

Experimental and numerical investigation of rheological and mechanical properties of self-compacting concretes containing recycled aggregates using Box-Behnken method

Hiwa Mollaei¹, Taleb Moradi Shaghghi^{2*}, Hasan Afshin³, Reza Saleh Ahari², Seyed Saeed Mirrezaei²

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

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

3- Department of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

ABSTRACT

Concrete is widely used as a building material all over the world, but it is not considered an environmentally friendly material due to environmental degradation and the use of large amounts of natural resources. Therefore, it is necessary to provide a solution to reduce the effects of recycled aggregate pollution. In the present study, the effect of the strength of recycled aggregates on the rheological and mechanical properties of self-compacting concrete is investigated experimentally and numerically. Hence, two types of recycled aggregates with known and unknown strength origins are utilized for the studied samples. The experimental design in this research is accomplished by the Box Behnken method, which is one of the response surface methods. Input variables in mixtures, including micro silica in the range of 5-15% as a percentage substitute for the weight of cement and recycled coarse and fine grains in the range of 0-50% for both series of recycled materials, are replaced by natural materials. The studied responses are slump flow, funnel V, compressive and tensile strengths. The results indicate that the increase in recycled aggregates reduces the rheological and mechanical properties of the mixtures, while micro silica effectively improves the mechanical properties. In addition, the sensitivity of most of the studied responses is related to recycle fine particles. It should be noted that recycled materials of known strengths are shown better results than recycled materials of unknown strengths. Some mathematical relationships are also provided using analysis of variance for all responses to predict the rheological and mechanical properties of mixtures.

ARTICLE INFO

Receive Date: 03 December 2021

Revise Date: 10 April 2022

Accept Date: 19 April 2022

Keywords:

self-compacting concrete
Recycled materials of specified origin
Recycled materials of unknown origin
Silica Fume
Response Surface Methodology

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.317450.2658>

*Corresponding author: Taleb Moradi Shaghghi.
Email address: ta.moradi@iaut.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی و عددی مشخصات رئولوژیکی و مکانیکی بتن‌های خودتراکم

حاوی سنگدانه‌های بازیافتی با استفاده از روش باکس‌بنکن

هیوا ملائی^۱، طالب مرادی شقاقی^{۲*}، حسن افشین^۳، رضا صالح اهری^۲، سید سعید میررضایی^۲

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

۲- گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۳- گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

چکیده

بتن به عنوان یکی از مصالح ساختمانی به طور گسترده در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما به عنوان مصالح سازگار با محیط زیست محسوب نمی‌شود. چون علاوه بر تخریب محیط زیست و استفاده از مقادیر زیاد منابع طبیعی، موجب اثرات زیان‌بار زیست محیطی می‌گردد. از این رو ارائه‌ی راهکاری جهت کاهش اثرات آلاینده‌ی سنگدانه‌ی بازیافتی، امری ضروری به نظر می‌رسد. در مقاله حاضر تاثیر سنگدانه‌های بازیافتی بر روی مشخصات رئولوژیکی و مکانیکی بتن خودتراکم به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از دو نوع سنگدانه بازیافتی با منشا مقاومتی مشخص و نامشخص برای نمونه‌های مورد مطالعه استفاده شده است. طراحی آزمایشات در این مقاله توسط روش باکس بنکن که یکی از روش‌های سطح پاسخ بوده، انجام گرفته است. متغیرهای ورودی در مخلوط‌ها، شامل میکروسیلیس در محدوده ۰-۵٪ تا ۱۵-۵٪ به عنوان جایگزین درصدی از وزن سیمان، درشت‌دانه و ریزدانه‌ی بازیافتی در محدوده ۰-۵۰٪ برای هر دو سری از مصالح بازیافتی، جایگزین مصالح طبیعی گردیده است. پاسخ‌های مورد مطالعه جریان اسلامپ، قیف V ، مقاومت فشاری و مقاومت کششی می‌باشند. نتایج حاکی از آن است که با افزایش سنگدانه‌های بازیافتی مشخصات روانی و مکانیکی مخلوط‌ها کاهش می‌یابد، در حالی که میکروسیلیس به طور موثری مشخصات مکانیکی را بهبود بخشیده است. علاوه بر این حساسیت بیشتر پاسخ‌های مورد مطالعه به ریزدانه‌های بازیافتی بوده است. لازم به ذکر است مصالح بازیافتی با منشا مقاومت مشخص در مقایسه با مصالح بازیافتی با منشا مقاومت نامشخص نتایج بهتری از خود نشان داده‌اند. همچنین برای تمامی پاسخ‌ها با استفاده از تحلیل واریانس روابط ریاضی جهت پیش‌بینی مشخصات رئولوژیکی و مکانیکی مخلوط‌ها ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، مصالح بازیافتی با منشا مشخص، مصالح بازیافتی با منشا نامشخص، میکروسیلیس، روش سطح پاسخ

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
https://doi.org/10.22065/jsce.2022.317450.2658	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت	
doi: 10.22065/jsce.2022.317450.2658	۱۴۰۱/۱۰/۳۰	۱۴۰۱/۱۰/۳۰	۱۴۰۱/۱۰/۳۰	۱۴۰۱/۱۰/۳۱	۱۴۰۰/۰۹/۱۲	
طالب مرادی شقاقی ta.moradi@iaut.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

بحران انرژی و کمبود مواد اولیه، پژوهشگران این عرصه را به اندیشیدن راهکارهایی در جهت مصرف بهینه انرژی واداشته است. با توجه به اقبال عمومی در سرتاسر جهان که در ساخت سازه‌های بتنی وجود دارد، تولید بتن به یکی از مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار در ساخت و ساز بدل گشته است. نظر به اینکه هر سازه دارای عمر مفید مشخصی در زمان بهره‌برداری خود می‌باشد، خواه ناخواه مجبور به تخریب سازه و ایجاد سازه‌ای جدید می‌باشیم. از طرفی عوامل گوناگون مانند بلایای طبیعی نظیر زلزله، سیل، طوفان و بلایای انسانی نظیر جنگ نیز به خودی خود سبب از بین رفتن سازه‌های بتنی می‌گردند. در نتیجه حجم آوار ناشی از این تخریب‌ها در جهان روز به روز در حال افزایش است و موضوع دفن بتن‌های تخریب شده را بیش از پیش با اهمیت می‌سازد. باتوجه به اینکه یکی از راه‌های اصلی در جهت کاهش اثرات مخرب زیست محیطی ناشی از دفن بتن فرسوده، استفاده‌ی مجدد از آن می‌باشد، لذا موضوع بازیافت این مصالح تخریبی از نظر زیست محیطی مهم و ضروری تلقی می‌گردد. همچنین، بهره‌برداری بیش از حد از شن و ماسه باعث ایجاد مشکلات شدید زیست محیطی گردیده است [۱-۳]. در ایران نیز با توجه به رشد فزاینده‌ی ساخت و ساز ساختمان‌های مسکونی از یک سو و الزام به بازسازی سازه‌های فرسوده توسط سیاست‌گذاران عرصه‌ی مسکن از سوی دیگر، به ترتیب سبب کاهش منابع سنگدانه‌های طبیعی و افزایش نخاله‌های ساختمانی گردیده است. با توجه به مطالب فوق الذکر لازم است با ارائه روش‌هایی سعی بر این گردد که سازه‌های بتنی تخریب شده را دوباره به چرخه‌ی تولید بتن بازگردانده تا از مخاطرات زیست محیطی آنها کاسته شود. یکی از این روش‌ها استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در تولید بتن‌های دیگر است، که یکی از این نوع بتن‌ها، بتن‌های خودتراکم می‌باشد. بتن خودتراکم، یک بتن با روانی بسیار بالا است که تحت اثر وزن خود جریان می‌یابد و می‌توان از آن به راحتی در مقاطع با تراکم میلگرد بالا از آن استفاده نمود (۴ و ۵). همچنین این بتن باید دارای شکل‌پذیری و پایداری بالایی بوده تا ظرفیت پرکردن قالب‌های با اشکال پیچیده، مقاطع عمیق و باریک را داشته باشد [۶].

پژوهش‌های متعددی در خصوص بتن‌های بازیافتی صورت گرفته که این امر به اهمیت بالای این موضوع تاکید می‌نمایند. به عنوان مثال طاهر و همکاران [۷] در مقاله‌ای به تاثیر سیمان و مواد افزودنی بر روی بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی پرداختند. آن‌ها در این مقاله تأثیر نوع سیمان و افزودنی‌ها را بر روی خصوصیات بتن تازه و سخت‌شده با سنگدانه‌های بازیافتی درشت‌دانه و ریزدانه مورد بررسی قرار دادند. ماسه طبیعی و شن طبیعی به ترتیب جای خود را به ماسه‌ی بتنی بازیافتی و شن بتنی بازیافتی با درصد‌های (۱۵، ۳۰، ۷۰ و ۱۰۰) دادند و همچنین دو نوع سیمان و مواد افزودنی به کار گرفته شده خصوصیات بتن تازه و بتن سخت‌شده مورد بررسی قرار گرفته و با بتن حاوی سنگدانه‌های طبیعی مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد که کارایی بتن‌های ساخته شده به ترکیب مواد افزودنی و سیمان بستگی دارد. بتن با سنگدانه‌های بازیافتی را می‌توان با ۳۰٪ ماسه بازیافتی و بیش از ۳۰٪ شن بازیافتی استفاده کرد.

در مطالعه‌ای دیگر، بوی و همکاران [۸] به بهبود مشخصات مکانیکی بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی بر پایه ترکیب سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی پرداخته‌اند. در این مقاله، ویژگی‌های مکانیکی بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی با استفاده از روش جدید و روش متداول در درصد‌های مختلف جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی مورد بررسی قرار گرفت. روش جدید سبب ارتقای قابل توجه خواص مکانیکی بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی نسبت به روش متداول گردید. با استفاده از روش جدید برای بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی، مقدار سنگدانه‌های بازیافتی را می‌توان تا ۵۰٪ در بتن افزایش داد، در حالی که روش متداول مقدار آن‌ها محدود به کمتر از ۳۰٪ می‌باشد. همچنین در مقاله‌ای دیگر دیمیتریو و همکاران [۹] به افزایش مشخصات مکانیکی و دوام بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی پرداختند. آن‌ها در این مطالعه یافتند که تفاوت عمده‌ی بین بتن‌های با سنگدانه‌ی بازیافتی و بتن‌های با سنگدانه‌ی طبیعی در چسبندگی سنگدانه‌های بازیافتی به ملات می‌باشد. دو نوع مواد افزودنی معدنی (خاکستر بادی و دوده‌ی سیلیسی) به عنوان جایگزینی جزئی سیمان و سه نوع سنگدانه‌ی بتن بازیافتی در این مقاله به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که خواص مکانیکی و دوام بتن بازیافتی با استفاده از روش‌های پیشنهادی بهبود یافت. علاوه بر این سیلوا و همکاران [۱۰] در مطالعه‌ای به بررسی عملکرد بتن‌های تازه حاوی سنگدانه‌ی

بازیافتی پرداختند. آن‌ها در این مقاله تاثیر افزودنی‌های کاهنده آب و افزودنی‌های معدنی بر خواص بتن تازه‌ی حاوی سنگدانه بازیافتی را مورد بررسی قرار داده و همچنین اطلاعات مختصری نیز درباره‌ی تاثیر استفاده از سنگدانه‌ی بازیافتی بر پارامترهای رئولوژیکی بتن ارائه دادند.

