

بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر PET و الیاف فولادی بر روی مقاومت خمشی و منحنی تنش-کرنش فشاری بتن‌های خودتراکم

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.

چکیده

هدف از پژوهش حاضر بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر هم‌زمان PET و الیاف فولادی بر روی خصوصیات رئولوژیکی بتن خودتراکم، مقاومت خمشی و منحنی تنش-کرنش فشاری بتن خودتراکم می‌باشد. بدین منظور ۳۰ طرح اختلاط به روش سطح پاسخ (RSM) با ترکیب درصد‌های مختلف متغیرهای PET، الیاف فولادی، بودرسنگ و فوق روان‌کننده طراحی گردید. نتایج نشان داد با افزایش درصد PET و درصد الیاف ویسکوزیته بتن کاهش یافته است. همچنین بیشترین مقاومت خمشی از ترکیب 0.4% الیاف، 8% PET و 1% فوق روان‌کننده حاصل گردیده است. منحنی‌های تنش - کرنش رسم شده برای طرح‌های مورد بررسی نشان دادند الیاف فولادی در قسمت صعودی منحنی تنش - کرنش تأثیر چندانی نداشته و موجب بهبود پایداری در قسمت نزولی منحنی تنش - کرنش شده است. همچنین ذرات PET موجب کاهش شیب قسمت صعودی منحنی تنش - کرنش شده است. به طور کلی الیاف فولادی و PET، موجب شکست نرم نمونه‌ها شده به صورتی که PET موجب افزایش کرنش نظیر حداکثر مقاومت فشاری (ϵ_0) شده و الیاف فولادی موجب افزایش کرنش گسیختگی بتن (ϵ_{cu}) شده است.

واژه‌های کلیدی: PET، الیاف فولادی، RSM، مقاومت خمشی، منحنی تنش-کرنش فشاری.

* نویسنده مسئول: hafshin@sut.ac.ir

۱- مقدمه

به‌عنوان مثال، [۱۱] مشخصات رئولوژیکی بتن‌های خودتراکم حاوی ضایعات پلاستیک را مورد بررسی قرار دادند. محققان ضایعات پلاستیک را در سه حالت ریز، درشت و ترکیب آنها جایگزین قسمتی از ریزدانه کردند. برای بررسی مشخصات رئولوژیکی و مکانیکی بتن ساخته شده، آزمایشات جریان اسلامپ، T50، قیف V، جعبه L و مقاومت فشاری انجام گرفته است. نتایج حاکی از آن است که، ضایعات پلاستیک به نحو مطلوبی می‌تواند جایگزین قسمتی از ریزدانه‌ها گردد. همچنین [۱۲] مشخصات رئولوژیکی و مقاومت فشاری بتن‌های خودتراکم را با استفاده از روش معکب مرکزی (CCD) مورد بررسی قرار دادند. فاکتورهای مورد بررسی مواد پودری، خاکستر بادی، میکروسلیس، پودرسنگ، نسبت آب به مواد پودری و فوق روان کننده انتخاب شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار خاکستر بادی مشخصات روانی بتن خودتراکم افزایش و مقاومت فشاری آن کاهش یافته است. همچنین با افزایش درصد میکروسلیس جریان اسلامپ و جعبه L کاهش یافته در حالی که مقاومت فشاری ۲۸ روزه و مقاومت در برابر جداسازی افزایش یافته است. در بررسی دیگر تأثیر شکل هندسی ضایعات پلاستیک بر روی کارایی و مقاومت فشاری بتن معمولی با استفاده از روش RSM مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۳].

Khasshaa Mohammed و همکاران [۱۴] بتن‌های خودتراکم حاوی PET و پودرسنگ آهک را بررسی کرده‌اند. به منظور بررسی آماری تأثیر هر یک از فاکتورها بر روی پاسخ آزمایش‌ها از روش RSM استفاده شده است. PET، پودر سنگ آهک و روان‌کننده به‌عنوان فاکتورهای مورد بررسی انتخاب شده‌اند. آزمایش‌های جریان اسلامپ، T50، مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه انجام گرفته و با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) میزان تأثیر هر یک از فاکتورهای مورد بررسی بر روی پاسخ هر آزمایش ارائه گردیده است. بعد از بهینه‌سازی‌های لازم مقادیر بهینه فاکتورهای ورودی پودرسنگ آهک، PET و روان‌کننده به ترتیب $20/1\%$ ، $2/4\%$ و $1/16\%$ درصد وزنی انتخاب شدند. محققان دیگر [۱۵] با استفاده از روش RSM تأثیر ضایعات لاستیک و متاکائولین را بر روی بتن مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها ضایعات لاستیک را جایگزین قسمتی از ریزدانه‌ها نمودند. بعد از

بشر به دلیل عملکردهای خود در سالیان اخیر با چالش‌های زیست محیطی مهمی نظیر تغییرات آب‌وهوا و کاهش منابع روبه‌رو بوده است [۱]. وجود مواد زاید حاصل از فرایندهای مختلف موجب بروز مشکلات متعددی شده است، که پلاستیک یکی از آنهاست. یکی از مشهورترین نوع پلاستیک‌ها پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) است [۲]. 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 می‌تواند قابلیت جایگزینی سنگ‌دانه‌ها با مواد دیگر به‌طور مثال با پلاستیک بررسی گردد [۳ و ۴]. بتن خودتراکم، یک بتن با روانی بسیار بالا است که تحت اثر وزن خود جریان می‌یابد و می‌توان از آن به راحتی در مقاطع پر خاموت و با تراکم میلگرد بالا از آن استفاده نمود [۵ و ۶]. همچنین این بتن باید دارای شکل‌پذیری و پایداری بالایی بوده تا ظرفیت پر کردن قالب‌های با اشکال پیچیده، مقاطع عمیق و باریک را داشته باشد. [۷] استفاده از پلاستیک‌ها در بتن موجب بهبود برخی از ویژگی‌های بتن از جمله شکل‌پذیری آن می‌گردد [۸]. مقاومت فشاری بالا، ترد شکنندگی، کمبود مقاومت کششی و خمشی از محاسن و معایب اصلی بتن می‌باشند، که با استفاده از الیاف‌های فولادی می‌توان برخی از معایب بتن را بهبود بخشید [۹ و ۱۰].

استفاده از PET و الیاف‌های فولادی در بتن‌های خودتراکم مشخصات رئولوژیکی آن را تحت تأثیر قرار داده و می‌تواند با استفاده از روش‌های آماری و آزمایش‌های مورد نیاز یک طرح اختلاط بهینه برای این نوع بتن‌ها ارائه داد. در این تحقیق به منظور انجام تحلیل‌های عددی و بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای مورد بررسی بر روی نتایج آزمایشات از روش سطح پاسخ (RSM) استفاده شده است. RSM مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی و آماری است که در بهینه‌سازی بسیاری از فرایندهای مختلف به کار می‌رود. مزیت اصلی این روش، کاهش تعداد آزمایش‌های لازم جهت ارزیابی پارامترهای متعدد و برهم‌کنش بین آنها می‌باشد. پژوهش‌های زیادی در خصوص تولید بتن‌های دوست‌دار محیط زیست صورت پذیرفته که این امر اهمیت بالای این نوع بتن‌ها و تأثیر آنها در مدیریت مواد زائد و توسعه پایدار را نشان می‌دهد.

L از مشخصات رئولوژیکی بتن و مقاومت فشاری ۲۸ روزه، مقاومت خمشی و منحنی تنش- کرنش فشاری از مشخصات مکانیکی بتن نقش پاسخ را در روش طراحی آزمایش برعهده دارد. همچنین ذرات PET، الیاف فولادی، پودرسنگ و فوق روان-کننده 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:

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

در معادله یاد شده، y پاسخ پیش‌بینی شده، x_i و x_j مقادیر کدی متغیرها، β ضریب خطی، β_{ii} ضریب خطی درجه دوم، β ضریب رگرسیون، k تعداد فاکتورها و ε خطای تصادفی می‌باشد [۲۳ و ۱۳]. در این مقاله، برای طراحی آزمایش، مدل‌سازی ریاضی، تحلیل آماری و بهینه‌سازی متغیرها از نرم‌افزارهای Minitab 19 و Design Expert 12 استفاده شده است. به منظور بررسی اندرکش بین متغیرها و تأثیر هر پارامتر بر روی پاسخ از تحلیل واریانس (ANOVA) استفاده گردید.

