

## ارائه مدل پیش‌بینی مقاومت فشاری ژئوپلیمر ساخته شده با متاکائولن و سرباره با استفاده از روش سطح پاسخ

پیام زنگانه رنجبر \*

استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

مرتضی سهرابی گیلانی

استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

امین صالحی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

مصطفی قاسمی لسکو کلایه

دانشجوی دکتری رشته عمران - سازه، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

### چکیده

در پژوهش حاضر از کربن فعال تهیه شده از ضایعات کارخانه چای‌سازی به‌عنوان جاذب آلاینده‌های رواناب‌های سطحی در بتن متخلخل استفاده شده است. این کربن فعال طی دو مرحله کربونیزاسیون (پیرولیز) و فعال‌سازی در دمای بالا تولید شده است. جهت دسترسی به نتایج مطلوب و بهینه از روش سطح پاسخ RSM و نرم افزار Design Expert استفاده شده است. همچنین در کنار ارزیابی قابلیت حذف آلاینده‌ها از رواناب توسط بتن متخلخل، بهبود مشخصات مکانیکی این نوع از بتن با اضافه کردن کربن فعال، میکروسلیس، تغییرات در نسبت آب به سیمان و مقدار ریز دانه مورد تحلیل قرار گرفته است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، مدل‌های ارائه شده برای تخمین مقاومت فشاری ۲۸ روزه با ضریب همبستگی ۰/۹۷، مقاومت فشاری ۷ روزه با ضریب همبستگی ۰/۸۴، مقاومت فشاری ۴۲ روزه با ضریب همبستگی ۰/۹۵، COD با ضریب همبستگی ۰/۹۴، TSS با ضریب همبستگی ۰/۹۳، TDS با ضریب همبستگی ۰/۹۱ و حذف فلز سنگین مس با ضریب همبستگی ۰/۹۴ بدست آمدند که نشان دهنده معنا دار بودن طراحی آزمایش انجام گرفته می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: بتن متخلخل، کربن فعال، روش سطح پاسخ، آلاینده‌های رواناب، تصفیه رواناب.

\* نویسنده مسئول: p.zanganeh@guilan.ac.ir

## ۱- مقدمه

دارند مواد قابل جذب توسط کربن فعال نیستند [۱۱-۱۵]. کیو همکاران طی مطالعات گسترده‌ای که در سال ۲۰۱۵ انجام دادند، به نتیجه رسیدند که کربن فعال حاصل از کاه (تفاله) انواع گیاهان، می‌تواند دسته‌های مختلفی از آلاینده‌های غیرفلزی را جذب کند [۱۶].

مکانیسم جذب کربن فعال برای فلزات سنگین شامل جذب فیزیکی و شیمیایی می‌شود. مکانیسم‌های شیمیایی برای جذب انواع مختلف فلزات، متفاوت است [۱۷]. در پژوهش حاضر، ابتدا کربن فعال از ضایعات چای و طی دو مرحله کربونیزاسیون و فعال‌سازی، تولید گردید. سپس نمونه‌های بتن متخلخل حاوی این کربن فعال ساخته شده و پس از گذشت ۲۸ روز از سن آنها، نمونه‌ها برای عبور داده شدن آلاینده‌ها آماده شدند. برای اینکه اثر بتن متخلخل حاوی کربن فعال در حذف آلاینده‌ها مشخص شود در ابتدا آب آلوده بدون عبور داده شدن از بتن، مورد آزمایش قرار داده شد تا ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن تعیین گردد و در مرحله بعد با عبور از نمونه‌های تهیه‌شده، تأثیر بتن در حذف آلاینده‌ها مشخص گردید.

## ۲- مشخصات مصالح مصرفی و معرفی آزمایش‌ها

### ۲-۱- تولید کربن فعال

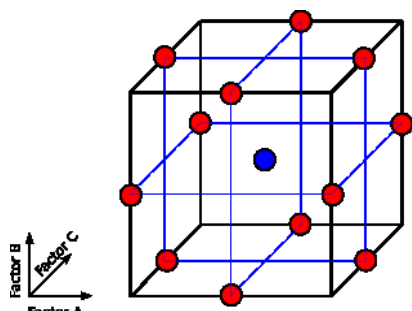
به منظور تولید کربن فعال، ابتدا تفاله‌ها توسط آسیاب علوفه خردکن، خرد شدند. سپس، تفاله‌های خردشده توسط غربال کردن با استفاده از الک‌های مختلف به اندازه‌های مختلف تقسیم گردید. از ذرات با قطر ۱ تا ۲ میلی‌متر استفاده شده است. پس از غربال کردن، تفاله‌ها با آب مقطر شسته شدند و در آون در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند تا خشک شوند. از ۱۰ کیلوگرم تفاله برای تهیه کربن فعال استفاده شده است. سپس نمونه‌های خشک‌شده با نسبت وزنی مناسب، با هیدروکسید پتاسیم مخلوط شده و درون آون با دمای ۱۱۰ °C به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت تا خشک شود. برای کربونیزاسیون و فعال‌سازی نمونه‌های خشک‌شده از کوره فعال‌سازی (پیرولیز) استفاده شده است. مراحل کربونیزاسیون و فعال‌سازی به‌طور هم‌زمان انجام شده است. شکل ۱ محصول نهایی کربن فعال تولید شده و شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از آن را نشان می‌دهند.

منابع آبی مانند بقیه منابع طبیعی محدود است. به گزارش سازمان بهداشت جهانی، در کشورهای در حال توسعه تقریباً ۳۳ درصد از مردم به آب آشامیدنی سالم دسترسی ندارند. سالانه سه میلیون نفر کودک زیر ۱۰ سال به علت کمبود آب سالم و امکانات بهداشتی از بین می‌روند [۱]. از میان منابع آبی مختلف، آب‌های سطحی بیشتر از بقیه آلوده می‌شوند. از جمله مهم‌ترین آلوده‌کننده‌های این منابع، آلاینده‌های صنعتی، رنگ‌های آلی، فلزات سنگین و... می‌باشند. [۲]. رواناب شهری شامل دامنه گسترده‌ای از ابعاد ذرات می‌باشد که از کوچک‌تر از ۱ میکرومتر تا بزرگ‌تر از ۱۰۰۰ میکرومتر را در برمی‌گیرد [۳].

یکی از راه‌های پیشنهادی برای حفظ آب سالم و همچنین حذف آلاینده‌هایی که آن را آلوده می‌کنند، استفاده از بتن متخلخل با توانایی حذف آلاینده‌های رواناب است. مهم‌ترین مزیت بتن متخلخل توانایی عبور آب از آن است که باعث برگشت آب به منابع زیرزمینی می‌شود و همچنین از جاری شدن رواناب روی سطح جاده جلوگیری می‌گردد. [۴]. موارد استفاده از آن اکثراً در مناطق با بارندگی زیاد، فرودگاه‌ها، پارکینگ‌ها، پاسیوها، گذرگاه‌های عابر پیاده و جاده‌های با ترافیک سبک در قالب لایه روسازی به منظور کاهش رواناب و افزایش نفوذپذیری و همچنین به عنوان زهکش در لایه‌های زیرسازی راه‌ها و سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد [۵، ۶، ۷].

تا کنون محققان افزودنی‌های مختلفی را به منظور جذب آلاینده‌های آب در بتن متخلخل استفاده نموده‌اند که یکی از پرکاربردترین آنها کربن فعال می‌باشد [۸، ۹، ۱۰]. کربن فعال یک اسم کلی برای گروهی از کربن‌های خلل و فرج دار می‌باشد. کربن فعال یک جامد بی‌شکل (آمورف) با سطح ویژه بالا و حجم بالای خلل و فرج می‌باشد. این ویژگی منحصربه‌فرد باعث ایجاد خواص جذبی بالا در کربن فعال می‌گردد. مواد آلی‌ای که قابل جذب شدن با کربن فعال هستند عبارت‌اند از: کودهای شیمیایی و علف‌کش‌ها، حلال‌های آروماتیک، آروماتیک‌های کلریدی، فنول‌ها، حلال‌های کلریدی، اسیدهای آلیفاتیک با وزن مولکولی بالا، آمین‌های آروماتیک و آمین‌های با وزن مولکولی بالا، سوخت‌ها، استرها، اترها، الکل‌ها و سورفکتانت‌ها و رنگ‌های آلی حل‌شدنی. ترکیباتی که وزن مولکولی پایین و قطبیت بالا

بهینه‌سازی محصولات و فرایندها در صنایع روز دنیا می‌باشد. ایده اصلی RSM استفاده از آزمایش‌های طراحی شده متوالی برای رسیدن به مقدار بهینه نهایی در متغیر پاسخ است. در دیدگاه اول دستیابی به چنین نقطه‌ای یا امکان‌پذیر نیست و یا هزینه‌های بسیار زیادی لازم است. اما از آنجایی که تعداد آزمایش‌های بسیار کم می‌باشد (برای مثال برای یک آزمایش با ۳ متغیر مستقل و یک متغیر پاسخ، حداکثر به ۲۰ آزمایش کنترل شده نیاز است) لذا این تکنیک بهترین روش برای بهینه‌سازی فرآیند یا محصول است [۱۸]. طرح باکس-بنکن یکی از روش‌های سطح پاسخ است که تا سه سطح را اعمال می‌کند. در این روش یک بلوک آزمایشات دو سطحی در بین مجموعه مختلفی از متغیرها تکرار می‌شود. این طرح برای حل مشکل تعداد زیاد آزمایشات (نمونه‌ها) در طراحی با تعداد فاکتور زیاد ارائه شد. شکل ۳ یک طراحی باکس-بنکن برای سه فاکتور را نشان می‌دهد. هندسه این طرح مشابه یک کره در فضای فرایند است که آزمایشات در نقاط میانی و مرکز اضلاع مکعب بیرونی قرار می‌گیرند.



