

بهینه سازی فرایند تثبیت و جامدسازی سیمانی لجن صنایع آبکاری توسط شبکه عصبی مصنوعی و روش سطح پاسخ

محمدجواد ذوقی، حسین گنجی دوست*، نادر مختارانی، بیبا آیتی

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مهندسی عمران و محیط زیست

چکیده: فرایند تثبیت و جامدسازی یکی از روش‌های دفع پسماندهای خطرناک می‌باشد. در این پژوهش از اختلاط آب مقطر، سیمان پرتلند تیپ دو، آهک و منیزیم اکسید برای تثبیت و جامد سازی لجن صنایع آبکاری استفاده شد. در این مطالعه مقاومت فشاری و میزان غلظت کروم و روی در شیرابه TCLP به عنوان پاسخ در نظر گرفته شد. طراحی ۳۰ آزمایش براساس طرح مرکب مرکزی برای محاسبه معادله مدل در روش سطح پاسخ و آموزش شبکه عصبی مصنوعی انجام شد. از طراحی تصادفی ۱۰ آزمایش برای صحت سنجی روش های چند متغیره استفاده شد. سپس بهینه سازی فرایند تثبیت و جامدسازی با استفاده از روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی با یکدیگر مقایسه شد. با توجه به نتیجه‌های مطالعه، از هر دو روش می‌توان با اطمینان بالا در بهینه سازی فرایند استفاده کرد. شبکه عصبی مصنوعی نسبت به روش سطح پاسخ، روشی دقیق تر در مدل‌سازی فرایند تثبیت و جامدسازی بود. همچنین برای رسیدن به بیشترین لجن خشک قابل دفن طبق استاندارد، میزان منیزیم اکسید، آهک، آب و سیمان مصرفی با توجه به مدل روش سطح پاسخ به ترتیب برابر ۱۵/۳، ۳/۶، ۴۹/۵، ۱۹ گرم و براساس شبکه عصبی مصنوعی به ترتیب برابر ۱۴/۹، ۳/۴، ۴۶، ۱۸/۵ گرم برای ۱۰۰ گرم لجن خشک صنایع آبکاری به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: روش سطح پاسخ؛ روی؛ کروم؛ MgO تثبیت و جامدسازی؛ شبکه عصبی مصنوعی.

KEY WORDS: Response surface methodology; Chromium; Zinc; MgO ; Solidification/stabilization; Artificial neural network.

مقدمه

در تصفیه لجن های آلوده به فلزهای سنگین می‌باشد [۶، ۵]. در این روش به‌وسیله ایجاد هیدروکسیدهای غیرمحلول، انتقال فلزهای سنگین به ساختارهای معدنی و محصور شدن فیزیکی ترکیبها، میزان تحرک ترکیب‌های غیرآلی کاهش می‌یابد [۷]. در این فرایند با استفاده از تغییر ظرفیت شیمیایی، سمیت برخی از فلزهای سنگین کاهش یافته [۸] و آلاینده خطرناک با فرایند شیمیایی جامد می‌شود. فرایندهای محصور شدگی و جذب نیز در بی خطر سازی آلاینده مؤثر هستند [۹، ۵].

ساختار شیمیایی لجن به‌دست آمده از صنایع آبکاری، دارای مقدارهای گوناگون فلزهای سنگین مانند سرب، روی، کروم و نیکل می‌باشد که با توجه به امکان خروج این فلزها از پسماند و انتشار آنها در محیط، این نوع پسماند به عنوان پسماند خطرناک رده بندی شده است [۳ - ۱]. روش‌های گوناگونی برای تصفیه و بی‌خطر سازی لجن صنایع آبکاری وجود دارد [۴]. تثبیت و جامدسازی سیمانی به دلیل سادگی و هزینه کم یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای تصفیه انواع پسماند های خطرناک و نیز مؤثرترین روش

*عهدہ دار مکاتبات

+E-mail: h-ganji@modares.ac.ir

کاهش حلالیت فلزهای سنگین و جلوگیری از پدیده انحلال دوباره می‌باشد. طبق نتیجه‌های پژوهشی با استفاده از MgO و آهک، میزان تثبیت فلزها تا ۸۰٪ امکان پذیر بوده و با افزایش میزان MgO به بیش از ۱۰٪ راندمان فرایند افزایش یافته است [۱۷]. در مطالعه‌های صورت گرفته بر روی استفاده از MgO تنها کاهش سمیت مطرح بوده و اطلاعات کمی در مورد تأثیر این ماده بر ویژگی‌های فیزیکی نمونه تثبیت و جامدسازی شده در دسترس می‌باشد. همچنین در این مطالعه‌ها استفاده همزمان سیمان، آهک و MgO بررسی نشده است. در نتیجه بررسی تأثیر MgO بر مقاومت فشاری و تأثیر استفاده همزمان از سیمان، آهک و MgO مورد نیاز می‌باشد.

استفاده از روش‌های چندمتغیره به جای تک متغیره در حال گسترش می‌باشد. با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چند متغیره تعداد آزمایش‌های مورد نیاز، زمان و هزینه کاهش می‌یابد. در فرایند تثبیت و جامدسازی برهمکنش همبندکننده با پسماند و با سایر همبندکننده‌ها سبب ایجاد تغییر در اثر آن‌ها بر پاسخ‌ها می‌شود. بنابراین اثرهای متغیرها بر فرایند تثبیت و جامدسازی غیرخطی می‌باشد. روش سطح پاسخ^(۱) (RSM) و شبکه عصبی مصنوعی^(۲) (ANN) ابزاری انعطاف پذیر برای تحلیل برازش‌های چند متغیره غیرخطی می‌باشند. به طوری که با استفاده از این دو روش و با انجام تعداد محدودی آزمایش می‌توان رابطه غیرخطی بین متغیرها و پاسخ‌ها را تعیین نمود [۱۸]. از RSM و ANN در مطالعه‌های گوناگون استفاده شده است [۲۲-۱۸].

هدف در این مطالعه تثبیت و جامدسازی لجن خشک اولیه با استفاده از سیمان، آهک و MgO و بهینه‌سازی فرایند تثبیت و جامدسازی به وسیله روش‌های چند متغیره می‌باشد. در این مطالعه برای اولین بار شبکه عصبی مصنوعی و روش پاسخ سطح به‌طور همزمان برای مدلسازی و پیش بینی فرایند تثبیت و جامدسازی لجن خشک اولیه استفاده و نتیجه‌های این دو روش با یکدیگر مقایسه شده است.

بخش تجربی

مواد شیمیایی

لجن مورد استفاده در این مطالعه از فیلتر پرس و خشک کن تصفیه خانه بخش آبکاری کارخانه پارس خزر واقع در شهر رشت تهیه شد. این لجن از ترسیب پساب بخش آبکاری به وسیله آهک

مطالعه‌ها نشان داده که میزان روی و کروم موجود در لجن صنایع آبکاری بین ۷ تا ۴۰ درصد وزنی متغیر می‌باشد، درحالی که میزان سرب و نیکل بین ۴ تا ۹ درصد بوده است [۳]. بنابراین میزان غلظت روی و کروم در پسماند این نوع صنایع همواره از غلظت سرب و نیکل به‌طور محسوسی بیشتر می‌باشد و در این پژوهش، تثبیت و جامدسازی روی و کروم مورد بررسی قرار گرفت. اگرچه برخی از فلزهای سنگین مانند روی در سامانه‌های زیستی به مقدار کم مورد نیاز هستند. اما تمام آن‌ها در مقادیرهای بالا سمی می‌باشند. مقادیرهای بالای روی سبب مرگ سلول‌ها، اعصاب و صدمه‌های مغزی می‌شود [۱۰]. در محیط آلوده، کروم به‌طور معمول به‌صورت کروم شش ظرفیتی وجود دارد. همچنین این فلز با توجه به شرایط اکسایش - کاهش و میزان pH محیط می‌تواند به صورت کروم سه ظرفیتی وجود داشته باشد. در شرایط هوازی (سطح خاک، آب‌های سطحی کم عمق) کروم به شکل شش ظرفیتی وجود دارد. در شرایط بی هوازی (آب‌های زیر زمینی و اعماق خاک) کروم شش ظرفیتی به کروم سه ظرفیتی تبدیل می‌شود. میزان سمیت کروم سه ظرفیتی بسیار کمتر از کروم شش ظرفیتی می‌باشد. کروم شش ظرفیتی سبب بروز انواع بیماری‌های پوستی و سرطان می‌شود. بسیاری از ترکیب‌های کروم به علت سرطان‌زا بودن، ایجاد جهش ژنتیکی، ناهنجاری‌های کروموزومی و حساسیت‌های پوستی به عنوان پسماند خطرناک در نظر گرفته می‌شوند [۱۱].

