



دانشگاه سوادکوه

نشریه علمی

روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن

شاپا: ۶۵۶۵-۲۲۵۱

سال شانزدهم - شماره ۴۶ - بهار ۱۴۰۵

- بهبود عملکرد جداکننده هوایی دینامیکی کارخانه گندله سازی شرکت معدنی و ...
محمد انصاری، پیمان خادمی، امیرعلی پورخسروانی، علیرضا قاسمی، وحید کاربخش، صمد بنیسی زاده
- تحلیل پایداری تقاطع تونل های شیب دار و دسترسی در معدن زغال سنگ طبس با ...
علیرضا تراکمه، ستار مهدوری، کورش شهریار
- کاربرد الگوریتم های نمونه گیری در طبقه بندی داده های ژئوشیمیایی نامتوازن: مطالعه ..
حمید گرانیان
- مدل سازی عددی تعیین الگوی بهینه کابل کشی در تحلیل پایداری فضاها ی زیرزمینی
مصلح افتخاری، محمدحسین مختارزاده، امیرحسین کاظمینی نیک
- پرعیار سازی نمونه هماتیتمی کم عیار به روش های ثقلی و مغناطیسی (مطالعه موردی: ...
سید حمزه امیری، مرضیه حسینی نسب، محمد نوع پرست، سید ضیاءالدین شفایی تنکابنی
- استفاده از تکنولوژی پهپادها در طراحی استخراج معادن روباز و زیرزمینی، وضعیت ...
امیرحسین واحدی، علیرضا باغبانان، امین ازهری، احمد رحمانی شهرکی



روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن

این نشریه در پایگاه بین‌المللی اسکوپوس (*Scopus*) به نشانی www.scopus.com، پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (*ISC*) به نشانی www.isc.gov.ir، پایگاه نمایه‌سازی مجلات با دسترسی آزاد (*DOAJ*) به نشانی www.doaj.org، «ایران ژورنال» نظام نمایه‌سازی مرکز منطقه‌ای اطلاع‌رسانی علوم و فناوری (*RICeST*) به نشانی www.ricest.ac.ir و بانک اطلاعات نشریات کشور (*magiran*) به نشانی www.magiran.com نمایه می‌شود.



Islamic World Science Citation Center



Directory of Open Access Journals



Regional Information Center for Science and Technology RICeST



سال شانزدهم، شماره ۴۶

بهار ۱۴۰۵

نشریه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن

(فصلنامه علمی)

صاحب‌امتیاز و ناشر: دانشگاه یزد- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی

مدیرمسئول: دکتر علیرضا یاراحمدی بافقی

سرمدیر: دکتر محمد فاتحی مرجی

مدیر داخلی: دکتر منوچهر صانعی

کارشناس: مهدیه دهقان هراتی

هیات تحریریه:

دکتر عبدالحمید انصاری (دانشیار- مهندسی معدن، ژئوفیزیک- دانشگاه یزد)
دکتر راحب باقرپور (استاد- مهندسی معدن، استخراج- دانشگاه صنعتی اصفهان)
دکتر احمد خدادادی (استاد- مهندسی معدن، فراوری مواد معدنی- دانشگاه تربیت مدرس)
دکتر رضا دهقان (دانشیار- مهندسی معدن، فراوری مواد معدنی- دانشگاه یزد)
دکتر رضا رحمان نژاد (استاد- مهندسی معدن، مکانیک سنگ- دانشگاه شهید باهنر کرمان)
دکتر حجت اله رنجبر (استاد- زمین‌شناسی اقتصادی- دانشگاه شهید باهنر کرمان)
دکتر جواد غلام نژاد (استاد- مهندسی معدن، استخراج- دانشگاه یزد)
دکتر محمد فاتحی مرجی (استاد- مهندسی معدن، مکانیک سنگ- دانشگاه یزد)
دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی (استاد- مهندسی معدن، اکتشاف- دانشگاه صنعتی شاهرود)
دکتر احمدرضا مختاری (دانشیار- مهندسی معدن، اکتشاف- دانشگاه صنعتی اصفهان)
دکتر علیرضا یاراحمدی بافقی (دانشیار- مهندسی معدن، ژئومکانیک- دانشگاه یزد)

هیات تحریریه بین‌المللی:

دکتر سلال کاریوز (استاد- مهندسی معدن، مکانیک سنگ- دانشگاه صنعتی خاورمیانه، آنکارا، ترکیه)
دکتر تیری وردل (استاد- مهندسی معدن، ژئومکانیک- موسسه ملی پلی تکنیک لورین (INPL)، نانسی، فرانسه)

ویراستاری: دکتر منوچهر صانعی - مهدیه دهقان هراتی

حامیان:

شرکت سنگ آهن مرکزی ایران- بافق

پژوهشکده فناوری‌های معدنکاری دانشگاه یزد

انجمن مهندسی معدن ایران

نشانی: یزد- صفائیه- خیابان پژوهش- دانشگاه یزد- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی- صندوق پستی: ۷۴۱-۸۹۱۹۵ -

تلفن: ۰۳۵-۳۸۲۰۰۱۳۱-۰۳۵-۳۸۲۰۰۱۳۱: دورنگار:

تارنما: www.anm.yazd.ac.ir

رایانامه: mm-journal@journals.yazd.ac.ir

دارای درجه علمی-پژوهشی به شماره ۳/۱۸/۱۸۹۵۸۴ مورخ ۱۳۹۳/۱۰/۱۵ از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
از شماره ۳ (بهار و تابستان ۱۳۹۱)

اهداف و محورهای فعالیت نشریه

شناخت، تبیین و توسعه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن و مهندسی‌های مرتبط با حوزه‌های اکتشاف، استخراج و فراوری مواد معدنی، مکانیک سنگ، سدسازی، تونل‌سازی، محیط‌زیست و فناوری‌های معدن کاری اصلی‌ترین هدف این نشریه است. لذا مقالاتی که شامل ارائه روش‌های تجربی – تحلیلی، روش‌های نوین تحلیلی، شبیه‌سازی، توسعه روش‌های عددی و یا مدل‌های ترکیبی تحلیلی – عددی و کاربرد آن‌ها در حل مسائل مهندسی‌های فوق باشد، موردتوجه قرار می‌گیرد. از دیگر عناوین موردنظر می‌توان به تحلیل‌های برگشتی، روش‌های چند مقیاسی، مدل‌های ریاضی، روش‌های آماری، روش‌های زمین‌آماري، روش‌های هوشمند (الگوریتم ژنتیک، شبکه‌های عصبی و...) و ترکیبی از آن‌ها که اغلب روش‌های رایانه‌ای عنوان می‌گیرند، اشاره نمود.

لذا کلیه محققان در زمینه‌های مرتبط با مهندسی معدن و علوم وابسته مثل زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، ژئوشیمی، هیدروژئولوژی، طراحی معادن سطحی و زیرزمینی، عملیات اصلی معدن کاری، سرویس‌های معدنکاری، خردایش، جداسازی، لیچینگ و بیو لیچینگ، بازسازی و محیط‌زیست معدن، مکانیک خاک و مکانیک سنگ، مهندسی عمران، مهندسی سد، تونل و فضاهاى زیرزمینی، مهندسی نفت و گاز و ذخایر هیدروکربوری و مهندسی فناوری‌ها و ماشین‌آلات معدنی از جمله مخاطبین نشریه محسوب می‌شوند.

راهنمای نگارش مقالات

- نشریه علمی-پژوهشی **روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن** مقالاتی را چاپ می‌نماید که ارائه‌دهنده نتایج پژوهش‌های بنیادی و کاربردی در راستای اهداف این نشریه باشد.
- دریافت مقالات تنها از طریق تارنمای نشریه امکان‌پذیر است. نویسندگان مسئول باید به همراه مقاله، فرم تکمیل‌شده تعهدنامه توسط همه نویسندگان را اسکن نموده در سایت بارگذاری نماید. نشریه از بررسی مقالاتی که فرم تعهدنامه تکمیل‌شده نداشته باشد، معذور است.
- مسئولیت محتوا و اصالت مقاله به عهده نویسنده یا نویسندگان مقاله است.

نحوه تدوین مقاله:

- هر مقاله باید شامل عنوان (به دو زبان)، نویسندگان و مشخصات (به دو زبان)، چکیده (به دو زبان) و کلمات کلیدی (به دو زبان)، مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری، تشکر و قدردانی (در صورت نیاز) و مراجع باشد.
 - مقالات ارسالی باید به صورت یک ستونی تنظیم شود.
 - قلم مورد استفاده در تمام متن *B Nazanin* است.
 - فاصله سطرها به صورت *single* باشد.
 - عنوان پارسی مقاله باید با قلم ۱۶ پرننگ نوشته شود.
 - اسامی نویسندگان با قلم ۱۲ پرننگ و توضیحات آن‌ها با قلم ۹ پرننگ نوشته شود.
 - چکیده پارسی و کلمات کلیدی با قلم ۱۰ پرننگ نوشته شود.
 - عناوین اصلی متن با قلم ۱۲ پرننگ و عناوین فرعی با قلم ۱۱ پرننگ نوشته شود.
 - بدنه اصلی مقاله با قلم ۱۲ نوشته شود.
 - شکل‌ها و جدول‌ها تا جایی که ممکن است به صورت پارسی باشد، چه توضیحات، چه اعداد.
 - توضیحات شکل‌ها و جدول‌ها با قلم ۱۰ پرننگ نوشته شود.
 - جدول‌ها با قلم ۱۱ تنظیم شود.
 - در صورت استفاده از علائم، اصطلاحات و کلمات انگلیسی در متن، قلم آن باید یک شماره کمتر از متن اصلی و نوع قلم مورد استفاده *Times New Roman* باشد.
 - مراجع و منابع در متن به صورت شماره و ترتیبی آورده شود.
 - با توجه به چاپ سیاه و سفید مقالات تا جایی که امکان دارد، تصاویر در این راستا تهیه شود.
 - روابط موجود در متن با استفاده از *Microsoft Equation 3* نوشته شود.
 - چکیده پارسی باید دارای کمینه ۱۵۰ و بیشینه ۲۵۰ کلمه باشد و در یک پاراگراف تنظیم شود.
 - **چکیده انگلیسی باید به صورت چکیده بلند تنظیم شود.** راهنمای تنظیم در تارنمای نشریه موجود است.
 - نویسندگان لازم است مقاله خود را بدون هرگونه *section* و در یک ستون تهیه کنند. تمامی تصاویر و جداول را در جای خود قرار داده و بابت تعداد صفحات هیچ‌گونه محدودیتی در ابتدا برای خود قائل نباشند.
- توجه: در صورت عدم رعایت موارد موردنظر در ساختار مقاله، مقاله‌ی ارسالی به نویسنده برگردانده خواهد شد.

نحوه‌ی صحیح مرجع نویسی

با توجه به مصوبه هیات تحریریه نشریه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، لازم است تا همه مراجع مورداستفاده در متن مقالات در بخش مراجع به صورت انگلیسی آورده شود؛ بنابراین نویسندگان باید به صورت زیر برگردان مراجع را در مقاله وارد کنند.

مرجع دهی در مقالات باید به صورت ترتیبی و شمارشی باشد و در بخش مراجع باید از استاندارد APA استفاده شود. جهت سهولت، استفاده از گوگل اسکالر و همچنین نرم‌افزار *EndNote* توصیه می‌شود.

مراجع پارسی:

محمدی، م. و توکلی، ح. (۱۳۹۱). بررسی کارایی معیار هوک و براون در پیش‌بینی تنش‌های روی صفحه شکست. روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۲(۴)، ۷۱-۷۸.

برگردان به انگلیسی:

Mohammadi, M. and H. Tavakoli (2013). "Efficiency Investigation of Hoek – Brown Criterion in Prediction of Stresses on Failure Plane." *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering* 2(4): 71-78 [In Persian].

کتاب انگلیسی:

Brown, E. T. (2007). *Block Caving Geomechanics: International Caving Study 1997-2004*. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, the University of Queensland.

مقاله نشریات انگلیسی:

Laubscher, D. H. (1990). A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. *JS Afr. Inst. Metall*, 90(10), 267-273.

مقاله کنفرانس انگلیسی:

Kendorski, F. S., Cummings, R. A., Bieniawski, Z. T., & Skinner, E. H. (1983, January). Rock mass classification for block caving mine drift support. In 5th ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics.

توجه: در صورت عدم رعایت موارد موردنظر در ساختار مقاله، مقاله‌ی ارسالی به نویسندگان برگردانده خواهد شد.

"فرم تعهدنامه اخلاقی نویسندگان"

سر دبیر محترم نشریه علمی روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن

با سلام و احترام ضمن ارسال مقاله‌ای با عنوان کامل بدینوسیله نویسندگان درخواست بررسی دست‌نوشته خود را برای چاپ در آن نشریه دارند. نویسندگان با امضا این فرم، متعهد می‌شوند که:

- ۱- مقاله به‌طور هم‌زمان برای نشریات دیگر ارسال نشده است.
- ۲- اسامی نویسندگان و ترتیب اسامی پس از ارسال مقاله تغییر نخواهد کرد.
- ۳- اصول اخلاقی پژوهش رعایت شده و موارد آن در مقاله درج گردیده است.
- ۴- همه نویسندگان در مورد ارسال مقاله به نشریه آگاهی دارند و نسخه نهایی را ملاحظه و تأیید کرده‌اند.
- ۵- احتمال هیچ‌گونه تعارض منافع (*Conflicts of Interest*) در مقاله ارسالی وجود ندارد.
- ۶- تمامی نهادها و مؤسساتی که هر یک به‌گونه‌ای حمایت مالی و معنوی برای انجام تحقیق و نوشتن مقاله توسط آنها مورد استفاده قرار گرفته است. با کسب مجوز در مقاله مورد اشاره واقع شده‌اند.
- ۷- در جریان اجرای این تحقیق و تهیه مقاله کلیه قوانین کشوری و اصول اخلاق حرفه‌ای مرتبط با موضوع تحقیق از جمله حقوق آزمودنی‌ها، سازمان‌ها و نهادها و نیز مؤلفین و مصنفین رعایت شده است.
- ۸- نویسندگان تأیید می‌نمایند در ایده طراحی، اجرا تجزیه و تحلیل و تألیف مقاله با یکدیگر همکاری داشته‌اند و اعلام می‌دارند که دست‌نوشته حاضر برداشت مستقیم از نوشته‌های چاپ‌شده یا در حال چاپ نمی‌باشد. ضمناً این مقاله به زبان فارسی با زبان‌های دیگر در داخل یا خارج به چاپ نرسیده است و یا تحت بررسی برای چاپ نمی‌باشد.

مشخصات تمامی نویسندگان به ترتیب مندرج در متن مقاله:

ردیف	نام و نام خانوادگی	ایمیل	شماره تماس	رتبه علمی و موسسه محل فعالیت	امضاء
۱					
۲					
۳					

امضاء این فرم توسط تمامی نویسندگان محترم مقاله الزامی است. این فرم لازم است بعد از امضاء همه نویسندگان، اسکن شود و به همراه فایل مقاله بارگذاری گردد.

نام و نام خانوادگی نویسنده مسئول مقاله:

امضاء و تاریخ

سخن نخست

«باسمه تعالی»

انا لله و انا اليه الرجوعون

نسخه بهار سال ۱۴۰۵ در شرایطی به چاپ می‌رسد که رهبر بزرگ عالم اسلام و قائد ایران اسلامی حضرت آیت‌الله سید علی خامنه‌ای (ره) در اسفندماه ۱۴۰۴ در ایام ماه مبارک رمضان بر اثر بمباران ددمنشان صهیونی - آمریکایی به شهادت رسیده‌اند. در این ایام دلاور مردان سپاه پاسداران انقلاب اسلامی و ارتش همیشه پیروز ایران اسلامی در جنگ تمدنی دروازه‌های تمدن اسلامی را بر روی جهانیان باز کردند و نشان دادند که "إِن تَنْصُرُوا اللَّهَ يَنْصُرْكُمْ وَيُثَبِّتْ أَقْدَامَكُمْ".

در اهمیت و وصف تمدن نوین اسلامی امام شهید در سخنانی در تاریخ ۲۸ مهرماه ۱۳۹۵ می‌فرمایند: "آنچه نگاه به نخبگان را به‌عنوان یک فریضه، به‌عنوان یک واجب غیرقابل اجتناب بر همه‌ی مسئولان لازم می‌کند، یک هدف بزرگ است. یک هدف بزرگی در اینجا وجود دارد؛ با این هدف حتماً بایستی نگاه به نخبگان یک نگاه جدی، یک نگاه عملیاتی، یک نگاه دلسوزانه و پیگیر باشد. آن هدف چیست؟ آن هدف عبارت است از تبدیل کشور ایران به کشوری پیشرفته، قدرتمند، شریف، صاحب حرف نو در مسائل بشری و در مسائل بین‌المللی... و برافرازنده‌ی پرچم تمدن نوین اسلامی. ما یک چنین کشوری می‌خواهیم" و در سال ۱۴۰۰ نیز در تشریح اهداف انقلاب اسلامی می‌فرمایند: "هدف‌های انقلاب که گفتیم، یعنی چه؟ یعنی پیشرفت کشور، عدالت اجتماعی در کشور، اقتدار کشور، تشکیل جامعه‌ی اسلامی در کشور و درنهایت رسیدن به تمدن نوین اسلامی و تمدن بزرگ اسلامی؛ هدف‌های انقلاب این‌ها است. باید دید برای رسیدن به این هدف‌ها، برای رسیدن به عدالت اجتماعی، برای رسیدن به پیشرفت واقعی کشور و برای رسیدن به جامعه‌ی اسلامی که احکام اسلام به معنای واقعی در آن پیاده بشود و مردم بهره‌مند بشوند از تحقق این احکام و درنهایت برای رسیدن به تمدن نوین اسلامی، چه کارهایی لازم است، آن کارها را در حد توانمان انجام بدهیم؛ هرکسی در حد توان خودش؛ بنده یک‌جور، آن مسئول یک‌جور، آن دانشجو یک‌جور و امثال این‌ها که حالا عرض خواهیم کرد" و لذا این جنگ‌ها و دعواها برای جلوگیری از ایجاد تمدن نوین اسلامی است که تمام فرق و قبائل اسلامی را در کنار یکدیگر قرار می‌دهد. روح امام شهیدمان با اولیاءالله ان‌شاءالله

در اینجا جا دارد تا از حوزه‌ی معاونت پژوهشی وزارت عتف به علت حمایت مالی ارزشمندی که اردیبهشت امسال از نشریه به خاطر بین‌المللی شدن نمودند تقدیر و تشکر به عمل آورده مراتب سپاس خود را بدین‌وسیله خدمتشان ابلاغ نماییم.

در انتها از کلیه اساتید، دانشجویان، مهندسیین و کارشناسان علوم زمین و معدنکاری خواهشمندیم تا انتقادات و پیشنهادهای سازنده خود را به هر طریق ممکن برای ما ارسال کنند و مطمئن باشند که راهگشای ما خواهد بود.

فهرست مطالب

- ۱ بهبود عملکرد جداکننده هوایی دینامیکی کارخانه گندله سازی شرکت معدنی و صنعتی گل گهر
محمد انصاری؛ پیمان خادمی؛ امیر علی پور خسروانی؛ علی رضا قاسمی؛ وحید کاربخش؛ صمد بنیسی
- ۱۷ تحلیل پایداری تقاطع تونل های شیب دار و دسترسی در معدن زغال سنگ طبرس با استفاده از روش
عددی تفاضل محدود
علیرضا تراکمه؛ ستار مهدوری؛ کورش شهریار
- ۳۱ کاربرد الگوریتم های نمونه گیری در طبقه بندی داده های ژئوشیمیایی نامتوازن: مطالعه موردی؛ داده های
ژئوشیمیایی برگه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ قاین
حمید گرانیان
- ۴۹ مدل سازی عددی تعیین الگوی بهینه کابل کششی در تحلیل پایداری فضا های زیرزمینی
مصلح افتخاری؛ محمد حسین مختارزاده؛ امیر حسین کاظمینی نیک
- ۶۹ پرعیار سازی نمونه هماتیتی کم عیار به روش های ثقلی و مغناطیسی (مطالعه موردی: خاک سرخ معدن
ساحل)
سید حمزه امیری؛ مرضیه حسینی نسب؛ محمد نوع پرست؛ سید ضیاء الدین شفایی تنکابنی
- ۸۹ استفاده از تکنولوژی پهپادها در طراحی استخراج معادن روباز و زیرزمینی، وضعیت کنونی، چالش های
پیش رو و چشم اندازهای آینده
امیر حسین واحدی؛ علیرضا باغبانان؛ امین ازهری؛ احمد رحمانی شهرکی



مقاله پژوهشی

بهبود عملکرد جداکننده هوایی دینامیکی کارخانه گندله سازی شرکت معدنی و صنعتی گل گهر

محمد انصاری^۱، پیمان خادمی^۱، امیرعلی پور خسروانی^۱، علی رضا قاسمی^۱، وحید کاربخش^۱، صمد بنیسی زاده^{۱*}

۱- بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

(دریافت: ۲۱ بهمن ۱۴۰۳، بازنگری: ۰۲ فروردین ۱۴۰۴، پذیرش: ۲۷ فروردین ۱۴۰۴)

چکیده

این تحقیق با استفاده از ترکیب روش های شبیه سازی مانند CFD و DEM، اندازه گیری های آزمایشگاهی و مشاهدات میدانی، به توصیف دقیق، تحلیل عملکرد و عیب یابی جداکننده هوایی به عنوان یکی از تجهیزات اصلی مدار خردایش خشک کارخانه گندله سازی گل گهر پرداخته است. تأثیر عوامل مختلف عملیاتی بر کارایی جداکننده و میزان حساسیت آن به هر عامل در آزمایش هایی بررسی شد. در یک آزمایش، دو استراتژی مختلف کنترلی برای تعیین تأثیر سرعت چرخش قفس بر کیفیت محصول مقایسه شدند. نتایج نشان دادند در حالتی که دور قفس ثابت بود، عدد بلین (میزان ریزی) محصول جداکننده نسبت به حالتی که دور قفس متغیر بود، از 1154 ± 240 به 1195 ± 72 سانتی مترمربع بر گرم رسید. به عبارت دیگر، انحراف معیار نسبی آن از ۱۱ درصد به ۳ درصد کاهش یافت که نشان دهنده محصول ریزتر با نوسان کمتر بود. با تصویربرداری و مشاهده مستقیم مشخص شد که تجمع ذرات ریز با ابعاد متوسط ۷ میکرون در محفظه حلزونی اتفاق افتاده است. از جمله علل آن می توان به عدم کارکرد صحیح دریچه تخلیه و ورود هوای اضافی از ته ریز سیکلون، چینش نامناسب صفحات دمپر و کاهش سرعت جریان هوا، افت کارایی غبارگیر کیسه ای و توزیع غیر یکنواخت هوا در محفظه حلزونی اشاره کرد. برای کاهش اثر این مشکلات، اقداماتی نظیر تنظیم وزنه روی دریچه تخلیه ته ریز سیکلون، تغییر چینش صفحات دمپر جهت توزیع یکنواخت و افزایش سرعت هوا، افزایش مکش غبارگیر کیسه ای با مسدود کردن ورودی های اضافی هوا و تغییر باز شدگی صفحات راهنمای دور قفس جهت توزیع یکنواخت هوا انجام شدند. پس از پایش ۱۰ ماهه بعد از اعمال این تغییرات، میزان نشست مواد در محفظه حلزونی اندازه گیری و مشخص شد که از ۳۰ درصد سطح مقطع به ۱۰ درصد کاهش یافته است. در بررسی دیگری با استفاده از شبیه سازی DEM، نحوه توزیع خوراک روی صفحه توزیع کننده به عنوان عامل کلیدی در تعیین کارایی جدایش مطالعه شد. در طرح اصلی، توزیع خوراک غیر یکنواخت بود و بار به صورت یک طرفه روی قفس توزیع می شد. جهت رفع این مشکل، طرح جدیدی پیشنهاد شد و تحلیل نتایج شبیه سازی نشان داد که توزیع خوراک به صورت یکنواخت تر در آمده و انحراف معیار نسبی توزیع ذرات در اطراف صفحه با ۹۵ درصد اطمینان از ۳۰ درصد به ۵ درصد بهبود و کاهش یافت.

کلمات کلیدی

جداکننده هوایی دینامیکی، دینامیک سیالات محاسباتی، روش اجزای گسسته، عیب یابی، خصوصیت سنجی، گل گهر

*عهده دار مکاتبات: banisi@uk.ac.ir

DOI: 10.22034/ANM.2025.22774.1666

۱- مقدمه

خصوصیت‌سنجی تجهیزات صنعتی موجود در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی، از ارکان اصلی پیشرفت در این حوزه است. چرا که زمینه‌ای برای درک بهتر جزئیات و نحوه عملکرد سیستم و عیب‌یابی در جهت بهبود فرایند را فراهم می‌کند. امروزه استفاده از جداکننده‌های هوایی دینامیکی در مدارهای آسیاکنی خشک در حال گسترش است، زیرا امکان جدایش ذرات ریز با کارایی بالا که برای دستیابی به کیفیت بالای محصول و کارایی عملیات نقش حیاتی دارند را فراهم می‌کنند [۱].

جداکننده‌های هوایی دینامیکی در سه نسل اصلی تکامل یافته‌اند که هر کدام بیانگر پیشرفت‌هایی در طراحی و افزایش کارایی هستند. جداکننده‌های نسل اول که به عنوان جداکننده‌های معمولی یا توربو نیز شناخته می‌شوند، دارای یک فن داخلی و مکانیزم ساده برای گردش جریان هوا هستند، اما از نظر کارایی و کنترل، با محدودیت مواجه هستند. جداکننده‌های نسل دوم با افزودن فن خارجی و سیکلون‌های یکپارچه، کارایی جدایش را نسبت به نسل قبلی افزایش دادند، اما در شرایط عملیاتی متغیر در حفظ کیفیت مطلوب محصول موفق عمل نکردند [۲]. جداکننده‌های نسل سوم که آخرین نسل از جداکننده‌های هوایی بوده و به جداکننده‌های با کارایی بالا (High Efficiency) معروف هستند، با طراحی پیشرفته روتور (قفس گردان) و بهبود گردش جریان هوا با استفاده از فن خارجی و دمپرهای کنترلی، کنترل بیشتری روی کیفیت محصول و پارامترهای عملیاتی فراهم کرده‌اند [۳]. این پیشرفت‌ها به‌طور قابل توجهی مصرف انرژی را کاهش، ظرفیت تولید را افزایش و جدایش ذرات ریز را بهبود بخشیدند. به این ترتیب، جداکننده‌های هوایی دینامیکی به تدریج در حال تبدیل شدن به انتخاب اول کارخانه‌های فرآوری مدرن هستند [۴]. تحقیقات در زمینه جداکننده‌های هوایی، به‌طور عمده، با هدف افزایش کارایی جدایش و رفع چالش‌های عملیاتی در صنعت فرآوری مواد معدنی انجام شده‌اند. یکی از اولین دستاوردها در این حوزه توسط هرمن [۵] به دست آمد که کاربرد جداکننده‌های با کارایی بالا در مدار آسیاکنی یک کارخانه سیمان را بررسی کرد. این مطالعه نشان داد که جایگزینی جداکننده‌های سنتی با جداکننده‌های با کارایی

بالا، می‌تواند مصرف انرژی را در بخش آسیاکنی تا یک‌سوم کاهش دهد که پتانسیل این فناوری برای صرفه‌جویی چشمگیر در انرژی و گسترش استفاده از آن را در صنایع فرآوری معدنی و سیمان نشان می‌دهد.

برای درک بهتر اصول نظری جداکننده‌های هوایی، شاپیرو و گالپرین [۲] یک بررسی جامع در خصوص اصول طبقه‌بندی هوایی انجام دادند. تأکید تحقیقات آن‌ها بر اهمیت پارامترهایی مانند حد جدایش، نحوه توزیع جریان هوا و بررسی نواحی جدایش بود که برای دستیابی به کارایی بهینه جدایش ضروری هستند. این بررسی، پایه نظری خوبی برای تحقیقات تجربی و محاسباتی بعدی فراهم کرد.

با گذر از تئوری به تحلیل تجربی، گوا و همکاران [۶] به بررسی تأثیر سرعت قفس گردان بر گرادیان سرعت در قسمت‌های مختلف جداکننده هوایی توربو پرداختند. با استفاده از سرعت‌سنج لیزری داپلر، آن‌ها نشان دادند که در صورت دستیابی به توزیع یکنواخت سرعت محوری و شعاعی، عملکرد جدایش به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. به‌طور مشابه، فنگ و همکاران [۷] تأثیر پارامترهای عملیاتی بر شدت و میدان جریان گردابی در نواحی مختلف جداکننده را مورد مطالعه قرار دادند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که دقت در تعیین شرایط عملیاتی مانند سرعت جریان هوا و سرعت روتور، می‌تواند کیفیت جدایش را افزایش دهد که بر اهمیت کنترل دقیق شرایط عملیاتی تأکید دارد.

جداکننده‌های هوایی با پدیده‌ای به نام اثر قلاب-ماهی (برخلاف الگوهای جدایش متداول سیکلون‌ها) مواجه هستند که منحنی جدایش معمول S شکل پذیرفته‌شده برای ارزیابی کارایی طبقه‌بندی را به چالش می‌کشند. این پدیده از طریق بازیابی غیرخطی ذرات ریز مشخص می‌شود. بدین صورت که از شروع نمودار در ابعاد بسیار ریز، ابتدا تا یک اندازه بحرانی بازیابی افزایش، سپس کاهش یافته و دوباره افزایش می‌یابد [۸]. این بی‌نظمی که در جداکننده‌های هوایی مشاهده شده است، از دنباله‌روی ناخواسته ذرات ریز به بخش درشت ناشی شده و کیفیت جدایش را کاهش می‌دهد. محققان زیادی در مورد منشأ آن بحث کرده‌اند. برخی این پدیده را به خطاهای اندازه‌گیری یا تجمع ذرات ریز نسبت داده‌اند [۹، ۱۰] و برخی دیگر توضیحات مکانیکی شامل نیروهای آیرودینامیکی، نیروی گریز از مرکز و محدودیت‌های عدد رینولدز بر ذرات درشت‌تر را مطرح کرده‌اند [۱۱].

می‌کند که تولید در هر شرایطی ادامه یابد، اما مشخصات محصول از جمله میزان ریزی محصول (عدد بلین) در این شرایط متفاوت خواهد بود. با این حال، دستیابی به عملکرد بهینه و کیفیت و ابعاد مورد قبول محصول، نیاز به کنترل دقیق و رویکرد عملیاتی جامعی دارد. این پیچیدگی بر اهمیت خصوصیت‌سنجی و عیب‌یابی جداکننده هوایی تأکید دارد. بدون درک روشنی از نحوه تعامل شرایط عملیاتی، کیفیت محصول می‌تواند دچار نوسان شود و کارایی جدایش کاهش یابد. با عیب‌یابی و خصوصیت‌سنجی و بهینه‌سازی فرایندی جداکننده هوایی دینامیکی، پژوهش حاضر سعی در ارائه راهکارهای عملیاتی جهت بهبود استراتژی‌های کنترلی، افزایش کارایی و بهبود کیفیت محصول دارد.

۱-۱- مدار آسیاکنی کارخانه گندله‌سازی گل‌گهر

در این پژوهش، جداکننده هوایی دینامیکی کارخانه گندله‌سازی شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر، به‌عنوان مطالعه موردی برای عیب‌یابی و خصوصیت‌سنجی انتخاب شد. در این کارخانه، از مدار آسیاکنی خشک استفاده شده است. این مدار شامل سیستم مشعل و خشک‌کنی، آسیای گلوله‌ای، جداکننده هوایی دینامیکی، جداکننده هوایی استاتیکی و غبارگیر کیسه‌ای است. خوراک پس از ورود به بخش خشک‌کنی آسیا، توسط هوای داغ تولیدشده از سیستم مشعل، خشک‌شده و سپس وارد محفظه آسیاکنی می‌شود. مواد پس از خردایش، به‌وسیله یک مکنده قوی که در انتهای مدار است، به بیرون از آسیا هدایت می‌شوند. بخشی از مواد که درشت‌تر هستند، به پایین سقوط کرده و توسط بالابر سطلی به جداکننده هوایی دینامیکی منتقل می‌شوند. مواد ریزتر وارد جداکننده هوایی استاتیکی می‌شوند. ته‌ریز این جداکننده، با خوراک جداکننده هوایی دینامیکی مخلوط و سرریز آن نیز به غبارگیر کیسه‌ای وارد می‌شود. در این تجهیز، مواد ریز از جریان هوا جدا شده و به دلیل عدد بلین مطلوب، مستقیماً به محصول نهایی مدار فرستاده می‌شود. در جداکننده هوایی دینامیکی، طبقه‌بندی مواد صورت گرفته و مواد ریز با عدد بلین مطلوب توسط چهار سیکلون هوایی که جزئی از آن هستند، از جریان هوا جدا شده و به‌عنوان محصول نهایی برای عملیات بعدی به سیلوهای ذخیره منتقل می‌شوند. ته‌ریز جداکننده هوایی دینامیکی که شامل مواد درشت است، برای خردایش بیشتر به همراه خوراک تازه مجدداً به آسیا برگردانده می‌شود (شکل ۱).

خصوصیت‌سنجی و مدل‌سازی دقیق اثر قلاب-ماهی برای بهینه‌سازی فرایند طبقه‌بندی ذرات ریز، هنوز به‌طور کامل شناخته و انجام نشده است. پیشرفت ابزارهای محاسباتی، دید وسیعی درباره دینامیک جداکننده‌ها فراهم کرده است. برای مثال، هوانگ [۱۲] از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای بهینه‌سازی طراحی صفحات راهنمای دور قفس در جداکننده‌های هوایی نوع توربو استفاده کرد و به پایداری و توزیع یکنواخت‌تر جریان هوا دست یافت. ادواردیش و همکاران [۱۳] و اسماعیل‌پور و همکاران [۱۴] این رویکرد را با ترکیب CFD با روش‌های تجربی برای تشریح پدیده اثر قلاب-ماهی و دنباله‌روی ذرات ریز توسعه و نشان دادند که CFD پتانسیل تشخیصی و بهینه‌سازی قابل‌توجهی برای جداکننده‌های هوایی دارد. ایجاد تعادل بین بهینه‌سازی مصرف انرژی و عملکرد، همواره یک چالش در طراحی جداکننده‌های هوایی بوده است. گویزانی و همکاران [۴] تأثیر سرعت چرخش قفس گردان بر دقت جدایش و مصرف انرژی را بررسی کردند و دریافتند که سرعت‌های بالاتر، دقت را افزایش می‌دهد، اما افت فشار و مصرف انرژی را بیشتر می‌کند که نیاز به بهینه‌سازی دقیق دارد. آلتون و بنزر [۳] مدل‌های ریاضی را برای برقراری توازن بین شرایط مختلف عملیاتی و طراحی پیشنهاد کردند. جداکننده هوایی دینامیکی، یک مدل نسل سوم است که به‌عنوان بخش مهمی از مدار آسیای خشک کارخانه گندله‌سازی شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این جداکننده که برای طبقه‌بندی دقیق ذرات ریز درشت طراحی شده است، در صورت کارکرد مطلوب، پایداری، کیفیت محصول و کارایی عملیات را تضمین می‌کند. با این حال، طراحی پیچیده و همبستگی عوامل عملیاتی آن، چالش‌های زیادی برای بهینه‌سازی فرایندی و کنترل آن ایجاد می‌کند.

ویژگی منحصر به فرد جداکننده هوایی دینامیکی، خودتنظیم بودن آن است. این سیستم با چند متغیر قابل دست‌کاری مانند تنظیمات دمپر، زوایای صفحات راهنمای دور قفس و سرعت قفس کار می‌کند، اما تغییرات ناشی از تنظیمات این متغیرها به‌شدت به یکدیگر وابسته‌اند. تنظیم یک پارامتر بر سایر موارد تأثیر می‌گذارد و کنترل را پیچیده و بسیار حساس می‌کند. با وجود این چالش‌ها، جداکننده طوری طراحی شده است که تقریباً در هر شرایط عملیاتی، در حال کار باقی می‌ماند؛ ولی محصول خروجی مشخصات متفاوتی خواهد داشت. این ویژگی تطبیق‌پذیری آن، تضمین

ممکن نیست و این موضوع، شناخت و تحلیل دقیق ساختار داخلی آن را با چالش‌هایی مواجه می‌کند. برای تسهیل درک جامع از عملکرد آن و امکان شبیه‌سازی‌های دقیق CFD و DEM، یک مدل هندسی سه‌بعدی از این تجهیز با جزئیات کامل و دقیق، با استفاده از نقشه‌های فنی ارائه‌شده توسط سازنده و در محیط نرم‌افزار طراحی صنعتی SolidWorks™ ترسیم و اطمینان حاصل شد که هر جزء با دقت بالا نشان داده شود (شکل ۲). این مدل سه‌بعدی نه تنها نمایشی بصری و ساختاری از جداکننده ارائه می‌دهد، بلکه به شناسایی مناطق با پتانسیل بهینه‌سازی و بهبود عملکرد نیز کمک می‌کند.

۲-۲- شبیه‌سازی به روش اجزای گسسته (راگ؛ AEM)

یکی از عوامل کلیدی که بر کارایی جداکننده هوایی تأثیر می‌گذارد، توزیع یکنواخت مواد روی صفحه توزیع‌کننده خوراک و تشکیل پرده نازک و یکنواخت مواد در اطراف قفس برای جدایش مؤثر است. توزیع یکنواخت مواد از تجمع یک‌طرفه در صفحه توزیع‌کننده جلوگیری می‌کند. چنین تجمعی می‌تواند جریان هوا را مسدود کرده و یا جداسازی ذرات ریز را مختل کند. برعکس، نواحی خالی از مواد، مسیرهای با مقاومت کم ایجاد می‌کنند که باعث می‌شود جریان هوا با عبور از آن قسمت‌ها، به‌طور کامل از مواد عبور نکند و کارایی جدایش کاهش یابد.

شبیه‌سازی به روش اجزای گسسته (راگ؛ DEM) برای تحلیل نحوه توزیع مواد بر روی صفحه توزیع‌کننده بالای قفس گردان با استفاده از نرم‌افزار ایرانی بر پایه DEM به نام KMPC-DEM انجام شد.

در راگ، موقعیت ذرات (X) زمانی که به‌صورت آزادانه در محیط حرکت کنند، بر اساس سرعت آن‌ها (V) و شتاب گرانش (g)، در هر لحظه محاسبه می‌گردد (روابط ۱ و ۲).

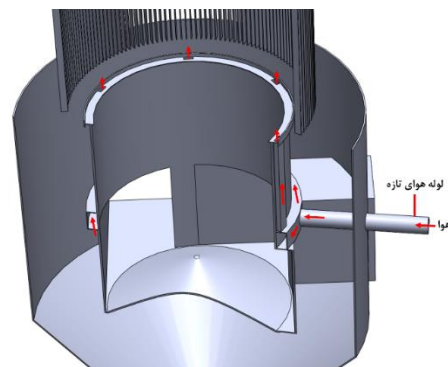
$$X = V\Delta t \quad (1)$$

$$V = g\Delta t \quad (2)$$

اما در صورتی که ذرات با یکدیگر برخورد داشته باشند، علاوه بر شتاب گرانش، شتابی دیگر که ناشی از نیروی برخورد است (رابطه ۳)، به آنان وارد شده و سرعت جدید این ذرات، با این شتاب محاسبه می‌گردد (رابطه ۴). این نیرو خود شامل دو مؤلفه‌ی عمودی (F^n) و مماسی (F^t) است

برگشته‌اند، به سمت غبارگیر کیسه‌ای هدایت می‌کند. تنظیم دقیق دمپر موجود در ابتدای این لوله، از ایجاد مکش بیش‌از حد که می‌تواند تعادل فشار درون جداکننده را مختل کرده و کارایی آن را کاهش دهد، جلوگیری می‌کند.

این لوله به همراه ذرات ریز، بخشی از هوای موجود در سیستم را به بیرون مکش می‌کند؛ بنابراین به دلیل اینکه در این تجهیز، یک سیکل بسته از حجم ثابت هوا جریان دارد، نیاز است تا این حجم هوای از دست‌رفته مجدداً از بیرون از سیستم به داخل آن مکش شود. به همین منظور و جهت جبران این حجم هوای از دست‌رفته، یک لوله (لوله هوای تازه) که به محیط بیرون از تجهیز راه دارد، در زیر قفس قرار گرفته است تا هوا را به داخل مکش کند. این جریان هوا به عدم نشست ذرات ریز و ساییده در زیر قفس و جلوگیری از ساییش این قسمت در اثر چرخش کمک می‌کند. همچنین، خنک‌کاری یاتاقان قفس را نیز انجام می‌دهد که از فرسایش آن جلوگیری کرده و عمر مفید جداکننده را افزایش می‌دهد (شکل ۳).



شکل ۳: نمایشی از لوله هوای تازه زیر قفس گردان و مسیر جریان هوا.

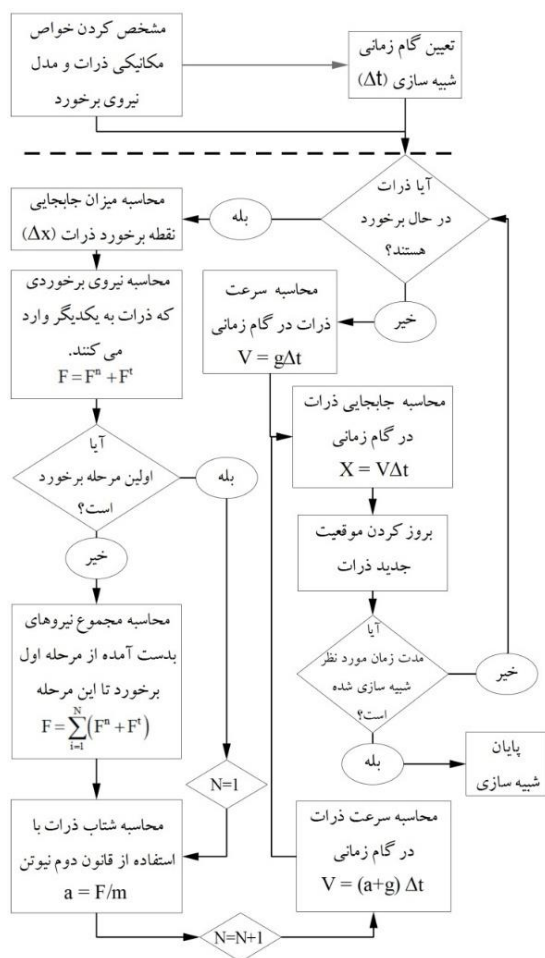
مهم‌ترین مشخصه کاری این جداکننده، سرعت هوای در گردش است که به‌وسیله تغییر میزان بازشدگی و نحوه چینش دمپر قبل از فن، کنترل می‌شود. در این تجهیز که پیچیدگی زیادی دارد، تعداد عوامل قابل دست‌کاری جهت کنترل عملکرد آن نیز بسیار کم و شامل موقعیت دمپرها، چینش صفحات راهنما و سرعت چرخش قفس است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ترسیم مدل هندسی جداکننده هوایی

جداکننده هوایی دینامیکی یک سیستم پیچیده با جزئیات زیاد است که بازدید مستقیم از برخی اجزای آن

برای تعیین مقدار نیروی کل وارده به ذرات، تعیین دقیق توابع سختی (K) و میرایی (C) از اهمیت زیادی برخوردار است. این توابع که در قالب مدل‌های نیروی برخورد ارائه می‌شوند، یکی از مهم‌ترین بخش‌هایی هستند که بر دقت نتایج شبیه‌سازی تأثیر گذراند و اعتبار شبیه‌سازی را تحت شعاع قرار می‌دهند. از این‌رو، تاکنون مدل‌های نیروی برخورد زیادی، باهدف نزدیک کردن نتایج شبیه‌سازی با واقعیت ارائه شده است [۱۶]. از بین مدل‌های نیروی برخورد ارائه‌شده، دو مدل نیروی برخورد خطی و هرتز-میندین بیشترین کاربرد را دارند و در بسیاری از نرم‌افزارهای راگ‌بنیان از این دو مدل استفاده می‌شود [۱۷].



شکل ۵: الگوریتم انجام محاسبات در شبیه‌سازی با راگ.

جزئیات دقیق روش DEM و مدل‌های ارائه‌شده در این نرم‌افزار در منابع دیگر آمده است [۱۸، ۱۹]. مدل برخورد مورد استفاده در این شبیه‌سازی از نوع خطی فرض شده است. سایر ضرایب و پارامترهای شبیه‌سازی در جدول ۱ آمده است.

(رابطه ۵). در این حالت ابتدا، میزان همپوشانی (Δx) هر یک از ذرات محاسبه می‌گردد. همپوشانی، میزان نفوذی است که دو ذره در اثر برخورد، پیدا می‌کنند. متناسب با میزان همپوشانی و با استفاده از مدل نیروی برخورد، نیروی اعمالی به هر یک از ذرات محاسبه می‌شود.

$$a = \frac{F}{m} + g \quad (3)$$

$$V = a \Delta t \quad (4)$$

$$F = F^n + F^t \quad (5)$$

در این روابط a شتاب ذره، F نیروی برخورد و m جرم ذره است.

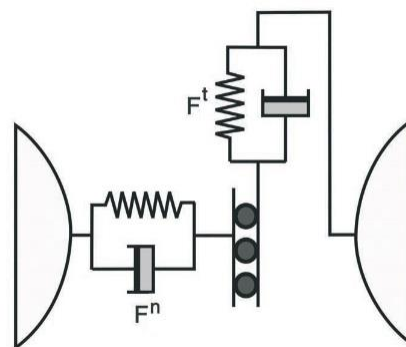
در تمام روابط، اندیس‌های n و t به ترتیب معرف مؤلفه‌های مماسی، عمودی و نسبی هستند.

فرضیاتی برای ساده‌سازی محاسبات در راگ در نظر گرفته می‌شود. از جمله این فرضیات شبیه‌سازی نیروی برخورد بین دو ذره با استفاده از مدل فنر-میراگر است (شکل ۴).

در مدل فنر-میراگر، مؤلفه‌های عمودی (F^n) و مماسی (F^t) نیروهایی که به ذرات وارد می‌شود، با استفاده از روابط ۶ و ۷ محاسبه می‌شود. در این روابط، K تابع سختی برخورد و C تابع میرایی برخورد است.

$$F^n = K^n \int \Delta x^n + C^n V_{rel}^n \quad (6)$$

$$F^t = K^t \int \Delta x^t + C^t V_{rel}^t \quad (7)$$



شکل ۴: مدل نیروی برخورد فنر-میراگر [۱۵].

با داشتن مقدار جرم گلوله‌ها و محاسبه مؤلفه‌های نیرو با استفاده از روابط (۶) و (۷)، مقادیر شتاب در جهت عمودی و مماسی و به دنبال آن سرعت و موقعیت جدید ذرات محاسبه می‌شود. به‌طور خلاصه، الگوریتم نحوه انجام محاسبات در شبیه‌سازی با راگ در شکل ۵ آمده است.

جدول ۱: پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی راگ

پارامتر	مقدار	واحد
مدول الاستیسیته	۰٫۲۴	مگا پاسکال
ضریب استرداد	۰٫۱	
ضریب اصطکاک غلتشی	۰٫۱۵	
ضریب اصطکاک ایستایی	۰٫۲	
گام زمانی	$1,7 \times 10^{-5}$	ثانیه
نسبت پواسون	۰٫۲۵	
چگالی ذرات	۲۴۰۰	کیلوگرم بر مترمکعب
توزیع ابعادی ذرات	۰٫۱ - ۰٫۵	میلی‌متر
تعداد کل ذرات	۱۵۴۶۰	

که در آن، ρ چگالی سیال، v مؤلفه‌های سرعت، P فشار، μ ویسکوزیته دینامیکی و F نیروهای حجمی مانند گرانش هستند.

مدل تنش رینولدز (Reynolds Stress Model-RSM) برای شبیه‌سازی آشفتگی انتخاب شد. این مدل به جای استفاده از فرضیات گرده‌های همسانگرد در مدل‌های $k - \epsilon$ و $k - \omega$ ، مستقیماً معادلات مربوط به تنش‌های رینولدز را حل می‌کند و دقت بالاتری برای جریان‌های چرخشی دارد. معادله تنش رینولدز به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود [۲۰]:

$$\frac{RD_{ij}}{Dt} = D_{ij} + P_{ij} + \varphi_{ij} - \epsilon_{ij} \quad (11)$$

که در آن D_{ij} و P_{ij} و φ_{ij} و ϵ_{ij} به ترتیب بیانگر نفوذ تنش رینولدز، تولید تنش رینولدز ناشی از گردان سرعت، اثر فشار-کرنش و نرخ اتلاف انرژی توسط ویسکوزیته هستند.

۲-۳-۲- آزمون استقلال از شبکه

برای بررسی دقت حل عددی، آزمون استقلال از شبکه به روش (Grid Convergence Index) انجام شد. چهار شبکه با تعداد المان‌های مختلف برای محفظه حلزونی (۱، ۲، ۴ و ۸ میلیون) و چهار شبکه برای دمپره‌های قبل از فن (۰٫۵، ۱، ۲ و ۴ میلیون) مورد بررسی قرار گرفتند. معیار انتخاب شبکه بهینه، پایداری مقدار سرعت و افت فشار در هر شبکه بود.

با افزایش تعداد المان‌های شبکه، تغییرات در مقدار سرعت و افت فشار کاهش یافت. مقدار GCI بین دو شبکه‌ی ۴ و ۸ میلیون المانی برای محفظه حلزونی، مقدار ۰٫۹ درصد و بین شبکه‌های ۲ و ۴ میلیون المانی برای دمپرها، مقدار ۱٫۲ درصد را نشان داد (جدول ۲). این نتایج نشان داد که دقت حل عددی با این شبکه‌ها به حد مطلوب رسیده و افزایش بیشتر تعداد المان‌ها تأثیر قابل توجهی بر نتایج ندارد. نتایج نشان داد که استفاده از شبکه‌ی ۴ میلیونی برای محفظه حلزونی و شبکه‌ی ۲ میلیونی برای دمپرها، تعادل مناسبی بین دقت و هزینه محاسباتی ایجاد می‌کند.

علاوه بر این، همگرایی حل عددی در تمامی شبکه‌ها بررسی شد. با کاهش باقی‌مانده‌ها (Residuals) به مقادیر کمتر از 10^{-4} ، اطمینان حاصل شد که حل عددی به همگرایی رسیده است.

۲-۳- شبیه‌سازی سیالاتی به روش $X\Phi\Delta$

برای بررسی نحوه توزیع سرعت جریان هوا در محفظه حلزونی و دمپره‌های قبل از فن، شبیه‌سازی به روش CFD با استفاده از نرم‌افزار Ansys Fluent™ انجام شد. با توجه به ماهیت جریان در جداکننده هوایی، مسیرهای پیچیده و چرخشی و تغییرات گردان فشار در بخش‌های مختلف آن، از مدل‌سازی دقیق تری برای تحلیل رفتار جریان استفاده شد که در ادامه، خلاصه‌ای از روند آن آمده است. مدل‌سازی جریان با فرضیات جریان آشفته، تراکم‌ناپذیر و پایدار انجام گرفت.

۱-۳-۲- معادلات حاکم

معادله پیوستگی بیان می‌کند که نرخ تغییرات چگالی در یک حجم کنترلی برابر با نرخ ورودی و خروجی جرم از آن حجم است و به صورت رابطه (۸) نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (8)$$

با توجه به فرض تراکم‌ناپذیری، چگالی ثابت فرض شده و معادله به صورت ساده‌تر در می‌آید (رابطه ۹).

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (9)$$

معادلات مومنوم (معادلات ناویر-استوکس) برای یک سیال تراکم‌ناپذیر در جهت i به شکل رابطه ۱۰ نوشته می‌شوند.

$$\rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} + F_i \quad (10)$$

کیسه‌ای و تغییرات جریان هوا بر عملکرد جداکننده و کارایی کلی آن محسوب می‌شود.

برای تحلیل توزیع اندازه و مشخصه‌های مواد تجمع‌یافته در محفظه حلزونی جداکننده، نمونه‌هایی از این قسمت جمع‌آوری شد. جهت بررسی ابعاد این ذرات، به دلیل ماهیت بسیار ریز آن‌ها از روش آنالیز لیزری ذرات (LPSA) استفاده شد.

برای تحلیل نحوه تجمع ذرات در محفظه حلزونی، جریان هوا با استفاده از روش CFD شبیه‌سازی شد و حرکت ذرات به‌عنوان تابعی از الگوی جریان استنتاج گردید. با توجه به این‌که ذرات در محفظه حلزونی بسیار ریز و سبک هستند و درصد پایینی از کل جریان را شامل می‌شوند، مسیر حرکت و نحوه تجمع آن‌ها مستقیماً با خطوط جریان هوا مرتبط در نظر گرفته شد و مدل‌سازی تأثیر متقابل بین فازهای گاز و جامد انجام نشد. این رویکرد، علاوه بر کاهش پیچیدگی محاسباتی، امکان ارزیابی غیرمستقیم الگوی توزیع ذرات را از طریق تحلیل جریان هوا فراهم کرد. از آنجاکه هدف از انجام شبیه‌سازی، صرفاً مقایسه حالت‌های قبل و بعد از اعمال تغییرات بود، اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی CFD از طریق مشاهده و تصویربرداری مستقیم از نحوه تجمع و نشست مواد در محفظه حلزونی و مطابقت دادن آن با پروفیل‌های سرعت جریان سیال در این منطقه انجام شد و از این طریق، از صحت نتایج شبیه‌سازی و در نظر گفتن فرضیات در روش مذکور، اطمینان حاصل شد.

در شبیه‌سازی توزیع خوراک به روش DEM نیز به دلیل اینکه توزیع ذرات روی صفحه توزیع‌کننده عمدتاً تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز ناشی از چرخش قفس گردان قرار دارد و جریان هوا در این ناحیه تأثیر ناچیزی دارد، از مدل‌سازی تک‌فازی DEM استفاده شد. برای اعتبارسنجی این نتایج، مشاهدات مستقیم از طریق دریچه‌های بازدید انجام گرفت و الگوی توزیع ذرات در طرح اولیه با شبیه‌سازی‌ها مقایسه و مطابقت داده شد.

به دلیل محدودیت‌های فنی و عملیاتی در اندازه‌گیری مستقیم رفتار ذرات و جریان هوا در کارخانه و همچنین استفاده مقایسه‌ای از نتایج، اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی‌های CFD و DEM بر اساس مشاهدات مستقیم، عکس‌برداری و مقایسه آن‌ها با نتایج شبیه‌سازی انجام شد. این روش، در محیط‌های صنعتی نسبت به روش‌های

جدول ۲: مقایسه‌ی پارامترهای کلیدی آزمون استقلال از شبکه در تعداد المان‌های مختلف

تعداد المان (میلیون)	سرعت میانگین (متر بر ثانیه)	افت فشار (کیلوپاسکال)
۱	۱۸٫۴	۱۲۰
۲	۲۰٫۲	۱۳۵
۴	۲۱٫۰	۱۴۰
۸	۲۱٫۲	۱۴۲

۳-۳-۲- شرایط مرزی

با توجه به یکنواختی سرعت در سرتاسر جداکننده و با توجه به شرایط عملیاتی معمول، شرایط مرزی شامل یک ورودی سرعت هوا به محفظه حلزونی و دمپر قبل از فن به مقدار ۲۱ متر بر ثانیه ($v = 21 \text{ m/s}$) در نظر گرفته شد که منعکس‌کننده سرعت هوا در حداکثر بازشدگی دمپر مطابق نمودارهای سازنده فن است. شرط خروجی نیز فشار محیطی بود ($P = P_{atm}$) که به‌صورت مشترک در هر دو مورد شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. در خصوص دیواره‌ها نیز شرط عدم لغزش ($v = 0$) در تمام سطوح جامد در نظر گرفته شد.

۴-۲- پایش و اندازه‌گیری، مشاهدات فیزیکی و اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی

برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد جداکننده هوایی، ترکیبی از مشاهدات فیزیکی، پایش مداوم تجهیز و نمونه‌برداری به کار گرفته شد. حضور مداوم در کارخانه امکان تصویربرداری منظم و بررسی اجزای حیاتی مانند محفظه حلزونی، صفحات راهنما و قفس گردان و بررسی الگوهای سایش، تجمع مواد و اثرات تغییر شرایط عملیاتی را فراهم کرد.

