

بررسی تأثیر اجزای تشکیل‌دهنده پرکننده‌های خمیری حاصل از باطله‌های معدنی بر رفتار مکانیکی و رئولوژیکی آن

مرتضی گراوند^۱، رامین دوست محمدی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، morteza.garavand@znu.ac.ir

۲- دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، ramin.doostmohammadi@znu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۰)

چکیده

استفاده از پرکننده‌های خمیری سیمانی در پرکردن فضاهای زیرزمینی توسط صنایع معدنی در حال گسترش است. در این مقاله قابلیت استفاده از باطله‌های کارخانه فرآوری در تهیه پرکننده خمیری سیمانی و عوامل موثر بر مقاومت و اسلامپ آن با استفاده از اصول طراحی آزمون‌ها و نتایج آزمایشگاهی بررسی شده است. در پرکننده مورد مطالعه از باطله واسطه سنگین معدن سرب و روی انگوران زنجان به‌عنوان خاک دانه‌درشت، باطله لیچ همین معدن به‌عنوان خاک ریزدانه و سیمان پرتلند تیپ یک به‌عنوان چسباننده استفاده شد. به‌منظور به حداقل رساندن تعداد آزمایش‌ها و ارائه یک نسبت ترکیبی مناسب، طراحی آزمایش بر اساس روش رویه پاسخ با ۵ سطح برای هر متغیر انجام شد که منجر به انجام ۱۲۰ آزمون آزمایشگاهی شد. در این مقاله، میزان تأثیر نسبت باطله لیچ به واسطه سنگین، سیمان و آب بر مقاومت و میزان اسلامپ پرکننده خمیری سنجیده شده و در نهایت رابطه‌ای برای بیان ارتباط متغیرها ارائه شده و مقادیر بهینه متغیرهای ورودی برای حصول مقادیر هدف تعیین شده است. نتایج طراحی‌ها و آزمون‌های آزمایشگاهی نشان دادند که افزایش نسبت باطله لیچ به واسطه سنگین بیش از سایر اجزا بر ویژگی‌های پرکننده خمیری (مقاومت فشاری و اسلامپ) تأثیرگذار است. افزایش این نسبت به شکل معنی‌داری باعث افزایش مقاومت فشاری و سرعت موج و کاهش اسلامپ پرکننده می‌شود. افزایش سیمان، مقاومت فشاری در نمونه‌ها را افزایش می‌دهد، اما تأثیر آن کمتر از سایر متغیرها است.

کلیدواژه‌ها: پرکننده‌های خمیری، اجزای جامد، خواص مکانیکی، روش رویه پاسخ

۱-مقدمه

CPB را به‌عنوان یک جایگزین اقتصادی برای هر دو نوع پرکننده سنگی و هیدرولیکی تقویت کرده است. به‌منظور افزایش قدرت CPB، مقداری چسباننده (مانند سیمان)، در محدوده ۲ تا ۱۰ درصد به آن اضافه می‌شود؛ اما چون هزینه سیمان زیاد است از موادی چون خاکستر، ماسه‌های رودخانه، مواد باطله، سرباره و زباله‌های جامد شهری در ترکیب با سیمان استفاده می‌شود [۴، ۵].

به‌طور تجربی نشان داده‌شده است که باطله‌هایی که در مخلوط خمیر استفاده می‌شود باید ذرات ریزتر از ۲۰ میکرومتر داشته باشند که به‌عنوان روان کننده عمل می‌کنند تا جریان پمپ را در خطوط لوله تسهیل کنند. برخلاف پر کردن هیدرولیکی، CPB را می‌توان بدون حذف ذرات ریز ترکیب کرد و در نتیجه حداکثر مقدار باطله، بدون در نظر گرفتن توزیع اندازه ذرات مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶، ۷].

پایداری مکانیکی یکی از مهم‌ترین معیارهای طراحی CPB است. خواص مکانیکی CPB معمولاً به مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)، رفتار تنش - کرنش و مدول الاستیسیته مربوط می‌شود. درک خوبی از خواص مکانیکی، کلیدی برای ارزیابی پایداری و عملکرد ساختار CPB است [۷]. شایع‌ترین روش اقتصادی و مستقیم برای تعیین مقاومت مکانیکی و رفتار تنش-کرنش مواد پرکننده، انجام آزمون UCS است. مقاومت مکانیکی برای هر پرکننده می‌تواند متفاوت باشد و به هدف پرکردن و مقاومت مورد نیاز بستگی دارد. مقاومت فشاری تک‌محوری مورد نیاز برای ساختار CPB متفاوت است و عمدتاً به چندین عامل، مانند کاربرد پرکننده‌ها و شرایط زمین، وابسته است. مقاومت فشاری CPB مورد استفاده با هدف فقط پرکردن به طور معمول بسیار کم و حداکثر ۳۰۰ کیلو پاسکال است [۱]. این مقاومت فشاری می‌تواند فاکتور ایمنی حداقل برای انباشت‌های ایجاد شده توسط پرکننده‌های خمیری را تأمین نماید. لازم به تأکید است که در صورت استفاده از پرکننده خمیری جهت سایر مقاصد (مانند نگهداری سقف و جلوگیری از نشست زمین)، بایستی حداقل مقاومت لازم محاسبه شده و ترکیب اجزای جامد برای برآورده کردن نیاز جدید، طراحی شود. امکان انتقال CPB یکی دیگر از معیارهای طراحی آن به شمار می‌آید به‌طوری‌که در بیشتر موارد انتقال مواد با استفاده از خطوط لوله صورت می‌پذیرد. هنگامی که مقدار آب مخلوط زیاد باشد مقدار اسلامپ آن بیشتر شده و مخلوط به راحتی در داخل لوله‌ها جریان می‌یابد. محتوی آب بیش از اندازه باعث افزایش زمان گیرش مخلوط و کاهش

مواد معدنی استخراج شده از معادن تحت فرآیند فرآوری قرار می‌گیرند تا ماده تغلیظ شده مورد نیاز سایر بخش‌های صنعتی فراهم شود. در این فرآیند حجم زیادی از باطله حاصل می‌شود که معمولاً در سطح زمین انباشت می‌شود. باطله‌های سولفیدی منجر به تولید زهاب اسیدی شده و باعث انتشار فلزات سنگین مانند آرسنیک (As)، سرب (Pb)، روی (Zn) و غیره شده که آلودگی منابع آب‌و خاک را به همراه دارد [۱]. امروزه باطله‌های تولیدشده در فرآوری مواد معدنی از طریق دفع در سدهای باطله، تخلیه در مناطق عمیق دریا و یا پرکردن در معادن زیرزمینی مدیریت می‌شود. در عمل، تخلیه در عمق دریا به‌ندرت انجام می‌شود و در عوض سدها، به‌طور گسترده‌ای برای مدیریت و دفع باطله‌ها در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. بیش از ۳۵۰۰ سد باطله در سراسر جهان ساخته شده‌اند و در تعدادی از سدها، حوادث رخ داده است. بین سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ و ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۱ به‌طور متوسط ۲ تا ۵ حادثه در سال در آن‌ها رخ داده است. در مجموع ۱۹۸ حادثه مرتبط با سدهای باطله قبل از سال ۲۰۰۰ و ۲۲ حادثه بعد از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ در سراسر جهان به وقوع پیوسته است. [۲، ۳]. بنابراین استفاده از باطله کارخانه‌های فرآوری در پر کردن معادن زیرزمینی، مشکلات ایمنی و زیست‌محیطی مربوطه را حل کرده و اجرای آن‌ها در مدیریت باطله‌های معدنی توصیه می‌شود [۱].

۲-پیشینه پژوهش

در میان انواع پرکننده‌ها (از جمله پرکردن سنگی و هیدرولیکی)، پرکننده‌های سیمانی خمیری (CPB^۱) به‌طور گسترده در بسیاری از معادن زیرزمینی در سراسر جهان استفاده می‌شود و حجم باطله‌های معدنی موجود در سطح را کاهش می‌دهد [۱]. تکنولوژی پرکردن خمیری برای اولین بار با موفقیت در معدن بدگراند در آلمان در سال ۱۹۸۰ استفاده شد، ولی توسعه آن از اواسط ۱۹۹۰ آغاز شده است [۴].

خمیر را می‌توان به‌عنوان یک ماده دانه‌ریز مخلوط با سیمان و آب کافی برای پر کردن شکاف و فضای خالی در نظر گرفت به‌طوری‌که مواد، رفتاری مشابه سیال دارند. خمیر تولیدشده یک دوغاب غلیظ با چگالی بالاست که معمولاً محتویات جامد آن از ۷۰ تا ۸۵ درصد تغییر می‌کند که در بیرون معدن ساخته‌شده و از طریق خط لوله یا نیروی گرانش به زیر زمین منتقل می‌شود. مزایای زیست‌محیطی، انتخاب

هیدراته موجود (C-S-H) را از بین ببرد و باعث ناپایداری پرکننده خمیری شود [۱].

فال و همکاران (۲۰۰۵) همچنین دریافتند که استحکام اولیه نمونه‌های CPB (در کمتر از ۲۸ روز) با غلظت سولفات کمتر از ۲۰۰۰ ppm افزایش می‌یابد که ناشی از رسوبات آبدار ثانویه (مانند گچ، اترینگیت) است. این رسوبات فضاهای خالی در CPB را پر می‌کنند و موجب افزایش استحکام می‌شوند [۷].