از سیمان به‌طور گسترده برای کنترل، کاهش نفوذپذیری، کپسوله کردن، کاهش حلالیت و کاهش سمیت برخی از اجزای خطرناک از جمله تثبیت و جامدسازی لجن حاوی فلزهای سنگین استفاده شده است [۱۲، ۵]. به طوری که اگر چنانچه پسماند تثبیت شده دارای مقاومت فشاری ساده (۵۰Psi) 0.35 Mpa باشد، فرایند تصفیه مطابق استاندارد انجام شده است [۱۴، ۱۳].

با توجه به اینکه مقادیرهای چشمگیری MgO در لجن صنایع آبکاری موجود است، استفاده از این ماده در فرایند تثبیت و جامدسازی لجن صنایع آبکاری نیز مورد توجه قرار گرفته است. طبق نتیجه‌های برخی مطالعه‌ها، کارایی فرایند تثبیت و جامدسازی از نظر کنترل سمیت در هنگام استفاده از MgO نسبت به استفاده از سیمان و آهک بیشتر است [۱۵]. MgO دارای اثرهای زیست محیطی کم، حلالیت پایین و قلیائیت بالا بوده، به طوری که pH بیشینه آن حدود ۱۰ می‌باشد. این ویژگی‌ها باعث تنظیم اسیدیته و ترسیب فلزها می‌شوند [۱۶]. هدف استفاده از MgO

(۱) Response surface method

(۲) Artificial neural network

جدول ۱- ویژگی‌های لجن خشک اولیه و نتیجه‌های آزمایش TCLP.

عنصر	شیرابه TCLP	
	غلظت (mg/kg dry sludge)	استاندارد (mg/kg)
Zn	۲۵۲۰۰	۲۸۰۵
Cr	۹۲۱۰۰	۲۶۱
Ni	۲۵۰۰	۰/۱۲
Pb	۱۲۰۰	۳/۶
Cu	۳۴۵۰	۲/۹
Cd	<۲	۰/۰۱
Mg	۱۲۶۰۰	۳۸۰
Ca	۲۸۹۰۰	۹۵۰

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی همبندکننده‌ها (درصد وزنی).

ترکیب	سیمان پرتلند تیپ دو	آهک هیدراته	MgO
CaO	۶۳/۵	---	۱/۵
Ca(OH) _۲	---	۹۶	---
SiO _۲	۱۶/۹	---	۱/۵
MgO	۱	---	۹۶
Al _۲ O _۳	۴/۳	---	۰/۴
CaCO _۳	---	۳	---
Fe _۲ O _۳	۲/۹	---	۰/۱۵
SO _۳	۲/۷	---	۰/۱

اما به علت غلظت کمتر تری کلسیم سیلیکات و غلظت بیشتر دی کلسیم سیلیکات (2CaO.SiO₂) افزایش مقاومت در آن کندتر می‌باشد [۲۳]. بنابراین با توجه به غلظت پایین سولفات لجن، دسترسی آسان، کاربرد وسیع‌تر و افزایش مقاومت سریع‌تر سیمان تیپ ۲، از این سیمان برای فرایند تثبیت و جامدسازی استفاده شد.

آماده سازی نمونه ها

برای تثبیت و جامدسازی لجن از آب مقطر، سیمان پرتلند تیپ دو، لجن خشک اولیه، MgO و آهک جهت ساخت ملات استفاده شد که برای تولید نمونه‌های گوناگون این مواد با نسبت‌های گوناگون مخلوط شدند. تعیین نسبت این مواد با توجه به آزمایش‌های مقدماتی، مطالعه‌های گذشته و طراحی آزمایش به روش طرح مرکب مرکزی (CCD) (۳) انجام شد. پس از اختلاط کامل ملات توسط مخلوط کن، ملات طبق روش استاندارد در داخل قالب های ۵۰ mm ریخته شد و پس از گیرش اولیه در ۲۴ ساعت به مدت ۲۸ روز در آب قرار گرفت [۲۴]. این روش برای ساخت تمام ۴۰ نمونه مورد نیاز این مطالعه استفاده شد.

مقاومت فشاری نمونه ها

پس از آماده سازی نمونه های مکعبی با ابعاد ۵۰ mm، مقاومت فشاری طبق استاندارد ASTM C 109-80 بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه انجام گرفت [۲۴].

به دست آمده و pH و هدایت الکتریکی آن به ترتیب برابر ۸/۶۲ و ۱/۵۳ mS/cm بود. رسوب‌های این بخش از فیلتر پرس و خشک‌کن با دمای ۶۰°C عبور می‌کند. میزان رطوبت لجن بعد از عبور از فیلتر پرس ۴۰٪ وزنی و پس از عبور از خشک کن ۸٪ وزنی بود. سپس این لجن در آزمایشگاه و در دمای ۱۰۵°C تا رسیدن به وزن ثابت خشک و با استفاده از خردکن به ذراتی با قطر کمتر از ۰/۵mm تبدیل شد. در جدول ۱ برخی از اجزای سازنده لجن خشک و نتیجه‌های آزمایش TCLP^(۱) ارایه شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود میزان غلظت کروم و روی نسبت به سایر فلزهای سنگین بیشتر بوده و غلظت منیزیم نیز چشمگیر می‌باشد.

در این مطالعه از سیمان پرتلند تیپ دو، آهک و MgO با خلوص ۹۶٪ به عنوان همبندکننده (۲) در فرایند تثبیت و جامدسازی استفاده شد. ترکیب‌های شیمیایی همبندکننده‌ها در جدول ۲ داده شده است. از بین ۵ تیپ موجود سیمان، سیمان تیپ ۲ به علت دسترسی آسان و گستردگی کاربرد آن در تثبیت و جامدسازی، انتخاب شد [۹، ۴]. همچنین لجن صنایع آبکاری دارای مقدارهای کمی سولفات (۱۵ گرم به ازای هر کیلوگرم لجن خشک) می‌باشد. سیمان تیپ ۲ به علت غلظت پایین تری کلسیم آلومینات (3CaO.Al₂O₃) نسبت به سیمان تیپ ۱، ۳ و ۴ دارای مقاومت بیشتری در برابر اثرهای مخرب سولفات می‌باشد. سیمان تیپ ۵ نسبت به سیمان تیپ ۲ دارای مقاومت بیشتری در برابر سولفات بوده

(۱) Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

(۳) Central composite design

(۲) Binder

تولید شیرابه از لجن تثبیت شده

برای تخمین رفتار طولانی مدت لجن خشک تثبیت شده از آزمایش TCLP استفاده شد. پس از نگهداری نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز، نمونه به ذراتی با قطر کمتر از ۱۰mm خرد شد. سپس به همراه مایع استخراج به مخزن استخراج انتقال یافت. برای ساخت مایع استخراج، ۵/۷mL استیک اسید با آب مقطر مخلوط شد تا حجم آن به یک لیتر افزایش یابد. طبق استاندارد pH محلول پایانی باید برابر $2/88 \pm 0/05$ باشد. پس از اضافه کردن مایع استخراج درب مخزن استخراج بسته شده و به مدت 18 ± 2 h در دور ۳۰rpm و در دمای $23 \pm 2^\circ\text{C}$ فرایند استخراج انجام شد سپس با صاف کردن، عملیات جداسازی فاز مایع و جامد صورت گرفت [۲۵]. میزان فلزهای موجود در شیرابه به وسیله دستگاه Flame Atomic Absorption Spectrometry (FAAS) با نام تجاری Buck scientific 210VGP اندازه گیری شد.