شکل ۳- طراحی باکس-بنکن برای سه فاکتور

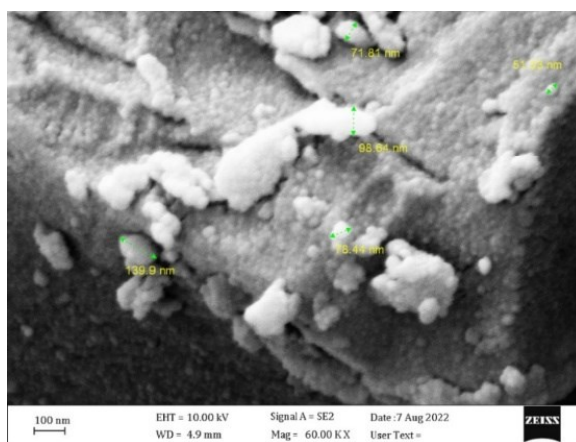
در پژوهش حاضر با توجه به ۴ متغیر ورودی اصلی در ساخت نمونه‌ها، به منظور تحقیق در مورد تأثیر توأمان آن‌ها در مقادیر پاسخ‌ها، از روش آماری باکس-بنکن استفاده شده است. در جدول ۱، متغیرهای ورودی و مقادیر آن‌ها آورده شده است. آزمون‌های آماری مدل‌ها در هر پاسخ با استفاده از آزمون آماری فیشر برای آنالیز واریانس<sup>۳</sup> ANOVA انجام شده است. بررسی کفایت تناسب مدل با استفاده از ضریب  $R^2$  تعدیل شده<sup>۴</sup> و  $R^2$  پیش‌بینی شده<sup>۵</sup> انجام شده است.  $R^2$  تعدیل شده مقدار تنظیم شده برای تعداد بیشتری از پارامترها در مدل‌ها است که آن را در

<sup>4</sup> Adjusted  $R^2$

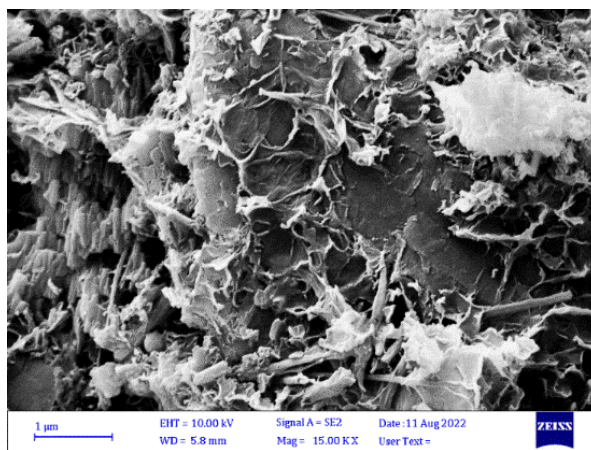
<sup>5</sup> Predicted  $R^2$



شکل ۱- کربن فعال تهیه شده



(الف)



(ب)

شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM<sup>۱</sup>) از: الف) کربن فعال تهیه شده و ب) بتن متخلخل حاوی کربن فعال

## ۲-۲- روش سطح پاسخ RSM<sup>۲</sup>

طراحی آزمایش به روش RSM یکی از پرکاربردترین روش‌های

<sup>1</sup> Scanning Electron Microscope

<sup>2</sup> Response Surface Method

<sup>3</sup> Analysis of Variance

نسبت آب به سیمان بالا باعث کاهش چسبندگی خمیر سیمان به سنگدانه‌ها و در نتیجه جاری شدن خمیر سیمان و پر نمودن حفرات بتن می‌گردد. این امر حتی در تراکم‌های با انرژی کم نیز اتفاق خواهد افتاد. در مقابل نسبت آب به سیمان پایین نیز باعث گلوله شدن مخلوط و عدم اختلاط مناسب مصالح می‌گردد. ACI 211.3R نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ الی ۰/۴۵ را جهت پوشش مناسب سنگدانه‌ها با خمیر سیمان و پایداری خمیر سیمان، پیشنهاد نموده است [۲۲]. برای اطمینان از خاصیت زهکشی بتن متخلخل درصد فضای خالی بتن به دست آمده از روش گراویمتری ASTM C138 باید بیشتر از ۱۵٪ باشد. با استفاده از روش باکس-بنکن ۴ متغیر ورودی درصد کربن فعال ۱٪ تا ۲/۵٪، نسبت آب به سیمان ۰/۳ تا ۰/۴، درصد میکروسیلیس ۵٪ تا ۱۰٪ و درصد ریزدانه ۰ تا ۱۰٪ تعریف و ۲۷ طرح اختلاط ارائه شد. جدول ۲ همه ترکیبات طرح‌های اختلاط بتن را نشان می‌دهد. تعداد همه طرح‌های اختلاط ۲۷ عدد بوده و یک طرح شاهد می‌باشد.

#### ۴-۲- سنجش آلودگی رواناب

در این پژوهش جهت اندازه‌گیری قابلیت حذف آلاینده‌ها از رواناب سطحی، از رواناب معمولی که در سطح شهر رشت موجود می‌باشد، برداشت شده است چراکه این رواناب و آلاینده‌های آن داده‌هایی حقیقی هستند و اعتبار واقعی قابلیت تصفیه و حذف آلاینده‌ها را توسط بتن متخلخل حاوی کربن فعال بالا می‌برند. همچنین قابلیت حذف فلز سنگین مس به صورت جداگانه بررسی شده است. این فلز به‌طور معمول در رواناب سطحی موجود است و امکان حذف شدن آن دارای اهمیت زیادی می‌باشد. مقادیر پارامترهای ابتدایی رواناب بدون عبور از نمونه‌های بتن متخلخل در جدول ۳ آورده شده است.

#### ۴-۵- آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری یکی از آزمایش‌های مهم در ارتباط با مشخصات مکانیکی بتن می‌باشد. مقاومت فشاری در این تحقیق مطابق با استاندارد BS اندازه‌گیری گردید. در روش BS مقاومت فشاری روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ سانتیمتر انجام می‌شود که به دلیل پایین آوردن هزینه‌ها از نمونه‌های ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتر استفاده شده است [۲۳].

مقایسه با مقدار معمول  $R^2$  بسیار مناسب می‌سازد. استفاده از  $R^2$  تعدیل شده در برآورد تناسب مدل‌های رگرسیون چندگانه به جای  $R^2$  معمول توصیه می‌شود. همچنین، در تحلیل رگرسیون،  $R^2$  پیش بینی شده در پیش بینی پاسخ های مشاهدات جدید استفاده می‌شود [۱۹].

جدول ۱- متغیرهای ورودی

مقادیر	ورودی‌ها
نسبت آب به سیمان (درصد از وزن کل سیمان مصرفی) (W/C)	۰/۳-۰/۳۵-۰/۴
کربن فعال (AC)	۰-۱-۱/۷۵-۲/۵ (درصد از وزن کل سیمان مصرفی)
میکروسیلیس (MIC)	۵-۷/۵-۱۰ (درصد از وزن کل سیمان مصرفی)
مقدار ریزدانه (FA)	۰-۵-۱۰ (درصد از وزن کل سنگدانه مصرفی)

مقادیر بزرگ  $R^2$  پیش بینی شده برای ایجاد توانایی‌های پیش بینی بالاتر پیشنهاد می‌شود [۲۰]. با استفاده از RSM، پرکاربردترین معادله چندجمله‌ای درجه دوم توسعه یافته برای تطبیق داده‌های آزمایشگاهی و شناسایی عبارات مدل مربوطه می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii}^2 X_{ii}^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

که در آن Y برابر با پاسخ پیش‌بینی شده یا مقادیر خروجی‌ها (مقاومت فشاری، تخلخل، مقاومت الکتریکی و پارامترهای ارزیابی سنجش کارایی بتن متخلخل حاوی کربن فعال در حذف آلاینده‌ها در این پژوهش)،  $\beta_i$  برابر با  $\hat{A}$  امین ضریب متغیر ورودی  $X_i$ ،  $\beta_{ii}$  برابر با  $\hat{A}$  امین ضریب درجه دوم متغیر  $X_{ii}$ ،  $\beta_{ij}$  اندرکنش های مختلف ضرایب بین متغیرهای ورودی  $X_i$  و  $X_j$  و  $\varepsilon$  خطای مدل می‌باشد [۲۱].