در پژوهشی دیگر دورات و همکاران [۱۱] به بررسی عملکرد مکانیکی بتن‌های شاتکریت ساخته شده از سنگدانه‌های بازیافتی پرداختند. آن‌ها در این مقاله عملکرد مکانیکی بتن شاتکریت با سنگدانه‌های بتنی بازیافتی درشت‌دانه^۱ (CRCA) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان از کاهش مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته داشته است. درحالی که مقاومت در برابر سایش به علت زبری سنگدانه‌های بازیافتی افزایش یافته است. همچنین در مقاله‌ای دیگر ژو و همکاران [۱۲] به ارزیابی دوام بتن‌های حاوی ۱۰۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که کیفیت بتن با مصالح بازیافتی بر دوام بتن تأثیر می‌گذارد. معیارهای دوام (مقاومت در مقابل یخ زدن و آب شدن، ضریب نفوذپذیری یون کلراید و عمق کربناسیون) به تدریج با افزایش تعداد چرخه‌های بازیافت کاهش می‌یابد. علاوه بر این وانگ و همکاران [۱۳] به پیش‌بینی مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بتن‌های حاوی ریزدانه و درشت‌دانه‌های بازیافتی پرداخته است. در این مقاله یک مدل برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی ارائه شده است. در مطالعه‌ای دیگر بهرامی و همکاران [۱۴] به تعیین مقدار بهینه، مصالح بازیافتی برای بتن‌های خودتراکم پرداختند. بدین منظور درشت‌دانه و ریزدانه بازیافتی به صورت جدا از هم در مقادیر ۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد به بتن خودتراکم اضافه گردید. نتایج نشان داد که کمترین تاثیر کاهش بر روی مشخصات رئولوژیکی و مکانیکی مربوط به طرح‌های حاوی ۲۵ درصد مصالح بازیافتی می‌باشد. همچنین ریزدانه‌ی بازیافتی تاثیر منفی بیشتری بر روی مشخصات رئولوژیکی و مکانیکی داشته است. در مقاله‌ای دیگر هونگ و همکاران [۱۵] به بررسی مشخصات بتن‌های خودتراکم حاوی سنگدانه‌های بازیافتی پرداختند. در این مقاله درشت‌دانه‌های بازیافتی در سطوح ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن است که افزودن درشت‌دانه بازیافتی موجب کاهش مشخصات مکانیکی، افزایش جذب آب و همچنین افزایش درصد هوای موجود در بتن شده است.

با بررسی مقالات مشاهده می‌گردد سنگدانه‌های بازیافتی مورد استفاده در بتن خودتراکم عموماً از بتنی با منشا مقاومتی مشخص تهیه شده‌اند و یا اطلاعاتی در خصوص منشا مقاومتی آنها ارائه نگردیده است. علاوه بر این، اطلاعات محدودی در خصوص مقایسه تاثیر سنگدانه‌ها بر روی مشخصات بتن تازه و سخت شده‌ی بتن‌های خودتراکم بصورت آماری، که قابلیت پیش‌بینی نتایج آزمایشات را داشته باشند، وجود دارد. همچنین در آینده حجم تخریب سازه‌های بتنی زیاد خواهد بود و مشخص نمودن منشا تولید سنگدانه‌ها در مرحله‌ی بازیافت امکان پذیر نمی‌باشد. بدین منظور در این مقاله یک سری مصالح بازیافتی با منشا مقاومتی مشخص (C30) و یک سری هم با منشا مقاومتی نامشخص (نخاله‌های ساختمانی جمع‌آوری شده از سطح کلانشهر کرمانشاه) تهیه گردید. هدف اصلی مقاله حاضر، مقایسه‌ی مشخصات رئولوژیکی و مکانیکی بتن‌های خودتراکم حاوی دو نوع سنگدانه‌ی بازیافتی با منشا مقاومتی مشخص و نامشخص و همچنین تعیین تاثیر میکروسلیس بر روی این نوع بتن‌ها با استفاده از تحلیل‌های آماری و ارائه‌ی روابط ریاضی جهت پیش‌بینی مشخصات آن‌ها می‌باشد. تا بتوان در بازه‌ی تغییرات متغیرهای مورد بررسی قابلیت پیش‌بینی خصوصیات بتن تازه و سخت شده بتن خودتراکم حاوی سنگدانه‌های بازیافتی مهیا گردد. جهت طراحی آزمایشات این مطالعه از روش باکس بنکن^۲، که یکی از روش‌های سطح پاسخ^۳، است استفاده شده است. مزیت اصلی این روش کاهش تعداد طرح‌های اختلاط لازم به منظور تعیین میزان تاثیر هر متغیر بر روی پاسخ مورد مطالعه می‌باشد.

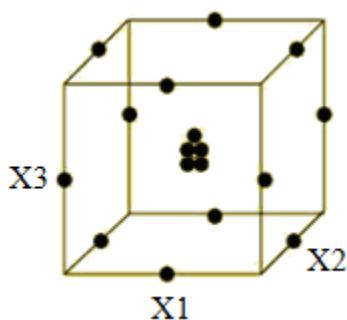
- 1 - Coarse recycled concrete aggregates
- 2 - Box-Behnken
- 3 - Response Surface Methodology

۲- روش سطح پاسخ RSM

در روش سطح پاسخ از مجموعه‌ای از روش‌های ریاضیاتی و تکنیک‌های آماری به منظور مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ فرآیند متأثر از چندین متغیر ورودی است مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین منظور ابتدا باید متغیرهای تاثیرگذار بر روی پاسخ آزمایش تعیین گردد [۱۶]. همچنین روش سطح پاسخ رابطه‌ای بین عوامل ورودی و پاسخ مورد مطالعه ارائه می‌دهد. علاوه بر این روش، سطح پاسخ می‌تواند پاسخ را براساس متغیرهای ورودی بهینه‌سازی نماید. مدل پیش‌بینی کننده‌ی درجه دومی که برای تعیین شرایط بهینه‌ی پاسخ استفاده شده در قسمت زیر آورده شده است [۱۷].

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

در معادله‌ی (۱)، y پاسخ پیش‌بینی شده، x_i و x_j مقادیر کدی متغیرها، i ضریب خطی، j ضریب خطی درجه دوم، β ضریب رگرسیون، k تعداد عامل‌ها و ε خطای تصادفی می‌باشد [۱۷ و ۱۸]. این روش قابل چرخش بوده و حداقل به سه سطح نیاز دارد. متغیرهای میکروسیلیس (X_1)، درشت‌دانه بازیافتی (X_2) و ریزدانه بازیافتی (X_3) را می‌توان به صورت زیاد (+۱)، متوسط (۰) و کم (-۱) کدگذاری نمود، که جدول ۱ طرح‌های اختلاط را به صورت کدی نشان می‌دهد. محدوده و سطح هر عامل مستقل بر اساس روش باکس-بنکن در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- ماتریس طراحی آزمایشات برای $k=3$

جدول ۱- طرح‌های اختلاط به صورت کدی

شماره طرح	X1	X2	X3
1	0	-1	-1
2	0	-1	1
3	1	0	-1
4	1	-1	0
5	0	0	0
6	0	1	-1
7	-1	0	-1
8	0	0	0
9	0	0	0
10	1	1	0
11	-1	1	0
12	-1	0	1
13	1	0	1
14	-1	-1	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	1	1

۳- مصالح

در این مقاله به طور کلی از سه نوع سنگدانه استفاده شده است. نوع اول، سنگدانه‌ی طبیعی بوده که با ترکیب دو نوع سنگدانه‌ی بازیافتی با درصد‌های جایگزینی مختلف، مخلوط‌های مورد بررسی را تشکیل داده‌اند. نوع دوم، سنگدانه‌ی بازیافتی محصول کارخانه‌ی بازیافت نخاله‌ی کلانشهر کرمانشاه بوده است که نخاله‌های ساختمانی و بتنی را از سطح شهر جمع‌آوری کرده و پس از جداسازی نخاله‌های غیر بتنی، خرد شده و سنگدانه‌ها در سائزهای ریز و درشت، دانه‌بندی شده‌اند، که در این مقاله به عنوان سنگدانه با منشا نامشخص مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۲- الف). نوع سوم سنگدانه‌ها، سنگدانه‌ی بازیافتی حاصل از بتنی با اسلامپ ۷ سانتی‌متر و مقاومت فشاری استوانه‌ای ۲۸ روزه ۳۰ مگاپاسکال بوده، که پس از تولید حدود ۶ متر مکعب از این نوع بتن در کارخانه‌ی سنگ‌شکن خرد و دانه‌بندی شده و در این مقاله به عنوان سنگدانه‌ی با منشا مقاومتی مشخص استفاده شده است (شکل ۲- ب). آزمایش‌های مصالح بر روی این نوع سنگدانه‌ها مطابق استاندارد ملی ایران انجام و نتایج آن در جدول شماره (۲) آورده شده است. نتایج آزمایشات طبق استاندارد INSO4980 و INSO4982 نشان می‌دهد چگالی سنگدانه‌های بازیافتی پایین‌تر و جذب آب آنها بیشتر از مصالح طبیعی بوده که ناشی از تخلخل و ملات چسبیده به آن می‌باشد. حداکثر اندازه‌ی سنگدانه مصرفی در این مقاله ۱۹ میلی‌متر بوده و در تمامی مخلوط‌ها از نمودار دانه‌بندی مطابق شکل (۳) استفاده شده است. سیمان مصرفی در این مقاله سیمان تیپ ۲ کاوان بوکان بوده است. برای ایجاد کارایی‌های لازم از پودرسنگ عبوری از الک ۲۰۰ به عنوان پرکننده استفاده گردید. همچنین از میکروسلیس به عنوان یک پوزولان جهت بهبود مشخصات مکانیکی نمونه‌های مورد مطالعه استفاده گردیده است. مشخصات سیمان، پودرسنگ و میکروسلیس در جدول (۳) ارائه شده است. فوق روان‌کننده پلی کربکسیلات محصول شرکت البرز شیمی آسیا با وزن مخصوص $1/08 \text{ gr/cm}^3$ برای بهبود کارایی مخلوط‌ها استفاده گردید.

در جدول (۲) پارامتر RCA-SS مربوط به درشت‌دانه‌ی بازیافتی با منشا مقاومتی مشخص، RFA-SS ریزدانه بازیافتی با منشا مقاومتی مشخص، RCA-K درشت‌دانه‌ی بازیافتی با منشا مقاومتی نامشخص جمع‌آوری شده از سطح کلانشهر کرمانشاه و RFA-K ریزدانه بازیافتی با منشا مقاومتی نامشخص جمع‌آوری شده از سطح کلانشهر کرمانشاه، NC درشت‌دانه‌ی طبیعی و NF مربوط به ریزدانه‌ی طبیعی می‌باشد.