برای مقایسه عددی میزان سایش، اندازه‌گیری‌هایی با تمرکز بر نواحی با پتانسیل بالای سایش مانند قفس گردان و کانال‌ها انجام شد.

پایش مداوم فشار درون جداکننده هوایی، نقش حیاتی در درک عملکرد این سیستم ایفا می‌کند. به همین منظور از یک فشارسنج دیجیتال کالیبره شده (محدوده: منفی ۳۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌بار؛ دقت: ۰٫۱ میلی‌بار) برای اندازه‌گیری اختلاف فشار داخل جداکننده نسبت به محیط بیرون استفاده شد. اندازه‌گیری این فشار، یک مرحله کلیدی برای پی بردن به تأثیر تغییر بازشدگی دمپر، تغییر فشار غبارگیر

و بار در گردش با تنظیم مداوم سرعت قفس در یک محدوده خاص حفظ شد. در استراتژی دوم، متغیر قابل دستکاری تناژ خوراک تازه، متغیر تحت کنترل بار در گردش و سرعت قفس نیز ثابت نگه‌داشته شد. برای جبران تغییرات و حفظ تناژ کل خوراک وارد شده به آسیا (مجموع بار در گردش و خوراک تازه)، تناژ خوراک تازه تنظیم شد.

نمونه‌برداری در طول زمان و در شرایط عملیاتی پایدار برای اندازه‌گیری عدد بلین که نشان‌دهنده میزان ریزی محصول است، انجام شد. میانگین عدد بلین اندازه‌گیری شده محصول نهایی در حالت سرعت متغیر قفس، 1154 ± 240 سانتی‌متر مربع بر گرم بود که نوسانات قابل توجهی را نشان داد. در مقابل، حالت سرعت ثابت قفس منجر به عدد بلین پایدارتر و محصول ریزتر با میانگین 1195 ± 72 سانتی‌متر مربع بر گرم شد که نشان‌دهنده نوسانات کمتر در اندازه محصول است (شکل ۶). به عبارت دیگر، انحراف معیار نسبی عدد بلین محصول از ۱۱ درصد به ۳ درصد کاهش یافت. افزایش مطلق در عدد بلین با سطح اطمینان ۹۳ درصد تنها ۴۱ واحد بود، اما کاهش قابل توجه در انحراف معیار از ۱۲۰ به ۳۶ واحد باعث ایجاد کیفیت محصولی پایدارتر می‌شود. آزمون F (فیشر) نشان داد که هنگام استفاده از استراتژی سرعت ثابت قفس، کاهش در واریانس عدد بلین اندازه‌گیری شده با سطح اطمینان بیش از ۹۹ درصد اتفاق افتاده است. در نتیجه مشخص شد که حفظ سرعت ثابت قفس، استراتژی کنترلی مطلوب برای جداکننده است؛ زیرا نوسانات در اندازه محصول جداکننده را به حداقل رسانده و عملکرد آن را پایدارتر می‌کند.

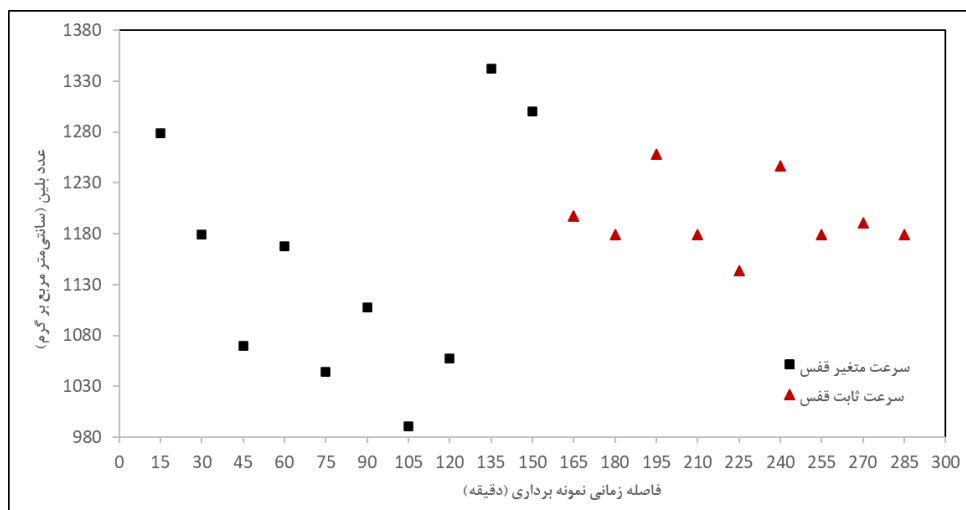
اندازه‌گیری دقیق‌تر، از نظر محاسباتی مقرون به صرفه‌تر و از نظر عملی قابل اجرا بوده و امکان بررسی صحت مدل‌سازی را بدون نیاز به ابزارهای پیچیده اندازه‌گیری فراهم کرده است. به عبارت دیگر، نتایج به‌کارگیری این روش‌های ترکیبی، امکان ارزیابی دقیق کارایی جداکننده، بررسی نقاط مستعد جهت انجام بهینه‌سازی، تأثیر سایش اجزا و تغییر شرایط عملیاتی بر عملکرد سیستم را فراهم کرد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- استراتژی کنترلی مطلوب سرعت قفس و تأثیر آن بر ابعاد محصول

بخش اصلی جداکننده هوای دینامیکی، روتور یا قفس گردان است که در ورودی جداکننده قرار دارد و جداسازی ذرات ریزودرشت را انجام می‌دهد. در طراحی هر جداکننده، یک حد جدایش در نظر گرفته می‌شود که به‌عنوان معیاری برای بررسی عملکرد آن است. حد جدایش در این تجهیز توسط سرعت چرخش قفس تعیین می‌شود. افزایش سرعت قفس منجر به تولید محصول ریزتر می‌شود؛ بنابراین، برای دستیابی به یک محدوده مطلوب برای حد جدایش، حفظ سرعت ثابت قفس بسیار مهم است. سرعت قفس به‌طور مستقیم بر بار در گردش جداکننده نیز تأثیر می‌گذارد.

جهت بررسی تأثیر سرعت چرخش قفس بر ابعاد محصول و حد جدایش، دو استراتژی کنترلی آزمایش شد. در اولین استراتژی، متغیر قابل دست‌کاری، سرعت قفس و متغیر تحت کنترل، بار در گردش جداکننده بود. تناژ خوراک تازه وارد شده به آسیای گلوله‌ای در یک محدوده ثابت نگه‌داشته



شکل ۶: تأثیر سرعت ثابت و متغیر قفس گردان بر نوسانات عدد بلین (میزان ریزی محصول) جداکننده.

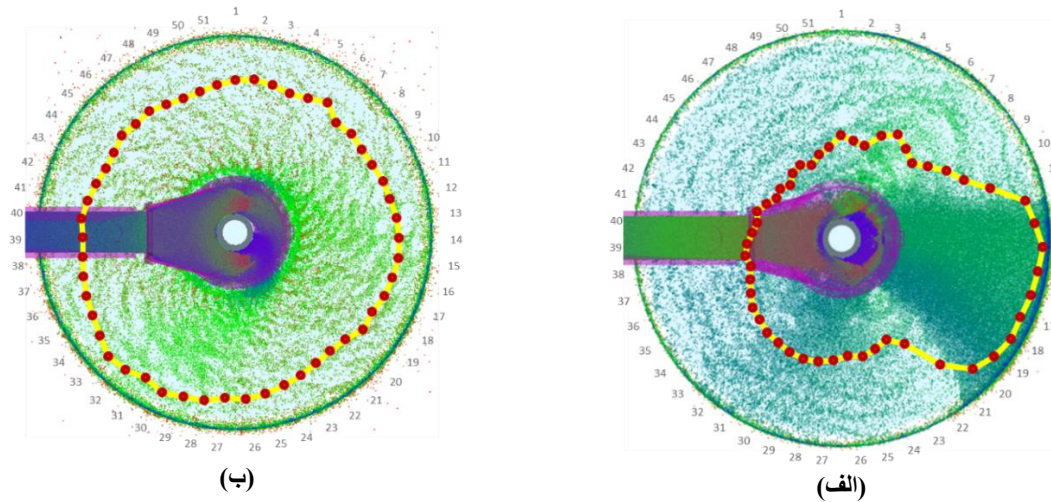
۲-۳- اصلاح نحوه خوراک‌دهی به جداکننده جهت توزیع یکنواخت خوراک روی سینی

نحوه توزیع خوراک روی صفحه توزیع‌کننده بالای قفس گردان از طریق خوراک‌دهنده، یکی از عوامل کلیدی در تعیین کارایی جدایش در جداکننده هوایی دینامیکی است. نتایج شبیه‌سازی DEM برای طرح فعلی خوراک‌دهنده نشان داد که توزیع خوراک روی صفحه توزیع‌کننده به صورت غیریکنواخت است و منجر به تجمع مواد به صورت یک طرفه شده و از کل فضای مفید صفحه توزیع استفاده نمی‌شود (شکل ۷-الف). این نوع توزیع باعث می‌شود در اطراف قفس که باید ذرات به صورت یک پرده نازک یکنواخت پخش شوند، در یک قسمت پرده ضخیمی از مواد تشکیل شود و در قسمت مقابل، پرده مواد وجود نداشته و خالی بماند. بنابراین چون جریان هوا توانایی عبور از قسمت ضخیم را ندارد، ذرات موجود در این قسمت کمتر در معرض نیروی ناشی از جریان هوا قرار گرفته و در معرض جدایش قرار نمی‌گیرند. همچنین، منطقه‌ای با مقاومت پایین در قسمت خالی از مواد ایجاد شده که اجازه عبور بیشتر جریان هوا از آن قسمت را می‌دهد و باعث عدم توزیع هوا در اطراف قفس به‌عنوان یک عامل جدایش می‌شود.

برای مقایسه عددی نحوه توزیع مواد، لبه صفحه توزیع‌کننده به ۵۱ قطاع تقسیم شد. در طول شبیه‌سازی، تعداد ذرات عبوری از هر قطاع اندازه‌گیری شد. داده‌های به‌دست‌آمده برای رسم نمودار توزیع استفاده شد که هر نقطه نشان‌دهنده تعداد ذرات عبوری از آن است. هرچه یک نقطه از مرکز صفحه دورتر باشد، تعداد مواد عبور کرده از آن بیشتر است. به‌عنوان مثال، در شکل ۷-الف، تعداد ذرات عبوری از قطاع ۱۴ برابر با ۱۳۴ ذره است، در حالی که این تعداد برای قطاع ۲۴ برابر با ۷۵ ذره است. این تعداد در شکل ۷-ب که به طراحی اصلاح‌شده تعلق دارد، ۹۵ ذره برای قطاع ۱۴ و ۹۳ ذره برای قطاع ۲۴ است. هرچه تفاوت بین تعداد ذرات عبوری از قطاع‌های مختلف کمتر باشد و تعداد ذرات به هم نزدیک‌تر باشد، یا به‌عبارت‌دیگر، هرچه انحراف معیار توزیع ذرات عبوری از قطاع‌ها کمتر باشد، نشان‌دهنده نوسان کمتر و توزیع یکنواخت‌تر ذرات بر روی صفحه توزیع‌کننده است. نتایج شبیه‌سازی DEM طرح اصلی خوراک‌دهنده و نمودار توزیع رسم شده، عدم یکنواختی قابل توجهی در جریان مواد

را نشان داد. نکته مهم در مورد شبیه‌سازی با طرح فعلی این است که نتایج شبیه‌سازی به‌شدت به ضرایب استفاده‌شده در روش اجزای گسسته مانند ضریب استرداد، ضریب اصطکاک ایستایی و غلتشی وابسته است. از آنجاکه نوسان در نوع و خواص بار ورودی به این تجهیز اجتناب‌ناپذیر است، لذا نتایجی که در شکل ۷-الف نشان داده شده است، تنها مربوط به یکی از حالت‌های توزیع مواد در طول عملیات است. در سایر شبیه‌سازی‌ها با تغییر ضرایب مورد استفاده در شبیه‌سازی که باعث تغییر خواص مواد می‌شود، مشاهده شد که الگوی ریزش مواد روی صفحه توزیع‌کننده تغییر می‌کند؛ اما وجه اشتراک در همه شبیه‌سازی‌ها این بود که در هیچ‌کدام از شرایط، توزیع مواد روی سینی یکنواخت نمی‌شود؛ بنابراین با توجه به اینکه الگوی ریزش مواد دائماً در حال تغییر است، باید طرح اصلاحی به‌نوعی باشد که با وجود تغییر خواص مواد، توزیع مواد روی سینی همچنان به‌صورت کاملاً همگن و یکنواخت باشد.

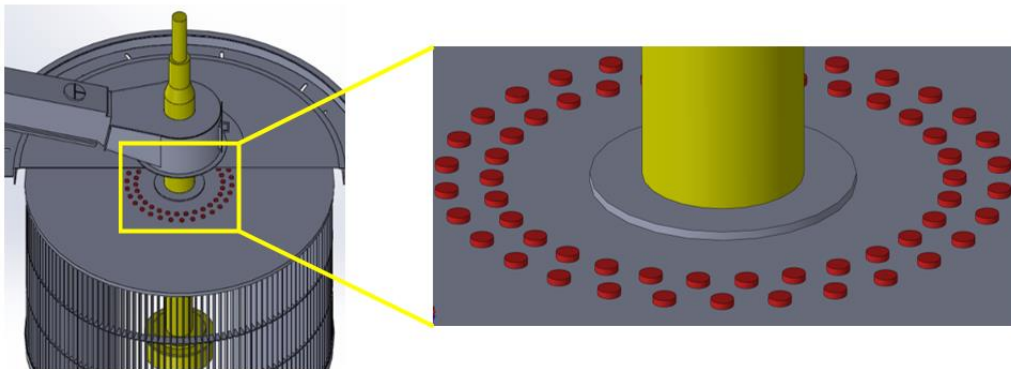
برای رفع مشکل توزیع غیریکنواخت خوراک، یک طرح اصلاحی خوراک‌دهنده پیشنهاد شد که در آن تعداد ۳۰ دیسک (دیسک‌های قرمز رنگ در شکل ۸) به قطر ۵۰ و ضخامت ۱۵ میلی‌متر روی محیط یک دایره به قطر ۱۰۰۰ میلی‌متر نسبت به مرکز سینی به‌صورت یکنواخت روی سینی جوشکاری می‌شوند. علاوه بر آن تعداد ۳۰ عدد دیسک دیگر با همین مشخصات روی محیط یک دایره به قطر ۱۲۰۰ میلی‌متر جوشکاری می‌شود. نحوه قرارگیری این دو ردیف از دیسک‌ها باید به‌نوعی باشد که دیسک‌های بیرونی بین دو دیسک از ردیف داخلی قرار بگیرد. به‌عبارت‌دیگر، این دو ردیف قرار است یک مانع موقت و کوتاه‌مدت برای ریزش مواد ایجاد کرده و مواد را تا آنجا که امکان دارد پخش کنند. لذا باید نحوه قرارگیری دیسک‌های ردیف دوم به نحوی باشد که مواد به‌راحتی نتوانند از بین دو دیسک متوالی ردیف اول راه میانبر پیدا کنند. در عمل، چینش دیسک‌ها در ردیف دوم باید با اختلاف ۶ درجه نسبت به ردیف اول انجام شود. از مزایای این طرح می‌توان به اجرای ساده و کم‌هزینه، توزیع یکنواخت مواد روی سینی و عدم تأثیرپذیری زیاد از تغییر خواص مواد (اصطکاک و چسبندگی) اشاره کرد. نتایج شبیه‌سازی DEM با استفاده از طراحی اصلاحی نشان داد که نحوه توزیع خوراک روی صفحه توزیع به‌طور قابل توجهی بهبود یافته است (شکل ۷-ب).



شکل ۷: نتایج شبیه‌سازی DEM و نمودار توزیع ذرات روی صفحه توزیع‌کننده خوراک در الف) طراحی فعلی و ب) طراحی پیشنهادی (خط زرد و نقاط قرمز نشان‌دهنده نمودار توزیع ذرات هستند).

ذرات روی صفحه توزیع‌کننده خوراک از ۳۰ درصد به ۵ درصد کاهش و بهبود یافته است.

مقایسه میانگین و انحراف معیار توزیع ذرات بر روی صفحه توزیع‌کننده نشان داد که یکنواختی توزیع افزایش یافته است، به طوری که انحراف معیار نسبی توزیع



شکل ۸: نمایشی از طراحی پیشنهادی خوراک‌دهنده جداکننده هوایی (دیسک‌های قرمز رنگ روی صفحه توزیع‌کننده).

- چینش نامناسب صفحات دمپر، کاهش سرعت و توزیع غیریکنواخت جریان هوا در جداکننده
- کاهش کارایی غبارگیر کیسه‌ای و لوله غبارگیر و عدم کارکرد صحیح لوله هوای تازه
- توزیع غیریکنواخت جریان هوا در محفظه حلزونی در ادامه، به بررسی جزئیات هر عامل و راهکارهای ارائه شده جهت رفع مشکل پرداخته می‌شود.

۳-۳-۱- کاهش کارایی سیکلون، عدم کارکرد صحیح دریچه تخلیه و ورود هوای اضافی به سیکلون از ته‌ریز

در شرایط عملیاتی ایده‌آل، نشست ذرات ریز در محفظه حلزونی نباید اتفاق بیفتد. تنها جایی که ذرات می‌توانند از آنجا به چرخه برگردند، سرریز سیکلون است. وظیفه سیکلون، بازیابی هوا از طریق سرریز و برگرداندن آن به

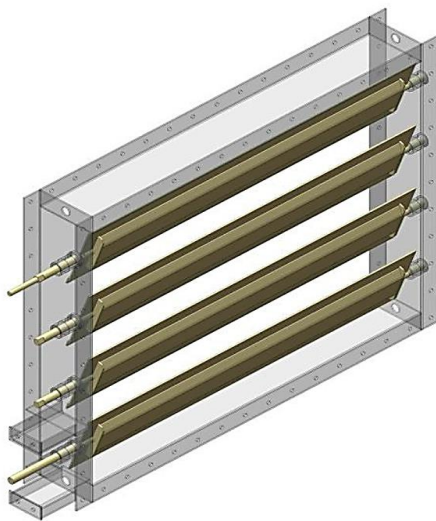
۳-۳-۲- نشست مواد در محفظه حلزونی دور قفس و عوامل مؤثر بر آن

طی پایش‌های مداوم انجام‌شده، از طریق تصویربرداری و مشاهده مستقیم مشخص شد که مقدار قابل توجهی از مواد در محفظه حلزونی دور قفس نشست کرده است. برای شناسایی منشأ این ذرات و اطلاع از دانه‌بندی آن‌ها، آنالیز دانه‌بندی با روش لیزری (LPSA) انجام شد. نتایج نشان داد که اندازه متوسط این ذرات حدود ۷ میکرون است که تأیید می‌کند ذرات بسیار ریز وارد چرخه جداکننده شده و در این بخش نشست کرده‌اند. چندین عامل وابسته به هم باعث بروز این مسئله بوده‌اند، از جمله:

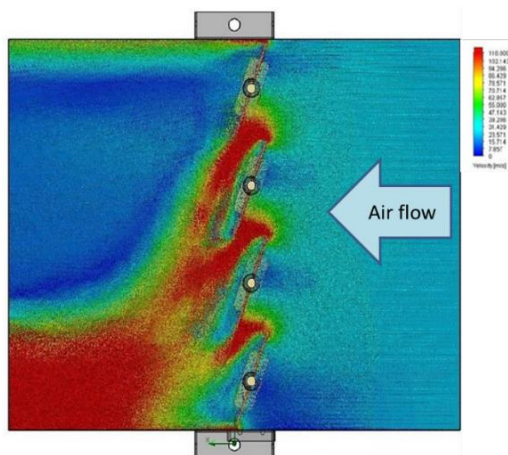
- کاهش کارایی سیکلون، عدم کارکرد صحیح دریچه تخلیه و ورود هوای اضافی به سیکلون از ته‌ریز

پایینی با بخش‌های میانی کانال بعد از دمپر وجود دارد و باعث سایش در بخش‌هایی از کانال بعد از دمپر می‌شود (شکل ۹). همچنین این نحوه توزیع نامطلوب هوا، منجر به کاهش کلی سرعت جریان هوا در جداکننده و کاهش کارایی جدایش در سیکلون می‌شود.

بازرسی‌های میدانی نیز مطابق انتظار نشان داد که سایش کانال‌های بعد از دمپر در دیواره‌های بالایی و پایینی که در نتایج شبیه‌سازی نیز سرعت بالای جریان هوا در آن مناطق مشاهده شده بود، اتفاق افتاده است.



(الف)



(ب)

شکل ۹: الف) نمایشی از چینش اولیه صفحات دمپر؛ ب) نتیجه شبیه‌سازی CFD کنتورهای سرعت.

برای اطمینان از توزیع یکنواخت‌تر جریان هوا و جلوگیری از سایش کانال بعد از دمپر، چینش صفحات دمپر اصلاح شد. نتایج شبیه‌سازی CFD برای چینش اصلاح‌شده صفحات دمپر، بهبود قابل‌توجهی را در یکنواختی توزیع سرعت هوا در کانال پس از دمپر نشان داد و هیچ منطقه‌ای

چرخه جداکننده هوایی است و به‌طور ایده‌آل، هیچ ذره‌ای نباید در این جریان وجود داشته باشد؛ زیرا جدایش مواد در جداکننده هوایی، وظیفه قفس گردان است؛ بنابراین، تمام جدایش باید به قفس محدود شود و سیکلون فقط به‌عنوان بازیابی‌کننده هوا عمل کند.

باین‌حال، حضور ذرات ریز در محفظه حلزونی نشان داد که علاوه بر هوا، ذرات ریز هم در جریان هوای سرریز سیکلون وجود دارند. باتوجه به ماهیت ریز این ذرات می‌توان نتیجه گرفت که حضور آنها عمدتاً به دلیل پدیده دنباله‌روی جریان هوا (اثر قلاب ماهی) است؛ اما از طرفی، حجم قابل توجه این ذرات نشان از این است که علاوه بر پدیده اجتناب‌ناپذیر دنباله‌روی، مشکل دیگری نیز وجود دارد که کارایی سیکلون را کاهش داده و باعث می‌شود که حجم بیشتری از این ذرات از طریق سرریز سیکلون به چرخه جداکننده راه پیدا کنند.

با بررسی‌های انجام‌شده، مشخص شد که علت کاهش کارایی سیکلون، تخلیه نادرست مواد از طریق ته ریز سیکلون است که اجازه می‌دهد هوای اضافی از ته ریز وارد سیکلون شود. این مسئله باعث ایجاد تلاطم و نقص در جریان گردابی (که برای جدایش هوا از ذرات ریز محصول ضروری است) می‌شود و ذرات ریز بیشتری را به همراه هوا از سرریز سیکلون خارج می‌کند. منشأ آن نیز نقص در عملکرد وزنه‌های متصل به دریچه پاندولی است که تخلیه مواد از ته ریز سیکلون را تنظیم می‌کنند. مشاهده سایش در کانال سرریز سیکلون و پیداکننده گرداب نیز گواهی بر وجود این مشکل بود. برای حل این مسئله، دریچه‌های پاندولی تعمیر و وزنه‌های متصل به آن‌ها به‌صورت دوره‌ای تنظیم شدند.

۲-۳-۳- چینش نامناسب صفحات دمپر، کاهش سرعت و توزیع غیریکنواخت جریان هوا در جداکننده

عامل دیگری که باعث کاهش کارایی سیکلون و جدایش نامطلوب ذرات بود، کاهش سرعت هوای ورودی به سیکلون بود که به چینش نامناسب صفحات دمپر قبل از فن برمی‌گردد. این دمپر تنها پارامتر مستقل قابل‌تنظیم برای تغییر سرعت هوای در حال گردش در جداکننده هوایی است. در طراحی اصلی، تمام صفحات دمپر در یک جهت حرکت می‌کردند که توزیع نامناسب و غیریکنواخت جریان هوا را به دنبال داشت. نتایج شبیه‌سازی CFD همراه با بررسی کنتورهای سرعت هوا نشان داد که اختلاف قابل‌توجهی در سرعت جریان هوا در بخش‌های بالایی و

با سرعت بالا که در طراحی اولیه موجب سایش شدید کانال شده بود، مشاهده نشد.

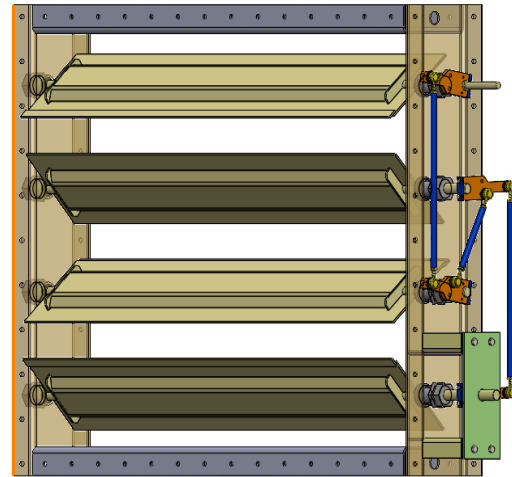
چینش اصلاح‌شده در جداکننده هوایی پیاده‌سازی شد و پس از حدود ۱۰ ماه از کارکرد، در طول یک توقف برنامه‌ریزی شده، بررسی کانال بعد از دمپر انجام شد و نشان داد که میزان سایش به‌طور بارز کاهش یافته است.

هدف لوله غبارگیر، مکش و خارج کردن ذرات بسیار ریزی است که به دلیل پدیده دنباله‌روی از طریق سرریز سیکلون به جداکننده هوایی راه‌یافته‌اند. به همین دلیل، کارایی نامطلوب این لوله و غبارگیر کیسه‌ای، باعث عدم مکش ذرات ریز به بیرون از جداکننده و عبور از این لوله و نشست در محفظه حلزونی می‌شود.

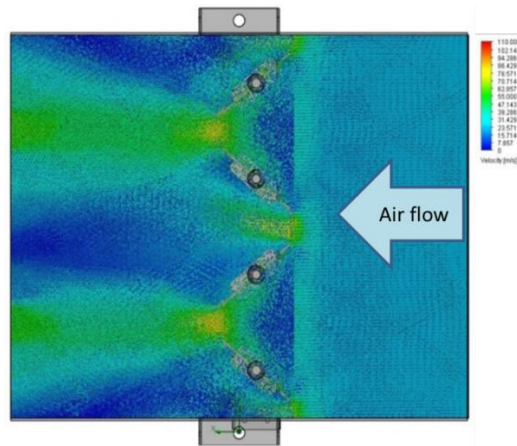
جهت بررسی تأثیر میزان مکش لوله غبارگیر بر اختلاف فشار داخل جداکننده هوایی، یک فشارسنج بعد از لوله غبارگیر نصب شد. این فشارسنج اختلاف فشار داخل جداکننده نسبت به فشار محیط (اتمسفر) را اندازه‌گیری می‌کند. با تغییر میزان بازشدگی دمپر روی لوله غبارگیر از ۸۰ درصد به ۴۰ درصد، اختلاف فشار داخل جداکننده از منفی ۱۵ به منفی ۵ میلی‌بار تغییر کرد. در آزمایشی دیگر، با ثابت نگه‌داشتن بازشدگی دمپر روی غبارگیر به میزان ۶۰ درصد، با کاهش ۴ میلی‌بار اختلاف فشار داخل غبارگیر کیسه‌ای، اختلاف فشار داخل جداکننده هوایی به میزان حدود ۸ میلی‌بار کاهش یافت.

برای بررسی تأثیر اختلاف فشار درون غبارگیر کیسه‌ای بر ابعاد ذرات مکش شده، نمونه‌برداری به‌طور هم‌زمان با کاهش اختلاف فشار درون این تجهیز از طریق وارد کردن هوای اضافی انجام شد. عدد بلین محصول غبارگیر کیسه‌ای اندازه‌گیری و مشاهده شد که با تغییر اختلاف فشار از منفی ۸/۴ به منفی ۶/۸ میلی‌بار، عدد بلین ذرات مکش شده از ۳۴۹۲ به ۳۸۰۰ افزایش یافت. این نتیجه نشان داد که اختلاف فشار بیشتر و منفی‌تر در غبارگیر کیسه‌ای، توانایی آن را برای مکش ذرات درشت‌تر افزایش می‌دهد.

یکی از عواملی که باعث کاهش اختلاف فشار داخل غبارگیر کیسه‌ای و کاهش کارایی و مکش آن شده بود، ورود ناخواسته هوای اضافی به سیستم بود. این جریان هوای ناخواسته از تجهیزات آماده‌به‌کار مانند بالابر سطحی ناشی می‌شد. فن مکنده غبارگیر کیسه‌ای با سرعت ثابت کار می‌کند و برای مکش غبار از نقاط محدودی طراحی شده است و اگر هوای اضافی از یکی از این نقاط وارد تجهیز شود، کارایی آن کاهش یافته و مکش ذرات را مختل می‌کند. با ورود هوای اضافی بیش از ظرفیت فن، حجم هوای مفید زیاد شده و فشار درون سیستم از فشار محیط بیشتر و اصطلاحاً



(الف)



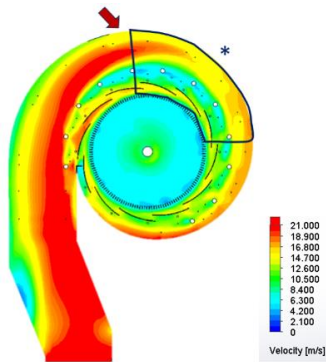
(ب)

شکل ۱۰: (الف) نمایشی از چینش اصلاح‌شده صفحات دمپر؛ (ب) نتیجه شبیه‌سازی CFD کنتورهای سرعت.

۳-۳-۳- کاهش کارایی غبارگیر کیسه‌ای و لوله غبارگیر و عدم کارکرد صحیح لوله هوای تازه

لوله غبارگیر جداکننده هوایی که بعد از فن قرار گرفته و به غبارگیر کیسه‌ای متصل است، به‌عنوان تنها خروجی هوا از این تجهیز عمل می‌کند. یک دمپر دستی در ورودی آن قرار دارد تا میزان خروج جریان هوا را تنظیم کند. غبارگیر کیسه‌ای وظیفه استخراج گردوغبار و ذرات خیلی ریز در مدار خردایش را از چندین نقطه کارخانه از جمله بالابرهای سطحی

توزیع غیریکنواخت عمدتاً به نحوه قرارگیری و زوایای صفحات راهنمای اطراف قفس مربوط می‌شود. نتایج شبیه‌سازی CFD برای طرح اصلی چینش صفحات راهنما که همگی در حالت کاملاً باز در ۱۰۰ درصد بازشدگی بودند، نشان داد که سرعت جریان هوا در بخش‌های اولیه تا ۲۵ متر بر ثانیه افزایش پیدا کرده، درحالی‌که سرعت در انتهای حلزونی به کمتر از ۱۲ متر بر ثانیه کاهش یافت. این تفاوت سرعت باعث نشست حجم زیادی از ذرات در انتهای بخش حلزونی و انسداد آن شده است (شکل ۱۱). تصویربرداری و آنالیز تصویری نیز این مورد را اثبات کرد و نشان داد که حدود ۳۰ درصد از سطح مقطع حلزونی توسط مواد نشست کرده، مسدود شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۱: الف) نتایج شبیه‌سازی CFD توزیع سرعت هوا در محفظه حلزونی با چینش اولیه زاویه صفحات راهنما؛ ب) نشست مواد در محفظه حلزونی (مکان نشان داده شده با * در شکل الف).

تنظیمات میزان بازشدگی صفحات راهنما در محفظه حلزونی برای بهبود توزیع جریان هوا در این ناحیه اصلاح شد. بدین‌صورت که بازشدگی در ابتدای حلزونی کمتر و به سمت انتهای آن بیشتر و در انتها نیز در حداکثر بازشدگی قرار گرفت. این تغییر منجر به توزیع یکنواخت سرعت جریان هوا در این محفظه شد (شکل ۱۲-الف). پس از گذشت حدود

مثبت می‌شود. از نشانه‌های مثبت شدن فشار که در کارخانه نیز مشاهده شد، بیرون‌زدن هوا و گردوغبار از نقاط غبارگیری است. جهت رفع مشکل شناسایی‌شده، دمپر خودکار روی تجهیزات آماده‌به‌کار مانند بالابر سطلی نصب شد تا در مواقع آماده‌به‌کار، مکش و ورود هوای اضافی از این نقاط اتفاق نیفتد.

از دیگر نشانه‌های عملکرد نامطلوب غبارگیر کیسه‌ای و لوله غبارگیر، وجود نقص در کارکرد لوله هوای تازه به‌عنوان تنها ورودی هوا به جداکننده هوایی است. این لوله به یک حلقه متصل است که به سمت بالا امتداد دارد و دارای ۸ شاخه است که هوا را از طریق آن‌ها به زیر قفس گردان هدایت می‌کند (شکل ۳). تأمین هوای تازه، نه تنها هوای ازدست‌رفته در سیستم را جبران می‌کند، بلکه در جلوگیری از نشست مواد ساینده در فاصله زیر قفس نیز تأثیر دارد و از سایش این قسمت جلوگیری کرده و خنک‌کاری یا تاقان‌های قفس را نیز انجام می‌دهد.

مکانیزم کارکرد لوله ورودی هوای تازه، بر اساس اختلاف فشار داخل جداکننده و فشار محیط است؛ یعنی هنگامی که فشار داخل جداکننده به دلیل مکش هوا از لوله غبارگیر از فشار محیط کمتر شود (فشار منفی شود)، هوای تازه به‌طور طبیعی از طریق این ورودی به داخل تجهیز مکش می‌شود. به‌طور ایده‌آل، لوله هوای تازه و لوله غبارگیر به‌صورت هماهنگ عمل می‌کنند، به‌گونه‌ای که هوای خارج‌شده از طریق لوله غبارگیر باید با هوای مکش شده از طریق لوله هوای تازه جبران شود. با این حال، هنگامی که سیستم غبارگیر به‌درستی عمل نمی‌کند، هوای تازه به‌درستی مکش نمی‌شود و باعث تجمع ذرات ریز ساینده و سایش شدید در زیر قفس گردان می‌شود. با بررسی‌های میدانی مشخص شد که لوله ورودی هوای تازه به دلیل پر شدن با مواد راه‌یافته به آن مسدود شده است. برای ارزیابی تأثیر این مسئله بر سایش قفس، اندازه‌گیری‌هایی در طول یک توقف برنامه‌ریزی‌شده انجام شد که سایش نامنظم در زیر قفس (از ۱۹ میلی‌متر تا ۲۷ میلی‌متر) مشاهده شد.

۳-۳-۴- توزیع غیریکنواخت جریان هوا در محفظه حلزونی

توزیع غیریکنواخت جریان هوا در محفظه حلزونی و اطراف قفس گردان نیز از دیگر عواملی است که می‌تواند در نشست و تجمع مواد در این منطقه تأثیر داشته باشد. این

میکرون بود. این مسئله به کاهش کارایی سیکلون، عدم کارکرد صحیح دریچه تخلیه و ورود هوای اضافی به سیکلون از ته‌ریز، چینش نامناسب صفحات دمپر، کاهش سرعت و توزیع غیریکنواخت جریان هوا در جداکننده، کاهش کارایی غبارگیر کیسه‌ای و لوله غبارگیر و عدم کارکرد صحیح لوله هوای تازه و توزیع غیریکنواخت جریان هوا در محفظه حلزونی مربوط می‌شود.

با انجام مجموعه‌ای از اقدامات اصلاحی در این زمینه از جمله بهبود نحوه آرایش دمپرها، بهبود کارایی سیستم غبارگیر کیسه‌ای، افزایش کارایی سیکلون و تنظیم دریچه و نحوه تخلیه ته‌ریز، تنظیم مجدد میزان بازشدگی صفحات راهنما، میزان نشست مواد در محفظه حلزونی از ۳۰ درصد سطح مقطع به ۱۰ درصد آن کاهش یافت.

علاوه بر این، نتایج شبیه‌سازی DEM برای بررسی نحوه توزیع خوراک روی خوراک‌دهنده نشان داد که در طراحی فعلی خوراک‌دهنده، توزیع به‌صورت غیریکنواخت اتفاق می‌افتد؛ بنابراین یک طراحی اصلاح‌شده پیشنهاد شد که به‌طور قابل توجهی، توزیع یکنواخت خوراک را بهبود بخشد. به‌گونه‌ای که انحراف معیار نسبی توزیع ذرات خوراک روی سینی از ۳۰ درصد به ۵ درصد بهبود و کاهش یافت.

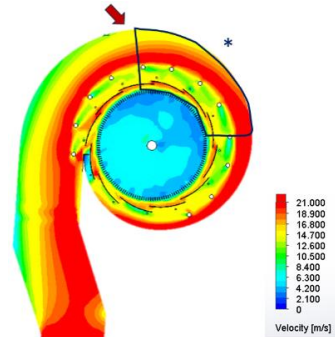
سپاسگزاری

نویسندگان از شرکت سنگ‌آهن گل‌گهر، پرسنل و کارکنان کارخانه گندله‌سازی و واحد تحقیقات و فناوری به‌دلیل حمایت و اجرای نتایج این پژوهش و همچنین اجازه انتشار مقاله تشکر می‌کنند.

مراجع

- [1] Y. Zhang, A. Kavetsky, T. Napier-Munn, D. Rapson, Effects of separator efficiency on clinker grinding circuits: a computer simulation study, ZKG International: Ausgabe B, 41 (1988) 501-505.
- [2] M. Shapiro, V. Galperin, Air classification of solid particles: a review, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 44 (2005) 279-285.
- [3] O. Altun, H. Benzer, Selection and mathematical modelling of high efficiency air classifiers, Powder Technology, 264 (2014) 1-8.
- [4] R. Guizani, H. Mhiri, P. Bournot, CFD study of the effect of rotation speed on dynamic air separator flow characteristics and pressure drop, 2014

۱۰ ماه از اعمال این تغییرات در جداکننده هوایی، مجدداً از طریق تصویربرداری و آنالیز تصویری مشخص شد که میزان نشست مواد در مقایسه با حالت قبل، از ۳۰ درصد سطح مقطع به ۱۰ درصد آن کاهش یافت (شکل ۱۲-ب).



(الف)



(ب)

شکل ۱۲: الف) نتایج شبیه‌سازی CFD توزیع سرعت هوا در محفظه حلزونی با چینش اصلاح‌شده زاویه صفحات راهنما؛ ب) نشست مواد در محفظه حلزونی (مکان نشان داده شده با * در شکل الف).

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، خصوصیت‌سنجی جامع از جداکننده هوایی دینامیکی، شامل مشاهدات تجربی، شبیه‌سازی و استراتژی‌های بهینه‌سازی، ارائه شد. بررسی پارامترهای عملیاتی نشان داد که برای حفظ کیفیت پایدار و مطلوب محصول جداکننده هوایی و جلوگیری از نوسان، استفاده از استراتژی کنترلی سرعت ثابت برای میزان چرخش قفس به‌جای استفاده از سرعت متغیر الزامی است؛ زیرا باعث افزایش پایداری در مشخصات محصول نهایی و کاهش نوسان در عدد بلین از 1154 ± 240 به 1195 ± 72 سانتی‌متر مربع بر گرم شد. به‌عبارت‌دیگر، انحراف معیار نسبی آن از ۱۱ درصد به ۳ درصد کاهش یافت.

مشاهدات میدانی، نشست بیش‌ازحد مواد در محفظه حلزونی را نشان داد که میانگین اندازه این ذرات حدود ۷

- [13] C. Eswaraiah, S.I. Angadi, B.K. Mishra, Mechanism of particle separation and analysis of fish-hook phenomenon in a circulating air classifier, *Powder Technology*, 218 (2012) 57-63.
- [14] M. Esmaeilpour, A. Mohebbi, V. Ghalandari, CFD simulation and optimization of an industrial cement gas-solid air classifier, *Particuology*, 89 (2024) 172-184.
- [15] P. Cleary, Discrete element modelling of industrial granular flow applications, *TASK. Quarterly - Scientific Bulletin*, 2 (1998).
- [16] H.P. Zhu, A.B. Yu, A theoretical analysis of the force models in discrete element method, *Powder Technology*, 161 (2006) 122-129.
- [17] A. EDEM, *EDEM 2022 User's Guide*, 2022.
- [18] A.R. Ghasemi, A.R. Hasankhoei, G.A. Parsapour, E. Razi, S. Banisi, A combined physical and DEM modelling approach to improve performance of rotary dryers by modifying flights design, *Drying Technology*, 39 (2021) 548-565.
- [19] A.R. Hasankhoei, M. Maleki-Moghaddam, A. Haji-Zadeh, M.E. Barzgar, S. Banisi, On dry SAG mills end liners: Physical modeling, DEM-based characterization and industrial outcomes of a new design, *Minerals Engineering*, 141 (2019) 105835.
- [20] S.B. Pope, Turbulent flows, *Measurement Science and Technology*, 12 (2001) 2020-2021.
- 5th International Renewable Energy Congress (IREC), 2014, pp. 1-6.
- [5] C. Herrmann, Increased Cement Grinding Efficiency by Using High-Efficiency Separators, *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-22 (1986) 330-337.
- [6] L. Guo, J. Liu, S. Liu, J. Wang, Velocity measurements and flow field characteristic analyses in a turbo air classifier, *Powder Technology*, 178 (2007) 10-16.
- [7] Y. Feng, J. Liu, S. Liu, Effects of operating parameters on flow field in a turbo air classifier, *Minerals Engineering*, 21 (2008) 598-604.
- [8] B. Beke, *The Process of Fine Grinding*, M. Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers 1981.
- [9] K. Nageswararao, A critical analysis of the fish hook effect in hydrocyclone classifiers, *Chemical Engineering Journal*, 80 (2000) 251-256.
- [10] B.C. Flintoff, L.R. Plitt, A.A. Turak, *Cyclone modelling: A review of present technology*, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 1987.
- [11] A.K. Majumder, P. Yerriswamy, J.P. Barnwal, The "fish-hook" phenomenon in centrifugal separation of fine particles, *Minerals Engineering*, 16 (2003) 1005-1007.
- [12] Q.L.J.Y.Y. Huang, Turbo air classifier guide vane improvement and inner flow field numerical simulation, *Powder Technology*, 226 (2012) 10-15.



مقاله پژوهشی

تحلیل پایداری تقاطع تونل های شیب دار و دسترسی در معدن زغال سنگ طبس با استفاده از روش عددی تفاضل محدود

علیرضا تراکمه^۱، ستار مهدوری^{۱*}، کورش شهریار^۱

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

(دریافت: ۳۰ مهر ۱۴۰۳، بازنگری: ۰۶ خرداد ۱۴۰۴، پذیرش: ۰۷ خرداد ۱۴۰۴)

چکیده

به علت پیچیدگی طرح شبکه تونل ها در معادن زیرزمینی معمولاً در این معادن تقاطع های مختلفی وجود دارد که پایداری آن ها اهمیت زیادی دارد. در این تحقیق، پایداری یکی از تقاطع های دوشاخه معدن زغال سنگ پروده طبس که در اثر تقاطع تونل شیب دار شماره دو و تونل دسترسی به گالری شماره پنج ایجاد می شود، مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور توزیع تنش های القایی، شدت تمرکز تنش و گستردگی ناحیه پلاستیک با استفاده از روش عددی تفاضل محدود در محیط نرم افزار FLAC3D بررسی شده است. بر اساس نتایج حاصل، در محدوده بین تونل شیب دار و تونل دسترسی، بیشینه تنش القایی قائم معادل ۲۵/۵ مگاپاسکال در سمت چپ تقاطع دوشاخه رخ داده است. همچنین بر اساس کانتورهای تمرکز تنش در محدوده بین تونل شیب دار و تونل دسترسی، تمرکز تنش در سمت چپ تقاطع دوشاخه در نزدیکی تونل شیب دار تا ۱/۶۵ و در نزدیکی تونل دسترسی تا ۱/۷۱ افزایش می یابد. در سقف تونل دسترسی با دور شدن از محل تقاطع، سطح تنش ها روند افزایشی دارد که ناشی از سطح مقطع غیرمردور و عریض آن است. بر اساس منحنی تنش های برشی نیز شدت تمرکز تنش برشی در پایه سنگی سمت چپ بیشتر است. بیشینه مقدار تنش برشی در گوشه سمت چپ و راست تقاطع دوشاخه به ترتیب معادل ۷/۱۱ و ۷/۹۸ مگاپاسکال است. به علت وجود لایه هایی با مقاومت متفاوت، گسترش ناحیه پلاستیک در فواصل مختلف از تقاطع تقریباً نامتقارن است و وجود لایه زغال سنگ در کف، منجر به تشدید گستردگی ناحیه پلاستیک و به تبع آن ناپایداری کف و بالازدگی آن می شود.

کلمات کلیدی

تقاطع دوشاخه، تحلیل پایداری، تنش های القایی، ناحیه پلاستیک، روش تفاضل محدود، معدن زغال سنگ پروده طبس

*عهده دار مکاتبات: satar.mahdevari@aut.ac.ir

DOI: 10.22034/ANM.2025.22282.1646

۱- مقدمه

با پیشرفت روزافزون جامعه، نیاز به احداث سازه‌های زیرزمینی به‌ویژه در حین آماده‌سازی شبکه معادن زیرزمینی به‌طور گسترده‌ای افزایش یافته است. بر اساس نوع کاربرد سازه عمرانی و یا طرح معدن، برخی از تونل‌ها به‌ناچار به‌صورت متقاطع حفاری می‌شوند. یکی از انواع تونل‌های متقاطع، تونل دوشاخه^۱ است که با توجه به شرایط پیچیده هندسی و تنش‌های القایی، تحلیل پایداری آن اهمیت ویژه‌ای دارد [۱]. عرض دهانه تونل‌های دوشاخه در محل تقاطع نسبت به مقطع تونل معمولاً بیشتر است که باعث افزایش جابه‌جایی‌ها و کاهش پایداری سازه در محل تقاطع می‌شود؛ بنابراین هرگونه ناپایداری در محل تقاطع تونل‌ها، پایداری کل سازه را تحت تأثیر قرار داده و از لحاظ مهندسی بسیار حائز اهمیت است [۲].

تاکنون پژوهش‌های مختلفی درباره تحلیل پایداری و برآورد تغییرشکل‌ها در توده‌سنگ یا خاک پیرامون تونل‌های دوشاخه انجام شده است که روش‌های عددی از بین انواع روش‌های معرفی شده پرکاربردتر و متداول‌تر هستند [۳]. سنگ و همکاران با استفاده از روش عددی المان محدود و در نظر گرفتن پارامترهایی همچون نسبت تنش‌های افقی به قائم، میزان جابه‌جایی‌ها و تنش‌های القایی، یک الگو برای طراحی سیستم نگهداری در تقاطع‌های سه‌راه^۲ در معادن زغال‌سنگ ارائه کردند [۴]. سیائو و همکاران برای مطالعه رفتار مکانیکی توده‌سنگ پیرامون محل تقاطع تونل‌های دوشاخه، از روش عددی تفاضل محدود برای در نظر گرفتن شرایط مختلف تونل‌سازی از جمله شرایط زمین‌شناسی و ژئومکانیکی زمین، امتیاز توده‌سنگ، عمق و زوایای مختلف محور تقاطع استفاده کردند و بر اساس تغییر زاویه تقاطع و پایداری توده‌سنگ، الگویی برای نصب سیستم نگهداری اضافی در محدوده ناپایدار محل تقاطع ارائه کردند [۵]. لیو و ونگ یک تونل انتقال آب را با رویکرد ریز-مدل^۳ و روش المان محدود الاستو-ویسکوپلاستیک مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج مدل با واقعیت نشان می‌دهد که این روش می‌تواند برای تخمین تغییرشکل‌ها و توزیع تنش پیرامون تونل‌های دوشاخه نتایج دقیق‌تری ارائه کند [۶]. گوا و همکاران با بررسی چندین تونل متقاطع در معادن عمیق زغال‌سنگ چین، تغییرشکل توده‌سنگ در محل تقاطع

دوشاخه با دهانه عریض را بررسی کردند. آن‌ها با توجه به ویژگی‌های مختلف تغییرشکل و فرآیندهای شکست در تقاطع‌های با دهانه عریض، مکانیزم‌ها و فرآیند شکست در محل تقاطع را با روش تفاضل محدود مدل‌سازی کرده و بر اهمیت پایه سنگی میانی به‌عنوان ناحیه حیاتی برای حفظ پایداری کل سازه تأکید کردند. آن‌ها تقویت این ستون میانی و حفظ یکپارچگی آن را مهم‌ترین عامل برای پایداری تقاطع‌های دوشاخه در معادن زیرزمینی دانسته و سیستم نگهداری بولت دوجهته یا دو سر درگیر^۴ را برای تقویت پایداری ستون میانی معرفی کردند [۷]. لی و همکاران به‌منظور درک رفتار مکانیکی توده‌سنگ و کنترل جابه‌جایی‌ها پس از حفاری تقاطع‌های دوشاخه در معادن زغال‌سنگ، از روش عددی تفاضل محدود استفاده کردند و زاویه برخورد انشعاب‌ها در محل تقاطع دوشاخه و زاویه بین تنش افقی و محور تونل را به‌عنوان عوامل اصلی مؤثر در پایداری تقاطع‌های دوشاخه معرفی کردند [۸]. لین و همکاران پایداری تقاطع دوشاخه در یک تونل انتقال آب واقع در یک ایستگاه برق-آبی را بررسی کردند. به‌این‌ترتیب که ابتدا عوامل اصلی پایداری شامل تغییرشکل‌های بسیار زیاد، تمرکز تنش و رهایی تنش^۵ را مطالعه کردند؛ سپس یک روش تحلیل پایداری غیرخطی برای طراحی سیستم‌های نگهداری تونل‌های دوشاخه با مقطع بزرگ و هندسه‌های پیچیده ارائه دادند. این روش مبتنی بر نتایج روش عددی تفاضل محدود حاصل از حل تنش‌های نرمال در آستر بتنی است [۹]. قارونی نیک و فرمهبینی فراهانی پایداری یک تقاطع Y-شکل در نیروگاه آبی سد رودبار را با استفاده از روش عددی تفاضل محدود بررسی کردند و بر اساس نتایج آن، محدوده نیازمند نصب نگهداری اضافی در محل تقاطع و تأثیر زاویه برخورد انشعاب‌ها در پایداری تقاطع را تعیین کردند [۱۰]. گلشنی و همکاران به‌منظور بررسی پایداری انشعاب تونل بزرگراه حکیم تهران، از روش عددی المان محدود استفاده کردند. بر اساس نتایج حاصل، ایجاد انشعاب در این تونل باعث افزایش نیروی محوری و ممان خمشی وارد بر سیستم نگهداری تونل اصلی و همچنین افزایش ۲۹ درصدی نشست سطح زمین می‌شود [۱۱]. لیو و همکاران با مدل‌سازی عددی رفتار توده‌سنگ اطراف تقاطع T-شکل، نشان دادند که حفاری تونل دسترسی تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر گسترش ناحیه پلاستیک تونل اصلی دارد؛ به‌طوری‌که با

پنج^۴ (تونل دسترسی MG5) ایجاد شده است، به‌عنوان مطالعه موردی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از انجام این پژوهش تحلیل پایداری سازه در محل تقاطع دوشاخه از طریق مطالعه میدان تنش‌های القایی، شدت تمرکز تنش و گسترده‌گی ناحیه پلاستیک پیرامون محل تقاطع است.

۲- معدن زغال‌سنگ پروده طیس

معدن زغال‌سنگ پروده طیس به‌عنوان اولین معدن مکانیزه ایران، در سال ۱۳۸۶ راه‌اندازی شده است و ظرفیت تولید سالانه آن حدود ۲/۵ میلیون تن زغال‌سنگ خام است. این معدن در فاصله ۸۵ کیلومتری شهر طیس در استان خراسان جنوبی واقع شده است. ساختمان زمین‌شناسی ناحیه پروده از چند گسل بزرگ با راستای شرقی-غربی تشکیل شده است که به‌وسیله گسل‌های کوچک‌تر به مناطق مجزا تفکیک می‌شود [۱۹]. منطقه زغال‌خیز پروده از سمت غرب به گسل کلمرد و از سمت شرق به گسل نایبند محدود شده است که در راستای شمالی-جنوبی گسترش یافته‌اند. سنگ‌های منطقه اغلب از توالی لایه‌های لای سنگ (سیلت‌استون) و ماسه‌سنگ تشکیل شده است. همچنین لایه‌های سنگ‌آهک نیز به‌صورت مقطعی قابل مشاهده است. لایه‌های اصلی زغال‌سنگ در ناحیه پروده طیس شامل لایه‌های B1، B2، C1، C2 و D است که لایه C1 از لحاظ ضخامت و پایداری مهم‌ترین لایه زغال‌سنگ این منطقه به شمار می‌رود [۲۰]. در شکل ۱ ستون زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است. سطح مقطع تونل در محدوده تقاطع دوشاخه به‌طور عمده از ماسه‌سنگ، لای سنگ و لای سنگ-ماسه‌ای تشکیل شده است و لایه زغال‌سنگ C2 نیز در سقف مشاهده شده است. خواص فیزیکی و مکانیکی لایه‌های سنگی در محدوده مورد مطالعه در جدول ۱ خلاصه شده است.

همان‌طور که در شکل ۱ مشخص شده است، تقاطع دوشاخه H16 یک تقاطع با سطح مقطع عریض و هندسه نامتقارن است که در عمق ۵۷۰ متری تونل شیب‌دار S2 را به تونل دسترسی MG5 تحت زاویه ۷۸ درجه متصل می‌کند. با توجه به طرح معدن و نیز عملیات استخراج معدن، سازه‌های مختلفی در اطراف تقاطع دوشاخه H16 وجود دارد که با حفاری هر تونل، تنش برجای منطقه دچار اغتشاش شده و موجب همپوشانی تنش‌های القایی می‌شود. همچنین عمق زیاد این تقاطع دوشاخه باعث ایجاد تنش‌های برجای

حفاری تونل دسترسی ناحیه پلاستیک اطراف تونل اصلی تا ۱/۵ برابر قطر تونل دسترسی توسعه می‌یابد [۱۲]. ژو و همکاران باهدف بررسی تأثیر پارامترهای توده‌سنگ و سیستم نگهداری پیچ‌سنگ در میزان جابه‌جایی‌ها و ناحیه اغتشاش توده‌سنگ، از روش عددی المان محدود برای تحلیل پایداری تقاطع‌های دوشاخه استفاده کردند [۱۳]. مدل‌سازی تأثیر حفاری تونل انشعاب بر روی پایداری تونل اصلی نشان می‌دهد که پس از حفاری تونل انشعاب، سیستم نگهداری بتنی در تاج تونل اصلی در اثر نیروهای کششی نسبتاً شدید دچار ترک خوردگی شده است؛ درحالی‌که در محدوده دیواره تونل اصلی در نزدیکی تقاطع، تحت تأثیر نیروهای فشاری قرار می‌گیرد [۱۴]. ژو و همکاران پایداری یک تقاطع دوشاخه در معدن زغال‌سنگ را با استفاده از مشاهدات میدانی، درون گمانه‌ای، آزمایش‌های تنش برجا و مدل‌سازی تفاضل محدود بررسی کردند و سپس سیستم نگهداری متشکل از کابل‌های انکر تزریقی توخالی همراه با کابل‌های انکر با کشیدگی زیاد را به‌عنوان سیستم نگهداری اصلی معرفی نمودند [۱۵]. ژو و همکاران به‌منظور جلوگیری از ناپایداری و وقوع تغییرشکل‌های زیاد در محل تقاطع‌های دوشاخه معادن زغال‌سنگ، از مشاهدات میدانی و روش‌های تحلیلی و عددی استفاده کردند. بر اساس نتایج مدل‌سازی عددی برای کنترل پایداری ستون سنگی میانی در محل تقاطع، از سیستم نگهداری انکر مقاومت ثابت با کنترل دوگانه که در آن کابل‌هایی با پیش‌تنیدگی زیاد و مقاومت ثابت به‌عنوان سیستم نگهداری اصلی به کار می‌رود، استفاده کردند [۱۶]. سان و همکاران برای رفع مشکل همگرایی شدید در محدوده تقاطع‌های دوشاخه در یک معدن زغال‌سنگ عمیق، پس از تحلیل عددی تفاضل محدود و انتخاب زاویه تقاطع و ترتیب حفاری بهینه، برای اولین بار کابل انکر با نسبت پواسون منفی^۶ را به‌عنوان سیستم نگهداری اصلی معرفی کردند [۱۷]. جیانگ و همکاران با استفاده از روش عددی المان محدود ویژگی‌های پاسخ لرزه‌ای و مکانیزم شکست تونل‌های دوشاخه را در محیط شهری بررسی کردند که نتایج حاصل حاکی از آسیب‌پذیری شدید دیواره میانی تقاطع‌های دوشاخه با افزایش شدت زمین‌لرزه است [۱۸].

