNARC، نسبت ارتفاع‌ها ($H2/H1$) در این آزمایش بین $0/8$ تا 1 می‌باشد (شکل ۶). جدول ۷ فاکتورهای تاثیرگذار و همچنین کلیه اندرکنش‌های تاثیرگذار بر مقدار پاسخ این آزمایش آورده شده است. طبق جدول ۷ مقدار ضریب R^2 و R^2 تعدیل یافته برای مدل ارائه شده به منظور پیش‌بینی مقدار پاسخ جعبه L به ترتیب $90/79\%$ و $82/31\%$ حاصل شده است.

کانتور شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش درصد PET و الیاف، مقادیر جعبه L دچار کاهش می‌شود. به طوری که با افزایش الیاف به ۰/۴٪ مقادیر جعبه L تا ۵۵٪ کاهش می‌یابد. این عامل را می‌توان به دلیل انسداد و تداخل الیاف با مخلوط بتن دانست. همچنین با افزایش PET تا ۱۶٪ درصد مقادیر جعبه L تا ۳۷/۵٪ کاهش می‌یابد. که این کاهش در تحقیقات پیشین مشاهده شده است [۱۹،۲۰].

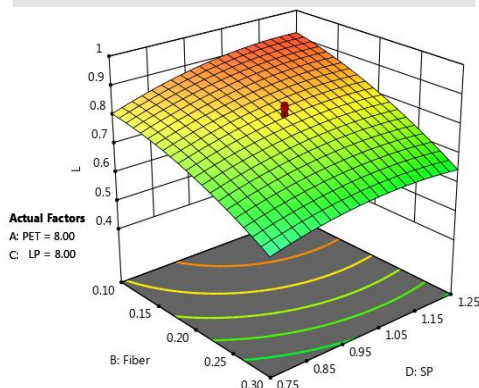
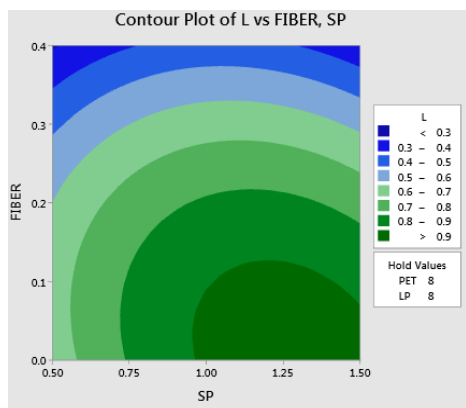
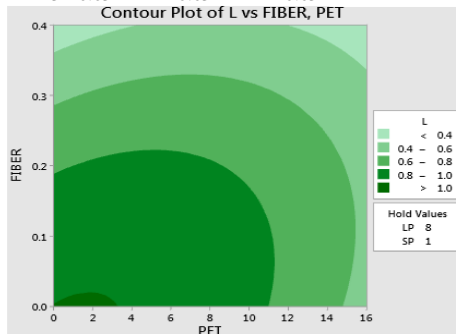
جدول ۷- تحلیل واریانس برای مدل درجه دوم L-BOX

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
L-جعبه	0.5781	10	0.0578	11.47	< 0.0001
X1	0.0828	1	0.0828	16.44	0.0007
X2	0.3432	1	0.3432	68.11	< 0.0001
X4	0.0392	1	0.0392	7.78	0.0117
X1.X2	0.0150	1	0.0150	2.98	0.1006
X1.X3	0.0086	1	0.0086	1.70	0.2081
X1.X4	0.0039	1	0.0039	0.7752	0.3896
X2.X4	0.0039	1	0.0039	0.7752	0.3896
X1.X1	0.0388	1	0.0388	7.70	0.0121
X2.X2	0.0338	1	0.0338	6.70	0.0180
X4.X4	0.0291	1	0.0291	5.77	0.0267
Residual	0.0957	19	0.0050		
R-Squared	90.79%				
Adj R-Squared	82.31%				
Pure Error	0.0025	5	0.0005		
Cor Total	0.6738	29			