ین و همکاران (۲۰۱۲) اثر اجزای جامد بر خواص مکانیکی و رئولوژیکی پرکننده‌های خمیری تهیه شده از باطله‌های معدن سرب و روی Chihong را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که نمونه‌های پرکننده خمیری با ۷۹ درصد وزنی جامد (که بخش عمده آن کلسیت و دولومیت است)، دارای حداکثر مقاومت در زمان ۲۸ روزه می‌باشند. اضافه شدن ۲۵٪ وزنی سرباره باعث می‌شود اسلامپ از ۱۳ به ۲۵/۴ سانتی‌متر برسد که عمدتاً به علت کاهش اصطکاک در نتیجه ایجاد فضاهای خالی بین ذرات است. با این حال، اضافه کردن سرباره درشت، خواص مکانیکی CPB را تضعیف می‌کند به طوری که UCS نمونه‌های بدون سرباره تقریباً دو برابر بزرگ‌تر از UCS نمونه‌ها با افزودن ۲۵٪ سرباره است [۱۰].

کارخانه‌های فرآوری مرتبط با معدن سرب و روی انگوران (یکی از بزرگترین معادن سرب و روی خاورمیانه که در استان زنجان واقع شده است) باطله‌های مختلفی تولید می‌کنند. در این مقاله قابلیت تهیه پرکننده‌های خمیری از این باطله‌ها و تأثیر اجزای جامد بر رفتار مکانیکی و رئولوژیکی آن، فقط با هدف تدفین باطله و پرکردن فضاهای خالی، با رسیدن به مقاومت فشاری لازم برای پرکردن (۳۰۰ کیلوپاسکال) و متوسط اسلامپ مورد نیاز پرکننده‌های خمیری (۲۰۰ میلی‌متر) مورد سنجش قرار خواهد گرفت. در صورت استفاده از این باطله‌ها در هر محلی بنا به شرایط ویژه زیست‌محیطی آن (تداخل با آب‌های سطحی، زیرزمینی، نگهداری و جلوگیری از نشست زمین و غیره)، بایستی مسائل مربوطه نیز در سایر مراحل امکان‌سنجی بررسی شوند.

۳- مواد، روش آزمایش و تجهیزات

مواد و مصالح مورد نیاز از باطله‌های کارخانه سرب و روی معدن انگوران تهیه شدند و دانه‌بندی آن‌ها متناسب با استانداردهای موجود، مشخص شدند. هدف از انجام این تحقیق بررسی امکان تدفین این باطله‌ها در قالب پرکننده‌های خمیری در محدوده مشخصات مکانیکی و رئولوژیکی مورد نیاز معرفی

مقاومت آن می‌شود. با در نظر گرفتن محدودیت‌های فوق، اسلامپ مناسب پرکننده‌های خمیری به طور متوسط ۲۰۰ میلی‌متر معرفی شده است [۱].

مطالعات مختلفی روی پرکننده‌های خمیری انجام شده است. این تحقیقات نشان داده است که ذرات ریز در یک پرکننده با دانه‌بندی مناسب می‌توانند حفره‌های بین ذرات بزرگ‌تر را پر کنند که باعث کاهش حجم اشغال‌شده توسط سیمان (چسباننده) شده و منجر به تشکیل پیوندهای قوی‌تر می‌گردد. کسیمال و همکاران (۲۰۰۳) تأثیر مقدار ریزدانه (کوچکتر از ۲۰ میکرومتر) در باطله‌ها را بر مقاومت کوتاه‌مدت پرکننده‌های خمیری بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که کاهش مقدار ریزدانه از طریق نرمه‌گیری تأثیر مثبتی بر مقاومت نمونه‌های خمیری دارد که بالاترین مقاومت در باطله‌هایی که حاوی ۲۵٪ ریزدانه هستند به دست می‌آید [۸].

فال و همکاران (۲۰۰۵) اثر باطله‌های ریزدانه بر توسعه پایدار کوتاه‌مدت پرکننده‌های خمیری تولیدشده از باطله‌های کارخانه استخراج طلا در نسبت‌های مختلف چسباننده را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که حداکثر مقاومت نمونه‌های پرکننده خمیری با مقدار ریزدانه ۲۵ تا ۳۰ درصد است که به‌عنوان محدوده مطلوب برای طراحی پرکننده‌های خمیری تفسیر شده است [۷].

به‌خوبی شناخته‌شده است که باطله ریزدانه نیاز به آب بیشتری از باطله‌های درشت برای رسیدن به استحکام هدف دارند که به‌نوبه خود باعث افزایش رطوبت و مقدار اجزای جامد کمتر می‌شود. از سوی دیگر، نمونه‌های پرکننده خمیری ساخته‌شده با باطله‌های درشت، آب بیشتری را نسبت به مواد تولیدشده با باطله‌های متوسط یا ریز آزاد می‌کنند. به‌طور کلی، همان‌طور که مقدار ریزدانه در یک پرکننده کاهش می‌یابد، میزان تنشینی باطله‌ها افزایش می‌یابد [۷، ۹].

کانی‌شناسی باطله‌ها بر تعدادی از ویژگی‌های دیگر پرکننده‌های خمیری، مانند نگهداری آب، استحکام و ویژگی‌های رسوب‌گذاری تأثیر می‌گذارد. میکاها در جهت نگهداری آب پرکننده‌های خمیری استفاده می‌شوند. مواد معدنی سیلیکات (به‌خصوص کوارتز) می‌تواند بسیار ساینده و منجر به نرخ سایش بالا در سیستم خط لوله شود. به همین ترتیب، مواد معدنی سولفیدی (به‌عنوان مثال پیریت) موجود در باطله‌ها ممکن است بر استحکام و پایداری پرکننده‌های خمیری تأثیر بگذارد. اسید تولیدشده توسط اکسیداسیون باطله‌های سولفیدی می‌تواند ساختار اتصال کلسیم سیلیکات

۳-۱-۱-آب

در انجام این پروژه، برای ساخت نمونه‌ها، از آب شرب آزمایشگاه استفاده شد. pH این آب حدود ۷/۳ اندازه‌گیری شده است.

۳-۱-۲-سیمان

سیمان مورد استفاده در این پژوهش از نوع پرتلند تیپ ۱ معمولی با مشخصه کارخانه‌ای ۱-۳۲۵ است.

۳-۱-۳-باطله واسطه سنگین (Hmw^2)

این باطله محصول فرایند فرآوری واسطه سنگین است که مطابق استاندارد ASTM C136، ۶۰ درصد این باطله در رده شن و ۴۰ درصد در رده ماسه قرار دارند. منحنی دانه‌بندی باطله واسطه سنگین در شکل ۲ (الف) مشاهده می‌شود.

۳-۱-۴-باطله لیچ (Lt^3)

این باطله محصول فرایند لیچینگ است که از کارخانه‌های فرآوری سرب و روی انگوران تهیه شدند. بخش مرطوب مواد ابتدا در دستگاه آون خشک شد. نمونه‌ها به این دلیل در آون خشک شدند تا بتوان در مراحل بعدی، مقدار آب هر طرح اختلاط را به دقت اضافه و آن را تنظیم کرد. این مواد پس از خشک شدن به‌طور کامل باهم ترکیب شده تا مخلوط یکنواخت که نماینده کل باطله موجود باشد، به‌دست آید. نمودار دانه‌بندی باطله ریزدانه مطابق استاندارد ASTM D 424-63 که به روش هیدرومتری ترسیم شده، در شکل ۲ (ب) ملاحظه می‌شود. این باطله حاوی لای قابل ملاحظه‌ای است. آنالیز $XRD^4 - XRF^5$ مربوط به نمونه تهیه‌شده انجام گرفت که در جدول ۱ مهم‌ترین عناصر تشکیل‌دهنده نشان داده شده است.