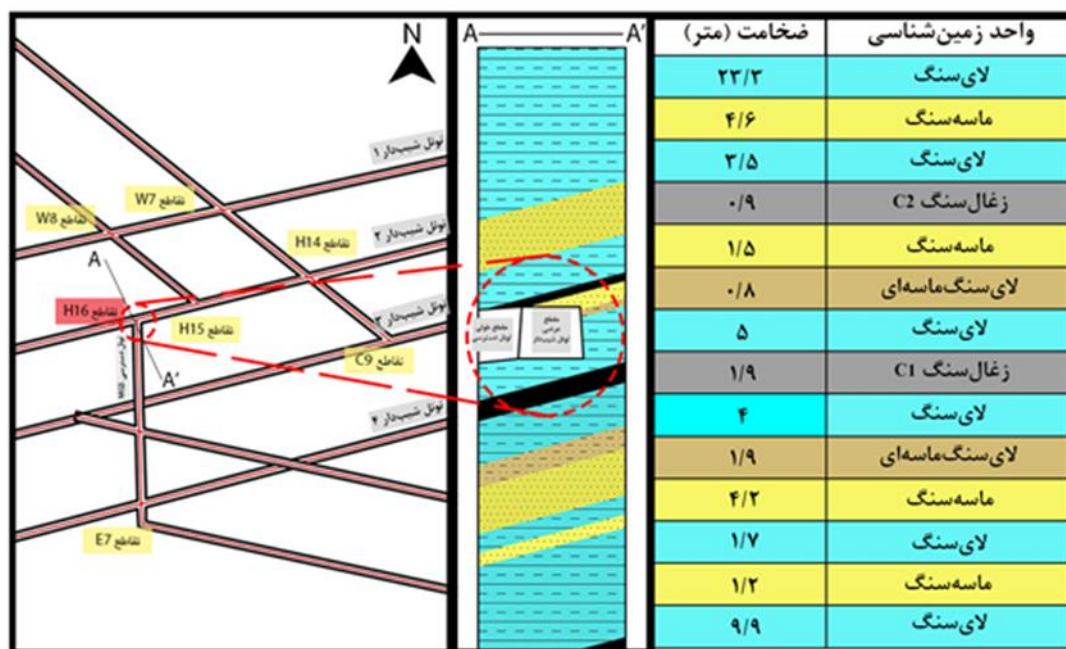
در این تحقیق، پایداری یکی از تقاطع‌های دوشاخه معدن زغال‌سنگ پروده طیس که در اثر تقاطع تونل شیب‌دار شماره دو^۷ (تونل شیب‌دار S2) و تونل دسترسی به گالری شماره

مقطع دوزنقه‌ای-شکل تعریض می‌شود که عرض آن به ۶٫۹ متر افزایش می‌یابد. پس از پایان عملیات حفاری تونل شیب‌دار در محل تقاطع، ادامه حفاری تونل شیب‌دار و تونل دسترسی به صورت هم‌زمان شروع می‌شود.

در محل تقاطع، هندسه تونل دسترسی از یک مقطع دوزنقه‌ای با اضلاع نامنظم تشکیل شده است که با افزایش فاصله از محل تقاطع، به صورت پیوسته سطح مقطع این تونل کاهش می‌یابد؛ به طوری که در ابتدا به یک مقطع دوزنقه‌ای با اضلاع منظم و پس از کاهش عرض تونل به مقدار ۵٫۶ متر به مقطع D-شکل تبدیل می‌شود. مراحل و ترتیب حفاری قبل، حین و بعد از تقاطع در شکل ۳ نشان داده شده است.

نسبتاً زیاد شده است که مقدار تنش قائم تا ۱۵ مگاپاسکال می‌رسد. همچنین نسبت تنش‌های افقی به قائم برابر ۱٫۱۵ و سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از تراز محدوده مورد مطالعه است. از طرف دیگر زاویه شیب تونل شیب‌دار S2 نسبت به خط افق حدود ۱۵ درجه و زاویه شیب تونل دسترسی MG5 نسبت به خط افق حدود ۶ درجه است.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، هندسه تونل شیب‌دار S2 از یک مقطع D-شکل تشکیل شده است که عرض و ارتفاع آن به ترتیب ۵٫۶ و ۳٫۹۵ متر است. در محل تقاطع دوشاخه، مقطع تونل شیب‌دار به تدریج با افزایش عرض تونل از سمت دو دیواره چپ و راست، به یک سطح



شکل ۱: موقعیت سه‌بعدی تقاطع دوشاخه H16 و ستون زمین‌شناسی آن.

جدول ۱: خواص فیزیکی و مکانیکی لایه‌های سنگی در محدوده مورد مطالعه [۲۱]

نسبت پواسون	زاویه اصطکاک داخلی (deg)	چسبندگی (MPa)	مدول تغییر شکل پذیری (GPa)	چگالی (kg/m^3)	واحد سنگی
۰٫۲۵	۱۸٫۲۳	۰٫۷۲	۱٫۲۶۸	۲۴۰۰	لای سنگ
۰٫۲۵	۲۷٫۰۵	۰٫۲۱	۲٫۱۶۷	۲۶۰۰	لای سنگ-ماسه‌ای
۰٫۲۵	۲۷٫۰۳	۱٫۲۲	۲٫۱۶۴	۲۷۰۰	ماسه سنگ
۰٫۳۲	۱۱٫۸۳	۰٫۴۲	۰٫۶۲۱	۱۶۰۰	زغال سنگ

۳- تحلیل پایداری محل تقاطع دوشاخه

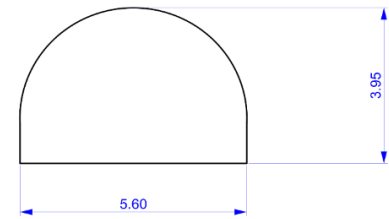
۳-۱- فرآیند مدل‌سازی

در این تحقیق از مدل‌سازی عددی به روش تفاضل محدود در محیط نرم‌افزار FLAC3D استفاده شده است. برای اینکه شرایط مدل‌سازی به شرایط واقعی زمین نزدیک باشد، ابعاد مدل انتخابی به نحوی تعیین شده است که شرایط مرزی اعمال‌شده در رفتار کلی مدل کمترین تأثیر را داشته باشد؛ بنابراین ابعاد مدل در جهت‌های X، Y و Z به ترتیب ۱۰۰، ۷۰ و ۱۰۰ متر تعیین شده است (شکل ۴).

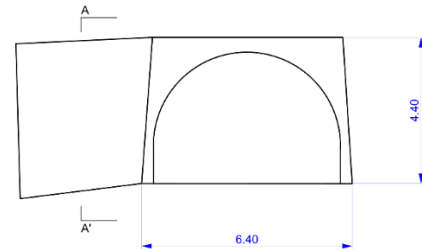
با توجه به اینکه بیشینه عرض تونل در محل تقاطع ۶٫۹ متر است، طبق اصل سنت و نانت ابعاد مدل در جهت محور Y، پنج برابر عرض تونل در هر دو سمت و در مجموع برابر ۷۰ متر در نظر گرفته شده است. ابعاد مدل در جهت محور X و هم‌سو با جهت پیشروی تونل برابر ۱۰۰ متر است؛ به‌طوری‌که محل تقاطع در مرکز این محور قرار گرفته است. در نهایت ابعاد مدل در جهت محور Z برابر با ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است که به‌منظور لحاظ اندرکنش کف و سقف بلافاصله، به ترتیب ۳۰ متر از کف مدل و ۷۰ متر از سقف مدل لحاظ شده است. همچنین تأثیر آب‌های زیرزمینی در تحلیل عددی اعمال نشده و فقط تنش‌های برجا به‌عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته شده است. در این مدل وزن روباره به‌صورت تنش قائم به مرز بالایی مدل اعمال‌شده و مرزهای جانبی مدل نسبت به جابه‌جایی افقی و همچنین مرز کف مدل نسبت به جابه‌جایی افقی و قائم ثابت شده است. همچنین نسبت تنش افقی به قائم معادل ۱/۱۵ و مدل رفتاری موهر-کولمب برای شبیه‌سازی وضعیت توده‌سنگ پیرامون سازه در نظر گرفته شده است.

۳-۲- سیستم نگهداری

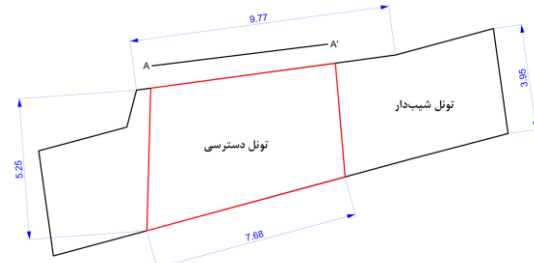
سیستم نگهداری تونل شیب‌دار متشکل از پیچ‌سنگ با قطر ۲۲ میلی‌متر و طول ۲٫۴ متر در یک آرایش منظم و با فاصله‌داری یک متر است که به‌صورت تمام‌طول با رزین تزریق شده و همراه با وایر مش نصب می‌شود. همچنین از قاب‌های فولادی کشویی TH36 با فاصله‌داری ۸۰۰ میلی‌متر برای تأمین پایداری تونل شیب‌دار S2 استفاده می‌شود؛ به‌صورتی‌که حدفاصل بین قاب فولادی و دیواره تونل با مواد پرکننده پوشانده می‌شود. با نزدیک شدن تونل شیب‌دار به محل تقاطع، به علت افزایش عرض دهانه و سطح مقطع تونل،



الف) مقطع عرضی D-شکل تونل شیب‌دار



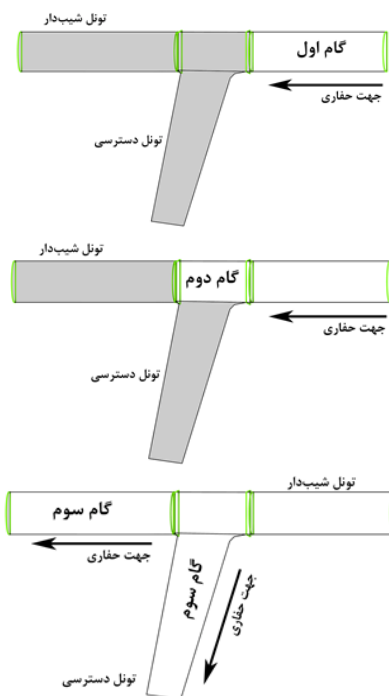
ب) مقطع عرضی دوزنقه‌ای محل تقاطع



ج) مقطع طولی تونل شیب‌دار

شکل ۲: مقاطع عرضی و طولی تونل‌ها در محل تقاطع دوشاخه

H16



شکل ۳: ترتیب و مراحل حفاری تونل‌ها در محل تقاطع دوشاخه H16 (دید از بالا).

شده است و المان ساختاری Cable برای مدل‌سازی کابل و فلکسی‌بولت‌ها استفاده شده است. در نهایت برای مدل‌سازی قاب‌های فولادی از المان Beam استفاده شده است.

جدول ۲: مشخصات سیستم نگهداری پیشنهادی [۲۱]

پارامتر	واحد	کابل‌انکر	فلکسی‌بولت	پیچ‌سنگ
قطر	(mm)	۴۲	۲۱٫۷	۲۲
طول	(m)	۹	۶	۲٫۴
مقاومت کششی	(kN)	۵۹۰	۴۹۰	۳۱۰
مقاومت فشاری	(kN)	-	-	۲۵۰
پیش‌تنیدگی	(kN)	۲۵۰	-	-
کرنش مجاز	(%)	-	-	۱۸
طول ناحیه انکراژ	(m)	۵	۴	۲٫۴
مواد تزریق		دوغاب	رزین	رزین

۳-۳- اعتبارسنجی مدل عددی

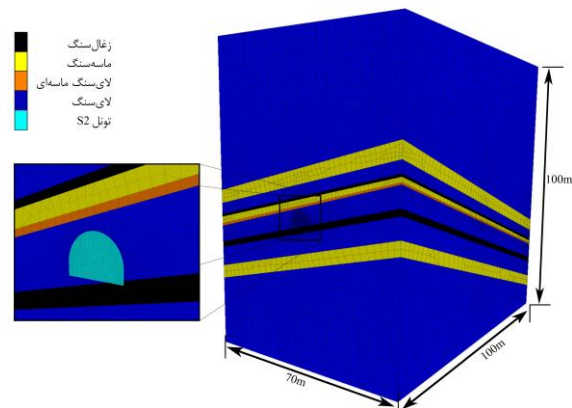
اعتبارسنجی مدل عددی برای ارزیابی دقت شبیه‌سازی مسائل ژئوتکنیکی امری ضروری است که می‌تواند به بهبود دقت نتایج شبیه‌سازی عددی و قابلیت اطمینان آن کمک کند. در این تحقیق، به منظور اعتبارسنجی مدل عددی، نتایج جابه‌جایی‌ها در یکی از مقاطع عرضی در فاصله ۲۲ متری قبل از محل تقاطع در مدل عددی با نتایج میدانی حاصل از پایش جابه‌جایی‌ها در همین مقطع مقایسه شده است.

همان‌طور که در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود، جابه‌جایی افقی نهایی مدل عددی در این مقطع و در موقعیت یک متری از کف تونل، معادل ۸۰۱ میلی‌متر است که با نتایج داده‌های میدانی حاصل از پایش رفتار توده‌سنگ پیرامون تونل در همین مقطع که بیشینه آن معادل ۸۸۴ میلی‌متر است (شکل ۶-ب)، تطابق نسبتاً خوبی دارد و مقدار خطای حدود ۹٫۳۸ درصد را نشان می‌دهد.

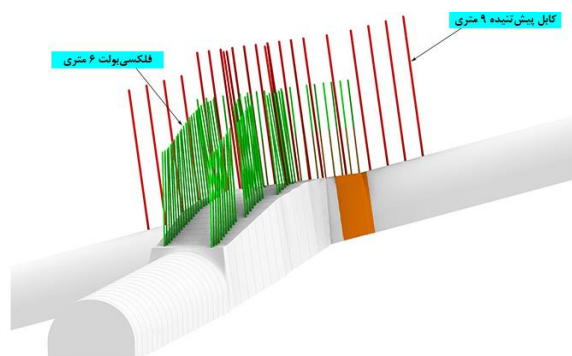
۳-۴- تحلیل تنش‌های القایی قائم

ابرنگاره^۹ توزیع تنش‌های قائم در دیواره سمت راست تونل شیب‌دار در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توزیع تنش قائم با فاصله از دیواره سمت راست تونل شیب‌دار ابتدا افزایش یافته و در فاصله حدود ۱۴ متری از مرکز تقاطع شروع به کاهش می‌کند و سپس ثابت می‌شود. بیشینه تنش قائم در ناحیه تمرکز تنش به ۲۱٫۵ مگاپاسکال می‌رسد. با مقایسه منحنی‌های تراز در پیرامون

از سیستم نگهداری تقویت‌شده استفاده می‌شود؛ به طوری که در تونل شیب‌دار تا شعاع ۹ متری از مرکز تقاطع، پیچ‌سنگ‌هایی با طول ۲٫۷ متر و با آرایش متراکم‌تر نصب می‌شود. در محل تقاطع، انکرهای پیش‌تنیده ۹ متری، فلکسی‌بولت‌های ۶ متری و پیچ‌سنگ‌هایی با فاصله‌داری ۸۰۰ میلی‌متر به‌عنوان سیستم نگهداری استفاده شده است (شکل ۵).



شکل ۴: هندسه مدل عددی در نرم‌افزار FLAC3D.



شکل ۵: سیستم نگهداری پیشنهادی کابل‌انکر و فلکسی‌بولت در محل تقاطع دوشاخه.

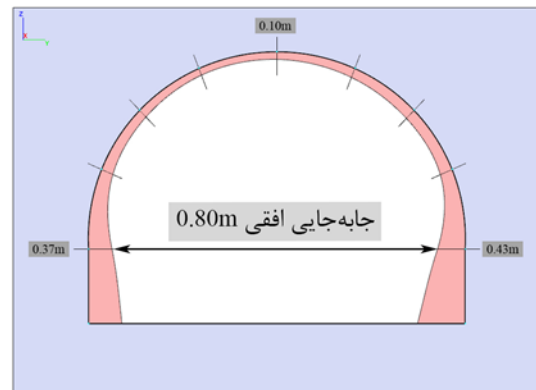
به علت افزایش سطح مقطع در محل تقاطع دوشاخه، از تیرهای IPB260 و IPB320 به جای قاب‌های فولادی کشویی استفاده شده است. آرایش پیچ‌سنگ‌های تزریقی در سقف و دیواره تونل دسترسی، دارای آرایش مربعی با فواصل ۸۰۰ میلی‌متر است. همچنین در این تونل از فلکسی‌بولت ۶ متری در سقف و قاب‌های فولادی IPB260 نیز به‌عنوان سیستم نگهداری استفاده شده است. خواص مکانیکی سیستم‌های نگهداری در جدول ۲ خلاصه شده است.

همه سیستم‌های نگهداری با استفاده از المان‌های ساختاری گوناگون در نرم‌افزار تعریف شده است. به این ترتیب که پیچ‌سنگ‌ها با استفاده از المان ساختاری Pile ساخته

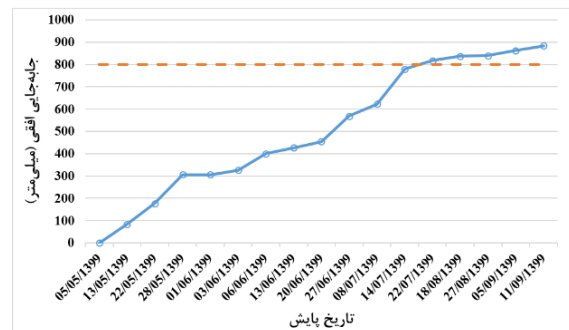
۱۴/۹ مگاپاسکال است، با نصب سیستم نگهداری حتی تا فاصله ۲۳ متر دورتر از مرکز تقاطع، تنش القایی قائم به مقدار اولیه نمی‌رسد. همچنین کانتورهای توزیع تنش‌های القایی قائم در محدوده بین تونل شیب‌دار و تونل دسترسی در شکل ۹ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سمت چپ تقاطع دوشاخه در فاصله ۱۲ متری از گوشه تیز پایه میانی، مقدار تنش القایی قائم به بیشینه مقدار ۲۵/۵ مگاپاسکال می‌رسد. در حالی که در سمت راست تقاطع دوشاخه بیشینه تنش قائم به مراتب کمتر از تنش وارد بر پایه سنگی سمت چپ بوده ولی همچنان بیشتر از مقدار آن در دیواره سمت راست تونل شیب‌دار است؛ به گونه‌ای که بیشینه مقدار این تنش قائم ۲۱/۷ مگاپاسکال بوده و در فاصله ۱۸/۵ متری از گوشه تقاطع به سمت تونل شیب‌دار ظاهر شده است. در شکل ۱۰ نیز کانتورهای تمرکز تنش‌های القایی قائم در محدوده بین تونل شیب‌دار و تونل دسترسی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سمت چپ تقاطع دوشاخه ناحیه تمرکز تنش تا فاصله ۴۷ متری از گوشه تیز پایه سنگی همچنان ادامه دارد و تمرکز تنش در نزدیکی تونل شیب‌دار تا ۱/۶۵ و در نزدیکی تونل دسترسی تا ۱/۷۱ افزایش می‌یابد. همچنین در سمت راست تقاطع دوشاخه تمرکز تنش در نزدیکی تونل شیب‌دار تا ۱/۴۷ و در نزدیکی تونل دسترسی تا ۱/۷۲ افزایش می‌یابد؛ بنابراین با افزایش فاصله از محل تقاطع دوشاخه، تمرکز تنش بیشتری در تونل دسترسی رخ خواهد داد.

مقطع تونل مشخص می‌شود که تمرکز تنش در محل تقاطع با نصب سیستم نگهداری به‌طور مناسب کنترل می‌شود.



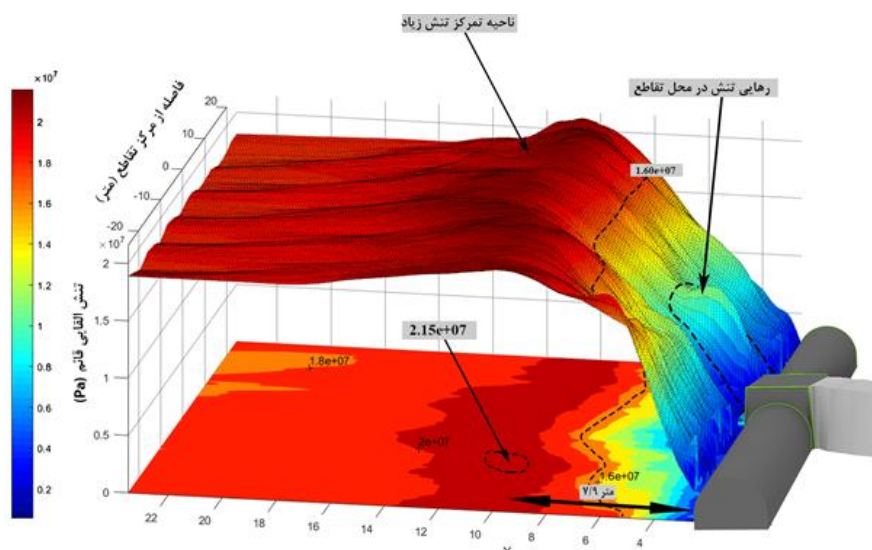
الف) جابه‌جایی افقی نهایی در مدل عددی



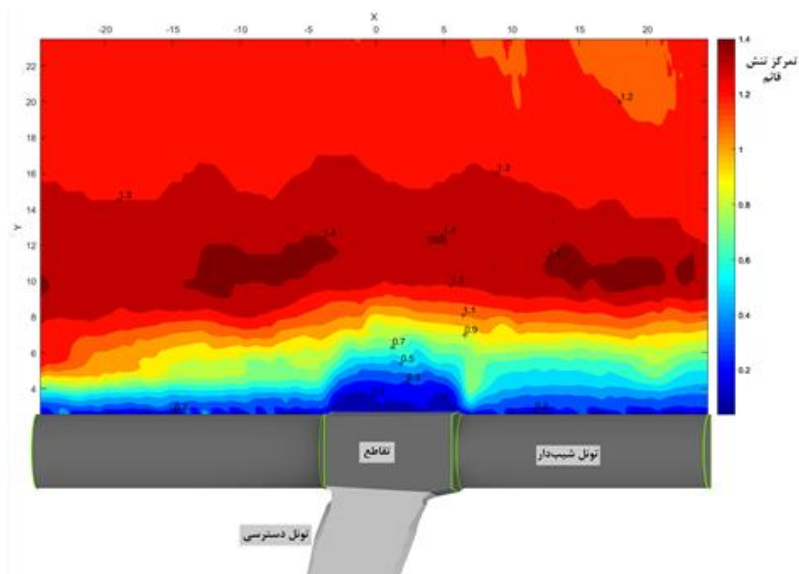
ب) جابه‌جایی افقی پایش شده در تونل نسبت به زمان

شکل ۶: جابه‌جایی افقی در مقطع عرضی مدل عددی نسبت به داده‌های رفتارنگاری تونل.

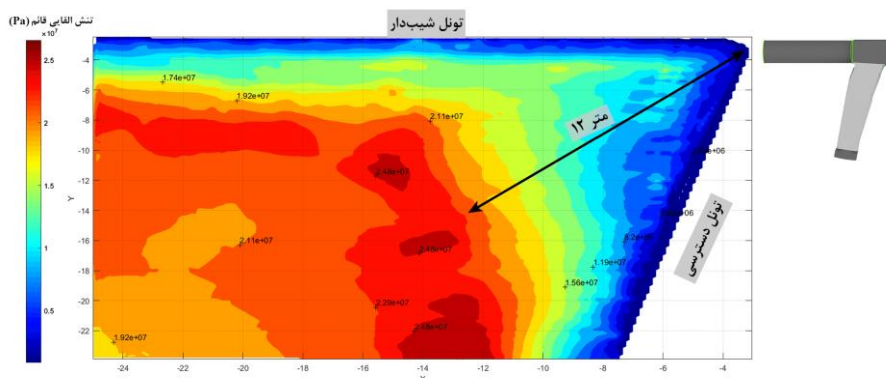
از طرف دیگر همان‌طور که در شکل ۸ مشخص شده است، بیشینه فاکتور تمرکز تنش قائم به مقدار ۱/۴ در فاصله حدود ۱۱ متر دورتر از مرکز تقاطع می‌رسد. همچنین با توجه به اینکه تنش قائم اولیه پیش از شروع حفاری تونل شیب‌دار



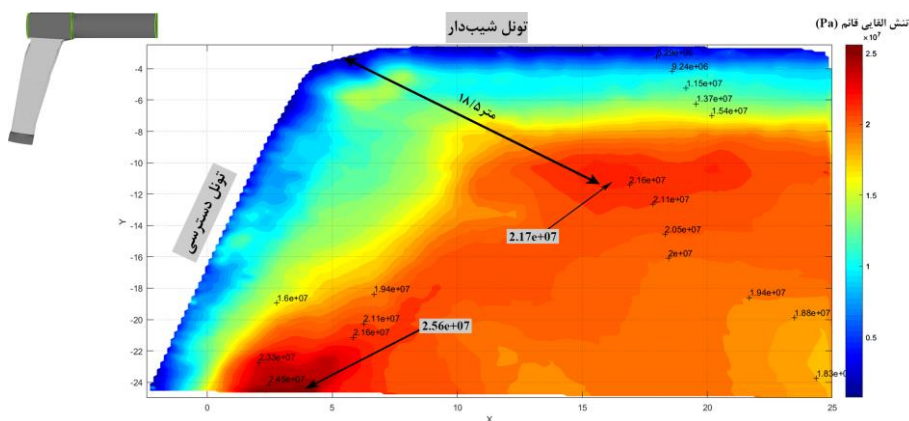
شکل ۷: ابرنگاره تنش‌های قائم در دیواره سمت راست تونل شیب‌دار.



شکل ۸: فاکتور تمرکز تنش القایی قائم در دیواره سمت راست تونل شیب‌دار (دید از بالا).

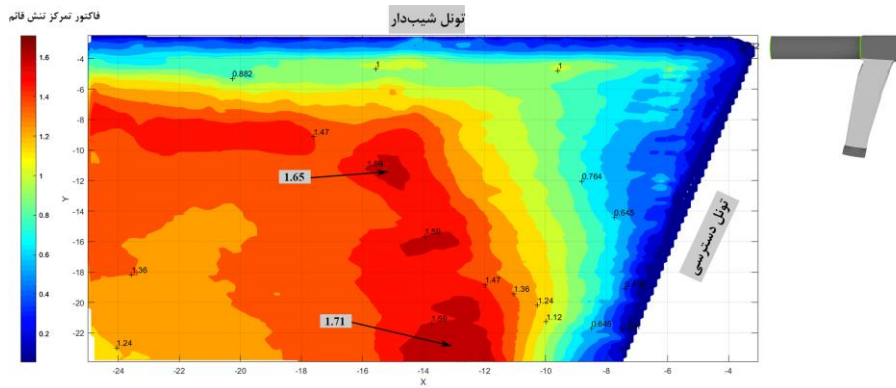


الف) سمت چپ تقاطع دوشاخه

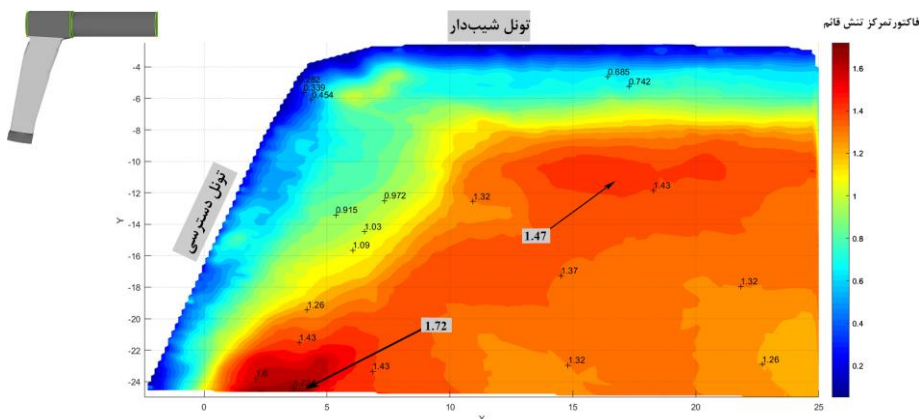


ب) سمت راست تقاطع دوشاخه

شکل ۹: کانتورهای توزیع تنش‌های القایی قائم در محدوده بین تونل شیب‌دار و تونل دسترسی (دید از بالا).



الف) سمت چپ تقاطع دوشاخه



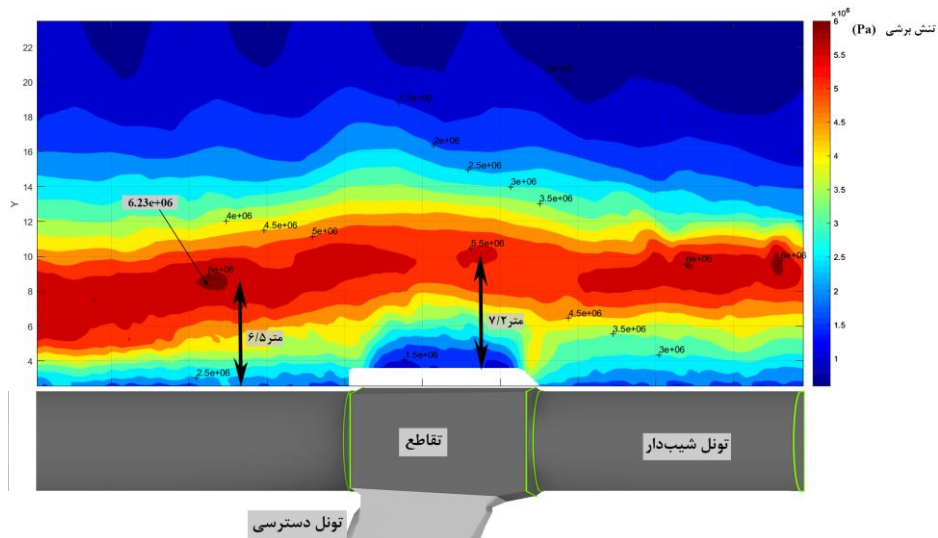
ب) سمت راست تقاطع دوشاخه

شکل ۱۰: کانتورهای تمرکز تنش‌های القایی قائم در محدوده بین تونل شیب‌دار و تونل دسترسی (دید از بالا).

۳-۵- تحلیل تنش‌های برشی

است. با در نظر گرفتن مقطع طولی، بیشینه تنش برشی در محدوده تقاطع دوشاخه معادل ۵٫۵ مگاپاسکال و در توده‌سنگ اطراف تقاطع دوشاخه معادل ۶٫۲۳ مگاپاسکال است.

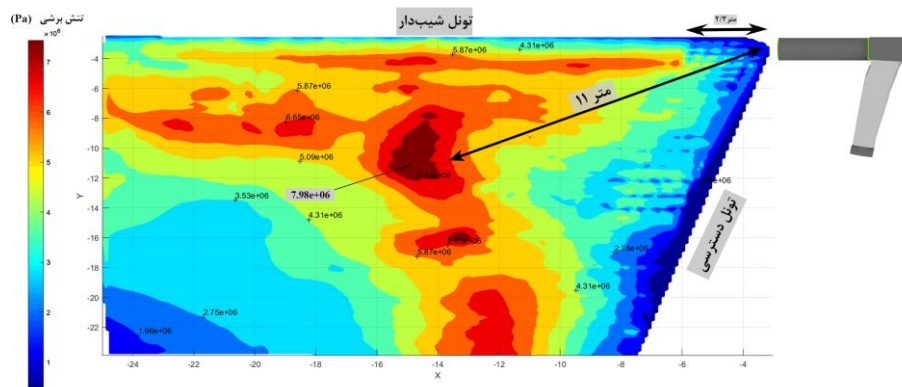
بر اساس منحنی تنش‌های برشی (شکل ۱۱)، بیشینه تنش برشی در دیواره سمت راست تونل شیب‌دار ۶٫۲۳ مگاپاسکال و متمایل به سمت دیواره کوچک‌تر تونل شیب‌دار



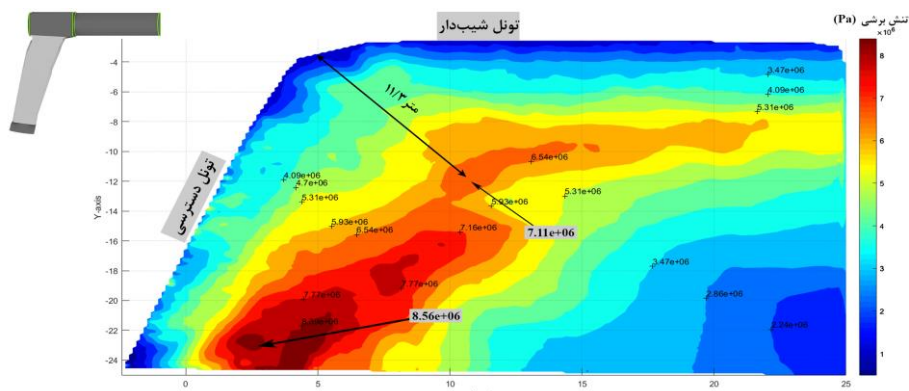
شکل ۱۱: منحنی تغییرات تنش برشی در دیواره سمت راست تونل شیب‌دار (دید از بالا).

تنش برشی در فاصله ۱۱٫۳ متری از گوشه سمت راست تقاطع دوشاخه به ۷٫۱۱ مگاپاسکال می‌رسد. همچنین روند تغییرات تنش‌های برشی در توده سنگ سمت راست در جهت تونل دسترسی افزایشی است؛ این در حالی است که در توده سنگ سمت چپ، تنش‌های برشی تمایل به توزیع متقارن‌تری نسبت به تونل شیب‌دار و تونل دسترسی دارند.

بر اساس منحنی‌های تنش برشی در توده سنگ سمت چپ تقاطع، تنش برشی در فاصله حدود ۱۲ متری از گوشه تیز تقاطع به ۷٫۹۸ مگاپاسکال می‌رسد (شکل ۱۲-الف). همچنین در فاصله کمتر از ۲ متری از گوشه تیز تقاطع، میدان تنش برشی به ۵٫۸۷ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. به‌طور کلی می‌توان گفت که در پایه سنگی سمت چپ، شدت تمرکز تنش برشی بیشتر است. مطابق شکل ۱۲-ب مقدار



الف) سمت چپ تقاطع دوشاخه



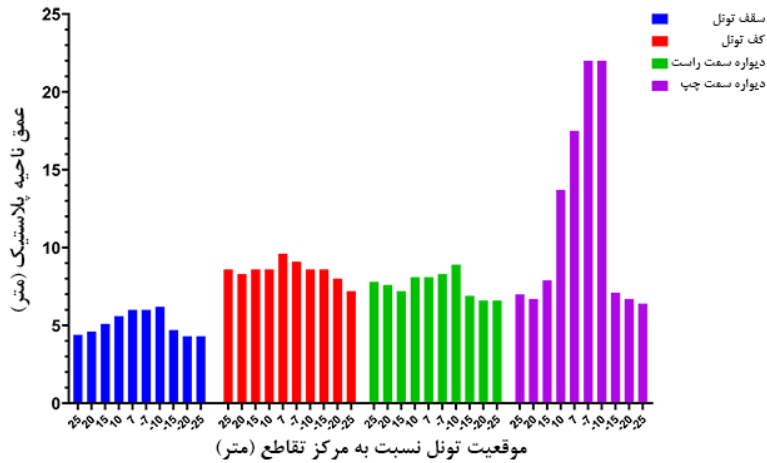
ب) سمت راست تقاطع دوشاخه

شکل ۱۲: منحنی تغییرات تنش‌های برشی در محدوده بین تونل شیب‌دار و تونل دسترسی (دید از بالا).

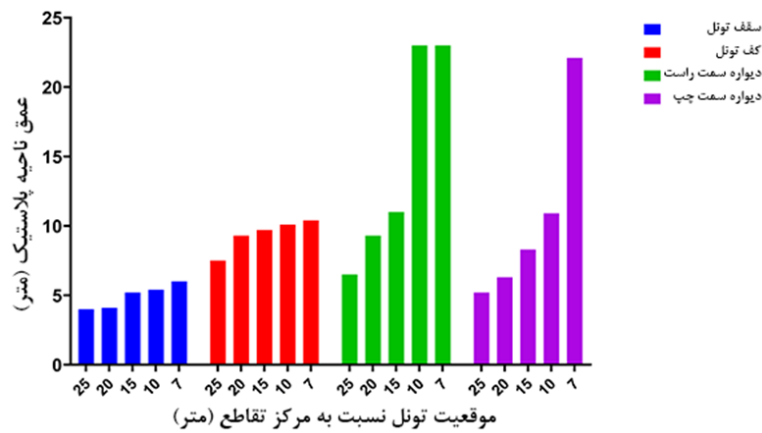
م تفاوت، ناحیه پلاستیک در فواصل مختلف از تقاطع تقریباً نامتقارن است. این پدیده در شکل ۱۵ با جانمایی لایه ضعیف زغال سنگ در فاصله ۲۰ متری از محل تقاطع مشخص شده است. با مقایسه فواصل مختلف و موقعیت لایه زغال سنگ نسبت به مقطع حفاری می‌توان نتیجه گرفت که گسترش ناحیه پلاستیک در صورت وجود لایه ضعیف در سقف مقطع حفاری کمتر از حالتی است که لایه ضعیف در کف مقطع حفاری باشد. به عبارت دیگر وجود لایه زغال سنگ در کف مقطع حفاری، منجر به تشدید گستردگی ناحیه پلاستیک و به تبع آن ناپایداری کف و بالازدگی آن در تونل‌ها و تقاطع دوشاخه خواهد بود.

۳-۶- ناحیه پلاستیک پیرامون تقاطع دوشاخه

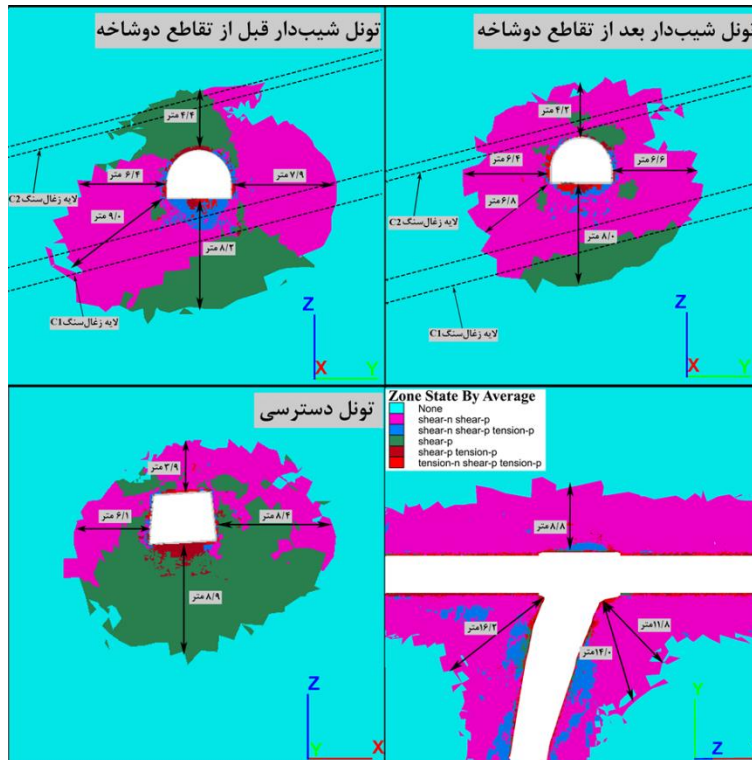
در شکل ۱۳ گسترش ناحیه پلاستیک در چهار محدوده شامل سقف تونل، کف تونل، دیواره سمت راست و دیواره سمت چپ ارائه شده است. در تونل شیب‌دار با افزایش فاصله از مرکز تقاطع، محدوده ناحیه پلاستیک در هر چهار بخش کاهش می‌یابد؛ ولی در دیواره سمت چپ تونل شیب‌دار به علت وجود انشعاب، عمق ناحیه پلاستیک بیشتر است. در تونل دسترسی نیز با افزایش فاصله از مرکز تقاطع، گسترش ناحیه پلاستیک مخصوصاً در دیواره‌ها به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد (شکل ۱۴). به علت وجود لایه‌هایی با مقاومت



شکل ۱۳: گسترش ناحیه پلاستیک در تونل شیب‌دار نسبت به موقعیت مرکز تونل.



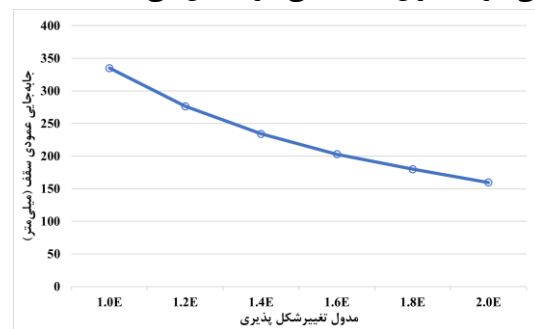
شکل ۱۴: گسترش ناحیه پلاستیک در تونل دسترسی نسبت به موقعیت مرکز تونل.



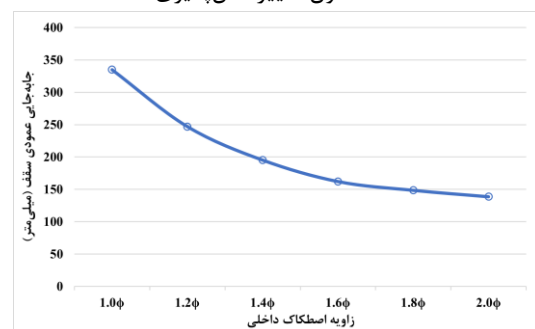
شکل ۱۵: ناحیه پلاستیک در فواصل ۲۰ متری از مرکز تقاطع دوشاخه.

۳-۷- تحلیل حساسیت

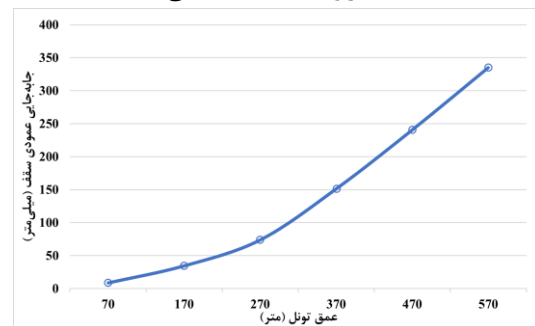
با توجه به تأثیر پارامترهای ورودی مدل عددی بر نتایج آن، در این تحقیق اثر تغییر سه پارامتر ورودی شامل مدول تغییر شکل‌پذیری، زاویه اصطکاک داخلی و عمق تونل بر روی بیشینه جابه‌جایی قائم سقف تقاطع مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۱۶-الف نشان داده شده است، مدل‌سازی حالت‌های متفاوت مدول تغییر شکل‌پذیری با در نظر گرفتن آهنگ رشد ۲۰ درصدی، حاکی از کاهش میزان جابه‌جایی قائم سقف با افزایش مدول تغییر شکل‌پذیری است؛ به طوری که با افزایش ۱۰۰ درصدی مدول تغییر شکل‌پذیری میزان جابه‌جایی سقف از حدود ۳۳۴ میلی‌متر به میزان ۱۵۹ میلی‌متر کاهش می‌یابد.



الف) مدول تغییر شکل‌پذیری



ب) زاویه اصطکاک داخلی



ج) عمق تونل

شکل ۱۶: تغییرات جابه‌جایی قائم در سقف تقاطع برحسب سه پارامتر ورودی.

جهت بررسی تأثیر زاویه اصطکاک داخلی بر نتایج جابه‌جایی، جابه‌جایی قائم سقف با در نظر گرفتن آهنگ رشد ۲۰ درصدی، محاسبه و نتایج آن در شکل ۱۶-ب ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ۱۰۰ درصدی زاویه اصطکاک داخلی، مقدار جابه‌جایی قائم از مقدار ۳۳۴ میلی‌متر به ۱۳۸ میلی‌متر کاهش می‌یابد.

از طرف دیگر با افزایش عمق تونل، میزان جابه‌جایی سقف نیز به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد؛ به گونه‌ای که در عمق ۵۷۰ متری جابه‌جایی قائم سقف ۳۳۴ میلی‌متر و در عمق ۷۰ متری جابه‌جایی قائم کمتر از ۱۰ میلی‌متر به‌دست‌آمده است (شکل ۱۶-ج). واضح است که در تمامی موارد با افزایش مدول تغییر شکل‌پذیری و زاویه اصطکاک داخلی، جابه‌جایی‌های قائم در مدل عددی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عمق تونل جابه‌جایی بیشینه افزایش و در نتیجه پایداری تقاطع کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور تحلیل پایداری تقاطع دوشاخه H16 در معدن زغال‌سنگ پروده طبس، تنش‌های القایی قائم و برشی و نیز ناحیه پلاستیک اطراف محل تقاطع با استفاده از روش عددی تفاضل محدود تجزیه و تحلیل شده است. نتایج اصلی به شرح زیر خلاصه می‌شود:

- سیستم نگهداری پیشنهادی شامل دو بخش سیستم نگهداری فعال و سیستم نگهداری غیرفعال است. سیستم نگهداری فعال شامل پیچ‌سنگ‌های تمام تزریقی، انکرهای ۹ متری و فلکسی بولت‌های ۶ متری است. با نصب این سیستم نگهداری پس از حفاری تونل و اعمال پیش‌تنیدگی لازم در انکرهای بلند، علاوه بر بهبود یکپارچگی توده‌سنگ اطراف تونل، ظرفیت خودنگهداری توده‌سنگ نیز افزایش خواهد یافت. سیستم نگهداری غیرفعال نیز شامل قاب‌های فولادی صلب است که برای افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل‌های شدید تونل نصب می‌شود.
- پس از حفاری تقاطع دوشاخه، توده‌سنگ بین تونل شیب‌دار و تونل دسترسی در سمت چپ تقاطع متحمل بیشترین اغتشاش تنش می‌شود؛ به طوری که بیشینه تنش القایی قائم آن ۱/۷۱ برابر تنش قائم قبل از حفاری است. پس از آن توده‌سنگ بین تونل

می‌تواند گزینه مناسبی برای تأمین پایداری تقاطع دوشاخه باشد. تأثیر وجود آب بر شرایط پایداری توده‌سنگ پیرامون تونل و لایه زغال‌سنگ نیز برای بررسی در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود.

سیاسگزاری

از مدیریت و کارکنان محترم معدن زغال‌سنگ پروده طبع برای همکاری در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Chortis, F., & Kavvadas, M. Three-Dimensional Numerical Analyses of Perpendicular Tunnel Intersections. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(3), 1771-1793. (2020)
- [2] Tan, Z., Zhou, Z., Kong, H., Zhao, B., & Zhao, J. Single excavation face method for super-large-span bifurcated tunnels. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 1-13. (2021)
- [3] Wang, J., Cao, A., Li, Z., et al. Mechanical Behavior and Excavation Optimization of a Small Clear-Distance Tunnel in an Urban Super Large and Complex Underground Interchange Hub. *Applied Sciences*, 13(1). (2022)
- [4] Singh, R. N., Porter, I., & Hematian, J. Finite element analysis of three-way roadway junctions in longwall mining. *International Journal of Coal Geology*, 45(2-3), 115-125. (2001)
- [5] Hsiao, F. Y., Wang, C. L., & Chern, J. C. Numerical simulation of rock deformation for support design in tunnel intersection area. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(1), 14-21. (2009)
- [6] Liu, X., & Wang, Y. Three Dimensional Numerical Analysis of Underground Bifurcated Tunnel. *Geotechnical and Geological Engineering*, 28(4), 447-455. (2010)
- [7] Guo, Z., Shi, J., Wang, J., Cai, F., & Wang, F. Double-directional control bolt support technology and engineering application at large span Y-type intersections in deep coal mines. *Mining Science and Technology (China)*, 20(2), 254-259. (2010)
- [8] Li, G., He, M., Zhang, G., & Tao, Z. Deformation mechanism and excavation process of large span intersection within deep soft rock roadway. *Mining Science and Technology (China)*, 20(1), 28-34. (2010)

شیب‌دار و تونل دسترسی در سمت راست تقاطع و سپس دیواره سمت راست تونل شیب‌دار به ترتیب با تمرکز تنش قائم ۱/۶۵ و ۱/۴ اغتشاش تنش کمتری را تجربه می‌کنند.

(۳) تنش‌های برشی نیز همانند تنش‌های قائم از روند مشابهی پیروی می‌کنند؛ به‌طوری‌که بیشینه تنش برشی در توده‌سنگ بین تونل شیب‌دار و تونل دسترسی سمت چپ تقاطع، سمت راست تقاطع و دیواره سمت راست تونل شیب‌دار به ترتیب معادل ۷/۹۸، ۷/۱۱ و ۶/۲۳ مگاپاسکال است.

(۴) روند توزیع تنش‌ها در توده‌سنگ بین تونل شیب‌دار و تونل دسترسی به‌صورت گنبدی-شکل در ابتدا افزایش و سپس به‌تدریج کاهش می‌یابد. این نکته حائز اهمیت است که با توجه به وسعت زیاد ناحیه اغتشاش تنش در توده‌سنگ پیرامون تقاطع، مرحله کاهش در این روند با شیب کمتری اتفاق می‌افتد. (۵) با افزایش فاصله از مرکز تقاطع دوشاخه، گسترش ناحیه پلاستیک در هر دو تونل شیب‌دار و دسترسی کاهش می‌یابد.

(۶) وجود لایه‌های شیب‌دار با مقاومت متفاوت موجب می‌شود که ناحیه پلاستیک در اطراف فضای حفاری به‌صورت نامتقارن پدیدار شود؛ به‌طوری‌که وجود لایه ضعیف در سقف مقطع حفاری خیلی در گسترش ناحیه پلاستیک تأثیرگذار نیست؛ درحالی‌که وجود لایه زغال‌سنگ در کف مقطع حفاری منجر به تشدید گستردگی ناحیه پلاستیک و به‌تبع آن ناپایداری کف و بالازدگی آن در تونل‌ها و تقاطع دوشاخه می‌شود. به‌منظور مقابله با جابه‌جایی‌های زیاد و ناپایداری تقاطع‌ها در این معدن چند مورد از اقدامات قابل‌اجرا به شرح ذیل پیشنهاد می‌شود. برای کنترل بالازدگی در تونل‌ها، حفاری قوس معکوس و یا تغییر مقطع تونل به‌صورت دایره‌ای-شکل همراه با نصب سیستم نگهداری در کف تونل‌ها پیشنهاد می‌شود. برای کنترل جابه‌جایی‌های ناشی از حفاری تونل دسترسی، کاهش گام حفاری باهدف کنترل تنش‌های القایی پیرامون تقاطع پیشنهاد می‌شود. برای کنترل تغییرشکل‌های ناشی از تنش‌های القایی، مطالعه رفتار تونل پس از تغییر مقطع حفاری به‌ویژه به‌صورت دایره‌ای-شکل پیشنهاد می‌شود. همچنین بررسی امکان اجرای حفاری بخشی به‌جای حفاری تمام مقطع در محدوده تقاطع

- intersections of large-scale variable cross-section roadways in deep soft rock. *International Journal of Coal Science & Technology*, 9(1). (2022)
- [16] Xu, H., Zhang, Y., Yang, J., et al. Study on the Constant Resistance Coupling Support Technology for Rock Column at the Intersection Point of Deep Soft Rock Large Section Roadway: A Case Study in China. *Shock and Vibration*, 2022, 1-12. (2022)
- [17] Sun, X.-m., Qi, Z.-m., Zhang, Y., Miao, C.-y., Zhao, C.-w., & He, M.-c. Failure mechanism and control countermeasures of surrounding rock at deep large section chamber intersection in the Wanfu Coal Mine. *Journal of Mountain Science*, 20(7), 2058-2075. (2023)
- [18] Jiang, J., Tao, R., Hesham El Naggar, M., Liu, H., & Du, X. Seismic performance and vulnerability analysis for bifurcated tunnels in soft soil. *Computers and Geotechnics*, 167. (2024)
- [19] (IRITEC), (2003). Tabas Coal Mine Project, detailed design report (Vol. 1, pp. 464).
- [20] Mahdevari, S., Shahriar, K., Sharifzadeh, M., & Tannant, D. D. Stability prediction of gate roadways in longwall mining using artificial neural networks. *Neural Computing and Applications*, 28(11), 3537-3555. (2016)
- [21] Tabas engineering technical. office. (2023). engineering report.
- [9] Lin, P., Zhou, Y., Liu, H., & Wang, C. Reinforcement design and stability analysis for large-span tailrace bifurcated tunnels with irregular geometry. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 189-204. (2013)
- [10] Nik, M. G., & Farahani, A. F. Assessment the Stability of Tunnels in Y Shaped Intersections with Regard to the Intersection Angles, Case Study: Penstock Tunnels of Rudbar Dam. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 48(2). (2016)
- [11] Golshani, A., Joneidi, M., & Majidian, S. 3D numerical modeling for construction of tunnels intersections- case study of Hakim tunnel. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(43), 1523-1527. (2016)
- [12] Liu, H.-l., Li, S.-c., Li, L.-p., & Zhang, Q.-q. Study on deformation behavior at intersection of adit and major tunnel in railway. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(6), 2459-2466. (2017)
- [13] Zhou, D., Ding, W., Xie, D., & Chen, S. Reinforcement Analysis of Bifurcated Highway Tunnels with Large Section of Different Surrounding Rock Grades in Tiger Leaping Gorge. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 741(1). (2020)
- [14] Gkikas, V. I., & Nomikos, P. P. Primary Support Design for Sequentially Excavated Tunnel Junctions in Strain-Softening Hoek-Brown Rock Mass. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(3), 1997-2018. (2020)
- [15] Xie, S., Wu, Y., Chen, D., Liu, R., Han, X., & Ye, Q. Failure analysis and control technology of

¹ Bifurcation

² Three-way

³ Sub model

⁴ Double directional control bolt

⁵ Stress release

⁶ Negative Poisson's Ratio

⁷ Slope 2 (S2)

⁸ Main Gate 5 access (MG5)

⁹ Nephogram



مقاله پژوهشی

کاربرد الگوریتم های نمونه گیری در طبقه بندی داده های ژئوشیمیایی نامتوازن: مطالعه موردی؛ داده های ژئوشیمیایی بر گه ۱:۱۰۰۰۰۰ قاین

حمید گرانیان^{*۱}

۱- گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

(دریافت: ۳۰ دی ۱۴۰۳، بازنگری: ۲۸ فروردین ۱۴۰۴، پذیرش: ۰۶ خرداد ۱۴۰۴)

چکیده

داده های ژئوشیمیایی ماهیت نامتوازن (یعنی تعداد نمونه ها با عیار کم یا کلاس زمینه زیاد و تعداد نمونه ها با عیار بالا یعنی کلاس آنومالی کم) دارند. طبقه بندی این داده ها، منجر به ایجاد مدلی اریب دار (کم شدن احتمال تعلق نمونه های جدید به کلاس هایی با نمونه های کمتر) همراه با کاهش دقت و صحت مدل خواهد شد. در این مقاله، سه دسته الگوریتم نمونه گیری افزایشی، نمونه گیری کاهش و نمونه گیری ترکیبی برای متوازن سازی داده ها معرفی شده است. همچنین عملکرد این الگوریتم ها بر روی داده های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه ای بر گه قاین توسط دو روش طبقه بندی ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی بررسی شده است. نتایج نشان می دهند که متوازن سازی داده ها (رساندن نسبت تعداد نمونه های کلاس زمینه به کلاس آنومالی از ۳/۶ با ۱) می توان افزایش قابل توجهی در کمیت سنجه های ماتریس درهم ریختگی مثل صحت، حساسیت، وضوح، دقت، امتیاز-F، مقدار-F، میانگین-G و سطح زیر منحنی ROC (به میزان ۱۰ تا ۵۰ درصد) و کاهش حدود ۱۰ درصدی در سنجه خطا ایجاد نماید. به طوری که الگوریتم های نمونه گیری افزایشی، ترکیبی و کاهش به ترتیب بالاترین عملکرد را دارند. همچنین نقشه های آنومالی های ژئوشیمیایی مدل سازی شده توسط الگوریتم های متوازن سازی در منطقه مورد مطالعه نشان می دهد که این مدل ها می توانند ضمن افزایش وسعت آنومالی های ژئوشیمیایی، همپوشانی خوبی بین این آنومالی ها با واحدهای سنگی حاوی کانی سازی برقرار نمایند. در این خصوص، الگوریتم های نمونه گیری افزایشی و سپس الگوریتم نمونه گیری ترکیبی از عملکرد بالاتری برخوردار هستند؛ بنابراین پیشنهاد این مقاله استفاده از الگوریتم های متوازن سازی داده های (به کارگیری الگوریتم های نمونه گیری افزایشی و سپس الگوریتم های نمونه گیری ترکیبی) قبل از طبقه بندی داده های اکتشافی است.