#### ۲-۳- طرح اختلاط

برای طرح اختلاط بتن متخلخل از آیین‌نامه ACI 211.3R که برای تعیین نسبت‌های اختلاط بتن‌های با اسلامپ صفر تهیه شده است، استفاده گردید. نسبت آب به سیمان یکی از مهم‌ترین پارامترها در تعیین مقاومت و ساختار تخلخل بتن متخلخل می‌باشد.

جدول ۳- مقادیر پارامترهای رواناب

مقدار	شاخص
۲۶۰	COD(ppm)
۵۷۰	TSS(ppm)
۱۰۲۷	TDS(ppm)
۲۰	فلز سنگین مس (ppm)

شیوه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن به گونه‌ای است که به نمونه آزمایش صدمه‌ای وارد نکرده و اجرای آزمایش‌های متوالی روی یک نمونه خاص بتنی را ممکن می‌سازد. به همین دلیل آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی بتن به‌عنوان یک تست غیر مخرب شناخته می‌شود. در سال ۲۰۱۲ انجمن مواد و آزمون آمریکا (ASTM) استاندارد C ۱۷۶۰-۱۲ تحت عنوان اندازه‌گیری هدایت الکتریکی بتن منتشر کرد [۲۴]. در این استاندارد نتایج به‌دست آمده از دو روش حجمی و هدایت الکتریکی باهم مقایسه گردیده و نتایج نشان‌دهنده همبستگی میان دو روش می‌باشد. در پژوهش حاضر، آزمایش مقاومت الکتریکی منطبق بر استاندارد فوق انجام شده است (شکل ۴-).



شکل ۴- نمونه بتنی تحت آزمایش مقاومت الکتریکی

### ۳- ارائه نتایج و بررسی

در پژوهش حاضر، طرح‌های اختلاط مختلف با چهار فاکتور نسبت آب به سیمان، درصد میکروسیلیس، درصد ریزدانه و مقدار کربن فعال، هرکدام در سه سطح و طبق روش طراحی آزمایش باکس - بنکن، طراحی شدند. تأثیر هر یک از فاکتورها و کاهش و افزایش همه سطوح آنها برای تست‌های مقاومت فشاری ۷ روزه، مقاومت فشاری ۲۸ روزه، مقاومت فشاری ۴۲ روزه، مقدار اکسیژن خواهی، مقاومت ویژه الکتریکی، مواد جامد معلق کل، مواد جامد محلول کل، حذف فلز سنگین مس و همچنین درصد تخلخل مشخص شد. جدول ۴ نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی تمامی طرح‌های اختلاط را نشان می‌دهد.

### جدول ۲- ترکیبات طرح‌های اختلاط

شماره طرح	مقدار کربن فعال (AC)	نسبت آب به سیمان (W/C)	مقدار ریزدانه (MIC)	مقدار میکروسیلیس (FA)
۱	۱/۷۵	۰/۴	۷/۵	۱۰
۲	۱/۰	۰/۳	۷/۵	۵
۳	۲/۵	۰/۳۵	۱۰/۰	۵
۴	۱/۷۵	۰/۳۵	۷/۵	۵
۵	۱/۷۵	۰/۴	۵/۰	۵
۶	۱/۰	۰/۳۵	۱۰/۰	۵
۷	۱/۷۵	۰/۳	۱۰/۰	۵
۸	۲/۵	۰/۳۵	۷/۵	۱۰
۹	۱/۷۵	۰/۳	۵/۰	۵
۱۰	۱/۰	۰/۴	۷/۵	۵
۱۱	۱/۷۵	۰/۳۵	۵/۰	۱۰
۱۲	۱/۷۵	۰/۳	۷/۵	۱۰
۱۳	۱/۷۵	۰/۳۵	۷/۵	۵
۱۴	۱/۰	۰/۳۵	۷/۵	۱۰
۱۵	۱/۷۵	۰/۳	۷/۵	۰
۱۶	۱/۰	۰/۳۵	۷/۵	۵
۱۷	۱/۷۵	۰/۴	۱۰/۰	۵
۱۸	۲/۵	۰/۳۵	۷/۵	۰
۱۹	۱/۷۵	۰/۳۵	۱۰/۰	۰
۲۰	۱/۰	۰/۳۵	۷/۵	۰
۲۱	۲/۵	۰/۳	۷/۵	۵
۲۲	۱/۷۵	۰/۳۵	۱۰/۰	۱۰
۲۳	۱/۷۵	۰/۴	۷/۵	۰
۲۴	۲/۵	۰/۳۵	۵/۰	۵
۲۵	۲/۵	۰/۴	۷/۵	۵
۲۶	۱/۷۵	۰/۳۵	۵/۰	۰
۲۷	۱/۷۵	۰/۳۵	۷/۵	۵
طرح شاهد	۰/۰	۰/۳۵	۷/۵	۵

### ۶-۲- آزمایش مقاومت الکتریکی

مقاومت الکتریکی به‌عنوان یکی از مشخصه‌های بتن نشان‌دهنده برخی از خواص مهم آن از جمله نفوذپذیری و به‌موازات آن جذب آب بتن است.

جدول ۴- نتایج آزمایش های انجام شده بر روی طرح های اختلاط

شماره طرح	مقاومت ۲۸ روزه (Mpa)	مقاومت ۷ روزه (Mpa)	مقاومت ۴۲ روزه (Mpa)	COD (ppm)	TSS (ppm)	TDS (ppm)	درصد حذف فلز مس	درصد تخلخل الکتریکی	مقاومت
۱	۳۵/۸	۱۸	۳۸/۳	۹۷	۲۸۷	۸۹۰	۶۰	۲۲	۲۹/۳۴
۲	۲۵/۹	۱۵	۲۹/۴	۱۸۵	۳۸۹	۹۲۰	۲۰	۲۰	۱۵/۴۳
۳	۲۸/۸	۱۷	۳۰/۶	۹۶	۳۱۶	۸۰۹	۶۰	۱۹	۲۳/۶۲
۴	۲۳/۱	۱۴	۲۵/۳	۱۵۰	۳۵۸	۸۲۶	۳۳	۲۰	۱۷/۲۴
۵	۱۹/۵	۱۳	۲۱/۴	۱۵۵	۳۵۷	۸۲۴	۳۷	۲۰	۲۱/۴۳
۶	۳۳/۸	۱۹	۳۵/۲	۱۸۱	۴۰۰	۹۲۰	۱۹	۱۷	۱۹/۳۷
۷	۲۷/۲	۱۸	۲۸/۷	۱۴۷	۳۴۸	۸۲۴	۴۹	۱۹	۲۳/۳۵
۸	۳۶/۷	۲۲	۴۰/۳	۸۰	۲۵۰	۸۱۰	۷۷	۲۲	۱۸/۳۷
۹	۲۲/۲	۱۶	۲۴/۴	۱۵۵	۳۳۹	۸۲۴	۳۸	۱۹	۱۶/۳۶
۱۰	۲۵/۷	۱۲	۲۸/۱	۱۸۵	۳۷۰	۹۳۰	۱۷	۲۰	۱۶/۷۸
۱۱	۳۲/۵	۲۱	۳۵/۷	۱۰۵	۳۱۲	۸۲۷	۶۰	۲۰	۲۸/۱۲
۱۲	۳۸/۹	۲۳	۴۲/۱	۹۷	۲۸۷	۸۵۰	۶۲	۲۱	۱۹/۳۶
۱۳	۲۳/۸	۱۵	۲۶/۱	۱۴۵	۳۵۳	۸۳۵	۳۵	۱۹	۱۷/۹۵
۱۴	۳۵/۶	۲۳	۳۹/۱	۱۳۲	۲۸۰	۹۳۰	۴۵	۲۲	۱۹/۳۳
۱۵	۱۸/۷	۱۲	۲۰/۵	۱۸۰	۳۹۷	۸۲۵	۲۶	۲۰	۲۰/۱۵
۱۶	۲۰/۷	۱۳	۲۴/۷	۱۸۹	۳۹۰	۹۲۶	۲۲	۲۱	۱۹/۳۷
۱۷	۳۰/۶	۱۹	۳۵/۶	۱۴۷	۳۵۹	۸۱۵	۳۵	۱۷	۲۵/۷۸
۱۸	۱۹/۰	۱۲	۲۲/۹	۱۳۰	۳۳۸	۸۰۳	۴۸	۲۲	۱۹/۳۶
۱۹	۲۲/۷	۱۴	۲۴/۹	۱۷۹	۳۹۶	۸۲۳	۲۲	۲۲	۲۶/۴۹
۲۰	۱۸/۵	۱۲	۲۰/۳	۲۰۰	۴۳۴	۹۲۴	۱۵	۲۰	۳۲/۳۳
۲۱	۲۷/۰	۱۷	۲۹/۷	۱۰۰	۳۱۷	۸۰۳	۵۴	۱۹	۱۶/۷۰
۲۲	۴۳/۴	۲۶	۴۷/۷	۸۹	۲۷۹	۸۶۰	۶۱	۲۱	۲۶/۳۳
۲۳	۱۶/۸	۱۴	۱۸/۴	۱۷۹	۳۹۶	۸۲۵	۲۹	۲۱	۲۰/۳۲
۲۴	۲۲/۲	۱۴	۲۴/۴	۱۰۴	۳۲۱	۸۱۲	۴۷	۲۰	۱۱/۸۹
۲۵	۲۴/۱	۱۵	۲۶/۵	۱۰۰	۳۰۹	۸۰۹	۵۲	۱۸	۱۹/۳۱
۲۶	۱۳/۱	۱۸	۱۴/۴	۱۸۰	۳۸۰	۸۱۹	۲۱	۱۹	۱۹/۳۲
۲۷	۲۲/۷	۱۳	۲۴/۹	۱۵۱	۳۶۳	۸۳۰	۳۰	۲۰	۱۸/۰۰
شاهد	۲۱/۵	۱۲	۲۶/۰	۱۹۲	۴۱۰	۹۸۰	۲۲	۲۱	۱۶/۳۶