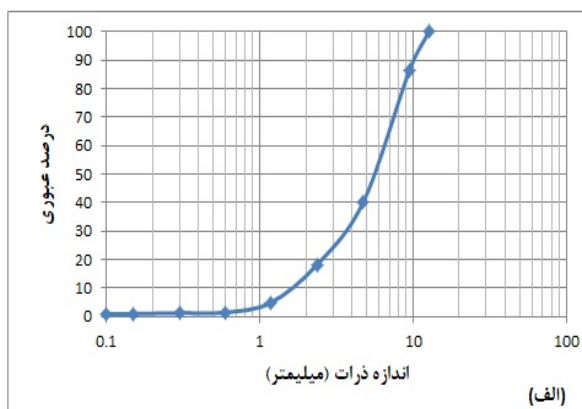
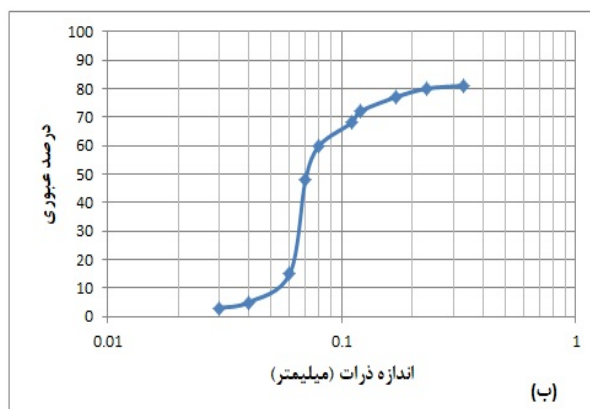
شده در بخش ۲ می‌باشد. با انجام آزمایش‌های اولیه آزمایشگاهی مشخص شد که با خروج از محدوده مقادیر سیمان ۲ تا ۱۰ درصد و آب ۲۵ تا ۲۹ درصد و نسبت Lt/Hmw بین ۰/۶۵ تا ۱/۵، مقاومت فشاری و اسلامپ پرکننده، خارج از محدوده مشخصات مکانیکی و رئولوژیکی تعریف شده قرار می‌گیرند (این خروج از محدوده در نتایج آمده در بخش ۴ قابل مشاهده است). بنابراین به‌منظور به حداقل رساندن تعداد آزمایش‌ها و ارائه یک نسبت ترکیبی مناسب، طراحی آزمایش بر اساس روش رویه پاسخ در پنج سطح در محدوده تعریف شده فوق برای هر متغیر انجام گرفت. ابتدا آزمایش اسلامپ بر روی مخلوط پرکننده انجام شد و سپس نمونه‌ها ساخته شده به مدت ۷ و ۲۸ روز در دمای آزمایشگاه قرار داده شدند تا به نهایت مقاومت خود رسیده و سپس آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. در نهایت نتایج آزمایشگاهی تجزیه و تحلیل شده و با یکدیگر مقایسه گردیدند.

۳-۱-مواد

مواد اولیه تهیه شده از کارخانه‌های فرآوری سرب و روی معدن انگوران در شکل ۱ مشاهده می‌شوند.



شکل ۱- مواد خام اولیه (الف) باطله واسطه سنگین (ب) باطله لیچ



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی (الف) باطله درشت‌دانه (ب) باطله ریزدانه

جدول ۱- نتایج آنالیز XRF-XRD باطله ریزدانه

مقدار (%)	عنصر	مقدار (%)	عنصر
3.7300	Pb	24.5700	SO ₃
3.3700	Fe	17.1300	SiO ₂
2.2100	zn	15.5600	CaO
1.0948	MgO	4.5350	Al ₂ O ₃
0.9169	K ₂ O	4.1010	Na ₂ O

۲-۲-۲- روش بهینه‌سازی

روش یکی در یک‌زمان، از روش‌های مطرح در بهینه‌سازی و بررسی تأثیر عوامل مؤثر در فرآیند است. در این روش یک عامل مؤثر (فاکتور) در بازه‌ای از سطوح مشخص متغیر بوده و سایر عوامل ثابت در نظر گرفته می‌شوند. برای دستیابی به شرایط بهینه، بایستی آزمایش‌ها برای تمام عوامل تکرار شود که این خود منجر به افزایش بسیار زیاد تعداد آزمایش‌ها می‌شود و از سوی دیگر، تأثیر متقابل بین فاکتورها نیز نادیده گرفته می‌شود. برای کاهش محدودیت‌های ذکر شده، روش‌های طراحی آزمایش بر مبنای تکنیک‌های آماری ابداع شده است که در تمامی آن‌ها، هدف پیدا کردن بهترین شرایط برای عملکرد یک سیستم است روش‌های طراحی آزمایش متنوع هستند، برخی روش‌ها بسیار ساده و سریع می‌باشند، اما با محدودیت‌های زیاد همراه‌اند. تعدادی نیز بسیار پیچیده و حرفه‌ای‌تر هستند که اطلاعات بسیار کامل و دقیقی در تحلیل نهایی به دست می‌دهند. روش رویه پاسخ تکنیکی برای بهینه‌سازی و مدل‌سازی یک فرآیند است که در آن پاسخ موردنظر توسط چندین متغیر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر این تکنیک بین پاسخ و متغیرهایی که خروجی فرآیند را تحت تأثیر قرار می‌دهند، ارتباط برقرار می‌کند [۱۱]، [۱۲]. روش رویه پاسخ به‌طور معمول به دو روش طراحی ترکیب مرکزی (CCD^۶) و باکس بنکن (BBD^۷) انجام می‌شوند. در پژوهش حاضر، روش CCD مورد استفاده قرار گرفت. در روش CCD، رویه پاسخ با انطباق یک چندجمله‌ای درجه دوم مدل می‌شود. تعداد آزمایش‌های لازم برای مدل‌سازی برابر $2^f + n_c$ می‌باشد. که در آن f و n_c به ترتیب تعداد فاکتورهای مورد استفاده در طراحی و دفعات تکرار نقاط مرکزی می‌باشد. در طرح CCD، ماتریس پیشنهاد شده برای انجام آزمایش‌ها از سه بخش مجزا تشکیل شده است. بخش اول شامل نقاط جزئی می‌باشد که سطوح فاکتورهای متناظر با

آن با کدهای (۱- و ۱+) نشان داده می‌شود. بخش دوم شامل نقاط مرکزی می‌باشد که در آن تمام فاکتورها در سطوح میانی یا صفر خود هستند و به‌طور معمول بیش از یک‌بار تکرار می‌شوند. بخش سوم شامل نقاط محوری هستند که در آن تمام فاکتورها در سطوح میانی یا صفر خود هستند و به‌طور معمول بیش از یک‌بار تکرار می‌گردند و سطوح متناظر با آن‌ها با نمادهای ($+\alpha$ و $-\alpha$) مشخص می‌شوند. این نقاط به‌منظور دوران پذیر کردن طرح آزمایش‌ها در نظر گرفته می‌شوند. دوران پذیر بودن به این معنا است که میزان دقت طرح در تخمین پاسخ در تمام جهات برابر است [۱۱]. در روش RSM متغیرهای ورودی شامل فاکتورهایی است که سطوح آن‌ها در واحدها و بازه‌های مختلف هستند. در نتیجه سطوح عوامل به‌صورت خطی به سطوح کدبندی شده بدون واحد تبدیل می‌شوند و تمام عوامل در یک بازه $\pm\alpha$ قرار می‌گیرند. بنابراین برای هر متغیر مجزا در این روش ۵ سطح با کدهای مشخصه ($-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha$) در نظر گرفته می‌شود [۱۱، ۱۲]. نمودارهای کانتور و سطح، برای برقراری رابطه مناسب میان مقادیر پاسخ و شرایط عملیاتی به‌کار می‌روند. در نمودار کانتور، سطح پاسخ به‌صورت یک سطح دوبعدی دیده می‌شود که همه نقاط با پاسخ یکسان برای تولید منحنی تراز پاسخ‌های ثابت به یکدیگر متصل می‌شوند. نمودار سطح نمایش یک نمودار سه‌بعدی است که دو عامل متغیر را در محورهای x و y و مقدار پاسخ را در محور z نمایش می‌دهد و در آن تصویر تراز پاسخ به‌صورت سطح یکپارچه دیده می‌شود [۱۱].

۳-۲-۱- رویکرد مدل‌سازی

شکل ۳ رویکرد مدل‌شناسی توسعه داده شده و مراحل مختلف پیش‌بینی تأثیر اجزای جامد بر عملکرد CPB برای بهینه‌سازی مخلوط را نشان می‌دهد. این روش شامل سه مرحله اصلی تجربی، مدل‌سازی و بهینه‌سازی است. هدف از مطالعه تجربی، شناسایی و ارزیابی اجزای اصلی مخلوط (CPB باطله، آب و چسباننده) بر خواص مکانیکی (مقاومت فشاری) و اسلامپ است. به‌طور تجربی نشان داده شده که برای شرایط محیطی مشخص (مانند دما و رطوبت)، عملکرد CPB بیشتر تحت تأثیر ویژگی‌های اجزای آن (آب، سیمان و خاکهای باطله) است [۱۲].

می‌شود. مخلوط باید در طول این فرآیند بر روی صفحه فلزی ثابت بماند. پس از پر شدن، مخروط به آرامی و به صورت قائم بالا کشیده می‌شود. اسلامپ مخلوط، به عنوان تفاوت در سطح ارتفاع اولیه مخلوط (شکل ۴-الف) و ریزش مواد پس از جابه‌جایی مخروط اسلامپ (شکل ۴-ب) تعریف می‌شود.

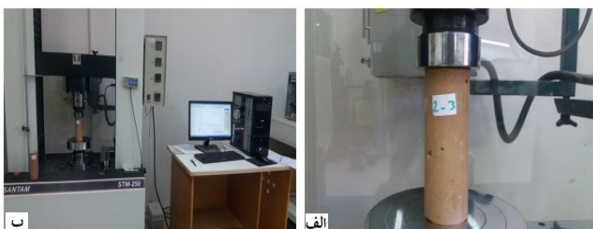


شکل ۴- طرح مخروط اسلامپ

۳-۳-۲- آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک محوری

برای انجام آزمون مقاومت فشاری از دستگاه STM-250 با ظرفیت ۲۵ تن ساخت شرکت سنتام استفاده شد. نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۵۴ میلی‌متر و نسبت ارتفاع به قطر بین ۲/۵ و ۲/۶ مطابق با استاندارد ISRM تهیه شدند. لازم به تاکید است که در این استاندارد در صورتی که نسبت ارتفاع به قطر نمونه‌ها ۲ تا ۳ باشد، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در نتیجه آزمایش وجود نخواهد داشت (Brady and Brown, 2005). در این مطالعه نسبت ارتفاع به قطر نمونه‌ها در محدوده میانگین فوق (نسبت ۲/۵) تنظیم شده است. گاهی در تهیه قالب‌ها ممکن است خطای یک میلی‌متر در این نسبت ایجاد شود که تا ۲/۶ افزایش یابد که با توجه به توضیح فوق، تأثیری در نتیجه نهایی نخواهد داشت.