کلمات کلیدی

الگوریتم SMOTE، الگوریتم ADASYN، الگوریتم Rus، الگوریتم OSS، الگوریتم SMOTE-Tomek، الگوریتم ADASYN-CNN، بر گه قاین.

*عهده دار مکاتبات: h.geranian@birjandut.ac.ir

DOI: 10.22034/ANM.2025.22666.1661

۱- مقدمه

پردازش داده‌های اکتشافی مستلزم به‌کارگیری تکنیک‌هایی است که بتواند ساختار داده‌ها را شناسایی و مدل‌سازی نماید. طبقه‌بندی و خوشه‌بندی از الگوریتم‌های داده‌کاوی هستند که قادر به استخراج این ساختارها می‌باشند. طبقه‌بندی یک روش یادگیری ماشین نظارت‌شده است که هدف آن برآورد یک مدل از داده‌ها با چند کلاس بر اساس روابط آماری بین آن‌ها و سپس محاسبه احتمال تعلق یک نمونه جدید به کلاس‌ها مختلف است [۱]. در این روش نوع کلاس هر نمونه و تعداد کل کلاس‌های از قبل مشخص است. همچنین در این روش نیاز به تعدادی نمونه آموزشی جهت ساختن مدل (۵۰ تا ۸۰ درصد نمونه‌ها) و تعدادی نمونه آزمایشی (۲۰ تا ۵۰ درصد نمونه‌ها) برای بررسی صحت‌سنجی مدل ساخته‌شده است [۱، ۲].

روش‌های طبقه‌بندی متنوع بوده و در تحلیل داده‌های اکتشافی (خصوصاً ژئوشیمیایی) به‌طور گسترده استفاده شده است. مدل‌سازی آلودگی‌های محیط زیستی در اطراف معدن انگوران و کانی‌زایی در کانسار طلای ساری گونای توسط روش تحلیل تمایز [۳، ۴]، شناسایی الگوهای پراکندگی ژئوشیمیایی عناصر نادر خاکی در اطراف معدن گل‌گهر و طبقه‌بندی سنگ‌ها بر اساس خواص ژئوشیمیایی آن‌ها توسط روش درخت تصمیم [۵، ۶]، پتانسیل‌یابی طلا در کانسار طلای ایپی‌ترمال ساری گونای و شناخت الگوهای ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی در کانسارهای طلای هیدروترمال توسط الگوریتم تئوری بی‌زین [۷، ۸]، شناسایی لیتولوژی ژئوشیمیایی و تعیین رابطه‌ی کمی بین آلتراسیون‌ها و آنومالی‌های ژئوشیمیایی کانسار طلای تنورچه به کمک روش ماشین بردار پشتیبان [۹، ۱۰]، طبقه‌بندی سنگ‌ها به کمک داده‌های ژئوشیمیایی و فتوگرافی و پیش‌بینی کانی‌سازی چندفلزی همراه با طلا به کمک داده‌های ژئوشیمیایی و زمین‌شناسی توسط روش جنگل تصادفی [۱۱، ۱۲]، تعیین رابطه بین عناصر ردیاب و زون‌های متالورژی به‌منظور شناسایی محدوده‌های مستعد کانی‌سازی و ارزیابی خواص ژئوشیمیایی زغال‌سنگ توسط روش رگرسیون لجستیک [۱۳، ۱۴]، مدل‌سازی داده‌های ژئوشیمیایی به‌منظور پیش‌بینی کانی‌سازی در استرالایای غربی و گناباد توسط روش شبکه عصبی [۱۵، ۱۶]، شناسایی آنومالی‌های

ژئوشیمیایی چند عنصری و تلفیق الگوریتم نظارت‌شده و نیمه نظارت‌شده به‌منظور تعیین آنومالی ژئوشیمیایی توسط روش k-نزدیک‌ترین همسایگی [۱۷، ۱۸] و تعیین نقشه پتانسیل معدنی کانی‌سازی سرب-روی با سنگ میزبان کربناته در زون ارومیه-دختر و تهیه نقشه‌های بازماند عیار طلا به کمک روش مجموعه‌ی طبقه‌بندی کننده‌های گرادیان بالا (XGBoost) [۱۹، ۲۰] نمونه‌هایی از این کاربردها می‌باشند.

برآورد مدلی با دقت بالا و پیش‌بینی احتمال تعلق نمونه‌های جدید به کلاس‌های مختلف با صحت بالا در کلیه‌ی روش‌های طبقه‌بندی ذکرشده، منوط به متوازن بودن نمونه‌های در داده‌های آموزشی است. متوازن بودن نمونه‌ها، به معنی برابر بودن توزیع تعداد نمونه‌ها در کلاس‌های مختلف است. درحالی‌که در عمل با داده‌های نامتوازن^۲ روبرو هستیم. به‌طور مثال در داده‌های ژئوشیمیایی، تعداد نمونه‌ها با عیار پایین (داده‌های کلاس زمینه) بسیار زیاد بوده در مقابل، تعداد نمونه‌ها با عیار بالا (داده‌های کلاس آنومالی) کم می‌باشند. طبقه‌بندی با داده‌های نامتوازن باعث ایجاد مدلی اریب‌دار، کاهش دقت مدل و کم شدن احتمال تعلق نمونه‌های جدید به کلاس‌هایی با نمونه‌های کمتر می‌شود [۲۱-۲۳]؛ بنابراین متوازن کردن نمونه‌ها قبل از ساخت مدل طبقه‌بندی، یک پیش‌شرط برای پردازش داده‌ها است. از آنجاکه این نکته کمتر مورد توجه متخصصین علوم زمین قرار گرفته است، هدف این مقاله معرفی الگوریتم‌های متوازن کردن داده‌ها و بررسی تأثیر آن‌ها در کاربرد روش‌های طبقه‌بندی به‌منظور انتخاب بهترین الگوریتم است.

برای طبقه‌بندی داده‌های نامتوازن سه رویکرد روش‌های نمونه‌گیری از داده‌ها، تعدیل روش‌های طبقه‌بندی و روش‌های یادگیری هزینه-حساسیت پیشنهادشده است [۲۴، ۲۵]. در رویکرد اول با افزایش مصنوعی، یا کاهش نمونه‌ها و یا ترکیب آن‌ها، داده‌های کلاس‌ها متوازن می‌گردد [۲۴، ۲۶، ۲۷]. در روش‌های گروه دوم با استفاده از الگوریتم‌های تلفیقی همچون bagging، boosting، جنگل تصادفی یا جنگل ایزوله عملکرد پیش‌بینی‌کننده را در مجموعه داده‌های نامتوازن افزایش می‌دهند [۲۸، ۲۹، ۳۰]. در حالی که در رویکرد سوم، هزینه مدل یادگیری را برای طبقه‌بندی نادرست نقاط کلاس دارای نمونه‌ی کمتر را افزایش می‌دهند تا عملکرد کل سیستم بهبود یابد [۳۱، ۳۲، ۳۳]. مطالعات

کلاس اقلیت معمولاً از اهمیت بیشتری برخوردار است. این نکته بدان معنی است که مهارت یک مدل در پیش‌بینی صحیح برچسب یا احتمال نمونه‌ای برای کلاس اقلیت از نمونه‌ای برای کلاس اکثریت مهم‌تر است؛ بنابراین کاهش احتمال تعلق نمونه به کلاس اقلیت هزینه مدل‌سازی را افزایش می‌دهد [۲۱، ۳۵]. برای حل این مشکل سه راه‌حل نمونه‌گیری افزایشی^۶، نمونه‌گیری کاهش‌ی^۷ و روش ترکیبی ارائه شده است که شکل ۱ اصول و فرآیند کار آن‌ها را نشان می‌دهد. در ادامه مقاله، این الگوریتم‌ها معرفی شده‌اند.

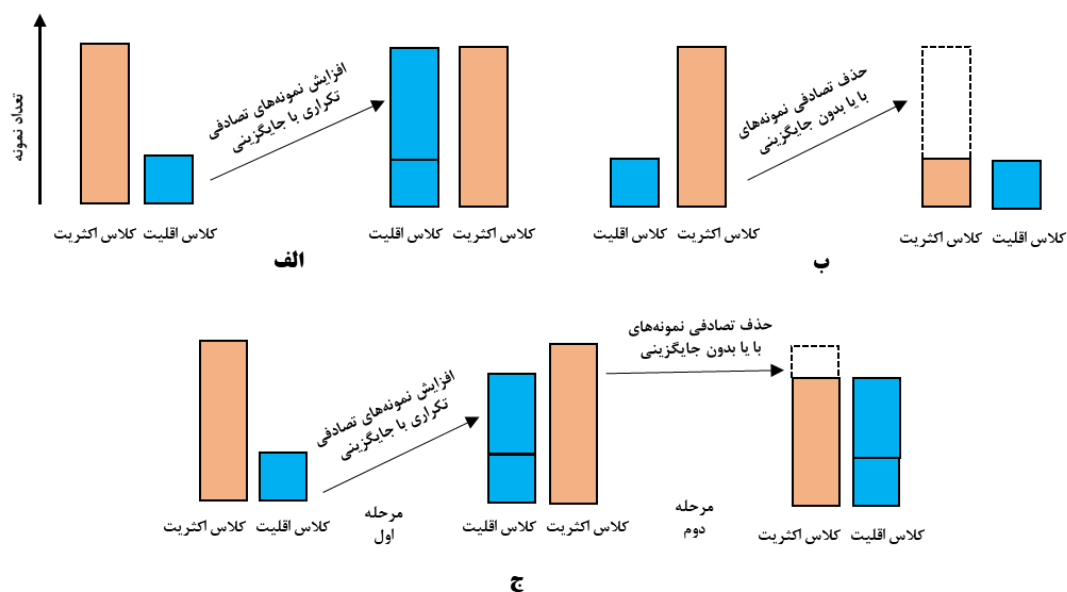
۱-۲- الگوریتم‌های نمونه‌گیری افزایشی

در این روش با اضافه کردن تعدادی نمونه به کلاس اقلیت، تعداد نمونه‌های آن افزایش‌یافته تا برابر تعداد نمونه‌های کلاس اکثریت شود؛ بنابراین در این روش، تعداد کل نمونه‌های داده‌های آموزشی افزایش می‌یابد (شکل ۱- الف). برای اجرای این روش، الگوریتم‌های نمونه‌گیری افزایشی تصادفی (ROS)^۸، تکنیک نمونه‌گیری افزایشی مصنوعی (SMOTE)^۹، نمونه‌گیری افزایشی مرزی (BOS)^{۱۰} و نمونه‌گیری مصنوعی تطبیقی (ADASYN)^{۱۱} برای کلاس اقلیت معرفی شده‌اند. مزیت این روش کاهش میزان اریب شدن مدل و افزایش دقت آن است. در مقابل از معایب آن می‌توان به افزایش تعداد نمونه‌ها بدون در نظر گرفتن نمونه‌های کلاس اکثریت که منجر به ایجاد نمونه‌های مبهم می‌شود، بالا رفتن احتمال بیش‌برازشی و افزایش زمان پردازش اشاره نمود [۲۱، ۳۵، ۳۶].

نشان داده است که الگوریتم‌های رویکرد اول به دلیل داشتن روش‌های متفاوت برای هر دسته داده‌ی نامتوازن با شرایط خاص، با داده‌های واقعی سازگارتر بوده و نتایج بهتری را به همراه داشته است [۲۵، ۲۶، ۲۷، ۳۴]. لذا در این مقاله، به معرفی الگوریتم‌های رویکرد اول پرداخته شده است. برای این منظور از داده‌های اکتشافی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ قاین در استان خراسان جنوبی و روش‌های طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است تا تأثیر متوازن‌سازی داده‌ها بر تفسیر داده‌های ژئوشیمیایی و تشخیص آنومالی‌های ژئوشیمیایی بررسی شود.

۲- الگوریتم‌های متوازن کردن داده‌ها

در یک مجموعه داده‌ی آموزشی دو کلاسه با n نمونه، اگر تعداد نمونه‌های کلاس اول (n_1) بیشتر از تعداد نمونه‌های کلاس دوم (n_2) باشد به نحوی که $n_1 \gg n_2$ و $n = n_1 + n_2$ با طبقه‌بندی یک دسته داده‌ی چولگی دار و نامتوازن روبرو هستیم؛ بنابراین کلاس اول، کلاس اکثریت^۲، کلاس دوم، کلاس اقلیت^۴ و به نسبت $\frac{n_1}{n_2}$ ، نسبت عدم توازن^۵ گفته می‌شود. نسبت عدم توازن می‌تواند از ۴:۱ تا ۱۰۰:۱ و یا حتی بیشتر تغییر نماید. با افزایش نسبت عدم توازن، میزان اریب‌دار شدن مدل طبقه‌بندی افزایش‌یافته و دقت کلاسه‌بندی کاهش می‌یابد. در نتیجه برآورد احتمال تعلق نمونه‌های جدید به کلاس اقلیت به شدت کاهش می‌یابد. در حالی که هنگام طبقه‌بندی یک مجموعه داده‌ی نامتوازن،



شکل ۱: فرآیند روش‌های نمونه‌گیری افزایشی (الف)، نمونه‌گیری کاهش‌ی (ب) و روش ترکیبی (ج) برای متوازن کردن داده‌ها [۲۲].

۱-۲-۱- الگوریتم SMOTE

که Δ تعداد نمونه‌های نزدیک هر نمونه در کلاس اقلیت است و $r_i \in [0, 1]$

۳- نرمالیزه کردن نسبت فوق توسط رابطه (۳):

$$\hat{r}_i = r_i / \sum_{i=1}^{n_2} r_i \quad i = 1, 2, \dots, n_2 \quad (3)$$

که \hat{r}_i توزیع چگالی است زیرا $\sum \hat{r}_i = 1$

۴- محاسبه تعداد نمونه‌های مصنوعی که بایستی برای هر نمونه‌ی کلاس اقلیت تولید شود، توسط رابطه (۴):

$$g_i = \hat{r}_i \times G \quad (4)$$

۵- برای هر نمونه‌ی کلاس اقلیت g_i نمونه همانند الگوریتم SMOTE تولید می‌شود.

در سال‌های اخیر برای این الگوریتم نیز مدل‌های تعدیل‌یافته‌ای از قبیل ADASYN-N، ADASYN-KNN و ADASYN-LOF پیشنهاد شده است [۴۶، ۴۵]

۲-۲- الگوریتم‌های نمونه‌گیری کاهش‌ی

در این روش با حذف کردن تعدادی از نمونه‌های کلاس اکثریت، تعداد آن‌ها کاهش یافته تا برابر تعداد نمونه‌های کلاس اقلیت گردد (شکل ۱-ب). برای کم کردن تعداد نمونه‌ها می‌توان از راه‌حل گروه‌بندی کردن نمونه‌ها یا حذف آن‌ها و یا ترکیب این دو استفاده نمود. برای اجرای این روش، الگوریتم‌های نمونه‌گیری کاهش‌ی تصادفی (RUS)^{۱۲}، قانون نزدیک‌ترین همسایگی متراکم شده (CNN)^{۱۳}، نمونه‌گیری کاهش‌ی نزدیک گم شده (NMUS)^{۱۴}، نمونه‌گیری کاهش‌ی پیوندهای Tomek (TLUS)^{۱۵}، قانون نزدیک‌ترین همسایگی اصلاح‌شده (ENN)^{۱۶}، انتخاب یک‌طرفه (OSS)^{۱۷} و قانون تمیزکردن همسایگی (NCR)^{۱۸} ارائه شده است. کاهش اریب‌دار شدن مدل طبقه‌بندی برای کلاس اقلیت و کاهش زمان پردازش از مزایای روش نمونه‌گیری کاهش‌ی است. همچنین از داست دادن اطلاعات، اریب‌دار شدن نمونه‌های کلاس اکثریت و خطای تجزیه و تحلیل از معایب این روش محسوب می‌شود [۲۱، ۳۴].

۱-۲-۲-۱- الگوریتم RUS

الگوریتم نمونه‌گیری کاهش‌ی تصادفی (RUS) شامل انتخاب تصادفی نمونه‌هایی از کلاس اکثریت برای حذف آن‌ها از مجموعه‌ی داده آموزشی است. این فرآیند را می‌توان تا زمان توزیع متوازن کلاس‌های موردنظر (مانند تعداد

الگوریتم نمونه‌گیری افزایش‌ی مصنوعی برای کلاس اقلیت (SMOTE) یکی از پرکاربرترین رویکردها در این زمینه است که توسط Chawla و همکارانش در سال ۲۰۰۲ ارائه شده است [۳۷]. در این الگوریتم تعداد نمونه‌های کلاس اقلیت توسط گام‌های زیر افزایش می‌یابد [۲۱، ۳۷]:

۱- یک بردار متغیر از اختلاف بین k نزدیک‌ترین نمونه‌های اطراف یکی از نمونه‌های کلاس اقلیت تشکیل می‌شود.

۲- این بردار در یک عدد تصادفی بین ۰ تا ۱ ضرب می‌شود.

۳- مقدار به دست آمده به مقدار بردار متغیر اصلی (نمونه‌ی اولیه کلاس اقلیت) اضافه شده تا نمونه‌ای جدید به دست آید. این فرآیند تا رسیدن تعداد نمونه‌های کلاس اقلیت به کلاس اکثریت ادامه می‌یابد. در سال‌های اخیر مدل‌های تعدیل‌یافته بسیاری برای این الگوریتم معرفی شده است که از آن جمله می‌توان به WSMOTE، MSMOTE، SASMOTE، DSMOTE، ESMOTE و GBSMOTE و غیره اشاره کرد [۴۲-۳۸].

۱-۲-۲-۲- الگوریتم ADASYN

الگوریتم نمونه‌گیری افزایش‌ی مصنوعی تطبیقی برای کلاس اقلیت (ADASYN) یک مدل تعدیل‌یافته الگوریتم قبلی است که توسط He و همکارانش در سال ۲۰۰۸ ارائه شده است [۴۳]. در این الگوریتم نمونه‌های جدید در مناطقی از فضای ویژگی بیشتر تولید می‌شوند که چگالی نمونه‌های اقلیت کمتر است؛ بنابراین داده‌های مصنوعی بیشتری برای نمونه‌های کلاس اقلیت تولید می‌شوند که یادگیری آن‌ها در مقایسه با سایر نمونه‌ها سخت‌تر است. مراحل این الگوریتم عبارت‌اند از [۴۳، ۴۴]:

۱- محاسبه تعداد نمونه‌هایی مصنوعی که بایستی برای کلاس اقلیت تولید شود از رابطه (۱):

$$G = (n_1 - n_2) \times \beta \quad (1)$$

که $\beta \in [0, 1]$ پارامتر تعیین‌کننده شدت توازن بوده و در حالت توازن کامل $\beta = 1$ است.

۲- پیدا کردن k نزدیک‌ترین نمونه‌های اطراف هر یک از نمونه‌های کلاس اقلیت و محاسبه نسبت زیر:

$$r_i = \Delta_i / k \quad i = 1, 2, \dots, n_2 \quad (2)$$

$z \in S$ وجود نداشته باشد که $d(x, z) < d(x, y)$ و یا $d(y, z) < d(x, y)$. نمونه‌های دارای پیوند Tomek نمونه‌های نویز یا روی خط-مرزی هستند.

۲-۳-۲- الگوریتم‌های ترکیبی

در این روش از ترکیب هم‌زمان روش‌های نمونه‌گیری افزایشی و کاهشی استفاده می‌شود. به طوری که ابتدا با روش نمونه‌گیری افزایشی تعداد نمونه‌های کلاس اقلیت افزایش یافته و سپس با روش نمونه‌گیری کاهشی تعداد نمونه‌های کلاس اکثریت کاهش می‌یابد تا توازن بین نمونه‌های کلاس‌ها ایجاد گردد (شکل ۱-ج). هر یک از الگوریتم‌های ذکر شده در بخش‌های قبلی می‌تواند برای دو روش نمونه‌گیری افزایشی و کاهشی استفاده شود؛ بنابراین تعداد الگوریتم‌های این روش بسیار زیاد خواهد بود. در این روش از اصلاح الگوریتم‌های طبقه‌بندی نیز می‌توان استفاده کرد. نمونه‌گیری ترکیبی مزایای نمونه‌گیری افزایشی و کاهشی را باهم ترکیب می‌کند و امکان متعادل کردن مجموعه داده‌ها را فراهم می‌کند. در عین حال از دست دادن اطلاعات و خطرات بیش از حد برآزش را نیز کاهش می‌دهد. در مقابل، این روش پیچیدگی بالایی دارد و نیازمند یافتن تعادل بین دو روش نمونه‌گیری است که باعث افزایش سختی طراحی و بهینه‌سازی می‌شود. همچنین ابرپارامترهای جدیدی در این روش معرفی می‌گردند که نیاز به تنظیم پارامتر و انتخاب مدل بیشتری دارد؛ بنابراین هزینه آزمایش و محاسبات را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، ممکن است به دلیل وابستگی به توزیع داده‌ها و ویژگی‌های متغیرها، سازگاری محدودی با مجموعه داده‌های مختلف داشته باشد [۴۷، ۲۱].

۲-۳-۱- الگوریتم SMOTE-Tomek

این الگوریتم اولین بار توسط Batista و همکارانش در سال ۲۰۰۳ معرفی شده است [۴۳]. این روش ترکیبی از توانایی الگوریتم SMOTE برای تولید داده‌های مصنوعی برای کلاس اقلیت و توانایی الگوریتم پیوندهای Tomek برای حذف داده‌هایی است که به‌عنوان پیوندهای Tomek از کلاس اکثریت شناسایی می‌شوند (نمونه‌هایی از داده‌ها از کلاس اکثریت که نزدیک‌ترین فاصله را با داده‌های کلاس اقلیت دارند). مراحل این دو الگوریتم قبلاً شرح داده شده است.

نمونه‌های مساوی برای هر کلاس) تکرار کرد. برای اجرای این الگوریتم می‌توان به هر نمونه یک شماره نسبت داد و با انتخاب تصادفی شماره‌ی نمونه‌ها، آن‌ها را از کلاس اکثریت حذف نمود.

این رویکرد ممکن است برای آن دسته از مجموعه داده‌هایی مناسب‌تر باشد که در آن تعداد کافی نمونه برای ساختن مدل طبقه‌بندی با دقت قابل قبول وجود داشته باشد. حذف احتمالی نمونه‌هایی از کلاس اکثریت که ممکن است برای تطبیق و ساختن مرز تصمیم‌گیری در مدل طبقه‌بندی مهم و یا حیاتی باشند؛ از محدودیت‌های کاربرد این الگوریتم محسوب می‌شود. در این الگوریتم هیچ راهی برای شناسایی یا حفظ نمونه‌های خوب یا غنی از اطلاعات در کلاس اکثریت وجود ندارد [۲۲، ۲۱].

۲-۲-۲- الگوریتم OSS

الگوریتم انتخاب یک‌طرفه (OSS) توسط Kubat و Matwin در سال ۱۹۹۷ ارائه شده است [۵۱]. در این الگوریتم با حذف نمونه‌های نویز، خط-مرزی و اضافی و حفظ نمونه‌های ایمن، تعداد نمونه‌های کلاس اکثریت کاهش می‌یابد. الگوریتم آن شامل گام‌های زیر است [۵۲، ۵۱]:

- ۱- مجموعه داده‌های آموزشی اولیه S در نظر گرفته می‌شود.

- ۲- زیرمجموعه‌ای از داده‌های آموزشی تحت عنوان C ساخته می‌شود که شامل تمامی نمونه‌های کلاس اقلیت و یک نمونه‌ی تصادفی از کلاس اکثریت باشد (یعنی $C \subset S$).
- ۳- نمونه‌های مجموعه S توسط قانون ۱-نزدیک‌ترین همسایگی (1-NN) با استفاده از نمونه‌های زیرمجموعه C طبقه‌بندی می‌شود. سپس کلاس نمونه‌های به‌دست‌آمده با کلاس اولیه مقایسه شده و تمامی نمونه‌های دارای طبقه‌بندی نادرست به زیرمجموعه C منتقل می‌گردد. در این حالت، زیرمجموعه C حاصل نسبت به مجموعه S سازگار و کوچک‌تر خواهد بود (یعنی نمونه‌های اضافی کلاس اکثریت از آن حذف شده است).

- ۴- از زیرمجموعه حاصل از گام ۳، نمونه‌های نویز و خط-مرزی کلاس اکثریت توسط الگوریتم پیوندهای Tomek حذف می‌گردد. زیرمجموعه به‌دست‌آمده متوازن خواهد بود. اگر دو نمونه‌ی x و y از دو کلاس متفاوت باشند و فاصله‌ی آن‌ها را با $d(x, y)$ نشان دهیم، زوج نمونه‌های (x, y) دارای پیوند Tomek خواهند بود، اگر هیچ نمونه‌ای همچون

۲-۳-۲- الگوریتم ADASYN-CNN

الگوریتم ADASYN-CNN که در این مقاله معرفی می‌شود، ترکیبی از نمونه‌گیری افزایشی برای کلاس اقلیت، توسط الگوریتم ADASYN و سپس نمونه‌گیری کاهشی برای کلاس اکثریت، توسط الگوریتم CNN است. فرآیند الگوریتم ADASYN در بخش قبلی به آن اشاره شد. در الگوریتم CNN که اولین بار توسط Hart در سال ۱۹۶۸ ارائه شده است به دنبال یافتن یک زیرمجموعه سازگار (زیرمجموعه‌ای که تمام نمونه‌های آن توسط قانون نزدیک‌ترین همسایگی به‌درستی طبقه‌بندی شوند) از داده‌های اولیه است [۵۴]. این کار توسط مراحل زیر صورت می‌گیرد [۵۴، ۴۷]:

- ۱- اولین نمونه در زیرمجموعه G قرار می‌گیرد.
- ۲- نمونه دوم توسط قانون نزدیک‌ترین همسایگی با استفاده از زیرمجموعه G طبقه‌بندی می‌شود. اگر نمونه دوم به‌درستی طبقه‌بندی شود، در زیرمجموعه G قرار می‌گیرد؛ در غیر این صورت در زیرمجموعه G قرار داده می‌شود.
- ۳- گام دوم برای کلیه نمونه‌ها صورت می‌گیرد. سپس این فرآیند برای زیرمجموعه G نیز انجام می‌شود تا در یکی از دو حالت زیر الگوریتم متوقف گردد.
- الف) زیرمجموعه G تمام شود؛ یعنی همه‌ی اعضای آن به G منتقل شده‌اند (در این صورت، زیرمجموعه سازگار شامل کل نمونه‌های مجموعه اصلی است) و یا
- ب) یک دور کامل بر روی زیرمجموعه G بدون هیچ‌گونه انتقال به زیرمجموعه G انجام شود.
- ۴- زیرمجموعه نهایی G به‌عنوان زیرمجموعه سازگار در نظر گرفته شده و زیرمجموعه G کنار گذاشته می‌شود.

۳- زمین‌شناسی و داده‌های منطقه مورد مطالعه

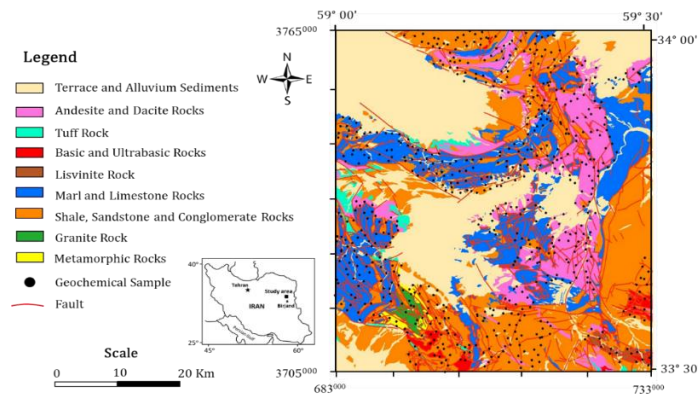
برگه ۱:۱۰۰/۰۰۰ قاین در استان خراسان جنوبی و در فاصله حدود ۱۰۰ کیلومتری شمال شهر بیرجند قرار دارد (شکل ۲). این منطقه به لحاظ زون‌های زمین‌شناسی ساختاری ایران جزو بلوک لوت محسوب می‌شود. بلوک لوت یکی از خرد قاره‌های ایران مرکزی است که فعالیت‌های گسل‌های امتداد لغز دو طرف بلوک لوت به همراه فروانش بلوک افغان به زیر بلوک لوت باعث تشکیل سنگ‌های کالک-آلکان در بخش‌های وسیعی از مرکزی و شمالی این بلوک شده است. به‌طوری‌که بر روی پی‌سنگ‌های دگرگونی

پروکامبرین و ژوراسیک پسین، سنگ‌های ولکانیکی، ولکانوکلاستیک، ساب ولکانیکی و توده‌های نفوذی از کرتاسه پسین تا کواترنه قابل‌مشاهده است [۴۸].

شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی این برگه را نشان می‌دهد. قدیم‌ترین واحدهای سنگی منطقه سنگ‌های دگرگونی گنایس، شیست و کوارتزیت و توده گرانیتی با سن پروتوزوئیک هستند که در بخش جنوب غربی برگه رخنمون دارند. سنگ‌های رسوبی شیل، ماسه‌سنگ و آهک ژوراسیک بیشترین رخنمون را در برگه دارند که در بخش‌های غربی و شمالی برگه دیده می‌شوند. سایر واحدهای سنگی رسوبی از قبیل کنگلومرا، شیل و ماسه‌سنگ در شمال و جنوب برگه به همراه بخشی از توف‌ها منطقه متعلق به کرتاسه بالایی هستند. واحدهای سنگی رسوبی به همراه توف‌های در شرق برگه نیز متعلق به دور پالئوسن می‌باشند. واحد سنگی لیستونیتی قرارگرفته در منتهی‌الیه بخش جنوب شرقی برگه، دارای سن کرتاسه میانی تا بالایی است. سنگ‌های بازی و فوق‌بازی برگه از دو بخش تشکیل شده است. واحدهای رخنمون‌دار در بخش جنوب شرقی برگه اولترابازیک‌های کرتاسه هستند. درحالی‌که واحد رخنمون‌دار در بخش جنوبی تا جنوب غربی برگه، سنگ‌های بازیک پلیستوسن می‌باشند. سنگ‌های آذرین درونی و بیرونی حد واسط در برگه در دو بخش سنگ‌های آندزیتی پورفیری پالئوسن-ائوسن که بیشترین رخنمون را دارد و سنگ‌های آندزیتی-بازالتی و آندزیتی-دیوریتی الیگوسن-میوسن قابل‌مشاهده است. حدود نیمه از برگه را نیز رسوبات آبرفتی و پادگانه به همراه رسوبات دشت‌های سیلابی تشکیل می‌دهد. از برگه قاین ۶۵۲ نمونه از رسوبات آبراه‌های برداشت شده است. نمونه‌ها برای ۶۳ عنصر به روش ICP-OES تجزیه شده‌اند (نمونه‌برداری و تجزیه شیمیایی توسط کارشناسان سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور صورت گرفته است). شکل ۲ موقعیت و پراکندگی این نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در این مقاله، پس از حذف عناصر دارای مقادیر سنسورد، از نتایج تجزیه شیمیایی ۲۷ عنصر باقیمانده استفاده شده است که جدول ۱ پارامترهای آمار توصیفی آن‌ها را نشان می‌دهد. مقادیر چولگی و کشیدگی عناصر نشان می‌دهند که تابع توزیع عناصر Fe، Al و تا حتی Si از توزیع نرمال، سایر عناصر اصلی نزدیک به نرمال و بقیه عناصر از توزیع لاگ‌نرمال تبعیت می‌کنند. مقایسه میانگین عناصر

انحراف معیار به میانگین برای کلیه عناصر کمتر از ۱ است؛ بنابراین می‌توان استنباط نمود که عناصر در مقادیر بزرگ‌تر از آنچه برای آن‌ها انتظار بوده است تمرکز یافته و از این رو احتمال وجود آنومالی در داده‌ها وجود دارد [۵۵].

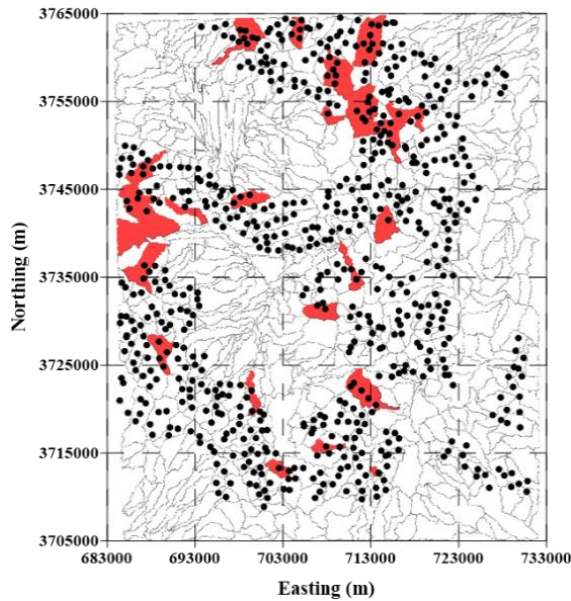
در جدول ۱ با عدد کلارک نیز نشان می‌دهد که نمونه‌ها برای عناصر $Ti, Si, P, Ni, Na, Mn, Mg, K, Fe, Cu, Co, Ba, Al$ و V تهی‌شدگی و برای عناصر $Li, La, Cr, Ca, Bi, B, As$ غنی‌شدگی دارند. همچنین نسبت Zr و Zn, Y, Sr, Sb, Pb



شکل ۲: نقشه ساده‌شده زمین‌شناسی ورقه ۱:۱۰۰,۰۰۰ قاین به همراه موقعیت نمونه‌های ژئوشیمیایی (سازمان زمین‌شناسی کشور)

جدول ۱: پارامترهای آمار توصیفی داده‌های ژئوشیمیایی ورقه قاین

متغیر (واحد)	میانگین	انحراف معیار	کمینه	میانه	بیشینه	چولگی	کشیدگی
Al (%)	۳٫۷۷	۰٫۴۵	۲٫۵۹	۳٫۷۶	۶٫۱۹	۰٫۷۱	۱٫۸۶
As (ppm)	۱۰٫۵۵	۸٫۲۱	۱۰٫۰۰	۱۰٫۰۰	۱۷۴٫۰۰	۱۷٫۹۷	۳۳۱٫۰۵
Ba (ppm)	۳۸۸٫۰۳	۷۳٫۳۱	۲۴۴٫۰۰	۳۸۲٫۰۰	۹۷۴٫۰۰	۲٫۷۲	۱۵٫۴۲
B (ppm)	۸۲٫۴۵	۲۴٫۵۵	۳۱٫۰۰	۷۸٫۰۰	۲۷۵٫۰۰	۲٫۶۹	۱۳٫۰۷
Bi (ppm)	۵۰٫۸	۰٫۴۲	۵۰٫۰	۵۰٫۰	۹۰٫۰	۶٫۱۹	۴۲٫۶۴
Ca (%)	۱۷٫۰۴	۳٫۴۸	۶٫۰۰	۱۶٫۸۶	۳۰٫۵۷	۰٫۳۵	۰٫۸۴
Co (ppm)	۱۴٫۶۲	۴٫۴۷	۵٫۰۰	۱۴٫۰۰	۴۰٫۰۰	۱٫۵۱	۶٫۱۷
Cr (ppm)	۱۳۹٫۷۱	۵۵٫۰۳	۶۶٫۰۰	۱۳۰٫۰۰	۶۰۸٫۰۰	۴٫۴۴	۲۵٫۹۶
Cu (ppm)	۲۴٫۹۵	۶٫۱۳	۱۲٫۰۰	۲۴٫۰۰	۷۳٫۰۰	۲٫۱۴	۹٫۹۶
Fe (%)	۳٫۱۶	۰٫۵۱	۱٫۸۹	۳٫۱۱	۵٫۹۴	۰٫۸۰	۱٫۹۰
K (%)	۱٫۸۰	۰٫۳۰	۰٫۹۱	۱٫۸۳	۲٫۷۴	۰٫۰۳	-۰٫۱۸
La (ppm)	۱۱۶٫۶۶	۲۴٫۲۷	۱۰۰٫۰۰	۱۰۳٫۰۰	۲۳۶٫۰۰	۱٫۷۶	۲٫۹۶
Li (ppm)	۵۰٫۵۶	۳٫۲۰	۵۰٫۰۰	۵۰٫۰۰	۸۴٫۰۰	۷٫۳۳	۵۹٫۲۴
Mg (%)	۱٫۹۷	۰٫۶۰	۱٫۲۷	۱٫۸۱	۷٫۶۰	۴٫۳۶	۲۷٫۲۴
Mn (%)	۰٫۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۷	۰٫۰۹	۰٫۲۲	۲٫۵۳	۱۷٫۳۰
Na (%)	۱٫۴۶	۰٫۳۲	۰٫۵۲	۱٫۴۱	۲٫۸۲	۰٫۴۸	۰٫۵۱
Ni (ppm)	۷۲٫۸۸	۵۶٫۱۸	۲۵٫۰۰	۶۳٫۰۰	۶۴۱٫۰۰	۵٫۹۸	۴۱٫۰۸
P (%)	۰٫۰۶	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۵	۰٫۱۰	۰٫۶۲	۰٫۹۱
Pb (ppm)	۳۱٫۳۶	۵٫۵۹	۱۰٫۰۰	۳۱٫۰۰	۶۲٫۰۰	۰٫۲۹	۱٫۷۴
Sb (ppm)	۳۰٫۹۹	۳٫۰۳	۳۰٫۰۰	۳۰٫۰۰	۷۰٫۰۰	۵٫۸۹	۵۲٫۵۷
Si (%)	۲۶٫۶۵	۱٫۶۸	۲۰٫۰۷	۲۶٫۷۹	۳۲٫۵۳	-۰٫۴۰	۱٫۰۲
Sr (ppm)	۵۷۹٫۸۷	۱۵۰٫۹۴	۳۵۹٫۰۰	۵۴۸٫۵۰	۱۸۷۳٫۰۰	۳٫۶۷	۲۱٫۳۵
Ti (%)	۰٫۴۵	۰٫۰۷	۰٫۲۳	۰٫۴۵	۰٫۶۵	۰٫۲۰	-۰٫۰۵
V (ppm)	۱۰۰٫۸۲	۱۶٫۶۱	۴۵٫۰۰	۱۰۳٫۰۰	۱۶۰٫۰۰	-۰٫۱۶	۰٫۴۸
Y (ppm)	۵۳٫۰۶	۹٫۹۸	۵۰٫۰۰	۵۰٫۰۰	۱۸۵٫۰۰	۶٫۱۹	۵۷٫۹۷
Zn (ppm)	۶۹٫۸۶	۲۷٫۶۱	۲۵٫۰۰	۶۵٫۵۰	۲۲۷٫۰۰	۱٫۶۶	۴٫۶۹
Zr (ppm)	۲۱۱٫۸۵	۵۲٫۴۷	۹۹٫۰۰	۲۰۳٫۰۰	۴۹۶٫۰۰	۱٫۱۵	۲٫۵۵



شکل ۳: موقعیت آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب جمعی (نواحی قرمز) و نمونه‌های ژئوشیمیایی در ورقه قاین

جدول ۲ نتایج طبقه‌بندی داده‌های نامتوازن با شبکه عصبی مصنوعی و با استفاده از الگوریتم MLP را نشان می‌دهد. در این روش از دو لایه پنهان با ۲۱ نورون، تابع فعال‌سازی لایه پنهان از نوع Gaussian، تابع فعال‌سازی خروجی Softmax و تابع خطا از نوع آنتروپی برای مدل کردن داده‌ها استفاده شده است. مقدار صحت کلی طبقه‌بندی برای داده‌های آموزشی و آزمایشی به ترتیب برابر ۸۹/۱ و ۸۵/۵ درصد و برای هر کلاس نیز در جدول آمده است.

از داده‌های جدول ۲ دو نکته را می‌توان نتیجه گرفت. نکته اول اینکه، صحت طبقه‌بندی داده‌های کلاس زمینه در روش SVM نسبت به روش ANN کمی بالاتر است. در مقابل صحت طبقه‌بندی داده‌های کلاس آنومالی در روش ANN کمی بیشتر از روش SVM است؛ بنابراین می‌توان گفت که روش ANN نسبت به روش SVM به داده‌های نامتوازن کمی مقاوم‌تر است. نکته دوم اینکه، علیرغم بالا بودن متوسط صحت طبقه‌بندی در هر دو روش (حدود ۸۷ درصد)، صحت طبقه‌بندی داده‌های کلاس اقلیت خیلی پایین است؛ بنابراین برای داشتن طبقه‌بندی با صحت قابل قبول و کاهش احتمال برآورد نمونه‌های کلاس اقلیت، نیاز به متوازن کردن داده‌های آموزشی خواهد بود.

۴- پردازش داده‌های ژئوشیمیایی

با توجه به ماهیت ترکیبی یا بسته بودن داده‌های ژئوشیمیایی (داشتن مجموع مقادیر ثابت ۱ یا ۱۰۰ درصد)، از روش‌های انتقال نسبت لگاریتمی (نسبت لگاریتمی افزایشی: \ln ، نسبت لگاریتمی میان مرکز: clr و نسبت لگاریتمی ایزومتریک: ilr) می‌توان برای تبدیل آن‌ها از سیستم بسته به باز استفاده کرد. در این مقاله به دلیل حفظ بعد داده‌ها، از روش clr استفاده شده است. در مرحله بعدی و برای کلاسه‌بندی نمونه‌های ژئوشیمیایی، روش آنومالی ژئوشیمیایی مرکب جمعی بکار رفته است. برای این منظور ابتدا داده‌های استاندارد شده (انتقال داده‌ها به یک باز مشخص مثلاً صفر تا یک)، عیار جمعی محاسبه و سپس داده‌های جامعه آنومالی از زمینه به روش فرکتال عیار-مساحت از هم تفکیک گردیده است [۴۹، ۵۰]. مطابق شکل ۳ که در آن موقعیت آنومالی‌های مرکب جمعی بر اساس حوزه آبریز هر نمونه به نمایش گذاشته شده است، از ۶۵۲ نمونه، ۸۹ نمونه در محدوده‌ی آنومالی‌ها قرار دارند؛ بنابراین ۵۶۳ نمونه متعلق به جامعه زمینه (کلاس اکثریت) و ۸۹ نمونه متعلق به جامعه آنومالی (کلاس اقلیت) خواهد بود. در نتیجه نسبت عدم توازن داده‌ها برابر ۶/۳ است.

برای طبقه‌بندی یا کلاسه‌بندی، داده‌ها به صورت تصادفی به دو بخش داده‌های آموزشی (حدود ۸۰ درصد داده‌ها؛ یعنی ۴۵۰ نمونه‌ی کلاس اکثریت بعلاوه ۷۱ نمونه‌ی کلاس اقلیت و مجموعاً ۵۲۱ نمونه) و داده‌های آزمایشی (حدود ۲۰ درصد داده‌ها؛ یعنی ۱۱۳ نمونه‌ی کلاس اکثریت بعلاوه ۱۸ نمونه‌ی کلاس اقلیت و مجموعاً ۱۳۱ نمونه) تفکیک شده است. طبقه‌بندی بر روی داده‌های به روش ماشین بردار پشتیبان^{۱۹} (SVM) و شبکه عصبی مصنوعی^{۲۰} (ANN) به‌عنوان دو روش شناخته‌شده و دارای اعتبار بالا انجام شده است. جدول ۲ نتایج طبقه‌بندی داده‌های اولیه (داده‌های نامتوازن) را با دو روش یادشده نشان می‌دهد که به کمک نرم‌افزار Statistica 14 صورت گرفته است. در روش SVM از تابع کرنل RBF با مقادیر $\gamma = 0.04$ و $c = 7$ استفاده شده است. بهینه‌سازی پارامترهای طبقه‌بندی نیز به روش 10-Fold Cross-Validation صورت گرفته است. مطابق داده‌های جدول ۲، صحت کلی طبقه‌بندی داده‌های آموزشی ۸۸/۹ درصد و داده‌های آزمایشی ۸۰/۹ درصد است.

جدول ۲: نتایج طبقه‌بندی داده‌های نامتوازن به دو روش SVM و ANN

		کلاس‌های پیش‌بینی شده							
		روش SVM				روش ANN			
		داده‌های آموزشی		داده‌های آزمایشی		داده‌های آموزشی		داده‌های آزمایشی	
		زمینه	آنومالی	زمینه	آنومالی	زمینه	آنومالی	زمینه	آنومالی
کلاس‌های واقعی	زمینه	۴۲۸	۲۲	۹۸	۱۵	۴۲۶	۲۴	۱۰۲	۱۱
	آنومالی	۳۶	۳۵	۱۰	۸	۳۳	۳۸	۸	۱۰
	صحت (%)	۹۵٫۱	۴۹٫۳	۸۶٫۷	۴۴٫۴	۹۴٫۷	۵۳٫۵	۹۰٫۳	۵۵٫۵

درصد به‌دست‌آمده است. در حالی که در روش طبقه‌بندی ANN بیشترین و کمترین صحت کلی به ترتیب با الگوریتم‌های ADASYN و BUS و برابر ۹۷٫۷ و ۸۴٫۷ درصد برآورد شده است. جدول ۳ صحت طبقه‌بندی هر کلاس و برای هر الگوریتم را به تفکیک نشان می‌دهد.

داده‌های جدول ۳ نشان می‌دهند که اولاً، روش طبقه‌بندی ANN از صحت کلی بالاتری نسبت به روش SVM برخوردار است. ثانیاً، الگوریتم‌های نمونه‌گیری افزایشی بالاترین صحت کلی طبقه‌بندی را دارند و الگوریتم‌های نمونه‌گیری ترکیبی و الگوریتم‌های نمونه‌گیری کاهشی به ترتیب در جایگاه‌های بعدی قرار دارند. ثالثاً، اختلاف معنی‌داری که بین صحت طبقه‌بندی کلاس‌های اقلیت و اکثریت در داده‌های نامتوازن وجود داشت (داده‌های جدول ۲)، در داده‌های متوازن وجود ندارد (داده‌های جدول ۳) و حتی در بعضی الگوریتم‌ها، صحت کلاس‌بندی داده‌های آزمایشی کلاس اقلیت از کلاس اکثریت بیشتر نیز شده است.

در ادامه و برای متوازن کردن داده‌ها، از شش الگوریتم شرح داده‌شده در بخش ۲ مقاله استفاده شده است. این محاسبات در نرم‌افزار MATLAB و نرم‌افزار داده‌کاوی Keel صورت گرفته است. تعداد نمونه‌های الگوریتم SMOTE و ADASYN برابر ۹۰۰ عدد (۴۵۰ نمونه کلاس زمینه و ۴۵۰ نمونه کلاس آنومالی)، تعداد نمونه‌های الگوریتم BUS و OSS برابر ۱۴۲ عدد (۷۱ نمونه کلاس زمینه و ۷۱ نمونه کلاس آنومالی) و تعداد نمونه‌های الگوریتم SMOTE-Tomek و ADASYN-CNN برابر ۷۲۰ عدد (۳۶۰ نمونه کلاس زمینه و ۳۶۰ نمونه کلاس آنومالی) محاسبه و انتخاب گردیده است. مدل‌سازی این داده‌های متوازن به دو روش SVM و ANN انجام شده و مدل به‌دست‌آمده برای طبقه‌بندی مجدد داده‌های آزمایشی بکار رفته است که جدول ۳ نتایج آن‌ها را نشان می‌دهد. در روش طبقه‌بندی SVM بالاترین صحت کلی با الگوریتم SMOTE و برابر ۹۰٫۸ درصد و کمترین صحت کلی با الگوریتم BUS و برابر ۷۷٫۱

جدول ۳: نتایج طبقه‌بندی داده‌های آزمایشی با مدل‌های متوازن به دو روش SVM و ANN

نوع داده		کلاس‌های پیش‌بینی شده								
		SMOTE				ADASYN				
		روش SVM		روش ANN		روش SVM		روش ANN		
		زمینه	آنومالی	زمینه	آنومالی	زمینه	آنومالی	زمینه	آنومالی	
کلاس‌های واقعی	زمینه	۱۰۲	۱۱	۱۱۱	۲	۱۰۰	۱۳	۱۱۲	۱	
	آنومالی	۱	۱۷	۲	۱۶	۱	۱۷	۳	۱۶	
	صحت (%)	۹۰٫۳	۹۴٫۴	۹۸٫۲	۸۹٫۹	۸۸٫۵	۹۴٫۴	۹۹٫۱	۸۹٫۹	
نوع داده		BUS				OSS				
		زمینه	۸۸	۲۵	۹۵	۱۸	۸۹	۲۴	۹۹	۱۴
		آنومالی	۵	۱۳	۲	۱۶	۵	۱۳	۲	۱۶
صحت (%)	۷۷٫۹	۷۲٫۲	۸۴٫۱	۸۹٫۹	۷۸٫۸	۷۲٫۲	۸۷٫۶	۸۹٫۹		
نوع داده		SMOTE-Tomek				ADASYN-CNN				
		زمینه	۹۳	۲۰	۱۰۷	۶	۱۰۱	۱۲	۱۱۰	۳
		آنومالی	۱	۱۷	۱	۱۷	۱	۱۷	۲	۱۶
صحت (%)	۸۲٫۳	۹۴٫۴	۹۴٫۷	۹۴٫۴	۹۸٫۳	۹۴٫۴	۹۷٫۳	۸۹٫۹		

۵- مقایسه الگوریتم‌های متوازن‌سازی

تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی ورقه قاین نشان داد که نتایج طبقه‌بندی داده‌های نامتوازن با داده‌های متوازن کاملاً متفاوت است. همچنین نتایج الگوریتم‌های متوازن‌سازی داده‌ها نیز کمی با یکدیگر تفاوت دارند. در ادامه و برای مقایسه نتایج از دو ابزار سنج‌های ماتریس درهم‌ریختگی و بررسی نقشه مرتبط با داده‌های اکتشافی منطقه مورد مطالعه استفاده شده است.

۵-۱- سنج‌های ماتریس درهم‌ریختگی

استفاده از ماتریس درهم‌ریختگی (ماتریس داده‌های جدول ۲ و ۳) و سنج‌هایی که بر اساس داده‌های این ماتریس تعریف می‌شوند، یکی از روش‌های ارزشیابی کارایی مدل‌های طبقه‌بندی است. اگر TP و FN به ترتیب تعداد نمونه‌های جامعه آنومالی درست و نادرست طبقه‌بندی شده باشد، FP و TN نیز به ترتیب تعداد نمونه‌های جامعه زمینه نادرست و درست طبقه‌بندی شده، P تعداد نمونه‌های جامعه آنومالی و N تعداد نمونه‌های جامعه زمینه در نظر گرفته شود، سنج‌های کمی ارزیابی مدل طبقه‌بندی را می‌توان مطابق جدول ۴ تعریف نمود.

جدول ۴: سنج‌های کمی ارزیابی مدل‌های طبقه‌بندی [۳۹،۲۳]

سنجه	پارامتر	فرمول
صحت	AC	$\frac{TP + TN}{P + N}$
خطا	ER	$\frac{FP + FN}{P + N}$
حساسیت	S or R	$\frac{TP}{P}$
وضوح	SP	$\frac{TN}{N}$
دقت	P	$\frac{TP}{TP + FP}$
امتیاز-F	F-Score	$\frac{2 \times P \times S}{P + S}$
مقدار-F	F-Value	$\frac{(1 + \beta^2) \times P \times S}{\beta^2 \times P + S}$
میانگین-G	G-Mean	$\sqrt{S \times SP}$
سطح زیر منحنی	AUC	$\frac{1}{2} \left(1 + \frac{TP}{TP + FN} - \frac{FP}{FP + TN} \right)$

جدول ۵ مقادیر سنج‌های دو ماتریس درهم‌ریختگی داده‌های نامتوازن و متوازن (جدول‌های ۲ و ۳) را برای داده‌های آزمایشی نشان می‌دهد. مقادیر صحت (AC) و خطا

(ER) نشان می‌دهند که متوازن کردن داده‌ها، حدود ۱۰ درصد صحت را افزایش و همین مقدار خطا را کاهش داده است (به‌استثنا الگوریتم‌های نمونه‌گیری کاهشی). همچنین روش طبقه‌بندی ANN از صحت بالاتر و خطای کمتر نسبت به روش طبقه‌بندی SVM برخوردار است. به‌طوری‌که بالاترین صحت و کمترین خطا متعلق به روش طبقه‌بندی ANN با الگوریتم متوازن‌سازی ADASYN است.

مقادیر حساسیت (S) و وضوح (SP) در جدول ۵ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی صحت طبقه‌بندی کلاس زمینه و آنومالی است. داده‌های حساسیت این جدول نشان می‌دهد اگرچه متوازن‌سازی در بعضی مواقع صحت طبقه‌بندی کلاس زمینه را افزایش داده است ولی این افزایش معنی‌دار نیست. در مقابل مقادیر وضوح نشان‌دهنده‌ی افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در طبقه‌بندی داده‌های متوازن کلاس آنومالی است. به‌طوری‌که این افزایش تا حدود ۵۰ درصد نیز رسیده است. بیشترین مقدار صحت طبقه‌بندی کلاس زمینه (S) متعلق به روش طبقه‌بندی ANN با الگوریتم متوازن‌سازی ADASYN و برابر ۰/۹۹۱ است و بالاترین مقدار صحت طبقه‌بندی کلاس آنومالی (SP) برابر ۰/۹۴۴ است که در چندین الگوریتم متوازن‌سازی و هر دو روش طبقه‌بندی خصوصاً روش SVM به‌دست‌آمده است. مقادیر دقت (P) در جدول ۵ نشان‌دهنده‌ی نسبت تعداد نمونه‌های کلاس زمینه است که به‌درستی طبقه‌بندی شده‌اند. داده‌های این سنج نشان می‌دهد که متوازن‌سازی توانسته است، دقت طبقه‌بندی را بین ۶-۹ درصد افزایش دهد. بالاترین دقت برابر ۰/۹۹۱ و به روش طبقه‌بندی ANN با الگوریتم متوازن‌سازی SMOTE-Tomek به‌دست‌آمده است. دو سنج F-Score و F-Value نیز ترکیب یا میانگین هارمونیک دو سنج دقت و حساسیت (یا Recall) را نشان می‌دهند. این سنج‌ها تمامیت طبقه‌بندی درست داده‌های کلاس زمینه هستند. داده‌های جدول ۵ نشان‌دهنده‌ی افزایش این دو سنج با متوازن‌سازی داده‌ها است. در این دو سنج نیز همانند سنج‌های قبلی تأثیر الگوریتم‌های نمونه‌گیری کاهشی کمتر است. به‌طوری‌که بالاترین مقدار توسط الگوریتم ADASYN-CNN به‌دست‌آمده است.