بهینه سازی

در این مطالعه تأثیر میزان MgO (A)، لجن (B)، آهک (C)، آب (D) و سیمان (E) بر راندمان فرایند تثبیت و جامدسازی لجن خشک اولیه و مقاومت فشاری لجن خشک تثبیت شده بررسی شد. برای کاهش تعداد متغیرهای مستقل و در نتیجه کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز میزان سیمان مصرفی (E) به عنوان یک متغیر وابسته محسوب شد. بدین منظور میزان سیمان مصرفی در هر نمونه برابر با تفاوت وزن مجموع مواد جامد برحسب گرم با ۱۰۰ گرم (MgO-لجن-آهک-۱۰۰=سیمان مصرفی) در نظر گرفته شد. بازه تغییر چهار متغیر مستقل با توجه به مطالعه‌های گذشته تعیین شد [۱۶، ۱۷، ۲۶]. با توجه به اینکه یکی از روش‌های بهینه‌سازی مورد استفاده در این مطالعه روش سطح پاسخ بود، تعداد آزمایش‌های مورد نیاز در این مطالعه با در نظر گرفتن ۶ نقطه مرکزی ۳۰ آزمایش شد. این تعداد آزمایش به وسیله CCD تعریف شد. این نوع طراحی شامل دو قسمت مکعب و ستاره بود. قسمت مکعبی مربوط به طرح غربالگری فاکتوریل و قسمت ستاره نقاط اضافه که دارای فاصله یکسان از مرکز مکعب بودند را در برگرفت. این نقاط اضافه روی هر یک از وجوه مکعب در نظر گرفته شد.

برای مدل‌سازی و پیش بینی راندمان فرایند تثبیت و جامدسازی و مقاومت فشاری لجن تثبیت شده از RSM و ANN استفاده شد. طراحی آزمایش به وسیله RSM سبب ایجاد یک مدل

آماري پیوسته می‌شود که می‌توان با دقت و اطمینان بالا برای به دست آوردن شرایط بهینه استفاده کرد [۲۷]. برای انجام این کار، ابتدا پارامترهای موثر بر فرایند و سپس بازه تغییر هر یک از متغیرهای مستقل با توجه به مطالعه‌های گذشته و آزمایش‌های مقدماتی تعیین شد [۲۸]. محاسبه معادله مدل یکی از مراحل بهینه سازی به وسیله RSM می‌باشد. از معادله مدل برای تخمین مقدار پاسخ‌ها در شرایط گوناگون متغیرهای ورودی استفاده می‌شود.

در ANN فرایند به صورت موازی بررسی شده و نرون‌های تشکیل دهنده شبکه به یکدیگر متصل می‌باشند. شبیه سازی هر نوع اتصال و مسیره‌ی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها با استفاده از شبکه عصبی پیش‌خور^(۱) چند لایه امکان پذیر می‌باشد [۲۰]. به طوری که پرکاربردترین ساختار شبکه عصبی برای تحلیل برازش‌های غیر خطی به علت دقت بالا، شبکه عصبی پیش‌خور چند لایه است [۱۸]. در این مطالعه برای پیش بینی شرایط بهینه از شبکه عصبی پیش‌خور چند لایه استفاده شد. از الگوریتم پس انتشار^(۲) که مهمترین الگوریتم در آموزش شبکه‌های چند لایه می‌باشد برای آموزش ANN و از آموزش و تست ساختارهای متفاوت شبکه عصبی برای تعیین ساختار بهینه استفاده شد.

داده‌ها برای شبکه عصبی با استفاده از Matlab R2013b و برای طراحی آزمایش‌ها و RSM با استفاده از Design-Expert 7.0.0 پردازش شدند.

نتیجه‌ها و بحث

در این پژوهش پس از طراحی آزمایش‌ها به وسیله CCD از RSM و ANN به همراه داده‌های آزمایشگاهی برای پیش‌بینی میزان غلظت کروم و روی در آزمایش TCLP و مقاومت فشاری لجن خشک تثبیت و جامدسازی شده استفاده شد. همچنین پس از بهینه سازی فرایند به وسیله RSM و ANN دو مدل با یکدیگر مقایسه شد. بدین منظور میزان MgO، لجن، آهک و آب مصرفی به عنوان متغیر مستقل و میزان سیمان به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. با توجه به مطالعه‌های گذشته و آزمایش‌های اولیه بازه تغییر هر یک از متغیرها تعیین شد [۱۶، ۱۷، ۲۶]. حد پایین (۲-) برای MgO (A)، لجن خشک (B)، آهک (C) و آب (D) برحسب درصد وزنی به کل مواد جامد (گرم/۱۰۰ گرم مواد جامد) به ترتیب برابر ۰، ۵۰، ۳۰ و حد بالا (+۲) برای این چهار متغیر به ترتیب برابر ۱۵، ۸۰، ۱۰ و ۴۰ تعیین شد. مقدارهای متغیرهای ورودی و خروجی ۳۰ آزمایش انجام شده در جدول ۳ مشخص شده است.

(۱) Feed forward

(۲) Back propagation

جدول ۳- ماتریس طراحی شده به وسیله طرح مرکب مرکزی (CCD) برای بهینه سازی فرایند تثبیت و جامدسازی.

شماره آزمایش	A	B	C	D	E	مقاومت فشاری (kg/cm ²)	غلظت روی (mg/L)	غلظت کروم (mg/L)
۱	۱۱,۲۵	۷۲,۵	۲,۵	۳۲,۵	۱۳,۷۵	۴,۴	۰,۹	۴
۲	۳,۷۵	۷۲,۵	۷,۵	۳۷,۵	۱۶,۲۵	۳,۷	۰,۷	۸
۳	۱۱,۲۵	۵۷,۵	۷,۵	۳۲,۵	۲۳,۷۵	۶	۰,۳	۱
۴	۱۱,۲۵	۵۷,۵	۲,۵	۳۲,۵	۲۸,۷۵	۱۸,۶	۰,۵	۰,۵
۵	۱۱,۲۵	۷۲,۵	۷,۵	۳۷,۵	۸,۷۵	۳,۵	۰,۵	۳
۶	۷,۵	۶۵	۵	۳۵	۲۲,۵	۶,۷	۰,۹	۷
۷	۷,۵	۸۰	۵	۳۵	۷,۵	۳,۵	۱,۲	۱۰
۸	۷,۵	۶۵	۵	۳۵	۲۲,۵	۷	۰,۸	۶,۵
۹	۳,۷۵	۷۲,۵	۲,۵	۳۲,۵	۲۱,۲۵	۹	۱,۶	۱۴
۱۰	۷,۵	۶۵	۵	۳۵	۲۲,۵	۶,۵	۱	۸
۱۱	۳,۷۵	۵۷,۵	۲,۵	۳۲,۵	۳۶,۲۵	۲۶,۵	۱,۳	۱۱
۱۲	۷,۵	۶۵	۵	۳۵	۲۲,۵	۶,۲	۰,۸	۶,۵
۱۳	۳,۷۵	۵۷,۵	۷,۵	۳۲,۵	۳۱,۲۵	۱۴,۵	۰,۵	۶
۱۴	۷,۵	۶۵	۱۰	۳۵	۱۷,۵	۳,۶	۰,۶	۷
۱۵	۳,۷۵	۵۷,۵	۷,۵	۳۷,۵	۳۱,۲۵	۱۱,۹	۰,۷	۸,۲
۱۶	۱۱,۲۵	۵۷,۵	۷,۵	۳۷,۵	۲۳,۷۵	۵,۳	۰,۵	۳
۱۷	۷,۵	۶۵	۵	۴۰	۲۲,۵	۶,۴	۱	۸
۱۸	۳,۷۵	۵۷,۵	۲,۵	۳۷,۵	۳۶,۲۵	۲۱,۲	۱,۸	۱۶
۱۹	۷,۵	۶۵	۵	۳۰	۲۲,۵	۸,۶	۰,۸	۶,۵
۲۰	۷,۵	۶۵	۵	۳۵	۲۲,۵	۶,۵	۰,۹	۷,۵
۲۱	۰	۶۵	۵	۳۵	۳۰	۱۵,۱	۱,۷	۱۸
۲۲	۷,۵	۶۵	۵	۳۵	۲۲,۵	۶,۷	۰,۸	۶,۵
۲۳	۱۱,۲۵	۵۷,۵	۲,۵	۳۷,۵	۲۸,۷۵	۱۶,۷	۰,۸	۳,۵
۲۴	۱۱,۲۵	۷۲,۵	۷,۵	۳۲,۵	۸,۷۵	۳,۵	۰,۷	۴,۵
۲۵	۳,۷۵	۷۲,۵	۷,۵	۳۲,۵	۱۶,۲۵	۳,۸	۱	۱۲
۲۶	۱۱,۲۵	۷۲,۵	۲,۵	۳۷,۵	۱۳,۷۵	۴,۳	۱	۶
۲۷	۱۵	۶۵	۵	۳۵	۱۵	۴	۰,۷	۱,۵
۲۸	۷,۵	۵۰	۵	۳۵	۳۷,۵	۲۲,۴	۱	۸,۵
۲۹	۳,۷۵	۷۲,۵	۲,۵	۳۷,۵	۲۱,۲۵	۸,۵	۲,۲	۲۰
۳۰	۷,۵	۶۵	۰	۳۵	۲۷,۵	۱۸,۹	۱	۶