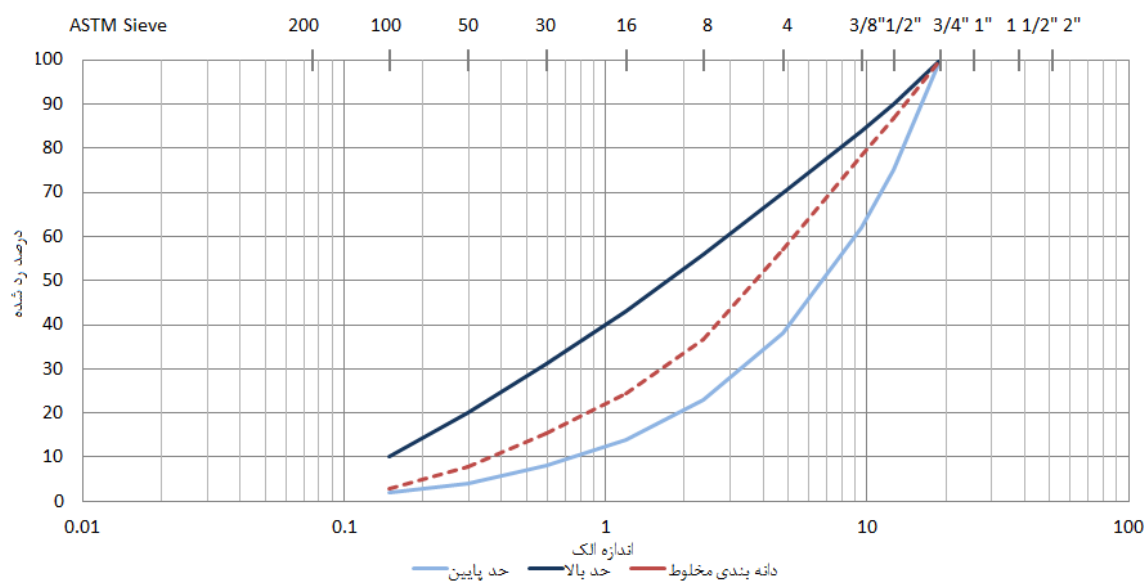
جدول ۲- آزمایشات فیزیکی و شیمیایی مصالح مورد مصرفی

نام آزمون	استاندارد	NF	NC	RFA-K	RCA-K	RFA-SS	RCA-SS
آزمایشات فیزیکی							
وزن مخصوص سنگدانه ریز kg/cm^3	INSO4980	2.64	-	2.32	-	2.33	-
جذب آب سنگدانه‌ی ریز %	INSO4980	2%	-	9.12%	-	8.16%	-
وزن مخصوص سنگدانه‌ی درشت kg/cm^3	INSO4982	-	2.65	-	2.36	-	2.41
جذب آب سنگدانه‌ی درشت %	INSO4982	-	1.7%	-	6.66%	-	7.4%
سایش (سایش لس آنجلس) %	INSO448	-	17%	-	48	-	41
تعیین درصد شکستگی (در دو جهت) %	INSO11568	-	93.5%	-	100	-	100
دانه‌های هم پهن هم دراز در سنگدانه %	INSO11269	-	14.83	-	10.5	-	11.45
اندازه گیری کلوخه‌های رسی و دانه‌های سست %	INSO4978	1.04	1.33	2.1%	1.4	1.92	1.9
آزمایشات شیمیایی							
تعیین درصد وزنی ذرات سبک در سنگدانه %	INSO4984	0.0175	0.02	0.19	0.1	0.16	0.08
مواد زیان آور-سولفات قابل حل در آب %	INSO19038-1	0.214	0.2	0.26	0.2	0.23	0.21

بررسی سلامت سنگدانه با استفاده از محلول سدیم (درصد افت وزنی)/	INSO449	4.12	3.17	7.4	5.19	8.12	6.12
---	---------	------	------	-----	------	------	------



شکل ۲- الف) سنگدانه‌های بازیافتی کرمانشاه، ب) آماده‌سازی سنگدانه‌های بازیافتی با منشا مشخص



شکل ۳- نمودار دانه بندی سنگدانه‌ها

جدول ۳ - مشخصات شیمیایی سیمان، پودر سنگ و میکروسیلیس

پودر سنگ	میکروسیلیس	سیمان	ترکیبات شیمیایی
1.47	93.9	21.66	SiO ₂ (%)
0.22	-	4.67	Al ₂ O ₃ (%)
0.29	0.59	3.63	Fe ₂ O ₃ (%)
0.05	0.17	-	Na ₂ O (%)
0.08	0.86	-	K ₂ O (%)
92.48	1.85	65.94	CaO (%)
0.3	0.27	1.58	MgO (%)
0.06	-	1.08	SO ₃ (%)
2700	2220	3115	وزن مخصوص Kg/m ³

۴- طرح اختلاط و آماده‌سازی نمونه‌ها

در این مطالعه برای مقایسه‌ی دقیق اثر مقاومت سنگ‌دانه‌ها بر روی خصوصیات رئولوژیکی و مکانیکی بتن خودتراکم در دو سری از روش باکس بنکن استفاده شده است. عامل‌های مورد بررسی در سری اول عبارتند از: میکروسیلیس (SF)، درشت‌دانه (RCA-SS) و ریزدانه‌ی بازیافتی با منشا مقاومتی مشخص (RFA-SS) حاصل از بتن با مقاومت ۳۰ مگاپاسکال و در سری دوم میکروسیلیس (SF)، درشت‌دانه (RCA-K) و ریزدانه‌ی بازیافتی (RFA-K) با منشا مقاومتی نامشخص جمع‌آوری شده از سطح کلانشهر کرمانشاه به عنوان متغیرهای مورد بررسی انتخاب گردیده‌اند. در هر دو سری متغیرهای مورد مطالعه در سه سطح متفاوت مطابق جدول ۴ تغییر می‌کنند. آزمایشات جریان اسلامپ و قیف V 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. طرح‌های اختلاط مورد بررسی در جدول ۵ آورده شده است. جهت حصول کارآیی مخلوط‌های مورد بررسی، مقدار نسبت آب به مواد سیمانی با بررسی پژوهش‌های پیشین و انجام پیش‌آزمایش‌هایی تعیین گردید. تعداد طرح‌های اختلاط برای هر سری از سنگدانه‌ها با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$\text{Number of Experiments} = 2k(k-1) + C_0 \rightarrow 2 \times 3(3-1) + 5 = 17 \quad (2)$$

در رابطه فوق k تعداد متغیرهای مورد بررسی و C_0 تعداد نقاط مرکزی به منظور کاهش خطای احتمالی در حین آزمایش‌ها می‌باشد.

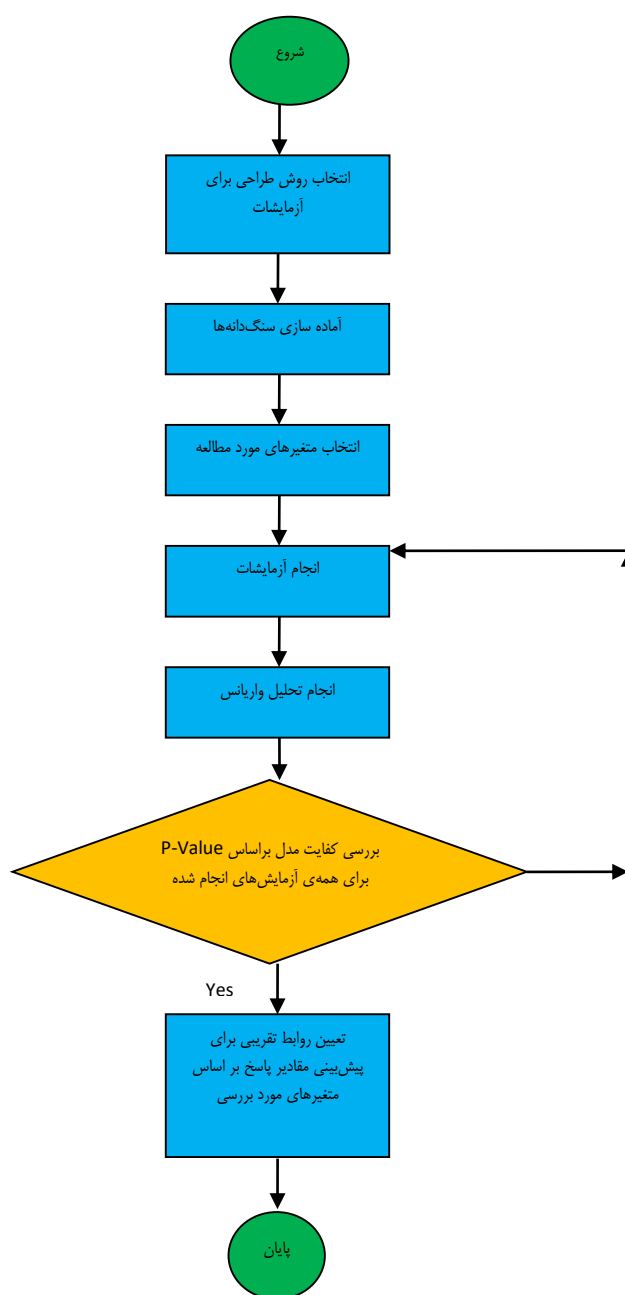
جدول ۴- فاکتورهای مورد بررسی

طرح‌های سری اول	متغیرها	نام متغیر	بصورت کدی	سطوح		
				۱	۰	-۱
طرح‌های سری دوم	SF (%)	X1		۱۵	۱۰	۵
	RCA-SS (%)	X2		۵۰	۲۵	۰
	RFA-SS (%)	X3		۵۰	۲۵	۰
	SF (%)	X1		۱۵	۱۰	۵
	RCA-K (%)	X2		۵۰	۲۵	۰
	RFA-K (%)	X3		۵۰	۲۵	۰

در مقاله حاضر در هر دو سری، میکروسیلیس در محدوده ۱۵٪-۵ به صورت وزنی جایگزین سیمان، درشت‌دانه و ریزدانه‌ی بازیافتی در محدوده‌ی ۵۰٪-۰ جایگزین مصالح طبیعی به صورت وزنی شده است. طرح اختلاط‌های مورد بررسی براساس جدول‌های ۱ و ۴ تهیه شده-

اند. توضیح اینکه در خصوص نامگذاری طرحها با توجه به جدولهای ۱ و ۴ که بصورت کدی و درصدی مقادیر متغیرها نوشته شدهاند. به طور مثال در طرح SF10RC0RF0-SS، X1 مربوط به میکروسیلیس و برابر با ۱۰ درصد وزن سیمان، X2 و X3 مربوط به درشتدانه و ریزدانه بازیافتی با منشا مشخص بوده که به صورت کدی ۱- و به مقدار صفر درصد جایگزین شدهاند.

برای ساخت نمونهها مکعبی از قالبهای ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی متر و برای نمونههای استوانه‌ای از قالبهای ۱۵×۳۰ سانتی متر استفاده گردیده است. پس از ساخت نمونهها تا زمان انجام آزمایش در حوضچه‌ی آب با دمای 2 ± 23 درجه‌ی سانتی‌گراد عمل‌آوری شده‌اند. مراحل مقاله در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- مراحل مقاله

جدول ۵- طرح اختلاطهای مورد بررسی (Kg/m³)