۲-۲- مصالح و آزمایشات

در مطالعه حاضر از سیمان تپ ۲ طبق استاندارد ASTM C150 [۲۴] با وزن مخصوص 3 T/m^3 استفاده شده است که ترکیبات شیمیایی آن در جدول ۱ آورده شده است. شکل ۱ توزیع اندازه سنگ‌دانه‌ها را نشان می‌دهد. حداکثر اندازه سنگ‌دانه‌های درشت مورد استفاده ۱۲/۵ میلیمتر است. ریزدانه‌های مورد استفاده در این تحقیق از نوع رودخانه‌ای بوده و وزن مخصوص درشت‌دانه و ریزدانه به ترتیب ۲/۶۸ و ۲/۶۵ و همچنین چگالی انبوهی آنها به ترتیب ۱/۳۹ و ۱/۴۹ واحد می‌باشد. درصد جذب آب درشت‌دانه و ریزدانه به ترتیب ۱/۱٪ و ۲/۷٪ می‌باشد. برای ایجاد کارایی‌های لازم از پودرسنگ با عبوری از الک ۱۰۰ به‌عنوان پرکننده در درصد‌های مختلف جایگزین وزن سیمان شده است. PET مورد بررسی در درصد‌های مختلف به‌صورت وزنی جایگزین ریزدانه‌ها شده که در جدول ۲ مشخصات فیزیکی PET های مورد استفاده را آورده شده است. فوق روان‌کننده پلی‌کربکسیلات طبق ASTM C494 نوع F [۲۵] با وزن مخصوص 3 gr/cm^3 ۱/۰۸

تحلیل‌های مربوطه مشاهده شد که با افزایش درصد جایگزینی لاستیک‌ها مقاومت فشاری بتن کاهش یافته است، که می‌توان این افت مقاومت را با استفاده از متاکائولین نسبتاً کاهش داد. مقالات متعددی در خصوص استفاده از روش RSM برای بررسی آماری میزان تأثیر هر یک از پارامترهای مورد بررسی در بتن منتشر شده است. این به منظور دستیابی به مقدار مطلوب فاکتورهای مورد مطالعه و ارائه یک طرح اختلاط بهینه بر مبنای پارامترهای مورد بررسی است [۱۶-۲۱].

براساس یافته‌های تحقیقات متعدد که به بخشی از آن اشاره گردید، غالباً رفتار نمونه‌های بتنی متأثر از یک یا دو متغیر و اغلب در قالب مطالعات آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. لذا، تأثیر استفاده هم‌زمان ذرات PET، الیاف فولادی، پودرسنگ و فوق-روان‌کننده بر خصوصیات رئولوژیکی و مکانیکی بتن خودتراکم با استفاده از روش RSM مدل‌سازی و بهینه‌سازی مطالعه نشده است. هدف اصلی تحقیق حاضر، تهیه بتن خودتراکم همسو با محیط زیست بوده که بدین منظور از ذرات PET به‌عنوان جایگزین قسمتی از ریزدانه استفاده شده است. برای جبران کاهش مشخصه-های مکانیکی بتن ساخته شده از الیاف فولادی استفاده گردید. همچنین با استفاده از مدل‌های رگرسیونی، آنالیز واریانس و جداول ANOVA میزان تأثیر هر یک از پارامترهای مورد بررسی بر روی پاسخ آزمایش تعیین گردید.

۲- روش‌های آزمایش

۲-۱- روش سطح پاسخ (RSM)

Box و Wilson در سال ۱۹۵۱ RSM را برای بهینه‌سازی تعداد و پاسخ آزمایش‌ها ارائه دادند که از این روش امروزه در طراحی آزمایش‌های یک فرایند استفاده می‌شود. در این روش ابتدا باید فاکتورهای تأثیرگذار بر روی پاسخ آزمایش تعیین گردد. سپس به منظور مدل‌سازی و تحلیل مسائل از ریاضیات و تکنیک‌های آماری استفاده می‌شود [۲۲]. بعد از انجام آزمایشات و تحلیل‌های لازم یک رابطه ریاضی بین فاکتورهای مورد بررسی و پاسخ آزمایش ارائه می‌گردد [۲۳]. RSM انواع مختلفی دارد که متداول‌ترین نوع آن برای یافتن رابطه بین پاسخ و فاکتورها، روش Central Composite Design (CCD) است، که در این مقاله از این روش استفاده شده است [۱۳]. در پژوهش حاضر، نتایج آزمایش‌های کیف V و جعبه

جدول ۲ - مشخصات فیزیکی PET

Physical property of PET	Results
Specific gravity	1.2
Water absorption (24h)	0
Shape of particle	Cylindrical
Bulk density	775kg/m ³
Thickness	3mm
Colour	Black



شکل ۲ - الف) الیاف مورد استفاده ب) PET

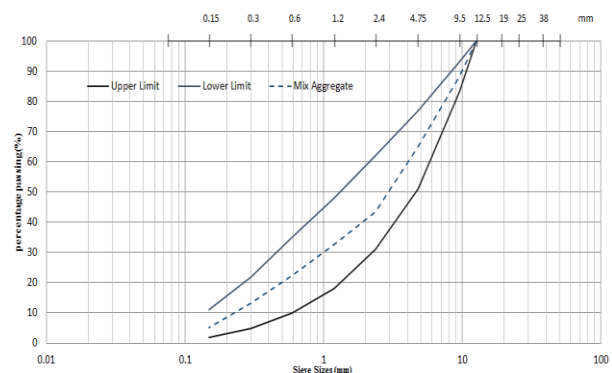
۲-۳- طرح اختلاط

در این تحقیق چهار فاکتور PET، الیاف فولادی، پودر سنگ و فوق روان کننده به عنوان متغیرهای مستقل در پنج سطح متفاوت مطابق جدول ۳ تغییر می کنند. آزمایشات قیف V و جعبه L به منظور بررسی خصوصیات رئولوژیکی بتن خودتراکم و مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و منحنی تنش- کرنش فشاری به عنوان مشخصات مکانیکی بتن خودتراکم مورد بررسی قرار گرفته است. طرح های اختلاط مورد بررسی در جدول ۴ و شکل ۳ آورده شده است.

برای دستیابی به کارایی مطلوب در همه مخلوط ها استفاده شده است. الیاف فولادی مورد استفاده دارای طول ۳۵ میلیمتر و قطر ۰/۶ میلی متر بوده و دو انتهای آن به صورت قلاب است. الیاف فولادی و PET مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۲ آورده شده است.

جدول ۱ - مشخصات شیمیایی سیمان و پودر سنگ

Items	Cement (%)	Stone powder (%)
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



شکل ۱ - نمودار دانه بندی سنگ دانه ها

جدول ۳ - فاکتورهای مورد بررسی

Variable %	symbol	Coded	Levels				
			-2	-1	0	1	2
PET	X1		0	4	8	12	16
Fiber	X2		0	0.1	0.2	0.3	0.4
Stone powder	X3		0	4	8	12	16
Superplasticizer	X4		0.5	0.75	1	1.25	1.5

فوق روان کننده، PET، پودر سنگ و الیاف فولادی نسبت به سطوح ارائه شده توسط روش CCD تغییر کرده است. چون نسبت آب به سیمان یکی از مهم ترین پارامترهای طرح اختلاط بتن می باشد، به همین دلیل این پارامتر را در تمامی طرح ها ثابت فرض کرده تا بتوان تأثیر PET و الیاف فولادی را بر روی تمامی طرح ها مشاهده نمود. روش CCD یک طرح آزمایش فاکتوریل کامل بوده و یک روش کارآمد برای بررسی مدل های مرتبه دوم می باشد [۲۳]. تعداد آزمایشات از رابطه (۲) تعیین می گردد:

در این تحقیق PET در محدوده ۰-۱۶٪ به صورت وزنی جایگزین ریزدانه ها، الیاف فولادی در محدوده ۰-۰/۴٪ جایگزین حجم بتن، پودر سنگ در محدوده ۰-۱۶٪ به صورت وزنی جایگزین سیمان و فوق روان کننده نیز در محدوده ۰/۵-۱/۵٪ وزن کل مواد پودری براساس آزمایشات اولیه و پیشینه تحقیق انتخاب گردیده اند. براساس پیشینه تحقیق، انتظار می رود که محدوده مقادیر انتخاب شده، نتایج کاملی را در برگرفته و تأثیر PET و الیاف را مشخص خواهد نمود. در همه مخلوط ها مقادیر سیمان و آب به صورت ثابت بوده و مقادیر

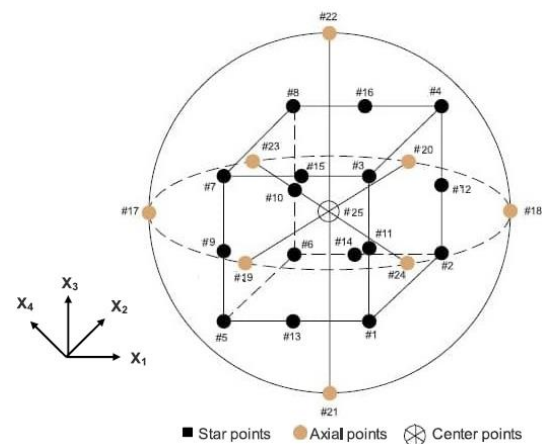
جدول ۴- طرح اختلاط‌های مورد بررسی (Kg/m^3)

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

دقت مدل ارائه شده و کاهش خطاهای احتمالی است. شکل ۴ به صورت شماتیک مراحل اصلی تحقیق را نشان می‌دهد.