ابتدا دو سر نمونه‌های آزمایشگاهی صاف و سپس طول و قطر نمونه‌ها اندازه‌گیری شده، سپس مطابق شکل‌های ۵ تحت بارگذاری قرار گرفتند. به‌طور کلی برای هر آزمون، سه نمونه آماده و تحت بارگذاری قرار گرفت و میانگین مقاومت‌های اندازه‌گیری شده به عنوان نتیجه نهایی گزارش شد. جهت دریافت اطلاعات دقیق، سرعت بارگذاری ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد.



شکل ۵- آزمایش مقاومت فشاری آماده‌سازی و جابجایی نمونه در دستگاه جهت انجام آزمون

در مرحله دوم، این پارامترهای شناسایی شده، به عنوان داده‌های پایه‌ای برای مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. این امر امکان پیش‌بینی مقاومت فشاری (UCS) و اسلامپ CPB مورد مطالعه را فراهم می‌نماید.

بهینه‌سازی تولید CPB در مرحله سوم ضروری است. منظور از بهینه‌سازی یافتن سطوحی از فاکتورهای مؤثر بر آزمایش است که پاسخ آزمایش حداکثر یا حداقل شود.

بر اساس نتایج در فاز آزمایشی اولیه، مطالعه در ادبیات مختلف و همچنین مواد در دسترس، سه عامل مطابق با شکل ۳ برای توصیف سیستم پرکننده‌های خمیری سیمانی انتخاب شدند:



شکل ۳- شماتیکی از مدل توسعه‌یافته

اثرات عوامل بیان‌شده بر خواص عملکرد CPB با استفاده از طراحی تجربی بررسی شد و طراحی کامپوزیت مرکزی (CCD) جهت توسعه مدل‌های مواد برای CPB استفاده شد. آزمایش‌ها به صورت تصادفی اجرا و پنج سطح متغیر در طراحی آزمایش مطابق جدول ۲ انجام شد. برای طراحی آزمایش‌ها، تحلیل نتایج حاصل و ترسیم منحنی‌های سطح پاسخ از نرم‌افزار مینی‌تپ ۱۶ استفاده شد.

جدول ۲- عوامل و سطوح آن‌ها برای طراحی آزمایش به روش

CCD

متغیر	$-\alpha$	۰	+۱	$+\alpha$
سیمان	۹/۲۷	۶	۸	۲/۷۳
Lt/Hmw	۱/۴۶	۱/۰۵	۱/۳	۰/۶۴
آب	۲۸/۶۳	۲۷	۲۸	۲۵/۳۶

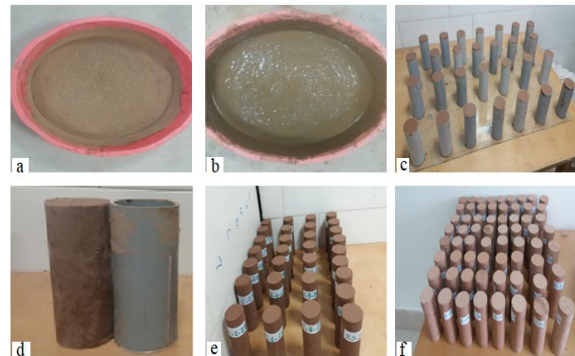
۳-۳-۳- آزمایش‌ها، تجهیزات و آماده‌سازی نمونه‌ها

۳-۳-۱- آزمایش تعیین اسلامپ

آزمون اسلامپ به دلیل سادگی آن در عمل برای تعیین خصوصیات جریان پذیری پرکننده‌های خمیری مطابق با استاندارد ASTM C 143 انجام می‌شود. مخروط اسلامپ استاندارد، مخروط دایره‌ای قائم با ارتفاع ۱۲، قطر پایین و بالای به ترتیب ۸ و ۴ اینچ است. مخروط فوق در سه لایه از ماده پرکننده پر شده و هر لایه توسط میله فلزی متراکم

۳-۳-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

تمام باطله‌های تهیه‌شده از کارخانه فرآوری سرب و روی، شامل درشت دانه Hmw، ریزدانه Lt و سیمان به‌طور جداگانه با یکدیگر مخلوط شدند تا برای هرکدام مجموعه یکنواختی به دست آید. سپس بر اساس طراحی آزمایش صورت گرفته مواد در حالت خشک با یکدیگر مخلوط شدند، پس از آن با اضافه کردن آب به مخلوط خشک، خمیر پرکننده شکل گرفت. در ابتدا از مخلوط برای انجام آزمون اسلامپ استفاده شده و پس از اتمام آزمون اسلامپ، مخلوط‌ها بلافاصله در داخل قالب‌ها (از جنس PVC) ریخته شدند. قالب‌ها با دقت توسط ماشین تراش تهیه شدند، به‌طوری‌که سطوح انتهایی آن‌ها کاملاً موازی یکدیگر هستند. قالب‌ها از یک طرف بر روی یک صفحه شیشه‌ای کاملاً تراز و صاف قرار گرفته و مخلوط نرم از دهانه دیگر، داخل آن‌ها ریخته می‌شود و توسط کاردکی که مماس به سطوح انتهایی قالب قرار دارد، تسطیح می‌گردد. نمونه‌ها پس از گذشت ۳۶ ساعت از قالب‌ها خارج شده و بعد از کدگذاری، در دمای اتاق در فواصل زمانی ۷ و ۲۸ روزه به مقاومت مربوطه می‌رسند. پس از رسیدن به مقاومت نهایی، نمونه‌ها روی کاغذ سمباده نرم چسبیده به سطح شیشه ساییده می‌شوند تا زبری احتمالی کاملاً از بین برود و در نهایت توازی سطوح نمونه توسط کولیس کنترل و تایید می‌شود. مراحل تهیه نمونه‌ها در شکل ۶ مشاهده می‌شوند.



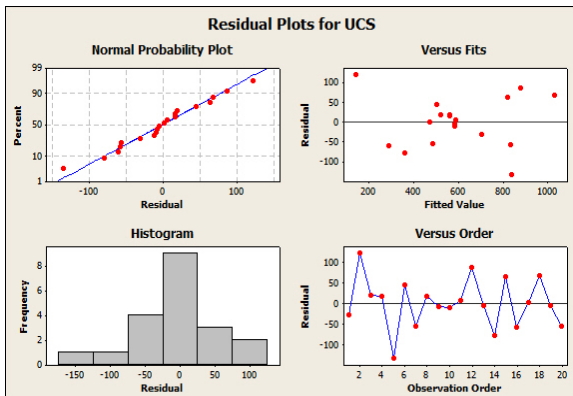
شکل ۶- مراحل تهیه نمونه‌ها (a) مخلوط خشک (b) تشکیل خمیر (c) قالب‌ریزی (d) خروج از قالب (e) کدگذاری (f) گذر زمان ۲۸ روزه

۴- بحث و نتایج

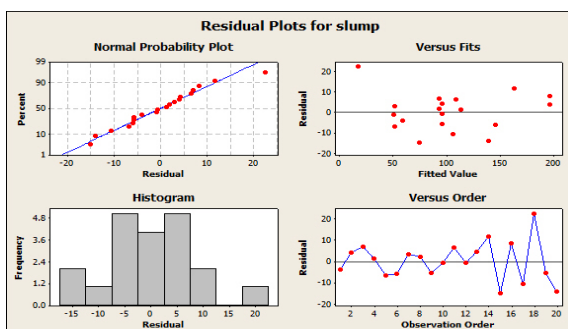
۴-۱- بررسی صحت مدل

توانایی مدل‌های توضیح داده شده در بخش ۳-۲ با استفاده از نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) در سطح اطمینان ۹۵ درصد مورد سنجش قرار گرفتند. در شکل‌های ۷

و ۸، معنی‌دار بودن مدل‌های درجه دوم برای مقاومت فشاری و اسلامپ ارزیابی شد. برای کفایت مدل چهار فرض بررسی می‌شود. اولین فرض برای نرمال بودن داده‌ها، نمودار نرمال پلات است، به این شکل که یک خط راست را از داده‌ها عبور داده و اگر خط رسم شده تمام داده‌ها را پوشش دهد نرمال بودن داده‌ها و به عبارتی کفایت مدل موردنظر را نشان می‌دهد. شکل‌های ۷ و ۸ تاییدی بر نرمال بودن داده‌ها هستند. فرض دوم ثابت بودن واریانس‌هاست به این ترتیب اگر تغییرات باقی مانده‌ها از روند خاص پیروی نکند شرط ثابت بودن واریانس‌ها برقرار است و نشان‌دهنده کفایت مدل است. فرض سوم نمودار هیستوگرام است که باید حالت گوسیانی داشته باشد. فرض چهارم استقلال داده‌ها نسبت به زمان است که نشان می‌دهد با توجه به تغییر زمان عامل موردنظر به‌صورت جهت‌دار تغییر نمی‌کند.