ردیف	نام طرح	سیمان	میکرو سیلیس	بودر سنگ	آب	فوق روان کننده	NC	NF	RCA-SS	RFA-SS	RCA-K	RFA-K
MIX1	SF10RC0RF0-SS	363.6	36.4	40	200	5.50	515.2	1197.7	0.00	0.00	-	-
MIX 2	SF10RC0RF50-SS	363.6	36.4	40	200	5.50	515.2	598.8	0.00	535.3	-	-
MIX 3	SF15RC25RF0-SS	347.8	52.2	40	200	5.50	385.1	1202.7	116.7	0.00	-	-
MIX 4	SF15RC0RF25-SS	347.8	52.2	40	200	5.50	513.5	902.0	0.00	266.7	-	-
MIX 5	SF10RC25RF25-SS	363.6	36.4	40	200	5.50	386.4	905.1	117.1	267.6	-	-
MIX 6	SF10RC50RF0-SS	363.6	36.4	40	200	5.50	257.6	1206.8	234.2	0.00	-	-
MIX 7	SF5RC25RF0-SS	380.1	19.9	40	200	5.50	387.7	1211.0	117.5	0.00	-	-
MIX 8	SF10RC25RF25-SS	363.6	36.4	40	200	5.50	386.4	905.10	117.1	267.6	-	-
MIX 9	SF10RC25RF25-SS	363.6	36.4	40	200	5.50	386.4	905.10	117.1	267.6	-	-
MIX 10	SF15RC50RF25-SS	347.8	52.2	40	200	5.50	256.7	902.07	233.5	266.7	-	-
MIX 11	SF5RC50RF25-SS	380.1	19.9	40	200	5.50	258.5	908.26	235.1	268.6	-	-
MIX 12	SF5RC25RF50-SS	380.1	19.9	40	200	5.50	387.7	605.50	117.5	537.2	-	-
MIX 13	SF15RC25RF50-SS	347.8	52.2	40	200	5.50	385.1	601.38	116.7	533.5	-	-
MIX 14	SF5RC0RF25-SS	380.1	19.9	40	200	5.50	517.0	908.26	0.00	268.6	-	-
MIX 15	SF10RC25RF25-SS	363.60	36.4	40	200	5.50	386.4	905.10	117.1	267.6	-	-
MIX 16	SF10RC25RF25-SS	363.60	36.4	40	200	5.50	386.4	905.10	117.1	267.6	-	-
MIX 17	SF10RC50RF50-SS	363.6	36.4	40	200	5.50	257.6	603.40	234.2	535.3	-	-
MIX 18	SF10RC0RF0-K	363.6	36.4	40	200	5.50	515.2	1197.7	-	-	0.00	0.00
MIX 19	SF10RC0RF50-K	363.6	36.4	40	200	5.50	515.2	598.8	-	-	0.00	526.27
MIX 20	SF15RC25RF0-K	347.8	52.2	40	200	5.50	385.1	1202.7	-	-	112.88	0.00
MIX 21	SF15RC0RF25-K	347.8	52.2	40	200	5.50	513.5	902.0	-	-	0.00	262.26
MIX 22	SF10RC25RF25-K	363.6	36.4	40	200	5.50	386.4	905.1	-	-	113.26	263.14
MIX 23	SF10RC50RF0-K	363.6	36.4	40	200	5.50	257.6	1206.8	-	-	226.52	0.00
MIX 24	SF5RC25RF0-K	380.1	19.9	40	200	5.50	387.7	1211.0	-	-	113.65	0.00
MIX 25	SF10RC25RF25-K	363.6	36.4	40	200	5.50	386.4	905.10	-	-	113.26	263.14
MIX 26	SF10RC25RF25-K	363.6	36.4	40	200	5.50	386.4	905.10	-	-	113.26	263.14
MIX 27	SF15RC50RF25-K	347.8	52.2	40	200	5.50	256.7	902.07	-	-	225.76	262.26
MIX 28	SF5RC50RF25-K	380.1	19.9	40	200	5.50	258.5	908.26	-	-	227.31	264.05
MIX 29	SF5RC25RF50-K	380.1	19.9	40	200	5.50	387.7	605.50	-	-	113.65	528.11
MIX 30	SF15RC25RF50-K	347.80	52.2	40	200	5.50	385.1	601.38	-	-	112.88	524.51
MIX 31	SF5RC0RF25-K	380.1	19.9	40	200	5.50	517.0	908.26	-	-	0.00	264.05
MIX 32	SF10RC25RF25-K	363.6	36.4	40	200	5.50	386.4	905.10	-	-	113.26	263.14
MIX 33	SF10RC25RF25-K	363.6	36.4	40	200	5.50	386.4	905.10	-	-	113.26	263.14
MIX 34	SF10RC50RF50-K	363.6	36.4	40	200	5.50	257.6	603.40	-	-	208.9	461.2

سری اول - سنگدانه بازیافتی با مقاومت مشخص

سری دوم - سنگدانه های بازیافتی کرمانشاه

جدول ۶ - نتایج آزمایشات

ردیف	نام طرح	قیف V (ثانیه)	جریان اسلامپ (میلیمتر)	مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm^2)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm^2)	مقاومت کششی ۷ روزه (kg/cm^2)	مقاومت کششی ۲۸ روزه (kg/cm^2)
سری اول - سنگدانه‌های بازیافتی با مقاومت مشخص							
MIX 1	SF10RC0RF0-SS	5.1	705	335	430	24.2	31
MIX 2	SF10RC0RF50-SS	5.99	620	261	339	17.63	23.73
MIX 3	SF15RC25RF0-SS	6.12	640	338	445	23.1	30.8
MIX 4	SF15RC0RF25-SS	6.08	635	308	390	21.02	26.8
MIX 5	SF10RC25RF25-SS	6.05	635	278	370	19.82	25.87
MIX 6	SF10RC50RF0-SS	6.02	600	291	378	19.5	25.32
MIX 7	SF5RC25RF0-SS	5.35	695	305	391	20.91	27
MIX 8	SF10RC25RF25-SS	5.99	640	276	363	19.38	25.7
MIX 9	SF10RC25RF25-SS	6.18	635	280	372	20.23	27
MIX 10	SF15RC50RF25-SS	6.59	580	276	368	19.56	26.12
MIX 11	SF5RC50RF25-SS	6.01	605	240	306	16.09	21.5
MIX 12	SF5RC25RF50-SS	6.72	600	252	324	16.96	22.82
MIX 13	SF15RC25RF50-SS	6.9	580	253	334	17.8	23.73
MIX 14	SF5RC0RF25-SS	5.68	670	246	310	18.12	22.95
MIX 15	SF10RC25RF25-SS	6.05	642	294	377	21.57	27.74
MIX 16	SF10RC25RF25-SS	6.19	637	274	364	19.3	25.67
MIX 17	SF10RC50RF50-SS	7.9	550	232	303	15.88	20.73
سری دوم - سنگدانه‌های بازیافتی کرمانشاه							
MIX 18	SF10RC0RF0-K	5	700	331	425	24.11	32
MIX 19	SF10RC0RF50-K	6.1	610	256	315	18	22.1
MIX 20	SF15RC25RF0-K	5.95	620	307	410	22.57	30.7
MIX 21	SF15RC0RF25-K	6	640	282	358	19.95	25.2
MIX 22	SF10RC25RF25-K	6	620	277	365	19.45	25.5
MIX 23	SF10RC50RF0-K	5.9	635	270	359	18.96	25.4
MIX 24	SF5RC25RF0-K	5.2	685	268	351	18.12	23.8
MIX 25	SF10RC25RF25-K	6.05	620	281	359	20.45	26.2
MIX 26	SF10RC25RF25-K	6.12	620	268	348	18.09	23.6
MIX 27	SF15RC50RF25-K	6.13	620	247	330	17.22	23.1
MIX 28	SF5RC50RF25-K	6.2	620	227	288	14.95	19
MIX 29	SF5RC25RF50-K	7.2	590	228	304	14.96	20
MIX 30	SF15RC25RF50-K	7.52	565	254	333	16.66	21.9
MIX 31	SF5RC0RF25-K	5.51	670	219	285	15.21	19.9
MIX 32	SF10RC25RF25-K	6	620	274	357	17.77	23.2
MIX 33	SF10RC25RF25-K	6	620	278	352	19.02	24.2
MIX 34	SF10RC50RF50-K	7.82	535	217	275	14.86	19.2

۵- تجزیه و تحلیل آزمایش‌ها

نتایج آزمایشات جریان اسلامپ، قیف V، مقاومت فشاری و کششی ۷ و ۲۸ روزه در جدول ۶ آورده شده است. توضیح این نکته لازم است که مدل‌ها با توجه به مقادیر نتایج آزمایشات ارائه شده در جدول ۶ ساخته شده‌اند. تحلیل ANOVA توسط نرم‌افزار Design

Expert12 و Minitab 19 انجام شده است [۱۹ و ۲۰]. بعد از انجام آزمایشات، مقادیر حاصله از آزمایشات برای انجام تحلیل‌های عددی به نرم‌افزارهای ذکر شده وارد گردیده و بر روی تمام آزمایشات تحلیل ANOVA صورت پذیرفته و روابط تقریبی به منظور پیش‌بینی پاسخ آزمایشات براساس متغیرهای مورد بررسی ارائه شده است. همچنین 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 گردیده است. مقدار p-value بیانگر معنی‌داری پارامترهای تعریف شده‌ی 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. علاوه بر این هر پارامتر F-Value نشان دهنده میزان تاثیرگذاری متغیر مورد بررسی بر روی پاسخ می‌باشد. به صورتی که هر چقدر این پارامتر بیشتر باشد متغیر مورد نظر تاثیر بیشتری بر روی پاسخ خواهد داشت. همچنین ضریب R^2 نشان دهنده‌ی هم‌بستگی بین داده‌های آزمایشگاهی و پاسخ‌های پیش‌بینی شده بوده، که مقدار این ضریب هر چقدر به عدد یک نزدیک‌تر باشد مدل ارائه شده از دقت بالاتری برخوردار خواهد بود [۲۱].

۶- آزمایش‌های بتن تازه و سخت شده

به منظور بررسی تاثیر سنگ‌دانه‌های بازیافتی بر روی خواص رئولوژیکی و مکانیکی مخلوط‌های مورد بررسی آزمایش‌های جریان اسلامپ، قیف V، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه و مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه انجام گرفته و نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است. بر روی نتایج تمامی آزمایش‌ها به منظور بررسی تاثیر هر یک از متغیرهای مورد بررسی، تحلیل واریانس (ANOVA) انجام گرفته و نتایج آن برای هر دو سری سنگدانه‌های بازیافتی ارائه شده است.

۶-۱- جریان اسلامپ

شاخص جریان اسلامپ، معیاری مناسبی برای قابلیت جریان و پراکنندگی بتن خودتراکم می‌باشد. مطابق روابط ۳ و ۴ می‌توان مقادیر جریان اسلامپ را برای هر دو سری از سنگدانه‌ها با استفاده از یک تابع درجه دو پیش‌بینی نمود. مقادیر جریان اسلامپ برای سنگدانه‌های با مقاومت مشخص در محدوده ۷۰۵-۵۵۰ میلی‌متر و برای سنگدانه‌های بازیافتی کرمانشاه ۷۰۰-۵۳۵ میلی‌متر حاصل گردیده است. بر روی هر دو سری از سنگدانه‌ها تحلیل‌های آماری صورت پذیرفته و نتایج آن در جدول‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. مدل و ضرایب ارائه شده در این جدول‌های، با مقدار $p\text{-value} < 0.05$ معنی‌دار است. در جدول‌های زیر پارامتر F-Value نشان دهنده‌ی میزان تاثیرگذاری هر یک از متغیرهای مورد بررسی بر روی پاسخ مورد مطالعه می‌باشد.

جدول ۷- نتایج تحلیل واریانس برای آزمایش جریان اسلامپ با سنگدانه‌های بازیافتی با مقاومت مشخص

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	25249.07	9	2805.45	39.67	< 0.0001
X1	2278.12	1	2278.12	32.21	0.0008
X2	10878.12	1	10878.12	153.82	< 0.0001
X3	10512.50	1	10512.50	148.65	< 0.0001
X1.X2	25.00	1	25.00	0.3535	0.5708
X1.X3	306.25	1	306.25	4.33	0.0760
X2.X3	306.25	1	306.25	4.33	0.0760
X1.X1	29.57	1	29.57	0.4181	0.5385
X2.X2	673.78	1	673.78	9.53	0.0177
X3.X3	172.46	1	172.46	2.44	0.1623
Residual	495.05	7	70.72		
R-Squared	98.08%				
Adj R-Squared	95.60%				
Pure Error	38.80	4	9.70		
Cor Total	25744.12	16			

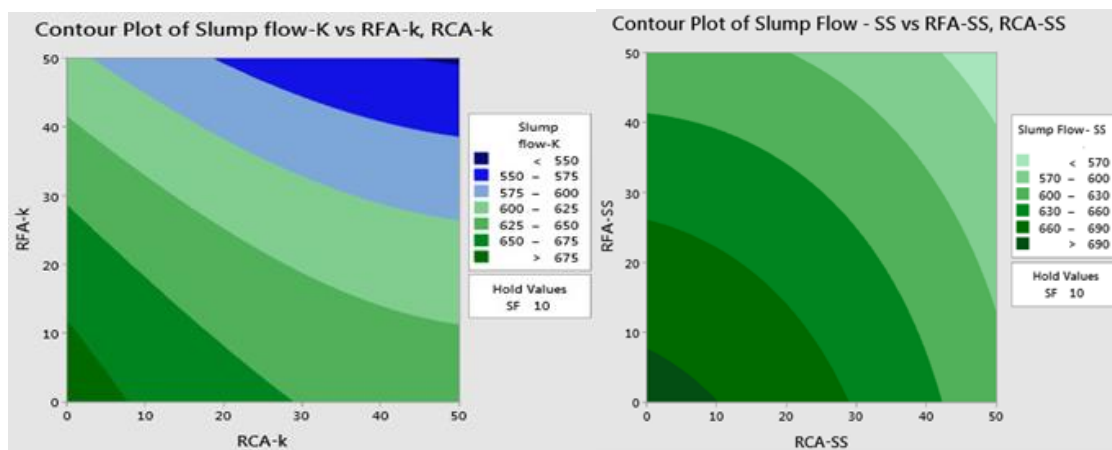
$$Slump\ Flow - ss = 753 - 5.21X1 - 0.77X2 - 2.5X3 + 0.07X1X3 + 0.01X1X2 - 0.02X2^2 \quad (3)$$