جدول ۵: مقادیر سنج‌های ماتریس درهم‌ریختگی داده‌های آزمایشی

روش	نوع داده	متوازن						
		نامتوازن	متوازن					
			SMOTE	ADASYN	RUS	OSS	SMOTE-Tomek	ADASYN-CNN
SVM	AC	۰,۸۰۹	۰,۹۰۸	۰,۸۹۳	۰,۷۷۱	۰,۷۷۹	۰,۸۳۹	۰,۹۰۱
	ER	۰,۱۹۱	۰,۰۹۲	۰,۱۰۷	۰,۲۲۹	۰,۲۲۱	۰,۱۶۱	۰,۰۹۹
	S	۰,۸۶۷	۰,۹۰۳	۰,۸۸۵	۰,۸۸۵	۰,۷۷۹	۰,۸۲۳	۰,۹۸۳
	SP	۰,۴۴۴	۰,۹۴۴	۰,۹۴۴	۰,۹۴۴	۰,۷۲۲	۰,۹۴۴	۰,۹۴۴
	P	۰,۹۰۷	۰,۹۹۰	۰,۹۹۰	۰,۹۴۶	۰,۹۴۷	۰,۹۸۹	۰,۹۹۰
	F-Score	۰,۸۸۷	۰,۹۴۵	۰,۹۳۵	۰,۹۱۴	۰,۸۵۵	۰,۸۹۸	۰,۹۸۶
	F-Value	۰,۸۹۹	۰,۹۷۱	۰,۹۶۷	۰,۹۳۳	۰,۹۰۸	۰,۹۵۱	۰,۹۸۹
	G-Mean	۰,۶۲۰	۰,۹۲۳	۰,۹۱۴	۰,۹۱۴	۰,۷۵۰	۰,۹۳۴	۰,۹۶۳
	AUC	۰,۶۵۶	۰,۹۲۳	۰,۹۱۵	۰,۷۵۰	۰,۷۵۵	۰,۸۸۴	۰,۹۱۹
ANN	AC	۰,۸۵۵	۰,۹۶۹	۰,۹۷۷	۰,۸۴۷	۰,۸۷۸	۰,۹۴۷	۰,۹۶۲
	ER	۰,۱۴۵	۰,۰۳۱	۰,۰۲۳	۰,۱۵۳	۰,۱۲۲	۰,۰۵۳	۰,۰۳۸
	S	۰,۹۰۳	۰,۹۸۲	۰,۹۹۱	۰,۸۴۱	۰,۸۷۶	۰,۹۴۷	۰,۹۷۳
	SP	۰,۵۵۵	۰,۸۹۹	۰,۸۹۹	۰,۸۹۹	۰,۸۹۹	۰,۹۴۴	۰,۸۹۹
	P	۰,۹۲۷	۰,۹۸۲	۰,۹۷۴	۰,۹۷۹	۰,۹۸۰	۰,۹۹۱	۰,۹۸۲
	F-Score	۰,۹۱۵	۰,۹۸۲	۰,۹۸۲	۰,۹۰۵	۰,۹۲۵	۰,۹۶۹	۰,۹۷۷
	F-Value	۰,۹۲۲	۰,۹۸۲	۰,۹۷۷	۰,۹۴۸	۰,۹۵۷	۰,۹۸۲	۰,۹۸۱
	G-Mean	۰,۷۰۸	۰,۹۳۹	۰,۹۴۳	۰,۸۷۰	۰,۸۸۷	۰,۹۴۵	۰,۹۳۵
	AUC	۰,۷۲۹	۰,۹۳۶	۰,۹۱۲	۰,۸۶۵	۰,۸۸۲	۰,۹۴۶	۰,۹۳۱

گرفت که متوازن‌سازی داده‌ها توانسته است مقدار کلیه سنج‌ها را افزایش و مقدار سنج خطا را کاهش دهد. همچنین سه نکته کلی به‌دست‌آمده از نتایج جدول ۳ برای داده‌های این جدول نیز برقرار است. در مجموع می‌توان الگوریتم ADASYN-CNN در روش طبقه‌بندی SVM و الگوریتم SMOTE در روش طبقه‌بندی ANN را به‌عنوان بهترین روش (به دلیل داشتن بالاترین مقدار مجموع سنج‌ها) پیشنهاد نمود.

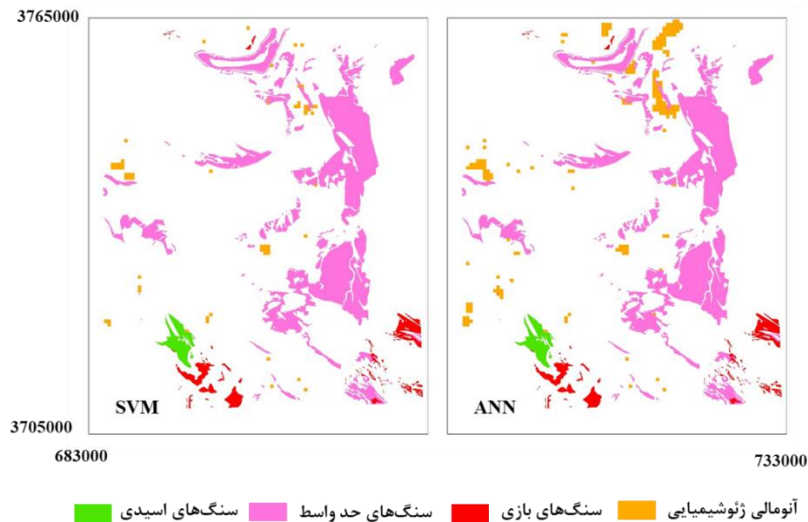
۲-۵- نقشه‌های مرتبط با داده‌های اکتشافی

در ادامه از مدل‌های به‌دست‌آمده از داده‌های متوازن برای تهیه نقشه‌ی آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. برای این منظور عیار هر یک از عناصر در سلول‌های 500×500 متری به کمک روش عکس مجذور فاصله برآورد گردید. تعداد کل سلول‌ها در برگه قاین، 12221 عدد است و ماتریس داده‌ها 12221×27 خواهد بود. در ابتدا نقشه‌ی آنومالی‌های ژئوشیمیایی منطقه مورد مطالعه به کمک داده‌های نامتوازن برآورد گردید که شکل ۴ نقشه‌ی این آنومالی‌ها را به دو روش طبقه‌بندی SVM و ANN نشان می‌دهد.

سنج G-Mean نشان‌دهنده‌ی دقت کلی طبقه‌بندی هم‌زمان کلاس‌های زمینه و آنومالی است و یک ارزیابی متعادلی از عملکرد روش طبقه‌بندی را ارائه می‌دهد. داده‌های جدول ۵ نشان می‌دهند که یک افزایش حدود ۳۰ درصد در کمیت این سنج در داده‌های متوازن شده نسبت به داده‌های نامتوازن به وجود آمده است. بالاترین مقدار این سنج برابر $0,963$ است که در روش طبقه‌بندی SVM با الگوریتم ADASYN-CNN به‌دست‌آمده است.

سنج AUC سطح زیر منحنی ROC^۳ را نشان می‌دهد که در بهترین حالت مقدار آن می‌توان برابر ۱ باشد. داده‌های جدول ۵ نشان‌دهنده‌ی افزایش قابل‌ملاحظه‌ای (حدود ۲۰ درصدی) در کمیت این سنج با متوازن کردن داده‌ها است. بیشترین مقدار این سنج با روش طبقه‌بندی ANN و الگوریتم SMOTE-Tomek به‌دست‌آمده است که برابر $0,946$ است.

سنج‌های ماتریس درهم‌ریختگی در بازه $[0, 1]$ تغییر می‌کنند. در حالت ایده‌آل و بهترین وضعیت، مقدار آن‌ها برای کلیه سنج‌ها برابر یک و برای سنج خطا برابر صفر خواهد بود؛ بنابراین از داده‌های جدول ۵ می‌توان نتیجه



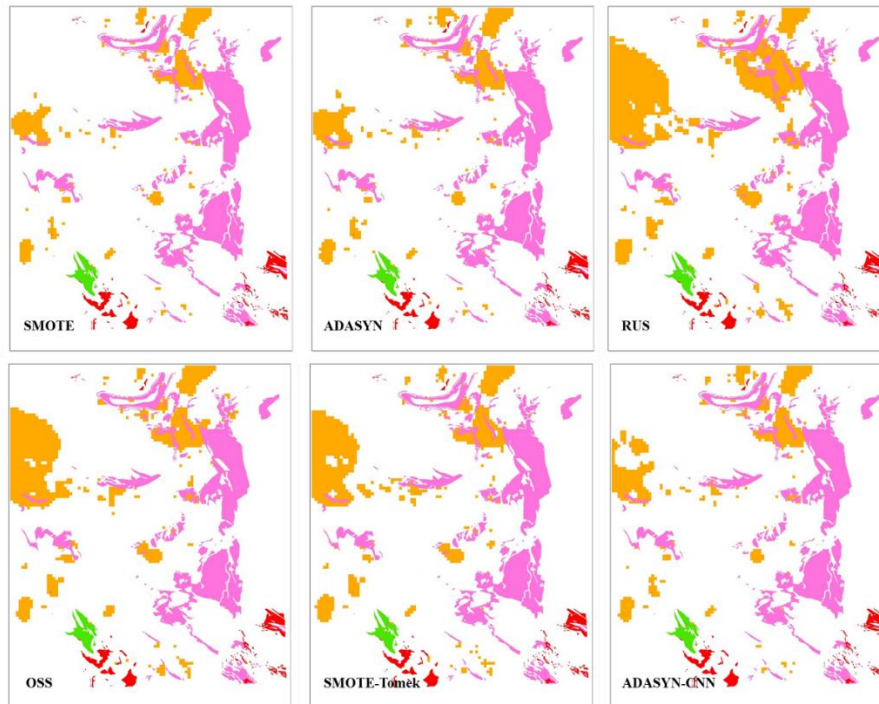
شکل ۴: نقشه‌ی آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب بر گه قاین بر آورده شده با داده‌های نامتوازن به همراه موقعیت واحدهای سنگی آذرین

سنگ‌های آذرین حد واسط نشان می‌دهند. اگرچه افزایش وسعت آنومالی به دست آمده می‌تواند احتمال کشف کانی‌سازی را افزایش می‌دهد؛ ولی در مقابل می‌تواند باعث افزایش هزینه‌های اکتشافی در فازهای بعدی نیز گردد. لذا تأیید این نکته نیازمند مطالعات و برداشت‌های صحرایی است. در مجموع، آنومالی‌های شکل‌های SMOTE-۵ و ۵-ADASYN-CNN بیشتر درصد همپوشانی را با سنگ‌های آذرین در بر گه مورد مطالعه دارند.

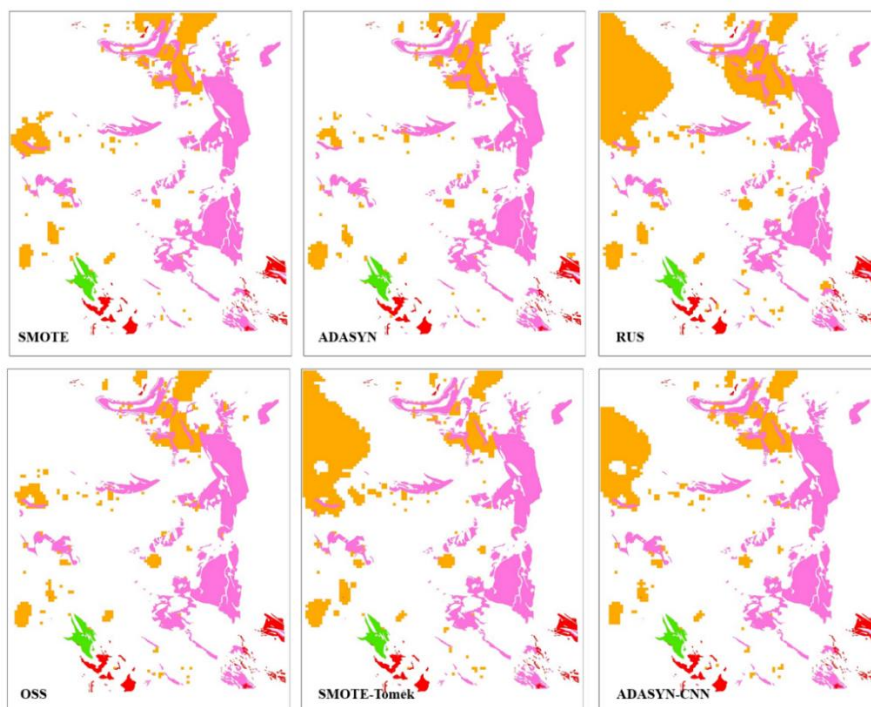
شکل ۶ طبقه‌بندی داده‌های کل بر گه قاین را توسط مدل‌های به دست آمده از داده‌های متوازن و به روش ANN نشان می‌دهد. وسعت آنومالی‌های ژئوشیمیایی به دست آمده توسط الگوریتم‌های SMOTE، ADASYN، OSS، RUS، و SMOTE-Tomek به ترتیب ۱۷۲٫۷۵، ۱۴۶٫۲۵، ۳۸۴٫۲۵، ۱۵۷، ۳۱۲٫۲۵ و ۲۴۵٫۲۵ کیلومتر مربع هستند. بیشترین وسعت آنومالی‌ها در این روش نیز همانند روش SVM توسط الگوریتم متوازن سازی RUS به دست آمده که در بخش شمال غربی بر گه خود را نشان می‌دهند و با سنگ‌های آذرین همپوشانی ندارد. این نتیجه با داده‌های جدول ۵ مطابقت دارد. بالاترین درصد همپوشانی آنومالی‌ها با واحدهای سنگی آذرین متعلق به شکل‌های SMOTE-۶ و ۶-ADASYN است؛ بنابراین، به لحاظ تطابق موقعیت آنومالی‌های شکل‌های ۵ و ۶ با شکل ۳ و همپوشانی با سنگ‌های آذرین می‌توان الگوریتم‌های نمونه‌گیری افزایشی (SMOTE و ADASYN) و سپس الگوریتم‌های ترکیبی (ADASYN-CNN) را معرفی نمود.

مساحت محدوده‌ی آنومالی‌ها در نقشه SVM-۴ حدود ۱۶ کیلومتر مربع و برای شکل ANN-۴ نیز $50,25 \text{ Km}^2$ است. شکل ۴ نشان می‌دهد که موقعیت آنومالی‌های ژئوشیمیایی بر آورده شده، همپوشانی کمی با واحدهای سنگی آذرین در منطقه مورد مطالعه دارد. مساحت کم آنومالی‌ها می‌تواند یکی از این دلایل این مسئله باشد. هر چند در بخش شمالی بر گه (خصوصاً در شکل ANN-۴)، بخشی از آنومالی‌ها با سنگ‌های آذرین حد واسط همپوشانی نشان می‌دهند.

شکل ۵ نقشه‌های آنومالی‌های ژئوشیمیایی در بر گه قاین را نشان می‌دهد که به روش طبقه‌بندی SVM و با کمک مدل‌های تهیه شده توسط شش الگوریتم متوازن سازی داده‌ها حاصل شده است. وسعت آنومالی‌ها در این نقشه‌ها نسبت به داده‌های نامتوازن (شکل ۴) افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است. به طوری بیشترین وسعت آنومالی‌ها متعلق به الگوریتم RUS با $252,25 \text{ Km}^2$ و کمترین وسعت متعلق به الگوریتم SMOTE با 135 Km^2 است. وسعت آنومالی‌ها در سایر الگوریتم‌ها ADASYN، OSS، SMOTE-Tomek و ADASYN-CNN نیز به ترتیب ۱۵۹٫۲۵، ۲۸۲٫۷۵، ۲۵۰٫۷۵ و $168,75 \text{ Km}^2$ کیلومتر مربع است. افزایش زیاد وسعت آنومالی‌های ژئوشیمیایی در سه شکل RUS-۵، OSS-۵ و SMOTE-Tomek-۵ بیشتر متعلق به آنومالی شمال-غربی بر گه است که همپوشانی کمی با سنگ‌های آذرین دارد و بیشتر در داخل سنگ‌های رسوبی قرار دارد. در مقابل، آنومالی‌های شمالی بر گه در شکل‌های SMOTE-۵، ۵-ADASYN و ۵-ADASYN-CNN همپوشانی بالای با



شکل ۵: نقشه‌ی آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب بر آورده شده با داده‌های متوازن به روش طبقه‌بندی SVM (راهنما همانند شکل ۴)



شکل ۶: نقشه‌ی آنومالی‌های ژئوشیمیایی مرکب بر آورده شده با داده‌های متوازن به روش طبقه‌بندی ANN (راهنما همانند شکل ۴)

باندی بر روی تصویر آستر منطقه مورد مطالعه به دست آمده است. برای این منظور ابتدا تصحیح اتمسفری و هندسی بر روی تصویر صورت گرفته و سپس از نسبت‌های باندی $8/(7+9)$ برای تعیین کانی‌های اپیدوت، کلریت و کربنات‌های مرتبط با آلتراسیون پروپیلیتیک، نسبت باندی $5/(4+6)$ برای

در ادامه، ارتباط آنومالی‌های ژئوشیمیایی با آلتراسیون‌ها و گسل‌های اصلی مورد بررسی قرار گرفته است که می‌تواند به صحت آنومالی‌ها کمک نماید. شکل ۷ پراکندگی آلتراسیون‌های هیدروترمال و گسل‌های اصلی را در ورقه قاین نشان می‌دهد. آلتراسیون‌ها به کمک روش نسبت‌گیری

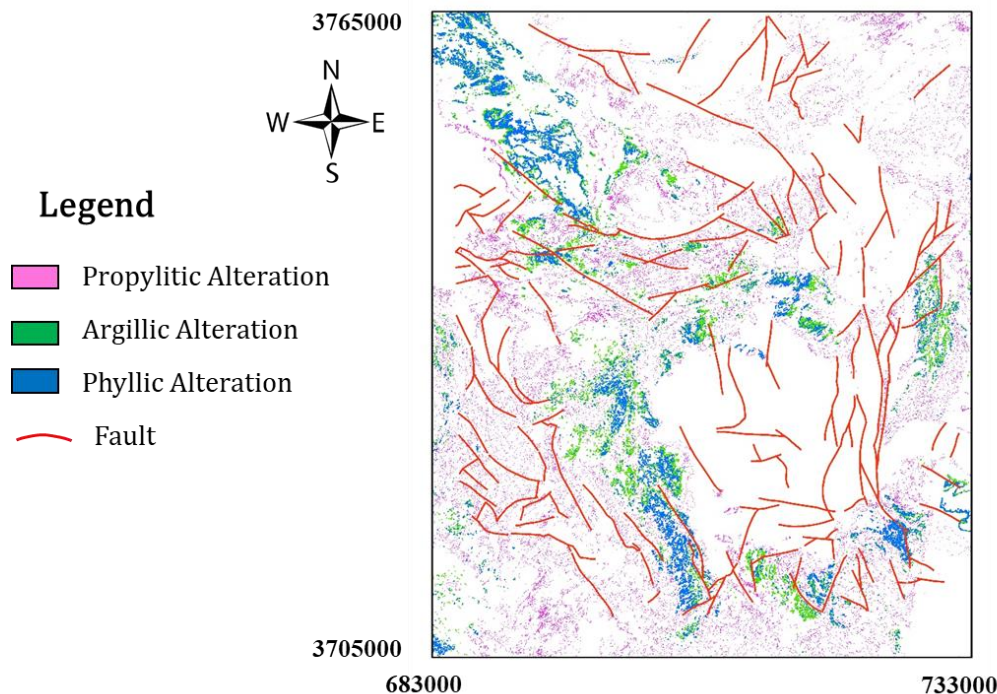
سنگ‌های آهنی نشان می‌دهد. مقایسه شکل ۷ با شکل‌های ۵ و ۶، نشان‌دهنده‌ی همپوشانی آلتراسیون‌های پروپیلیتیک با آنومالی‌های ژئوشیمیایی در بخش شمال شرقی دارد. بهترین همپوشانی آنومالی‌های ژئوشیمیایی متعلق به الگوریتم‌های نمونه‌گیری افزایشی (SMOTE و ADASYN) و سپس الگوریتم‌های ترکیبی (از قبیل ADASYN-CNN) است.

گسل‌های اصلی ورقه قاین در شکل ۷ را می‌توان از لحاظ راستا به سه بخش تقسیم نمود. گسل‌های شمالی-جنوبی که بیشتر در بخش شرقی و میانی ورقه قرار دارند و با آلتراسیون‌ها و آنومالی‌های ژئوشیمیایی ارتباط ندارند. گسل‌های شمال غربی- جنوب شرقی در بخش جنوب غربی ورقه می‌توانند با آنومالی‌های ژئوشیمیایی دارای همپوشانی با سنگ‌های اسیدی و بازی مرتبط باشند که در کلیه الگوریتم‌های شکل‌های ۵ و ۶ قابل مشاهده است. در حالی که گسل‌های شمال شرقی- جنوب غربی بیشتر در بخش شمال شرقی ورقه قرار دارند و با آنومالی‌های ژئوشیمیایی الگوریتم‌های نمونه‌گیری افزایشی و ترکیبی همپوشانی دارند. البته تأیید مطالب ذکر نشده نیازمند مطالعات صحرایی است.

تعیین کانی‌های کائولینیت و مونت‌موریلونیت مرتبط با آلتراسیون آرژیلیک و نسبت باندی $6/(5+7)$ برای تعیین کانی‌های مسکویت و ایلیت مرتبط با آلتراسیون فیلیک استفاده شده است [۵۶، ۵۷].

آلتراسیون‌های فیلیک بخش میانی و جنوبی ورقه قاین، نشان داده شده در شکل ۷، در مرز بین سنگ‌های آذرین و واحدهای رسوبی قرار دارند. از آنجاکه این آلتراسیون در نزدیکی توده کانی‌سازی به وجود می‌آید، بنابراین احتمال کانی‌سازی در آن‌ها نسبت به سایر بخش‌های ورقه می‌تواند بیشتر باشد. آلتراسیون‌های آرژیلیک و فیلیک در کل ورقه همپوشانی بالای با هم دارند. وجود این آلتراسیون‌ها در بخش شمال غربی ورقه و همپوشانی آن‌ها با رسوبات آواری همان طور که قبلاً نیز ذکر شد، نمی‌تواند با کانی‌سازی مرتبط باشد؛ بنابراین روش‌های متوازن‌سازی که آنومالی‌های ژئوشیمیایی بزرگی در این بخش از ورقه نشان می‌دهند (همانند الگوریتم‌های نمونه‌گیری کاهشی)، نمی‌تواند از اعتبار برخوردار باشد.

در مقابل، آلتراسیون پروپیلیتیک در کل ورقه قاین پراکنده بوده و همپوشانی خوب با واحدهای رسوبی بخصوص



شکل ۷: پراکندگی آلتراسیون‌های هیدروترمال و گسل‌های اصلی در ورقه قاین

۶- نتیجه‌گیری

داده‌های اکتشافی (خصوصاً داده‌های ژئوشیمیایی) ماهیت نامتوازن دارند. طبقه‌بندی با داده‌های نامتوازن باعث ایجاد مدلی آریب‌دار، کاهش دقت مدل و کم شدن احتمال تعلق نمونه‌های جدید به کلاس‌های اقلیت (که از حساسیت بالاتری برخوردار است) می‌شود. در این مقاله، سه دسته الگوریتم نمونه‌گیری افزایشی (SMOTE و ADASYN)، نمونه‌گیری کاهشی (RUS و OSS) و نمونه‌گیری ترکیبی (SMOTE-Tomek و ADASYN-CNN) برای متوازن‌سازی داده‌ها معرفی گردید و کاربرد آن‌ها توسط دو روش طبقه‌بندی SVM و ANN بر روی داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراه‌ای برگه قاین بررسی شد. نتایج نشان داد که روش طبقه‌بندی ANN به دلیل استفاده از لایه‌های پنهان و نورون‌های زیاد از کارایی بالاتری نسبت به روش SVM برخوردار است. نتایج این مقاله نشان داد که متوازن‌سازی داده‌ها می‌تواند افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در کلیه سنجه‌های ماتریس درهم‌ریختگی و کاهش قابل‌توجه در سنجه خطا ایجاد نماید (کمیت سنجه‌های ماتریس درهم‌ریختگی مثل صحت، حساسیت، وضوح، دقت، امتیاز-F، مقدار-F، میانگین-G و سطح زیر منحنی به میزان ۱۰ تا ۵۰ درصد و کاهش حدود ۱۰ درصدی در سنجه خطا). به‌طوری‌که الگوریتم‌های نمونه‌گیری افزایشی بالاترین مقدار سنجه‌های ماتریس درهم‌ریختگی را دارند و الگوریتم‌های نمونه‌گیری ترکیبی و الگوریتم‌های نمونه‌گیری کاهشی به ترتیب در جایگاه‌های بعدی قرار دارند. همچنین نقشه‌های آنومالی‌های ژئوشیمیایی مدل‌سازی شده توسط الگوریتم‌های متوازن‌سازی در برگه قاین نشان دادند که این مدل‌ها می‌توانند ضمن افزایش وسعت آنومالی‌ها، همپوشانی خوبی بین آنومالی‌ها با واحدهای سنگی حاوی کانی‌سازی برقرار نمایند. نقشه پراکندگی آلتراسیون‌های هیدروترمال (پروپیلیتیک، آرژیلیک و فیلیک) و گسل‌های اصلی در ورقه قاین نیز نشان می‌دهد که آنومالی‌های شمال شرقی ورقه در اولویت اول احتمال کانی‌سازی و آنومالی‌های جنوب‌غربی در اولویت دوم قرار دارند. مقایسه آنومالی‌های ژئوشیمیایی به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های متوازن‌سازی با شواهد زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که نقشه‌های پراکندگی آنومالی‌های ژئوشیمیایی به‌دست‌آمده از

الگوریتم‌های نمونه‌گیری افزایشی (SMOTE و ADASYN) و سپس الگوریتم ترکیبی (ADASYN-CNN) در این زمینه از عملکرد بالاتری برخوردار بودند؛ بنابراین متوازن‌سازی داده‌ها قبل از طبقه‌بندی پیشنهاد این مقاله است که می‌تواند باعث افزایش دقت، صحت و کارایی مدل طبقه‌بندی شود. همچنین استفاده از الگوریتم‌های نمونه‌گیری افزایشی و سپس الگوریتم‌های نمونه‌گیری ترکیبی پیشنهاد دیگر این مقاله است.

سیاسگزاری

از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به خاطر استفاده از داده‌های اکتشافی منطقه مورد مطالعه و از آقایان دکتر مصطفی سبزه‌کار و دکتر اسماعیل هداوندی به خاطر راهنمایی‌های ارزشمندشان در استفاده از نرم‌افزار Keel تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

- [1] Zaki, M.J. and Meira, W. (2020). *Data Mining and Machine Learning: Fundamental Concepts and Algorithms*, Cambridge University Press, New York, 777 P.
- [2] Cerulli, G. (2023). *Fundamentals of Supervised Machine Learning: With Applications in Python, R, and Stata*, Springer Cham, 391 P.
- [3] Moradzadeh, A., Zare, M., Kamkar Rouhani, A. and Doulati Aredehjan, F. (2019). Classification of environmental geochemical data using discriminant analysis and neural network in carbonate-sulfide waste dumps of lead and zinc mines. *Journal of Mining Engineering* 14(44): 12-25 [In Persian].
- [4] Geranian, H., Tabatabaei, S.H., Asadi, H.H. and Carranza, E.J.M. (2016). Application of discriminant analysis and support vector machine in mapping gold potential areas for further drilling in the Sari-Gunay gold deposit, NW Iran. *Nat. Resour. Res.* 25: 145-159.
- [5] Zaremotlagh, S. and Hezarkhani, A. (2017). The use of decision tree induction and artificial neural networks for recognizing the geochemical distribution patterns of LREE in the Choghart deposit, Central Iran. *Journal of African Earth Sciences* 128: 37-46.
- [6] Degtyareva, K., Kukartseva, O., Tynchenko, V., Mariupolskiy, T. and Pereverzev, D. (2024). Analysis of geochemical characteristics of rocks

- [17] Chen, Y., Zhao, Q. and Lu, L. (2022). Combining the outputs of various k-nearest neighbor anomaly detectors to form a robust ensemble model for high-dimensional geochemical anomaly detection. *Journal of Geochemical Exploration* 231(1):106875.
- [18] Chen, Y. and Lu, L. (2023). The Anomaly Detector, Semi-supervised Classifier, and Supervised Classifier Based on K-Nearest Neighbors in Geochemical Anomaly Detection: A Comparative Study. *Math. Geosci.* 55: 1011–1033.
- [19] Parsa, M. (2021). A data augmentation approach to XGboost-based mineral potential mapping: An example of carbonate-hosted Zn-Pb mineral systems of Western Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 228: 106811.
- [20] Ibrahim, B., Majeed, F., Ewusi, A. and Ahenkorah, I. (2022). Residual geochemical gold grade prediction using extreme gradient boosting. *Environmental Challenges* 6: 100421.
- [21] Brownlee, J. (2021). *Imbalanced Classification with Python, Machine Learning Mastery*, 463 P.
- [22] Wongvorachan, T., He, S. and Bulut, O. (2023). A Comparison of Undersampling, Oversampling, and SMOTE Methods for Dealing with Imbalanced Classification in Educational Data Mining. *Information* 14: 54.
- [23] Han, J., Kamber, M. and Pei, J. (2022). *Data mining: concepts and techniques*, 4th Edition, Morgan Kaufmann, 752 P.
- [24] Kashyap, J., and Gulati, P. (2020). Hybrid Resampling Technique to Tackle the Imbalanced Classification Problem. 10.21203/rs.3.rs-36578/v1.
- [25] Ghosh, K., Bellinger, C., Corizzo, R., Branco, P., Krawczyk, B., and Japkowicz, N. (2024). The class imbalance problem in deep learning. *Machine Learning* 113: 4845–4901.
- [26] Khushi, M., Shaukat, K., Mahboob Alam, T., Hameed, I.A., Uddin, S., and Luo, S. (2021). A Comparative Performance Analysis of Data Resampling Methods on Imbalance Medical Data. *IEEE Access* 9: 109960-109975.
- [27] Altalhan, M., Algarni, A., and Turki-Hadj Alouane, M. (2025). Imbalanced Data Problem in Machine Learning: A Review. *IEEE Access* 13: 13686-13699.
- [28] Liu, L., Wu, X., Li, S., Tan, S., and Bai, Y. (2022). Solving the class imbalance problem using ensemble algorithm: application of screening for aortic dissection. *BMC Medical Informatics and Decision Making* volume 22: Article number: 82.
- using machine learning methods. *E3S Web of Conferences* 583, 01007.
- [7] Geranian, H., Tabatabaei, S.H. and Asadi, H.H. (2013). Application of classifiers based on Bayes decision theory in gold potential mapping in Sari Gunay epithermal gold deposit. *Geochemistry Journal* 1(4): 347-355 [In Persian].
- [8] Ziaii, M., Abedi, A. and Ziaei, M. (2009). Geochemical and mineralogical pattern recognition and modeling with a Bayesian approach to hydrothermal gold deposits. *Applied Geochemistry* 24(6): 1142-1146.
- [9] Yin, S., Lin, X., Huang, Y., Zhang, Z. and Li, X. (2023). Application of improved support vector machine in geochemical lithology identification. *Earth. Sci. Inform.* 16: 205–220.
- [10] Mahdiyanfar, H., Mohammadpoor, M. and Mahdavi, M. (2022). Determination of alteration genesis and quantitative relationship between alteration and geochemical anomaly using support vector machines. *International Journal of Mining and Geo-Engineering* 56(1): 33-391.
- [11] Trott, M., Leybourne, M., Hall, L. and Layton-Matthews, D. (2022). Random forest rock type classification with integration of geochemical and photographic data. *Applied Computing and Geosciences* 15: 100090.
- [12] Zhang, Y., Ye, X., Xie, S., Dong, J., Yaisamut, O., Zhou, X. and Zhou, X. (2023). Prediction of Au-Polymetallic Deposits Based on Spatial Multi-Layer Information Fusion by Random Forest Model in the Central Kunlun Area of Xinjiang, China. *Minerals* 13(10): 1302.
- [13] Chen, Y. and Zhao, Q., (2021). Mineral exploration targeting by combination of recursive indicator elimination with the ℓ_2 -regularization logistic regression based on geochemical data. *Ore Geology Reviews* 135: 104213.
- [14] Hanson, D.R. and Lawson, H.E. (2023). Using Machine Learning to Evaluate Coal Geochemical Data with Respect to Dynamic Failures. *Minerals* 13(6): 808.
- [15] Puzyrev, V., Zelic, M. and DURING, P. (2023). Applying neural networks-based modelling to the prediction of mineralization: A case-study using the Western Australian Geochemistry (WACHEM) database. *Ore Geology Reviews* 152: 105242.
- [16] Tahmooreesi, M., Babaei, B. and Dehghan, S. (2022). Geochemical exploration numerical modeling using convolutional neural network (Case study: Gonabad region). *Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering* 12(31): 47-58.

- imbalanced data classification in healthcare. *BioData Mining* 16: 15.
- [41] Hengyu, Z. (2020). Improved SMOTE algorithm for imbalanced dataset. Chinese Automation Congress (CAC), Shanghai, China, 693-697.
- [42] Lee, H., Kim, J. and Kim, S. (2017). Gaussian-Based SMOTE Algorithm for Solving Skewed Class Distributions. *Int. J. Fuzzy Log. Intell. Syst.* 17(4): 229-234.
- [43] He, H., Bai, Y., Garcia, E.A. and Li, S. (2008). ADASYN: Adaptive synthetic sampling approach for imbalanced learning, IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IEEE World Congress on Computational Intelligence), Hong Kong, 1322-1328.
- [44] Brandt, J. and Lanzén, E. (2021). A Comparative Review of SMOTE and ADASYN in Imbalanced Data Classification. Department of Statistics, Uppsala University, 42 P.
- [45] Kurniawati, Y.E., Permanasari, A.E. and Fauziati, S. (2018). Adaptive Synthetic-Nominal (ADASYN-N) and Adaptive Synthetic-KNN (ADASYN-KNN) for Multiclass Imbalance Learning on Laboratory Test Data, 4th International Conference on Science and Technology (ICST), Yogyakarta, Indonesia, 1-6.
- [46] Qing, Z., Zeng, Q., Wang, H., Liu, Y., Xiong, T. and Zhang, S. (2022). ADASYN-LOF Algorithm for Imbalanced Tornado Samples. *Atmosphere*, 13(4): 544.
- [47] Devi, D., Biswas, S.K. and Purkayastha, B. (2020). A Review on Solution to Class Imbalance Problem: Undersampling Approaches, International Conference on Computational Performance Evaluation (ComPE), Shillong, India, 626-631.
- [48] Mazhari, S.A. and Safari, M. (2013). High-K Calc-alkaline Plutonism in Zouzan, NE of Lut Block, Eastern Iran: An Evidence for Arc Related Magmatism in Cenozoic. *Journal Geological Society of India* 81: 698-708.
- [49] Geranian, H. and Carranza, E.J.M. (2022). Mapping of Regional-scale Multi-Element Geochemical Anomalies Using Hierarchical Clustering Algorithms. *Natural Resources Research* 31(4): 1841-1865.
- [50] Seyedrahimi-Niaq, M., Mahdianfar, H. and Mokhtari, A. R. (2023). Application of geochemical structural methods to determine lead-contaminated areas related to mining activities. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering* 13(34): 41-55.
- [51] Kubat, M. and Matwin, S. (1997). Addressing the course of imbalanced training sets: [29] Wang, W., and Sun, D. (2021). The improved AdaBoost algorithms for imbalanced data classification. *Information Sciences* 563: 358-374.
- [30] Salehi, A. R., and Khedmati, M. (2024). A cluster-based SMOTE both-sampling (CSBBoost) ensemble algorithm for classifying imbalanced data. *Scientific Reports* 14(1): 5152.
- [31] Araf, I., Idri, A., and Chairri, I. (2024). Cost-sensitive learning for imbalanced medical data: a review. *Artificial Intelligence Review* 57(4): 80.
- [32] Xiao, J., Li, S., Tian, Y., Huang, J., Jiang, X., and Wang, S. (2025). Example dependent cost sensitive learning based selective deep ensemble model for customer credit scoring. *Scientific Reports* 15(1): 6000.
- [33] Liu, Y., Li, Z., Chen, J., Zhang, T., Pan, T., and He, S. (2025). A batch-adapted cost-sensitive contrastive feature learning network for industrial diagnosis with extremely imbalanced data. *Measurement* 244: 116478.
- [34] Yuan, Y., Wei, J., Huang, H., Jiao, W., Wang, J. and Chen, H. (2023). Review of resampling techniques for the treatment of imbalanced industrial data classification in equipment condition monitoring. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 126: 106911.
- [35] Abhishek, K. and Abdelaziz, M. (2023). *Machine Learning for Imbalanced Data: Tackle imbalanced datasets using machine learning and deep learning techniques*, Packt Publishing, 344 p.
- [36] Yang, Y., Akbarzadeh Khorshidi, H. and Aickelin, U. (2024). A review on over-sampling techniques in classification of multi-class imbalanced datasets: insights for medical problems. *Front. Digit. Health* 26: 1430245.
- [37] Chawla, N.V., Bowyer, K.W., Hall, L.O. and Kegelmeyer, W.P. (2002). SMOTE: Synthetic Minority Over-Sampling Technique. *Journal of Artificial Intelligence Research* 16: 321-357.
- [38] Hu, S., Liang, Y., Ma, L. and He, Y. (2009). MSMOTE: Improving Classification Performance when Training Data is imbalanced. 2009 Second International Workshop on Computer Science and Engineering, 13-17.
- [39] Tahmooreesi, M., Babaei, B. and Dehghan, S. (2022). Geochemical exploration numerical modeling using convolutional neural network (Case study: Gonabad region). *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering* 12(31): 47-58.
- [40] Kosolwattana, T., Liu, C., Hu, R. Han, S., Chen, H. and Lin, Y. (2023). A self-inspected adaptive SMOTE algorithm (SASMOTE) for highly

[55] Hassani Pak, A.A. (2016). Principles of Geochemical Exploration. Tehran University Press, Tehran [In Persian].

[56] Fakhari, S., Jafarirad, A., Afzal, P., and Lotfi, M. (2019). Delineation of hydrothermal alteration zones for porphyry systems utilizing ASTER data in Jebal-Barez area, SE Iran. Iranian Journal of Earth Sciences, 11: 80-92.

[57] Mokhtari, Z., and Seifi, A. (2021). Detection of Hydrothermal Alteration Zones Using ASTER Remote Sensing Data in Turquoise mine of Neyshabur. Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering, 11(28): 1-22 [In Persaian].

One-sided selection. Proceedings of the 14th international conference on machine learning, Morgan Kaufmann, pp. 179-186.

[52] Jia, C. and Zuo, Y. (2017). S-SulfPred: A sensitive predictor to capture S-sulfenylation sites based on a resampling one-sided selection undersampling-synthetic minority oversampling technique. Journal of Theoretical Biology 422: 84-89.

[53] Batista, G., Bazzan, A. and Monard, MC. (2003). Balancing Training Data for Automated Annotation of Keywords: A Case Study. II Brazilian Workshop on Bioinformatics, 10-18.

[54] Hart, P.E. (1968). The Condensed Nearest Neighbour Rule. IEEE Transactions on Information Theory 14(5): 515-516.

¹ Extreme Gradient boosting (XGboost)

² Imbalanced Dataset

³ Majority Class

⁴ Minority Class

⁵ Imbalance Ratio

⁶ Oversampling

⁷ Undersampling

⁸ Random Oversampling (ROS)

⁹ Synthetic Minority Oversampling Technique (SMOTE)

¹⁰ Borderline Oversampling (BOS)

¹¹ Adaptive Synthetic Sampling (ADASYN)

¹² Random Undersampling (RUS)

¹³ Condensed Nearest Neighbor Rule (CNN)

¹⁴ Near Miss Undersampling (NMUS)

¹⁵ Tomek Links Undersampling (TLUS)

¹⁶ Edited Nearest Neighbors Rule (ENN)

¹⁷ One-Sided Selection (OSS)

¹⁸ Neighborhood Cleaning Rule (NCR)

¹⁹ Support Vector Machine (SVM)

²⁰ Artificial Neural Network (ANN)

²¹ Receiver Operating Characteristic (ROC)



مقاله پژوهشی

مدل سازی عددی تعیین الگوی بهینه کابل کششی در تحلیل پایداری فضاها زیرزمینی

مصالح افتخاری^{۱*}، محمدحسین مختارزاده^۱، امیرحسین کاظمینی نیک^۲

۱- دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۰۴ خرداد ۱۴۰۴، بازنگری: ۲۸ مرداد ۱۴۰۴، پذیرش: ۱۵ شهریور ۱۴۰۴)

چکیده

نگهداری فضاهاى زیرزمینی یکی از مهم ترین مقوله های مهندسی معدن و عمران است که کابل های کششی به عنوان یکی از رایج ترین ابزارهای نگهداری در این فضاها به کار می روند. در این پژوهش، در محیطی پیوسته، با استفاده از نرم افزار FLAC3D، الگوهای مختلف کابل کششی شامل آرایش های مرسوم، کوتاه-بلند، و پیچشی در شرایط توده سنگ بسیار ضعیف مدل سازی شده تا اثر آنها بر پایداری تونل بررسی شود. هدف این مطالعه، تعیین الگوی بهینه کابل کششی برای کاهش مصرف مصالح و دستیابی به حداکثر پایداری است. نتایج نشان داد که الگوی کوتاه-بلند با طول های ۵ و ۷/۵ متر و فاصله گذاری ۱/۵ × ۲/۲ متر، جایابی تونل را از ۷ سانتی متر (حد مجاز ساکورایی) به ۵/۵ سانتی متر کاهش می دهد. همچنین، این الگو مصرف کابل کششی را تا ۱۰ درصد (معادل ۱۷۵ متر در ۲۸ متر طول تونل) نسبت به الگوی مرسوم کاهش داد. الگوی پیچشی با طول ۷/۵ متر نیز کمترین جایابی (۳/۵ سانتی متر) را به همراه داشت، اما الگوی کوتاه-بلند به دلیل سهولت اجرا و صرفه جویی اقتصادی به عنوان الگوی بهینه پیشنهاد شد.

کلمات کلیدی

کابل کششی، الگوی کابل کششی، تحلیل پایداری، بهینه سازی، تونل، فضاهاى زیرزمینی

*عهده دار مکاتبات: mosleh.eftekhari@modares.ac.ir

DOI: 10.22034/ANM.2025.23174.1678

۱- مقدمه

زمانی که یک فضا حفر می‌شود، توده سنگ حول آن تمایل دارد که به داخل فضا حرکت کند [۲،۱]. حرکت و پتانسیل شکست یا ریزش توده سنگ حول فضای حفرشده تابعی از میدان تنش، خصوصیات سنگ، ساختار زمین‌شناسی، روش حفر، زمان خود پایداری، هندسه و ابعاد فضای حفرشده است [۴،۳]. معمول‌ترین روش برای پایدار نگه‌داشتن فضای حفرشده، نصب نگهداری است. انواع نگهداری‌های اکتیو و پیچ‌سنگ‌هایی (Rock Bolt) که در این دسته قرار می‌گیرند به‌عنوان مقاوم‌سازی توده سنگ در نظر گرفته می‌شوند [۵-۸]. بر اساس آمار، استفاده از پیچ‌سنگ یکی از روش‌های عمده نگهداری در معدنکاری و کارهای عمرانی به شمار می‌رود که قابلیت به‌کارگیری در شرایط مختلف زمین‌شناسی را داراست [۹، ۱۰]. علاوه بر این، استفاده از پیچ‌سنگ نه‌تنها از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است بلکه در شرایط مختلف نیز قابل‌نصب است. این ابزار را می‌توان در کنار سایر نگهداری‌ها مانند شاتکریت (Shotcrete) و پوشش بتنی (Concrete Lining) و تیرهای فولادی حائل (Props Steel) به‌کاربرد تا ساختاری سازگارتر با محیط ایجاد کرد. پیچ‌سنگ‌ها با سهولت و سرعت بالا و به روش کاملاً مکانیزه مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۰-۱۴]. پیچ‌سنگ‌ها تاریخچه‌ای بالغ بر صدسال دارند و به‌عنوان یک تکنولوژی کلیدی برای نگهداری سازه‌های زیرزمینی و عمرانی شناخته می‌شوند. در ادبیات مهندسی سنگ، پیچ‌سنگ و کابل‌های کششی (Cable Bolt) هر دو به‌عنوان سیستم‌های نگهداری شناخته می‌شوند. در بسیاری از منابع، واژه پیچ‌سنگ به‌طور کلی برای اشاره به این دو سیستم به‌کاررفته است [۱۵]. هرچند کابل کششی به دلیل طول بیشتر و انعطاف‌پذیری، برای شرایط پیچیده‌تر و مقیاس‌های بزرگ‌تر ترجیح داده می‌شود. در این مطالعه، منظور از سیستم نگهداری، کابل کششی است، اما جهت حفظ پیوستگی با مطالعات پیشین، مرور منابعی که تحت عنوان پیچ‌سنگ ارائه شده‌اند نیز مدنظر قرار گرفته است.

کواری در سال ۲۰۰۴ [۱۶] تاریخچه استفاده از پیچ‌سنگ را به‌تفصیل مرور کرده است که در ادامه به بیان مختصری از این تاریخچه پرداخته شده است. در سال ۱۹۱۳ روش پیچ‌سنگ‌گذاری در آلمان اختراع و حق انحصاری آن

اخذ شده است. در بازه زمانی از ۱۹۴۳ تا ۱۹۵۰ استفاده از پیچ‌سنگ برای معادن زغال‌سنگ آمریکای شمالی و اروپا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است. پیچ‌سنگ‌ها به میزان زیادی جایگزین سیستم‌های نگهداری فولادی شدند. زغال در سال ۱۹۵۹ اولین سیستم کپسولی رزینی در آلمان معرفی گردید. در سال بعد، نصب پیچ‌سنگ‌های فولادی مکانیزه در روش NATM مورد استفاده واقع شده است. در سال ۱۹۶۳ رابسون یک روش جدید برای تونل‌زنی که در آن پیچ‌سنگ و شاتکریت مهم‌ترین اجزاء نگهداری بودند را ابداع نمود. با توسعه تئوری‌های تحلیلی متعدد، روش‌های جدیدی مانند روش المان محدود، المان مرزی، المان مجزا و روش‌های احتمالاتی و آماری در طراحی پیچ‌سنگ توسعه‌یافته و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روش‌های طراحی مورد استفاده در عمل، از منطقه‌ای به منطقه دیگر و از زمانی به زمان دیگر تغییر کرده‌اند که دلیل آن تغییرات در شرایط زمین‌شناسی و ساختگاه‌های زیرزمینی است [۱۷]. پانک در سال ۱۹۶۴ [۱۸] به بررسی طراحی شبکه پیچ‌سنگ‌های عمودی در سقف معادن دارای لایه‌بندی افقی پرداخت. کوتس و کوچران در ۱۹۷۰ [۱۹] توسعه خصیصه‌های طراحی شبکه پیچ‌سنگ را با توجه به مطالعاتی که در معادن موجود در کانادا انجام شده بود، مورد ارزیابی قرار دادند. لانگ در ۱۹۷۲ [۲۰] اصول نگهداری فضاهای سنگی با استفاده از پیچ‌سنگ را مورد بررسی قرار داد. طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ برای طراحی نگهداری تونل در سال ۱۹۷۴ توسط بارتن و همکاران [۲۱] انجام گرفت و در این مطالعه نتایج حاصل از ثبت تغییرات ۲۰۰ تونل نشان داد که، بین مقدار و نوع نگهداری دائمی تونل و کیفیت توده سنگ Q رابطه‌ای برقرار است.

شچ و همکاران در ۱۹۷۹ [۲۲] رساله‌ای مرجع و کاربردی برای اصول طراحی پیچ‌سنگ منتشر کردند. فارمر و شلتون در ۱۹۸۰ [۲۳] در به بررسی فاکتورهایی که طراحی سیستم نگهداری با استفاده از پیچ‌سنگ در فضاهای زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، پرداختند. در ۱۹۸۵ کراوفورد [۲۴] فاصله‌داری و طول پیچ‌سنگ‌ها در فضاهای زیرزمینی در سنگ درزه‌دار را مورد مطالعه قرار داد. استیلیبورگ در ۱۹۹۴ [۲۵] کتابچه‌ای تخصصی در زمینه طراحی نگهداری با استفاده از پیچ‌سنگ تألیف نمود. از آن زمان، این روش نقش مهمی به‌عنوان یکی از نگهداری‌های

شامل طول پیچ سنگ و فاصله داری بهینه پیچ سنگ ها پیشنهاد شده است. شردهاران و کولاتیلاک در سال ۲۰۱۶ [۳۶] در مطالعه ای دیگر، پایداری دو تونل در یک معدن عمیق زغال سنگ در چین با استفاده از نرم افزار 3DEC بررسی نموده اند و دریافتند که استفاده از پیچ سنگ های بلندتر و پیچ سنگ گذاری در کف تونل، نتایج پایداری بهتری را برای توده سنگ اطراف تونل ارائه می دهد. در این تحقیق روی تأثیر پارامترهای ژئومکانیکی مثل چسبندگی، مقاومت تک محوری و مقاومت کششی به روش آنالیز معکوس تمرکز شده است.

لی در سال ۲۰۱۷ [۱۵] در مطالعه ای، اصول کلی طراحی پیچ سنگ در فضاهای زیرزمینی و انواع روش ها و قواعد مورداستفاده در طراحی شبکه پیچ سنگ مورد بررسی و بحث قرار گرفته است. مدل های عددی نشان می دهند که طراحی الگو پیچ سنگ نقش کلیدی در پایداری فضاهای زیرزمینی دارند [۳۷]. سرفرازی و همکاران ۲۰۲۱ [۳۸] به بررسی آزمایشگاهی و عددی تعامل پیچ سنگ و پل سنگی تحت بارگذاری کششی پرداختند. آن ها با توسعه یک دستگاه آزمایش جدید، مقاومت کششی پل سنگی را در نمونه های دارای درزه ناپیوسته اندازه گیری کردند. نتایج نشان داد که وجود و زاویه ترک اولیه تأثیر قابل توجهی بر کاهش تنش شکست کششی دارد، به طوری که کمترین مقاومت در زاویه صفر درجه (موازی با بارگذاری) مشاهده شد. همچنین، کاهش نرخ بارگذاری باعث کاهش زاویه انتشار ترک نسبت به جهت بار گردید. این نتایج اهمیت پارامترهای مؤثر بر تعامل پیچ سنگ-پل سنگی را در بهینه سازی الگوی نگهداری در توده سنگ های درزه دار برجسته می سازد. سناریان اصفهانی و همکاران در سال ۲۰۲۳ به بررسی ابعاد متفاوت پیچ سنگ در مغار کلاب پرداخت و دریافت که با افزایش طول پیچ سنگ تا میزانی بهینه پایداری سیستم نگهداری افزایش می یابد و پس از آن افزایش طول پیچ سنگ تأثیری بر پایداری سیستم نگهداری حفریه زیرزمینی نخواهد داشت [۲].

فو و همکاران (۲۰۲۴) [۳۹] به بررسی آزمایشگاهی و عددی مکانیزم های شکست برشی پیچ سنگ در توده سنگ لایه دار پرداختند. نمونه های ساخته شده شامل لایه هایی از دوغاب و گچ با نسبت های ضخامت مختلف و یک پیچ سنگ تزریقی در مرکز بودند. نتایج نشان داد که نوع و ضخامت ماده پرکننده اطراف پیچ سنگ تأثیر قابل توجهی بر نیروی

اولیه در مهندسی سنگ ایفا می کند. این روش، به طور گسترده ای در معادن زغال سنگ و معدنکاری در سنگ سخت، طرح های برق آبی زیرزمینی، تونل سازی و سایر ساخت های سنگی در مهندسی عمران مورداستفاده قرار گرفته است. شوپرت در ۲۰۰۱ [۲۶] و در ادامه لی در ۲۰۱۲ [۲۷] چنین عنوان کردند که روش های نصب پیچ سنگ در نگهداری سنگ در تونل های عمرانی به گونه ای است که پیچ سنگ های سخت، کاملاً محصور شده در سنگ نصب می شوند و شاتکریت یا پوشش بتنی پیش ساخته بر روی سطح سنگ قرار می گیرد. تحقیقاتی توسط زیپینگ در سال ۲۰۰۱ [۲۸] بر روی پایداری سقف مغارهای سنگی انجام گرفت. نویسنده از کدهای عددی برای شبیه سازی پیچ سنگ و کابل های کششی استفاده کرد. نتایج به دست آمده کارایی سیستم نگهداری در ایجاد قوس های سقفی، کاهش جابجایی سقف و بهبود تحکیم توده سنگ را تأیید کرد.

ان جی و لی در ۲۰۰۲ [۲۹] استفاده از پیچ سنگ برای پایداری جبهه کار تونل را به صورت پارامتری تحلیل کردند. فلین و همکاران در ۲۰۱۰ [۳۰] پارامترهای مؤثر بر پایداری جبهه کار تونل را به صورت مدل آزمایشگاهی تحلیل کردند. ساکورائی در ۲۰۱۰ [۳۱] در مطالعه ای به بررسی مدل سازی توده سنگ درزه دار مقاوم شده توسط پیچ سنگ پرداخته است. در این بررسی به مقایسه دو نوع مقاوم سازی شامل شاتکریت و فوالد با پیچ سنگ پرداخته شده است. این مطالعه اهمیت، برتری و لزوم مدل سازی و در نظر گرفتن ناپیوستگی ها را نسبت به توده سنگ معادل در محیط هایی با درزه های همگن مورد ارزیابی قرار داده است. کایا و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۳۲] در تحقیقی به طراحی ورودی تونل در سنگ ضعیف پرداخته است که با استفاده از روش های تجربی پارامترهای ورودی به روش FEM محاسبه شده اند. همچنین ملاحظاتی به منظور طراحی الگوی پیچ سنگ گذاری در معادن و سازه های زیرزمینی عمرانی در محیط های درزه دار با طراحی سیستم نگهداری پیچ سنگ در تونل ها به وسیله روش المان مجزا و شبکه ناپیوستگی مجزا در سال ۲۰۱۳ توسط لورینگ و ورونا [۳۳] ارائه شده است. مارک در سال ۲۰۱۵ [۳۴] به بیان کلیات روش های طراحی پیچ سنگ های سقفی پرداخت. بن و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۳۵] در مطالعه ای، روندی را به منظور پایداری نواحی بلوکی اطراف تونل به روش المان مجزا در دو بعد پیشنهاد کرده اند. نهایتاً در این روش الگوی مناسب پیچ سنگ گذاری

استفاده از روش‌های طراحی مبتنی بر طبقه‌بندی‌های توده‌سنگ پیشنهاد شده است، بدون آنکه تأثیر مستقیم نحوه آرایش و طول پیچ‌سنگ‌ها در شرایط توده‌سنگ‌های بسیار سست، به‌صورت عددی و سیستماتیک مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین، تحلیل‌های گذشته عمدتاً بر روی مدل‌های دوبعدی یا شرایط نسبتاً پایدار متمرکز بوده و کمتر به تحلیل سه‌بعدی رفتار پیچ‌سنگ‌ها پرداخته است.

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC 3D، عملکرد سیستم نگهداری کابلی در شرایط توده‌سنگ بسیار سست به‌صورت عددی مدل‌سازی شده و تأثیر آرایش‌های مختلف کابل‌ها (منظم، معمول، کوتاه و بلند) در چهار سری ابعاد متفاوت، به‌طور جامع بررسی گردیده است. این پژوهش باهدف تعیین الگوی بهینه نصب کابل، نه‌تنها به شناسایی ترکیب بهینه‌ای از طول و فاصله آن‌ها پرداخته، بلکه با تحلیل کمی نتایج مدل‌سازی، معیاری برای انتخاب مناسب‌ترین پیکربندی نگهداری در شرایط مشابه ارائه می‌دهد. با این حال، بدیهی است که در طراحی اجرایی، می‌توان سیستم نگهداری ترکیبی شامل پیچ‌سنگ، کابل کششی، شاتکریت یا سایر عناصر نگهدارنده را انتخاب و بهینه‌سازی کرد. با این حال، در تحقیقات آینده می‌توان از نتایج این پژوهش به‌عنوان مبنای طراحی پایه‌ای استفاده کرد و سپس در ترکیب با سایر سیستم‌های نگهداری مانند شاتکریت یا قاب، به تحلیل ترکیبی و جامع‌تری دست یافت.

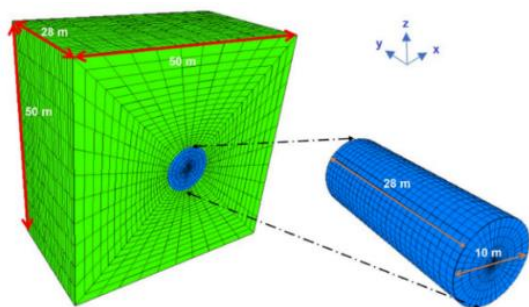
۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق، فضای زیرزمینی حفرشده در یک محیط سنگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. محیط سنگی به‌صورت معادل پیوسته فرض شده و پارامترهای توده سنگ معادل به‌کل مدل تخصیص داده می‌شوند. توده سنگ همگن و پیوسته در نظر گرفته‌شده و پارامترهای آن در همه‌جا یکسان است. با فرض همسانگردی، مقاومت و تغییر شکل توده سنگ در جهات اصلی یکسان فرض می‌شود. در مدل‌سازی مقطع فضای زیرزمینی، ابتدا پایداری توده سنگ اطراف حفاری تحلیل‌شده و سپس تأثیر الگوهای مختلف اجرای شبکه پیچ‌سنگ/کابل کششی بر پایداری و تشکیل زون پلاستیک اطراف فضا بررسی می‌شود تا الگوی بهینه برای پایداری پیشنهاد گردد.