$$L - BOX = 0.81 - 0.05 X1 - 0.11 X2 + 0.04 X4 + 0.03 X1 X2$$

$$- 0.02 X1 X3 - 0.03 X1 X1 - 0.03 X2 X2 - 0.03 X4 X4$$

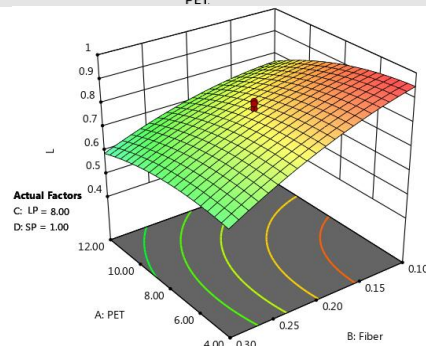
Contour Plot of L vs FIBER, PET



شکل ۸- الف) کانتور تاثیر الیاف و روان کننده بر روی پاسخ آزمایش جعبه L (ب) نمودار سه بعدی تاثیر الیاف و روان کننده بر روی پاسخ آزمایش جعبه L

شکل ۸ تاثیر روان کننده و الیاف را بر روی جعبه L را نشان می‌دهد. با بررسی نمودارهای شکل ۸ مشاهده می‌گردد برای داشتن پاسخ بیشتر از ۰/۸ به روان کننده بالای ۰/۷۵٪ نیاز است. استفاده از روان کننده باعث افزایش مقادیر جعبه L (H2/H1) شده، به نحوی که با افزایش روان کننده از ۰/۵٪ به ۱/۵٪ درصد مقدار جعبه L تا ۶۸٪ افزایش را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر افزایش مقادیر روان کننده موجب کاهش پدیده انسداد، ناشی از وجود الیافها شده است.

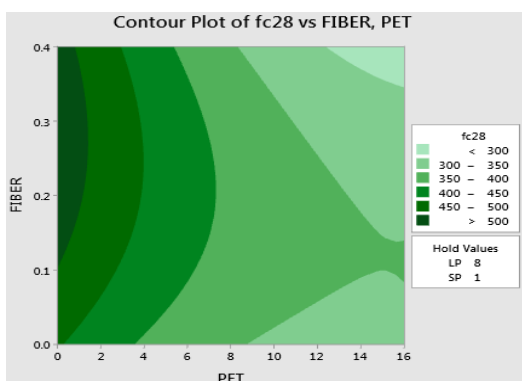
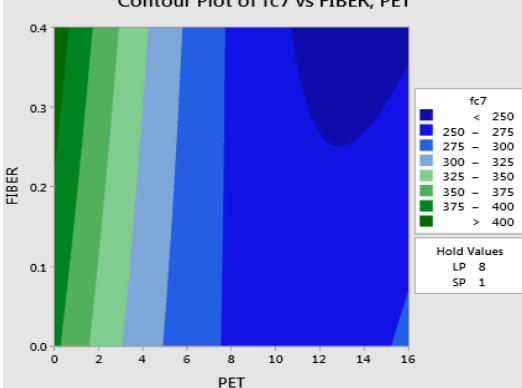
شکل ۷- الف) کانتور تاثیر PET و الیاف بر روی پاسخ آزمایش جعبه L (ب) نمودار سه بعدی تاثیر PET و الیاف بر روی پاسخ آزمایش جعبه L



جدول ۸- تحلیل واریانس برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
مقاومت فشاری	73808.83	12	6150.74	10.25	< 0.0001
X1	49686.00	1	49686.00	82.83	< 0.0001
X2	888.17	1	888.17	1.48	0.2403
X4	4428.17	1	4428.17	7.38	0.0146
X1.X2	1089.00	1	1089.00	1.82	0.1955
X2.X3	1260.25	1	1260.25	2.10	0.1654
X1.X1	3060.11	1	3060.11	5.10	0.0373
X2.X2	2378.68	1	2378.68	3.97	0.0628
X3.X3	5916.96	1	5916.96	9.86	0.0060
X4.X4	3281.25	1	3281.25	5.47	0.0318
Residual	10197.83	17	599.87		
R-Squared	91.22%				
Adj R-Squared	83.40%				
Pure Error	1124.83	5	224.97		
Cor Total	84006.67	29			

$$F_{c28} - dy \left(\frac{kg}{cm^2} \right) = 392.17 - 45.5X1 + 6.08X2 + 13.58X4 - 8.87X2X3 + 10.56X1X1 - 9.31X2X2 - 14.69X3X3 - 10.94X4X4$$