جدول ۸- نتایج تحلیل واریانس برای آزمایش جریان اسلامپ با سنگدانه‌های بازیافتی کرمانشاه

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	24004.55	9	2667.17	19.34	0.0004
X1	1711.12	1	1711.12	12.41	0.0097
X2	5778.12	1	5778.12	41.89	0.0003
X3	15138.00	1	15138.00	109.76	< 0.0001
X1.X2	156.25	1	156.25	1.13	0.3225
X1.X3	256.00	1	256.00	1.86	0.2153
X2.X3	25.00	1	25.00	0.1813	0.6831
X1.X1	196.13	1	196.13	1.42	0.2719
X2.X2	406.44	1	406.44	2.95	0.1297
X3.X3	374.02	1	374.02	2.71	0.1436
Residual	965.45	7	137.92		
R-Squared	96.13%				
Adj R-Squared	91.16%				
Pure Error	33.20	4	8.30		
Cor Total	24970.00	16			

$$Slump\ Flow - K = 746 - 8.38X1 - 1.86X2 - 0.98X3 + 0.27X1^2 + 0.01X2^2 - 0.01X3^2 \quad (4)$$

با بررسی مقادیر F-Value در جداول ۷ و ۸ مشاهده می‌گردد که در هر دو سری از سنگدانه‌ها ریزدانه‌ی بازیافتی بیشترین تاثیر را بر روی جریان اسلامپ داشته است. با بررسی کران‌نماهای شکل ۵ مشاهده می‌گردد که افزایش سنگدانه‌های بازیافتی در هر دو سری، جریان اسلامپ مخلوط‌های مورد بررسی کاهش می‌یابد. در حالی که با بررسی هر دو کران‌نما مشاهده می‌گردد که پاسخ آزمایش جریان اسلامپ نسبت به تغییرات سنگدانه‌های بازیافتی کرمانشاه حساس‌تر است. سنگدانه‌های بازیافتی در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی تیز گوشه هستند، که این عامل موجب کاهش جریان اسلامپ در مخلوط‌های مورد بررسی شده است [۲۲]. از دلایل دیگر برای کاهش جریان اسلامپ با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی می‌توان به چگالی کم سنگدانه‌های بازیافتی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی اشاره نمود. با افزایش میزان جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، چگالی بتن حاصله کاهش یافته و در نتیجه جریان اسلامپ کاهش می‌یابد. که تحقیقات دیگر نیز به نتایج مشابهی دست یافته‌اند [۲۳].



ب

الف

شکل ۵- الف) کران نما تاثیر برهمکنش ریزدانه و درشت‌دانه‌ی بازیافتی با منشا مشخص بر روی جریان اسلامپ ب) کران نما تاثیر برهمکنش ریزدانه و درشت‌دانه‌ی بازیافتی کرمانشاه بر روی جریان اسلامپ (mm)

کران نما الف در شکل ۵، برای متغیرهای درشت‌دانه‌ی بازیافتی و ریزدانه‌ی بازیافتی با منشا مقاومتی مشخص با در نظر گرفتن ۱۰ درصد میکروسیلیس رسم شده است. با بررسی کران‌نماهای شکل ۵ مشاهده می‌گردد می‌توان با جایگزینی حدود ۳۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی با منشا مقاومتی مشخص و ۲۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی کرمانشاه به سطح SF2 آیین نامه EFNARC دست یافت [۲۴].

۶-۲- آزمایش قیف V

آزمایش قیف V به عنوان معیاری برای تعیین قابلیت پرکنندگی و لزجت خمیری بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. زمان جریان قیف V، برای ۳۴ مخلوط در جدول ۶ ارائه شده است. زمان قیف V برای مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی با منشا مشخص در بازه ۵/۱ تا ۷/۹ ثانیه و برای مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی کرمانشاه ۵ تا ۷/۸۲ ثانیه می‌باشد. بعد از انجام تحلیل ANOVA یک تابع چند جمله‌ای درجه دو برای قیف V برای هر دو سری از سنگدانه‌ها تعیین گردیده است. جدول‌های ۹ و ۱۰ مقادیر مربوط به عامل‌های تاثیرگذار و همچنین کلیه‌ی اندرکنش‌های تاثیرگذار بر مقدار پاسخ این آزمایش نشان می‌دهد. مدل به دست آمده برای سنگدانه‌های بازیافتی با منشا مقاومتی مشخص دارای ضریب R^2 ۹۰/۷۶٪ و R^2 تعدیل یافته ۷۸/۸۷٪ و برای سنگدانه‌های بازیافتی کرمانشاه مقدار R^2 و R^2 تعدیل یافته به ترتیب ۹۴/۱۱٪ و ۸۶/۵۵٪ حاصل شده است. بر اساس مقادیر F-Value جدول ANOVA، موثرترین متغیر بر مقدار پاسخ قیف V، ریزدانه‌ی بازیافتی می‌باشد.

جدول ۹- نتایج تحلیل واریانس برای آزمایش قیف V با سنگدانه‌های بازیافتی با مقاومت مشخص

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	5.64	9	0.6267	7.64	0.0069
X1	0.4656	1	0.4656	5.67	0.0487
X2	1.68	1	1.68	20.52	0.0027
X3	3.03	1	3.03	36.87	0.0005
X1.X2	0.0081	1	0.0081	0.0987	0.7625
X1.X3	0.0870	1	0.0870	1.06	0.3374
X2.X3	0.2450	1	0.2450	2.99	0.1276
X1.X1	0.0003	1	0.0003	0.0042	0.9504
X2.X2	0.0005	1	0.0005	0.0062	0.9394
X3.X3	0.1238	1	0.1238	1.51	0.2590
Residual	0.5745	7	0.0821		
R-Squared	90.76%				
Adj R-Squared	78.87%				
Pure Error	0.0313	4	0.0078		
Cor Total	6.21	16			

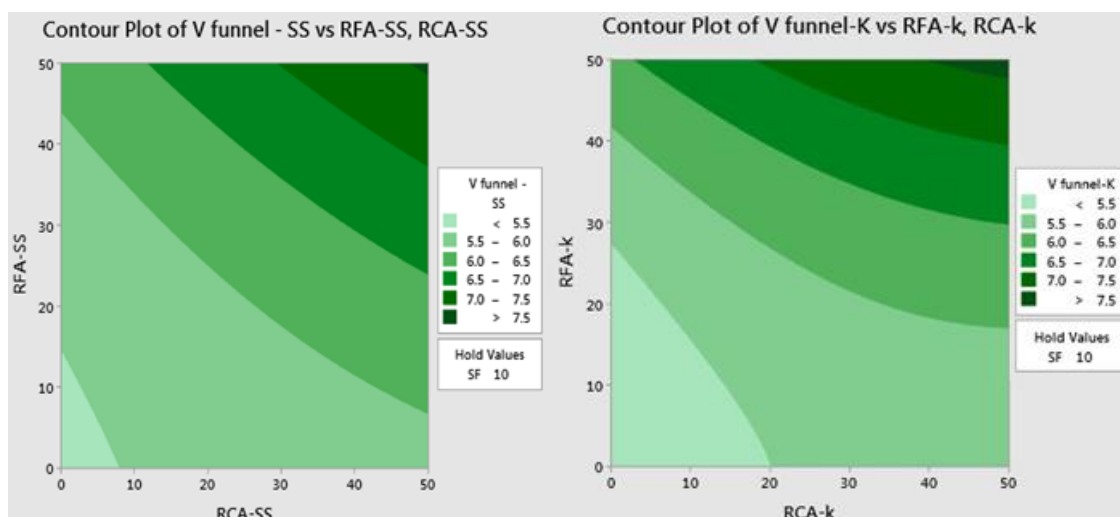
$$V \text{ Funnel} - SS = 4.65X1 + 0.07X2 + 0.008X2 + 0.01X3 - 0.001X1X3$$

جدول ۱۰- نتایج تحلیل واریانس برای آزمایش قیف V با سنگدانه‌های بازیافتی کرمانشاه

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	8.10	9	0.9004	12.44	0.0016
X1	0.2775	1	0.2775	3.83	0.0911
X2	1.48	1	1.48	20.43	0.0027
X3	5.43	1	5.43	74.99	< 0.0001
X1.X2	0.0784	1	0.0784	1.08	0.3326
X1.X3	0.0462	1	0.0462	0.6385	0.4505
X2.X3	0.1681	1	0.1681	2.32	0.1714
X1.X1	0.0374	1	0.0374	0.5167	0.4956
X2.X2	0.1192	1	0.1192	1.65	0.2403
X3.X3	0.4846	1	0.4846	6.69	0.0361
Residual	0.5067	7	0.0724		
R-Squared	94.11%				
Adj R-Squared	86.55%				
Lack of Fit	0.4956	3	0.1652	59.43	0.0009
Pure Error	0.0111	4	0.0028		
Cor Total	8.61	16			

$$V \text{ Funnel} - K = 4.91 + 0.03X1 + 0.009X2 - 0.002X3$$

با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، روانی مخلوط‌های مورد بررسی کاهش یافته است. به طوری که با کاهش روانی مخلوط‌ها مدت زمان خروج بتن از قیف V افزایش یافته است. این افزایش را می‌توان به شکسته بودن و تیز گوشه بودن سنگدانه‌های بازیافتی نسبت داد. از دلایل دیگر برای این افزایش می‌توان به افزایش اصطکاک داخلی مخلوط‌ها با افزایش درصد جایگزینی مصالح بازیافتی اشاره نمود. درصد‌های جایگزینی مورد مطالعه برای هر دو سری از سنگدانه‌های سطح VS1/VF1 آیین‌نامه‌ی EFNARC را برآورده کرده‌اند [۲۴]. همچنین در تمامی طرح‌ها علاوه بر این که پدیده‌ی انسداد مشاهده نگردید، سرعت خروج بتن از قیف V یکنواخت بوده که نشان دهنده‌ی یکنواخت بودن مخلوط‌های بتن بوده است.



ب

الف

شکل ۶- الف) کران نما تاثیر برهمکنش ریزدانه و درشت دانه‌ی بازیافتی با منشا مشخص بر روی کیف V ب) کران نما تاثیر برهمکنش ریزدانه و درشت دانه‌ی بازیافتی کرمانشاه بر روی کیف V (S)

۳-۶- مقاومت فشاری

جدول ۶ مقاومت فشاری متوسط مخلوطها را در سنین ۷ و ۲۸ روزه ارائه می‌دهد. نتایج حاصل از تحلیل ANOVA نشان می‌دهد که از بین عامل‌های مورد مطالعه، ریزدانه‌ی بازیافتی و میکروسیلیس به عنوان تاثیرگذارترین متغیر شناسایی شده‌اند. مقدار ضریب R^2 برای سنگدانه‌های بازیافتی با منشا مقاومتی مشخص و سنگدانه‌های بازیافتی کرمانشاه به ترتیب $94/62\%$ و $93/57\%$ حاصل شده است.