شکل ۷- نمودارهای باقی‌مانده جهت بررسی کفایت مدل مقاومت فشاری



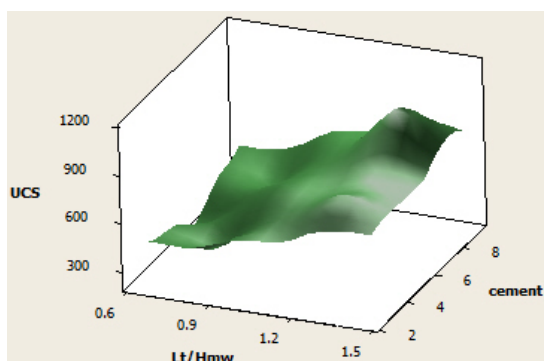
شکل ۸- نمودارهای باقی‌مانده جهت بررسی کفایت مدل اسلامپ

عامل بعدی جهت بررسی کفایت مدل صحت آن است که با توجه به مقادیر R^2 ها تعیین می‌شود. R^2 تعدیل شده (Adj- R^2) نسبت به سایر R^2 (مثل R^2 رگرسیون) نتایج قابل‌قبول‌تری را ارائه می‌دهد زیرا به جای مجموع مربعات از میانگین مربعات استفاده می‌کند که درجات آزادی را که نشان دهنده تعداد عوامل است را در محاسبات دخیل می‌کند. مقدار

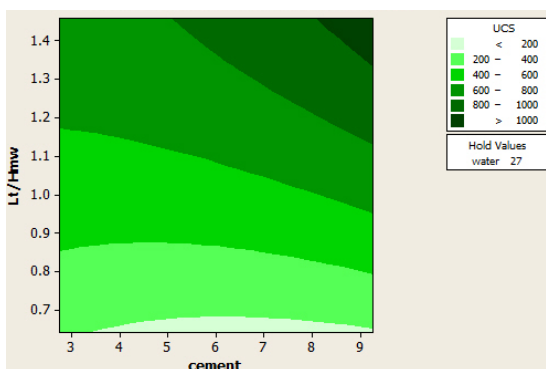
و مقاومت فشاری را بیشتر می‌کند. در نسبت‌های پایین Lt/Hmw کاهش مقاومت در نمونه‌ها مشاهده می‌شود که تأثیر منفی باطله دانه‌درشت بر مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار سه‌بعدی ملاحظه می‌شود، شیب تأثیرگذاری نسبت Lt/Hmw بیشتر از آب است که نشان می‌دهد این فاکتور، تأثیر بیشتری بر مقاومت فشاری دارد.

در شکل ۱۱ تأثیر هم‌زمان آب و سیمان در نسبت ثابت Lt/Hmw بر مقاومت فشاری CPB بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نسبت‌های پایین سیمان، مخلوط CPB همچنان مقاومت بالایی دارد که این امر به دلیل نسبت پایین آب و به تبع آن کاهش نسبت W/C است که باعث کاهش زمان رسیدن نمونه‌ها به مقاومت نهایی و افزایش استحکام پرکننده می‌شود.

مطابق شکل (۱۱-الف) شیب تأثیرگذاری آب بیشتر از سیمان است که نشان دهنده اثرگذاری بیشتر این فاکتور بر مقاومت فشاری پرکننده است.



(الف)



(ب)

شکل ۹- تأثیر سیمان و Lt/Hmw بر مقاومت فشاری CPB (الف) سه‌بعدی (ب) دو‌بعدی

R^2 تعدیل‌شده برای مدل مقاومت فشاری و اسلامپ به ترتیب ۸۴ و ۹۰ درصد بود که تأییدی بر مدل‌های ارائه‌شده است.

تأثیر مستقیم و برهم‌کنش متغیرها در مدل پیش‌بینی شده بر اساس مقادیر پارامتر آماری احتمال P-value مطابق جدول ۳ است. با توجه به سطح اطمینان ۹۵ درصد در نرم‌افزار Minitab مقادیر P کمتر از ۰/۰۵ برای یک متغیر نشان می‌دهد که آن متغیر به‌طور مؤثری پاسخ فرآیند را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای به دست آوردن یک معادله ساده، متغیرهای با تأثیر کمتر (با مقادیر P بیشتر از ۰/۰۵) از مدل نهایی حذف شدند.

جدول ۳- مقادیر p-value جهت بررسی تأثیر پارامترها بر مقاومت فشاری و اسلامپ

P-value		منبع
اسلامپ	UCS	
0.041	0.047	سیمان
0.000	0.000	Lt/Hmw
0.000	0.002	آب

۴-۲- تأثیر اجزای جامد بر مقاومت فشاری

با استفاده از مدل‌های پیشنهادشده برای بررسی تأثیر اجزای جامد بر خواص مکانیکی پرکننده خمیری، نمودارهای سه‌بعدی رویه پاسخ و دو‌بعدی کانتور رسم شدند که برای بررسی تأثیر عوامل مختلف بر مقاومت فشاری مورد بررسی قرار می‌گیرند. شکل ۹ تأثیر سیمان و نسبت Lt/Hmw بر مقاومت فشاری CPB را نشان می‌دهد. در طول این فرآیند، درصد آب ثابت است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش مقدار سیمان تأثیر مثبتی بر مقاومت پرکننده خمیری دارد. شیب این تأثیرگذاری مطابق شکل (۹-الف) ملایم است که نشان از تأثیرگذاری کم این پارامتر بر استحکام پرکننده دارد. افزایش نسبت Lt/Hmw به دلیل افزایش مقدار ریزدانه و کاهش تخلخل، مقاومت فشاری را بیشتر می‌کند.

شکل ۱۰ تأثیر آب و نسبت Lt/Hmw بر مقاومت فشاری CPB در مقدار ثابت سیمان را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین مقاومت در نسبت‌های بالای Lt/Hmw و درصد پایین آب به دست می‌آید، زیرا در این مقادیر با افزایش نسبت Lt/Hmw بخش ریزدانه خاک بیشتر شده و فضای خالی بین دانه‌ها کاهش پیدا می‌کند که در نتیجه مقاومت فشاری افزایش پیدا می‌کند. همچنین کاهش آب با توجه به ثابت بودن مقدار سیمان، نسبت W/C را کاهش داده

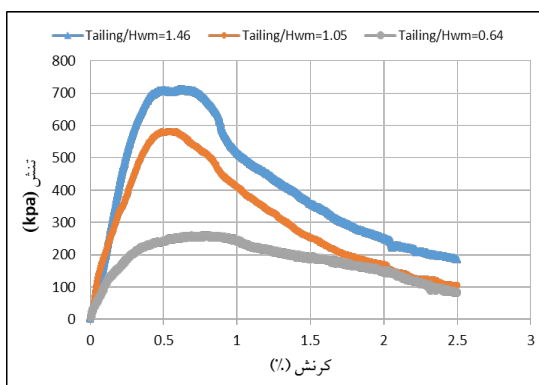
با توجه به انجام روش‌های ذکر شده، معادله چندجمله‌ای زیر مدل کلی برای پیشگویی تأثیر اجزای جامد بر مقاومت فشاری پرکننده خمیر را بیان می‌کنند:

$$UCS = 2269.5 + 27.6 \text{ cement} - 101.6 \text{ water} + 859.593 \text{ Lt/Hmw} \quad (1)$$

مطابق با معادله داده شده، به ترتیب Lt/Hmw، آب و سیمان بیشترین تأثیر را بر مقاومت فشاری CPB دارند.

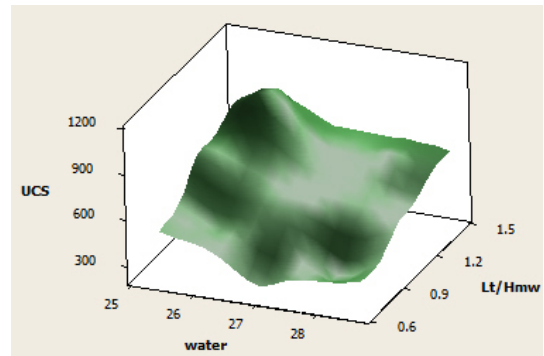
۴-۳- تأثیر اجزای جامد بر تغییر شکل پذیری

روند نمودار تنش - کرنش و اختلاف مقاومت اوج و پسماند، به عنوان معیاری در جهت تعیین تغییر شکل پذیری است. شکل ۱۲، نمودار تنش - کرنش را در نسبت‌های مختلف Lt/Hmw نشان می‌دهد. همان‌طور که از این نمودار ملاحظه می‌گردد اختلاف بین مقاومت اوج و پسماند در نسبت‌های کمتر Lt/Hmw، کم است و رفتار پرکننده در مقابل بارگذاری اعمال شده، نرم‌تر از وقتی است که نسبت مذکور بیشتر است. دلیل این فرایند را می‌توان به یوکی بیشتر نمونه‌های با نسبت کمتر Lt/Hmw نسبت داد که در اثر بارگذاری و پس از شکست، دانه‌های شکسته شده با سهولت بیشتری می‌توانند در فضای خالی حرکت کرده و رفتار سیال‌گون مخلوط را افزایش دهند. این نمودارها همچنان نشان می‌دهند که اختلاف تنش اوج در نسبت‌های اختلاط ۰/۶۴ و ۱/۰۵ بیشتر از دو برابر اختلاف تنش اوج در نسبت‌های اختلاط ۱/۴۶ و ۱/۰۵ می‌باشد.