شکل ۹- الف) کانتور PET در برابر الیاف برای مقاومت فشاری ۷ روزه

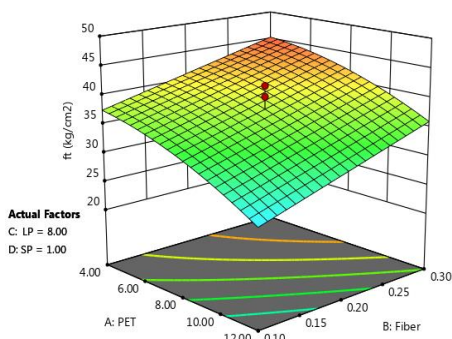
ب) الف) کانتور PET در برابر الیاف برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه

۵-۳- مقاومت فشاری

برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه، برای هر طرح اختلاط ۳ نمونه در نظر گرفته شد که جمعا ۱۸۰ نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. جدول تحلیل واریانس مقاومت فشاری ۲۸ روزه در قسمت زیر از میانگین ۳ نمونه حاصل شده است. مدل مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه، مطابق جدول ۸ ارائه شده است. نتایج حاصل از تحلیل ANOVA نشان می‌دهد که از بین افزودنی‌های مورد مطالعه، PET و روان‌کننده به عنوان تاثیرگذارترین متغیر شناسایی شده و مدل خطی دو متغیر دیگر مدل معنی‌دار شناخته نشده‌اند. مقدار ضریب R^2 و R^2 تعدیل یافته برای مدل ارائه شده به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری ۲۸ روزه به ترتیب ۹۱/۲۲٪ و ۸۳/۴۰٪ حاصل شده است.

با بررسی کانتورهای شکل ۹ مشاهده می‌گردد افزایش سهم PET باعث کاهش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه گردیده است. نتیجه‌ای که در تحقیقات گوناگون به اثبات رسیده است [۱۹]. این ضعف، به خاطر عدم حصول چسبندگی مناسب بین خمیر و ذرات PET می‌باشد. ذرات PET، موجب کاهش چسبندگی خمیر سیمان به سنگ‌دانه‌های طبیعی می‌شوند [۳]. مطابق شکل ۹، استفاده از الیاف در مخلوط، تاثیرات مثبتی بر مقاومت فشاری داشته است. البته این میزان کم بوده به طوری که با افزایش مقدار الیاف از صفر به ۰/۴٪ مقاومت فشاری در حدود ۱۴٪ افزایش یافته است [۲۰].

با بررسی کانتور شکل ۹ مشاهده می‌گردد که در ۰/۲٪ درصد الیاف به ازای مقدار PET متغیر بیشترین تاثیر بر روی افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. همچنین مشاهده می‌گردد افزایش درصد جایگزینی PET مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. با بررسی کانتور شکل ۹ الف مشاهده می‌گردد که الیاف بر روی مقاومت فشاری ۷ روزه تاثیر چندانی از خود نشان نمی‌دهد ولی برای مقاومت ۲۸ روزه این افزایش کاملا محسوس بوده که برای ۰/۲٪ الیاف این افزایش بیشتر از سایر مقادیر الیاف است. افزایش مقاومت فشاری تحت تاثیر الیاف را می‌توان بدین صورت توجیه نمود که وجود الیاف باعث به تاخیر افتادن رشد ریز ترک‌ها در بتن می‌گردد که در نتیجه باعث افزایش مقاومت و کرنش تحت بار حداکثر خواهد شد.



شکل ۱۱- نمودار سه بعدی PET در برابر الیاف برای مقاومت کششی

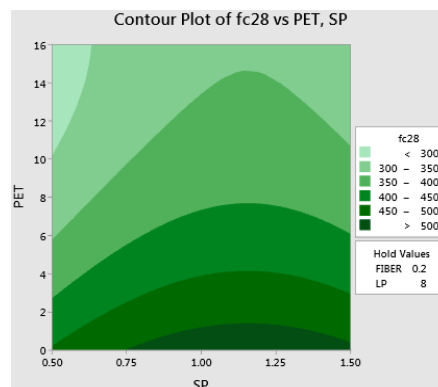
جدول ۹- نتایج جدول تحلیل واریانس برای مقاومت کششی