جدول ۴- تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) برای پاسخ های روش سطح پاسخ.

مقدار P			مجموع مربعات			منبع
غلظت کروم	غلظت روی	مقاومت فشاری	غلظت کروم	غلظت روی	مقاومت فشاری	
<۰/۰۰۰۱ ^a	<۰/۰۰۰۱ ^a	<۰/۰۰۰۱ ^a	۵۹۱/۴۹	۴/۷۲	۱۲۴۹/۲۳	مدل
<۰/۰۰۰۱ ^a	<۰/۰۰۰۱ ^a	<۰/۰۰۰۱ ^a	۴۳۹/۴۷	۱/۸۱	۱۴۵/۰۴	A
۰/۰۱۰۲ ^a	۰/۰۰۹۲ ^a	<۰/۰۰۰۱ ^a	۲۶/۶۷	۰/۲۸	۵۷۸/۲	B
۰/۰۰۶۴ ^a	<۰/۰۰۰۱ ^a	<۰/۰۰۰۱ ^a	۳۱/۰۵	۱/۵	۳۱۹/۷۴	C
۰/۰۴۷۸ ^a	۰/۰۴۶۱ ^a	۰/۰۰۳۵ ^a	۱۳/۰۵	۰/۱۳	۱۰/۱۴	D
۰/۶۴۵۸	۰/۷۸۲	۰/۰۰۰۲ ^a	۰/۶۸	۰/۰۰۲۵	۲۰/۷	AB
۰/۰۰۳۵ ^a	۰/۰۰۱۳ ^a	۰/۱۴۹۶	۳۶/۹۱	۰/۴۹	۱/۹۶	AC
۰/۶۰۶۷	۰/۴۱۱۳	۰/۱۳۶۵	۰/۸۶	۰/۰۲۲	۲/۱	AD
۰/۶۰۶۷	۰/۵۸۱۵	<۰/۰۰۰۱ ^a	۰/۸۶	۰/۰۰۱	۷۰/۵۶	BC
۰/۱۸۸۲	۰/۱۷۹۳	۰/۰۵۷۹	۵/۸۸	۰/۰۶۳	۶	BD
۰/۰۲۶۶ ^a	۰/۰۳۹۶ ^a	۰/۲۵۱۲	۱۸/۷۱	۰/۱۶	۱/۲۱	CD
۰/۱۰۴۶	۰/۰۴۸۱ ^a	۰/۰۰۱۳ ^a	۹/۲۳	۰/۱۵	۱۳/۴۴	A ^۲
۰/۱۹۵۴	۰/۱۷۷۸	<۰/۰۰۰۱ ^a	۵/۶۸	۰/۰۶۳	۶۵/۹	B ^۲
۰/۴۹۹۷ ^a	۰/۴۳۶۷	<۰/۰۰۰۱ ^a	۱/۴۸	۰/۰۲	۳۴/۷۱	C ^۲
۰/۸۹۵۷	۰/۹۵۱۸	۰/۳۰۳۵	۰/۰۵۵	۰/۰۰۱۲	۰/۹۶	D ^۲
			۴۶/۴۱	۰/۴۷	۱۲/۷۴	باقیمانده
۰/۰۰۸	۰/۰۲۵۳	۰/۰۰۲۹	۴۴/۴۱	۰/۴۴	۱۲/۳۸	نقص برازش

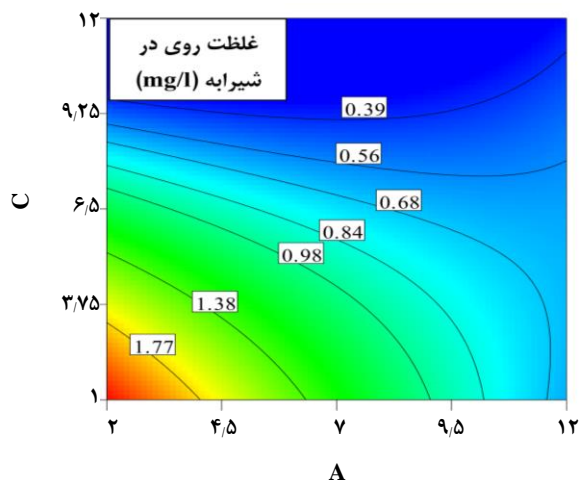
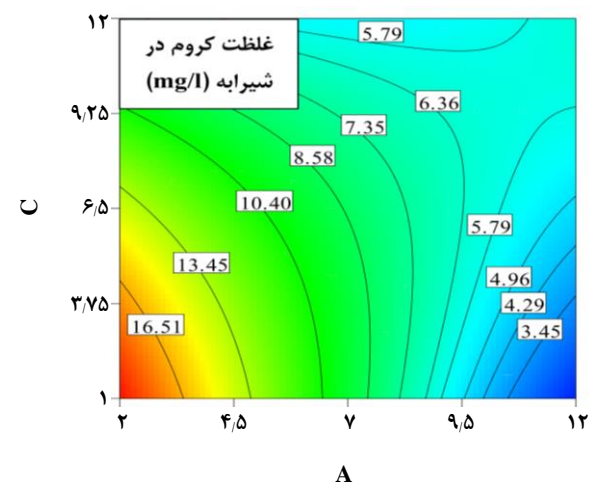
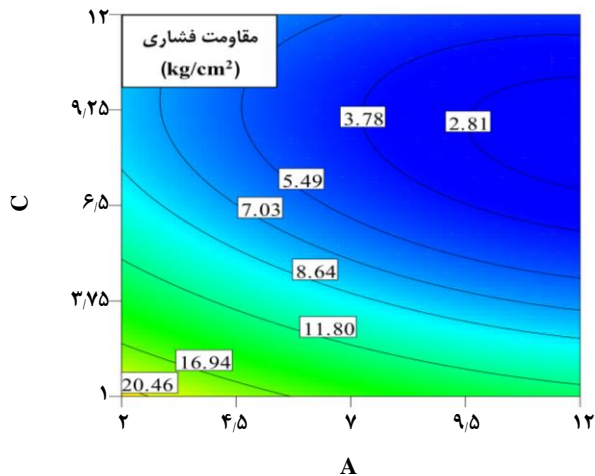
RSM

در جدول ۴ اثرهای اصلی و برهمکنشی متغیرها بر مقاومت فشاری و غلظت کروم و روی در شیرابه TCLP در قالب تحلیل واریانس بیان شده است. در این جدول از مقدارهای P به عنوان معیاری برای تشخیص میزان معناداری اثرات متغیرهای گوناگون بر پاسخها استفاده شد. تا زمانی که مقدار P برای مدل کمتر از ۰/۰۵ باشد، بین متغیر و پاسخ مورد نظر در سطح اطمینان ۹۵٪ رابطه آماری وجود دارد.