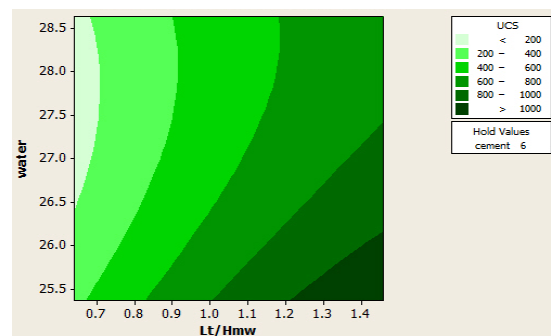


شکل ۱۲- تأثیر نسبت Lt/Hmw بر نمودار تنش - کرنش

این نتایج نیز نشان می‌دهند که نسبت اختلاط Lt/Hmw تا زمانی که تداخل بین مواد پرکننده را کاهش دهد، باعث بهبود عملکرد مکانیکی CPB شده و در نسبت‌های بالاتر، این تأثیر ناچیز است. البته باید این واقعیت را در نظر گرفت که افزایش نسبت Lt/Hmw، مقدار خاک ریزدانه را در مخلوط افزایش داده و نیاز به آب را بیشتر می‌کند که باعث افزایش نسبت W/C شده و تأثیر منفی بر مقدار UCS دارد.

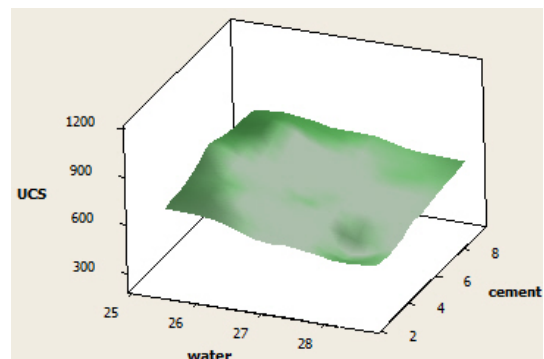


(الف)

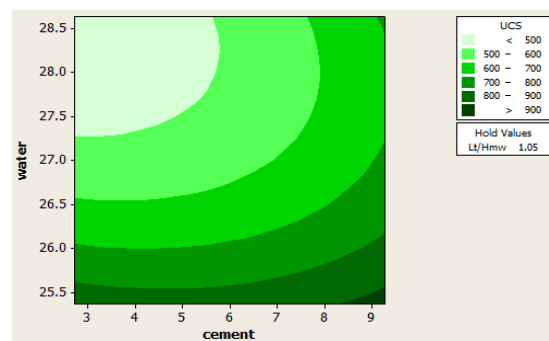


(ب)

شکل ۱۰- تأثیر آب و Lt/Hmw بر مقاومت فشاری CPB (الف) سه بعدی (ب) دوبعدی



(الف)



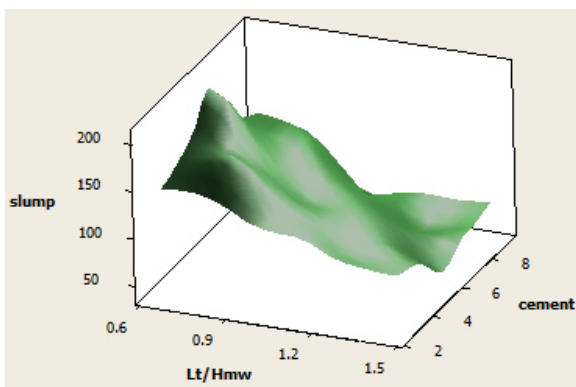
(ب)

شکل ۱۱- تأثیر سیمان و آب بر مقاومت فشاری CPB (الف) سه بعدی (ب) دوبعدی

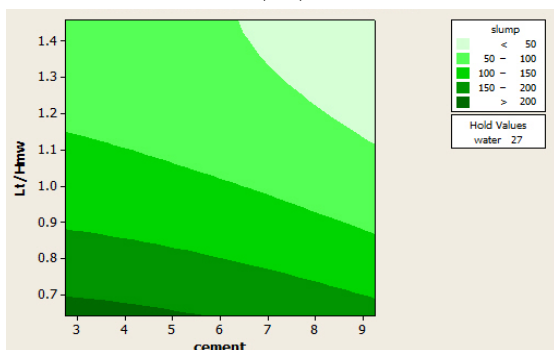
۴-۴- تأثیر اجزای جامد بر اسلامپ

با استفاده از مدل‌های پیشنهاد شده برای بررسی تأثیر اجزای جامد بر خواص رئولوژیکی پرکننده خمیری توسط CCD، نمودارهای سه‌بعدی رویه پاسخ و دوبعدی کانتور رسم شد. همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود با افزایش مقدار سیمان، اسلامپ مخلوط پرکننده کاهش پیدا می‌کند البته این تأثیر منفی، نسبتاً ملایم است؛ اما تأثیر منفی نسبت Lt/Hmw بر اسلامپ مخلوط پرکننده کاملاً مشهود است، به طوری که در نسبت Lt/Hmw بیشتر از ۰/۹ در هیچ یک از درصد‌های سیمان، اسلامپ قابل قبولی حاصل نشد.

تأثیر نسبت Lt/Hmw از دو منظر قابل بررسی است. در ابتدا افزایش این نسبت باعث افزایش بخش ریزدانه خاک (Lt) شده و نیاز به آب را بیشتر می‌کند؛ که این باعث کاهش اسلامپ مخلوط می‌شود. از طرفی دیگر کاهش این نسبت سبب افزایش بخش دانه‌درشت خاک (Hmw) شده و نیاز به آب را کاهش داده و اسلامپ مخلوط پرکننده افزایش می‌یابد. تأثیر نیست Lt/Hmw در شکل ۱۵ نیز به روشنی دیده می‌شود.



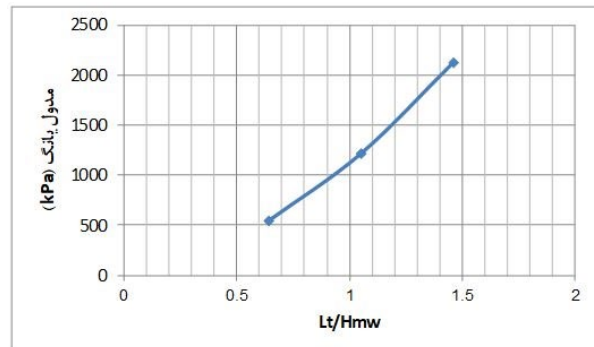
(الف)



(ب)

شکل ۱۵- تأثیر سیمان و Lt/Hmw بر اسلامپ CPB (الف) سه‌بعدی (ب) دوبعدی

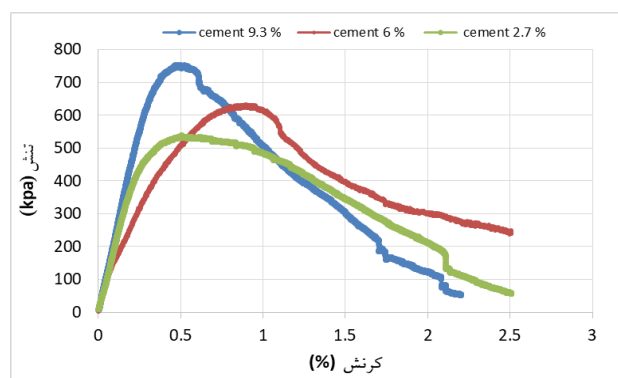
مدول الاستیسیته نمونه‌ها در مقادیر متفاوت باطله لیج و واسطه سنگین نیز محاسبه شدند. شکل ۱۳ تغییر مدول الاستیسیته در مقابل نسبت Lt/Hmw را برای نمونه‌های متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش این نسبت، مقدار باطله دانه‌ریز پرکننده مابین ذرات دانه درشت بیشتر شده و بنابراین فضای خالی مخلوط کم می‌شود. این کاهش تخلخل موجب کاهش تغییر شکل پذیری و در نتیجه افزایش مدول الاستیسیته می‌شود.