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
مقاومت کششی	1408.05	8	176.01	31.43	< 0.0001
X1	618.85	1	618.85	110.51	< 0.0001
X2	454.75	1	454.75	81.21	< 0.0001
X4	31.72	1	31.72	5.66	0.0269
X1.X3	77.40	1	77.40	13.82	0.0013
X2.X3	39.34	1	39.34	7.03	0.0150
X1.X1	70.05	1	70.05	12.51	0.0020
X3.X3	131.30	1	131.30	23.45	< 0.0001
X4.X4	20.97	1	20.97	3.75	0.0665
Residual	117.60	21	5.60		
R-Squared	93.16%				
Adj R-Squared	90.36%				
Pure Error	41.76	5	8.35		
Cor Total	1525.64	29			

$$TensileStrength(\frac{kg}{cm^2}) = 37.86 - 5.08X1 + 4.35X2 + 1.15X4 + 2.2X1X3 + 1.57X2X3 - 1.58X1X1 - 2.17X3X3 - 0.86X4X4$$

کانتور شکل ۱۲ اندرکنش روان کننده و الیاف فولادی را برای مقاومت کششی نشان می دهند. مشاهده می گردد که در محدوده ۱٪ تا ۳٪ روان کننده، و ۰/۳٪-۰/۲٪ الیاف نمونه های مورد مطالعه مقاومت کششی قابل قبولی را داشته اند. همچنین الیاف و PET تاثیر مثبت قابل قبولی به عنوان جاذب بخشی از انرژی کرنشی در به تعویق انداختن شکست نهایی در کلیه نمونه ها داشته اند. نحوه شکست بتن های حاوی الیاف بصورت، شکستی نرم و تدریجی بوده و با افزایش درصد الیاف، از تردی شکست کاسته می شود.

مطابق نتایج مدلسازی انجام شده افزایش سهم روان کننده به طور ویژه در نمونه های دارای درصدهای بیشتری از PET، منجر به رشد مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز شده است. این رفتار می تواند ناشی از وجود فضاهای خالی بیشتر در نمونه های دارای سهم کم از روان کننده باشد. شکل ۱۰ اندرکنش روان کننده و PET را برای مقاومت ۲۸ روزه، نشان می دهد. با بررسی آن این نتیجه حاصل می گردد که در محدوده ۱٪ تا ۲۵/۱٪ روان کننده نمونه های مورد مطالعه مقاومت فشاری قابل قبولی را داشته اند.



شکل ۱۰- کانتور اندرکنش روان کننده و PET برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه

۵-۴- مقاومت کششی

جهت تعیین مقاومت کششی نمونه های مورد بررسی، برای هر طرح ۳ قالب ۱۵×۳۰ سانتی متر و مجموعاً ۹۰ نمونه در نظر گرفته شد و تحلیل های آماری بر مبنای میانگین این ۳ مقدار صورت گرفت. نتایج تحلیل واریانس آزمایش مقاومت کششی در جدول ۹ ارائه شده است. بررسی جدول ANOVA نتایج آزمایش مقاومت کششی نشان می دهد که متغیرهای ورودی PET و الیاف تاثیرگذارترین پارامترهای مورد مطالعه هستند. پارامتر R² و R² تعدیل یافته برای مدل ارائه شده به منظور پیش بینی مقاومت کششی ۲۸ روزه به ترتیب ۹۳/۱۶٪ و ۹۰/۳۶٪ حاصل شده که نشان دهنده دقت بالایی مدل ارائه شده است.

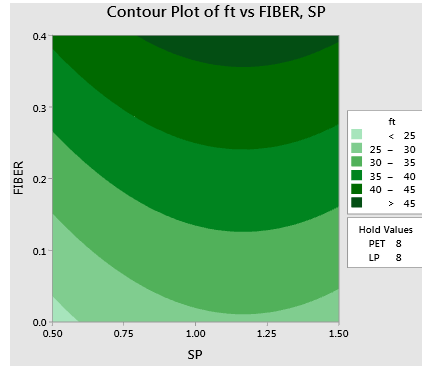
شکل ۱۱ حاکی از آن است که با افزایش درصد الیاف، مقاومت کششی مخلوط های مورد مطالعه افزایش می یابد. به عنوان مثال با بررسی طرح های ۱۷ و ۱۹ ملاحظه می گردد با افزایش درصد الیاف از ۰/۱٪ به ۰/۴٪ مقاومت کششی از ۲۰/۵۹ به ۴۶/۵ مگاپاسکال افزایش یافته است. این افزایش به دلیل محدود شدن گسترش ترک ها توسط الیاف بوده و همچنین الیاف موجب انتقال نیرو در دو طرف ترک ها می گردد، که نتیجتاً موجب افزایش مقاومت کششی شده است.