جدول ۱۱- نتایج تحلیل واریانس مصالح با مقاومت مشخص برای آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	24502.32	9	2722.48	13.67	0.0012
X1	5304.50	1	5304.50	26.64	0.0013
X2	1624.50	1	1624.50	8.16	0.0245
X3	14792.00	1	14792.00	74.29	< 0.0001
X1.X2	81.00	1	81.00	0.4068	0.5439
X1.X3	484.00	1	484.00	2.43	0.1629
X2.X3	64.00	1	64.00	0.3214	0.5885
X1.X1	227.46	1	227.46	1.14	0.3206
X2.X2	1417.78	1	1417.78	7.12	0.0321
X3.X3	571.46	1	571.46	2.87	0.1341
Residual	1393.80	7	199.11		
R-Squared	94.62%				
Adj R-Squared	87.70%				
Pure Error	134.80	4	33.70		
Cor Total	25896.12	16			

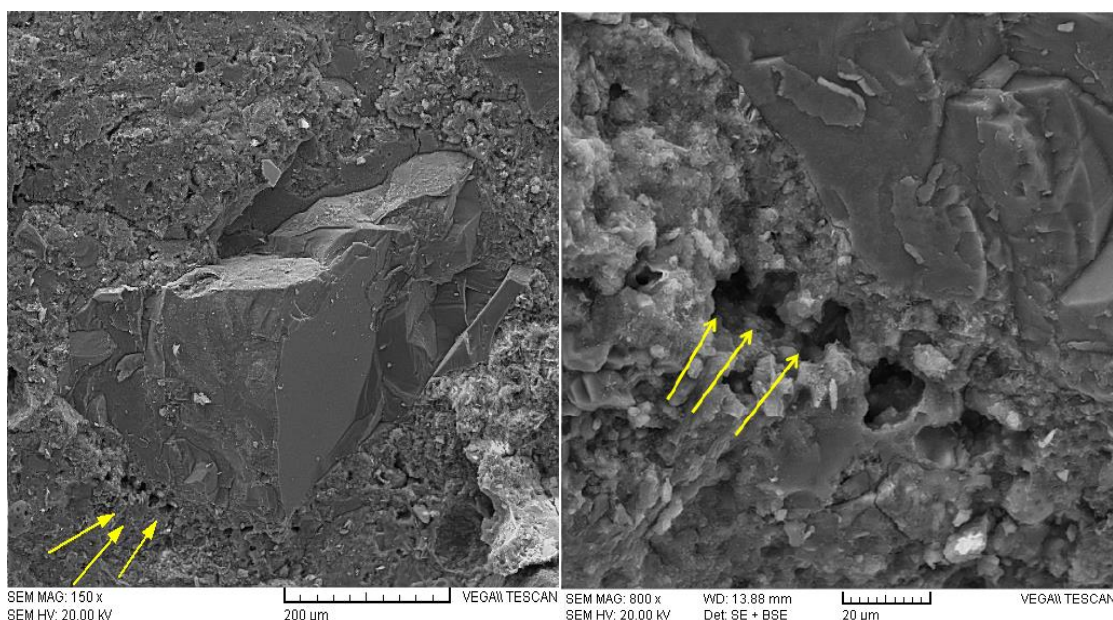
$$F_c - SS28 = 275.57 + 18.6X_1 + 1.17X_2 - 1.59X_3 - 0.678X_1^2 - 0.03X_2^2$$

جدول ۱۲- نتایج تحلیل واریانس مصالح کرمانشاه برای آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	24675.45	9	2741.72	11.33	0.0021
X1	5151.13	1	5151.13	21.28	0.0024
X2	2145.13	1	2145.13	8.86	0.0206
X3	12640.50	1	12640.50	52.22	0.0002
X1.X2	240.25	1	240.25	0.9924	0.3523
X1.X3	225.00	1	225.00	0.9295	0.3671
X2.X3	169.00	1	169.00	0.6981	0.4310
X1.X1	1285.79	1	1285.79	5.31	0.0546
X2.X2	2320.32	1	2320.32	9.58	0.0174
X3.X3	488.84	1	488.84	2.02	0.1983
Residual	1694.55	7	242.08		
R-Squared	93.57%				
Adj R-Squared	85.31%				
Pure Error	170.80	4	42.70		
Cor Total	26370.00	16			

$$F_c - k28 = 342.28 + 7.35X_1 + 0.92X_2 - 1.74X_3 - 0.088X_1X_3 - 0.03X_2^2 + 0.01X_3^2$$

نتایج ارائه شده در جدول ۶ نشان دهنده این است که همه بتن‌های ساخته شده با مصالح بازیافتی جزو بتن‌های سازه‌ای محسوب می‌شوند، که این موضوع جزو اهداف این مقاله بوده است. بدون در نظر گرفتن اندازه‌ی سنگدانه‌هایی که جایگزین شده‌اند، مقاومت فشاری با افزودن سنگدانه‌های بازیافتی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج آزمایش جذب آب سنگدانه‌ها که در جدول ۲ ارائه شده است، با افزایش درصد جایگزینی مصالح بازیافتی، مخلوط‌ها برای دستیابی به جریان اسلامپ مطلوب، به آب بیشتری نیاز دارند و با توجه به ثابت بودن نسبت آب به مواد سیمانی برای تمامی طرح‌ها مشاهده گردیده است که در مخلوط‌های حاوی درصد‌های بالای مصالح بازیافتی نمونه‌ها دارای تخلخل بیشتری بوده‌اند، که شکل ۷ مبین این مطلب است.



شکل ۷- مشاهده‌ی ریز تخلخل‌ها با ۵۰ درصد مصالح بازیافتی کرمانشاه

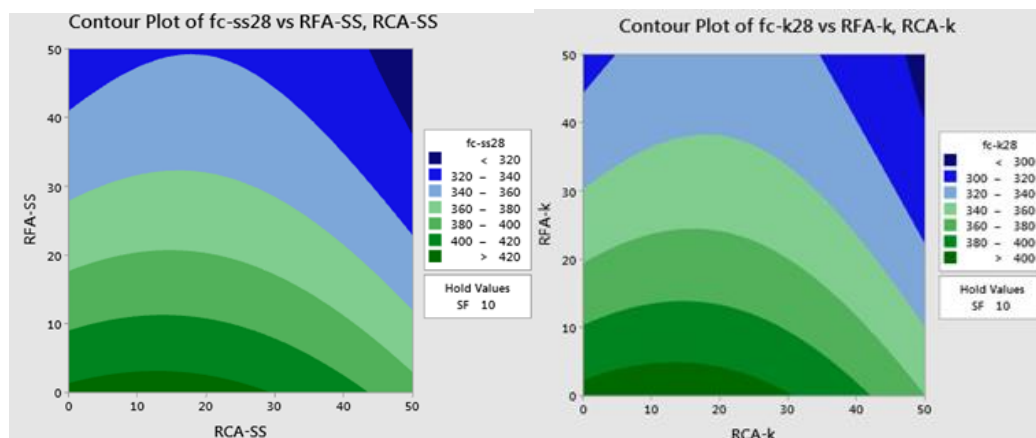
یکی از عواملی که بر کاهش مقاومت فشاری موثر است، منبع سنگدانه‌های بازیافتی می‌باشد. از آنجا که سنگدانه‌های بازیافتی کرمانشاه به صورت تصادفی از نخاله‌های ساختمانی سطح شهر جمع آوری شده‌اند، ترکیب آن‌ها با توجه به منبع آن‌ها متفاوت است. در سری اول، مخلوط ۱۷ با ۵۰٪ مصالح بازیافتی در مقایسه با مخلوط ۱ بدون مصالح بازیافتی، ۳۰٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه کاهش یافته است، در حالی که در سری دوم، مخلوط ۳۴ در مقایسه با مخلوط ۱۸ این کاهش به ۳۶٪ رسیده است. این نتایج با توجه به نتایج آزمایشات ارائه شده در جدول ۲ از قبیل لس‌آنجلس توجیه می‌شود. در مخلوط‌های با ریزدانه بازیافتی کرمانشاه، افت مقاومت فشاری ۲۸ روزه بیشتر از ریزدانه‌های بازیافتی از نوع منشا مشخص است. این افت مقاومت فشاری بیشتر، اساساً به دلیل حجم رس و مواد زیان‌آور موجود در آن‌ها می‌باشد که در تحقیقات دیگر به نتایج مشابه رسیده‌اند [۲۵]. این ذرات ریزدانه، سطح سنگدانه‌های بازیافتی را می‌پوشانند و آب مخلوط را جذب می‌کنند، علاوه بر این مانع پیوند مناسب بین سنگدانه‌های بازیافتی و خمیر سیمان شده و منجر به ایجاد ساختار داخلی ضعیف در سیمان می‌شوند [۲۶ و ۲۷]. در واقع این عوامل موجب می‌گردند پیوند ضعیفی بین بتن ناحیه‌ی انتقالی ITZ (فصل مشترک سنگدانه و خمیر سیمان) قدیمی و ناحیه انتقالی ITZ جدید ایجاد شود، که با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، این پدیده خود را بیشتر نمایان کرده و موجب گردیده پیوند مذکور ضعیف‌تر شود و در نتیجه مقاومت فشاری مخلوط‌ها افت بیشتری پیدا می‌کنند [۲۸ و ۲۹]. از طریق میکروسکوپ الکترونی روبشی ۵ ثابت شد که این پدیده‌ها باعث افزایش تخلخل این مخلوط‌ها و منجر به کاهش مقاومت فشاری آن‌ها شده است. به صورت کلی می‌توان گفت با توجه به اینکه هنگام استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی با منشا مقاومتی مشخص اطلاعات مشخصات مکانیکی و بخصوص مقاومتی آن قابل دسترسی است و بر آن اساس می‌توان طرح اختلاط مناسب را پیشنهاد داد. در حالی که هنگام استفاده از سنگدانه‌های با منشا مقاومتی نامشخص با قبول یک خطای احتمالی طرح‌های اختلاط طراحی می‌گردد، که نتایج مقاله حاضر بر وجود این خطای احتمالی صحه می‌گذارد. بنابراین با توجه به اینکه حدود ۸۰ درصد حجم بتن را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهند، الزام است که در طرح اختلاط بتن‌های خودتراکم با مصالح بازیافتی مشخصات مکانیکی و بخصوص مقاومت سنگدانه‌ها قبل از طرح اختلاط مشخص گردد.

اندازه‌ی سنگدانه‌های بازیافتی عامل دیگری در تأثیرگذاری نتایج بود. با بررسی مقادیر F-Value در جدول‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌گردد که ریزدانه‌ی بازیافتی بیشترین تأثیر را در کاهش مقاومت فشاری مخلوط‌ها را داشته است. به صورتی که تأثیر کاهش افت مقاومت فشاری در مخلوط با سنگدانه‌های بازیافتی ریزدانه به مراتب بیشتر از سنگدانه‌های بازیافتی درشت‌دانه بوده است.

با توجه به کران‌نماهای شکل ۸ برای دست‌یابی به مقاومت فشاری ۳۶۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع با ۱۰ درصد میکروسیلیس در سری اول می‌توان با جایگزینی حدود ۳۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی به این مقاومت دست یافت، در حالی که در سنگدانه‌های بازیافتی کرمانشاه با جایگزینی ۲۰ درصد مصالح بازیافتی می‌توان به این مقاومت رسید.