### ۳-۱- مقاومت فشاری ۷ روزه

مقاومت فشاری ۷ روزه یکی از معیارها برای مقاومت فشاری است، به این دلیل که در این مقاومت در بازه زمانی کم، بتن درصد قابل توجهی از مقاومت فشاری خود را به دست می آورد. ابتدا *design expert* طراحی شده بود، قرار داده شدند. جدول ۵ خلاصه مقادیر متغیرها را برای پاسخ مقاومت ۷ روزه نشان می دهد. نرم افزار، مدلی درجه دو با مقدار  $R^2$  تعدیل شده برابر با ۰/۸۴۲۲

پیشنهاد داده است که نزدیکی این مقدار به عدد یک نشان دهنده معنادار بودن آن می‌باشد. همچنین پارامتر کمبود تناسب Lack of Fit برابر با ۰/۳۰۲۷ تقریباً کم به خاطر نویزهایی است که در هر آزمایش می‌باشد.

جدول ۵- مقادیر متغیرها در نرم افزار برای ارزیابی مقاومت ۷ روزه

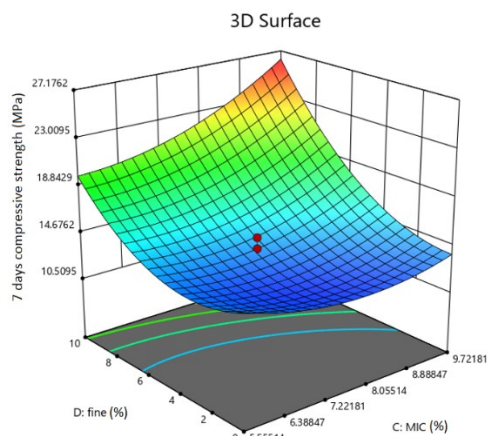
	Predicted R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	Lack of Fit p-value	Sequential p-value	Source
	۰/۴۵۸۹	۰/۵۷۵۱	۰/۱۳۲۳	۰/۰۰۰۱	Linear
	۰/۲۴۶۴	۰/۵۷۷۴	۰/۱۲۸۷	۰/۴۴۷۵	2FI
Suggested	۰/۵۹۸۳	۰/۸۴۲۲	۰/۳۰۲۷	۰/۰۰۲۶	Quadratic
Aliased	۰/۵۰۱۰-	۰/۸۹۹۸	۰/۳۲۸۸	۰/۲۸۶۶	Cubic

با توجه به مقدار R<sup>2</sup> پیش‌بینی شده، این مدل برای نمونه‌های ریز دانه و هم‌چنین درصد میکروسیلیس (شکل ۵ - الف) دارای اهمیت زیادی در ارتباط با مقاومت فشاری ۷ روزه می‌باشند در صورتی که دو پارامتر مقدار کربن فعال و هم‌چنین مقدار نسبت آب به سیمان (شکل ۵ - ب) چندان اثرگذار نمی‌باشند. هم‌چنین تأثیر توأمان این دو پارامتر باعث می‌شود که به مقاومت فشاری تقریباً ۲۶ مگاپاسکال برسیم که برای یک بتن متخلخل نسبتاً بالا به حساب می‌آید.

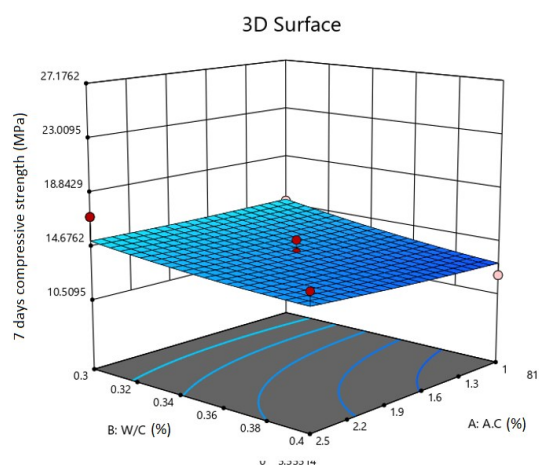
### ۳-۲- مقاومت فشاری ۲۸ روزه

ابتدا پاسخ‌ها در طرحی که از قبل برای این پژوهش در نرم‌افزار design expert طراحی شده بود، قرار داده شدند. جداول ۶ و ۷ خلاصه مقادیر متغیرها و آنالیز واریانس را برای پاسخ مقاومت ۲۸ روزه نشان می‌دهد. نرم‌افزار، مدلی درجه‌دو با مقدار R<sup>2</sup> تعدیل شده برابر با ۰/۹۷ پیشنهاد داده است که نزدیکی این مقدار به عدد یک نشان دهنده معنادار بودن آن می‌باشد. هم‌چنین پارامتر کمبود تناسب Lack of Fit برابر با ۰/۱۶۲۹ تقریباً کم به خاطر نویزهایی است که در هر آزمایش می‌باشد. با توجه به مقدار R<sup>2</sup> پیش‌بینی شده، این مدل برای نمونه‌های دیگر با طرح‌های اختلاط متفاوت با احتمال ۰/۸۶ می‌تواند پیش‌بینی درستی داشته باشد. شکل ۶ شکل‌های سطح پاسخ مقاومت ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های ترسیم‌شده مشخص است، دو پارامتر درصد ریز دانه و هم‌چنین درصد میکروسیلیس (شکل ۶- الف) دارای اهمیت زیادی در ارتباط با مقاومت فشاری ۲۸ روزه می‌باشند در صورتی که دو پارامتر مقدار کربن فعال و هم‌چنین مقدار نسبت آب به سیمان (شکل ۶- ب) چندان اثرگذار نمی‌باشند. هم‌چنین تأثیر توأمان این دو پارامتر باعث

با توجه به مقدار R<sup>2</sup> پیش‌بینی شده، این مدل برای نمونه‌های دیگر با طرح‌های اختلاط متفاوت با احتمال ۰/۵۹۸۳ می‌تواند پیش‌بینی درستی داشته باشد. شکل ۵ تصاویر سطح پاسخ مقاومت ۷ روزه را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۵- تأثیر هم‌زمان پارامترها بر مقاومت فشاری ۷ روزه: (الف) میکروسیلیس و ریزدانه و (ب) کربن فعال و نسبت آب به سیمان

می شود که به مقاومت فشاری تقریباً ۲۶ مگاپاسکال برسیم که برای یک بتن متخلخل نسبتاً بالا به حساب می آید.