۷- نتیجه گیری

۱- بعد از انجام تحلیل واریانس برای آزمایش‌های جریان اسلامپ ملاحظه گردید بیشترین تاثیر بر روی جریان اسلامپ مربوط به PET بوده، به طوری که با افزایش درصد جایگزینی PET، مقدار جریان اسلامپ کاهش می یابد. وزن مخصوص کم PET نسبت به ماسه و همچنین شکل ظاهری PET موجب کاهش جریان اسلامپ گردیده است. همچنین در درصدهای بالا جایگزینی PET نشانه‌هایی از جداسازی در طرح‌ها دیده می‌شود در حالی که تا حدود ۱۰٪ جایگزینی PET پاسخ‌های حاصله معیارهای EFNARC را برآورده می‌نماید. از سویی دیگر الیاف افزوده شده بر روی میزان پاسخ این آزمایش به صورت جزئی موجب کاهش پاسخ گشته است. درحالی‌که روان کننده و تا حدودی پودر سنگ تاثیر مثبتی بر میزان پخش شدگی بتن داشته و به ازای روان کننده بیش از ۱/۰۵٪ نمونه‌های مورد مطالعه دارای جریان اسلامپ بیش از ۶۰۰ میلی‌متر را از خود نشان می‌دهند.

۲- تاثیر افزایش درصد الیاف موجب افزایش تاثیر منفی در خواص بتن تازه می‌گردد، که بیشترین تاثیر کاهش در مقادیر جعبه L بوده، به صورتی با افزایش مقدار الیاف تا ۴٪ مقدار جعبه L (H2/H1) تا ۵۵٪ درصد کاهش می یابد. همچنین پارامتر PET موجب کاهش پاسخ و روان کننده و تا حدی پودر سنگ موجب افزایش پاسخ گردیده‌اند. نتایج نشان داد الیاف جایگزینی تا حدود ۲٪ مقادیر EFNARC برای آزمایش جعبه L را برآورده می‌سازد. همچنین برای برآورده نمودن معیارهای این آزمایش به روان کننده بیش از ۱٪ نیاز است.

۳- نتایج مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نسبت به درصد جایگزینی متغیرهای ورودی به ترتیب ۲۱۸ تا ۴۱۲ و ۲۹۹ تا ۵۶۱ kg/cm² است. با افزایش درصد جایگزینی PET در طرح‌های مورد بررسی، مقاومت فشاری آن کاهش می‌یابد. این کاهش می‌تواند به علت چسبندگی کم ذرات PET و خمیر سیمان و مقاومت کم PET نسبت به ماسه اشاره باشد. همچنین در این مطالعه مقدار آب مخلوط‌ها ثابت در نظر گرفته شده و با توجه به افزایش درصد جایگزینی PET در طرح‌های مورد بررسی و به علت عدم جذب آب PET موجب مقداری آب مزاد در مخلوط‌ها نگه‌داشته می‌شود که در مرور زمان و با تبخیر آن فضای خالی ایجاد شده و مقاومت بتن کاهش می‌یابد. از سویی دیگر الیاف تاثیر کمی بر روی مقاومت فشاری از خود نشان می‌دهد. در بررسی تاثیر الیاف بر روی مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه مشاهده می‌گردد که با گذشت زمان تاثیر الیاف بر مقاومت فشاری بیشتر شده بطوری که در نمونه‌های ۲۸ روزه الیاف تاثیر بیشتری بر افزایش مقاومت نسبت به نمونه ۷ روزه داشته است. با بررسی نتایج آنالیز واریانس به منظور دستیابی به مقاومت مطلوب بتن‌های خودتراکم حاوی PET و الیاف مقادیر ۱۰-۸٪ PET، ۲٪ الیاف و ۱-۱/۲۵٪ روان کننده پیشنهاد می‌گردد.