⁴ - Interfacial Transition Zone

⁵ - Scanning Electron Microscope (SEM)



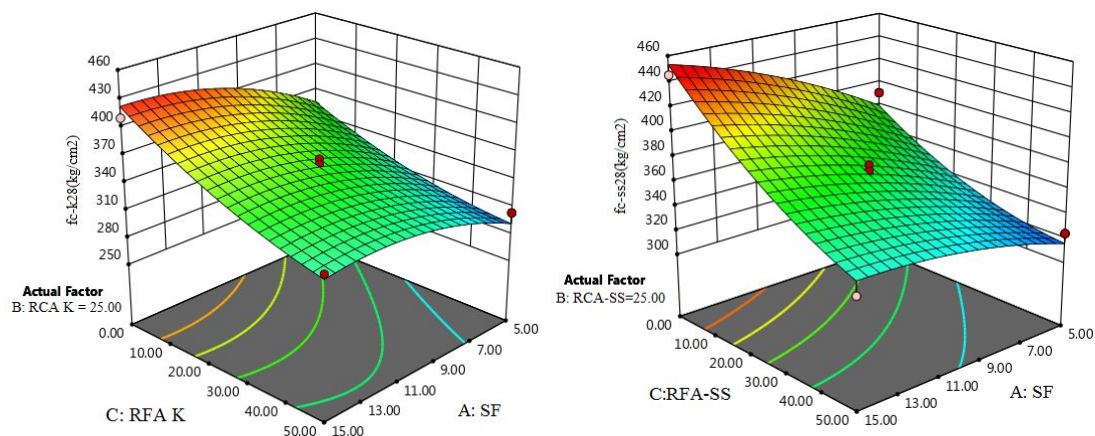
ب

الف

شکل ۸- الف) کران نما تاثیر برهمکنش ریزدانه و درشت دانه بازیافتی با منشا مشخص ب) کران نما تاثیر برهمکنش ریزدانه و درشت دانه بازیافتی

کرمانشاه بر روی مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm^2)

نمودارهای شکل ۹ نشان می‌دهند با افزایش میکروسیلیس، مقاومت فشاری در هر دو سری افزایش یافته است. به طور مثال در طرح‌های ۱۰ و ۱۱ در سری ۱ و ۲ با جایگزینی ۵۰ درصد درشت‌دانه و ۲۵ درصد ریزدانه‌ی بازیافتی با افزایش میکروسیلیس از ۵ به ۱۵ درصد، مقاومت فشاری در سری اول ۲۰ درصد و در سری دوم ۱۴ درصد افزایش یافته است. با مقایسه‌ی نتایج آزمایش مقاومت فشاری مندرج در شکل ۹ می‌توان نتیجه گرفت، که مخلوط‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی با مقاومت مشخص نسبت به سنگدانه بازیافتی کرمانشاه نتایج بهتری از خود نشان داده‌اند. به طور مثال در طرح‌های SF10rc50rf50-K و SF10rc50rf50-SS با ۵۰ درصد جایگزینی ریزدانه و درشت‌دانه و ۱۰ درصد میکروسیلیس حدود ۱۳٪ نمونه‌ی حاوی مصالح بازیافتی کرمانشاه مقاومت کمتری نسبت به نمونه‌ی حاوی مصالح بازیافتی با منشا مشخص داشته است.

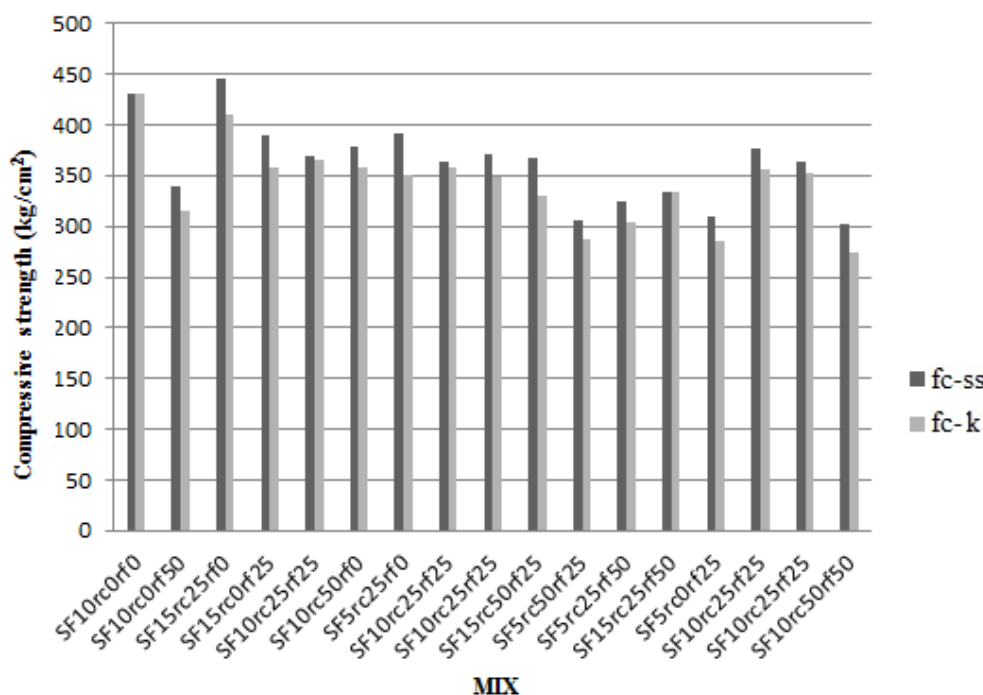


ب

الف

شکل ۹- الف) نمودار سه بعدی تاثیر برهمکنش RFA-SS و میکروسیلیس ب- نمودار سه بعدی تاثیر برهمکنش RFA-K و میکروسیلیس بر روی

مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm^2)



شکل ۱۰ - مقایسه‌ی نتایج مقاومت فشاری ۲۸ برای هر دو سری مصالح بازیافتی

۴-۶ - مقاومت کششی

جهت تعیین مقاومت کششی نمونه‌های مورد مطالعه، برای هر طرح اختلاط در هر دوسری ۳ قالب ۱۵×۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و تحلیل‌های آماری بر مبنای میانگین این ۳ مقدار صورت گرفته است. نتایج تحلیل واریانس آزمایش مقاومت کششی برای هر دو سری در جدول‌های ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است. بررسی مقادیر F-value جداول ANOVA نشان می‌دهد که متغیرهای ورودی ریزدانه‌ی بازیافتی و میکروسیلیس تاثیرگذارترین پارامترها در مقاومت کششی هستند. نتایج آزمایش مقاومت کششی مندرج در جدول ۶ نشان می‌دهد که ترکیب مصالح بازیافتی درشت‌دانه و ریزدانه باعث کاهش مقاومت کششی می‌شود. که نتیجه‌ی حاصله با تحقیقات پیشین مطابقت دارد [۳۰ و ۳۱].

شکل ۱۱ نشان می‌دهد افت مقاومت کششی با افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی افزایش می‌یابد، که این کاهش در ریزدانه‌های بازیافتی بیشتر خود را نمایان نموده است. این مورد به خاطر حجم بالای خاک رس در سنگدانه‌های بازیافتی ریزدانه نسبت به ریزدانه‌های طبیعی است. این افت مقاومت کششی ناشی از کیفیت بد خمیر سیمان و سنگدانه‌های بازیافتی ریزدانه است [۳۲].

همچنین بر اساس شکل ۱۱ مخلوط‌های حاوی مصالح بازیافتی با منشا مشخص نسبت به مصالح بازیافتی کرمانشاه نتایج بهتری از خود نشان داده‌اند. با جایگزینی ۵۰٪ مصالح بازیافتی سری اول، مقاومت کششی از ۳۲ به $۲۰/۷۳$ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع (حدود ۳۵٪) کاهش می‌یابد، در حالی که با جایگزینی همان مقدار از مصالح بازیافتی کرمانشاه مقاومت کششی کاهش ۲۸٪ را از خود نشان می‌دهد. این عملکرد متفاوت تاثیر مقاومت سنگدانه‌های بازیافتی را نشان می‌دهد.

علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهند که ترکیب سنگدانه‌های بازیافتی درشت و ریزدانه باعث کاهش مقاومت کششی شده است. افت مقاومت کششی نیز ناشی از اتصال ضعیف سنگدانه‌های بازیافتی و خمیر سیمان است. با مقایسه طرح‌های ۱ و ۱۸ با طرح‌های ۱۷ و ۳۴ مشاهده می‌گردد که با افزایش درصد جایگزینی ریزدانه‌ی بازیافتی از صفر به ۵۰٪، مقاومت کششی از ۳۱ به $۲۰/۷۳$ در سری اول و از ۳۲ به $۱۹/۲$ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در سری دوم کاهش یافته است. این کاهش مقاومت را می‌توان به همان دلایل کاهش مقاومت فشاری نسبت داد.

جدول ۱۳- نتایج تحلیل واریانس مصالح با مقاومت مشخص برای آزمایش مقاومت کششی

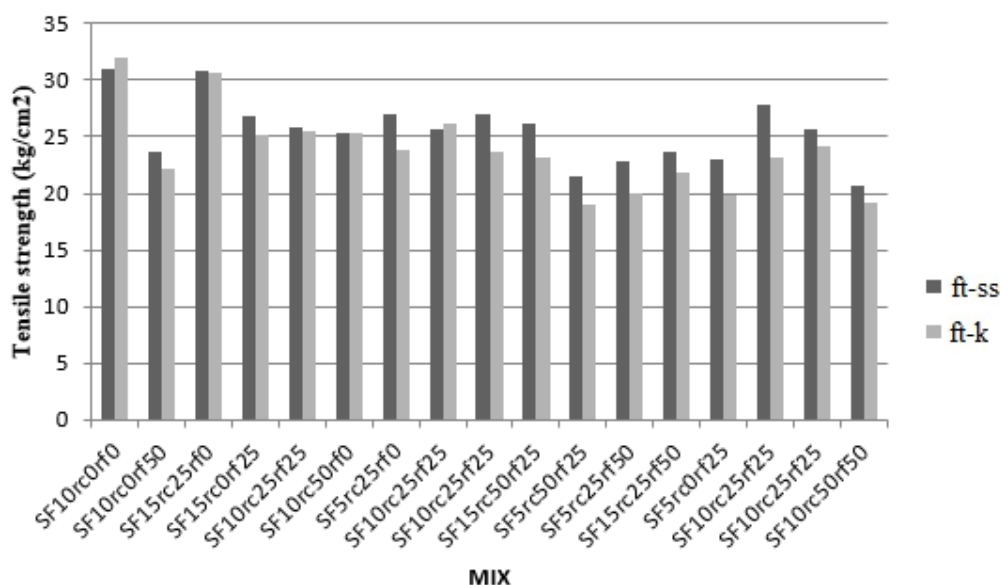
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	118.18	9	13.13	8.64	0.0048
X1	21.71	1	21.71	14.29	0.0069
X2	14.61	1	14.61	9.61	0.0173
X3	66.76	1	66.76	43.94	0.0003
X1.X2	0.1482	1	0.1482	0.0976	0.7639
X1.X3	2.09	1	2.09	1.37	0.2794
X2.X3	1.80	1	1.80	1.18	0.3130
X1.X1	1.42	1	1.42	0.9338	0.3661
X2.X2	9.14	1	9.14	6.01	0.0440
X3.X3	0.3115	1	0.3115	0.2050	0.6644
Residual	10.64	7	1.52		
R-Squared	93.46%				
Adj R-Squared	86.93%				
Pure Error	3.46	4	0.8648		
Cor Total	128.82	16			

$$f_t - ss \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 24.93 + 0.47X_1 + 0.03X_2 - 0.08X_3 - 0.005X_1X_3 + 0.001X_2X_3 - 0.002X_3^2$$

جدول ۱۴- نتایج تحلیل واریانس مصالح کرمانشاه برای آزمایش مقاومت کششی

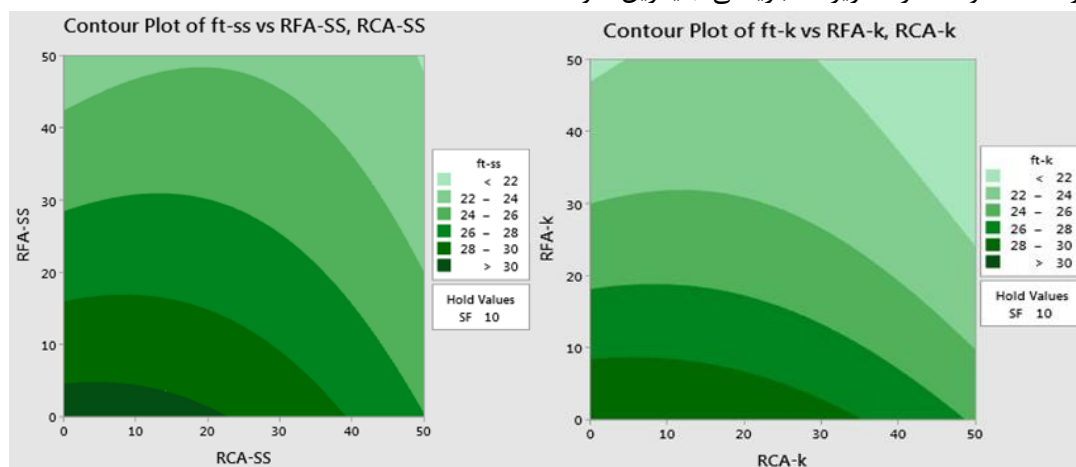
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	196.08	9	21.79	11.44	0.0020
X1	41.41	1	41.41	21.74	0.0023
X2	19.53	1	19.53	10.26	0.0150
X3	102.96	1	102.96	54.07	0.0002
X1.X2	0.3600	1	0.3600	0.1891	0.6768
X1.X3	6.25	1	6.25	3.28	0.1129
X2.X3	3.42	1	3.42	1.80	0.2219
X1.X1	11.57	1	11.57	6.07	0.0432
X2.X2	4.93	1	4.93	2.59	0.1515
X3.X3	6.24	1	6.24	3.28	0.1131
Residual	13.33	7	1.90		
R-Squared	91.74%				
Adj R-Squared	81.13%				
Lack of Fit	6.86	3	2.29	1.41	0.3623
Pure Error	6.47	4	1.62		
Cor Total	209.41	16			

$$f_t - k \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 17.07 + 2.03X_1 - 0.01X_2 - 0.177X_3 - 0.01X_1X_3 + 0.001X_2X_3 - 0.06X_1^2 + 0.06X_3^2$$