جدول ۶- مقادیر متغیرها در نرم افزار برای ارزیابی مقاومت ۲۸ روزه

	Predicted R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	Lack of Fit p-value	Sequential p-value	Source
	۰/۹۰۳۴	۰/۹۲۰۲	۰/۰۶۱۵	<۰/۰۰۰۱	Linear
	۰/۸۷۰۷	۰/۹۱۵۵	۰/۰۵۶۱	۰/۵۸۵۹	2FI
Suggested	۰/۹۳۱۱	۰/۹۷۳۵	۰/۱۶۲۹	۰/۰۰۰۹	Quadratic
Aliased	۰/۷۱۵۳-	۰/۹۸۴۴	۰/۱۷۸۱	۰/۲۵۴۹	Cubic

جدول ۷- آنالیز واریانس مدل درجه دوم برای پاسخ مقاومت ۲۸ روزه

p-value	F-value	Mean Square	df	Sum of Squares	Source
<۰,۰۰۰۱	۶۹/۲۸	۱۰۲/۴۶	۱۴	۱۴۳۴/۳۸	Model
۰/۵۷۹۴	۰/۳۲۴۶	۰/۴۸	۱	۰/۴۸	A-A.C (%)
۰/۱۰۴۴	۳/۰۹	۴/۵۶	۱	۴/۵۶	B-W/C (%)
<۰,۰۰۰۱	۱۷۸/۶۲	۲۶۴/۱۴	۱	۲۶۴/۱۴	C-MIC (%)
<۰,۰۰۰۱	۷۳۳/۶۳	۱۰۸۴/۹۰	۱	۱۰۸۴/۹۰	D-fine (%)
۰/۲۸۸۷	۱/۲۳	۱/۸۲	۱	۱/۸۲	AB
۰/۰۲۰۳	۷/۱۴	۱۰/۵۶	۱	۱۰/۵۶	AC
۰/۸۰۹۳	۰/۰۶۰۹	۰/۰۹	۱	۰/۰۹	AD
۰/۰۲۷۵	۶/۲۹	۹/۳۰	۱	۹/۳۰	BC
۰/۶۳۰۶	۰/۲۴۳۴	۰/۳۶	۱	۰/۳۶	BD
۰/۶۰۲۸	۰/۲۸۵۷	۰/۴۲۲۵	۱	۰/۴۲۲۵	CD
۰/۰۱۴۲	۸/۲۰	۱۲/۱۳	۱	۱۲/۱۳	A <sup>2</sup>
۰/۱۵۰۷	۲/۳۶	۳/۴۸	۱	۳/۴۸	B <sup>2</sup>
۰/۰۲۵۲	۶/۵۳	۹/۶۶	۱	۹/۶۶	C <sup>2</sup>
<۰,۰۰۰۱	۳۷/۴۱	۵۵/۳۳	۱	۵۵/۳۳	D <sup>2</sup>
-	-	۱/۴۸	۱۲	۱۷/۷۵	Residual
۰/۱۶۲۹	۵/۵۲	۱/۷۱	۱۰	۱۷/۱۳	Lack of Fit
-	-	۰/۳۱	۲	۰/۶۲	Pure Error
-	-	-	۲۶	۱۴۵۲/۱۳	Cor Total

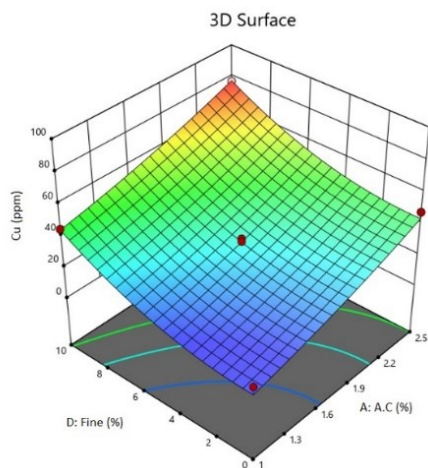
جدول ۸- مقادیر متغیرها در نرم افزار برای ارزیابی حذف فلز مس

	Predicted R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	Lack of Fit p-value	Sequential p-value	Source
	۰/۸۶۱۸	۰/۸۸۸۴	۰/۱۶۳۴	<۰/۰۰۰۱	Linear
	۰/۷۸۲۶	۰/۸۷۰۷	۰/۱۳۸۰	۰/۷۹۹۸	2FI
Suggested	۰/۸۶۳۰	۰/۹۴۶۳	۰/۲۹۴۳	۰/۰۰۴۷	Quadratic
Aliased	۰/۶۲۸۶-	۰/۹۱۵۸	۰/۱۲۸۹	۰/۸۳۹۲	Cubic

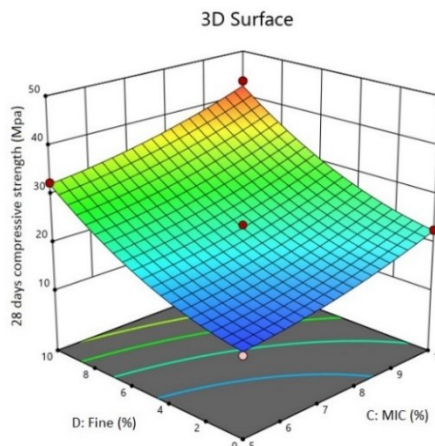
۳-۳- حذف فلز سنگین مس کم و بیش همواره حضور دارد. برای انجام این آزمایش یک فلز سنگین مس یکی از فلزهایی است که در رواناب سطحی محلول ۲۰ppm از فلز مس در آب مقطر تهیه شده است و پس



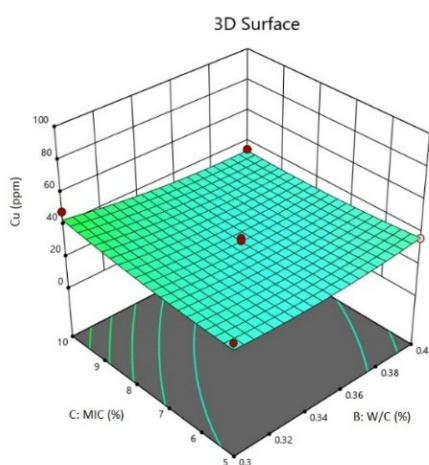
از عبور از هر کدام از نمونه‌های بتنی درصد حذف شده مقدار فلز سنگین مس ثبت شده است.



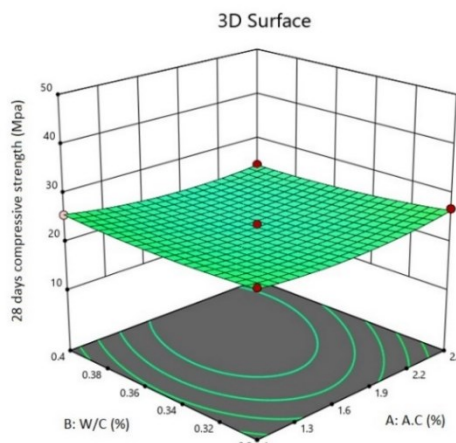
(الف)



(الف)



(ب)



(ب)

شکل ۷- تأثیر هم‌زمان پارامترها بر حذف فلز سنگین مس: الف- کربن فعال و ریزدانه و ب- میکروسیلیس و نسبت آب به سیمان

شکل ۶- تأثیر هم‌زمان پارامترها بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه: الف) میکروسیلیس و ریزدانه و ب) کربن فعال و نسبت آب به سیمان

### ۴-۳- نیاز اکسیژن خواهی (COD<sup>۱</sup>)

COD شاخصی است که، معرف مواد آلی قابل تجزیه و غیر قابل تجزیه با باکتری می‌باشد. بنابراین COD با تقریب خوبی معرف همه ناخالصی‌های آلی نمونه است. هرچقدر که این شاخص کمتر باشد نشان‌دهنده آن است که کیفیت آب بیشتر است و نمونه بتنی توانسته است نسبت به قبل از عبور رواناب مقدار بیشتری از مواد آلی را حذف کند. در جدول ۹ مقادیر متغیرهای ورودی در نرم افزار برای ارزیابی حذف فلز سنگین مس نشان داده شده است. همچنین با توجه به شکل‌های خروجی نرم‌افزار، دو پارامتر مقدار درصد کربن فعال و همچنین مقدار درصد ریز دانه (شکل ۸-الف)

در جدول ۸ مقادیر متغیرهای ورودی در نرم افزار برای ارزیابی حذف فلز سنگین مس نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های ترسیم‌شده، دو پارامتر مقدار درصد کربن فعال و همچنین مقدار درصد ریز دانه (شکل ۷-الف) دارای اهمیت زیادی در ارتباط با حذف فلز سنگین مس می‌باشند در صورتی که دو پارامتر مقدار میکروسیلیس و همچنین مقدار نسبت آب به سیمان (شکل ۷-ب) چندان اثرگذار نمی‌باشند. همچنین با افزایش ریز دانه و مقدار کربن فعال، میزان حذف فلز سنگین مس کاهش داشته و با تأثیر توامان این دو فاکتور، ۷۷ درصد مقدار این فلز با عبور از بتن حذف شده است.