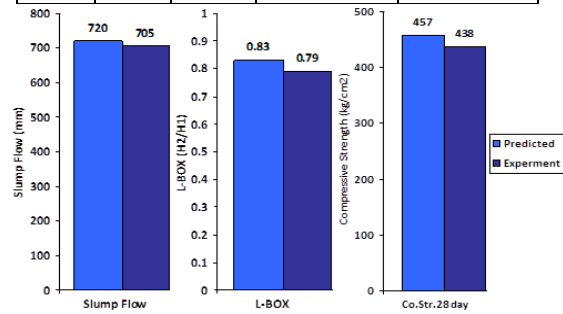
شکل ۱۲- کانتور اندرکنش روان کننده و الیاف برای مقاومت کششی

۶- بهینه سازی

یکی از مؤثرترین کاربردهای مدل‌های آماری ساخته شده، تعیین رابطه بین متغیرهای مستقل و پاسخ است که در بندهای پیشین معرفی گردید. هدف از چنین بهینه‌سازی‌ها یافتن شرایط بهینه با در نظر گرفتن معیارهای رئولوژیکی بتن برای تمامی پاسخ‌ها است. در عین حال باید مقادیر پیشنهادی برای ترکیب فاکتورهای مورد بررسی به نحوی باشد که بهترین پاسخ‌ها را داده و همچنین معیارهای آیین‌نامه‌ای را نیز پوشش دهد. بدین منظور با استفاده از توابع بدست آمده از نتایج آزمایشات یک بهینه‌سازی عددی به منظور ماکزیمم سازی مقاومت فشاری ۲۸ روزه صورت پذیرفت. بهینه‌سازی‌های لازم با استفاده از نرم افزار آماری Design Expert 12 انجام گرفته است.

جدول ۱۰- مقادیر پیشنهادی روش RSM برای بهینه‌سازی مقاومت فشاری

Item	PET	الیاف	پودر سنگ	روان کننده
1	4	0.23	6.747	1.132



شکل ۱۳- مقادیر پیش‌بینی RSM و نتایج آزمایشگاهی

- 10- Elemam W, Abdelraheem A, Mahdy M, Tahwia A. optimizing fresh properties and compressive strength of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*. 2020; 249: 118781.
- 11- Aldahdooh M, Jamrah A, Alnuaimi A, Martini M, Ahmed M. Influence of Various Plastics-Waste Aggregates on Properties of Normal Concrete, *Journal of Building Engineering*. 2018; 17: 13-22.
- 12- Rezaifar O, Hasanzadeh M, Gholhaki M. Concrete made with hybrid blends of crumb rubber and metakaolin: Optimization using Response Surface Method. *Construction and Building Materials*. 2016; 123: 59–68.
- 13- Khashaa Mohammed M, Ismail A, Mohammed M. Production and optimization of eco-efficient self-compacting concrete SCC with limestone and PET. *Construction and Building Materials*. 2019; 197: 734–746.
- 14- Sultana N, Zakir Hossein S, Shah Alam M, Hashish M, Islam M. An experimental investigation and modeling approach of response surface methodology coupled with crow search algorithm for optimizing the properties of jute fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2020; 243: 118216.
- 15- Soares R, Mohamed A, Venturini W, Lemaire M. Reliability analysis of non-linear reinforced concrete frames using the response surface method. *Reliability Engineering & System Safety*. 2002; 75(1): 1-16.
- 16- Montgomery D. Design and analysis of experiments. Eighth edition. John Wiley & Sons. 2008.
- 17- Cho T. Prediction of cyclic freeze–thaw damage in concrete structures based on response surface method. *Construction and Building Materials*. 2007; 21(12): 2031-2040.
- 18- Noroozi R, Shafabakhsh G, Kheyroddin A, Mohammadzade Moghadam A. Investigating the effects of recycled PET particles, shredded recycled steel fibers and Metakaolin powder on the properties of RCCP. *Construction and Building Materials*. 2019; 224: 173–187.
- 19- Sadrmomtazi A, Dolati-Milehsara S, Lotfi-Omran O, Sadeghi-Nik A. The combined effects of waste PET particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2016; Volume 112 Part 4: 2363-2373
- 20- AbdelAleem B, Ismail M, Hassan A. The combined effect of crumb rubber and synthetic fibers on impact resistance of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*. 2018; 162: 816–829