محوری نهایی دارد و استفاده از دوغاب، به‌ویژه در ضخامت‌های بیشتر، باعث افزایش مقاومت محوری و بهبود عملکرد نگهداری می‌شود. شبیه‌سازی عددی با روش PFC2D نیز تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشت. گوو و همکاران (۲۰۲۴) [۴۰] نوع جدیدی از بولت طراحی کردند که قادر به تحمل پیش‌تنش بالا و کنترل تغییر شکل‌های بزرگ در تونل‌های عمیق معدن سنگ فسفات است. آن‌ها با انجام آزمایش‌های میدانی نشان دادند که استفاده از این بولت‌ها باعث کاهش حدود ۷۰ درصد در تغییر شکل نهایی سنگ‌های اطراف تونل می‌شود. همچنین، شبیه‌سازی عددی با مدل ترکیبی PFC3D-FLAC3D مکانیزم جریان تنش تونل را تحلیل کرد و نشان داد که این روش می‌تواند پایداری تونل و ستون‌ها را بهبود بخشد. یافته‌های این پژوهش بر اهمیت طراحی بولت‌های مقاوم در برابر تغییر شکل‌های بزرگ و توسعه فناوری‌های نوین نگهداری تونل در معادن عمیق تأکید می‌کند.

دو و همکاران (۲۰۲۵) [۴۱] مدل جدیدی برای بولت‌های سنگی در شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی FDEM ارائه کردند تا تأثیر بولت‌ها بر تغییر شکل و ترک‌خوردگی سنگ‌های اطراف تونل بررسی شود. آن‌ها با بهینه‌سازی الگوریتم و ارائه معادلات ماده جدید، نشان دادند که استفاده از بولت‌ها می‌تواند جابه‌جایی عمودی سنگ‌ها را کاهش دهد و فرآیند رشد ترک‌ها را کند کند. همچنین، نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که کاهش فاصله بین ردیف‌های بولت یا افزایش طول آن‌ها منجر به کاهش تعداد ترک‌ها و جابه‌جایی سنگ‌های اطراف می‌شود. سرفرازی و همکاران (۲۰۲۵) [۴۲] با استفاده از روش المان گسسته، اثر شکل و تعداد فرورفتگی‌های کابل کششی را بر رفتار مکانیکی سطح اتصال بتن-کابل بررسی کردند. نتایج نشان داد که شکست غالب از نوع کششی بوده و هندسه و تعداد فرورفتگی‌ها اثر قابل‌توجهی بر مقاومت برشی و مکانیزم گسیختگی دارد. این یافته‌ها بیانگر اهمیت طراحی هندسی کابل کششی برای بهبود انتقال بار و افزایش دوام سیستم نگهداری در سازه‌های زیرزمینی است.

باوجود مطالعات گسترده‌ای که در زمینه طراحی و به‌کارگیری پیچ‌سنگ‌ها و پیچ‌های کابلی در نگهداری فضاهای زیرزمینی انجام شده، در بسیاری از مطالعات پیشین، الگوی آرایش پیچ‌سنگ‌ها به‌صورت تجربی و یا با



شکل ۱: نمایش ابعاد تونل و هندسه مدل عددی

که در آن قطر و طول تونل به ترتیب ۱۰ و ۲۸ متر بوده و همچنین هندسه مدل یک مربع ۵۰ در ۵۰ متر با ضخامت ۲۸ متر است. همان طور که پیش تر بیان گردیده بود با استفاده از مدل رفتاری موهر کولمب مدل سازی صورت گرفته است.

برای مدل تونل ساخته شده در محیط نرم افزار FLAC3D از داده های ژئومکانیکی توده سنگ موجود در مقاله کرمی ۱۳۹۱ استفاده شده است که در جدول ۱ قابل مشاهده است [۴۳]. در مدل سازی، مرزهای کناری مدل در برابر جابجایی افقی مقید شده اند، در حالی که جابجایی قائم برای آن ها مجاز در نظر گرفته شده است. همچنین، مرز پایین مدل به صورت کاملاً مقید تعریف شده و در هر دو راستای افقی و قائم بدون حرکت فرض شده است.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ [۴۳]

مقدار	مشخصات
۰٫۳۸۵	مدول برشی (GPa)
۰٫۸۳	مدول بالک (GPa)
۲۷	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۰٫۱	چسبندگی (MPa)
۱۰	RMR

تنش های اولیه عمودی و افقی بر اساس وزن مخصوص و عمق ۱۰۰ متری حفر تونل نسبت به سطح زمین مطابق جدول ۲ اعمال شده است.

جدول ۲: مقادیر تنش های اعمالی اولیه بر مدل

تنش افقی بیشینه (MPa)	تنش افقی کمینه (MPa)	تنش وارده بر مرکز مدل (MPa)
۱٫۸۳۷۵	۱٫۸۲۷۵	۲٫۶۲۵

برای کنترل پایداری از روش کرنش مجاز استفاده می گردد. ساکورائی در سال ۱۹۸۶ روشی را برای ارزیابی پایداری سازه های زیرزمینی با توجه به کرنش بحرانی

در این پژوهش، از نرم افزار تفاضل محدود FLAC 3D و مدل رفتاری موهر کولمب برای تحلیل عددی استفاده گردیده است. این نرم افزار بر پایه فرض محیط پیوسته (Continuum) توسعه یافته و در آن، توده سنگ اطراف تونل به صورت پیوسته مدل سازی می شود. از این رو، برای لحاظ کردن اثر ناپیوستگی های موجود در توده سنگ (نظیر درزه های ناممتم و گسستگی های موضعی)، مدل سازی سه بعدی به روش محیط پیوسته معادل انجام شده است. مدل عددی شامل تونل و روباره آن و سیستم نگهداری شامل کابل کشی است. در این مطالعه، به منظور ارزیابی مستقل اثر آرایش کابل های کششی، سایر سیستم های نگهداری نظیر شاتکریت و قاب فولادی در مدل عددی لحاظ نشده اند. این رویکرد امکان تحلیل خالص اثر کابل های کششی و مقایسه مستقیم بین آرایش های مختلف را فراهم می سازد. بدیهی است که در شرایط واقعی و در طراحی اجرایی، سیستم نگهداری ترکیبی شامل کابل کششی به همراه سایر عناصر نگهدارنده مورد استفاده قرار می گیرد که انتخاب و بهینه سازی آن می تواند بر اساس نتایج این پژوهش انجام شود. همچنین، در راستای اقتصادی تر شدن طرح، بهینه سازی در تعداد و آرایش کابل های کششی مورد توجه قرار گرفته است.

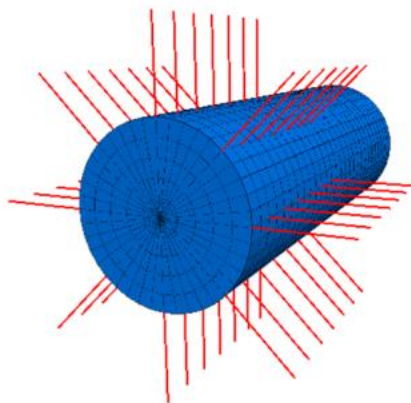
۲-۱- ساخت مدل

از پارامترهای مؤثر در ساخت مدل، شکل هندسی و ابعاد مقطع تونل است، که در این پژوهش تونلی با مقطع دایره ای با شعاع ۵ متر در نظر گرفته شده است. ابعاد مدل عددی به گونه ای برگزیده شد تا رفتار مرزهای مدل کمترین تأثیر را در نتایج داشته باشند به همین علت مرزهای جانبی مدل بایستی به اندازه ای از منطقه اعمال بار فاصله داشته باشند تا تغییر محسوسی از نظر تنش و کرنش در المان های مرزی به وجود نیاید و تغییر شکل ها در این المان ها قابل صرف نظر باشد. بر اساس روابط کرش ۴ تا ۵ برابر شعاع مقطع حفاری می تواند به عنوان مرز مدل با توجه به شرایط ذکر شده در نظر گرفته شود [۴۲]. برای دستیابی به دقت مناسب در اطراف تونل ها ابعاد مش ها ریز تر در نظر گرفته شده اند. در شکل ۱ می توان ابعاد تونل و هندسه مدل را مشاهده نمود. ابعاد مدل مشابه با مدل مقاله کرمی ۱۳۹۱ در نظر گرفته شده است [۴۳].

شده و تونل به پایداری اولیه برسد. سپس با بکار گیری الگوهای پیشنهادی پیچسنگ‌های پیچشی- الگوی پیچسنگ‌های کوتاه و بلند- الگوی ترکیبی (پیچشی- کوتاه و بلند) به بررسی تأثیر این الگوها در کاهش میزان مصرف پیچسنگ با افزایش گام نصب پیچسنگ نسبت به روش معمول که در مرحله اولیه مدل‌سازی شده پرداخته شده است. برای این مهم از دو عامل جابجایی مجاز ساکورایی و میزان تنش مجاز در پیچسنگ، برای بررسی تأثیر این الگوها استفاده شده است. در شکل ۲ الگوی مرسوم نصب کابل که در آن المان‌های نگهداری فاصله منظم و یکسانی را دارند مشاهده می‌گردد.

جدول ۲: مشخصات کابل تزریقی مورد استفاده

مقدار	مشخصات
۲۰۰	مدول الاستیسیته (GPa)
۸۰۴,۳	مساحت مقطع (mm ²)
۴۰۰	مقاومت تسلیم (MPa)
۲,۳۲۲	ظرفیت کششی دوغاب (MPa)
۵۶۰	سختی دوغاب (MPa)
۱	مقاومت دوغاب (MPa)
۱۰	پیش کشش در کابل (MPa)



شکل ۲: الگوی مرسوم پیاده‌سازی کابل

همچنین در شکل ۳ الگوی کابل‌های کوتاه و بلند که به صورت یکی در میان به اندازه درصدی از نسبت کابل بلندتر انتخاب و نصب می‌گردند، قابل مشاهده است. در طرح الگوی کابل‌های پیچشی در هر گام از نصب شبکه کابل، کابل‌ها به جای نصب در یک شبکه منظم با زاویه‌ای مشخص نسبت به کابل قبلی، نصب می‌شود (شکل ۴).

در شکل ۵ الگوی پیچشی نصب کابل به صورت سه‌بعدی بر روی دیواره تونل به نمایش در آمده است.

پیشنهاد کرده است که بر اساس نتایج آزمایش‌های فشاری تک‌محوره بر روی سنگ‌های مختلف تعریف می‌شود. این روش اغلب به عنوان روشی متداول برای محاسبه همگرایی (جابجایی نسبی دیواره‌های تونل) استفاده می‌شود که در طی بررسی تونل‌های مختلف به دست آمده است. ساکورایی و همکاران علاوه بر روابطی که بین مقاومت تک‌محوره و کرنش بحرانی برای توده سنگ‌های مختلف بیان کرده‌اند. روابط (۱) تا (۳) را نیز بر مبنای مدول الاستیسیته و کرنش بحرانی ارائه کرده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روابط (۱) تا (۳) نشان‌دهنده حد بالا و پایین مقدار کرنش بحرانی است. رابطه (۲) نیز مقدار لگاریتمی متوسط روابط (۱) تا (۳) است.

$$\log \epsilon_c = -0.25 \log E - 0.85 \quad (1)$$

$$\log \epsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \quad (2)$$

$$\text{Log } \epsilon_c = -0.25 \log E - 1.59 \quad (3)$$

رابطه (۱) تراز هشدار خطر اول، رابطه (۲) تراز هشدار خطر دوم و رابطه (۳) تراز هشدار سوم است. در این روابط ϵ_c کرنش بحرانی و E مدول الاستیسیته بر حسب $\frac{Kgf}{cm^2}$ است. ساکورایی و همکاران، تراز هشدار دوم را به عنوان مبنا برای طراحی سیستم‌های نگهداری تونل‌های مهندسی پیشنهاد نموده‌اند. شرط پایداری فضای حفاری این است که جابجایی ایجاد شده در تونل (به ویژه سقف) از جابجایی مجاز کمتر باشد. میزان کرنش و جابجایی مجاز بر اساس معیار ساکورایی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۱: میزان کرنش و جابجایی مجاز بر اساس معیار ساکورایی

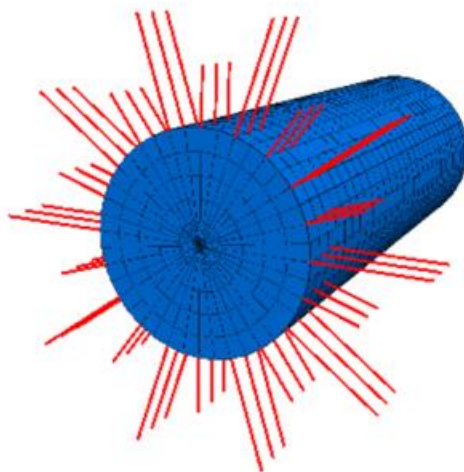
مدول الاستیسیته $(\frac{Kgf}{cm^2})$	کرنش مجاز سطح یک (ϵ_c)	حداکثر میزان جابجایی (cm)
۱۰۲۰۰,۵۳	۰,۱۴	۷

۲-۲- نصب سیستم نگهداری

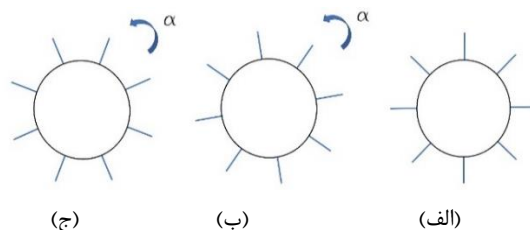
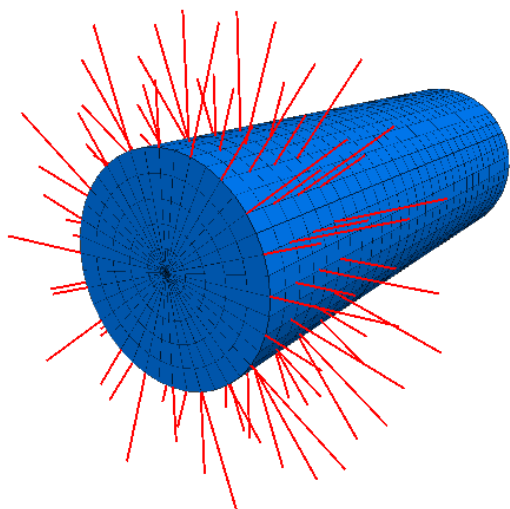
برای نگهداری فضای حفر شده در این پژوهش همان‌طور که پیش‌تر ذکر شده است از پیچسنگ با الگوهای متفاوت به عنوان سیستم نگهداری استفاده شده است. مشخصات مربوط به پیچسنگ در جدول ۴ آورده شده است.

برای بررسی پایداری مدل‌های انتخابی، از الگوهای مرسوم نصب پیچسنگ استفاده شده، تا میزان جابجایی‌ها، از میزان جابجایی بحرانی به دست آمده از رابطه ساکورایی کمتر

به طور کلی هرچه مقاومت پیچ سنگ بیشتر باشد پیچ سنگ قوی تر است ولی مقاومت خیلی زیاد هم از سویی مناسب نیست، زیرا اگر پیچ سنگ تحت کشش فوق العاده زیاد بشکند، با سرعت زیادی از چال به بیرون پرتاب می شود و ممکن است خطراتی را به همراه داشته باشد، بنابراین توصیه می شود که نیروی کششی وارد بر پیچ سنگ بیش از ۶۰ درصد بار تسلیم پیچ سنگ نباشد [۴۴]. از این رو در این پژوهش نیز تنش مجاز ۶۰ درصد تنش تسلیم در نظر گرفته شده است.



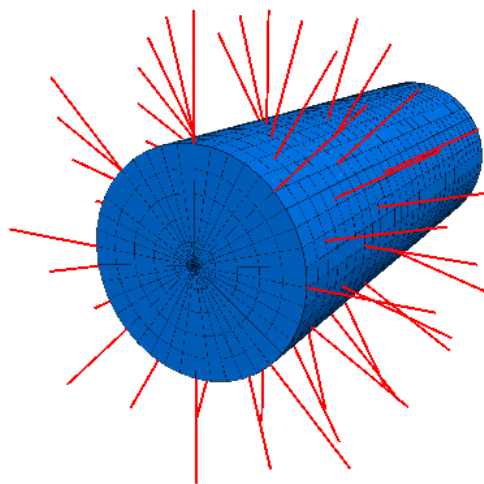
شکل ۳: الگو کوتاه و بلند پیاده سازی کابل



شکل ۴: نحوه نصب کابل در آرایش پیچشی با زاویه گردش α در جهت پادساعت گرد (الف) مرحله اول کابل گذاری (ب) گام دوم کابل گذاری، (ج) گام سوم کابل گذاری

شکل ۶: الگوی ترکیبی پیاده سازی پیچ سنگ های پیچشی و یکی در میان کوتاه و بلند بر روی دیواره تونل

در این مطالعه به منظور بررسی اثر طول پیچ سنگ، دو طول (۱) ۵ متری و ۷٫۵ متری برای پیچ سنگ ها در نظر گرفته شده است. به منظور طراحی آرایش های متفاوت، فاصله پیچ سنگ ها در راستای طول تونل یا گام نصب پیچ سنگ (S)، برابر چهار مقدار ۱ و ۱٫۵ و ۲ و ۲٫۵ در نظر گرفته شده است. همچنین فواصل پیچ سنگ ها در جهت محیط تونل دایره ای چهار مقدار متفاوت در نظر گرفته شده است. بدین صورت که با در نظر گرفتن محیط ۳۰ متری برای تونل، چهار الگوی با فواصل ۱ متر (با زاویه ۱۲ درجه نسبت به مرکز تونل) ۱٫۵ متر (زاویه ۱۸ درجه)، ۲ متر (زاویه ۲۴ درجه) و ۲٫۵ متر (زاویه ۳۰ درجه) بر روی محیط تونل نصب شده اند که تعداد پیچ سنگ ها در محیط تونل (d) در هر حالت به ترتیب ۱۲ و ۱۵ و ۲۰ و ۳۰ پیچ سنگ است. در جدول ۵ سناریوهای مختلف برای پیاده سازی الگوی مرسوم پیچ سنگ تعریف شده اند. در نتیجه چگالی شبکه های به دست آمده برای شبیه سازی از ۱×۱ تا ۲×۲ متفاوت است.



شکل ۵: الگوی پیچشی پیاده سازی کابل

الگوی نصب کابل با آرایش ترکیبی که خود ترکیبی از روش های قبل بوده، ضمن اینکه کابل های کوتاه و بلند انتخاب شده، الگو با توجه به زاویه نصب کابل ها، با زاویه ای خاص گردش می کند در شکل ۶ این الگو نمایش داده شده است.

جدول ۵: شماره سناریوهای مختلف طراحی الگوی مرسوم کابل

طول کابل (متر)	گام نصب کابل (S) (متر)	تعداد کابل نصب‌شده بر روی محیط تونل (d)			
		۳۰	۲۰	۱۵	۱۲
۵	۱	۴	۳	۲	۱
	۱٫۵	۸	۷	۶	۵
	۲	۱۲	۱۱	۱۰	۹
	۲٫۵	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳
	۳	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷
۷٫۵	۱٫۵	۲۴	۲۳	۲۲	۲۱
	۲	۲۸	۲۷	۲۶	۲۵
	۲٫۵	۳۲	۳۱	۳۰	۲۹
	۳	۳۶	۳۵	۳۴	۳۳

۳- نتایج

در ابتدای این بخش ابتدا برای حالت متداول و منظم اجرای کابل نتایج گزارش می‌گردد سپس تأثیر آرایش کوتاه و بلند با دو حالت متفاوت کابل‌های نصب‌شده ارائه خواهد گردید و سپس حالت بهینه معرفی می‌گردد.

۳-۱- مدل منظم و متداول کابل کششی

همان‌طور که در شکل ۷ قابل مشاهده است، قسمت الف مدل ساخته‌شده را بدون نصب هرگونه نگهداری نشان می‌دهد. بیشینه جابجایی در این مدل برابر با ۱۵٫۵ سانتی‌متر بوده و زون تأثیر و ناحیه پلاستیک حول تونل در قسمت ب ارائه شده است. با توجه به معیار ساکورایی و گسترش زیاد زون پلاستیک ناپایداری تونل مشهود است.

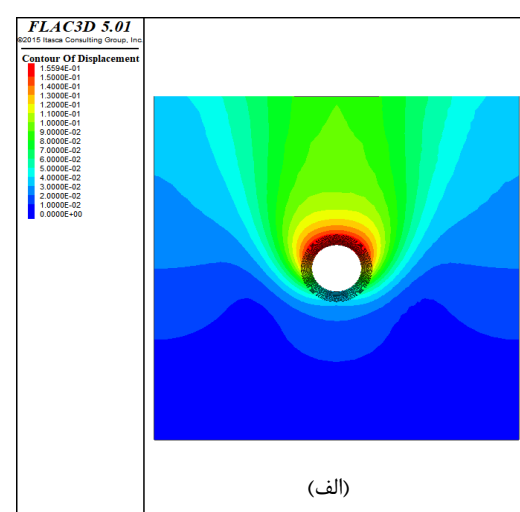
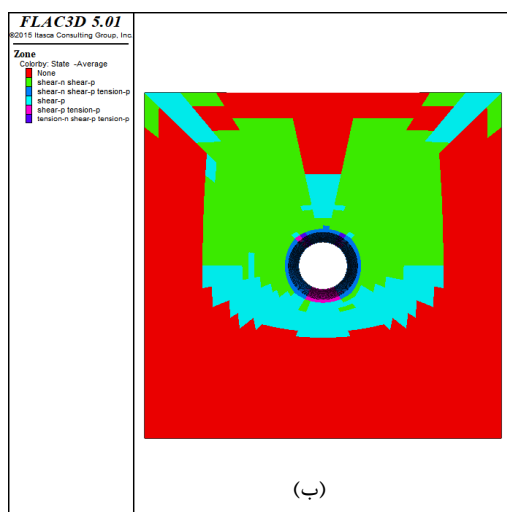
همان‌طور که در شکل ۸ قابل مشاهده است، قسمت الف مدل شبیه‌سازی شده مربوط به سناریوی شماره ۴ با نصب

پیچ‌سنگ ۵ متری با الگوی ۱×۱ که چگال‌ترین انتخابی بوده را، نمایش می‌دهد. با نصب این الگو میزان جابجایی از ۱۵٫۵ سانتیمتر به ۳٫۱۶ سانتیمتر کاهش داده که مقدار قابل توجهی بوده که کمتر از تراز دوم هشدار ساکورایی است، همچنین ناحیه تأثیر اطراف تونل به میزان قابل‌ملاحظه‌ای (به‌طور تقریبی ۸۷ درصد) کاهش یافته است (قسمت ب).

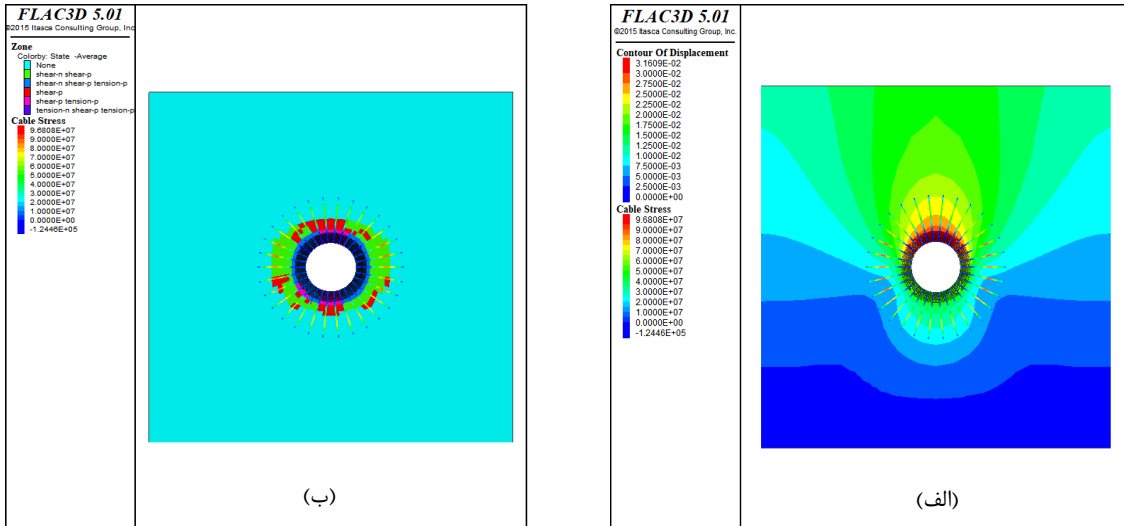
میزان ضریب ایمنی در این مدل برابر با ۲٫۴۸ است.

همان‌طور که در شکل ۹ قابل مشاهده است، قسمت الف مدل شبیه‌سازی شده سناریوی ۷ با نصب پیچ‌سنگ ۵ متری با الگوی ۱٫۵×۱٫۵ را نمایش می‌دهد. با نصب این الگو میزان جابجایی از ۱۵٫۵ سانتی‌متر به ۶٫۱۲ سانتی‌متر کاهش یافته که این مقدار کمتر از حد آستانه هشدار برای تراز اول ساکورایی در این مدل است. ناحیه تأثیر اطراف تونل به میزان قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به مدل بدون نگهداری (به‌طور تقریبی ۷۷٫۷ درصد) کاهش یافته است (قسمت ب). ضریب ایمنی به‌دست آمده برای این مدل برابر با ۲٫۷۱ است.

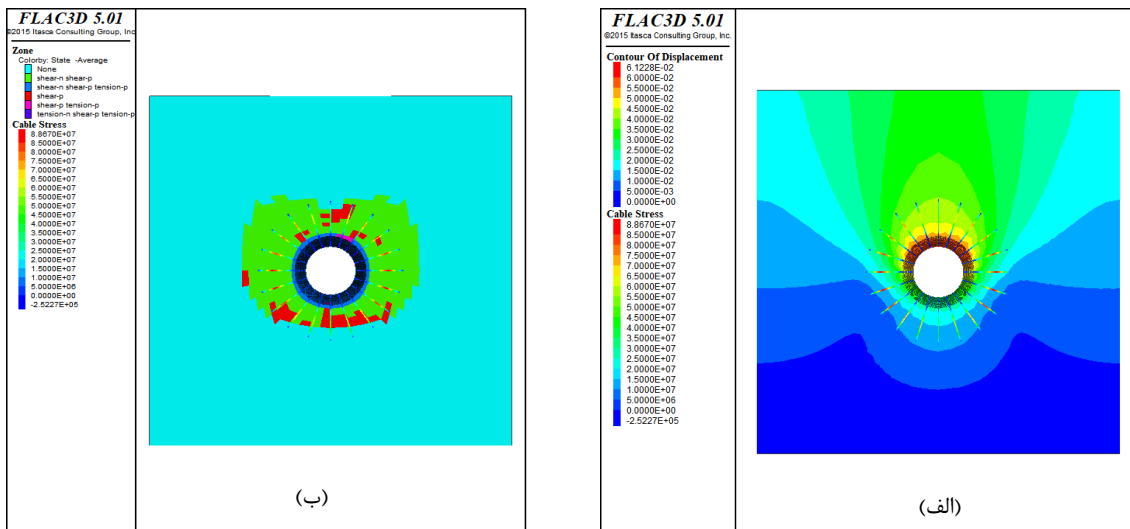
در نهایت شکل ۱۰ قسمت الف مدل شبیه‌سازی شده سناریوی ۱۳ با نصب پیچ‌سنگ ۵ متری با الگوی ۲٫۵×۲٫۵ که غیرچگال‌ترین شبکه است را نمایش می‌دهد. با نصب این الگو میزان جابجایی از ۱۵٫۵ سانتیمتر به ۹٫۳۷ سانتیمتر کاهش یافته که این مقدار از حد آستانه هشدار برای تراز اول ساکورایی در این مدل عبور کرده است. اگرچه ناحیه تأثیر اطراف تونل نسبت به مدل اولیه کاهش یافته است ولی وسعت آن از دو مدل قبلی که با نگهداری‌های چگال‌تری نصب شده‌اند بیشتر است (قسمت ب).



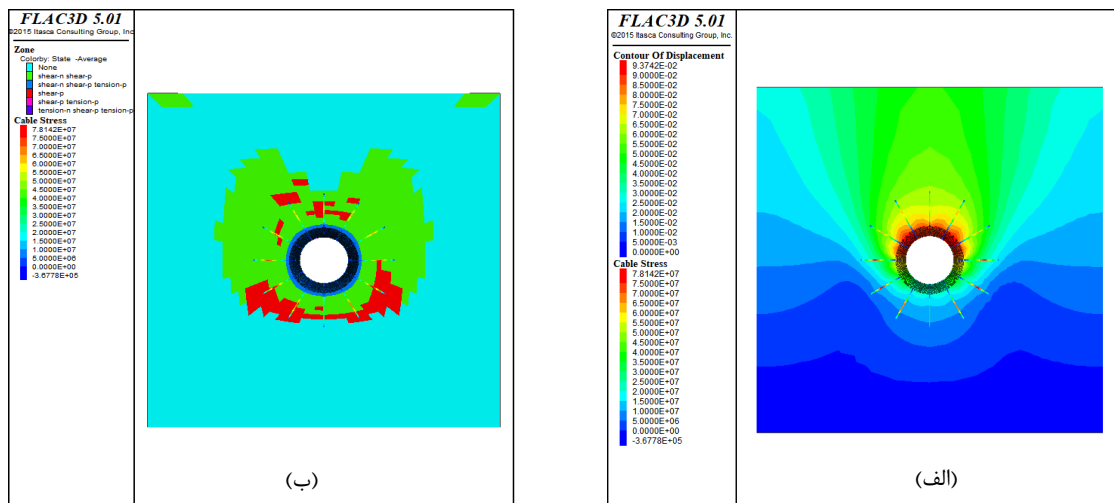
شکل ۷: مدل شبیه‌سازی شده بدون نصب نگهداری (الف) کانورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تأثیر اطراف تونل



شکل ۸: مدل شبیه سازی شده سناریوی شماره ۴ با نصب پیچسنگ ۵ متری با الگوی ۱×۱ (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تأثیر اطراف تونل



شکل ۹: مدل شبیه سازی شده سناریوی شماره ۷ با نصب پیچسنگ ۵ متری با الگوی ۱٫۵×۱٫۵ (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تأثیر اطراف تونل



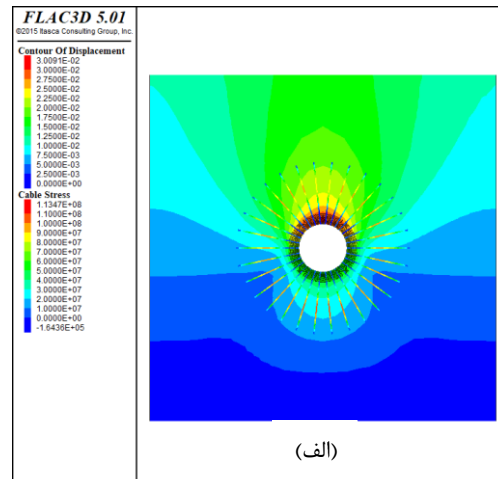
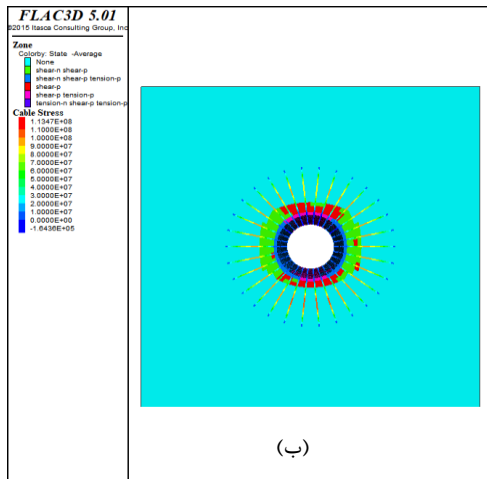
شکل ۱۰: مدل شبیه سازی شده سناریوی شماره ۱۳ با نصب پیچسنگ ۵ متری با الگوی ۲٫۵×۲٫۵ (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تأثیر اطراف تونل

اطراف تونل به میزان قابل ملاحظه‌ای نسبت به مدل بدون نگهداری (به‌طور تقریبی ۵۹/۶ درصد) کاهش یافته است (قسمت ب). ضریب ایمنی به‌دست‌آمده برای این مدل برابر با ۱٫۵۹ است.

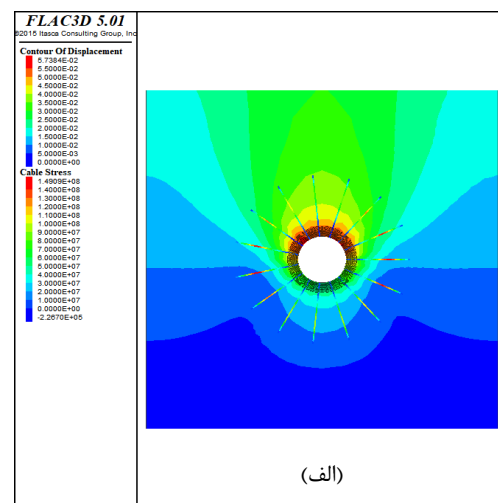
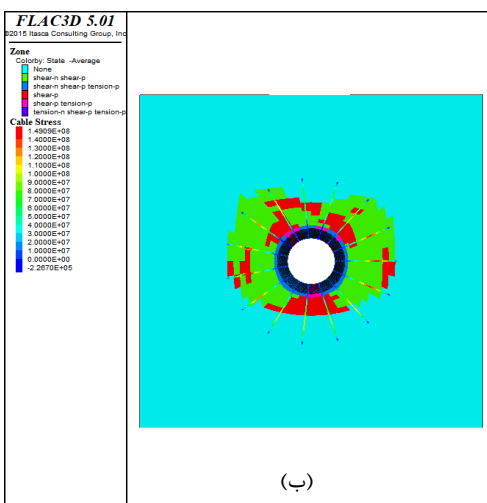
در نهایت شکل ۱۳ در قسمت الف مدل شبیه‌سازی شده سناریوی ۲۹ با نصب پیچ‌سنگ ۵ متری با الگوی ۲٫۵×۲٫۵ که غیرچگال‌ترین شبکه است را نمایش می‌دهد. با نصب این الگو میزان جابجایی از ۱۵٫۵ سانتیمتر به ۸٫۱۲ سانتیمتر کاهش یافته که این مقدار از حد آستانه هشدار برای تراز اول ساکورائی در این مدل عبور کرده است. اگرچه ناحیه تأثیر اطراف تونل نسبت به مدل اولیه کاهش یافته است ولی وسعت آن از دو مدل قبلی که با نگهداری‌های چگالتری نصب شده‌اند بیشتر است (قسمت ب). ضریب ایمنی برای این مدل مقدار ۱٫۷۱ محاسبه شده است.

شکل ۱۱ قسمت الف مدل شبیه‌سازی شده مربوط به سناریوی شماره ۲۰ با نصب پیچ‌سنگ ۷٫۵ متری با الگوی ۱×۱ که چگالترین الگوی انتخابی است را نمایش می‌دهد. با نصب این الگو میزان جابجایی از ۱۵٫۵ سانتیمتر به ۳ سانتیمتر کاهش یافته که مقدار قابل توجهی بوده و کمتر از تراز دوم هشدار ساکورائی است، همچنین ناحیه تأثیر اطراف تونل به میزان قابل ملاحظه‌ای (به‌طور تقریبی ۸۸٫۹ درصد) کاهش یافته است (قسمت ب). میزان ضریب ایمنی در این مدل برابر با ۲٫۱۲ است.

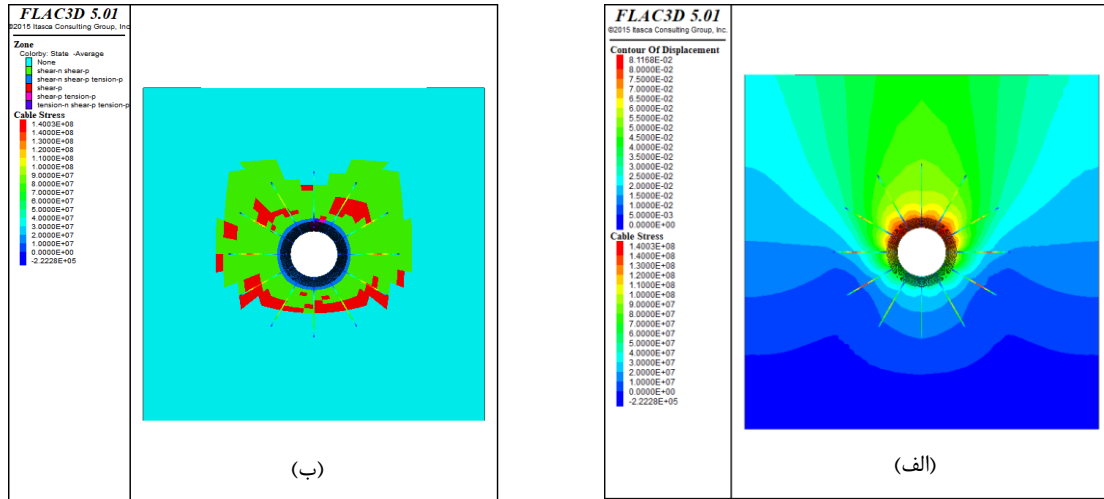
شکل ۱۲ قسمت الف مدل شبیه‌سازی شده سناریوی ۲۲ با نصب پیچ‌سنگ ۷٫۵ متری با الگوی ۱٫۵×۱٫۵ را نمایش می‌دهد. با نصب این الگو میزان جابجایی از ۱۵٫۵ سانتیمتر به ۵٫۷۵ سانتیمتر کاهش یافته که این مقدار کمتر از حد آستانه هشدار برای تراز اول ساکورائی در این مدل است. ناحیه تأثیر



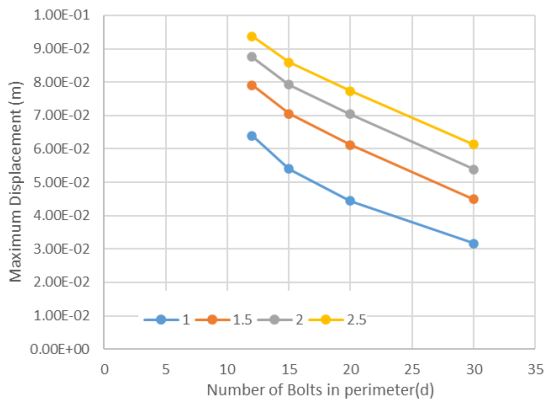
شکل ۱۱: مدل شبیه‌سازی شده سناریوی شماره ۲۰ با نصب پیچ‌سنگ ۷٫۵ متری با الگوی ۱×۱ (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تأثیر اطراف تونل



شکل ۱۲: مدل شبیه‌سازی شده سناریوی شماره ۲۲ با نصب پیچ‌سنگ ۷٫۵ متری با الگوی ۱٫۵×۱٫۵ (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تأثیر اطراف تونل

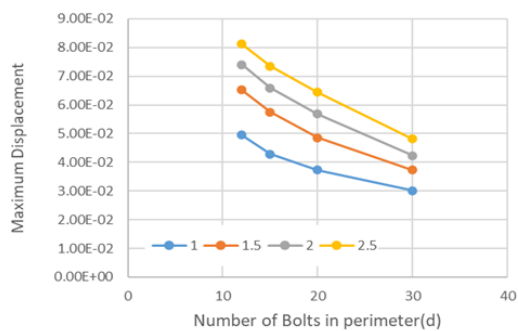


شکل ۱۳: مدل شبیه سازی شده سناریوی شماره ۲۹ با نصب پیچ سنگ با الگوی ۲/۵×۲/۵ (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تأثیر اطراف تونل



شکل ۱۴: نمودار بیشترین میزان جابجایی نسبت به تعداد پیچ سنگ های ۵ متری در محیط تونل (d) در حالت های مختلف گام

نصب کابل در طول تونل (s)



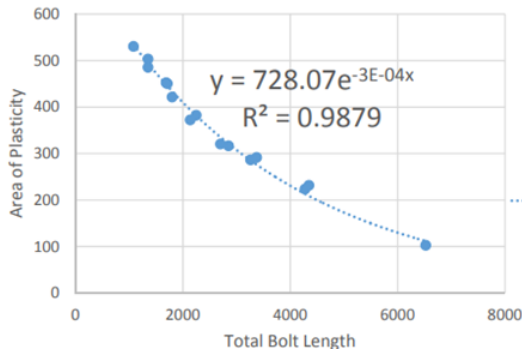
شکل ۱۵: نمودار بیشترین میزان جابجایی نسبت به تعداد پیچ سنگ های ۷/۵ متری در محیط تونل (d) در حالت های مختلف گام

نصب کابل در طول تونل (s)

پس از مدل سازی در فضای نرم افزار FLAC 3D نتایج حاصله برای گروهی که به طور منظم و متناوب نصب شده اند را می توان در جدول ۶ مشاهده نمود. در این جدول میزان جابجایی های اتفاق افتاده برای هر حالت گزارش شده است. در ادامه نمودارهای مختلف مربوط به میزان جابجایی (شکل های ۱۴ و ۱۵)، مساحت ناحیه تأثیر (شکل های ۱۶ و ۱۷) و طول کل پیچ سنگ مصرفی (شکل های ۱۸ و ۱۹) آورده شده است.

جدول ۶: میزان جابجایی ناشی از حالات مختلف طراحی شده برای کابل منظم

جابجایی (سانتی متر)				گام نصب کابل (s) (متر)	طول کابل (متر)
۳۰	۲۰	۱۵	۱۲		
۳,۱۶	۴,۴۴	۵,۴	۶,۴	۱	۵
۴,۴۹	۶,۱۲	۷,۰۶	۷,۹۱	۱,۵	
۵,۳۹	۷,۰۴	۷,۹۲	۸,۷۶	۲	
۶,۱۴	۷,۷۳	۸,۵۹	۹,۳۷	۲,۵	۷,۵
۳,۰۱	۳,۷۳	۴,۲۹	۴,۹۶	۱	
۳,۷۳	۴,۸۶	۵,۷۵	۶,۵۳	۱,۵	
۴,۲۳	۵,۶۹	۶,۶۰	۷,۴	۲	۲,۵
۴,۸۲	۶,۴۴	۷,۳۵	۸,۱۲	۲,۵	



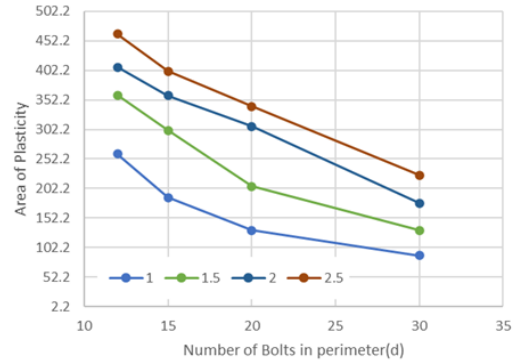
شکل ۱۹: نمودار مساحت زون تأثیر نسبت به طول کل پیچ سنگ مصرفی ۷/۵ متری در سناریوهای مختلف

با توجه به آنالیز انجام‌شده برای انتخاب شبکه بهینه پیچ‌سنگ گذاری، شبکه ۱/۵×۱/۵ برای زمینی با خصوصیات مذکور جهت پایداری انتخاب شده است. میزان پیچ‌سنگ مصرفی برای این الگو با توجه به طول تونل که برابر ۲۸ متر بوده که شامل ۱۹ گام نصب در آن خواهد بود و در هر گام تعداد ۲۰ پیچ‌سنگ ۵ متری نصب شده، که در مجموع طول پیچ‌سنگ مصرفی برابر با ۱۹۰۰ متر است. حال برای بررسی میزان تأثیر طرح‌های پیچشی، طرح‌های کوتاه-بلند و طرح‌های ترکیبی به صورت مجزا برای هر طرح، مدل‌سازی‌های مجزا با ابعاد شبکه متفاوت و الگوی خاص انجام شده تا شبکه بهینه به دست آمده و تأثیر طرح‌های مذکور در کاهش میزان مصرفی پیچ‌سنگ برآورد شود. هر طرح با تعداد ۲۰ پیچ‌سنگ در محیط تونل (مطابق با الگوی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی اولیه) مدل شده و بعداز آن اقدام به افزایش یا کاهش گام نصب پیچ‌سنگ در راستای تونل برای حصول نتیجه مطلوب گردیده است.

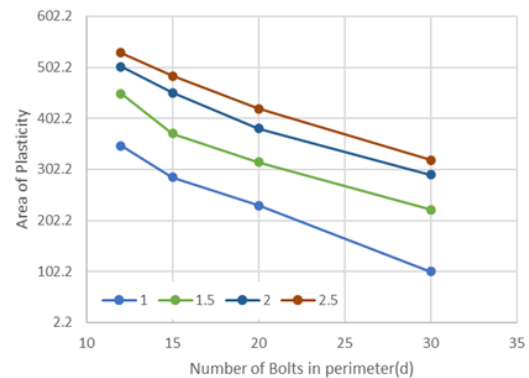
۳-۲- تحلیل اثر آرایش کوتاه و بلند

۳-۲-۱- آرایش کوتاه و بلند با کابل‌های ۵ و ۷/۵ متری

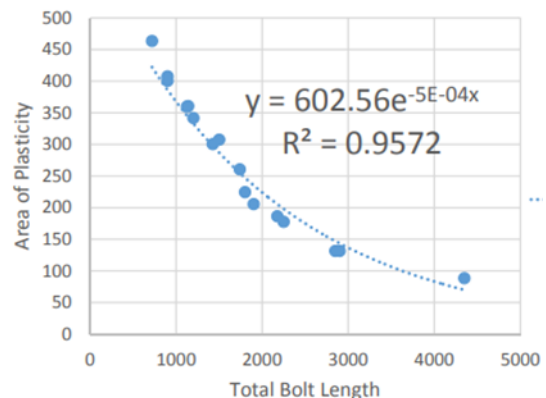
در ادامه برای بررسی پایداری فضا، با طرح پیچ‌سنگ‌های کوتاه- بلند، پیچ‌سنگ‌های کوتاه ۵ متر و پیچ‌سنگ‌های بلند ۷/۵ متر، جهت مدل‌سازی انتخاب شده است. شبیه‌سازی اولیه با تعداد ۲۰ پیچ‌سنگ در محیط تونل و با طول گام ۱ متر انجام‌شده که میزان جابجایی به مقدار ۵/۵ سانتی‌متر رسیده است، که از حد مجاز ساکورایی کمتر است. نتایج کانتورهای جابجایی اطراف تونل و همچنین ناحیه تأثیر اطراف تونل در شکل ۲۰ نمایش داده شده است. در این مرحله با افزایش طول گام برای یافتن شبکه بهینه، شبیه‌سازی‌های متعدد شبکه پیچ‌سنگ با گام‌های ۱/۵ و ۱/۷



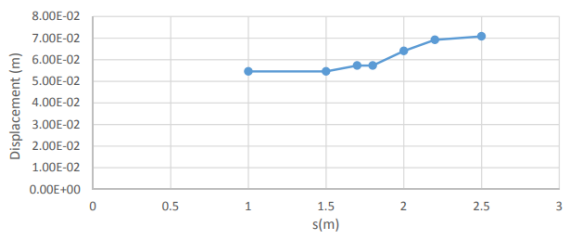
شکل ۱۶: نمودار مساحت زون تأثیر نسبت به تعداد پیچ‌سنگ‌های ۵ متری در محیط تونل (d) در حالت‌های مختلف گام نصب کابل در طول (s)



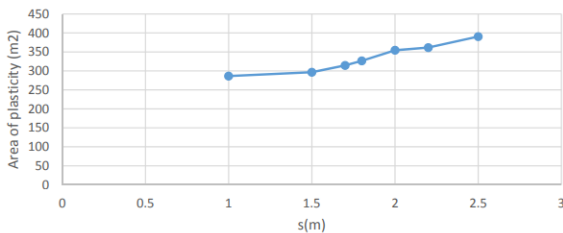
شکل ۱۷: نمودار مساحت زون تأثیر نسبت به تعداد پیچ‌سنگ‌های ۷/۵ متری در محیط تونل (d) در حالت‌های مختلف گام نصب کابل در طول (s)



شکل ۱۸: نمودار مساحت زون تأثیر نسبت به طول کل پیچ سنگ مصرفی ۵ متری در سناریوهای مختلف



شکل ۲۱: میزان جابجایی برحسب گام نصب کابل در مدل سازی الگوی کوتاه- بلند ۵ و ۷٫۵ متری با گام های مختلف

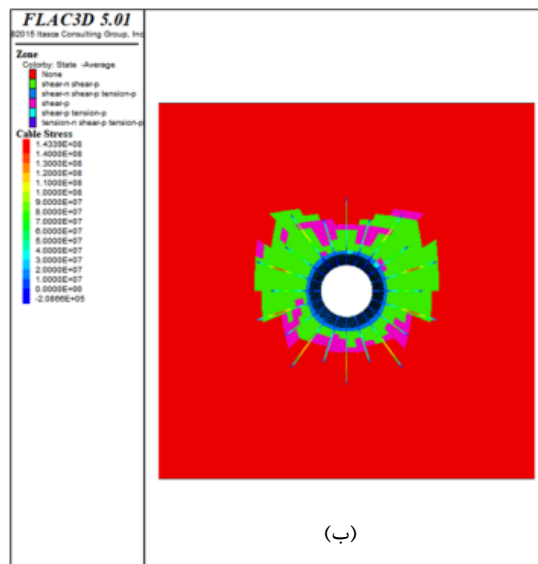
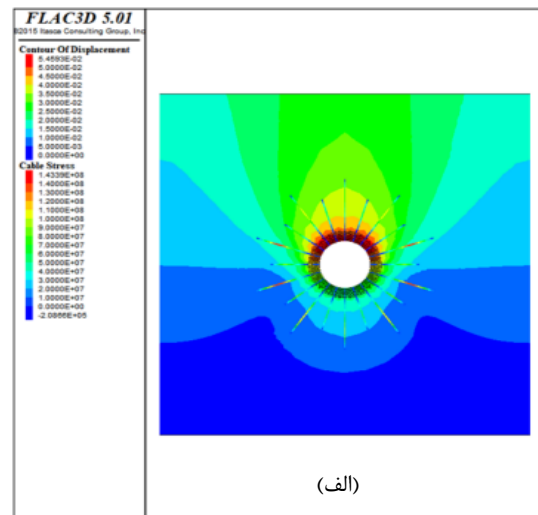


شکل ۲۲: مساحت ناحیه پلاستیک در مدل سازی الگوی کوتاه- بلند ۵ و ۷٫۵ متری با گام های مختلف نصب

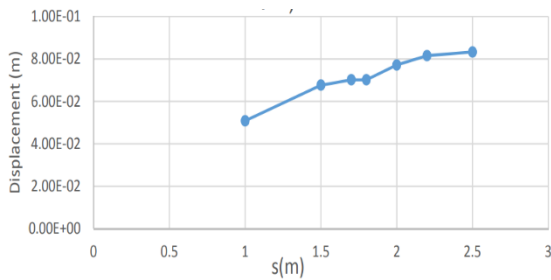
۳-۲-۲- آرایش کوتاه و بلند با کابل های ۳٫۷۵ و ۵ متری در ادامه برای بررسی پایداری فضا، با طرح پیچ سنگ های کوتاه- بلند، پیچ سنگ های کوتاه ۳٫۷۵ متر و پیچ سنگ های بلند ۵ متر، جهت مدل سازی انتخاب شده است. شبیه سازی اولیه با تعداد ۲۰ پیچ سنگ در محیط تونل و با طول گام ۱ متر انجام شده که میزان جابجایی به مقدار ۶٫۷ سانتیمتر رسیده است، که کمتر از حد مجاز ساکورایی است. شکل ۲۳ نتایج کانتورهای جابجایی و ناحیه تأثیر اطراف تونل را نمایش می دهند.

در این مرحله با افزایش طول گام برای یافتن شبکه بهینه، شبیه سازی های متعدد شبکه پیچ سنگ گام های ۱٫۵ و ۱٫۷ و ۲ و ۲٫۲ و ۲٫۵ انجام شده تا با استفاده از تعداد پیچ سنگ کمتر مقدار جابجایی باقیمانده از مقدار حد مجاز ساکورایی (۷ سانتیمتر) فراتر نرود. اندازه شبکه بهینه با الگوی پیچ سنگ کوتاه- بلند ۱٫۷×۱٫۵ به دست آمده است (شکل ۲۴ و ۲۵) تعداد گام نصب پیچ سنگ در این مدل برابر ۱۶ بوده که با توجه به الگوی مصرفی پیچ سنگ در هر گام که برابر با ۸۷٫۵ متر است (۱۰ پیچ سنگ ۳٫۷۵ متری و ۱۰ پیچ سنگ ۵ متری) صرفه جوئی پیچ سنگ در این الگو برابر با ۱۰۰ متر در ۲۸ متر بوده، که برابر با ۶ درصد پیچ سنگ مصرفی نسبت به الگوی مرسوم است.

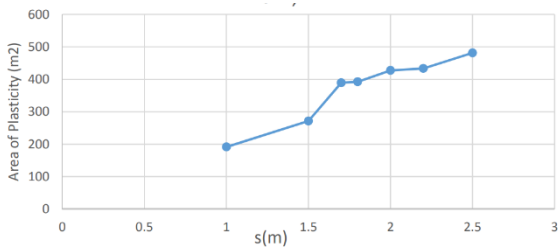
و ۱٫۸ و ۲ و ۲٫۲ و ۲٫۵ انجام شده تا با استفاده از تعداد پیچ سنگ کمتر مقدار جابجایی باقی مانده از مقدار حد مجاز ساکورایی (۷ سانتیمتر) فراتر نرود. مقادیر جابجایی حاصل از اعمال شبکه کوتاه- بلند ۵ و ۷٫۵ متری در شکل ۲۱ آورده شده است. با توجه به این نمودار اندازه شبکه بهینه با الگوی پیچ سنگ کوتاه- بلند ۲٫۲×۱٫۵ به دست آمده است (شکل ۲۱ و ۲۲). تعداد گام نصب پیچ سنگ در این مدل برابر ۱۳ بوده که با توجه به الگوی مصرفی پیچ سنگ در هر گام که برابر با ۱۲۵ متر است (۱۰ پیچ سنگ ۷٫۵ متری و ۱۰ پیچ سنگ ۵ متری) صرفه جوئی پیچ سنگ در این الگو برابر با ۱۷۵ متر در ۲۸ متر بوده، که برابر با ۱۰ درصد پیچ سنگ مصرفی نسبت به الگوی مرسوم است.



شکل ۲۰: مدل سازی الگوی کوتاه- بلند با پیچ سنگ های به طول ۵ و ۷٫۵ متر با فاصله شعاعی ۱٫۵ متر و ۱ متر در عمق (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تأثیر اطراف تونل



شکل ۲۴: میزان جابجایی بر حسب گام نصب کابل



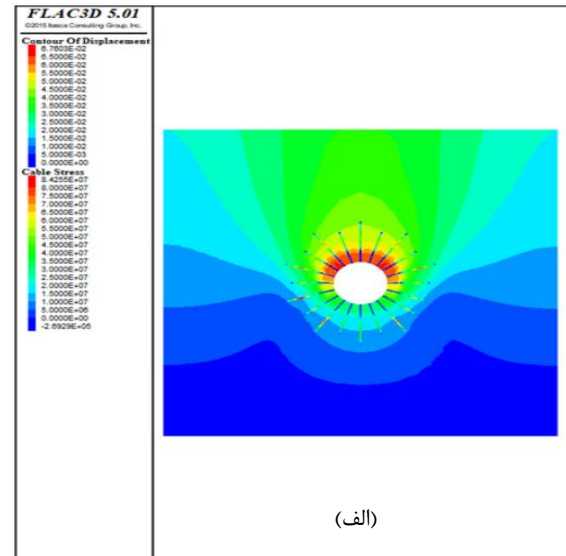
شکل ۲۵: مساحت ناحیه پلاستیک در مدل‌سازی الگوی کوتاه-بلند ۳٫۷۵ و ۵ متری با گام‌های مختلف نصب



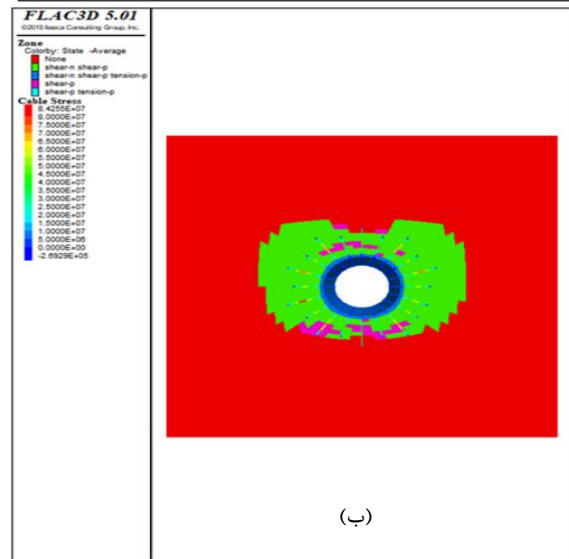
شکل ۲۶: نحوه نصب و گردش کابل در هر گام با زاویه ۶ درجه

مدل‌سازی آرایش پیچشی برای کابل با طول ۵ متر برای گام‌های ۱، ۱٫۵، ۲، ۲٫۵ و ۳ متر انجام گرفت. در این حالت تنها یک مقدار برای فاصله کابل‌ها در محیط تونل (d) در نظر گرفته شد و به عبارت دیگر تنها حالتی که تعداد کابل‌ها در محیط تونل ۲۰ عدد بوده است مورد مدل‌سازی قرار گرفته است. در ادامه نتایج مربوط به پیاده‌سازی الگوهای مختلف آورده شده است.