با توجه به جدول ۴ در سطح اطمینان ۹۵٪ تمام اثرات اصلی معنادار می‌باشند. چهار پارامتر MgO، لجن خشک، آهک و آب که در مدل به ترتیب با A، B، C و D مشخص می‌باشند بر روی مقاومت فشاری تأثیر منفی داشته و از بین این پارامترها، لجن

خشک دارای بیشترین تأثیر منفی بر روی مقاومت فشاری می‌باشد. به عبارت دیگر تنها عاملی که به صورت منفرد بر روی مقاومت فشاری نمونه دارای تأثیر مثبت بوده سیمان (E) می‌باشد. با افزایش مصرف سیمان به عنوان متغیر وابسته ($E=100-A-B-C$)، میزان مصرف سایر متغیرها کاهش و در نتیجه میزان مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. همچنین میزان لجن خشک و آهک به ترتیب دارای بیشترین تأثیر در افزایش و کاهش غلظت کروم و روی در شیرابه TCLP نمونه‌ها بودند.

با توجه به جدول ۴ میزان تأثیر برخی از برهمکنش‌های بین پارامترها در سطح اطمینان ۹۵٪ معنادار نبوده و حذف این پارامترها در دقت مدل تأثیر محسوسی ندارد. در نتیجه جهت مدل‌سازی سه پاسخ موجود در این پژوهش از مدل کاهشی درجه دوم استفاده شد.



شکل ۱- نمودار شمارنده به دست آمده از تاثیر همزمان MgO (A) و آهک (C) بر الف) مقاومت فشاری، ب) غلظت کروم و ج) غلظت روی در شیرابه TCLP.

پس از حذف برهمکنش‌های دارای اهمیت ناچیز، مدل‌های مورد استفاده در این مطالعه در مقدار P برابر ۵ درصد و سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار بوده است. میزان مقاومت فشاری نمونه و غلظت کروم و روی در شیرابه TCLP به ترتیب از طریق معادله (۱) تا (۳) قابل محاسبه می‌باشند.

$$(1) \quad \text{مقاومت فشاری نمونه} = 6.81 - 2.46A - 4.91B - 3.65C - 0.65D + 1.14AB + 2.1BC + 0.67A^2 + 1.52B^2 + 1.1C^2$$

$$(2) \quad \text{غلظت کروم در شیرابه نمونه} = 7.16 - 4.28A + 1.05B - 1.14C + 0.74D + 1.52AC - 1.08CD + 0.56A^2$$

$$(3) \quad \text{غلظت روی در شیرابه نمونه} = 0.88 - 0.28A + 0.11B - 0.25C + 0.075D + 0.18AC - 0.1CD + 0.071A^2$$

میزان ضریب همبستگی و ضریب همبستگی اصلاحی برای مدل‌سازی مقاومت فشاری نمونه‌ها به ترتیب برابر ۰/۹۸۰ و ۰/۹۷۱، غلظت کروم در شیرابه TCLP برابر ۰/۹۰۱ و ۰/۸۷۰ و غلظت روی در شیرابه TCLP برابر ۰/۸۷۲ و ۰/۸۳۱ می‌باشد. در نتیجه با توجه به شاخص‌های آماری، مدل در پیش بینی پاسخ‌ها از راندمان بالایی برخوردار بود.

در شکل ۱ نمودار شمارنده پاسخ‌ها نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۱-الف بیشترین مقاومت فشاری نمونه (بیش از 20 kg/cm^2) در MgO کمتر از ۲g و آهک کمتر از ۱g دیده می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش میزان آهک و MgO در نمونه‌ها به دلیل کاهش میزان سیمان پرتلند مصرفی میزان مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش یافته است. مهمترین ترکیبات سیمان خشک شامل آلایت (Ca_3SiO_5)، دی و تری کلسیم آلومینات می‌باشند. این ترکیبات در واکنش با آب سبب تولید پرتلنیت ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (۲۰ - ۲۵ درصد وزنی) و کلسیم سیلیکات هیدراته ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) (۶۰ - ۷۰ درصد وزنی) می‌شوند. در هیدراسیون، واحدهای ارتوسیلیس مجزا (SiO_4^{4-}) موجود در کلینکر سیمان به واحدهای دی سیلیس ($\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$) تبدیل شده و با پیشرفت فرایند هیدراسیون یون‌های سیلیس زنجیره‌های پلیمری بلند تشکیل می‌دهند. این پلیمرسازی سبب عمل‌آوری ملات و افزایش مقاومت فشاری می‌شود [۲۳]. افزایش میزان مصرف آهک و MgO و کاهش سیمان در نمونه‌ها، سبب کاهش سیلیس شده و این کاهش سبب کاهش تولید سیلیکات کلسیم هیدراته و مقاومت فشاری می‌شود.

ANN

برای طراحی ANN چهار عامل تأثیر گذار بر فرایند تثبیت و جامدسازی، در لایه ورودی شبکه و میزان مقاومت فشاری، غلظت روی و کروم در شیرابه TCLP به عنوان پاسخ در لایه خروجی ANN در نظر گرفته شد.

شبکه عصبی پس انتشار به یک وسیله مناسب برای مدل سازی سامانه های زیست محیطی تبدیل شده است [۲۷]. در این پژوهش به منظور انتخاب الگوریتم پس انتشار بهینه، ۱۲ الگوریتم پس انتشار با یکدیگر مقایسه شد و از بین آنها الگوریتم پس انتشار بهینه برای داده های جمع آوری شده، انتخاب شد. در تمام الگوریتم ها، شبکه عصبی دارای یک لایه پنهان با ۱۰ نرون و تابع انتقال سیگموئید و لایه خروجی با تابع انتقال خطی بود. برای ارزیابی راندمان الگوریتم های گوناگون از پارامترهای آماری استفاده شد. نتیجه های آموزش شبکه عصبی با الگوریتم های گوناگون پس انتشار در این پژوهش، در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به این جدول الگوریتم لونیبرگ - مارکواریت^(۱) به عنوان بهترین الگوریتم برای آموزش شبکه عصبی در این مطالعه انتخاب شد. جهت تعیین ساختار شبکه، شبکه عصبی با الگوریتم لونیبرگ - مارکواریت و یک لایه پنهان انتخاب و با تعداد نرون های گوناگون آموزش داده شد. با توجه به جدول ۶ کمترین میزان RMSE^(۲) برای مقاومت فشاری در شبکه عصبی دارای ۱۰ نرون و برای میزان غلظت روی و کروم در شبکه عصبی دارای ۱۱ نرون به دست آمد. بنابراین در این مطالعه برای پیش بینی مقاومت فشاری از شبکه عصبی دارای ۴ نرون در لایه ورودی، ۱۰ نرون در لایه پنهان و یک نرون در لایه خروجی و برای پیش بینی میزان غلظت روی و کروم از شبکه عصبی دارای ۴ نرون در لایه ورودی، ۱۱ نرون در لایه پنهان و یک نرون در لایه خروجی استفاده شد.

از RSM و شبکه عصبی برای به دست آوردن حالت های بهینه فرایند تثبیت و جامدسازی استفاده شد. طبق استاندارد برای دفن پسماند در محل دفن زباله، مقاومت فشاری پسماند باید بیش از $3/51 \text{ kg/cm}^2$ و غلظت کروم در شیرابه TCLP کمتر از 5 mg/L باشد [۱۲، ۵]. در نتیجه در این پژوهش با در نظر گرفتن استاندارد در حالت اول بهینه سازی رسیدن به بیشترین لجن خشک قابل دفن شاخص در نظر گرفته شد. در حالت دوم بهینه سازی با در نظر گرفتن ضریب اطمینان رسیدن به مقاومت فشاری بیش از 10 kg/cm^2 و غلظت کروم کمتر از 3 mg/L و رسیدن به بیشترین لجن خشک قابل دفن هدف گذاری شد. در حالت سوم بهینه سازی،

باتوجه به شکل ۱ - ب کمترین غلظت کروم در شیرابه نمونه ها (کمتر از $3/5 \text{ mg/L}$) در $11/25 \text{ g}$ و آهک کمتر از $2/5 \text{ g}$ دیده شد. به طور کلی با افزایش میزان MgO مصرفی، میزان غلظت کروم همواره کاهش می یابد. مصرف MgO به علت قلیائیت کمتر (حدود ۱۰ pH) نسبت به سیمان و آهک سبب جلوگیری از حل شدن دوباره فلزات آموتری مانند کروم می شود [۱۷]. در 10 g کمتر از 10 g با افزایش میزان آهک مصرفی میزان غلظت کروم کاهش می یابد. با کاهش MgO مصرفی و افزایش آهک pH نمونه و در نتیجه تبدیل کروم شش ظرفیتی به سه ظرفیتی افزایش می یابد. تحرک کروم سه ظرفیتی نسبت به کروم شش ظرفیتی کمتر بوده [۲۹] و این باعث کاهش غلظت کروم در شیرابه TCLP می شود.