۴- استفاده از الیاف در طرح های مورد بررسی بر خلاف مقاومت فشاری، مقاومت کششی را افزایش می دهد. که بیشترین افزایش در مقاومت کششی از جایگزینی $\frac{0.4}{4}$ الیاف به دست آمده است. ولی در این حالت معیارهای روانی EFNARC برآورده نمی شود. افزایش درصد الیاف تاثیر بسزایی در بهبود مقاومت کششی از خود نشان می دهد به طوری که با افزایش درصد الیاف از صفر به $\frac{0.1}{1}$ ، $\frac{0.2}{2}$ و $\frac{0.3}{3}$ مقاومت کششی به طور میانگین ۶، ۲۹ و $\frac{46}{46}$ افزایش از خود نشان می دهند.

۵- نتایج نشان می دهد که روش RSM می تواند به صورت مطلوبی برای پیش بینی و ماکزیم سازی پاسخ های مورد بررسی استفاده گردد.

۸- منابع

- 1- Klockner C. A comprehensive model of the psychology of environmental behavior—A meta-analysis. *Global Environmental Change*. 2013; 23: 1028-1038
- 2- Hadithi A, Hilal N. The possibility of enhancing some properties of self-compacting concrete by adding waste plastic fibers. *Journal of Building Engineering*. 2016; 8: 20-28.
- 3- Rahmani E, Dehestani M, Beygi M, Allahyari H, Nikbin IM. On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*. 2013; 47: 1302–1308
- 4- Ghernouti Y, Rabehi B, Bouziani T, Ghezraoui H, Makhoulfi A. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC). *Construction and Building Materials*. 2015; 82: 89–100
- 5- Yang S, Yue X, Liu X, Tong Y. Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles. *Construction and Building Materials*. 2015; 84: 444–453.
- 6- Gholhaki M, Kheyroddin A, Hajforoush M, Kazemi M. An investigation on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete incorporating magnetic water with various pozzolanic materials. *Construction and Building Materials*. 2018; 158: 173–180.
- 7- Mastali M, Dalvand A. Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete Reinforced with Hybrid Recycled Steel–Polypropylene Fiber. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017; 29.
- 8- Hama S, Hilal N. Fresh properties of self-compacting concrete with plastic waste as partial replacement of sand. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2017; 6: 299–308.
- 9- Aziminezhad M, Mahdikhani M, Memarpour M. RSM-based modeling and optimization of self-consolidating mortar to predict acceptable ranges of rheological properties. *Construction and Building Materials*. 2018; 189: 1200–1213.

Experimental and numerical evaluation of rheological and mechanical properties of self-compacting concretes containing steel fibers and PET using response surface method (RSM)

Hamed Basser

Ph.D. candidate in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Taleb Moradi Shaghaghi

Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Hasan Afshin

Associate Professor of Structural Engineering, Sahand University of Technology

Reza Saleh Ahari

Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Seyed Saeed Mirrezaei

Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Abstract

In the modern characteristics of concrete design based on daily needs, the use of recycled materials is an important and basic principle. Therefore, in the present study, PET (Polyethylene Terephthalate) has been substituted for fine aggregates in self-compacting concrete. The aim of this study is to produce and optimize the mechanical and rheological properties of environmentally friendly self-compacting concretes. Input variables in the mixtures include (PET) as a substitute for a percentage of fine aggregates, steel fibers, powder stone as a substitute for a percentage of cement weight, and lubricant as a percentage of powder material weight. The studied responses are slump flow, L-box ratio (H_2 / H_1), compressive and tensile strengths. Mixing schemes were designed and studied using the Central Composite Design (CCD) method, which is one of the RSM (Response Surface Methodology) methods. The results demonstrated that with increasing PET, the rheological and mechanical properties of the mixtures decreased while the fibers effectively improved the reduction of strengths. Applying mathematical models provided by ANOVA, multi-objective optimizations were performed to maximize compressive strength by the RSM method and an optimal mixing scheme based on experimental results was proposed.

Keywords: self-compacting concrete, PET, steel fibers, RSM, Rheological and mechanical properties.