با توجه به شکل ۲۷ مشاهده می‌شود که میزان جابجایی از ۷ سانتی‌متر به ۴ سانتی‌متر کاهش یافته، که بیانگر کارایی الگوی پیچشی بر میزان پایداری فضا و کاهش میزان جابجایی است. مدل‌سازی آرایش پیچشی برای کابل با طول ۷٫۵ متر برای گام‌های ۱، ۱٫۵، ۲، ۲٫۵ و ۳ متر انجام گرفت. در این حالت تنها یک مقدار برای فاصله کابل‌ها در محیط تونل (d) در نظر گرفته شد و به عبارت دیگر تنها حالتی که تعداد کابل‌ها در محیط تونل ۲۰ عدد بوده است مورد



(الف)



(ب)

شکل ۲۳: مدل‌سازی الگوی کوتاه-بلند با پیچ سنگ‌های به طول ۳٫۷۵ و ۵ متر با فاصله شعاعی ۱٫۵ متر و ۱ متر در عمق، الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تأثیر اطراف تونل

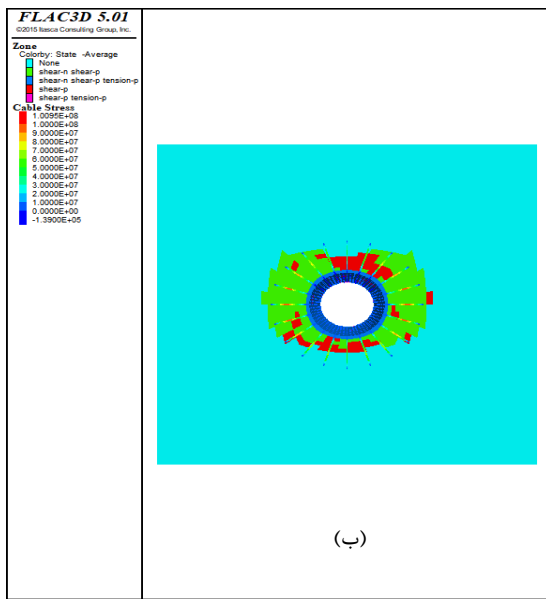
۳-۳- تحلیل آرایش پیچشی

دومین طرح انتخابی برای پیاده‌سازی کابل‌ها در محیط تونل، طرح پیچشی است. همان‌طور که در شکل ۲۶ قابل مشاهده است. در گام نخست برای طرح پیچشی با فاصله ۱٫۵ متر بر روی محیط تونل، طول گام دو متر در راستای تونل و زاویه پیچش ۶ درجه در هر گام مدل‌سازی انجام شده است.

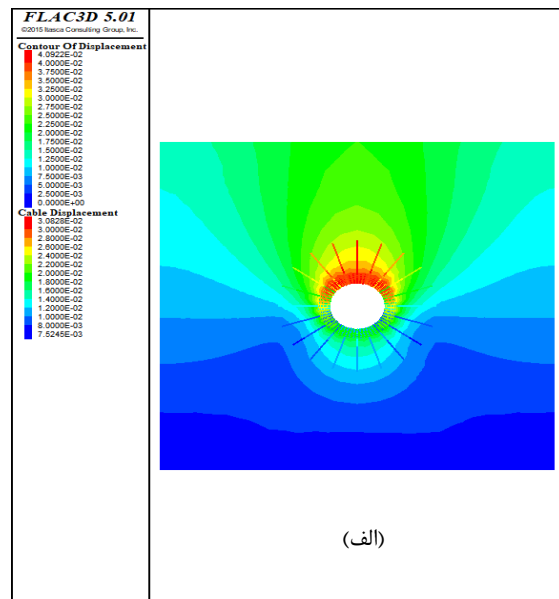
در شکل ۲۹ مقدار جابجایی ایجاد شده پس از اعمال نگهداری پیچشی با کابل های ۵ و ۷ متری در گام های مختلف نگهداری آورده شده است. چنانچه مشاهده می شود برای دستیابی به جابجایی حداکثر ۷ سانتی متر که حد مجاز تراز هشدار اول ساکورایی است، الگوهای با گام ۲٫۵ متری برای پیچ سنگ های ۷٫۵ متری و با گام ۲ متر برای کابل ۵ متری مناسب است و پیچ سنگ ۷٫۵ متری جابجایی ها را به میزان بیشتری کاهش می دهد.

مدل سازی قرار گرفته است. در ادامه نتایج مربوط به پیاده سازی الگوهای مختلف آورده شده است.

شکل ۲۸ نشان می دهد که میزان جابجایی از ۷ سانتی متر به ۳٫۵ سانتی متر کاهش یافته، که بیانگر کارایی الگوی پیچشی بر میزان پایداری فضا و کاهش میزان جابجایی است. در راستای افزایش گام نصب با استفاده از شبکه پیچشی، تا آنجا که جابجایی تونل از ۷ سانتی متر تجاوز نکند، شبکه های مختلف با تغییر طول گام شبیه سازی شده تا شبکه بهینه استخراج شود.

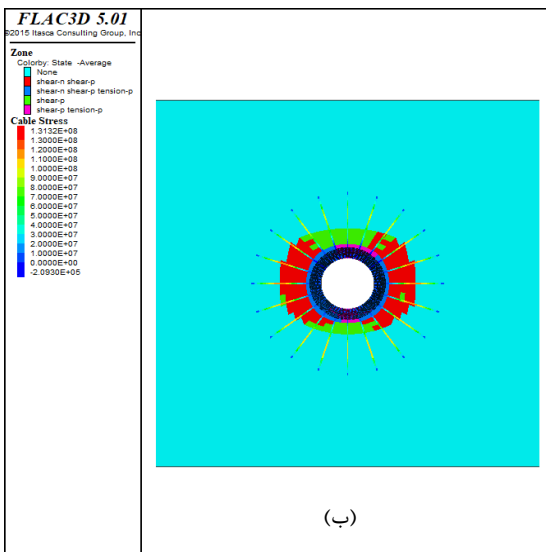


(ب)

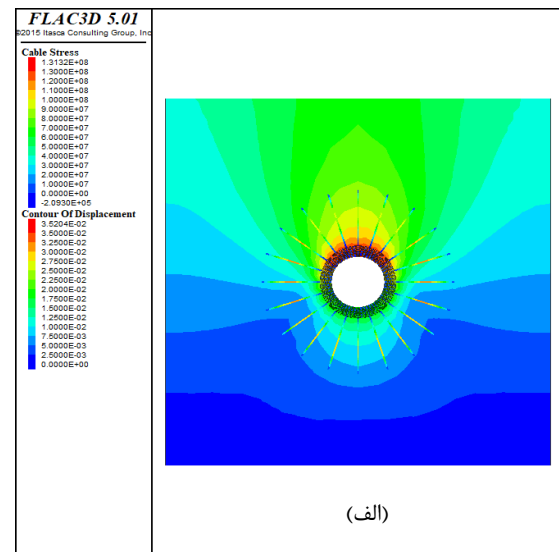


(الف)

شکل ۲۷: مدل سازی الگوی پیچشی با پیچ سنگ به طول ۵ متر با فاصله شعاعی ۱٫۵ متر و ۱ متر در عمق (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تأثیر اطراف تونل



(ب)



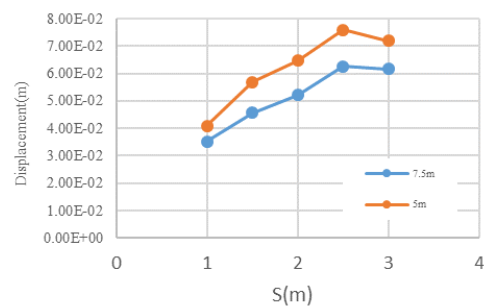
(الف)

شکل ۲۸: مدل سازی الگوی پیچشی با پیچ سنگ به طول ۷٫۵ متر با فاصله شعاعی ۱٫۵ متر و ۱ متر در عمق (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تأثیر اطراف تونل

نتایج حاصل از تغییر خصوصیات پیچ‌سنگ با الگوهای متفاوت را می‌توان به صورت جامع در جدول ۸ مشاهده کرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از کابل ضعیف با خصوصیات ذکر شده، جابجایی‌ها را در بیشتر الگوها به کمتر از حد مجاز ساکورایی رسانده است.

جدول ۷: خصوصیات دو پیچ‌سنگ متوسط و ضعیف مورد استفاده در مدل‌سازی

توصیف پیچ‌سنگ	متوسط (۲)	ضعیف (۳)
پیش کشش در کابل (MPa)	۵	۱
مقاومت دوغاب (MPa)	-	-
سختی دوغاب (MPa)	۱۷۰	۱۰۰
ظرفیت کششی دوغاب (MN)	-	-
مقاومت تسلیم (MPa)	۳۰۰	۲۰۰
مساحت مقطع (mm ²)	۵۰۵,۵	۲۵۶,۵۷
مدول الاستیسیته (GPa)	۹۰	۴۵



شکل ۲۹: مقایسه میزان جابجایی الگوی پیچشی با پیچ‌سنگ‌های ۵ و ۷٫۵ متری در گام‌های مختلف

۳-۴- بررسی اثر تغییر خصوصیات کابل

به منظور بررسی اثر تغییر خصوصیات پیچ‌سنگ، دو نمونه کابل با خصوصیات متوسط و ضعیف با الگوهای منظم علاوه بر مدل‌های قبلی مورد مدل‌سازی و بررسی قرار گرفته‌اند. در جدول ۷ خصوصیات دو کابل استفاده شده در مدل‌سازی‌ها آورده شده است. در شکل‌های ۳۰ و ۳۱ نتایج حاصل از دو نمونه از کابل‌های ضعیف و متوسط با طول‌های ۵ و ۷٫۵ متر نشان داده شده است.

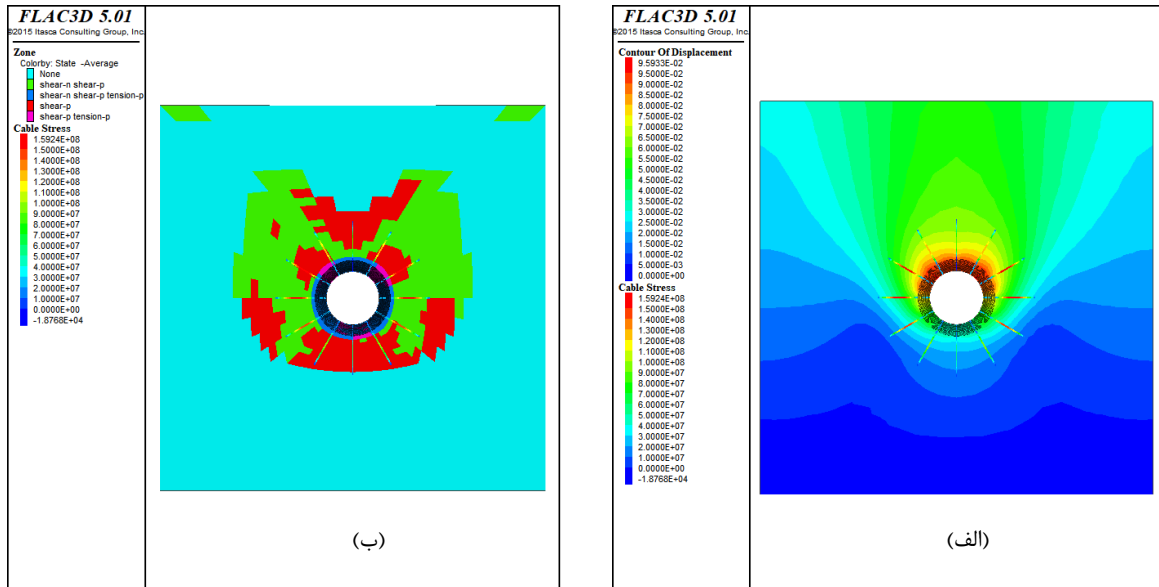
جدول ۸: نتایج مربوط به مدل‌سازی پیچ‌سنگ با خصوصیات متوسط و ضعیف

شماره مدل	توصیف پیچ‌سنگ	طول پیچ‌سنگ (متر)	تعداد پیچ‌سنگ در محیط تونل (d)	طول گام (s) (متر)	جابجایی (سانتی‌متر)
۱	۲	۵	۱۲	۱٫۵	۹٫۵۹
۲	۲	۵	۱۵	۱	۷٫۷۶
۳	۲	۵	۲۰	۲٫۵	۹٫۵۶
۴	۲	۷٫۵	۱۲	۱٫۵	۹٫۱۰
۵	۲	۷٫۵	۱۵	۲٫۵	۹٫۸۶
۶	۲	۷٫۵	۲۰	۱٫۵	۷٫۸۳
۷	۳	۵	۱۲	۱	۵٫۴۷
۸	۳	۵	۱۵	۱٫۵	۶
۹	۳	۵	۲۰	۲٫۵	۶٫۷۲
۱۰	۳	۵	۳۰	۲	۴٫۶۲
۱۱	۳	۷٫۵	۱۲	۱٫۵	۵٫۸۳
۱۲	۳	۷٫۵	۱۵	۱٫۵	۵٫۲۸
۱۳	۳	۷٫۵	۲۰	۲٫۵	۵٫۷۶
۱۴	۳	۷٫۵	۳۰	۱	۳٫۰۴

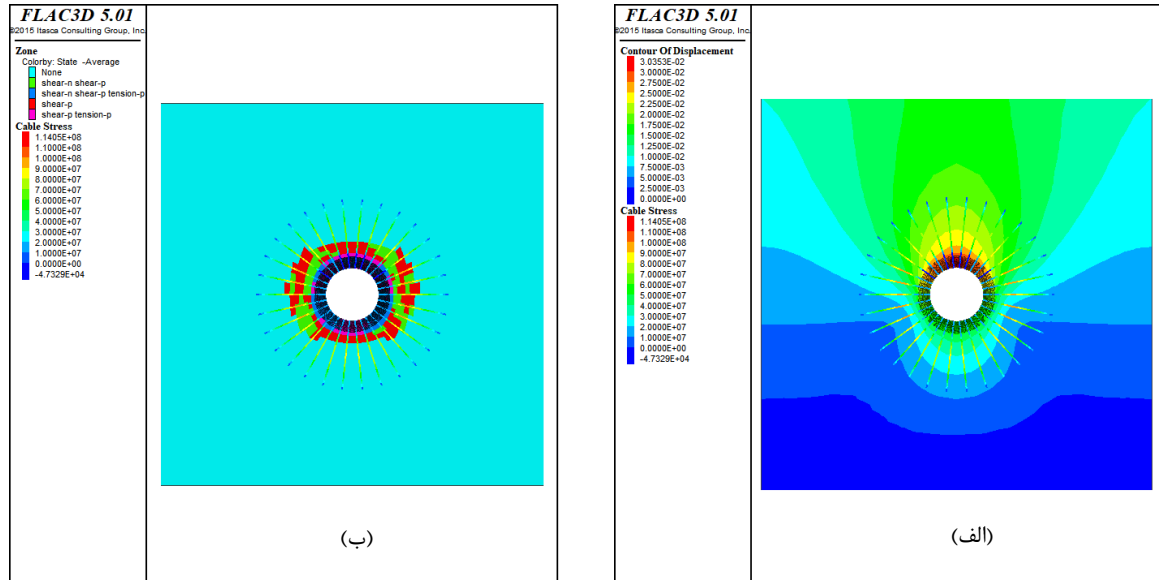
شکل‌های ۳۴ و ۳۵، به نظر می‌رسد که الگوی پیچشی همواره کمترین میزان جابجایی و ناحیه پلاستیک را به توجه به گام‌های نصب پیچ‌سنگ، به همراه دارد. اما از آنجایی که الگوی ترکیبی از نظر میزان مصرف پیچ‌سنگ و اجرا سهولت بیشتری داشته و مقرون به صرفه‌تر می‌باشد به عنوان الگوی بهینه تعیین می‌گردد.

۳-۵- پیشنهاد الگوی بهینه

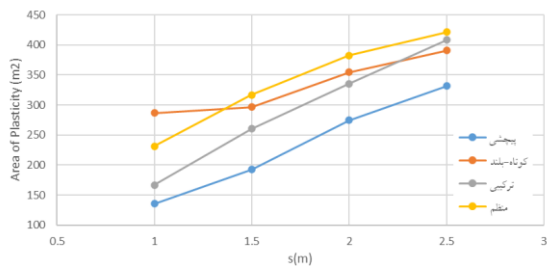
با توجه به نمودارهای شکل ۳۲ و ۳۳ که مربوط به مقایسه میزان جابجایی و ناحیه پلاستیک در چهار الگوی منظم، پیچشی، کوتاه-بلند و ترکیبی با طول‌های ۵ و ۷٫۵ متری با تعداد ۲۰ پیچ‌سنگ در محیط تونل می‌باشد و مقایسه آن با چهار الگوی مربوط به پیچ‌سنگ ۵ متری



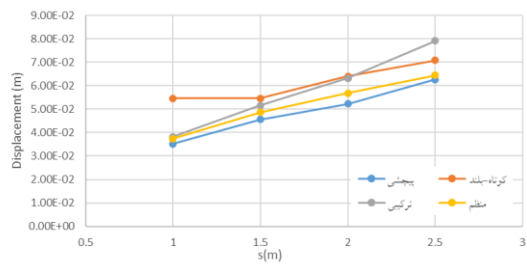
شکل ۳۰: مدلسازی الگوی منظم پیچ‌سنگ ۵ متر با خصوصیات متوسط فاصله شعاعی ۲٫۵ متر و ۱٫۵ متر در عمق (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تاثیر اطراف تونل



شکل ۳۱: مدلسازی الگوی منظم پیچ‌سنگ ۷٫۵ متر با خصوصیات ضعیف فاصله شعاعی ۱ متر و ۱ متر در عمق (الف) کانتورهای جابجایی اطراف تونل (ب) ناحیه تاثیر اطراف تونل



شکل ۳۳: نمودار زون پلاستیک به گام نصب حاصل از مدلسازی الگوهای مرسوم، پیچشی، ترکیبی، کوتاه-بلند مربوط به پیچ‌سنگ ۵ و ۷٫۵ متری



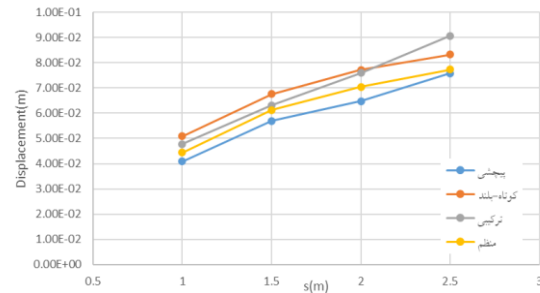
شکل ۳۲: نمودار جابجایی به گام نصب حاصل از مدلسازی الگوهای مرسوم، پیچشی، ترکیبی، کوتاه-بلند مربوط به پیچ‌سنگ ۵ و ۷٫۵ متری

ترکیب دیگر (۳/۷۵ و ۵ متر)، اندازه شبکه بهینه $۱,۷ \times ۱,۷$ به دست آمده و صرفه‌جویی حدود ۶ درصد حاصل شد.

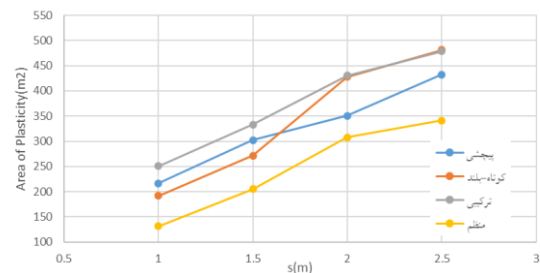
- در الگوی پیچشی، کابل‌های ۵ و ۷/۵ متری به ترتیب با گام ۲ و ۲/۵ متری مناسب می‌باشد و پیچ‌سنگ ۷/۵ متری جابجایی‌ها را به میزان بیشتری کاهش می‌دهد. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که انتخاب صحیح الگوی کابل تأثیر مستقیم بر کاهش جابجایی و کنترل زون پلاستیک دارد. الگوی کوتاه-بلند با حفظ شرایط پایداری سازه‌ای، به دلیل سهولت اجرا و صرفه‌جویی اقتصادی به‌عنوان الگوی بهینه برای نگهداری در زمین‌های ضعیف پیشنهاد شد.

مراجع

- [1] Bagheri, M.; Jalalifar, H.; R. Rahmanned, R., (2008), The Evaluation and Applicability of Rock Bolts in Coal Mines with regard to the Kerman Province Mines. In: Proceedings of the Aachen international symposium on Roof-bolting in Mining, March 2008. Publisher: Wissenschaftsverlag Mainz in Aachen; pp 257- 274.
- [2] Sanmarian Esfahani, N., Azari, A., Baghbanan, A., Hashem Al-Hosseini, H. (2023). Evaluation of optimal rock bolt arrangement for the stability of a jointed rock mass using 3D DEM-DFN method – Case study: Kolab 2 cavern. Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering, 13(34), 67–81. [In Persian]
- [3] Croney P. Legge T. and Dhalla A., (1978), Location of block release mechanism in tunnels from geological data and the design of associated support. Computer Methods in Tunnel Design. Institute of Civil Engineers. London, pp 97-119.
- [4] Everling G., (1964), Model test concerning the interaction of ground and roof support in gate roads. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 1, pp 319-326.
- [5] Fahimifar, A.; Soroush, H. (2004): A theoretical approach for analysis of the interaction between grouted rockbolts and rock masses. In: Tunnelling and Underground Space Technology, 20(2004), Issue 4; Publisher: Elsevier Press; pp 333-343.
- [6] Aghakhani H., Ahangari K, Eftekhari M., (2024) Estimation of Deformation Modulus of Azad Pumped Storage Powerhouse Cavern using Back Analysis based on Combination of Extensometer and Load Cell Results, Indian Geotechnical Journal, 1-17.



شکل ۳۴: نمودار جابجایی به گام نصب حاصل از مدل‌سازی الگوهای مرسوم، پیچشی، ترکیبی، کوتاه-بلند مربوط به پیچ‌سنگ ۳/۷۵ و ۵ متری



شکل ۳۵: نمودار زون پلاستیک به گام نصب حاصل از مدل‌سازی الگوهای مرسوم، پیچشی، ترکیبی، کوتاه-بلند مربوط به پیچ‌سنگ ۳/۷۵ و ۵ متری

۴- نتیجه‌گیری

- در این پژوهش، عملکرد الگوهای مختلف کابل کششی برای نگهداری فضاهای زیرزمینی در شرایط توده‌سنگ بسیار ضعیف با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار FLAC3D بررسی شد. چهار الگوی مرسوم، کوتاه-بلند، پیچشی و ترکیبی مورد ارزیابی قرار گرفتند و نتایج به شرح زیر است:
- در حالت بدون نگهداری، جابجایی حداکثر تونل به حدود ۱۵/۵ سانتی‌متر رسید که بسیار بیشتر از حد مجاز (۷ سانتی‌متر) بوده و ناپایداری کامل سازه‌ای را نشان داد.
 - در الگوی مرسوم، استفاده از کابل‌های ۵ متری با فاصله‌گذاری $۱,۷ \times ۱,۷$ متر موجب شد جابجایی حداکثر به ۶/۱ سانتی‌متر کاهش یابد و پایداری تأمین شود. در این حالت، مصرف کل کابل برای یک تونل ۲۸ متری برابر با ۱۹۰۰ متر محاسبه شد. برای طول ۷/۵ متر، این مقدار به ۵/۷ سانتی‌متر رسید.
 - در الگوی کوتاه-بلند (۵ و ۷/۵ متر به صورت یکی در میان)، اندازه شبکه بهینه $۱,۷ \times ۲,۲$ بدست آمد و مصرف کابل حدود ۱۰٪ کمتر از حالت مرسوم بود. در

- Bulletin of the International Association of Engineering Geology;9: 15-39.
- [21] Barton N, Lien R, Lunde J. ,(1974), Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*;6(4),pp 189-239
- [22] Schach R, Garschol K, Heltzen AM., (1979), *Rock bolting: a practical handbook*. Oxford: Pergamon
- [23] .Farmer IW, Shelton PD., (1980), Factors that affect underground rockbolt reinforcement systems design. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy* (1980);89:68-83.
- [24] Crawford AM, Ng L, Lau KC. ,(1985), The spacing and length of rock bolts for underground openings in jointed rock. In: Eissenstein Z, editor. *Proceedings of the 84 5th international conference on numerical methods in geomechanics*. A.A. Balkema. pp 293-300.
- [25] Stillborg B., (1994), *Professional user's handbook for rockbolting*. ClausthalZellerfeld: Trans Tech Publications.
- [26] .Schubert W., (2001), Recent experience with squeezing rock in Alpine tunnels. In: CUC erock support in medium to poor rock conditions.
- [27] Li CC., (2012), Design principles of rock support for underground excavations. In: Eurock 2012. Stockholm, Sweden.
- [28] Ziping, H. (2001): Stabilizing of rock cavern roofs by rockbolts. Department of geology and mineral resources engineering; Faculty of applied earth science; Norwegian University of Science and Technology; PhD thesis.
- [29] Ng C.W.W., Lee G.T.K., (2002) , A three-dimensional parametric study of the use of soil nails for stabilising tunnel faces", *Computers and Geotechnics*, Vol. 29:pp 673-697 .
- [30] Fellin W., King J., Kirsch A., (2010), Oberguggenberger M., "Uncertainty modelling and sensitivity analysis of tunnel face stability", *Structural Safety* Vol. 32 402-410
- [31] Sakurai, Sh.; 2010; "Modeling strategy for jointed rock masses reinforced by rock bolts in tunneling practice". *Acta Geotechnica*, Vol. 5.2, pp. 121-126.
- [32] Kaya, A.; Bulut, F.; and Sayin A.; 2011; "Analysis of support requirements for a tunnel portal in weak rock: A case study from Turkey". *Scientific Research and Essays*, Vol. 6(31), pp.6566-6583.
- [33] Lorig, L. J.; Varona, P.; 2013; "Guidelines for numerical modelling of rock support for mines." *Proceedings of the Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground*
- [7] Senemarian Isfahani N, Azhari A, Baghbanan A, Hashemolhosseini H, (2023), Evaluation of the optimal arrangement of rock bolts on the stability of jointed rockmass Using Three-Dimensional DFN-DEM Approach - Case study: Clab 2 cavern. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*. Vol. 13, No. 34, pp 67-81.
- [8] Aghakhani H., Ahangari K, Eftekhari M., (2022), Loss displacement estimation of Azad pumped storage powerhouse cavern using combination of numerical modeling and instrumentation results, *Innovative Infrastructure Solutions*, 7:32.
- [9] Hobbs D. W., (1968), Scale model studies of strata movement around mine roadways. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci*. Vol. 5, pp 219-235.
- [10] Hoek E., (1963), Experimental study of rock stress problems in deep level mining. *Proc. 1st Congr. on Experimental Mechanics*, New York, pp 177-193.
- [11] Hoek E. ,(2007), Model to demonstrate how bolts work. In: *Practical rock engineering*;
- [12] Itasca Consulting Group, (2015), *FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 5.1.*, ITASCA Consulting Group, Inc, Minneapolis, MN.
- [13] Junlu, L. (1999): A new rockbolt design criterion and knowledge expert system for stratified roof. The Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University; Dissertation. In: website: www.eng.unsw.edu.au/faculty/publicat/2007/Eng%20Research%20Guide.pdf.
- [14] Kaiser PK, Tannant DD, McCreath DR. ,(1996), *Canadian rock burst support handbook*. Sudbury, Canada: Geomechanics Research Center.
- [15] Li C. C., (2017), Principles of rockbolting design, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp 396-414.
- [16] Kovari, K. (2004): History of rockbolt and the sprayed concrete lining method. In: *Proceedings of the Aachen International symposium on Roofbolting in Mining* (2004); Publisher: Wissenschaftsverlag Mainz in Aachen; pp 39 – 85.
- [17] Rabcewicz, L. V. (1964). The new Austrian tunnelling method. *Water power*
- [18] Panek LA., (1964), Design for bolting stratified roof. *Transactions of the Society of Mining Engineers* ;229:9-13.
- [19] Coates DF, Cochrane TS. , (1970), Development of design specifications for rock bolting from research in Canadian mines. *Research Report R224*. Mining Research Centre, Energy, Mines and Resources Canada.
- [20] Lang T. ,(1972), *Rock reinforcement*.

- [40] Longji Guo, Zhigang Tao, Manchao He, Massimo Coli. (2024). Excavation compensation and bolt support for a deep mine drift, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Volume 16, Issue 8, Pages 3206-3220, ISSN 1674-7755
- [41] Chenglei Du, Yong Cheng, Quansheng Liu, Zitao Cheng, Yiwei Liu, You Lu, Haitao Jiang. (2025). A new type of rockbolt model in 3D FDEM and its application to tunnel excavation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 155, Part 1, 106210, ISSN 0886-7798
- [42] Sarfarazi, V. , Zhou, L. , Haeri, H. , Salehipour, P. , Elahi, A. , Moayer, A. and Fatehi Marji, M. (2025). Failure Mechanisms of Concrete-Bolt Attachment Surface: Impact of Cable Bolt Indent Number and Shape. *Journal of Mining and Environment*, 16(1), 223-239.
- [43] Karami, M., Abreh, B., Faramarzi, L. (2012). Practical training in FLAC3D software. Isfahan University of Technology - Academic Jahad Publications. [In Persian]
- [44] Hosseini, M., Afzal Aghaei, A. (2012). Back analysis of Siyah Bisheh dam power plant cavern using instrumentation data. *Journal of Mining Engineering*, 7, [In Persian].
- Construction. Australian Centre for Geomechanics, pp. 81-105.
- [34] Mark C., (2015) , Design of roof bolts systems, *Ergonomics in Mining project*.
- [35] Boon, C. W.; Houlsby, G. T.; Utili, S.; 2015; "Designing tunnel support in jointed rock masses via the DEM." *Rock mechanics and rock engineering*, Vol. 48.2, pp. 603-632.
- [36] Shreedharan, S.; Kulatilake, P.; 2016; "Discontinuum-equivalent continuum analysis of the stability of tunnels in a deep coal mine using the distinct element method". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 49.5: pp. 1903-1922
- [37] Skrzypkowski, K., Korzeniowski, W., Zagórski, K., & Zagórska, A. (2019). Flexibility and Load-Bearing Capacity of Roof Bolting as Functions of Mounting Depth and Hole Diameter. *Energies*, 12(19), 3754.
- [38] Sarfarazi, Vahab & Asgari, Kaveh & Nasrollahi, Mehdi. (2021). Interaction between rock bolt and rock bridge under tensile loading. *Geomechanics and Geoengineering*. 25. 455-471. 10.12989/gae.2021.25.6.455.
- [39] Fu, J., Sarfarazi, V., Haeri, H., Zarei, A. S., Bahrami, R., Imani, M., & Marji, M. F. (2024). Experimental and Numerical Analyses of Shear Failure Mechanisms of Rock Bolt Surrounded by Bedded Rock. *International Journal of Geomechanics*, 24(12), 04024276.

¹ Encapsulated

² Kirsch



مقاله پژوهشی

پرعیارسازی نمونه هماتیتی کم عیار به روش های ثقلی و مغناطیسی (مطالعه موردی: خاک سرخ معدن ساحل)

سید حمزه امیری^۱، مرضیه حسینی نسب^{۲*}، محمد نوع پرست^۱، سید ضیاءالدین شفایی تنکابنی^۱

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

(دریافت: ۱۴ اسفند ۱۴۰۳، بازنگری: ۱۵ شهریور ۱۴۰۴، پذیرش: ۱۸ شهریور ۱۴۰۴)

چکیده

در این تحقیق، فرآوری نمونه کانسنگ خاک سرخ منطقه غرب بندرعباس مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات کانی شناسی نشان داد کانی های آهن دار نمونه شامل هماتیت و گوتیت بوده و کوارتز و کلسیت عمده کانی های باطله را تشکیل می دهند. نتایج آنالیز شیمیایی تیتراسیون نشان داد که عیار هماتیت در نمونه حاضر ۴۴٫۷۱ درصد هماتیت (۳۱٫۳ درصد آهن) است و هدف رسیدن به عیار بالای ۵۵-۵۶ درصد هماتیت است. جهت فرآوری و کاهش کانی های باطله، آزمایش های ثقلی میز لرزان، آزمایش های مغناطیسی تر و خشک شدت و گرادیان بالا بر روی نمونه صورت پذیرفت. در انجام آزمایش های میز لرزان از روند طراحی آزمایش ها به روش فاکتوریل کامل استفاده شد و تأثیر پارامترهای شیب، دبی آب شستشو و آب خوراک بر عیار و بازیابی کنسانتره مورد بررسی قرار گرفت. برای آزمایش های میز لرزان که برای ابعاد درشت تر از ۱۵۰ میکرون انجام شد، در بهترین شرایط با دبی آب خوراک ۸ لیتر در دقیقه، شیب ۸ درجه و آب شستشو ۱۱٫۵ لیتر در دقیقه محصولی با عیار ۵۵٫۸۷ درصد هماتیت و بازیابی ۶۳٫۲۵ درصد به دست آمد که از آن می توان به عنوان روش پیش فرآوری استفاده نمود. جدایش مغناطیسی خشک گرادیان بالا پس از نرمه گیری نمونه خوراک اولیه، در محدوده ابعادی ۱۰۰۰+۲۳۸۰- میکرون، محصولی با عیار ۵۷٫۶ درصد هماتیت و بازیابی ۹۵٫۱۱ درصد و در محدوده ۱۵۰+۱۰۰۰- میکرون نیز محصولی با عیار ۶۴٫۳۴ درصد هماتیت و بازیابی ۷۵٫۱۴ درصد را حاصل نمود. در آزمایش های جدایش مغناطیسی تر شدت بالا نمونه خوراک اولیه نیز نهایتاً محصولی با عیار ۵۷٫۵۳ درصد هماتیت و بازیابی ۶۴٫۹ درصد به دست آمد.

کلمات کلیدی

خاک سرخ، هماتیت، میز لرزان، جدایش مغناطیسی، فاکتوریل کامل

*عهده دار مکاتبات: hosseinasab@eng.usb.ac.ir

DOI: 10.22034/ANM.2025.22874.1669

۱- مقدمه

بندرعباس قرار دارد. ذخیره قطعی این معدن، ۵۰۰۰۰۰ تن برآورد شده است. این معدن به‌عنوان نمونه شاخصی از ذخایر متعدد و با ذخیره کم موجود در منطقه است که به‌صورت اقتصادی از آن‌ها بهره‌گرفته نمی‌شود. مطالعه حاضر باهدف انجام بررسی‌های فرآوری به‌منظور افزایش عیار آهن از نمونه کم‌عیار هماتیتی از ذخیره فوق‌الذکر صورت پذیرفت. در این ارتباط ابتدا نمونه موردنیاز تهیه و پس از آماده‌سازی، بررسی‌های لازم بر روی آن انجام شد.

۲- پیشینه تحقیق

در ارتباط با پرعیارسازی نمونه‌های کم‌عیار هماتیتی تحقیقات بسیاری در ایران و جهان انجام شده است که در این قسمت به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. سنگ معدن هماتیت کم‌عیار در اگمیر ترکیه با استفاده از تجهیزات جداسازی ثقلی مرسوم، جیگ‌ها و میزهای لرزان و جداکننده مغناطیسی با شدت بالا مورد فرآوری قرار گرفت. در این تحقیق هم جداسازی ثقلی و هم جداسازی مغناطیسی با شدت بالا بر پرعیارسازی سنگ معدن هماتیت کم‌عیار مؤثر بودند و کنسانتره‌ای (۹۵۳+۶۳۵- میلی‌متر) حاوی ۵۱/۱ درصد آهن با بازیابی ۶۷/۸۹ درصد از خوراک با ۴۰/۸۳ درصد آهن، با استفاده از جیگ به دست آمد. در جداسازی مغناطیسی، کنسانتره‌ای با ۴۷/۲۱ درصد آهن و ۸۶/۶۶ درصد بازیابی از خوراک با عیار ۳۹/۳۴ درصد آهن در ابعاد ریزتر از ۳ میلی‌متر حاصل شد [۱۲].

سنگ معدن هماتیتی از استان سین کیانگ چین به‌منظور افزایش عیار آهن و کاهش سیلیس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کنسانتره آهن با ۶۱ درصد آهن و بازیابی ۶۶ درصد با استفاده از دو مرحله مغناطیسی شدت بالا و فلوتاسیون معکوس به دست آمد [۱۳].

بهنام فرد و خافاجه^۱ (۲۰۱۹)، با استفاده از روش مغناطیسی خشک شدت پایین، سنگ آهن کم‌عیار سنگان را پرعیار کردند. میزان آهن، اکسید آهن و محتوای گوگرد نمونه به ترتیب ۳۶/۸۶، ۸/۱ و ۰/۱۲ درصد بود. در این تحقیق کنسانتره‌ای با عیار ۴۷/۱۵ درصد آهن و بازدهی ۶۸/۵۶ درصد تولید شد [۱۴]. اکبری و همکاران (۱۳۹۵)، امکان استفاده از میز لرزان برای پرعیارسازی سنگ آهن هماتیتی زون کم‌عیار (۴۵ درصد آهن) معدن تنگراغ استان هرمزگان را بررسی کردند. در شرایط بهینه استفاده از میز لرزان طی دو مرحله رافر و اسکونجر از عیار ۴۵ درصد آهن، کنسانتره‌ای

یکی از رنگینه‌های مهم اکسید آهن که به‌صورت وسیع در صنایع رنگ‌سازی جهت تولید رنگ‌های مختلف روغنی، ساختمانی، صنعتی و غیره مصرف می‌شود، خاک سرخ است. علاوه بر این، خاک سرخ در صنایع دیگر از جمله صنایع شیمیایی، سیمان، پلاستیک، کاغذسازی، شیشه‌سازی، سرامیک و لوازم‌آرایشی نیز به کار می‌رود [۱-۴].

امروزه کاربردها و نیازهای وسیع صنایع مختلف به خاک سرخ سبب شده تا بشر در جهت کشف و بهره‌برداری از ذخایر جدید خاک سرخ برآید و حتی به علت پایین بودن کیفیت و کمیت خاک سرخ طبیعی، نسبت به تولید خاک سرخ مصنوعی نیز اقدام نماید [۲، ۳، ۵].

ذخایر خاک سرخ به‌طور عمده در مناطق حاره و مرطوب به‌صورت تمرکزهای باقیمانده از آهن تشکیل می‌شوند. در تشکیل این ذخایر، هوازدگی و آب‌های نفوذی یا فرورو، به‌عنوان دو عامل مؤثر و اصلی محسوب می‌شوند [۶، ۷].

این خاک‌ها از آهن یا آلومینیوم یا هر دو غنی هستند [۸]. در برخی از کنسارهای خاک سرخ مانند خاک سرخ در قسمت جنوبی کشور، خاک سرخ که عمدتاً از هماتیت تشکیل شده و همچنین اولیژیست و منیتیت به همراه نمک دیده می‌شود و در بعضی قسمت‌ها نیز نمک به‌صورت خالص یافت می‌شود. انحلال نمک و مهاجرت محلول‌های نمکی به پایین باعث می‌شود که خاک سرخ درون نمک به‌صورت نامحلول و درجا در داخل حفرات ایجادشده باقی بماند و تشکیل کنسار خاک سرخ را دهد [۹]. علاوه بر مصرف هماتیت به‌عنوان یکی از کانی‌های اکسیده در تولید آهن و فولاد، هماتیت در شرایط معینی تبدیل به خاک سرخ شده که در صنعت رنگ‌سازی از آن استفاده می‌شود [۱۰]. معمولاً لازم است تا اکسیدهای آهن طبیعی که برای مصرف به‌صورت رنگ‌دانه استخراج می‌گردند از نظر دانه‌بندی ریزتر و ساده‌تر شوند تا از لحاظ تجارتي اهمیت و ارزش بیشتری کسب کنند. کانی‌های اصلی اکسید آهن بر اساس خصوصیات فیزیکی و شیمیایی دسته‌بندی شده و مورد توجه واقع می‌شوند. ترکیب شیمیایی کانی‌هایی مانند گوتیت و هماتیت اکثراً به‌صورت خالص نیستند و تغییراتی توسط کارخانه‌های فرآوری رنگ‌دانه، بر روی آن‌ها انجام می‌گیرد [۱۱].

نمونه مورد مطالعه در این تحقیق متعلق به معدن ساحل در استان هرمزگان است که در فاصله ۲۰ کیلومتری غرب

با عیار متوسط ۵۷/۰۸ درصد و بازیابی کل ۳۵/۲ درصد حاصل شد [۱۵].

کونگ^۲ و همکاران (۲۰۲۲)، روش فیزیکی و روش های شیمیایی (هیدرو و پیرومتالورژی) بازیابی آهن از گل قرمز را بررسی نمودند و نشان دادند که این ترکیب می تواند در آینده در صنعت مورد استفاده قرار گیرد. در روش فیزیکی، کانی های حاوی آهن مستقیماً با استفاده از جدایش ثقیلی، جدایش مغناطیسی و فلوتاسیون فرآوری می شوند [۱۶].

جیانگ^۳ و همکاران، مخروط های مستقیم سنتی را با مخروط های سهموی مکعبی در هیدروسیکلون جایگزین کردند که به طور مؤثر محتوای ذرات ریز در ته ریز را کاهش داد [۱۷]. برخی از محققان از فرآیند جدایش مغناطیسی برای جداسازی بخش حاوی آهن بر مبنای اختلاف خاصیت مغناطیسی استفاده می کنند. جیمیسون^۴ و همکاران [۱۸] جدایش مغناطیسی شدت پایین و جدایش مغناطیسی تر شدت بالا را ترکیب کردند و کنسانتره ای با ۵۶ درصد وزنی از هماتیت به دست آوردند. به منظور افزایش محتوای کل آهن کنسانتره، لی^۵ و همکاران [۱۹] یک فرآیند جداسازی مغناطیسی دومرحله ای را به کار بردند؛ هر مرحله شامل جداسازی مغناطیسی ضعیف و جداسازی مغناطیسی قوی حلقه عمودی بود. محتوای کل آهن و نرخ بازیابی کنسانتره به ترتیب ۲۴/۶۳ و ۴۳/۲۹ درصد بود. لی و همکاران در تحقیق دیگری از جداسازی مغناطیسی ابرسانا با گرادیان بالا برای بهبود محتوای کل آهن کنسانتره استفاده کردند و به راندمان وزنی حدود ۶۷ درصد برای هماتیت رسیدند [۲۰]. سونگ^۶ و همکارانش [۲۱] تأثیر متقابل کلکتورهای مختلف را بررسی کردند. هنگامی که متیلن بیس آکریل آمید (C₆H₁₂N₄) و نشاسته به عنوان کلکتور با یکدیگر مخلوط شدند، بازیابی کلی آهن و بازیابی آهن کنسانتره به ترتیب ۴۹/۸۱ و ۷۴/۶۴ درصد بود. هوانگ^۷ و همکارانش [۲۲] دریافتند که مواد هیومیکی دارای گروه های عاملی اسیدی هستند و در تعامل با اکسیدهای آهن، انتخابی تر عمل می کنند. بازیابی کلی آهن و بازیابی آهن حاصل از کنسانتره حاصل، به ترتیب ۶۱/۱۲ و ۸۶/۲۵ درصد بودند.

برخی از محققان چندین روش فیزیکی را باهم ترکیب کردند. رای^۸ و همکاران [۲۳] به دلیل چگالی بالای اکسید آهن و اکسید تیتانیوم، آن ها را با استفاده از هیدروسیکلون از گل قرمز به دست آوردند. شیائو^۹ و همکاران (۲۰۲۲)، گل قرمز بایر با محتوای آهن کل برابر با ۲۶/۸۶ درصد را برای

استحصال عناصر ارزشمند اسکاندیم، تیتانیوم و گالیوم مورد بررسی قرار دادند. فرآیند مؤثر تشویه با نمک کلسیم و جدایش مغناطیسی برای استخراج آهن از گل قرمز انجام شد [۲۴]. برای گل قرمز کم آهن، یک فناوری جذب جدید کم هزینه و در مقیاس بزرگ از روش "کلسیناسیون-کربنیزاسیون" پیشنهاد شد. با استفاده از این فناوری برای عمل آوری گل قرمز کم آهن، سدیم و بخشی از آلومینا در گل قرمز قابل بازیابی است و محتوای اکسید سدیم در باطله های نهایی کمتر از ۱ درصد است که می تواند مستقیماً برای تهیه سیمان یا خاک استفاده شود [۲۵].

ابول پور و همکاران (۱۴۰۱)، در تحقیقی پودر معدنی با عیار آهن هماتی حدود ۳۰ درصد (کارخانه چابهار) را پرعیار کردند و به عیار ۶۵ درصد آهن دست یافتند [۲۶]. نای^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۳)، استخراج آهن از گل قرمز را با استفاده از تشویه احیائی مورد بررسی قرار دادند. این روش شامل احیاء در کوره مافل و لوله ای است و دما، عامل احیاء و نوع افزودنی به عنوان پارامترهای مهم بررسی شدند. اعمال شدت میدان مغناطیسی حدود ۱۰۰۰ گاوس منجر به بازیابی ۸۹/۹ درصد آهن شد [۲۱].

سو^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۴)، در بخشی از تحقیق خود، بازیابی اسکاندیم از گل قرمز (پسماند جامد حاصل از فرآیند آلومینا) را با استفاده از روش تبادل یونی مورد بررسی قرار دادند [۲۷]. یو^{۱۲} و همکاران (۲۰۲۴)، آهن و آلومینیوم را از پسماند بوکسیت (گل قرمز) بازیابی کردند. استخراج و استفاده از منابع آهن و آلومینیوم از گل قرمز می تواند مشکل جستجوی ذخیره گل قرمز در مقیاس وسیع را برطرف کند. بازیابی و انحلال بالا (بیش از ۹۰ درصد) می تواند طی فرآیند دما بالا و لیچینگ ممکن شود [۲۸]. چن^{۱۳} و همکاران (۲۰۲۳)، استخراج آهن و آلومینیوم از گل قرمز را طی فرآیند زینترینگ مغناطیسی غیر مضر بررسی کردند. در این مطالعه، فرآیند لیچینگ فشار اتمسفری برای بازیابی منابع آلومینا اتخاذ شد [۲۲]. فارس^{۱۴} و همکاران (۲۰۲۵)، فرآوری سنگ آهن کم عیار (با عیار آهن کل ۳۹/۵ درصد) را با استفاده از جداکننده مغناطیسی بررسی کردند. نمونه سنگ معدن مورد استفاده متشکل از اکسید آهن (گوتیت و هماتیت)، کوارتز، کلریت، مسکویت، پلاژیوکلاز و سایر کانی ها بود. نتایج نشان داد که محصول (۵-۰/۱ میلی متر) با عیار Fe(T) برابر با ۶۷/۶۷ درصد قابل دستیابی است، اما بازیابی آن در مقدار قابل قبولی نبود [۲۹].

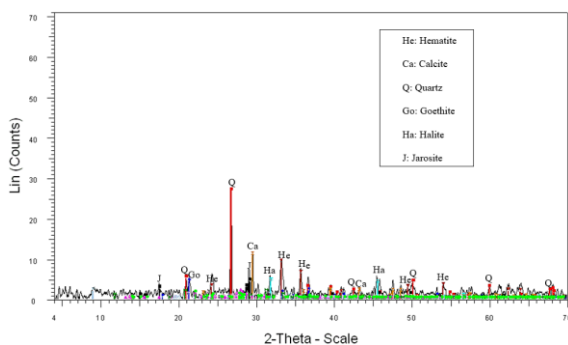
۲-۳- شناسایی نمونه

۱-۲-۳- آنالیز XRD

نخستین گام پس از آماده‌سازی نمونه و تهیه نمونه معرف، انجام مطالعات کانی‌شناسی و آنالیز شیمیایی است. از این‌رو نمونه معرفی به وزن تقریبی ۵۰۰ گرم تهیه و توسط آسیای میله‌ای خرد و پودر شد و جهت انجام آزمایش‌های XRD به آزمایشگاه مربوط انتقال یافت. دستگاه XRD Bruker axs مدل D8 Advance ساخت شرکت Bruker در آزمایشگاه اشعه ایکس دانشکده معدن دانشگاه تهران بود. نتایج این آنالیز در جدول ۱ و شکل ۲ نشان داده شده است که دلالت بر آن دارد که عمده کانی‌های نمونه، هماتیت و کلسیت و کوارتز و به مقدار جزئی تر گوتیت، کانی‌های نمکی، ژاروسیت، آنورتیت و اورتوکلاز می‌باشند.

جدول ۱: آنالیز XRD نمونه مورد مطالعه

نام ترکیب	ترکیب شیمیایی
هماتیت	Fe_2O_3
کوارتز	SiO_2
کلسیت	$CaCO_3$
گوتیت	$FeO(OH)$
هالیت	$NaCl$
ژاروسیت	$(K,H_3O)Fe_3(SO_4)_2(OH)_6$
آنورتیت	$CaAl_2Si_2O_8$
اورتوکلاز	$KAlSi_3O_8$
بیوتیت	$KMg_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
ژنپس	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
آلیت	$NaAlSi_3O_8$
منیتیت	Fe_3O_4



شکل ۲: گراف XRD نمونه معرف

۲-۲-۳- تجزیه شیمیایی نمونه اولیه

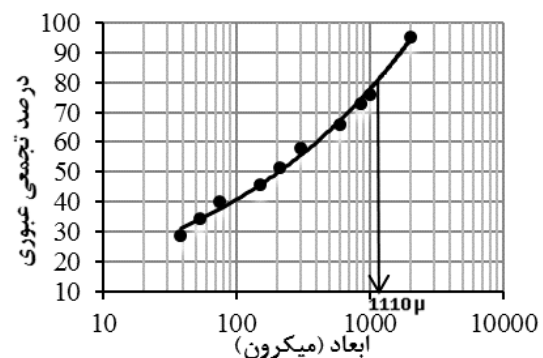
به منظور انجام مطالعات عیارسنجی از روش تیتراسیون استفاده شد. برای تعیین دقیق مقدار آهن موجود در خوراک اولیه، دو نمونه معرف برای آنالیز شیمیایی تیتراسیون تهیه

در این تحقیق، نمونه مورد استفاده که از معدن ساحل در استان هرمزگان تهیه شد، در ابتدا با روش غرق و شناورسازی با دانسیته‌های مختلف (چندین دانسیته بین ماده با ارزش و باطله) امکان‌سنجی استفاده از روش‌های ثقلی مشخص شد. سپس به دلیل مثبت بودن نتایج آزمایش‌های غرق و شناورسازی از میز لرزان در چندین دانسیته مختلف بررسی لازم صورت پذیرفت. با توجه به مثبت بودن نتایج، آزمایش‌های مغناطیسی انجام شد و در نهایت نتیجه دو روش مغناطیسی و ثقلی مورد بررسی قرار گرفتند.

۳- روش تحقیق

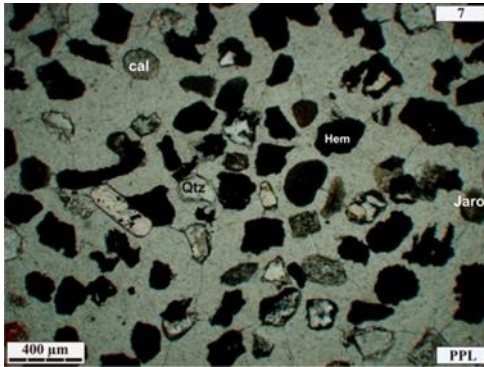
۱-۳- تهیه و آماده‌سازی نمونه

در این مرحله ۱۵۰ کیلوگرم نمونه معرف از منطقه مورد مطالعه در بندرعباس برداشت و جهت انجام آزمایش‌های فرآوری به آزمایشگاه کانه‌آرایی دانشکده معدن دانشگاه تهران انتقال یافت. برای آماده‌سازی نمونه جهت استفاده در آزمایش‌های مختلف، ابتدا تمامی نمونه دریافتی خاک سرخ با استفاده از سرنده ۲/۳۵ میلی‌متر سرنده و سپس مواد باقی‌مانده روی سرنده طی یک مرحله سنگ‌شکنی در مسیر بسته توسط سنگ‌شکن غلتکی مورد خردایش قرار گرفت و تمامی مواد به ابعاد ریزتر از ۲/۳۵ میلی‌متر رسانده شد و سپس نمونه مورد اختلاط و همگن‌سازی قرار گرفت. شکل ۱ نمودار تجمعی عبوری ذرات را نشان می‌دهد.



شکل ۱: منحنی توزیع دانه‌بندی محصول نهایی اختلاط و همگن‌سازی

با توجه به شکل ۱ مشاهده می‌شود که d_{80} محصول نهایی تقریباً ۱۱۱۰ میکرون بوده و همچنین ۵۰ درصد ذرات ریزتر از ۲۰۰ میکرون می‌باشند. نمونه‌های خردشده، در این مرحله طی تقسیمات متوالی توسط ریفل، به بخش‌های ۲ کیلوگرمی قابل استفاده در آزمایش‌های مختلف تقسیم شد.



شکل ۵: نمایی از تیغه نازک محدوده ابعادی ۱۵۰+۲۱۲- میکرون

خلاصه نتایج بررسی های کانی شناسی به شرح ذیل است:

- عمده کانی آهن دار نمونه، هماتیت است که به دو فرم بلوری و ریز و خاکی یافت می شود. همچنین هماتیت به طور متوسط ۳۰ درصد قطعات را به خود اختصاص داده است.

- هماتیت ریز و خاکی در اکثر محدوده های ابعادی هم با هماتیت بلوری و هم با کانی های شفاف درگیری نشان می دهد که این موضوع باید در انتخاب روش فرآوری مدنظر قرار گیرد.

- کانی های کلسیت و کوارتز عمده کانی های باطله نمونه و در مقادیر کمتر ژاروسیت، فلدسپات، ژپس و کانی های رسی و نمکی نیز مشاهده می شوند.

- هماتیت بلوری دانه درشت نزدیک به ۲۰ درصد قطعات و هماتیت دانه ریز نزدیک به ۱۲ درصد را به خود اختصاص داده است. با توجه به کانی سازی هماتیت این نمونه که در دو نسل ابعاد درشت و ریز صورت گرفته است، تجربه نشان می دهد که در این گونه موارد انتخاب روش فرآوری ثقیلی برای جدایش نسل اول دانه درشت و روش های جدایش مغناطیسی شدت و گرادیان بالا برای نسل دوم بسیار دانه ریز مورد بررسی قرار می گیرد.

- نتایج مطالعات، نشان داد که درجه آزادی هماتیت بلوری و دانه درشت، در سایز ۱۵۰ میکرون، برابر ۸۵ درصد و برای هماتیت دانه ریز در ابعاد ۳۵ میکرون برابر ۴۰-۳۵ درصد است.

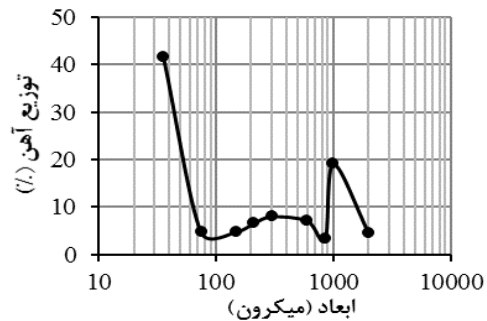
۳-۲-۴- وزن مخصوص، اندیس کار و زمان بهینه خردایش نمونه

وزن مخصوص ظاهری و واقعی نمونه بعد از سه بار تکرار به ترتیب برابر با ۱/۴۹ و ۳/۲۱ گرم بر سانتی متر مکعب

شد. نتیجه آنالیز نشان داد که میزان آهن موجود در نمونه برابر با ۳۱/۳ درصد (۴۴/۷۱ درصد هماتیت) است.