با توجه به شکل ۱-ج کمترین غلظت روی در شیرابه نمونه ها (کمتر از $0/4 \text{ mg/L}$) در 2 g MgO بیش از 1 g و آهک بیش از 11 g دیده می شود. همچنین با افزایش میزان MgO مصرفی میزان غلظت روی به علت کنترل قلیائیت نمونه و جلوگیری از حل شدن دوباره همواره کاهش می یابد [۱۷].

با توجه به شکل ۱ و معادله (۱)، آهک و MgO سبب کاهش مقاومت فشاری نمونه می شوند. میزان تأثیر منفی آهک بر روی مقاومت فشاری نمونه ها حدود $1/48$ برابر MgO می باشد. همچنین آهک و MgO سبب کاهش غلظت کروم و روی در شیرابه نمونه می شود. میزان تأثیر MgO بر کاهش غلظت کروم و روی در شیرابه TCLP به ترتیب حدود $3/75$ و $1/12$ برابر آهک می باشد (معادله های (۲) و (۳)). بنابراین در یک تحلیل خطی و با در نظر نگرفتن اندرکنش پارامترها استفاده بیشتر از MgO به جای آهک سبب افزایش راندمان فرایند تثبیت و جامدسازی می شود. این نوع تأثیر MgO در مطالعات گذشته بر روی سایر پسماندها مورد تأیید قرار گرفته است [۱۶، ۱۷، ۳۰]. با در نظر گرفتن اندرکنش سیمان، آهک و MgO (شکل ۱ الف تا ج) تا زمانی که میزان MgO مصرفی کمتر از ۱۰٪ وزنی نمونه باشد، مقاومت فشاری با میزان غلظت فلزات سنگین در شیرابه دارای رابطه مستقیم بوده و با افزایش مقاومت فشاری میزان غلظت فلزات سنگین در شیرابه افزایش می یابد. در حالی که با افزایش میزان MgO مصرفی به بیش از ۱۰٪ وزنی نمونه، با افزایش مقاومت فشاری میزان غلظت فلزات سنگین در شیرابه کاهش یافته است. به عبارت دیگر بین مقاومت فشاری و میزان غلظت فلزات سنگین در شیرابه TCLP همواره یک رابطه خطی وجود ندارد.

(۱) Levenberg-Marquardt

(۲) Root mean square error

جدول ۵ - مقایسه کارایی الگوریتم ها پس انتشار در پیش بینی مقاومت فشاری و غلظت فلزات در شیرابه TCLP.

غلظت کروم		غلظت روی		مقاومت فشاری		نوع الگوریتم
RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	
۲,۱۳	۰,۸۸۷	۰,۵۵۷	۰,۲۰۳	۱,۴۹۶	۰,۹۷۵	پس انتشار BFGS گوسی- نیوتن
۱,۲۱۹	۰,۹۶۵	۰,۱۲۷	۰,۹۵۶	۰,۳۱۶	۰,۹۹۹	پس انتشار تعدیل بیزی
۲,۲۱۷	۰,۸۷۷	۰,۶۰۲	۰,۳۹۴	۰,۹۵۳	۰,۹۶	پس انتشار شیب مزدوج با شروع مجدد پاول- بیل
۲,۴۳۲	۰,۸۷۸	۰,۷۱۹	۰,۴۷۲	۲,۵۴۳	۰,۹۲۶	پس انتشار شیب مزدوج با به هنگام سازی فلچر- ریوز
۲,۸۵۲	۰,۷۹	۰,۶۶۶	۰,۵۸۶	۲,۰۰۲	۰,۹۵۳	پس انتشار شیب مزدوج با به هنگام سازی پولاک- ریبر
۲,۸۶۶	۰,۸۲۱	۱,۶۶۹	۰,۲۵	۳,۸۶۲	۰,۸۱۳	نزول شیب دار یا پس انتشار نرخ یادگیری انطباقی
۲,۳۷۱	۰,۸۶۷	۰,۵۵۶	۰,۰۲۲	۱,۱۲۱	۰,۹۸۵	نزول شیب دار با پس انتشار اندازه حرکت و نرخ یادگیری انطباقی
۰,۸۳۵	۰,۹۸۴	۰,۰۷۵	۰,۹۸۴	۰,۲۱۷	۰,۹۹۹	پس انتشار لونبرگ مارکوات
۲,۲۶۷	۰,۸۹۴	۰,۶۷۳	۰,۶۱۷	۲,۴۱۹	۰,۹۳۲	پس انتشار متقاطع تک گام
۲,۳۱۴	۰,۸۷۹	۰,۲۶۵	۰,۸۲۶	۱,۱۵۱	۰,۹۸۴	آموزش تدریجی رتبه تصادفی با توابع آموزش
۲,۳۷۴	۰,۸۵۸	۰,۲۷۱	۰,۷۶	۳,۰۹۴	۰,۸۸۵	پس انتشار برجسته
۳,۷۳۵	۰,۷۷۷	۰,۹۳۸	۰,۳۴۲	۳,۰۳	۰,۹۲۱	پس انتشار شیب مزدوج مدرج

جدول ۶ - تاثیر تعداد نرون ها بر روی ضریب همبستگی و مجذور میانگین مربع خطا.

غلظت کروم		غلظت روی		مقاومت فشاری		تعداد نرون
R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	
۰,۸۶۰	۲,۳۵۸	۰,۷۱۳	۰,۲۹۶	۰,۹۸۱	۱,۳۳۸	۲
۰,۸۶۵	۲,۴۰۷	۰,۸۳۹	۰,۲۳۹	۰,۹۷۸	۱,۳۸۴	۳
۰,۸۹۶	۲,۱۹۵	۰,۷۲۷	۰,۳۰۹	۰,۹۸۰	۰,۶۷۶	۴
۰,۹۱۷	۱,۸۶۹	۰,۸۴۳	۰,۲۲۵	۰,۹۹۲	۰,۸۶۳	۵
۰,۸۰۴	۳,۳۲۴	۰,۷۳۱	۰,۳۳۴	۰,۹۸۱	۱,۳۲۵	۶
۰,۹۲۱	۱,۸۰۸	۰,۸۳۴	۰,۲۳۴	۰,۹۸۲	۱,۲۴۰	۷
۰,۹۲۶	۱,۸۴۳	۰,۹۱۷	۰,۱۹۴	۰,۹۹۳	۰,۸۰۱	۸
۰,۸۵۶	۳,۲۱۳	۰,۸۴۸	۰,۲۳۶	۰,۹۳۶	۲,۵۲۹	۹
۰,۹۵۴	۱,۴۰۷	۰,۹۷۱	۰,۱۰۳	۰,۹۹۹	۰,۲۲۲	۱۰
۰,۹۹۲	۰,۵۷۳	۰,۹۸۹	۰,۰۶۲	۰,۹۹۷	۰,۴۶۵	۱۱
۰,۹۰۷	۱,۹۶۵	۰,۸۵۰	۰,۲۲۱	۰,۹۸۰	۱,۳۷۷	۱۲
۰,۷۵۴	۳,۸۷۷	۰,۶۶۶	۰,۴۶۶	۰,۹۶۱	۲,۱۴۹	۱۳
۰,۹۲۰	۱,۸۴۳	۰,۸۵۸	۰,۲۵۴	۰,۹۰۵	۳,۱۸۶	۱۴
۰,۹۷۷	۱,۰۵۳	۰,۹۵۳	۰,۱۲۸	۰,۹۶۹	۱,۶۷۷	۱۵

جدول ۷ - حالات بهینه در فرایند تثبیت و جامدسازی لجن صنایع آبکاری.