<sup>1</sup> Chemical Oxygen Demand

دارای اهمیت زیادی در ارتباط با حذف فلز سنگین مس می‌باشند است در صورتی که دو پارامتر مقدار میکروسیلیس و همچنین مقدار و با افزایش آن‌ها COD به مقدار ۳۰ درصد اولیه خود رسیده نسبت آب به سیمان (شکل ۸-ب) چندان اثرگذار نمی‌باشند.

جدول ۹- مقادیر متغیرها در نرم افزار برای ارزیابی COD

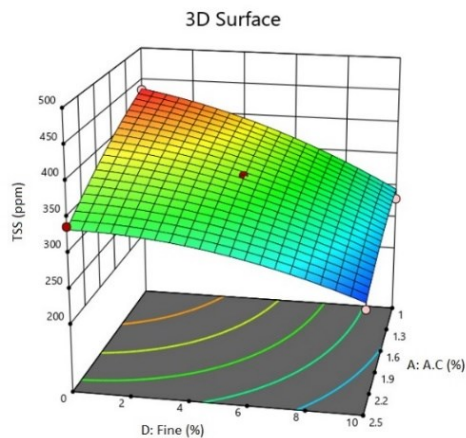
	Predicted R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	p-value Lack of Fit	p-value Sequential	Source
Suggested	۰/۹۳۰۴	۰/۹۴۶۳	۰/۱۱۸۴	۰/۰۰۰۱ <	Linear
	۰/۸۶۹۸	۰/۹۳۲۴	۰/۰۹۱۸	۰/۹۵۵۶	2FI
	۰/۸۷۲۵	۰/۹۵۱۳	۰/۱۲۰۲	۰/۰۹۳۲	Quadratic
Aliased	۰/۸۲۴۲	۰/۹۸۸۴	۰/۳۱۹۲	۰/۰۵۳۴	Cubic

جدول ۱۰- مقادیر متغیرها در نرم افزار برای ارزیابی مواد جامد معلق کل

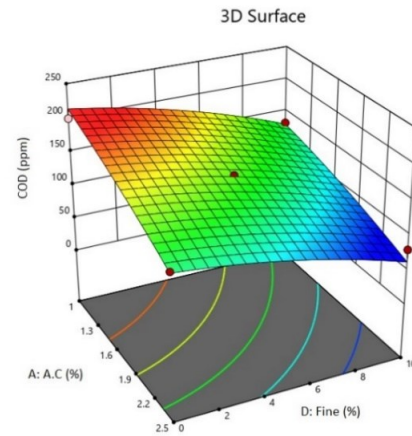
	Predicted R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	p-value Lack of Fit	p-value Sequential	Source
Suggested	۰/۸۴۱۶	۰/۸۷۷۷	۰/۰۸۵۱	۰/۰۰۰۱ <	Linear
	۰/۷۸۵۰	۰/۸۸۵۱	۰/۰۸۷۲	۰/۳۳۹۸	2FI
	۰/۸۳۹۰	۰/۹۳۸۲	۰/۱۵۰۶	۰/۰۱۹۷	Quadratic
Aliased	۰/۳۰۹۸-	۰/۹۳۵۰	۰/۰۹۱۶	۰/۵۷۲۷	Cubic

جدول ۱۱- آنالیز واریانس مدل درجه دوم برای پاسخ TSS

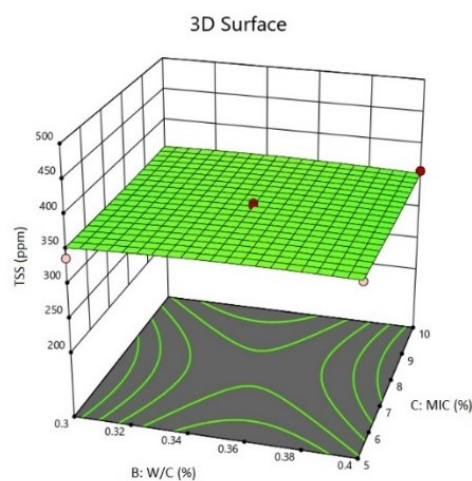
p-value	F-value	Mean Square	df	Sum of Squares	Source
.	۲۹/۱۹۹	۳۷۸۶/۷۱۸	۱۴	۵۳۰۱۴/۰۴۶	Model
.	۱۰۹/۰۷۲	۱۴۱۴۵/۳۳۳	۱	۱۴۱۴۵/۳۳۳	A-A.C
۰/۹۸۰	۰/۰۰۱	۰/۰۸۳	۱	۰/۰۸۳	B-W/C
۰/۹۸۰	۰/۰۰۱	۰/۰۸۳	۱	۰/۰۸۳	C-MIC
.	۲۶۸/۱۵۵	۳۴۷۷۶/۳۳۳	۱	۳۴۷۷۶/۳۳۳	D-fine
۰/۶۳۸	۰/۲۳۳	۳۰/۲۵۰	۱	۳۰/۲۵۰	AB
۰/۵۲۳	۰/۴۳۴	۵۶/۲۵۰	۱	۵۶/۲۵۰	AC
۰/۰۱۳	۸/۳۹۷	۱۰۸۹	۱	۱۰۸۹	AD
۰/۷۶۴	۰/۰۹۴	۱۲/۲۵۰	۱	۱۲/۲۵۰	BC
۰/۹۶۶	۰/۰۰۲	۰/۲۵۰	۱	۰/۲۵۰	BD
۰/۰۵۳	۴/۶۲۸	۶۰۰/۲۵۰	۱	۶۰۰/۲۵۰	CD
۰/۱۰۹	۳	۳۸۹/۱۲۰	۱	۳۸۹/۱۲۰	A <sup>2</sup>
۰/۵۰۲	۰/۴۸۰	۶۲/۲۵۹	۱	۶۲/۲۵۹	B <sup>2</sup>
۰/۷۱۷	۰/۱۳۸	۱۷/۹۲۶	۱	۱۷/۹۲۶	C <sup>2</sup>
۰/۰۰۳	۱۳/۷۶۰	۱۷۸۴/۴۵۴	۱	۱۷۸۴/۴۵۴	D <sup>2</sup>
-	-	۱۲۹/۶۸۸	۱۲	۱۵۵۶/۲۵۰	Residual
۰/۱۵۱	۶/۰۲۵	۱۵۰/۶۲۵	۱۰	۱۵۰۶/۲۵۰	Lack of Fit
-	-	۲۵	۲	۵۰	Pure Error
-	-	-	۲۶	۵۴۵۷۰/۲۹۶	Cor Total



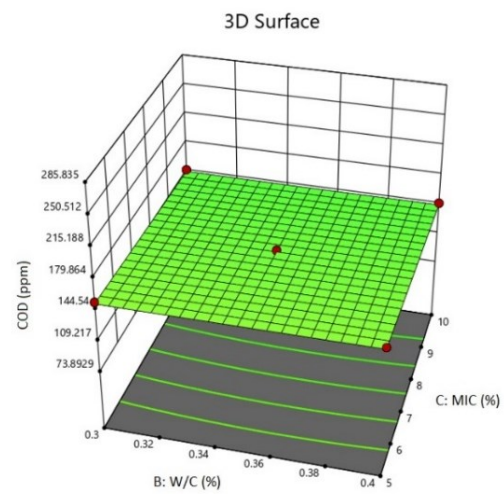
(الف)



(الف)



(ب)



(ب)

شکل ۹- تأثیر هم‌زمان پارامترها بر مواد جامد معلق کل: الف- کربن فعال و ریزدانه و ب- میکروسیلیس و نسبت آب به سیمان

شکل ۸- تأثیر هم‌زمان پارامترها بر نیاز اکسیژن خواهی: الف- کربن فعال و ریزدانه و ب- میکروسیلیس و نسبت آب به سیمان

### ۳-۶- سنجش اعتبار مدل های ارائه شده و انتخاب نمونه

#### بهینه

به منظور سنجش اعتبار مدل‌های ارائه شده ابتدا دو نمونه با ترکیبات نشان داده شده در جدول ۱۲ ساخته شدند. جداول ۱۳ و ۱۴ نتایج آزمایشگاهی و عددی نمونه‌های ساخته شده را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان دهنده تقریب منطقی مدل‌های ارائه شده جهت تخمین متغیرها می‌باشد.