۲-۴- آزمایشات بتن تازه و سخت شده

به منظور بررسی قابلیت جریان بتن تازه و بررسی پدیده انسداد ناشی از حضور الیافها آزمایش جعبه L بر روی مخلوطها انجام گردید. در بتن‌های خودتراکم علاوه بر سیالیت، قابلیت عبوردهی از موانع از اهمیت بالایی برخوردار است. در این آزمایش مخلوط بتن تازه در قسمت عمودی L-BOX ریخته شده و با بالا رفتن در ریچه لغزنده، بتن از قسمت عمودی به سمت سطح افقی جریان می‌یابد و بعد از توقف بتن مقادیر H1 و H2 اندازه گیری و مقدار H2/H1 تعیین گردیده است [۲۶]. سپس آزمایش قیف V بر روی طرح‌های مورد بررسی انجام گردید. برای تعیین مقاومت



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

$$n = 2^k + 2k + N_c \rightarrow 2^4 + (2 \times 4) + 6 = 30 \quad (۲)$$

در رابطه فوق، n تعداد طرح‌ها؛ پارامتر k تعداد متغیرهای مستقل و N_c تعداد نقاط مرکزی که تکرار این آزمایشات به منظور بهبود

فشاری مخلوطها از نمونه‌های $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر استفاده شده و میانگین مقاومت فشاری سه نمونه در ۲۸ روز گزارش شده است [۲۷]. همچنین مقاومت خمشی نمونه‌ها طبق C293/C293M ASTM [۲۸] تعیین شده و مدول گسیختگی از رابطه ۳ حاصل گردیده است.

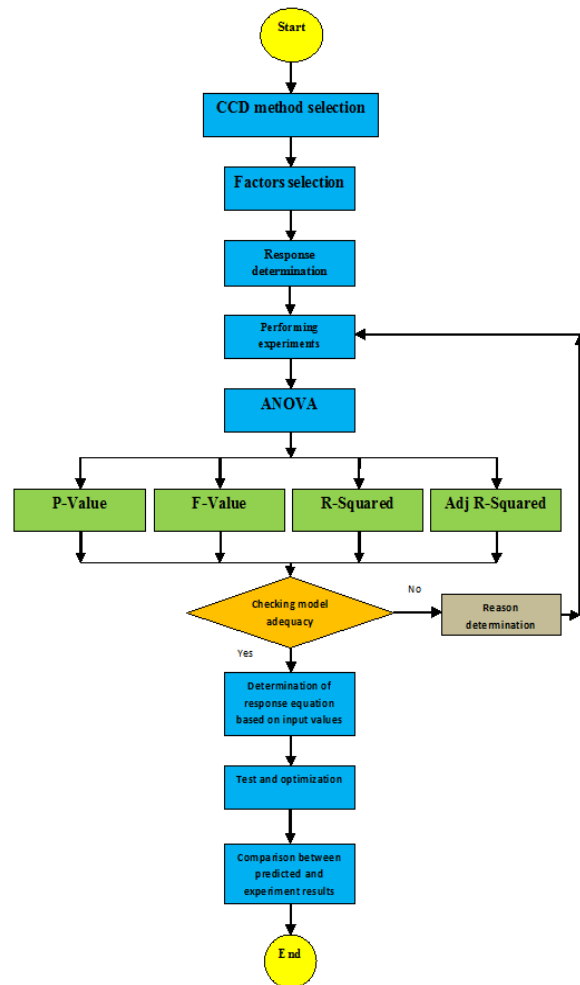
$$R = \frac{3P}{2bd^2} \text{ Mpa} \quad (3)$$

۳- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج آزمایشات قیف V، جعبه L، مقاومت فشاری ۲۸ روزه، مقاومت خمشی در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵ - نتایج آزمایشات

شماره طرح	جعبه L	قیف V (s)	مقاومت فشاری (kg/cm^2)	مقاومت خمشی (kg/cm^2)
1	0.91	4.77	380	33.21
2	0.8	6.39	396	42.97
3	0.5	9.21	303	47.77
4	0.5	3.75	331	35.69
5	0.55	5.08	416	55.27
6	0.92	4.81	343	33.34
7	0.75	6.4	391	36.92
8	0.8	5.44	301	31.33
9	0.84	6.34	391	45.35
10	0.81	7.47	342	27.06
11	0.86	4.73	363	37.41
12	0.94	5.89	400	38.17
13	0.6	10.37	320	50.16
14	0.5	13.35	333	24.89
15	0.8	6.33	380	48.33
16	0.7	8.77	299	27.54
17	0.77	9.78	336	23.32
18	0.82	6.21	374	50.47
19	0.4	9.19	392	63.62
20	0.47	6.18	436	53.39
21	0.92	5.83	417	45.77
22	0.8	6.44	561	46.98
23	0.84	6.58	399	41.88
24	0.61	8.31	310	34.09
25	0.6	9.52	333	37.16
26	0.8	6.11	416	44.96
27	0.7	7.2	331	25.96
28	0.65	6.6	431	56.31
29	0.85	6.4	388	42.96
30	0.8	4.85	367	52.06



شکل ۴ - مراحل تحقیق

برای رسم نمودار تنش-کرنش فشاری مخلوطها از نمونه‌های استوانه‌ای 15×30 سانتی‌متر استفاده شده است. در سن ۲۸ روزه آزمایش تنش-کرنش فشاری بر روی آنها انجام شده است. جهت ایجاد سطح صاف و اعمال بار یکنواخت به آزمونه، دو سر آزمونه با ملات گوگرد استفاده شده است [۲۹]. برای اندازه‌گیری تغییرشکل عرضی از یک LVDT با دقت 0.001 میلیمتر و برای اندازه‌گیری تغییرات طول نمونه از LVDT با دقت 0.01 میلیمتر استفاده شده است. انجام آزمایش بدین صورت بوده که به هنگام

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.

۳-۱- آزمایش قیف V

نتیجه این آزمایش به‌عنوان معیاری برای تعیین قابلیت پراکنندگی و لزجت خمیری بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. زمان جریان قیف V، از ۳۰ مخلوط در جدول ۵ ارائه شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود این مقادیر از ۳/۷۵ تا ۱۳/۳۵ ثانیه است. با توجه به داده‌های جدول نتایج تحلیل ANOVA مقدار قیف V توسط یک تابع چند جمله‌ای درجه ۲ تعیین گردیده است. جدول ۶ مقادیر مربوط به فاکتورهای تأثیرگذار و همچنین کلیه اندرکنش‌های تأثیرگذار را نشان می‌دهد. مدل به‌دست آمده از جدول ۶، دارای ضریب R^2 ۹۰/۴۵٪ و R^2 تعدیل یافته ۸۷/۹۶٪ برخوردار است. بر اساس مقادیر F-Value جدول ANOVA، موثرترین متغیرها بر مقدار پاسخ قیف V، متغیرهای PET و الیاف می‌باشد.

با بررسی پاسخ‌های آزمایش‌های رئولوژیکی مشاهده گردید برخی از طرح‌ها، معیارهای مورد قبول بتن خودتراکم را برآورده نمی‌کنند. از طرف دیگر مقادیر مقاومت فشاری ۲۸ روزه حاصله از طرح‌های مورد بررسی نشان می‌دهد امکان تولید بتن‌های خودتراکم سازگار با محیط زیست با جایگزینی مقداری از ریزدانه‌ها با PET امکان‌پذیر می‌باشد. مدلسازی آماری نتایج آزمایش‌ها، همراه با تحلیل ANOVA توسط نرم‌افزارهای Design Expert 12 و Minitab 19 انجام شده است. اطلاعات کلی مدل و نحوه اثرگذاری هر کدام از متغیرهای مستقل بر مقدار پاسخ، در جداول 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، به‌عنوان یک متغیر معنی‌دار بر نتایج آزمایش شناخته شده و نشان می‌دهد مشارکت متغیر پیشنهادی دارای تأثیر قابل توجهی بر پاسخ مورد آزمایش می‌باشد. همچنین، ضریب تعیین R^2 نشان‌دهنده همبستگی

جدول ۶- تحلیل واریانس برای مدل درجه دوم V Funnel

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
V Funnel Model	113.70	14	8.12	11.83	< 0.0001
X1	68.41	1	68.41	99.64	< 0.0001
X2	8.69	1	8.69	12.65	0.0029
X3	0.3651	1	0.3651	0.5317	0.4771
X4	5.70	1	5.70	8.31	0.0114
X1.X2	0.4556	1	0.4556	0.6636	0.4280
X1.X3	0.0240	1	0.0240	0.0350	0.8541
X1.X4	0.0380	1	0.0380	0.0554	0.8171
X2.X3	0.4489	1	0.4489	0.6538	0.4314
X2.X4	0.0144	1	0.0144	0.0210	0.8868
X3.X4	0.0576	1	0.0576	0.0839	0.7761
X1.X1	23.32	1	23.32	33.97	< 0.0001
X2.X2	1.08	1	1.08	1.57	0.2292
X3.X3	0.1409	1	0.1409	0.2052	0.6571
X4.X4	2.31	1	2.31	3.37	0.0863
Residual	10.30	15	0.6866		
R-Squared	90.45%				
Adj R-Squared	87.96%				
Pure Error	0.1335	5	0.0267		
Cor Total	124.00	29			

$$VFunnel (\text{sec}) = 6.25 + 1.69X1 + 0.6X2 + 0.48X4 + 0.93X1X1 + 0.21X2X2 - 0.28X4X4 \quad (4)$$