شکل ۱۱- مقایسه‌ی نتایج مقاومت کششی ۲۸ روزه برای هر دو سری مصالح بازیافتی

کران‌نما شکل ۱۲ اندرکنش ریزدانه و درشت‌دانه‌ی بازیافتی را در هر دو سری از سنگدانه‌ها برای مقاومت کششی نشان می‌دهند. مشاهده می‌گردد که برای دستیابی به مقاومت کششی بالاتر از ۲۶ کیلوگرم بر سانتی‌مربع برای مصالح بازیافتی سری ۱ می‌توان ۳۰ درصد درشت‌دانه و ۲۵ درصد ریزدانه‌ی بازیافتی جایگزین نمود. در حالی که برای حصول این مقاومت کششی با مصالح بازیافتی سری ۲ می‌توان تا ۳۰ درصد درشت‌دانه و ۲۰ درصد ریزدانه بازیافتی جایگزین نمود.



ب

الف

شکل ۱۲- الف) کران‌نما تاثیر برهمکنش ریزدانه و درشت‌دانه‌ی بازیافتی با منشا مشخص ب- کران‌نما تاثیر برهمکنش ریزدانه و درشت‌دانه‌ی بازیافتی کرمانشاه بر روی مقاومت کششی (kg/cm^2)

۷- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر دو نوع سنگدانه‌ی بازیافتی با منشا مقاومتی مشخص و نامشخص به همراه میکروسلیس بر روی مشخصات رئولوژیکی و مکانیکی بتن‌های خودتراکم مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین به منظور انجام تحلیل‌های آماری و طراحی مخلوط‌های مورد بررسی از روش باکس بنکن استفاده شده است. با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام گرفته می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

۱- نتایج آزمایش‌ها بیانگر این مهم هستند که باکس بنکن شیوه‌ای مناسب برای ارزیابی رفتارهای رئولوژی و سخت شده‌ی مخلوط‌ها بوده است. همچنین روش باکس بنکن با کاهش تعداد آزمایش‌ها روابطی به منظور پیش‌بینی نتایج ارائه می‌دهد.

۲- با بررسی مقادیر F-value جداول تحلیل واریانس مشاهده گردید که ریزدانه‌ی بازیافتی در هر دو سری از سنگدانه‌ها بیشترین تاثیر را بر روی پاسخ مورد مطالعه داشته است، که این عامل می‌تواند مربوط به حجم زیاد ریزدانه در کل مخلوط بوده و همچنین به دلیل شکل ظاهری و بالا بودن اصطکاک داخلی مخلوط‌های حاوی ریزدانه‌های بازیافتی بوده است.

۳- نتایج نشان داد که با جایگزینی حدود ۳۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی با منشا مقاومتی مشخص و ۲۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی کرمانشاه برای آزمایش جریان اسلامپ می‌توان به سطح SF2 آیین نامه‌ی EFNARC دست یافت.

۴- با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی روانی مخلوط‌های مورد بررسی کاهش یافته است، به طوری که با کاهش روانی مخلوط‌ها مدت زمان خروج بتن از قیف V افزایش یافته است. درصدهای جایگزینی مورد مطالعه برای هر دو سری از سنگدانه‌ها، سطح VS1/VF1 آیین‌نامه‌ی EFNARC را برآورده کرده‌اند.

۵- نتایج مقاومت فشاری برای نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه ارائه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد با جایگزینی ۵۰٪ مصالح بازیافتی نمونه‌های حاوی مصالح بازیافتی کرمانشاه در حدود ۱۳٪ مقاومت کمتری نسبت به مصالح بازیافتی با منشا مشخص نشان داده‌اند. همچنین با مقایسه‌ی طرح‌های مورد بررسی مشاهده گردید افزودن میکروسلیس توانسته تا حدودی کاهش مقاومت فشاری ناشی از افزودن سنگدانه‌های بازیافتی را بهبود بخشد.

۶- نتایج آزمایش مقاومت کششی حاکی از آن است که با افزایش درصد جایگزینی مصالح بازیافتی مقاومت کششی در هر دو سری کاهش یافته است. این درصد کاهش در درصدهای مشابه جایگزینی مصالح بازیافتی در سری دوم محسوس‌تر بوده است.

۷- براساس نمونه‌های مورد مطالعه مشاهده گردید با جایگزینی تا حداکثر ۲۵ درصد مصالح بازیافتی با منشا مشخص و ۲۰ درصد منشا نامشخص معیار SF2 آیین‌نامه EFNARC تامین گردیده و مشخصات مکانیکی مورد قبولی برای استفاده در اعضای سازه‌ای دارند. لازم به ذکر است استفاده از این مصالح موجب کاهش نیاز به مصالح طبیعی و کمتر شدن آسیب‌های زیست محیطی در آینده می‌گردد.

منابع:

- 1- C.J. Zega, A.A. Di Maio, (2011), Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements, Waste Manag. 31 (11) 2336-2340.
- 2- S. Manzi, C. Mazzotti, M.C. Bignozzi, (2013) Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate, Cem. Concr. Comp. 37, 312-318.
- 3- C.-S. Poon, S.-C. Kou, H.-W. Wan, M. Etxeberria, (2009), Properties of concrete blocks prepared with low grade recycled aggregates, Waste Manag. 29 (8), 2369-2377.
- 4- M. Gholhaki, A. Kheyroddin, M. Hajforoush, M. Kazemi, (2018), an investigation on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete incorporating magnetic water with various pozzolanic materials, Construction and Building Materials 158, 173-180.
- 5- R. Saleh Ahari, T. Kamel Erdem, K. Ramyar, (2015), Effect of various supplementary cementitious materials on rheological properties of self-consolidating concrete, Construction and Building Materials 75, 89-98.
- 6- R. Saleh Ahari, T. Kamel Erdem, K. Ramyar, (2015), Permeability properties of self-consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials, Construction and Building Materials 79, 326-336.
- 7- Tahar, Z., Ngo, T., Kadri, E., Bouvet, A., Debieb, F., Aggoun, S., (2017), Effect of cement and admixture on the utilization of recycled aggregates in concrete, Journal of Construction and Building Materials 149, Pp 91-102
- 8- Bui, N., Satomi, T., Takahashi, H., (2017), Improvement of mechanical properties of recycled aggregate concrete basing on a new combination method between recycled aggregate and natural aggregate. Journal of Construction and Building Materials 148. Pp 376-385

- 9- Dimitriou, G., Savva, P., Petrou, M., (2018), Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete, *Journal of Construction and Building Materials* 158. Pp 228–235.
- 10- Silva, R., Brito, J., Dhir, R., (2018), Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review. *Journal of Construction and Building Materials* 178. Pp 19–31
- 11- Duarte, G., Bravo, M., Brito, J., Nobre, J., (2019) Mechanical performance of shotcrete produced with recycled coarse aggregates from concrete. *Journal of Construction and Building Materials* 210. Pp 696–708.
- 12- Zhu, P., Hao, Yali., Liu, H., Wei, D., Liu, S., Gu, L., (2019), Durability evaluation of three generations of 100% repeatedly recycled coarse aggregate concrete. *Journal of Construction and Building Materials* 210. Pp 442–450
- 13- Wang, Y., Zhang, H., Geng, Y., Wang, Q., Zhang, S., (2019), Prediction of the elastic modulus and the splitting tensile strength of concrete incorporating both fine and coarse recycled aggregate, *Journal of Construction and Building Materials* 215. Pp 332–346.
- 14- Bahrami, N., Zohrabi, M., Mahmoudy, S. A., Akbari, M. (2020). Optimum recycled concrete aggregate and micro-silica content in self-compacting concrete: Rheological, mechanical and microstructural properties, *Journal of Building Engineering* 31, 101361.
- 15- Hung Mo, K., Chai Ling, T., Cheng, Q. (2020). Examining the Influence of Recycled Concrete Aggregate on the Hardened Properties of Self-compacting Concrete, *Waste and Biomass Valorization* 12, pages 1133–1141.
- 16- Soares, R. C., Mohamed, A., Venturini, W. S., & Lemaire, M. (2002). Reliability analysis of non-linear reinforced concrete frames using the response surface method. *Reliability Engineering & System Safety*, 75(1), 1-16.
- 17- Montgomery, D.C., *Design and analysis of experiments*, Eighth edition, John Wiley & Sons, (2008).
- 18- M. Aldahdooh, A. Jamrah, A. Alnuaimi, M. Martini, M. Ahmed, A. Ahmed, (2018), Influence of Various Plastics-Waste Aggregates on Properties of Normal Concrete, *Journal of Building Engineering* 17, 13-22.
- 19- Design Expert. Version 12.0.3.0. Stat-Ease, Design Expert Inc. 2019. (www.statease.com)
- 20- Minitab 19 statistical software. [computer software]. State college, PA: Minitab, Inc. 2019. (www.minitab.com)
- 21- M. Aziminezhad, M. Mahdikhani, M. Memarpour, (2018), RSM-based modeling and optimization of self-consolidating mortar to predict acceptable ranges of rheological properties, *Construction and Building Materials* 189, 1200–1213.
- 22- K. Kanish, S. Singh, B. Singh, P. Singh, (2020), Effect of recycled aggregates on fresh and hardened properties of self-compacting concrete, *Materials Today: Proceedings* 32.
- 23- E. Güneysi, M. Gesoglu, Z. Algin, H. Yazici, (2016), Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials* 113, 622–630.
- 24- EFNARC. Self-compacting concrete, European project group. The European guidelines for self-compacting concrete: specification, production and use; 2005
- 25- Rodrigues, F., Carvalho, T., Evangelista, L., de Brito, J., (2013), Physical-chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *J. Clean. Prod.* 52, 438e445
- 26- Leite, M., Gualberto, J., Filho, F. and et al, (2013), Workability study of concretes made with recycled mortar aggregate, *Materials and structures*, 46(10), pp. 1765-1778.
- 27- M. Safiuddin, M. Salam, M. Jumaat, (2011), Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11(4), pp. 1023-1041.
- 28- A. Katz, (2003), Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete, *Cement and Concrete Research*, 33(5), pp. 703-711.
- 29- Sim, J. and Park, C. Kim, Y., (2012), Mechanical properties of recycled aggregate concrete with deformed steel re-bar, *Journal of Marine Science and Technology*, 20(3), pp. 274-280.
- 30- Kou, S., Poon, C., Chan, D., (2004). Properties of steam cured recycled aggregate fly ash concrete. Use of recycled materials in buildings and structures. In: *International RILEM Conference*, Barcelona, Spain, pp. 590e599
- 31- Bravo, M. Brito, J. Pontes, J. Evangelista, L. (2015), Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants, *Journal of Cleaner Production* 99, 59-74.
- 32- Neville, A., (1995), *Properties of Concrete*, fourth ed. United Kingdom, London, p. 844.