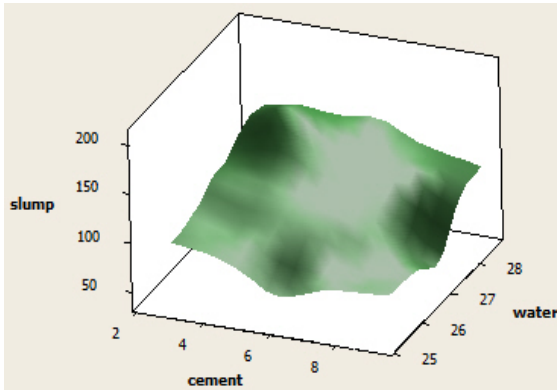
شکل ۱۳- تأثیر نسبت Lt/Hmw بر مدول یانگ مخلوط CPB

۴-۳-۱- تأثیر مقدار سیمان بر نمودار تنش - کرنش

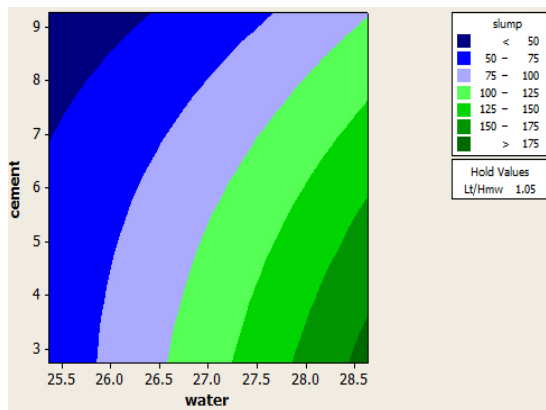
شکل ۱۴ تأثیر مقدار سیمان بر نمودار تنش-کرنش CPB را نشان می‌دهد. حداکثر تنش قابل تحمل نمونه‌های CPB با افزایش مقدار چسباننده بیشتر می‌شود. همان‌طور که از شکل ۱۴ مشاهده می‌شود میزان اختلاف تنش بین مقادیر پایین و بالای سیمان بر خلاف انتظار زیاد نیست. این موضوع در نمودارهای کانتور و سطح پاسخ آمده در اشکال ۹ و ۱۱ نیز تایید شده، که بیان‌گر این است که سیمان مورد استفاده، تأثیر کمتری بر مقاومت فشاری دارد.



شکل ۱۴- تأثیر سیمان بر نمودار تنش - کرنش



(الف)



(ب)

شکل ۱۷- تأثیر سیمان و آب بر اسلامپ CPB (الف) سه بعدی (ب) دوبعدی

با توجه به خروجی نرم افزار، معادله‌های چندجمله‌ای زیر، مدلی برای پیش‌بینی تأثیر اجزای جامد بر اسلامپ پرکننده خمیر را بیان می‌کنند:

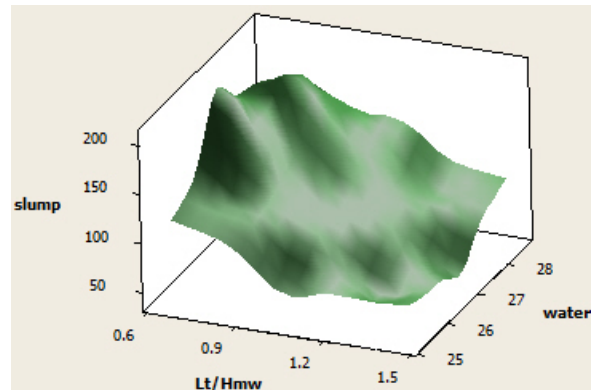
$$\text{Slump} = 2336.54 + 7.219 \text{ cement} - 61.243 \text{ water} + 417.13 \text{ Lt/Hmw} \quad (2)$$

۵- بهینه‌سازی

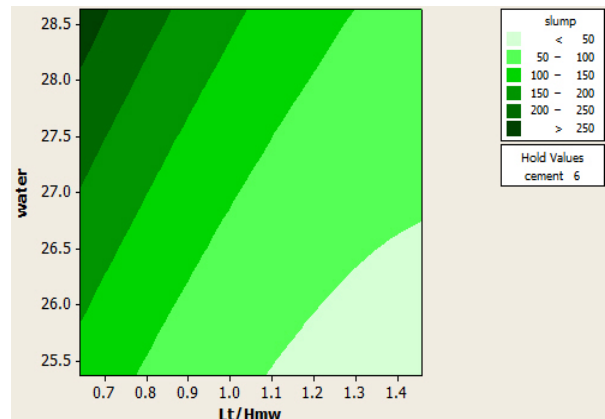
شناسایی ترکیبی از متغیرهای ورودی که به طور مشترک یک یا مجموعه‌ای از پاسخ‌ها را بهینه می‌کند ضروری است. در این مطالعه مقاومت فشاری و اسلامپ که از فاکتورهای اصلی در به‌کارگیری مخلوط پرکننده هستند بر مبنای امکان استفاده از مخلوط‌ها به عنوان فقط پرکننده به ترتیب در ۳۰۰ کیلوپاسکال و ۲۰۰ میلی‌متر انتخاب شدند.

با توجه به این‌که حداکثر وزن حجمی محاسبه شده از پرکننده خمیری تهیه شده ۱۶۲۰۰ نیوتن بر مترمکعب می‌باشد، در صورتیکه مدنظر باشد تا انباشتی از این پرکننده با ارتفاع ۱۰ متر تهیه شود، فاکتور ایمنی پایه این انباشت (که تحت بیشترین تنش قائم قرار دارد) مطابق محاسبات زیر، بیش از ۱/۸ خواهد شد که پایداری آن را تضمین می‌کند.

شکل ۱۶ تأثیر همزمان آب و نسبت Lt/Hmw بر اسلامپ مخلوط پرکننده را در نسبت ثابت سیمان نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شدت تأثیر برای هر دو فاکتور زیاد است. افزایش نسبت Lt/Hmw با افزایش ریزدانه همراه است که نیاز به آب را بیشتر کرده و اسلامپ مخلوط را کاهش می‌دهد. افزایش مقدار آب، اسلامپ مخلوط را افزایش می‌دهد ولی مطابق با شکل (۱۶-الف) تأثیر منفی نسبت Lt/Hmw بیشتر از تأثیر مثبت آب بر اسلامپ CPB است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۶- تأثیر Lt/Hmw و آب بر اسلامپ CPB (الف) سه بعدی (ب) دوبعدی

تأثیر همزمان آب و سیمان در نسبت ثابت Lt/Hmw بر اسلامپ مخلوط در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اسلامپ قابل قبول فقط در درصدهای بالای آب و درصدهای پایین سیمان به دست می‌آید. همان‌طور که در شکل ۱۵ و ۱۶ نیز مشاهده می‌شود، به طور کلی در نسبت Lt/Hmw تنها یک اسلامپ قابل قبول از مخلوط حاصل شده است.

همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌گردد، مقدار مقاومت فشاری و اسلامپ هدف با سیمان ۳/۸۲ درصد، آب ۲۷/۸۹ درصد و نسبت Lt/Hmw ۰/۸۲ به دست می‌آید.

۶- نتیجه‌گیری

کارخانه‌های فراوری مواد معدنی، میلیون‌ها تن باطله در سدهای باطله دپو می‌کنند که مسائل زیست محیطی مانند آلودگی‌های آب‌و‌خاک ناشی از تولید ذهاب اسید و یا رهاسازی فلزات سنگین در محیط را ایجاد می‌کنند. یکی از روشهای کاهش آلودگی، انتقال این مواد به حالت پرکننده خمیری به معادن زیرزمینی است. در این مقاله، تأثیر اجزای جامد بر امکان تولید پرکننده‌های خمیری ساخته شده از باطله‌های کارخانه‌های فراوری سرب و روی انگوران بررسی شده است.

در این پروژه طراحی آزمایش‌ها بر مبنای روش رویه پاسخ انجام شد که در آن سه فاکتور سیمان، آب و نسبت Lt/Hmw در پنج سطح مورد ارزیابی قرار گرفتند تا امکان دسترسی به مقادیر هدف طراحی (مقاومت فشاری ۳۰۰ کیلوپاسکال و اسلامپ ۲۰۰ میلی‌متر) فراهم شوند.

نتایج نشان دادند که افزایش نسبت Lt/Hmw بیش از سایر اجزای CPB بر کارایی پرکننده خمیری تأثیرگذار است. افزایش این نسبت به شکل معنی‌داری مقاومت فشاری در نمونه را افزایش می‌دهد که دلیل آن را می‌تواند به زیاد شدن مقدار ریزدانه در مخلوط پرکننده که باعث ایجاد انسجام و کاهش تخلخل در نمونه‌ها می‌شود، نسبت داد. همچنین مطالعات تایید کننده این موضوع هستند که کاهش آب، باعث افزایش مقاومت شده است.

افزایش باطله واسطه سنگین تأثیر مثبتی بر اسلامپ نمونه‌ها داشته است اما مقاومت فشاری را به شدت کاهش می‌دهد، به طوری که در درصد‌های مشابه سیمان و آب وقتی نسبت Lt/Hmw از ۱/۳ به ۰/۸ می‌رسد، اسلامپ از ۴۰ به ۹۵ میلی‌متر و مقاومت فشاری از ۱۱۰۰ به ۴۷۵ کیلو پاسکال می‌رسد.

افزایش نسبت Lt/Hmw به شدت اسلامپ نمونه‌ها را کاهش می‌دهد به طوری که در تمام نسبت‌های Lt/Hmw بیشتر از ۰/۹ با درصد‌های آب تعیین شده هیچ‌یک از نمونه‌ها اسلامپ قابل قبولی را ارائه ندادند. علت آن این است که افزایش Lt/Hmw باعث افزایش مقدار ریزدانه در خاک شده و یاز به آب را بیشتر می‌کند.