آزمایش را با افزایش PET و الیاف مشاهده نمود. این پدیده را می‌توان چنین توجیه کرد که، در درصد‌های جایگزینی بالای

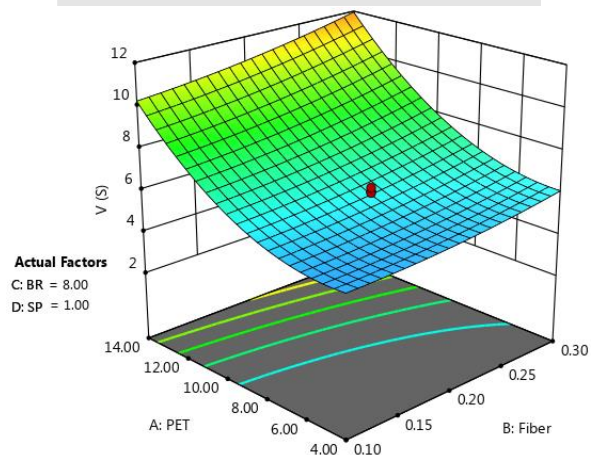
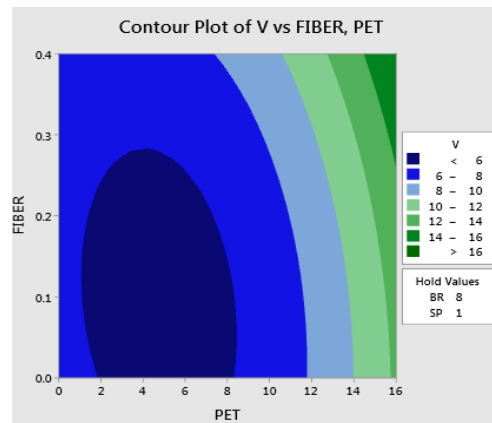
هرچه میزان روانی بتن بیشتر باشد مدت زمان خروج بتن از قیف V کاهش می‌یابد. می‌توان کاهش روانی مخلوط‌ها در این

با بررسی کانتور شکل ۵ می‌توان نتیجه گرفت درصد مطلوب الیاف فولادی و PET برای برآورده نمودن کلاس VS1/VF1 آیین‌نامه EFNARC در مورد آزمایش قیف V به ترتیب ۰/۲۵٪ و ۱۲٪ می‌باشد [۲۶].

۳-۲- آزمایش جعبه L

این آزمایش به منظور بررسی قابلیت جریان بتن تازه و پدیده انسداد ناشی از حضور میلگردها طراحی شده است. مقادیر جعبه L برای طرح اختلاط‌های مطالعه حاضر، در محدوده ۰/۴ تا ۰/۹۴ است. افزایش درصد الیاف فولادی و کاهش میزان فوق روان‌کننده منجر به کاهش قابل توجه مقادیر جعبه L شده است، که با توجه به کاهش کارایی بتن و حضور حجم بالای الیاف فولادی، قابل انتظار بود. در جدول ۷ فاکتورهای تأثیرگذار و همچنین کلیه اندرکنش‌های تأثیرگذار بر مقدار پاسخ این آزمایش آورده شده است. با بررسی نتایج تحلیل ANOVA مشاهده می‌گردد که تأثیرگذارترین پارامتر در پاسخ این آزمایش درصد الیاف فولادی می‌باشد. به طور کلی پارامترهای الیاف فولادی و PET موجب کاهش و پارامتر فوق روان‌کننده موجب افزایش پاسخ گردیده 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 ۸۵/۵۲٪ و ۸۰/۰۱٪ حاصل شده است. کانتور شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش درصد PET و الیاف، مقادیر جعبه L دچار کاهش شده است. به طوری که با افزایش الیاف فولادی به ۰/۴٪ مقادیر جعبه L تا ۵۵٪ کاهش یافته است. این عامل را می‌توان به دلیل انسداد و تداخل الیاف فولادی 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 [۳۰ و ۳۱]. در کانتور شکل ۶ پارامترهای الیاف فولادی و PET را برای مقادیر ۸٪ پودرسنگ و ۱٪ فوق روان‌کننده رسم شده است. این کانتور نشان می‌دهد برای داشتن پاسخی در محدوده بالاتر از ۰/۸ حداکثر می‌توان از ۱۰٪ PET و ۰/۲٪ الیاف فولادی استفاده نمود. همچنین شکل ۶ نشان دهنده تأثیر قابل توجه الیاف فولادی نسبت به PET بر روی پاسخ این آزمایش می‌باشد. با افزایش درصد الیاف فولادی سرعت حرکت بتن در سطح افقی جعبه L کاهش یافته است که دلیل آن را می‌توان به کم شدن توانایی بتن در عبور از شبکه میلگردهای جعبه L نسبت داد.

PET و الیاف فولادی، بتن هنگام خارج شدن از دریچه قیف، دچار مشکل شده و نیاز به زمان بیشتری برای خارج شدن پیدا می‌کند. دلیل این امر می‌تواند به علت وقوع پدیده جداسازی و در نتیجه انسداد جزئی سنگ‌دانه‌ها در محل خروج مخلوط از قیف V باشد. که بر اثر افزایش مقدار آب آزاد بتن و حرکت آن به سمت بالا و نیز صعود ذرات سبک PET و تجمع درشت دانه در نواحی پایین قیف رخ می‌دهد. همچنین کاهش وزن مخصوص بتن ناشی از افزایش درصد جایگزینی PET می‌تواند از دلایل افزایش زمان قیف V باشد. علاوه بر این افزایش درصد جایگزینی PET موجب بالازدگی و جمع شدن آب اختلاط و ملات در لایه فوقانی قیف V شده، که نشانه‌ای از جداسازی ذرات و ته‌نشین شدن مواد جامد است. مطابق آنچه در شکل ۵ ارائه شده است، با افزایش سهم PET و الیاف در مخلوط، زمان قیف V افزایش می‌یابد، البته لازم به ذکر است تأثیر PET بیشتر از تأثیر درصد الیاف می‌باشد. در مخلوط ۱۴ ترکیب PET ۱۶٪ و الیاف فولادی منجر به افزایش زمان قیف V به ۱۳/۳۵ شده است.

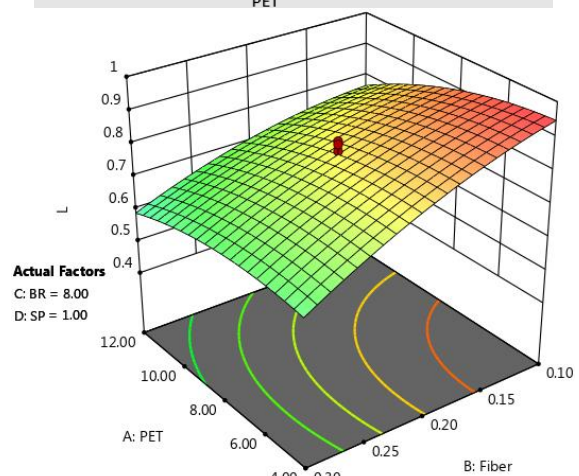
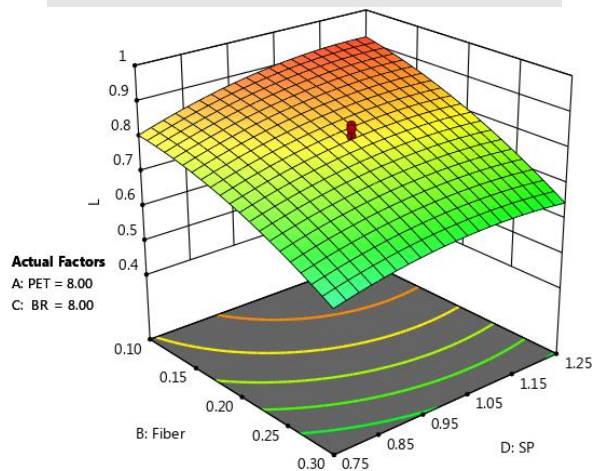
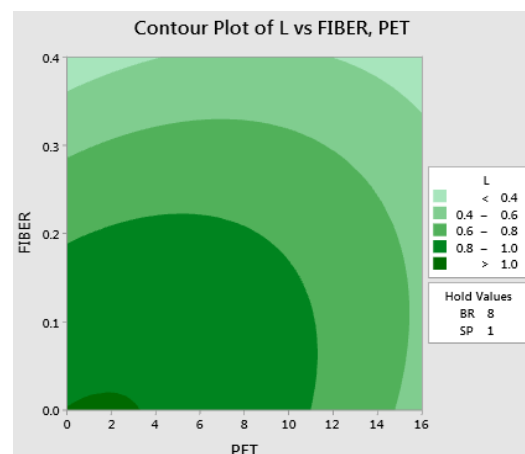
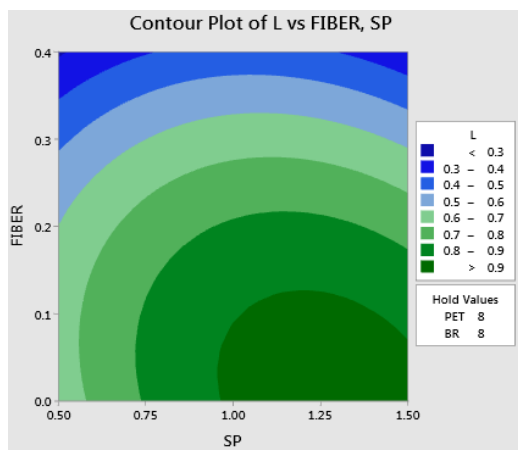