در جدول ۱۵ برای هر کدام از آزمایش‌های انجام شده بهینه‌ترین نمونه به صورت خلاصه آورده شده است، منظور از بهینه‌ترین نمونه یعنی نمونه‌ای که بیشترین تأثیر را در هر کدام از آزمایش‌ها داشته است، برای مثال برای مقاومت فشاری آن نمونه‌ای بهینه‌ترین

### ۳-۵- مواد جامد معلق کل (TSS)

اندازه‌گیری مواد جامد آب به روش وزن سنجی انجام می‌شود. در تمامی آب‌ها و پساب قابل اندازه‌گیری است و برحسب میلی‌گرم بر لیتر گزارش می‌شود. جداول ۱۰ و ۱۱ خلاصه مقادیر متغیرها و آنالیز واریانس برای ارزیابی TSS نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های ترسیم شده، دو پارامتر مقدار درصد کربن فعال و همچنین مقدار درصد ریز دانه (شکل ۹- الف) دارای اهمیت زیادی در ارتباط با TSS می‌باشند و با تأثیر توأمان این دو فاکتور ، مقدار TSS به ۴۴ درصد مقدار اولیه خود رسید، در صورتی که دو پارامتر مقدار میکروسیلیس و همچنین مقدار نسبت آب به سیمان اثر زیادی نداشتند (شکل ۹- ب).

<sup>1</sup> Total Suspended Solids

طرح‌های بتن متخلخل مستقل از فاکتورهایی است که در ابتدا و برای انجام این پژوهش در نظر گرفته شده است. درصد تخلخل، که یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در طرح اختلاط است برای انواع طرح‌های مختلف بتن متخلخل در ابتدای طراحی ۲۰ درصد در نظر گرفته شده بود و کاهش و افزایش سطح هر یک از فاکتورها، به اندازه‌ای نبوده است که درصد تخلخل طرح‌های اختلاط مختلف به میزانی باشد که از لحاظ تحلیل آماری بتوان رابطه‌ای مشخص برای آن پیدا کرد و مقدار بسیار کمی درصد تخلخل‌ها از ۲۰ درصد انحراف دارند که قابل چشم‌پوشی است.

در جدول ۱۶ ترکیب‌های مختلفی نمایش داده شده است که بهترین عملکرد و نتیجه را برای هر کدام از آزمایش‌ها نشان می‌دهند، یعنی برای مقاومت فشاری و حذف آلاینده‌ها بالاترین مقدار را نمایش دهند. در این جدول ده ترکیب آمده است به گونه‌ای که برای رسیدن به یک هدف معین، بهینه‌ترین نتیجه را نمایش می‌دهند و به ترتیب از شماره اول به آخر، انتظار این که نرم‌افزار بهینه‌ترین ترکیب را ارائه کند، کاهش می‌یابد. با این توضیح در مورد اولین ترکیب ارائه شده اگر درصد‌های کربن فعال، میکروسیلیس و مقدار ریزدانه و نسبت آب به سیمان رعایت شود، بهینه‌ترین حالت برای رسیدن به کل اهداف آزمایش‌های مختلف بر روی رواناب سطحی و نمونه‌های بتنی خواهد بود.

#### ۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج پژوهش حاضر:

- در مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه، با افزایش دو فاکتور ریزدانه و میکروسیلیس، مقاومت فشاری به ترتیب ۲۶ مگاپاسکال و ۴۳ مگاپاسکال بدست آمد.
- در مقدار COD با افزایش دو فاکتور درصد کربن فعال و مقدار ریزدانه، COD به مقدار ۳۰ درصد مقدار اولیه خود رسیده است.
- در مواد جامد معلق TSS، با افزایش دو فاکتور ریزدانه و مقدار کربن فعال، TSS کاهش داشته است همچنین با تأثیر توامان این دو فاکتور، مقدار TSS به ۴۴ درصد مقدار اولیه خود رسید.
- در حذف فلز سنگین مس، با افزایش دو فاکتور ریزدانه و مقدار کربن فعال، مقدار حذف فلز سنگین مس کاهش داشته است. همچنین با تأثیر توامان این دو فاکتور، ۷۷ درصد مقدار این فلز با عبور از بتن حذف شد.

به حساب می‌آید که بیشترین مقاومت فشاری ممکن را تحمل کرده است.

جدول ۱۲- ترکیبات نمونه های ساخته شده

شماره نمونه	کربن فعال	نسبت آب به سیمان	ریزدانه	میکروسیلیس
۱	۲/۵	۰/۳۵	۱۰	۷/۵
۲	۱/۷۵	۰/۳	۵	۵

جدول ۱۳- نتایج عددی و آزمایشگاهی نمونه شماره ۱

نمونه ۱	مقاومت			
	فشاری ۲۸ روزه (Mpa)	COD (ppm)	TSS (ppm)	TDS (ppm)
آزمایشگاهی	۳۶/۷	۸۰	۲۵۰	۸۱۰
عددی	۳۷/۱	۴۵	۲۳۹	۸۱۵

جدول ۱۴- نتایج عددی و آزمایشگاهی نمونه شماره ۲

نمونه ۲	مقاومت			
	فشاری ۲۸ روزه (Mpa)	COD (ppm)	TSS (ppm)	TDS (ppm)
آزمایشگاهی	۲۲/۲	۱۵۵	۳۳۹	۸۳۴
عددی	۱۹/۹	۱۵۵	۳۶۷	۸۲۷

جدول ۱۵- بهینه ترین نمونه ها

شماره ی نمونه	عنوان آزمایش
۲۲	مقاومت فشاری ۲۸ روزه
۲۲	مقاومت فشاری ۷ روزه
۲۲	مقاومت فشاری ۴۲ روزه
۸	COD
۸	TSS
۲۱	TDS
۸	فلز مس
نامشخص	درصد تخلخل
نامشخص	مقاومت الکتریکی

در مقاومت ویژه الکتریکی، با توجه به پاسخ‌هایی که به دست آمد، با وارد کردن آن‌ها در نرم‌افزار هیچ نوع ارتباط ریاضی و تحلیلی بین پاسخ‌ها پیدا نشد. به بیان دیگر، مقاومت الکتریکی ویژه

جدول ۱۶- ترکیب های بهینه

شماره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
کربن فعال (%)	۲/۵۰	۲/۴۸	۲/۴۴	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۵۰	۲/۴۵	۲/۵۰	۲/۵۰
نسبت آب به سیمان (%)	۱۰/۰۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۳۰
میکروسیلیس (%)	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	۹/۹۶	۹/۹۷	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	۹/۹۱	۹/۹۲
ریزدانه (%)	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	۹/۹۸	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰
مقاومت ۲۸ روزه (Mpa)	۴۳/۰۰	۴۲/۹۵	۴۲/۸۵	۴۲/۹۴	۴۲/۹۲	۴۲/۸۸	۴۲/۹۰	۴۲/۸۱	۴۲/۸۴	۴۲/۸۲
مقاومت ۷ روزه (Mpa)	۲۸/۱۷	۲۸/۱۹	۲۸/۲۳	۲۸/۱۱	۲۸/۰۶	۲۸/۰۴	۲۸/۰۶	۲۸/۱۵	۲۷/۹۴	۲۷/۹۳
مقاومت ۴۲ روزه (Mpa)	۴۵/۸۵	۴۵/۷۹	۴۵/۶۶	۴۵/۸۲	۴۵/۷۷	۴۵/۷۲	۴۵/۸۱	۴۵/۶۶	۴۵/۶۹	۴۵/۷۰
COD (ppm)	۶۲/۳۷	۶۳/۲۱	۶۵/۳۶	۶۲/۳۷	۶۲/۴۳	۶۲/۵۵	۶۲/۳۲	۶۴/۸۴	۶۲/۴۶	۶۲/۴۴
TSS (ppm)	۲۴۰/۵۶	۲۴۱/۴۶	۲۴۳/۷۲	۲۴۰/۸۳	۲۴۰/۷۴	۲۴۱/۰۲	۲۴۰/۹۸	۲۴۳/۴۸	۲۴۰/۸۹	۲۴۱/۰۲
TDS (ppm)	۸۲۲/۶۵	۸۲۲/۴۱	۸۲۱/۹۴	۸۲۲/۸۷	۸۲۲/۶۱	۸۲۲/۵۲	۸۲۳/۰۵	۸۲۲/۲۸	۸۲۲/۵۸	۸۲۲/۷۶
حذف فلز سنگین مس (ppm)	۹۳/۶۳	۹۳/۰۸	۹۱/۶۹	۹۳/۲۵	۹۳/۴۱	۹۳/۳۶	۹۲/۹۹	۹۱/۵۹	۹۳/۲۰	۹۳/۰۱
تخلخل (%)	۲۱/۱۷	۲۱/۱۵	۲۱/۱۱	۲۱/۱۶	۲۱/۱۸	۲۱/۱۶	۲۱/۱۵	۲۱/۱۱	۲۱/۱۹	۲۱/۱۸
مقاومت الکتریکی	۲۵/۹۱	۲۵/۸۵	۲۵/۷۱	۲۶/۰۰	۲۵/۷۵	۲۵/۷۸	۲۶/۰۸	۲۵/۸۵	۲۵/۵۹	۲۵/۷۱
ضرب تمایل Desirability	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۶
	Selected									

[5] Tennis, P.D., Leming, M.L. and Akers, D.J. (2004) Pervious Concrete Pavements. Technical Report, EB30202. Portland Cement Association, Skokie, and National Ready Mixed Concrete Associated, Silver Spring.