حالت بهینه	روش بهینه‌سازی	متغیرها					مقاومت فشاری نمونه (kg/cm ²)		غلظت روی (mg/L)		غلظت کروم (mg/L)	
		A	B	C	D	E	مدل	آزمایشگاهی	مدل	آزمایشگاهی	مدل	آزمایشگاهی
۱	RSM	۱۱,۱	۷۲,۵	۲,۶	۳۵,۹	۱۳,۸	۴,۷۵	۴,۲	۰,۸	۱	۴,۹	۴,۶
	ANN	۱۰,۹	۷۳,۱	۲,۵	۳۳,۸	۱۳,۵	۴,۵۵	۳,۹	۰,۸۵	۰,۸	۵	۴,۸
۲	RSM	۱۰	۶۵,۷	۲,۵	۳۲,۶	۲۱,۸	۱۰	۸,۹	۰,۷	۰,۹	۲,۹۸	۲,۶
	ANN	۱۱,۱	۶۳,۱	۲,۶	۳۴,۱	۲۳,۲	۱۰	۹,۶	۰,۶۶	۰,۶	۲,۹۴	۲,۸
۳	RSM	۹,۶	۶۰,۸	۳,۸	۳۲,۵	۲۵,۸	۱۱,۵	۱۱,۱	۰,۶	۰,۹	۳	۲,۹
	ANN	۹,۴	۶۱,۴	۳,۹	۳۳,۴	۲۵,۳	۱۰,۹	۱۰,۲	۰,۷۵	۰,۷	۳	۳,۲

جدول ۸ - مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج RSM و ANN برای ده آزمایش تصادفی.

غلظت کروم (mg/L)			غلظت روی (mg/L)			مقاومت فشاری نمونه (kg/cm ²)			متغیرهای فرایند			
آزمایشگاهی	ANN	RSM	آزمایشگاهی	ANN	RSM	آزمایشگاهی	ANN	RSM	D	C	B	A
۲۶,۵	۲۵,۷۸۶	۱۹,۸۲۷	۱,۷	۱,۸۱۵	۲,۳۱۷	۱۳,۸	۱۴,۴۸۱	۱۱,۴۶۲	۳۰	۰	۷۸	۱
۱۲,۱	۹,۷۹۸	۷,۷۷۴	۰,۷	۰,۸۸۰	۰,۸۲۱	۶,۵	۷,۱۳۰	۷,۶۶۱	۳۱	۶	۶۵	۶
۵,۱	۵,۰۸۶	۶,۴۳۰	۰,۸	۰,۹۵۱	۰,۹۶۶	۳,۹	۴,۶۴۳	۴,۵۷۸	۳۸	۴	۶۸	۱۰
۲,۵	۲,۵	۳,۴۳۸	۰,۸	۰,۸۶۱	۰,۶۴۷	۱۸,۲	۱۸,۹۴۵	۱۶,۳۸۹	۳۰	۳	۶۰	۸
۱,۹	۰,۲۵۸	۵,۵۷۰	۱,۱	۱,۲۰۰	۰,۸۶۵	۲,۹	۳,۳۱۱	۲,۹۸۶	۳۲	۹	۶۹	۱۴
۶,۱	۸,۲۳۳	۵,۲۵۴	۱,۲	۱,۲۹۹	۱,۰۶۶	۱,۸	۲,۰۳۵	۶,۱۱۷	۳۷	۱	۷۶	۱۲
۱۴,۲	۱۵,۱۱۱	۱۱,۷۱۶	۱,۲	۱,۴۴۵	۱,۵۳۲	۱۸,۵	۱۹,۴۴۷	۱۶,۴۳۵	۳۷	۱	۶۴	۷
۲۳,۲	۲۴,۸۸۸	۱۸,۰۹۳	۱,۷	۱,۸۴۸	۱,۸۱۹	۲۶,۱	۲۶,۲۵۶	۲۸,۲۹۳	۳۹	۴	۵۴	۱
۳,۹	۳,۵۶۸	۲,۷۰۴	۱	۰,۸۲۷	۰,۷۱۹	۲,۸	۳,۰۵۶	۱,۰۹۳	۴۰	۸	۷۰	۱۵
۱۲,۴	۱۲,۷۰۷	۸,۸۷۲	۰,۸	۰,۸۵۱	۰,۵۴۳	۱۱,۳	۱۲,۳۸۷	۱۱,۸۶۸	۴۰	۹	۶۲	۰

آزمایشگاهی نزدیک‌تر بوده به‌طوری که ضریب همبستگی بین داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده به‌وسیله ANN برای مقاومت فشاری، غلظت کروم و روی در شیرابه TCLP به ترتیب برابر ۰,۹۹۹، ۰,۹۲۳ و ۰,۹۷۷ و در RSM به ترتیب ۰,۹۳۴، ۰,۸۱۴ و ۰,۹۴۳ بود. همچنین RMSE بین داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده به‌وسیله ANN برای مقاومت فشاری، غلظت کروم و روی در شیرابه TCLP به ترتیب برابر ۰,۰۶۶، ۰,۱۴۴ و ۱,۳۰۱ و در RSM به ترتیب ۲,۰۳۷، ۰,۲۸۱ و ۳,۵۵۳ بود. بنابراین شبکه عصبی با دقت بیشتری قادر به مدل‌سازی فرایند تثبیت و جامدسازی لجن صنایع آبکاری بود.

افزون بر شاخص‌های مرحله دوم مصرف کمینه MgO و مصرف بیشینه آهک نیز به عنوان شاخص در نظر گرفته شد. دلیل در نظر گرفتن این مرحله هزینه بالای MgO نسبت به آهک بود. حالات بهینه این دو مرحله در جدول ۷ نمایش داده شده است.

مقایسه مدل‌سازی به‌وسیله RSM و ANN

پس از مدل‌سازی، ۱۰ آزمایش تصادفی توسط برنامه Matlab طراحی و میزان مقاومت فشاری، غلظت کروم و روی پیش‌بینی شده به‌وسیله ANN و RSM با میزان آزمایشگاهی مقایسه شد (جدول ۸) با توجه به جدول ۸ مقادیرهای پیش‌بینی شده به‌وسیله ANN در مقایسه با RSM به مقادیرهای

نتیجه گیری

با در نظر گرفتن اندرکنش سیمان، آهک و MgO، رابطه بین مقاومت فشاری و میزان غلظت فلزات سنگین در شیرابه به دست آمده از آزمایش TCLP همواره یک رابطه خطی نمی باشد و به میزان MgO مصرفی بستگی دارد. نمودار تأثیر همزمان آهک و MgO بر مقاومت فشاری و غلظت کروم در شیرابه نمونه ها نشان داد که بیشترین مقاومت فشاری نمونه (بیش از 20 kg/cm^2) در MgO کمتر از ۲g و آهک کمتر از ۱g و کمترین غلظت کروم در شیرابه نمونه ها (کمتر از 3 mg/L) در MgO بیش از 11.25 g و آهک کمتر از 2.5 g به دست می آید. روش RSM و ANN می تواند به عنوان یک روش مطمئن در مدل سازی فرایند تثبیت و جامدسازی لجن صنایع آبکاری عمل کند. همچنین بهینه سازی به وسیله ANN در مقایسه با RSM دقیق تر می باشد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۴/۱

با توجه به نتیجه های پژوهش، تمام اثرات اصلی چهار پارامتر MgO، لجن خشک، آهک و آب در سطح اطمینان ۹۵٪ معنادار بوده و بر روی مقاومت فشاری تأثیر منفی دارد و از بین این پارامترها، لجن خشک دارای بیشترین تأثیر منفی بر روی مقاومت فشاری می باشد. تنها عاملی که به صورت منفرد بر روی مقاومت فشاری نمونه دارای تأثیر مثبت بوده، سیمان می باشد. با افزایش مصرف سیمان به عنوان متغیر وابسته میزان مصرف سایر متغیرها کاهش یافته در نتیجه میزان مقاومت فشاری افزایش می یابد. میزان لجن خشک و آهک به ترتیب دارای بیشترین تأثیر در افزایش و کاهش غلظت کروم و روی در شیرابه TCLP نمونه ها بوده است. آهک و MgO هر دو در کاهش غلظت فلزات سنگین دارای تأثیر مثبتی بوده و میزان تأثیر MgO در کاهش غلظت کروم و روی در شیرابه TCLP به ترتیب حدود $3/75$ و $1/12$ برابر آهک می باشد.