شکل ۵- الف) کانتور تأثیر بر همکنش پت و الیاف فولادی بر روی قیف V ب) نمودار سه بعدی تأثیر پت و الیاف بر روی قیف V

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

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
L-BOX Model	0.5861	14	0.0419	7.16	0.0003
X1	0.0828	1	0.0828	14.17	0.0019
X2	0.3432	1	0.3432	58.71	< 0.0001
X3	0.0007	1	0.0007	0.1205	0.7334
X4	0.0392	1	0.0392	6.71	0.0205
X1.X2	0.0150	1	0.0150	2.57	0.1300
X1.X3	0.0086	1	0.0086	1.46	0.2451
X1.X4	0.0039	1	0.0039	0.6682	0.4265
X2.X3	6.25E-06	1	6.25E-06	0.0011	0.9743
X2.X4	0.0039	1	0.0039	0.6682	0.4265
X3.X4	0.0060	1	0.0060	1.03	0.3268
X1.X1	0.0401	1	0.0401	6.86	0.0194
X2.X2	0.0350	1	0.0350	5.99	0.0272
X3.X3	0.0013	1	0.0013	0.2285	0.6395
X4.X4	0.0303	1	0.0303	5.18	0.0379
Residual	0.0877	15	0.0058		
R-Squared	85.52%				
Adj R-Squared	80.01%				
Pure Error	0.0025	5	0.0005		
Cor Total	0.6738	29			

$$L - \text{BOX} = 0.81 - 0.05X_1 - 0.11X_2 + 0.04X_4 + 0.031X_1X_2 - 0.02X_1X_3 - 0.03X_1X_1 - 0.03X_2X_2 - 0.03X_4X_4 \quad (5)$$



شکل ۷- الف) کانتور تأثیر الیاف فولادی و فوق‌روان‌کننده بر جعبه L
ب) نمودار سه بعدی تأثیر الیاف فولادی و فوق‌روان‌کننده بر جعبه L

شکل ۶- الف) کانتور تأثیر PET و الیاف فولادی بر روی جعبه
ب) نمودار سه بعدی تأثیر PET و الیاف فولادی بر جعبه L

کانتور شکل ۷ نشان می‌دهد برای داشتن پاسخ بیشتر از ۰/۸ به فوق روان کننده بالای ۰/۷۵٪ نیاز است. استفاده از روان کننده موجب بهبود مقادیر جعبه L شده، به نحوی که با افزایش فوق‌روان کننده از ۰/۵٪ به ۱/۵٪ درصد مقدار جعبه L تا ۶۸٪ افزایش را نشان می‌دهد.

۳-۳- مقاومت خمشی

برای تعیین مقاومت خمشی ۲۸ روزه مخلوط‌ها از نمونه‌های با ابعاد ۱۵×۱۵×۵۰ سانتی‌متر استفاده شد که میانگین مقادیر به دست آمده خمشی را نشان می‌دهد.

جدول ۸- تحلیل واریانس برای مدل درجه دوم مقاومت خمشی

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Flexural Strength	2985.97	11	271.45	37.99	< 0.0001
X1	848.59	1	848.59	118.77	< 0.0001
X2	1477.84	1	1477.84	206.84	< 0.0001
X3	27.84	1	27.84	3.90	0.0639
X4	70.42	1	70.42	9.86	0.0057
X1.X2	0.5006	1	0.5006	0.0701	0.7943
X1.X3	115.62	1	115.62	16.18	0.0008
X2.X3	72.04	1	72.04	10.08	0.0052
X1.X1	138.13	1	138.13	19.33	0.0003
X2.X2	21.83	1	21.83	3.06	0.0975
X3.X3	199.45	1	199.45	27.91	< 0.0001
X4.X4	33.06	1	33.06	4.63	0.0453
Residual	128.61	18	7.14		
R-Squared	95.87%				
Adj R-Squared	93.35%				
Pure Error	58.62	5	11.72		
Cor Total	3114.58	29			

$$Fr = 45.26 - 5.95X1 + 7.85X2 + 1.08X3 + 1.71X4 + 0.17X1.X2 + 2.69X1X3 + 2.12X2X3 - 2.24X1X1 + 0.89X2.X2 - 2.7X3X3 - 1.1X4X4 \quad (6)$$

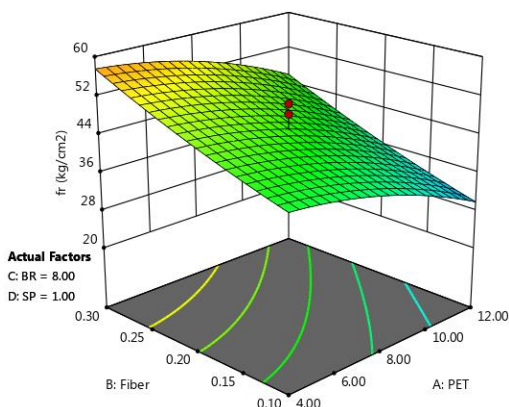
با بررسی اشکال ۸ ملاحظه می‌شود حضور الیاف فولادی باعث افزایش و افزودن PET موجب کاهش مقاومت خمشی گردیده است. با بررسی طرح‌های ۲۲ و ۱۴ مشاهده می‌گردد با افزایش درصد PET از صفر به ۱۶ درصد مقاومت خمشی ۰/۲/۴۷ درصد کاهش یافته است. به دلیل چسبندگی کم ذرات PET و ملات این ذرات مانعی برای بهتر چسبیدن ملات به سنگ‌دانه‌های طبیعی شده که موجب شده مقاومت خمشی نمونه‌ها با افزایش این ذرات کاهش یابد. با بررسی مخلوط‌های ۶ و ۱۹ مشاهده می‌گردد افزایش درصد الیاف فولادی موجب افزایش مقاومت خمشی شده است. به صورتی که با افزایش درصد الیاف فولادی از صفر به ۰/۴ مقاومت خمشی ۰/۸۲/۹۰ درصد افزایش یافته و از ۳۳/۳۴ به ۶۳/۶۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش یافته است.

افزودن الیاف فولادی به مخلوط موجب محدود شدن گسترش ترک‌ها می‌گردد. با اعمال بار و بروز ترک‌های میکروسکوپی در نمونه‌ها الیاف‌ها قادر خواهند بود از گسترش ترک‌ها به ترک‌های ماکروسکوپی جلوگیری کنند. با افزایش بار و تنش در نمونه، الیاف‌های فولادی با انتقال بار در طرفین ترک‌ها، از میزان تنش موجود در ترک‌ها کاسته‌اند. همچنین از این طریق، از افزایش عرض ترک‌ها و تبدیل شدن ترک‌های میکروسکوپی به ماکروسکوپی جلوگیری نموده‌اند. علاوه بر این با افزایش تنش‌های کششی، برخورد الیاف‌های فولادی با ترک‌ها بیشتر شده و با مقاومت کششی خود گسترش ترک و انفصال بتن را تا رسیدن به

الیاف فولادی بیش از ۰/۲٪ معیارهای روانی مخلوط‌های مورد بررسی برآورده نشده و اضافه نمودن ۰/۲٪ الیاف فولادی موجب جبران کاهش مقاومت خمشی حاصل از افزودن PET شده است. از روش RSM در مقالات مختلفی برای بهینه‌سازی‌های مورد نیاز استفاده شده است. به طور مثال [۳۲] از روش RSM برای بهینه‌سازی مقاومت خمشی مخلوط‌های در معرض سدییم کلرید استفاده کرده‌اند. نتایج بهینه‌سازی نشان داد مخلوط‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۳ و عمل آوری شده با ۵ درصد سدییم کلرید بیشترین مقاومت خمشی را داشته است. همچنین [۱۴] از این روش برای بهینه‌سازی مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی PET و پودرسنگ استفاده شده است.