[6] Moretti, L., P. Di Mascio, and C. Fusco, Porous concrete for pedestrian pavements. Water, 2019. 11(10): p. 2105.

<https://doi.org/10.3390/w11102105>

[7] Moretti, L. and G. Loprencipe, Climate change and transport infrastructures: State of the art. Sustainability, 2018. 10(11): p. 4098.

<https://doi.org/10.3390/su10114098>

[8] Mohammadi, EL., Najafi, EK., Ranjbar, PZ., Payan, M., Chenari, RJ. and Fatahi, B., Recycling industrial alkaline solutions for soil stabilization by low-concentrated fly ash-based alkali cements, Construction and Building Materials, 2023,393:132083.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132083>

[9] Hosseinjani, MH., Ranjbar, PZ., Lashteh Neshaei, MA., Ranjbar, MM. and Nassiraei, H., Investigation of Alkaline Reaction of Dredged Caspian Sea Marine Sand to Make Concrete in Marine Environment and Ports, Concrete Research, 2022, 15(1), pp.5-22.

<https://doi.org/10.22124/JCR.2021.20990.1530>

- بر اساس نتایج بدست آمده در صورت ساخت بتن متخلخل حاوی درصد های کربن فعال، میکروسیلیس، مقدار ریز دانه و نسبت آب به سیمان به ترتیب برابر با ۲/۵ و ۰/۳ و ۱۰ و ۱۰ بیشترین میزان مقاومت فشاری ۲۸ روزه و بیشترین میزان بازدهی در تصفیه آلاینده های رواناب های سطحی حاصل خواهد شد.

## ۵- مراجع

[1] Organization, W.H., Facts and figures: Water, sanitation and hygiene links to health. Geneva: WHO, 2004.

[2] Müller, A., et al., The pollution conveyed by urban runoff: A review of sources. Science of the Total Environment, 2020. 709: p. 136125. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136125>.

[3] Kim, J.-Y. and J.J. Sansalone, Event-based size distributions of particulate matter transported during urban rainfall-runoff events. Water research, 2008. 42(10-11): p. 2756-2768. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.02.005>

[4] Sánchez-Mendieta, C., J.J. Galán, and I. Martínez-Lage, Physical and Hydraulic Properties of Porous Concrete. Sustainability, 2021. 13(19): p. 10562. <https://doi.org/10.3390/su131910562>

- artificial neural network. *Chem. Ind. Chem. Eng.* 19 (2), 241–252. <https://doi.org/10.2298/CICEQ120210058E>
- [20] Liu Y, Zheng Y, Wang A. Response Surface Methodology for Optimizing Adsorption Process Parameters for Methylene Blue Removal by a Hydrogel Composite. *Adsorption Science & Technology*. 2010 ;28(10):913-922. <https://doi.org/10.1260/0263-6174.28.10.913>
- [21] Daneshi, A., Younesi, H., Ghasempouri, S.M., Sharifzadeh, M., 2010. Production of poly- 3-hydroxybutyrate by *Cupriavidus necator* from corn syrup: statistical modeling and optimization of biomass yield and volumetric productivity. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 85, 1528–1539. <https://doi.org/10.1002/jctb.2463>
- [22] ACI Committee 522. 2006. Pervious Concrete, ACI 522R-06 Report.
- [23] ASTM C642, A., Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. ASTM, ASTM International, 2013.
- [24] ASTM C1760-12, Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete (Withdrawn 2021), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [10] Ranjbar, PZ., Talebi, H., Mousazadeh, R. and Ghorbani, M., Investigating the synergistic effect of using cement, polymer slurry, and recycled tire fibers in improving the mechanical and geotechnical properties of dune sand, *Concrete Research*, 2022, 15(3):31-33. <https://doi.org/10.22124/JCR.2022.19642.1500>
- [11] Bansal, R.C. and M. Goyal, Activated carbon adsorption. 2005: CRC press. <https://doi.org/10.1201/9781420028812>
- [12] Hu, X., Dai, K., & Pan, P. , Investigati on of engineering properties and filtration characteristics of porous asphalt concrete containing activated carbon. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 209, 1484-1493. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.115>
- [13] Justo-Reinoso, I., Srubar III, W. V., Caicedo-Ramirez, A., & Hernandez, M. T. (2018). Fine aggregate substitution by granular activated carbon can improve physical and mechanical properties of cement mortars. *Construction and Building Materials*, 164, 750-759. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.181>
- [14] Moses, M. T., Thomas, L. B., Scaria, J., & Dev, G. V. (2019). Prospective benefits of using activated carbon in cement composites-An overview. *Technology*, 10(04),946-953. <https://doi.org/10.34218/IJARET.10.3.2019.027>
- [15] Justo-Reinoso, I., Caicedo-Ramirez, A., Srubar III, W. V., & Hernandez, M. T. (2019). Fine aggregate substitution with acidified granular activated carbon influences fresh-state and mechanical properties of ordinary Portland cement mortars. *Construction and Building Materials*, 207, 59-69. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.063>
- [16] Cui, J., et al., A green route for preparation of low surface area SiO<sub>2</sub> microspheres from wheat straw ash with activated carbon and NPK compound fertilizer as by-products. *RSC advances*, 2015. 5(98): p. 80238-80244. <https://doi.org/10.1039/c5ra14622d>
- [17] Valentín-Reyes, J., et al., Adsorption mechanisms of hexavalent chromium from aqueous solutions on modified activated carbons. *Journal of environmental management*, 2019. 236: p. 815-822. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.014>
- [18] Bezerra, M.A., et al., Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 2008. 76(5): p. 965-977. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>
- [19] Esfahanian, M., Nikzad, M., Najafpour, G., Choreyshi, A.A., 2013. Modeling and optimization of ethanol fermentation using *saccharomyces cerevisiae*: response surface methodology and

## Evaluation of porous concrete containing waste-originated activated carbon in the removal of surface runoff pollutants

Payam Zanganeh Ranjbar\*

Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Guilan University, Rasht, Iran.

Morteza Sohrabi Guilani

Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Guilan university, Rasht, Iran.

Amin Salehi

Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Guilan University, Rasht, Iran.

Mostafa Ghasemi Laskoukalayeh

Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Guilan University, Rasht, Iran.

### Abstract

In recent years, water pollution is increasing due to contemporary civilization and industrialization. Clean fresh water, an essential ingredient for a healthy human life, are polluted in different ways, and among different water sources, surface waters are more polluted than others. The penetration of polluted surface water into underground water cause the contamination of these important water sources. Among the most important types of water pollutants are industrial pollutants, organic dyes, heavy metals, etc. One of the ways to preserve water resources is to remove its various pollutants using porous concrete. In this paper, activated carbon prepared from agricultural waste has been used as pollutants absorbent in porous concrete. This activated carbon is produced during two stages of carbonization (pyrolysis) and activation at high temperature. In order to reach the desired and optimal results, the response surface method (RSM) has been used. while evaluating the ability to remove pollutants from runoff water, it has been trying to improve the mechanical characteristics of this type of concrete by adding activated carbon, micro silica, water to cement ratio changes and the amount of fine grains. Design-Expert software was used to design the experiment using the Box-Behnken method. To use the Box-Behnken method, 4 input variables were defined including active carbon percentage (1% to 2.5%), water-cement ratio (0.3 to 0.4%), micro silica percentage (5% to 10%) and fine grain percentage (0 to 10%), which provided 27 mixing plans. Results showed that the presented models for estimating 28-day compressive strength are correlated with  $R^2$  value of 0.97, 7-day compressive strength with  $R^2$  value of 0.84, 42-day compressive strength with  $R^2$  value of 0.95, COD with  $R^2$  value of 0.94, TSS with  $R^2$  value of 0.93, TDS with  $R^2$  value of 0.91 and copper heavy metal removal with  $R^2$  value of 0.94, which indicate the significance of the test design as well as the improvement of the mechanical characteristics and removal of pollutants in porous concrete containing waste activated carbon.

**Keywords:** Porous concrete; Activated carbon; Response surface method; Runoff pollution.

---

\* Corresponding Author: p.zanganeh@guilan.ac.ir