مراجع

- [1] Zhen G., Yan X., Zhou H., Chen H., Zhao T., Zhao Y., *Effects of Calcined Aluminum Salts on the Advanced Aewatering and Solidification/Stabilization of Sewage Sludge*, *Journal of Environmental Sciences*, **23**(7):1225-32 (2011).
- [2] Xu H., Liu D.D., He L., Liu N., Ning G., *Adsorption of Copper (II) from an Wastewater Effluent of Electroplating Industry by Poly (ethyleneimine)-Functionalized Silica*, *Iran. J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE)*, **34**(2):73-81 (2015).
- [3] Chen Y.L., Ko M.S., Lai Y.C., Chang J.E., *Hydration and Leaching Characteristics of Cement Pastes made from Electroplating Sludge*, *Waste management*, **31**(6):1357-63. (2011)
- [4] Aydın A.A., Aydın A., *Development of an Immobilization Process for Heavy Metal Containing Galvanic Solid Wastes by Use of Sodium Silicate and Sodium Tetraborate*, *Journal of hazardous materials*, **270**:35-44 (2014).
- [5] Pandey B., Kinrade S.D., Catalan L.J., *Effects of Carbonation on the Leachability and Compressive Strength of Cement-Solidified and Geopolymer-Solidified Synthetic Metal Wstes*, *Journal of environmental management*, **101**:59-67 (2012).
- [6] Voglar G.E., Lestan D., *Efficiency Modeling of Solidification/Stabilization of Multi-Metal Contaminated Industrial Soil Using Cement and Additives*, *Journal of hazardous materials*, **192**(2):753-62 (2011).
- [7] Hale B., Evans L., Lambert R., *Effects of Cement or Lime on Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Sb and Zn Mobility in Field-Contaminated and Aged Soils*, *Journal of Hazardous Materials*, **199**:119-27 (2012).

- [8] Voglar G.E., Lestan D., [Solidification/Stabilisation of Metals Contaminated Industrial Soil from Former Zn Smelter in Celje, Slovenia, Using Cement as a Hydraulic Binder](#), *Journal of Hazardous Materials*, **178**(1):926-33 (2010).
- [9] Tantawy M.A., El-Roudi A.M., Salem A.A., [Immobilization of Cr \(VI\) in Bagasse ash Blended Cement pastes](#), *Construction and Building Materials*, **30**(1):218-223 (2012).
- [10] Radić S., Babić M., Škobić D., Roje V., Pevalek-Kozlina B., [Ecotoxicological Effects of Auminum and Zinc on Growth and Antioxidants in Lemna minor L](#), *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **73**(3):336-42 (2010).
- [11] Wu Q., Qu Y., Li X., Wang D., [Chromium Exhibits Adverse Effects at Environmental Relevant Concentrations in Chronic Toxicity Assay System of Nematode Caenorhabditis Elegans](#), *Chemosphere*, **87**(11):1281-7 (2012).
- [12] Chen Q.Y., Tyrer M., Hills C.D., Yang X.M., Carey P., [Immobilisation of Heavy Metal in Cement-Based Solidification/Stabilisation: a Review](#), *Waste Management*, **29**(1):390-403 (2010).
- [13] Ivšić-Bajčeta D., Kamberović Ž., Korać M., Gavrilovski M., [A Solidification/Stabilization Process for Wastewater Treatment Sludge from a Primary Copper Smelter](#), *Journal of the Serbian Chemical Society*, **78**(5):725-39 (2013).
- [14] Radovanović D.Đ., Kamberović Ž.J., Korać M.S., Rogan J.R., [Solidified Structure and Leaching Properties of Metallurgical Wastewater Treatment Sludge After Solidification/Stabilization Process](#), *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, **51**(1):34-43 (2016).
- [15] Jegandan S., Liska M., Osman A.A., Al-Tabbaa A., [Sustainable Binders for Soil Stabilization](#), *Proceedings of the ICE-Ground Improvement*, **163**(1):53-61 (2010).
- [16] Cubukcuoglu B., Ouki S.K., [Solidification/Stabilisation of Electric Arc Furnace Waste Using Low Grade MgO](#), *Chemosphere*, **86**(8):789-96 (2012).
- [17] del Valle-Zermeño R., Giró-Paloma J., Formosa J., Chimenos J.M., [Low-Grade Magnesium Oxide by-products for Environmental Solutions: Characterization and Geochemical Performance](#), *Journal of Geochemical Exploration*, **152**:134-44 (2015).
- [18] Khayet M., Cojocar C., Essalhi M., [Artificial Neural Network Modeling and Response Surface Methodology of Desalination by Reverse Osmosis](#), *Journal of Membrane Science*, **368**(1):202-14 (2011).
- [19] Ranjan D., Mishra D., Hasan S.H., [Bioadsorption of Arsenic: an Artificial Neural Networks and Response Surface Methodological Approach](#), *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **50**(17):9852-63 (2011).
- [20] Khanlou H.M., Sadollah A., Ang B.C., Kim J.H., Talebian S., Ghadimi A., [Prediction and Optimization of Electrospinning Parameters for Polymethyl Methacrylate Nanofiber Fabrication Using Response Surface Methodology and Artificial Neural Networks](#), *Neural Computing and Applications*, **25**(3-4):767-77 (2014).

- [21] Keypour H., Noroozi M., Rashidi A., Shariati Rad M., [Application of Response Surface Methodology for Catalytic Hydrogenation of Nitrobenzene to Aniline Using Ruthenium Supported Fullerene Nanocatalyst](#), *Iran. J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE)*, **34**(1):21-32 (2015).
- [۲۲] ترجمان نژاد، علی؛ یاسمی، مهناز، [پیش بینی حلالیت اکسیژن در حلال های آلی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی](#)، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، (۱) ۳۳: ۴۹ تا ۵۵ (۱۳۹۳).
- [23] Ojovan M.I., Lee W.E., ["An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation"](#), Newnes (2013).
- [24] ASTM C109 / C109M-13e1., ["Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars \(Using 2-in. or \[50-mm\] Cube Specimens\)"](#), ASTM International, West Conshohocken (2013).
- [25] Method 1311., ["Toxicity Characteristic Leaching Procedure Test Method for Evaluation of Solid Wastes, Physical Chemical Methods"](#), United States Environmental Protection Agency (2003).
- [26] Lasheen M.R., Ashmawy A.M., Ibrahim H.S., Moniem S.M., [Pozzolanic-Based Materials for Stabilization/Solidification of Contaminated Sludge with Hazardous Heavy Metal: Case Study](#), *Desalination and Water Treatment*, **51**:(13-15):2644-55 (2013).
- [27] Geyikçi F., Kılıç E., Çoruh S., Elevli S., [Modelling of Lead Adsorption from Industrial Sludge Leachate on Red mud by Using RSM and ANN](#), *Chemical Engineering Journal*, **183**:53-9 (2012).
- [28] Ebrahimzadeh H., Tavassoli N., Sadeghi O., Amini M.M., Jamali M., [Comparison of Novel Pyridine-Functionalized Mesoporous Silicas for Au \(III\) Extraction from Natural Samples](#), *Microchimica Acta*, **172**(3-4):479-87 (2012).
- [29] Trezza M.A., Tironi A., Irassar E.F., Scian A.N., [Blended Cements with Kaolinitic Calcined Clays: Study of the Immobilization of Cr \(VI\)](#), *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, **10**:203-209 (2015).
- [30] Lampris C., Stegemann J.A., Cheeseman C.R., [Solidification/Stabilisation of Air Pollution Control Residues Using Portland Cement: Physical Properties and Chloride Leaching](#), *Waste Management*, **29**(3):1067-75 (2010).