شکل ۹- نحوه شکست نمونه‌های ۳ و ۶

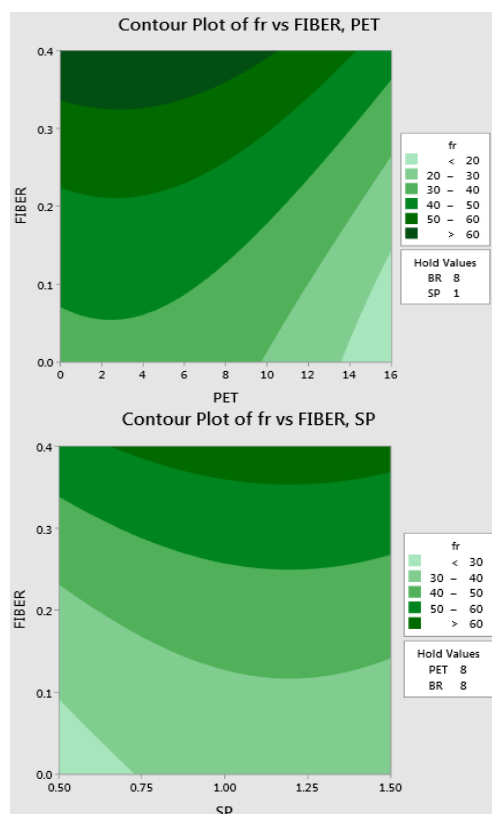


شکل ۱۰- نمودار سه بعدی PET در برابر الیاف برای مقاومت خمشی

۳-۴- منحنی تنش - کرنش فشاری

برای هر نمونه یک آزمون استوانه‌ای ۱۵×۳۰ سانتی‌متری جهت انجام آزمایش تنش - کرنش فشاری در نظر گرفته شده است. آزمون‌ها پس از قالب‌گیری به مدت ۲۸ روزه در اتاق مرطوب و

حد مقاومت کششی اصلاح می‌کنند [۳۱]. بدین طریق یک مکانیزم جذب انرژی اضافی ایجاد می‌کنند و منجر به کاهش تنش-ها در ناحیه ریز ترک‌ها شده و با کاهش عمق ترک‌ها مدول گسیختگی نیز افزایش می‌یابد. در مخلوط‌های حاوی کم الیاف و PET نمونه از وسط دو نیم شده و کاملاً از هم جدا شده و گسیختگی ترد مشاهده گردید. در حالی که با افزایش درصد الیاف فولادی و PET نمونه‌ها ترک برداشته ولی ابعاد ترک به طور کاملاً محسوسی کاهش یافته است. شکل ۹ مخلوط‌های ۳ و ۶ را نشان می‌دهند.



شکل ۸- الف) کانتور اندرکنش PET در برابر الیاف فولادی برای مقاومت خمشی ب) کانتور اندرکنش الیاف در برابر فوق روان‌کننده برای مقاومت خمشی

کانتورهای شکل ۸ اندرکنش الیاف فولادی با PET و فوق‌روان‌کننده را برای مقاومت خمشی نشان می‌دهند. این کانتورها نشان می‌دهند مخلوط حاوی ۱٪ تا ۱/۲۵٪ روان‌کننده، ۱۰٪ PET و ۰/۲٪ الیاف فولادی مقاومت خمشی رضایت‌بخشی را داشته باشد. همچنین با مطالعه شکل ۸ می‌توان نتیجه گرفت با افزایش درصد جایگزینی PET به میزان بیش از ۱۰ درصد اثرگذاری تأثیر کاهشی آن بر پاسخ مورد نظر قابل ملاحظه است. همچنین برای

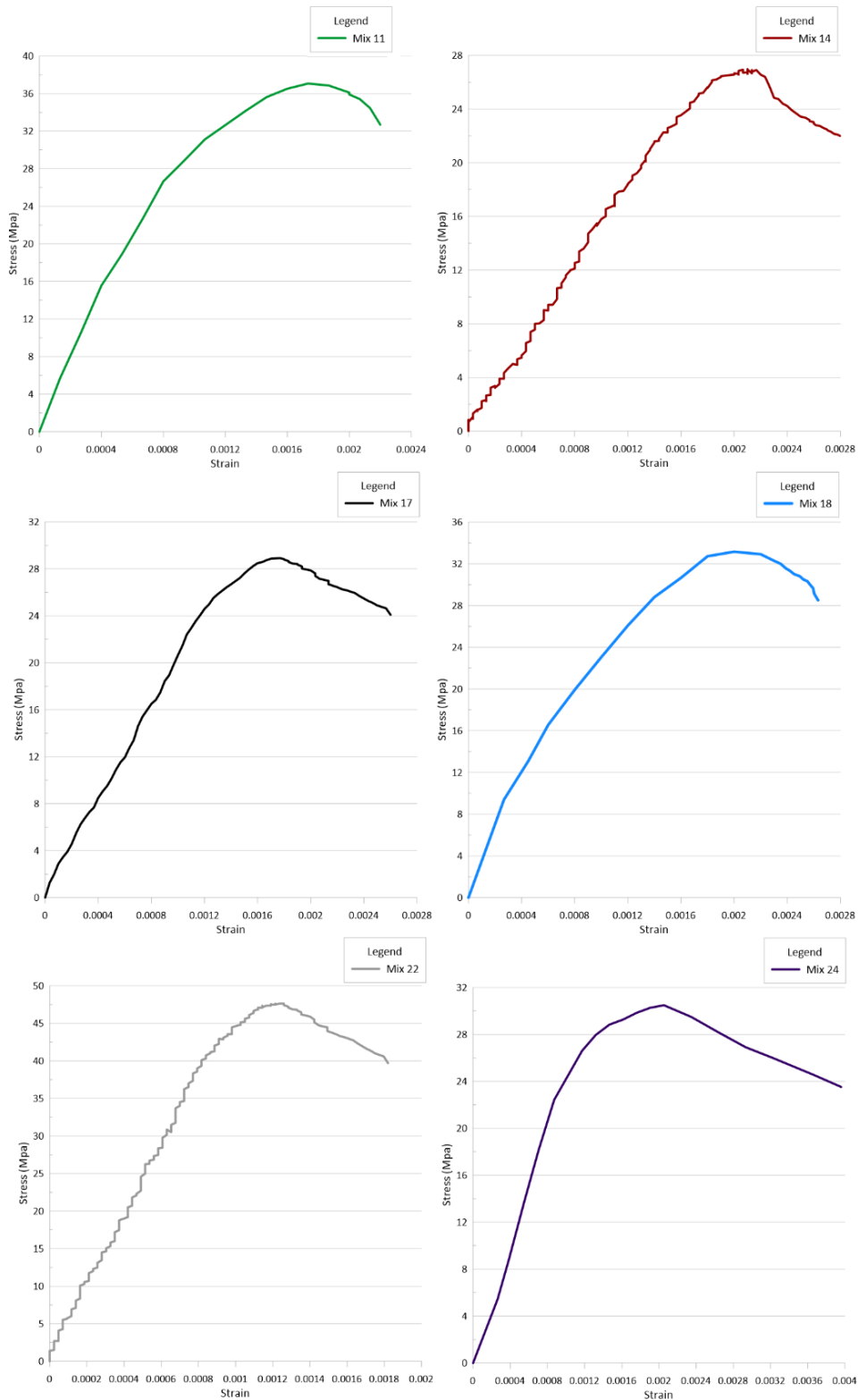
مقایسه نمودارها ملاحظه می گردد با افزایش PET در نمونه‌ها از شدت شیب نمونه‌ها کاسته شده و کرنش نظیر حداکثر مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد. این نتایج می‌تواند توجیه کننده شکست‌های نرم نمونه‌های حاوی PET باشد. ذرات PET نسبتاً تراکم‌پذیر هستند و قادر به مانع شدن عکس العمل بین خمیر و سنگدانه سخت می‌باشند، بنابراین موجب کاهش سختی بتن و افزایش جذب انرژی می‌شود. همچنین PET موجب می‌گردد نقطه قسمت نزولی منحنی با شیب کندتری همراه باشد. به طور مثال با بررسی نمودار نمونه های ۲۲ و ۱۷ حاوی صفر و ۱۲ درصد PET مشاهده می‌گردد شیب قسمت نزولی نمودار ۲۲ بیشتر از نمودار ۱۷ است که این نشان دهنده رفتار ترد این نمونه است. افزودن هم‌زمان الیاف فولادی و PET به نمونه‌ها، تأثیر مثبت و مؤثری بر هر دو قسمت صعودی و نزولی منحنی تنش-کرنش فشاری داشته و از افت ناگهانی مقاومت در قسمت نزولی منحنی تنش-کرنش جلوگیری می‌کند. در میان کلیه نمونه‌ها، افزودن ۰/۳ الیاف فولادی به همراه ۱۲٪ PET (در طرح ۲۴)، بیشترین تأثیر را در بهبود رفتار بتن در قسمت نزولی منحنی تنش-کرنش داشته است.