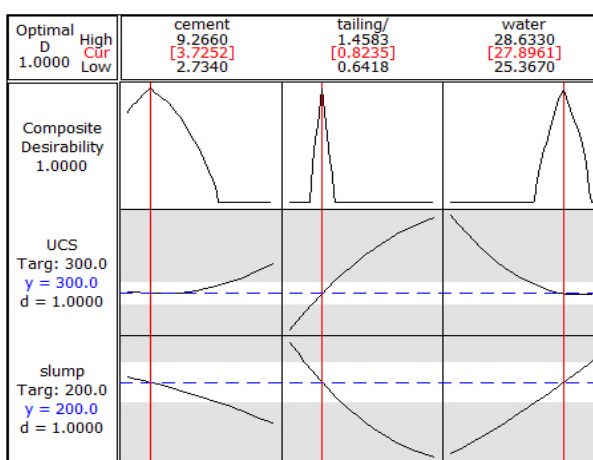
$$\sigma_{vertical} = \gamma \cdot h = 16200 \left(\frac{N}{m^3} \right) \cdot 10(m) = 162000 (Pa)$$

$$FoS = \frac{UCS}{\sigma_{vertical}} = \frac{300000}{162000} = 1.85$$

چون چسباننده، پرهزینه‌ترین جز پرکننده است، محدوده اقتصادی استفاده از آن‌ها نیز بایستی لحاظ گردد. روند بهینه سازی در این مطالعه با استفاده از روش RSM انجام شد. در این روش مطلوبیت تکی (d^1) و ترکیبی (D^1) به عنوان معیارهای صحت بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. مطلوبیت تکی بیانگر این موضوع است که تنظیمات یک فاکتور به صورت انفرادی چگونه باعث بهینه شدن پاسخ می‌شود. هر چه مقدار d به عدد یک نزدیک‌تر باشد نشان می‌دهد که مقدار انتخاب شده برای آن فاکتور به‌طور موثر می‌تواند پاسخ هدف را بهینه کند.

محدوده‌ی D در شرایط ترکیبی از صفر تا یک است که ارزیابی کننده نیل به اهداف تعیین شده است. مقدار یک، وضعیت ایده‌آل است که نشان می‌دهد متغیرهای ورودی به خوبی پاسخ هدف را پیش‌بینی می‌کنند و صفر نشان دهنده این است که یک یا چند پاسخ خارج از محدوده مجاز هستند. مقدار D مطابق شکل ۱۸ برابر یک بوده که بیانگر این است که مقادیر بهینه‌سازی در محدوده مطلوب قرار دارند و در بهترین شرایط می‌توانند مقدار هدف تعیین شده برای بهینه‌سازی را به دست آورند.

شکل ۱۸ اجزای تأثیرگذار را در ستون‌ها و اجزای هدف را در ردیف‌ها نشان می‌دهد که نتیجه انجام بهینه‌سازی با روش RSM و با کمک نرم‌افزار minitab 16 ترسیم شده است.



شکل ۱۸- نتایج بهینه‌سازی برای مقاومت فشاری و اسلامپ

منابع

- [1] Yilmaz, E., Fall, M.; 2017; "Paste tailings management", Springer, pp. 303.
- [2] Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A. R., Diez-Herrero, A., Pereira, H.G.; 2008; "Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context", Journal of Hazardous Materials, 152, pp. 846-852.
- [3] Azam, S., Li, Q.J.G.N.; 2010; "Tailings dam failures: a review of the last one hundred years", Waste GeoTechnics, Geotechnical news, pp. 50-54.
- [4] Sivakugan, N., Veenstra R., Naguleswaran, N.; 2015; "Underground mine backfilling in Australia using paste fills and hydraulic fills", Int. J. of Geosynth. and Ground Eng, 18, pp.1-7.
- [5] Sheshpari, M.; 2015; "A review of underground mine backfilling methods with emphasis on cemented paste backfill", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 20, pp. 5183-5208.
- [6] Kesimal, A., Yilmaz, E., Ercikdi, B., Alp, I., Deveci, H.; 2005; "Effect of properties of tailings and binder on the short-and long-term strength and stability of cemented paste backfill", Materials Letters, 59, pp. 3703-3709.
- [7] Fall, M., Benzaazoua, M., Ouellet, S.; 2005; "Experimental characterization of the influence of tailings fineness and density on the quality of cemented paste backfill", Minerals Engineering, 18, pp. 41-44.
- [8] Kesimal, A., Ercikdi, B., Yilmaz, E.; 2003; "The effect of desliming by sedimentation on paste backfill performance", Minerals Engineering, 16, pp. 1009-1011.
- [9] Ercikdi, B. H. Baki, İzki, M.; 2013; "Effect of desliming of sulphide-rich mill tailings on the long-term strength of cemented paste backfill", J Environ Manage, 115, pp. 5-13.
- [10] Yin, S, Wu, A., Hu, K., Wang, Y., Zhang, Y.; 2012; "The effect of solid components on the rheological and mechanical properties of cemented paste backfill", Minerals Engineering, 35, pp. 61-66.
- [11] Bashir, M. J. K., Aziz, H. A., Yusoff, M. S., Adlan, M. N.; 2010; "Application of response surface methodology (RSM) for optimization of ammoniacal nitrogen removal from semi-aerobic landfill leachate

افزایش مقدار سیمان به دلیل ایجاد ساختار پایدار در پرکننده ناشی از فرایند هیدراتاسیون اثر مثبت بر مقاومت فشاری و نمودار تنش کرنش دارد؛ اما تأثیر آن کمتر از نسبت Lt/Hmw است. همچنین افزایش سیمان در نسبت‌های ثابت آب باعث کاهش نسبت W/C شده و اسلامپ در نمونه‌ها را کاهش می‌دهد.

افزایش آب باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود. در صورتی که بیش از مقدار موردنیاز، آب به مخلوط پرکننده اضافه شود، پس از کامل شدن فرایند واکنش (هیدراتاسیون) مقداری آب اضافی در مخلوط باقی‌مانده و پس از سفت شدن نمونه باعث ایجاد پوکی و کاهش مقاومت می‌شود. تأثیر مثبت آب بر اسلامپ بسیار مشهود است.

در مرحله بهینه‌سازی برای رسیدن به مقاومت فشاری هدف (۳۰۰ کیلو پاسکال)، درصد‌های پیشنهادی برای سیمان، Lt/Hmw و آب مصرفی به ترتیب، ۳/۹۷ درصد، ۰/۸ و ۲۷/۵۱ درصد تعیین شدند. برای رسیدن به اسلامپ هدف (۲۰۰ میلی‌متر) مقدار آب می‌تواند تا ۲۸/۸۳ درصد افزایش یابد.

طراحی آزمایش با RSM علاوه بر کاهش تعداد آزمایش‌ها که منجر به کم شدن هزینه ساخت نمونه‌ها و صرفه‌جویی در وقت می‌شود، به‌خوبی می‌تواند تأثیر اجزای جامد بر خواص مکانیکی و رئولوژیکی توده‌های پرکننده را نیز پیش‌بینی کند.

در مقاله حاضر تأثیر اجزای جامد بر رفتار مکانیکی و رئولوژیکی پرکننده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. تدفین باطله‌های معدنی در محیط، نیازمند سنجش سایر ملاحظات محیطی (مانند دما و pH آب)، زیست محیطی (مانند عدم تداخل با آبهای سطحی و زیرسطحی) و اقتصادی (هزینه حمل مواد باطله و وجود سایر مواد چسباننده در نزدیکی مکان پرکردن) می‌باشد که ضروری است با توجه به شرایط ویژه هر محل دفن، تحت بررسی‌های جداگان‌های قرار گیرد. یکی از مهمترین مسائل زیست محیطی، در نظرگرفتن امکان تداخل آبهای سطحی و زیرزمینی با مخلوط پرکننده است. از آنجایی که باطله‌های کارخانه‌های فرآوری حاوی انواع مواد شیمیایی لازم برای فرآوری و یا فلزات سنگین است، توصیه می‌شود که در مواردی که امکان تماس با آب وجود دارد، از این پرکننده‌ها استفاده نشود.

using ion exchange resin”, Desalination, 254, pp. 154-161.

[12] Fall, M. Benzaazoua, M. Saa, E. G.; 2013; “Mix proportioning of underground cemented tailings backfill”, Tunnelling and Underground Space Technology 23, pp. 80-90.

Cement paste backfill ^۱

Heavy media waste ^۲

Leach tailing ^۳

X-ray diffraction ^۴ یا پراش پرتو ایکس، روشی برای تعیین

فازها و ساختار کریستالی مواد است. از این روش برای مطالعه و شناسایی فازها، کانی شناسی و کریستالوگرافی استفاده می‌شود.

X-ray diffraction ^۵ یا پراش پرتو ایکس، روشی برای تعیین

فازها و ساختار کریستالی مواد است. از این روش برای مطالعه و شناسایی فازها، کانی شناسی و کریستالوگرافی استفاده می‌شود.

Central composite design ^۶

Box-behnken design ^۷

Individual desirability ^۸

Composit desirability ^۹