با بررسی طرح ۱۷ حاوی ۱۲٪ PET و ۰/۱ الیاف با طرح ۲۴ با ۱۲٪ PET و ۰/۱ الیاف مشاهده می‌گردد که، با افزایش درصد الیاف از ۰/۱ به ۰/۳ درصد میزان جذب انرژی (سطح زیر منحنی تنش - کرنش) در حدود ۷۷ درصد افزایش یافته است. همچنین برای تعیین میزان تأثیر PET بر جذب انرژی، مخلوط‌های ۲۲ (صفر درصد PET و ۰/۲ الیاف) و ۱۸ (۱۲٪ PET و ۰/۲ الیاف) مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد میزان جذب انرژی (سطح زیر منحنی تنش - کرنش) با افزایش درصد PET به ۱۲ درصد در حدود ۸ درصد افزایش یافته است.

نتایج نشان می‌دهد تأثیر افزایش الیاف بر ظرفیت جذب انرژی و شکل‌پذیری بتن بسیار بیشتر از تأثیر PET بر روی این پارامتر است. علاوه بر این، نتایج حاکی از آن است که، افزایش الیاف سبب افزایش قابل ملاحظه‌ای کرنش نهایی بتن شده و موجب پایداری بهتر قسمت نزولی منحنی تنش - کرنش شده است. پارامترهای اصلی در تعیین منحنی تنش-کرنش تحت بارگذاری یکنواخت فشاری شامل مقاومت فشاری، کرنش متناظر با حداکثر مقاومت فشاری و کرنش نهایی بتن در جدول ۹ ارائه شده است.

حوضچه آب نگهداری شده و در سن ۲۸ روزه آزمایش تنش - کرنش فشاری بر روی آن‌ها انجام شده است. قبل از انجام آزمایش دو انتهای نمونه‌های استوانه‌ای با ملات گوگرد به منظور ایجاد سطحی صاف برای توزیع یکنواخت بار، کپینگ شده اند [۲۹]. برای اندازه‌گیری تغییرشکل عرضی از یک حلقه فلزی که توسط سه پیچ به بدنه نمونه متصل گردیده و یک گیج با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شده است. اندازه‌گیری تغییرات طول آزمون به وسیله یک گیج با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر صورت گرفته است. روش انجام آزمایش بدین صورت بوده که پس از کپینگ، نمونه درون جک‌بتن شکن قرار گرفته و با اعمال بار، میزان تغییرشکل طولی و عرضی آزمون در مقادیر ثابت افزایش نیروی فشاری ثبت گردیده و با استفاده از داده‌های آزمایش، نمودار تنش - کرنش فشاری آزمون رسم شده است. در سازه‌های بتنی، اطلاعات مربوط به منحنی تنش-کرنش بتن اهمیت بسیاری دارد. منحنی‌های تنش-کرنش فشاری برای بتن خودتراکم حاوی PET و الیاف فولادی تحت بارگذاری یکنواخت فشاری برای نمونه‌ها در شکل ۱۱ ارائه شده است. همانطوری که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود مخلوط ۲۲ که بدون PET بوده نسبت به سایر مخلوط‌ها دارای افت مقاومت بعد از تنش حداکثر و در نتیجه رفتار شکننده و شکست ترد می‌باشد. قسمت صعودی نمودار تنش-کرنش فشاری تا نزدیکی تنش ماکزیمم به صورت تقریباً خطی است. افزودن الیاف فولادی به تنهایی، تأثیر چندانی بر شیب قسمت صعودی و نقطه پیک منحنی تنش-کرنش نداشته، در حالیکه قسمت بعد از تنش حداکثر منحنی تنش-کرنش بطور قابل توجهی تحت تأثیر افزودن الیاف فولادی می‌باشد. بخش نزولی منحنی تنش-کرنش یک عنصر کلیدی اساسی در تحلیل‌های غیرخطی و طراحی اعضای بتن مسلح تحت بارهای فشاری می‌باشد [۳۳]. حضور الیاف فولادی و PET، رفتار نمونه‌ها را به‌طور قابل ملاحظه‌ای به صورت شکست نرم اصلاح کرده و در نتیجه باعث افزایش شکل‌پذیری آنها شده‌اند. مخلوط‌های حاوی PET و الیاف فولادی در قسمت نزولی منحنی تنش-کرنش پایداری بهتری نسبت به نمونه‌های بدون الیاف فولادی دارند، که این به علت عملکرد پل زدن میان ترک‌ها توسط الیاف فولادی و جلوگیری از گسترش ترک‌ها می‌باشد [۳۴].

افزودن PET بر قسمت صعودی منحنی تأثیرگذار می‌باشد. با



شکل ۱۱- منحنی‌های تنش - کرنش فشاری

جدول، مشاهده می‌شود با افزودن الیاف فولادی به تنهایی تغییر ناچیزی در کرنش متناظر با حداکثر تنش فشاری ایجاد شده، درحالی‌که با مقایسه طرح ۱۴ با ۰/۲٪ الیاف فولادی و ۱۶٪ PET با طرح ۲۲ با ۰/۲٪ الیاف فولادی و صفر درصد PET ملاحظه

کرنش نظیر حداکثر تنش یکی از پارامترهای اصلی و تأثیرگذار بر منحنی تنش-کرنش بتن می‌باشد. با افزایش مقاومت فشاری در محدوده ۲۶/۹۷ تا ۴۷/۶۲ مگاپاسکال، کرنش نظیر حداکثر مقاومت فشاری از ۰/۰۱۲ تا ۰/۰۲۱ تغییر می‌کند. با توجه به

می‌گردد که افزودن PET باعث ایجاد کرنش‌های بزرگتری در مخلوط ۱۸ با ۰/۲٪ الیاف فولادی و ۸ درصد PET کرنش نهایی کرنش نظیر حداکثر مقاومت فشاری می‌شود. مخلوط ۲۴ با ۰/۳٪ ۰/۰۰۲۷ را داشته و توانسته معیارهای روانی بتن خودتراکم را الیاف فولادی و ۱۲٪ PET بیشترین کرنش حداکثر را دارد. برآورده نماید.

جدول ۹- پارامترهای موثر بر منحنی تنش - کرنش

مخلوط	مقاومت فشاری (MPa)	کرنش نظیر حداکثر مقاومت فشاری ϵ_0	کرنش نهایی ϵ_{cu}
۱۱	۳۷/۰۶	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۲۲
۱۴	۲۷/۱۶	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۱۹
۱۷	۲۸/۹۱	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۲۶
۱۸	۳۳/۱۵	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۲۷
۲۲	۴۷/۶۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۸
۲۴	۳۰/۴۸	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۳۹

۴- نتیجه گیری

با افزایش درصد PET جذب انرژی در نمونه‌ها افزایش یافته و مخلوط‌ها شکست نرمی را تجربه نموده‌اند. استفاده از الیاف فولادی در طرح‌های مورد بررسی مقاومت خمشی را افزایش داده‌اند، که بیشترین افزایش در مقاومت خمشی از جایگزینی ۰/۴ الیاف فولادی به دست آمده است. افزایش درصد الیاف فولادی تأثیر بسزایی در بهبود مقاومت خمشی از خود نشان داده است، به طوری که با افزایش درصد الیاف فولادی از صفر به ۰/۴، مقاومت خمشی در حدود ۹۰٪ افزایش یافته است. همچنین افزایش فوق روان‌کننده تا ۱/۰۵٪ موجب بهبود مقاومت خمشی گردیده است.

- افزودن الیاف فولادی به تنهایی تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری مخلوط‌های مورد بررسی داشته و فقط قسمت نزولی منحنی تنش - کرنش فشاری را تحت تأثیر قرار داده و منجر به تغییر مود خرابی ترد به شکل پذیر شده است. همچنین افزودن PET موجب بهبود شکل-پذیری نمونه‌ها در هر دو قسمت صعودی و نزولی منحنی تنش - کرنش فشاری شده و موجب تغییر مود خرابی ترد به شکل پذیر شده است. حضور توام الیاف فولادی و PET، بهبود کلی رفتار مخلوط-ها را در قبل و بعد از نقطه پیک به همراه داشته است. PET موجب افزایش کرنش نظیر حداکثر مقاومت فشاری گردیده است. به طور مثال با افزایش درصد PET از صفر به ۱۶٪ کرنش نظیر حداکثر مقاومت از ۰/۰۰۱۲ به ۰/۰۰۲۱ افزایش یافته است.

در محدوده آزمایش‌ها و تحلیل‌های انجام گرفته در این تحقیق می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

- نتایج آزمایش‌ها بیانگر این مهم هستند که RSM شیوه‌ای مناسب برای ارزیابی رفتارهای رئولوژیکی و مکانیکی مخلوط‌های بتن خودتراکم می‌باشد. با استفاده از روش RSM با تعداد آزمایش‌های کم روابط تجربی برحسب متغیرها جهت پیش‌بینی مشخصات رئولوژیکی و مکانیکی حاصل گردید.

- پارامتر PET موجب کاهش پاسخ آزمایش و فوق روان‌کننده و تا حدی پودرسنگ موجب بهبود نتایج جعبه L گردیده است. با بررسی کانتورها مشاهده می‌گردد با جایگزینی الیاف فولادی تا حدود ۰/۲٪ و افزودن فوق روان‌کننده بیش از ۱٪ مقادیر EFNARC برای آزمایش جعبه L برآورده می‌گردد. به طور مثال در طرح شماره ۲ با ۰/۲٪ الیاف فولادی، ۸٪ PET و ۱٪ فوق روان‌کننده مقدار جعبه L، ۰/۸ حاصل شد.

- با بررسی ۴ متغیر ورودی بر روی پاسخ آزمایش قیف V مشاهده گردید، که PET و الیاف فولادی بیشترین تأثیر بر روی پاسخ را داشته است. به طوری که افزایش هر دو متغیر یاد شده، موجب افزایش لزجت و افزایش زمان تخلیه قیف V شده است.

- روند کلی تغییرات مقاومت خمشی با افزایش درصد PET به صورت کاهشی و با افزایش درصد الیاف به صورت افزایشی می‌باشد.

- Tahwia, optimizing fresh properties and compressive strength of self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials* 249 (2020) 118781.
- [13] M. Aldahdooh, A. Jamrah, A. Alnuaimi, M. Martini, M. Ahmed, A. Ahmed, Influence of Various Plastics-Waste Aggregates on Properties of Normal Concrete, *Journal of Building Engineering* 17 (2018) 13-22.
- [14] M. Khashaa Mohammed, A. Ismail Al-Hadithi, M. Mohammed, Production and optimization of eco-efficient self-compacting concrete SCC with limestone and PET, *Construction and Building Materials* 197 (2019) 734-746.
- [15] O. Rezaifar, M. Hasanzadeh, M. Gholhaki, Concrete made with hybrid blends of crumb rubber and metakaolin: Optimization using Response Surface Method, *Construction and Building Materials* 123 (2016) 59-68.
- [16] M. Aziminezhad, M. Mahdikhani, M. Memarpour, RSM-based modeling and optimization of self-consolidating mortar to predict acceptable ranges of rheological properties, *Construction and Building Materials* 189 (2018) 1200-1213.
- [17] N. Sultana, S. Zakir Hossein, M. Shah Alam, M. Hashish, M. Islam, 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* 243 (2020) 118216.
- [18] T. Awolusi, O. Oke, O. Akinkurolere, A. Sojobi, Application of Response Surface Methodology: Predicting and optimizing the properties of concrete containing steel fibre extracted from waste tires with limestone powder as filler, *Case Studies in Construction Materials* 10 (2019).
- [19] I. Ferdosian, A. Camoes, Eco-efficient ultra-high performance concrete development by means of response surface methodology, *Cement and Concrete Composites* 84 (2017) 146-156.
- [20] T.F. Awolusi, O.L. Oke, O.O. Akinkurolere, A.O. Sojobi, Application of response surface methodology: Predicting and optimizing the properties of concrete containing steel fibre extracted from waste tires with limestone powder as filler, *Case Studies in Construction Materials* 10 (2019).
- [21] M. Balcikanli Bankir, U. Korkut Sevim, Performance optimization of hybrid fiber concrete according to mechanical properties, *Construction and Building Materials* 261 (2020) 119952.
- [22] Soares, R. C., Mohamed, A., Venturini, W. S., [1] C. Klockner, A comprehensive model of the psychology of environmental behaviour—A meta-analysis, *Global Environmental Change* 23 (2013) 1028-1038
- [2] Al-Hadithi. A, Naji Hilal. N, The possibility of enhancing some properties of self-compacting concrete by adding waste plastic fibers, *Journal of Building Engineering* 8 (2016) 20-28.
- [3] Y. Ghernouti, B. Rabehi, T. Bouziani, H. Ghezraoui, A. Makhloufi, Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC), *Constr. Build. Mater* 82 (2015), 89-100.
- [4] R. Noroozi, G. Shafabakhsh, A. Kheyroddin, A. Mohammadzade Moghadam, Investigating the effects of recycled PET particles, shredded recycled steel fibers and Metakaolin powder on the properties of RCCP, *Construction and Building Materials* 224 (2019) 173-187
- [5] M. Gholhaki, A. Kheyroddin, M. Hajforoush, M. Kazemi, an investigation on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete incorporating magnetic water with various pozzolanic materials, *Construction and Building Materials* 158 (2018) 173-180.
- [6] R. Saleh Ahari, T. Kamel Erdem, K. Ramyar, Effect of various supplementary cementitious materials on rheological properties of self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials* 75 (2015) 89-98.
- [7] R. Saleh Ahari, T. Kamel Erdem, K. Ramyar, Permeability properties of self-consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials, *Construction and Building Materials* 79 (2015) 326-336.
- [8] S. Yang, X. Yue, X. Liu, Y. Tong, Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles, *Construction and Building Materials* 84 (2015) 444-453.
- [9] J. Sanjeev, K. Sai Nitesh, Study on the effect of steel and glass fibers on fresh and hardened properties of vibrated concrete and self-compacting concrete, *Materials Today: Proceedings* 27 (2020) 1559-1568.
- [10] M. Mastali, A. Dalvand, Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete Reinforced with Hybrid Recycled Steel-Polypropylene Fiber, *Journal of Materials in Civil Engineering* 29 (2017).
- [11] S. Hama, N, Hilal, Fresh properties of self-compacting concrete with plastic waste as partial replacement of sand, *International Journal of Sustainable Built Environment* 6 (2017) 299-308.
- [12] W. Elemam, A. Abdelraheem, M, Mahdy, A,

& Lemaire, M. (2002). Reliability analysis of non-linear reinforced concrete frames using the response surface method. *Reliability Engineering & System Safety*, 75(1), 1-16.

[23] Montgomery, D.C., Eighth edition (2008), *Design and analysis of experiments*, John Wiley & Sons.

[24] ASTM C150/C150M – Standard Specification for Portland Cement, in: ASTM International, 2016

[25] ASTM C494-08. Standard specification for chemical admixtures for concrete. ASTM International; 2008.

[26] EFNARC. Self-compacting concrete, European project group. The European guidelines for self-compacting concrete: specification, production and use; 2005

[27] B.S. EN, 12390-3 (2009) testing hardened concrete—part 3: compressive strength of test specimens, British Standards Institution, 2009

[28] ASTM C293/C293M- Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading), 2016.

[29] ASTM C617 / C617M-15, "Standard practice for capping cylindrical concrete specimens", ASTM International, West Conshohocken, 2015.

[30]- A. Sadrmomtazi, S. Dolati-Milehsara, O. Lotfi-Omran, A. Sadeghi-Nik, The combined effects of waste PET particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete, [Journal of Cleaner Production](#) 112 (2016) 2363-2373.

[31] B. AbdelAleem, M. Ismail, A. Hassan, the combined effect of crumb rubber and synthetic fibers on impact resistance of self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials* 162 (2018) 816–829.

[۳۲]- اسکندری نداف، حمید، خسروجردی، روشنک، کوشکی،

رعنا. "بهینه سازی عوامل موثر بر مقاومت فشاری و خمشی ملات

سیمان در مجاورت محلول سدیم کلرید با استفاده از روش سطح

پاسخ" نشریه مهندسی سازه و ساخت. ۶، (۱۳۹۸)، ۱۸۷-۱۹۸.

[33] A. Tasnimi, "Mathematical model for complete stress-strain curve prediction of normal, light-weight and high-strength concretes", *Magazine of Concrete Research* 56 (2004) 23-34.

[34] M. Pajak, J. Janiszewski, L. Kruszka, Laboratory investigation on the influence of high compressive strain rates on the hybrid fibre reinforced self-compacting concrete, *Construction and Building Materials* 227 (2019) 116687.

[35] CEB-FIP, " Diagnosis and assessment of concrete structures – state of the art report ", *CEB Bull* 192; 1989: 83–5.

Experimental and numerical study of the effect of PET and steel fibers on flexural strength and stress-strain curves of self-compacting concretes

Hamed Bassar

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 *

Department of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

Reza saleh Ahari

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

saeed mirrezaei

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

Abstract

The aim of this study is the experimental and numerical investigation of the simultaneous effect of PET and steel fibers on the rheological properties, flexural strength, and compressive stress-strain curve of self-compacting concrete. For this purpose, 30 mixing designs by response surface method (RSM) were designed by combining different percentages of PET, steel fibers, stone powder, and superplasticizer variables. The results demonstrate that with increasing the percentage of PET and steel fibers, the viscosity of concrete decreased. Also, the highest flexural strength was obtained from the combination of 0.4% fibers, 8% PET, and 1% superplasticizer. The stress-strain curves plotted for the mixtures showed that the steel fibers had little effect on the ascending part of the stress-strain curve and improved the stability on the descending part of the curve. PET particles also reduce the slope of the ascending part of the stress-strain curve. In general, Steel fibers and PET caused the soft failure of the samples so that PET increased the strain corresponding to the maximum compressive strength, and steel fibers increased the rupture strain of concrete.

Keywords: Pet, Steel Fibers, RSM, Flexural Strength, Compensive Stress-Strain Curve.

* Corresponding Author: hafshin@sut.ac.ir