۳-۲-۱- آنالیز سرندي و شیمیایی ابعادی

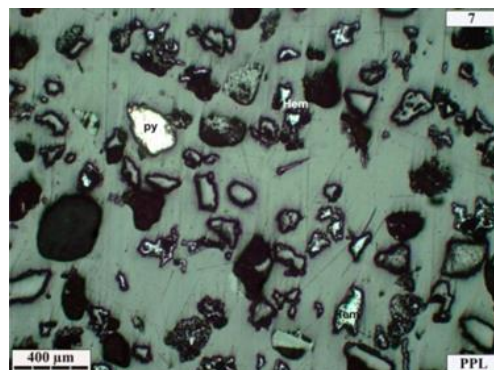
به منظور تعیین توزیع آهن نمونه مورد مطالعه، آزمایش آنالیز ابعادی انجام شد. از طبقات سرندي به دست آمده یک نمونه تهیه و مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفت. نتایج آنالیز عیارسنجی در محدوده ابعادی مختلف در شکل ۳ آمده است. عیار کل آهن نمونه نیز ۳۱/۳ درصد به دست آمد. همان طور که از شکل ۳ می توان نتیجه گرفت، در محدوده ابعادی ریزتر از ۷۵ میکرون، میزان توزیع آهن نسبت به چند محدوده ابعادی درشت تر خود افزایش داشت که این امر می تواند ناشی از تمرکز هماتیت دانه ریز و خاکی در این محدوده باشد.



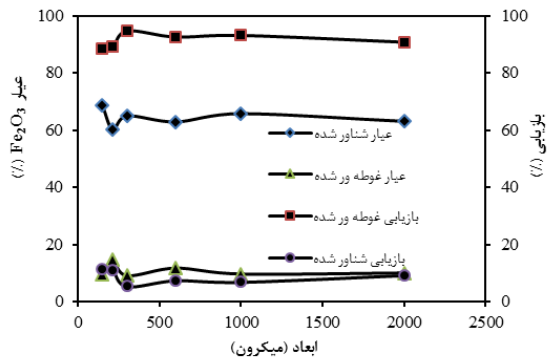
شکل ۳: توزیع آهن در محدوده های ابعادی مختلف

۳-۲-۳- مطالعات مقاطع صیقلی و تیغه نازک

مطالعه میکروسکوپی بر روی ۹ مقطع صیقلی و ۹ تیغه نازک انجام شد. در عمل ابتدا یک نمونه از ماده معدنی در بخش های مختلف مورد تجزیه ابعادی قرار گرفت و از محدوده های ابعادی ۲۰۰۰، ۱۰۰۰، ۸۵۰، ۶۰۰، ۳۰۰، ۲۱۲، ۱۵۰ میکرون و ریزتر از ۷۵ میکرون مقاطع صیقلی و نازک تهیه شد. شکل های ۴ و ۵ به ترتیب مقطع صیقلی و تیغه نازک در محدود ابعادی ۱۵۰+۲۱۲- را نشان می دهد.



شکل ۴: نمایی از مقطع صیقلی محدوده ابعادی ۱۵۰+۲۱۲- میکرون



شکل ۶: نمودار عیار و بازیابی هماتیت نسبت به ابعاد در آزمایش مایع سنگین

۳-۴- آزمایش‌های فرآوری

آزمایش‌های فرآوری که به منظور پرعیارسازی نمونه خاک سرخ انجام شد، شامل آزمایش‌های ثقلی میز لرزان و آزمایش‌های مغناطیسی خشک و تر بودند. امروزه استفاده صحیح از روش‌های آماری طراحی آزمایش‌ها علاوه بر سهولت در اجرای آن‌ها باعث ارتقاء سطح اطمینان داده‌ها و تحلیل پردازش آماری آن‌ها می‌شود [۳۱].

در این تحقیق از نرم‌افزار Design Expert 7 جهت کاهش تعداد آزمایش‌ها و توجه به اندرکنش پارامترها استفاده شد. همچنین در جدول ۲، تجهیزات مورد استفاده برای آزمایش‌های پرعیارسازی ارائه شده است.

جدول ۲: تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها

مورد استفاده	نوع دستگاه
امکان‌سنجی استفاده از روش‌های ثقلی (جدایش کوارتز و ذرات باطله از هماتیت)	مایع سنگین
جدایش ذرات ریزودرشت مغناطیسی	میز لرزان
ذرات ریز مغناطیسی	جداکننده مغناطیسی
	شدت بالا
	با شدت ۱٫۷ تسلا
ذرات درشت مغناطیسی	جداکننده مغناطیسی
	خشک از نوع القایی
	با شدت ۱٫۷ تسلا

۴- ارائه نتایج و بحث

۴-۱- آزمایش‌های میز لرزان

کانی‌های موجود در خاک سرخ منطقه غرب بندرعباس به‌طور عمده شامل هماتیت، کلسیت و کوارتز با وزن

حاصل شد. همچنین اندیس کار نمونه به روش آسیای گلوله‌ای استاندارد باند مورد آزمایش قرار گرفت [۳۰] و مقدار آن برابر $۸٫۲۹ \text{ kWh/t}$ به دست آمد.

نمونه موردنظر در زمان‌های ۲، ۴، ۵ و ۸ دقیقه تحت خردایش با آسیای میله‌ای دنور به‌صورت تر قرار گرفت که زمان ۴ دقیقه، زمان بهینه برای رسیدن به ابعاد مطلوب (۱۵۰ میکرون) بود.

۳-۳- آزمایش مایع سنگین

استفاده از روش‌های ثقلی علیرغم بهره‌گیری از تکنیک‌ها و تجهیزات متفاوت، نیازمند استفاده از اطلاعاتی است که از مطالعات مراحل آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی به دست می‌آیند. یکی از این اطلاعات، رفتار ماده معدنی در آزمایش‌های غرق و شناورسازی است. در این آزمایش‌ها با استفاده از محلول‌های واسطه سنگین، بخش شناور و غوطه‌ور در دانه‌بندی خاص از ماده معدنی مورد مطالعه در چگالی مشخص از مایع یا واسطه سنگین مورد تحلیل قرار می‌گیرد. برای تعیین دقیق درجه و سایز آزادی نمونه، آزمایشی با مایع سنگین برموفرم با وزن مخصوص $۲٫۸۲ \text{ g/cm}^3$ روی بخش‌های ابعادی مختلف نمونه انجام شد. لازم به توضیح می‌داند، انتخاب این وزن مخصوص به دلیل آن است که اکثر کانی‌های باطله مانند کلسیت و کوارتز دارای وزن مخصوص کمتر از $۲٫۸۲ \text{ g/cm}^3$ هستند، بنابراین در بخش شناور تجمع می‌یابند و بخش غوطه‌ور شامل هماتیت است که دارای وزن مخصوص بیشتر از $۲٫۸۲ \text{ g/cm}^3$ است.

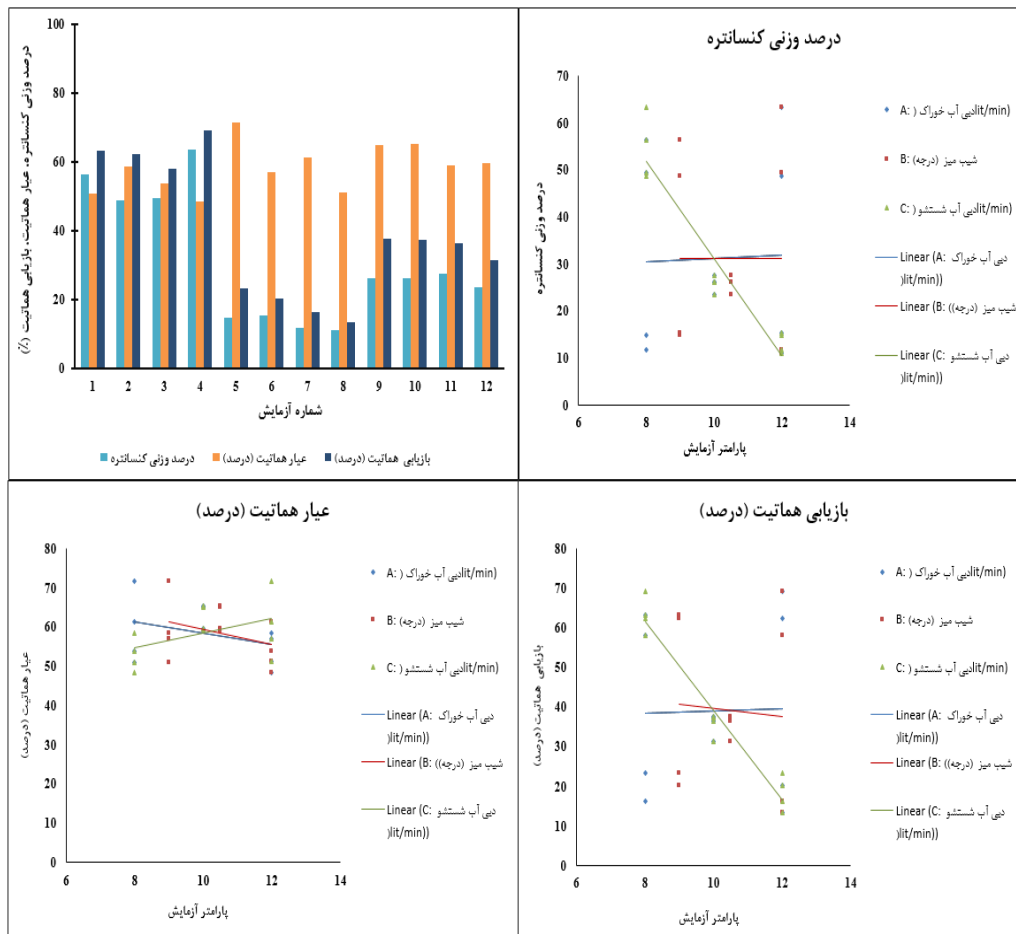
به‌منظور انجام آزمایش مایع سنگین از هر یک از بخش‌های ابعادی خوراک (۶ طبقه سردی ۲۰۰۰، ۱۰۰۰، ۶۰۰، ۳۰۰ و ۲۱۲ و ۱۵۰ میکرون) حدود ۵۰ گرم نمونه معرف تهیه شد و مورد آزمایش قرار گرفت. به دلیل ایجاد سوسپانسیون و عدم شرایط ته‌نشینی در ابعاد ریز، حداقل ابعاد برای تست مایع سنگین ۱۵ میکرون در نظر گرفته شد. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، خوراک در اندازه ۱۵۰ میکرون، دارای بیشترین عیار و بازیابی بسیار بالا در بخش غوطه‌ور و عیار پایین در بخش شناور شده است. با توجه به این امر می‌توان به این نتیجه رسید که ذرات هماتیت دانه‌درشت و بلوری در این بخش به درجه آزادی کافی رسیده‌اند.

حداکثر است. همچنین نمونه خوراک تمامی آزمایش ها دارای عیار متوسط ۴۴/۳ درصد هماتیت است. در شکل ۷، شرایط و نتایج آزمایش ها ارائه شده است.

جدول ۳: فاکتورهای مؤثر بر آزمایش میز لرزان و سطوح آن ها

فاکتور سطح	سطح پایین	سطح میانی	سطح بالا
شیب میز	۸	۱۰	۱۲
آب شستشو	۹	۱۰/۵	۱۲
آب خوراک	۸	۱۰	۱۲

مخصوص های به ترتیب برابر ۴/۹-۵/۲، ۲/۶ و ۲/۶ گرم بر سانتی متر مکعب می باشند. آزمایش ها به روش فاکتوریل کامل و ۴ بار تکرار برای نقطه مرکزی طراحی شدند. عیار و بازیابی هماتیت به عنوان جواب آزمایش ها در نظر گرفته شد. دبی جامد، مقدار ثابت ۳۳۰ گرم بر دقیقه و فرکانس نوسانات میز، ۳۶۰ دور در دقیقه در همه آزمایش ها مورد نظر گرفته شد. فاکتورهای انتخابی، شیب میز، دبی آب خوراک و دبی آب شستشو بودند. مقادیر سطوح این فاکتورها در جدول ۳ آورده شده است. هدف از انجام این آزمایش ها، به دست آوردن شرایطی با عیار حداقل ۵۵ درصد هماتیت و بازیابی



شکل ۷: شرایط و نتایج آزمایش های میز لرزان و سطوح آن ها

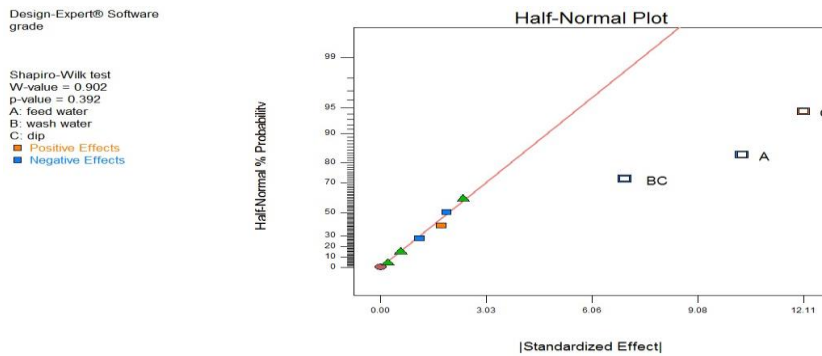
آب شستشو، به ترتیب مؤثرترین پارامترها بر مدل است. شکل ۸، نمودار نصف نرمال برای عیار را نشان می دهد. (ب) بازیابی هماتیت: با توجه به نمودار Half-Normal رسم شده توسط نرم افزار، مؤثرترین پارامتر بر پاسخ بازیابی، شیب میز است. شکل ۹، نمودار نصف نرمال برای بازیابی را نشان می دهد.

نتایج حاصل با استفاده از نرم افزار، مورد تجزیه تحلیل قرار گرفت که در زیر ارائه شده است.

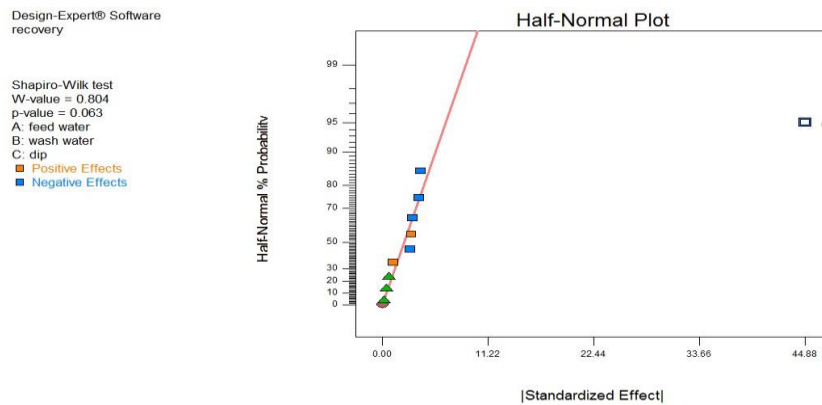
۴-۱-۱- بررسی پارامترهای مؤثر بر پاسخ های میز لرزان

عوامل مؤثر بر پاسخ ها از نمودار نصف نرمال رسم شده توسط نرم افزار مشخص شدند.

الف) عیار هماتیت: با توجه به نمودار Half-Normal رسم شده توسط نرم افزار، شیب، آب خوراک و اثر متقابل شیب و



شکل ۸: نمودار Half-Normal مربوط به عیار کنسانتره میز



شکل ۹: نمودار Half-Normal مربوط به پاسخ بازیابی کنسانتره میز

۱۰/۵۵ و برای بازیابی ۲۲/۱۸ است و دلالت بر آن دارد که به‌اندازه کافی سیگنال وجود دارد.

در این جدول، انحنای^{۱۷} (به کمک انحنای میانگین پاسخ سطوح نقاط با نقاط مرکزی مقایسه می‌شود) نیز از نظر آماری معنادار است که بیانگر خطی نبودن پاسخ‌ها است. همچنین این جدول نشان می‌دهد که نقصان در برازش^{۱۸} معنادار نیست که نشان‌دهنده مطلوبیت مدل است. چنانچه نقصان در برازش معنی‌دار باشد، به این مفهوم است که واریانس تکرارها نسبت به مقادیر میانگین‌شان کمتر از واریانس نقاط طراحی‌شده نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده است. وقتی نقصان در برازش معنی‌دار است، یا آزمایش‌های تکرار شده مشکل دارند و یا مدل برازش مناسب نیست. ضریب همبستگی بین نتایج پیش‌بینی مدل و نتایج واقعی آزمایش‌ها برای عیار هماتیت در کنسانتره، ۰/۹۹۰۶ بود که نشان می‌دهد بین مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی‌شده هماهنگی خوبی وجود دارد. مدل‌های ارائه‌شده توسط نرم‌افزار برای دو پاسخ موردنظر در جدول ۵ آورده شده است. این مدل‌ها بر اساس فاکتورهای کد شده بیان شده‌اند. در این مدل‌ها فاکتوری که بزرگ‌ترین ضریب را دارد، دارای بیشترین تأثیر بر مدل است.

۴-۱-۲- بررسی و تحلیل نتایج نرم‌افزار

به‌منظور کنترل درستی پارامترهای انتخاب‌شده (به‌عنوان پارامترهای مؤثر) از فیلترهای مختلفی استفاده شد که مهم‌ترین آن‌ها، بررسی جدول آنالیز واریانس^{۱۵} و استفاده از نمودار توزیع باقیمانده‌ها^{۱۶} است. در این منحنی هرچه مقادیر باقی‌مانده به‌دست‌آمده به خط نرمال نزدیک‌تر باشد، صحت مدل پیش‌بینی‌شده بیشتر است. تحلیل واریانس مربوط به عیار کنسانتره در جدول ۴ و تحلیل واریانس مربوط به بازیابی در جدول ۶ ارائه شده است. سطح اعتماد در نظر گرفته‌شده برای پاسخ‌ها ۹۵ درصد است. ملاحظه می‌شود که مدل‌های انتخاب‌شده برای هر دو پاسخ از نظر آماری معنی‌دار است. در قسمت پایین جدول تحلیل واریانس، مقادیر R-squared، Adj R-squared، Pred R-squared، (ضریب همبستگی خط برازش شده به نقاط) و Adeq Precision (نسبت سیگنال به اغتشاش) نشان داده شده است.

اختلاف Adj R-squared و Pred R-squared باید کمتر از ۰/۲ باشد که در مورد هر دو پاسخ صادق است و Adeq Precision باید بزرگ‌تر از ۴ باشد که برای عیار، این مقدار

جدول ۴: نتایج بررسی آنالیز واریانس برای عیار هماتیت در کنسانتره (نتایج نرم افزار)

	p-value Prob > F	F Value	Mean Square	df	sum of Squares	Source
معنی دار	۰٫۰۱۰۳	۹٫۶۶	۹۶٫۳۸	۳	۲۸۹٫۱۵	مدل
	۰٫۰۰۶۰	۱۷٫۱۹	۱۷۱٫۴۴	۱	۱۷۱٫۴۴	آب خوراک-A
	۰٫۰۰۲۹	۲۳٫۵۳	۲۳۴٫۶۹	۱	۲۳۴٫۶۹	شیب-C
	۰٫۰۰۳۱۱	۷٫۸۵	۷۸٫۳۲	۱	۷۸٫۳۲	BC
معنی دار	۰٫۰۰۷۶	۱۵٫۵۴	۱۵۵٫۰۱	۱	۱۵۵٫۰۱	Curvature
			۹٫۹۸	۶	۵۹٫۸۵	Residual
بی معنی	۰٫۶۳۱۱	۰٫۶۶	۷٫۹۱	۳	۲۳٫۷۲	Lack of Fit
			۱۲٫۰۴	۳	۳۶٫۱۳	Pure Error
				۱۰	۵۰۴٫۰۲	Cor Total

جدول ۵: مدل های پیشنهادی برای پاسخ های آزمایش میز لرزان

پاسخ	مدل پیشنهادی
عیار هماتیت	$\% Grade = 54.24 - 5.18 \times A + 6.06 \times C - 3.50 \times B \times C$
بازیابی هماتیت	$\% Recovery = 40.75 - 22.44 \times C$

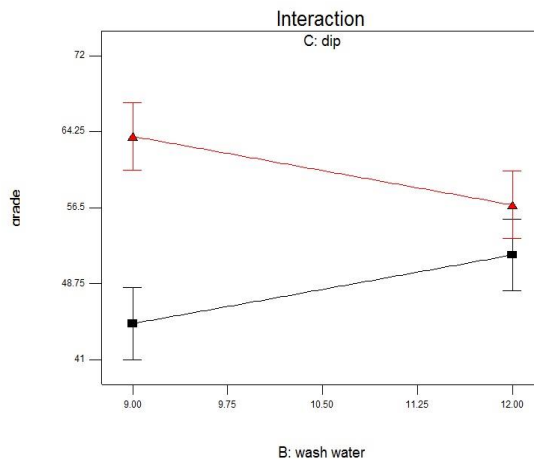
جدول ۶: نتایج بررسی آنالیز واریانس برای بازیابی هماتیت در کنسانتره (نتایج نرم افزار)

	p-value Prob > F	F Value	Mean Square	df	Sum of Squares	Source
معنی دار	۰٫۰۰۰۱ <	۲۴۵٫۹۵	۴۰۲۷٫۵۳	۱	۴۰۲۷٫۵۳	مدل
	۰٫۰۰۰۱ <	۲۴۵٫۹۵	۴۰۲۷٫۵۳	۱	۴۰۲۷٫۵۳	شیب-C
بی معنی	۰٫۰۷۱۸	۴٫۱۶	۶۸٫۱۴	۱	۶۸٫۱۴	Curvature
			۱۶٫۳۸	۹	۱۴۷٫۳۸	Residual
بی معنی	۰٫۲۶۳۹	۲٫۳۰	۲۰٫۱۸	۶	۱۲۱٫۰۶	Lack of Fit
			۸٫۷۷	۳	۲۶٫۳۲	Pure Error
				۱۱	۴۲۴۳٫۰۵	Cor Total

عیار بالا باید فاکتور شیب، در سطح بالا و آب خوراک، در سطح پایین و فاکتور آب شستشو (به دلیل اثر متقابل)، در سطح مخالف شیب انتخاب شود. شکل ۱۱ نمودار چگونگی تأثیر پارامتر C بر مدل انتخاب شده برای بازیابی را نشان می دهد.

شکل ۱۰ نمودار چگونگی تأثیر پارامترهای C و A و BC را بر حسب عیار کنسانتره نشان می دهد. بر اساس این نمودارها، با افزایش پارامتر شیب، عیار افزایش و با افزایش دبی آب خوراک، عیار کاهش می یابد. همچنین پارامترهای شیب و دبی آب شستشو اثر متقابل دارند. برای دستیابی به

Design-Expert® Software
grade
● Design Points
■ C- 8.000
▲ C+ 12.000
X1 = B: wash water
X2 = C: dip
Actual Factor
A: feed water = 10.00



شکل ۱۰: نمودار تأثیر پارامتر A، C و BC بر عیار کنسانتره

قابلیت تولید میدانی با شدتی به مراتب بالاتر از جداکننده‌های مغناطیسی خشک را دارند و همچنین برای ذرات ریز محدودیت کاربرد ندارند [۳۲].

حداکثر میزان مغناطیسی قابل تولید توسط جداکننده مغناطیسی شدت بالای موجود در آزمایشگاه کانه‌آرایی دانشگاه تهران، ۱٫۷ تسلا بود. برای انجام تست‌های مغناطیسی، نمونه معرف، خردشده و به درجه آزادی مطلوب ۱۵۰ میکرون رسانده شد. آزمایش‌ها با دستگاه جداکننده شدت بالای نوع *Boxmag* انجام شدند. فاکتورهای مؤثر بر کار این جداکننده، شدت میدان، دور روتور و آب خوراک می‌باشند. به منظور بهینه‌سازی شرایط آزمایش‌ها، هر یک از پارامترهای مؤثر بر فرآیند در دو سطح به روش فاکتوریل کامل و نقطه مرکزی با چهار بار تکرار مورد بررسی قرار گرفتند. عیار و بازیابی هماتیت به عنوان پاسخ آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. سطوح انتخابی برای انجام آزمایش‌ها در جدول ۷ آورده شده است. هم‌چنین عیار متوسط هماتیت خوراک نمونه نیز ۴۴٫۳ درصد بود.

جدول ۷: فاکتورهای مؤثر بر آزمایش جدایش مغناطیسی تر

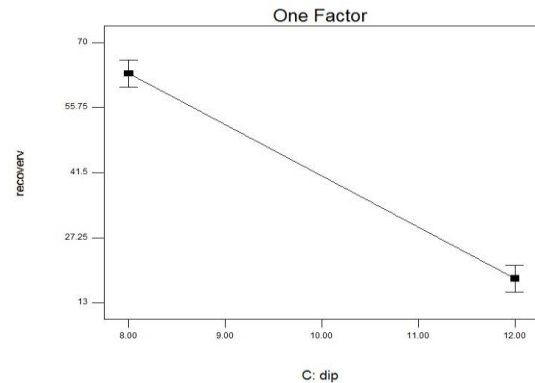
شدت بالا و سطوح آن‌ها

فاکتورها	سطح پایین	سطح میانی	سطح بالا
A: شدت میدان (تسلا)	۱٫۲	۱٫۴۵	۱٫۷
B: آب خوراک (لیتر بر دقیقه)	۲	۳٫۵	۵
C: دور روتور (دور بر دقیقه)	۱	۲	۳

جدول ۸: نتایج و شرایط آزمایش جدایش مغناطیسی تر شدت

بالا و سطوح آن‌ها

شماره آزمایش	A	B	C	درصد وزنی کنسانتره	عیار (درصد)	بازیابی (درصد)
۱	۱٫۲	۲	۱	۳۹٫۵۶	۵۷٫۴۳	۵۰٫۰۹
۲	۱٫۷	۲	۱	۴۴٫۵۹	۵۶	۵۷٫۰۵
۳	۱٫۲	۵	۱	۴۱٫۰۴	۶۲	۵۶٫۷۸
۴	۱٫۷	۵	۱	۴۳٫۳۰	۶۱٫۶۷	۶۰٫۲۴
۵	۱٫۲	۲	۳	۵۴٫۷۸	۵۲٫۹۷	۶۷٫۱۲
۶	۱٫۷	۲	۳	۵۷٫۶۴	۵۴٫۸۳	۶۹٫۳۱
۷	۱٫۲	۵	۳	۴۲٫۵۳	۶۳	۵۹٫۲۴
۸	۱٫۷	۵	۳	۴۵٫۵۴	۶۱٫۳۱	۶۲٫۲۳
۹	۱٫۴۵	۳٫۵	۲	۴۲٫۴۶	۶۱٫۷۱	۵۸٫۳۷
۱۰	۱٫۴۵	۳٫۵	۲	۴۱٫۰۲	۶۱٫۹۳	۵۷٫۰۶
۱۱	۱٫۴۵	۳٫۵	۲	۴۱٫۵۰	۶۱٫۵۱	۵۸٫۸۹
۱۲	۱٫۴۵	۳٫۵	۲	۴۱٫۴۵	۶۲٫۷۹	۵۷٫۹۳



شکل ۱۱: نمودار چگونگی تأثیر پارامتر C بر بازیابی

۴-۱-۳- بهینه‌سازی شرایط آزمایش‌های میز لرزان

هدف از انجام آزمایش رسیدن به عیار حداقل بالای ۵۵ درصد هماتیت با بیشترین بازیابی است که محصول حاصل قابل استفاده در صنعت مانند کارخانه‌های سیمان باشد. با بالا رفتن عیار، بازیابی کاهش می‌یابد و مشاهده می‌شود که فاکتور شیب میز در مدل‌های عیار و بازیابی در سطوح مخالف قرار دارد. در تعیین شرایط بهینه، هر دو شرط عیار و بازیابی در نظر گرفته و کنسانتره دارای عیار حداقل ۵۵ درصد به عنوان هدف در نظر گرفته شد. در شرایط پیشنهادی دبی آب خوراک (۸ لیتر در دقیقه)، شیب (۸ درجه) و آب شستشو (۱۱٫۵ لیتر در دقیقه) تعیین شد که محصول دارای عیار ۵۵٫۸۷ درصد هماتیت و بازیابی ۶۳٫۲۵ درصد بود.

۴-۱-۴- نتیجه‌گیری آزمایش‌های میز لرزان

علیرغم اینکه معیار پرعیارسازی، قابل توجه و بالا است، ولی با استفاده از میز لرزان به نتایج قابل توجهی حاصل نشد. در طی آزمایش‌های میز لرزان مشاهده گردید که ذرات باطله نیز به کنسانتره راه می‌یابند. از دلایلی که وجود دارند می‌توان به توزیع دانه‌بندی بار ورودی به سیستم اشاره کرد و وجود نسل دانه‌ریز هماتیت در نمونه که دارای ابعاد بسیار ریز درجه آزادی است و با کانی‌های باطله کلسیت و کوارتز درگیری نشان می‌دهد و باعث می‌شود تا ذره‌ای با دانسیته بیش از ۲٫۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب تشکیل گردد و این ذره در طی آزمایش نیز مانند کانی با ارزش رفتار خواهد کرد و به کنسانتره راه می‌یابد.

۴-۲- آزمایش‌های مغناطیسی تر شدت بالا

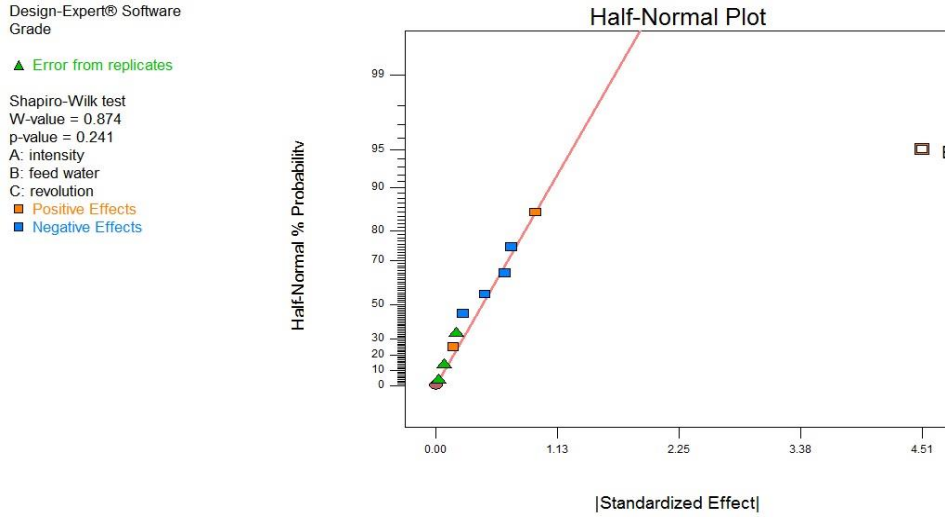
پرکاربردترین و مهم‌ترین روش رایج برای فرآوری خاک سرخ، روش مغناطیسی تر شدت بالا است. این جداکننده‌ها

۴-۲-۱- بررسی پارامترهای مؤثر بر پاسخ های جدایش مغناطیسی

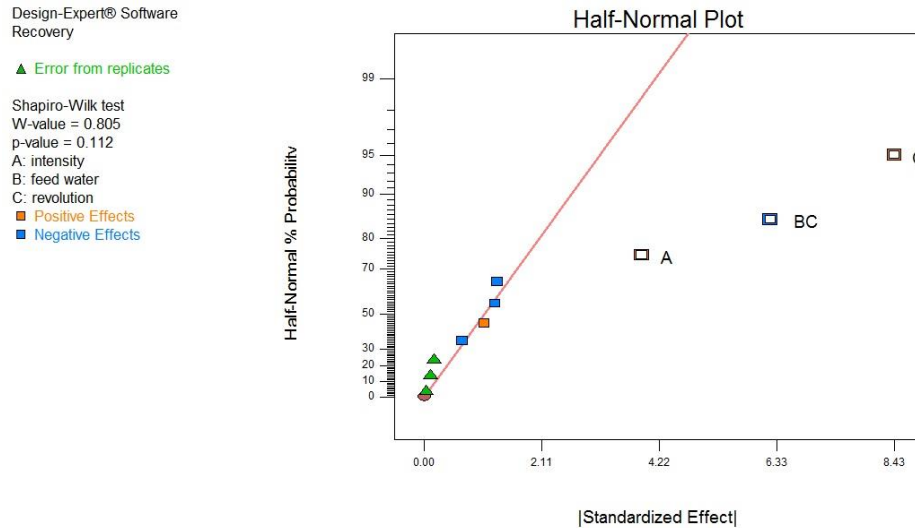
عوامل مؤثر بر پاسخ ها از نمودار نصف نرمال رسم شده توسط نرم افزار مشخص شدند.

الف) عیار هماتیت: با توجه به نمودار Half-Normal رسم شده توسط نرم افزار، آب خوراک مؤثرترین پارامتر بر مدل است. شکل ۱۲ نمودار نصف نرمال برای عیار را نشان می دهد.

ب) بازیابی هماتیت: با توجه به نمودار Half-Normal رسم شده توسط نرم افزار، مؤثرترین پارامترها بر پاسخ بازیابی، دور روتور، شدت میدان مغناطیسی و اثر متقابل آب خوراک و دور روتور می باشند. شکل ۱۳ نمودار نصف نرمال برای بازیابی را نشان می دهد.



شکل ۱۲: نمودار Half-Normal مربوط به عیار کنسانتره



شکل ۱۳: نمودار Half-Normal مربوط به پاسخ بازیابی کنسانتره

۴-۲-۲- بررسی و تحلیل نتایج نرم افزار

به منظور کنترل صحت مدل ها و نتایج، جدول تحلیل واریانس ها (ANOVA) بررسی شد. جدول ANOVA مربوط به عیار و بازیابی کنسانتره به ترتیب در جداول ۹ و ۱۰ آورده شده اند. ملاحظه می شود که مدل های انتخاب شده برای هر

دو پاسخ از نظر آماری معنی دار است. سطح اعتماد در تحلیل نتایج ۹۵ درصد در نظر گرفته شد. مقادیر P-Value پارامترهای مؤثر در مدل های هر پاسخ کمتر از ۰٫۰۵ است که بیانگر آن است که پارامترهای انتخاب شده با احتمال ۹۵ درصد صحیح است.

جدول ۹: نتایج بررسی آنالیز واریانس برای عیار کنسانتره

	Prob > F p-value	Value F	Square Mean	df	Squares Sum of	Source
معنی‌دار	۰,۰۰۰۱ <	۷۳,۵۵	۸۲,۸۸	۱	۸۲,۸۸	مدل
	۰,۰۰۰۱ <	۷۳,۵۵	۸۲,۸۸	۱	۸۲,۸۸	آب خوراک-B
معنی‌دار	۰,۰۰۰۳	۳۳,۶۱	۳۷,۸۸	۱	۳۷,۸۸	Curvature
			۱,۱۳	۹	۱۰,۱۴	Residual
بی‌معنی	۰,۲۶۲۸	۲,۳۱	۱,۳۹	۶	۸,۳۴	Lack of Fit
			۰,۶۰	۳	۱,۸۱	Pure Error
				۱۱	۱۳۰۰,۹	Cor Total

جدول ۱۰: نتایج بررسی آنالیز واریانس برای بازیابی کنسانتره

	Prob > F p-value	Value F	Square Mean	df	Squares Sum of	Source
معنی‌دار	۰,۰۰۰۱ <	۴۹,۹۰	۸۳,۲۸	۳	۲۴۹,۸۵	مدل
	۰,۰۰۳۷	۱۸,۲۳	۳۰,۴۲	۱	۳۰,۴۲	A-شدت
	۰,۰۰۰۱ <	۸۵,۲۶	۱۴۲,۳۰	۱	۱۴۲,۳۰	C-دور روتور
معنی‌دار	۰,۰۰۰۳	۴۶,۲۱	۷۷,۱۳	۱	۷۷,۱۳	BC
	۰,۰۲۷۵	۷,۷۰	۱۲,۸۵	۱	۱۲,۸۵	Curvature
			۱,۶۷	۷	۱۱,۶۸	Residual
بی‌معنی	۰,۱۳۷۴	۴,۱۱	۲,۴۷	۴	۹,۸۸	Lack of Fit
			۰,۶۰	۳	۱,۸۰	Pure Error
				۱۱	۲۷۴,۳۸	Cor Total

می‌دهد. بر اساس این نمودارها با افزایش پارامتر آب خوراک، میزان زمان ماند ذرات در دستگاه جداکننده مغناطیسی کاهش یافته، بنابراین ذرات کاملاً با ارزش به کنسانتره راه می‌یابند و باعث افزایش عیار می‌شوند. شکل ۱۵ چگونگی تأثیر پارامترهای A، C و BC بر مدل انتخاب شده برای بازیابی را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار، با افزایش فاکتورهای شدت میدان و دور روتور، بازیابی افزایش می‌یابد. همچنین فاکتور تأثیر متقابل دور روتور و آب خوراک نیز در بازیابی تأثیر دارد.

از آنجایی که هدف، عیار بالای ۵۵ درصد هماتیت است و بررسی آماری انجام شده، شرایط بهینه آزمایش بر اساس جدول ۱۲ را پیشنهاد می‌دهد.

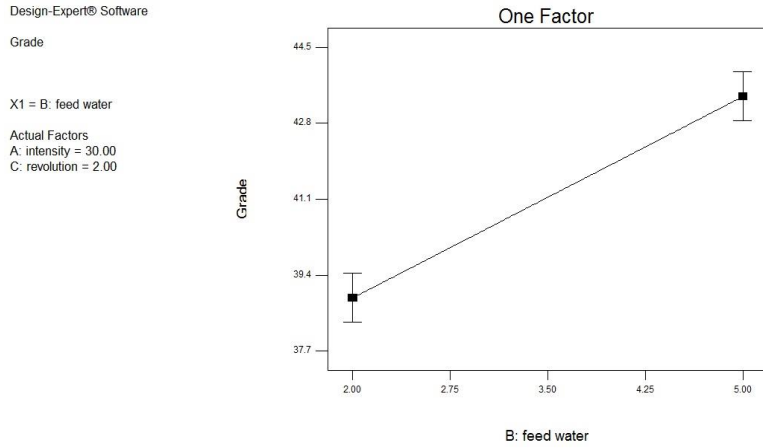
به منظور اطمینان از نتایج و مدل‌های به دست آمده از نرم‌افزار، تعدادی آزمایش تکمیلی نیز انجام شد که نتیجه آن‌ها در جدول ۱۳ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج حاصل از آزمایش‌ها، مدل‌های ارائه شده توسط نرم‌افزار را تأیید می‌کنند.

در جداول ۹ و ۱۰، انحنای نیز از نظر آماری معنادار است که نشان‌دهنده خطی نبودن پاسخ‌ها است. همچنین این امر دلالت بر آن دارد که نقصان در برازش معنادار نیست و بیانگر مطلوبیت مدل است. ضریب همبستگی بین نتایج پیش‌بینی مدل و نتایج واقعی آزمایش‌ها برای بازیابی کنسانتره، ۰,۹۹۴۹ بود که نشان می‌دهد بین مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده هماهنگی خوبی وجود دارد. مدل‌های ارائه شده توسط نرم‌افزار برای دو پاسخ مورد نظر در جدول ۱۱ آورده شده است.

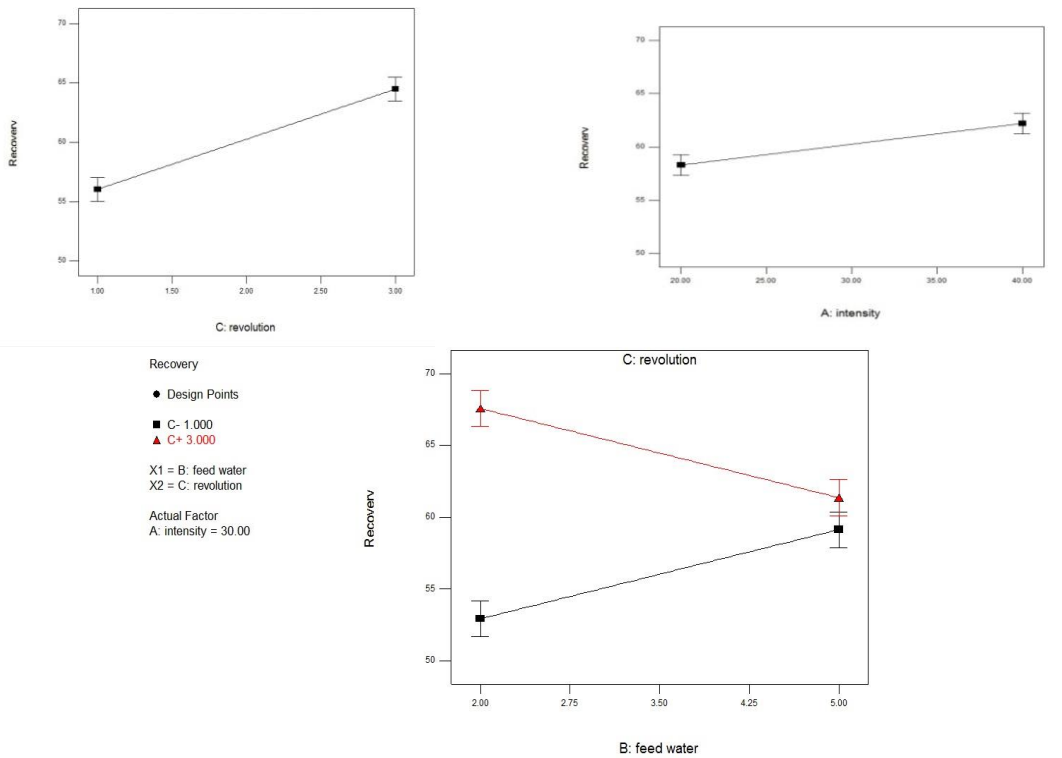
جدول ۱۱: مدل‌های پیشنهادی برای پاسخ‌های آزمایش‌ها

مدل پیشنهادی	پاسخ
$\%Grade = 51,27 + 2,15 \times B$	عیار هماتیت (درصد)
$\%Recovery = 32,96 + 0,2 \times A + 2,72 \times B + 11,46 \times C - 2,07 \times B \times C$	بازیابی هماتیت (درصد)

این مدل‌ها بر اساس فاکتورهای واقعی شده، بیان شده است. در این مدل‌ها، فاکتوری که بزرگ‌ترین ضریب را دارد، دارای بیشترین اثر بر مدل است. شکل ۱۴، چگونگی تأثیر پارامتر B (دبی آب خوراک) را بر عیار کنسانتره نشان



شکل ۱۴: نمودار تأثیر پارامتر B بر عیار کنسانتره



شکل ۱۵: نمودار چگونگی تأثیر پارامترهای A، C و BC بر بازیابی

جدول ۱۲: شرایط انجام آزمایش پیشنهادی توسط نرم افزار

شماره آزمایش	شدت (تسلا)	آب خوراک (لیتر بر دقیقه)	دور روتور (دور بر دقیقه)	عیار (درصد)	بازیابی (درصد)	مطلوبیت
۱	۱٫۷	۲٫۰۱	۳	۵۵٫۵۸	۶۹٫۵	۱
۲	۱٫۶۶	۲	۳	۵۵٫۵۶	۶۹٫۲	۱
۳	۱٫۷	۲	۲٫۹۵	۵۵٫۵۶	۶۹٫۲	۱

جدول ۱۳: نتایج و شرایط آزمایش های تکمیلی جدایش مغناطیسی تر شدت بالا و سطوح آن ها

شماره آزمایش	A	B	C	نتایج حاصل از نرم افزار		نتایج حاصل از انجام آزمایش	
				عیار هماتیت (درصد)	بازیابی هماتیت (درصد)	عیار هماتیت (درصد)	بازیابی هماتیت (درصد)
۱	۱٫۲	۲٫۷۴	۳	۵۷٫۱۶	۶۴٫۵۲	۵۷٫۵۳	۶۴٫۹
۲	۱٫۷	۵	۳	۶۲٫۰۲	۶۲٫۸۹	۶۲٫۰۴	۶۲٫۱
۳	۱٫۷	۳	۱	۵۷٫۷۲	۵۷٫۳۷	۵۶٫۹۵	۵۷٫۸۳

ملاحظه می‌شود میزان عیار و بازیابی کنسانتره حاصل نسبت به حالتی که نمونه خوراک تحت خردایش به مدت زمان ۴ دقیقه قرار گرفته باشد، کمتر است و این نشان می‌دهد که خردایش بیش از حد، موجب تولید نرمه و در برخی موارد نیز کاهش نسبی مقدار آهن در نمونه می‌شود؛ بنابراین بهترین روش ارتقای کیفی محصول، اعمال یک تا دو مرحله شستشو (کلینر) در فرآیند است. علیرغم موارد فوق، نتیجه حاصل همچنان در محدوده قابل قبول محصول هدف است. جهت کنترل و اصلاح نتایج و دستیابی به عیارهای بالاتر و اعمال مراحل شستشو، آزمایش‌های جدایش مغناطیسی با ابعاد ریزتر از ۱۵۰ میکرون ادامه یافت. در ادامه، آزمایش دیگری نیز بر روی یک کیلوگرم نمونه ریزتر از ۱۵۰ میکرون انجام شد که نتایج آن در جدول ۱۶ ارائه شده است.

وزن نمونه: ۱ کیلوگرم ریزتر از ۱۵۰ میکرون

بدون خردایش

شدت جریان: ۱٫۷ تسلا

دور روتور: ۳ دور در دقیقه

جدول ۱۶: نتایج حاصل از آزمایش مغناطیسی تر شدت بالا

نمونه خوراک ریزتر از ۱۵۰ میکرون بدون خردایش

نوع محصول	وزن (درصد)	عیار هماتیت (درصد)	عیار Fe (درصد)	بازیابی هماتیت (درصد)
خوراک	۱۰۰	۴۶٫۲۰	۳۲٫۳۴	۱۰۰
کنسانتره	۲۶٫۷۶	۶۶	۴۶٫۱۹	۳۸٫۲۲
باطله	۷۳٫۲۴	۳۸٫۹۷	۲۷٫۲۸	۶۱٫۷۸

نتایج آزمایش‌ها تا این مرحله نشان می‌دهد که دستیابی به محصولی با عیار حداقل ۵۵ درصد هماتیت، امکان‌پذیر است؛ بنابراین با انجام آزمایش‌های تکمیلی برای افزایش بازیابی کانه مفید و آزمایش‌های تکمیلی باطله‌های جدایش مغناطیسی و اعمال یک مرحله شستشو، در مجموع دو محصول به صورت ذیل به دست آمد (شکل ۱۶).

الف- محصول مرحله رافر با ۵۰٫۴۲ درصد وزنی از بار اولیه ورودی به سیستم با عیار کنسانتره بیش از ۵۵ درصد هماتیت.

ب- محصول مرحله رمق‌گیری با حدود ۱۰ درصد وزنی بار اولیه با عیار ۴۶٫۷۹ درصد هماتیت، بعد از یک مرحله شستشوی باطله حاصل از مرحله رافر.

در ادامه جهت بررسی تأثیر آسیاب‌کنی بر افزایش درجه آزادی هماتیت ریز و خاکی و همچنین بر عیار و بازیابی کنسانتره، تعدادی آزمایش با مدت‌زمان‌های خردایش متفاوت انجام گرفت که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند. یک نمونه به مدت زمان ۸ دقیقه آسیا شد، در این حالت ۱۰۰ درصد ذرات از اندازه ۲۱۲ میکرون ریزتر بودند. نمونه بعد از آسیا مورد آزمایش قرار گرفت که نتیجه آن در جدول ۱۴ ذکر شده است.

وزن نمونه: ۱ کیلوگرم

خردایش: ۸ دقیقه

شدت جریان: ۱٫۷ تسلا

دور روتور: ۳ دور در دقیقه

جدول ۱۴: نتایج حاصل از آزمایش مغناطیسی تر شدت بالا با خردایش اولیه به مدت ۸ دقیقه

نوع محصول	وزن (درصد)	عیار هماتیت (درصد)	عیار Fe (درصد)	بازیابی هماتیت (درصد)
خوراک	۱۰۰	۴۱٫۷۴	۲۹٫۱۹	۱۰۰
کنسانتره	۴۵٫۵۱	۵۹٫۱۶	۴۱٫۳۷	۶۴٫۴۹
باطله	۵۴٫۴۹	۲۷٫۱۹	۱۹٫۰۲	۳۵٫۵۱

ملاحظه می‌شود با افزایش خردایش نمونه از ۴ دقیقه به ۸ دقیقه، به نظر می‌رسد میزان آزادشدگی به مقدار بسیار کمی افزایش یافته و با توجه به نتایج جدول ۱۴ باعث افزایش عیار به مقدار ۲ درصد شده و بر روی بازیابی تأثیری نداشت. آزمایش دیگری جهت بررسی بیشتر تأثیر مدت‌زمان خردایش بر عیار محصول در پی گرفته شد. در این حالت نیز سرند کنترل، اندازه ۱۵۰ میکرون و مدت‌زمان خردایش ۱۳ دقیقه بود. شرایط و نتیجه حاصل به شرح جدول ۱۵ است.

خردایش: ۱۳ دقیقه

سرند کنترل: ۱۵۰ میکرون

شدت جریان: ۱٫۷ تسلا

دور روتور: ۳ دور در دقیقه

جدول ۱۵: نتایج حاصل از آزمایش مغناطیسی تر شدت بالا با خردایش اولیه به مدت ۱۳ دقیقه

نوع محصول	وزن (درصد)	عیار هماتیت (درصد)	عیار Fe (درصد)	بازیابی هماتیت (درصد)
خوراک	۱۰۰	۴۱٫۲۷	۲۸٫۸۶	۱۰۰
کنسانتره	۴۶٫۱۳	۵۵٫۹۷	۳۹٫۱۴	۶۲٫۵۷
باطله	۵۳٫۸۷	۲۸٫۶۸	۲۰٫۰۵	۳۷٫۴۳

ملاحظه می شود کنسانتره با عیار بیش از ۶۶ درصد و بازیابی ۵۰/۴۹ درصد حاصل شد. برای بررسی امکان افزایش عیار این محصول، آزمایش کلینر در شرایط مشابه رافر انجام شد که نتیجه حاصل در جدول ۱۸ ارائه گردید. ارزیابی افزایش عیار نشان می دهد که دستیابی به عیار بالاتر از ۵۵ درصد آهن (۷۸ درصد هماتیت) ممکن بوده و تنها بازیابی بیشتر باید مدنظر قرار گیرد. نگاهی به محصولات کلینر نشان می دهد در شرایط بهینه، محصولات جدا شده در مرحله رافر باید برای افزایش عیار به ابعاد ریزتری آسیا شود. به همین دلیل می توان خردایش مجدد باطله کلینر را در نظر گرفت. نتایج به دست آمده به شرح جدول ۲۰ است.

جدول ۱۸: نتایج آزمایش مرحله پرعیار کنی اولیه

نوع محصول	وزن (درصد)	عیار هماتیت (درصد)	عیار Fe (درصد)	توزیع هماتیت (درصد)
خوراک	۱۰۰	۶۷/۹۱	۴۷/۵۴	۱۰۰
کنسانتره	۸۳/۱۹	۷۲/۱۱	۵۰/۴۸	۸۸/۳۳
باطله	۱۶/۸۱	۴۷/۱۵	۳۳/۰۱	۱۱/۶۷

جدول ۱۹: نتایج آزمایش مرحله پرعیار سازی ثانویه

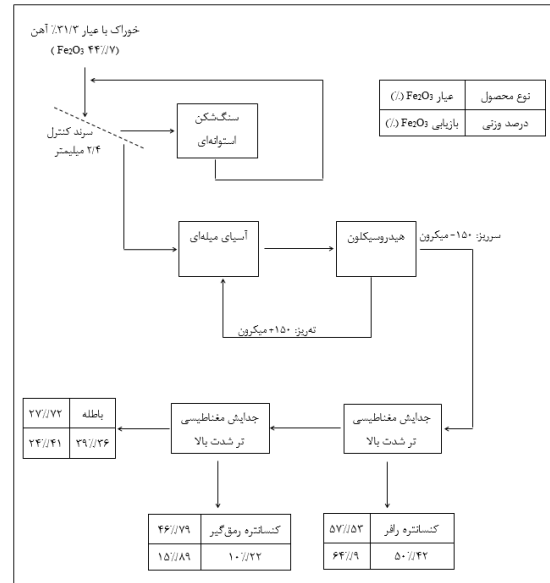
نوع محصول	وزن (درصد)	عیار هماتیت (درصد)	عیار Fe (درصد)	توزیع هماتیت (درصد)
خوراک	۱۰۰	۷۲/۱۱	۵۰/۴۸	۱۰۰
کنسانتره	۷۱/۳۱	۸۰/۱۷	۵۶/۱۲	۷۹/۲۸
باطله	۲۸/۶۹	۵۲/۰۸	۳۶/۴۶	۲۰/۷۲

جدول ۲۰: نتایج نهایی حاصل از دو مرحله پرعیار سازی کنسانتره رافر

نوع محصول	وزن (درصد)	عیار هماتیت (درصد)	عیار Fe (درصد)	توزیع هماتیت (درصد)
خوراک	۱۰۰	۴۴/۹۷	۳۱/۴۸	۱۰۰
کنسانتره نهائی	۲۰/۴	۸۰/۱۷	۵۶/۱۲	۳۶/۵۰
باطله	۷۹/۶	۳۵/۷۴	۲۵/۰۲	۶۳/۵۰

۴-۲-۳- نتیجه گیری و فلوشیت پیشنهادی

نتایج بررسی های به عمل آمده نشان می دهد که در بهترین وضعیت، وزن کنسانتره تولیدی با عیار بیش از ۵۶ درصد آهن و ۸۰ درصد هماتیت حاوی ۲۰ درصد وزن بار اولیه است. در حقیقت باید ارزیابی اقتصادی برای تولید تناژ مشخص و تأسیسات مورد نیاز به عمل آید تا سوددهی تعیین شود. باتوجه به ارزش کنسانتره آهن و مشخصات ماده معدنی مورد مطالعه، این امر (سوددهی) باید با دقت و حساسیت بیشتری بررسی شود.



شکل ۱۶: فلوشیت برای دستیابی به محصول با عیار حداقل ۵۵ درصد هماتیت

آزمایش های اولیه نشان داد که به علت عدم حضور منیتیت، بازیابی آهن در میدان مغناطیسی با شدت کم عملاً امکان پذیر نیست. درعین حال علیرغم اینکه هماتیت در شدت های میدان مغناطیسی کمتر از ۱ تسلا نیز قابل جدایش است، اما ریزدانه بودن و حضور گوئیت به عنوان بخشی از کانی حاوی آهن عملاً استفاده از شدت های متوسط را نیز غیرممکن ساخته است. در آزمایش های به عمل آمده ابتدا بیشترین بازیابی در مرحله رافر مدنظر قرار گرفت و برای بهترین شرایط رافر، آزمایش های کلینر (شستشو) در دو تا سه مرحله انجام شد. در ادامه بهترین نتایج، حاصل و فلوشیت انتخابی ارائه شده است. آزمایش های این مرحله بهینه سازی با جداکننده مغناطیسی تر شدت بالا، آسیای مواد در ۴ دقیقه و سرد کنترل ۱۵۰ میکرون بود. شرایط و نتیجه حاصل به شرح جدول ۱۷ است.

وزن نمونه: ۱ کیلوگرم

خردایش: ۴ دقیقه

سرد کنترل: ۱۵۰ میکرون

شدت جریان: ۱/۷ تسلا

دور روتور: ۳ دور در دقیقه

جدول ۱۷: نتایج آزمایش مرحله رافر خوراک

نوع محصول	وزن (درصد)	عیار هماتیت (درصد)	عیار Fe (درصد)	توزیع هماتیت (درصد)
خوراک	۱۰۰	۴۴/۹۷	۳۱/۴۸	۱۰۰
کنسانتره	۳۴/۳۹	۶۶/۰۲	۴۶/۲۱	۵۰/۴۹
باطله	۶۵/۶۱	۳۳/۹۳	۲۳/۷۵	۴۹/۵۱

۴-۲-۴- جدایش مغناطیسی خشک گرادبان بالا

جداکننده‌های مغناطیسی خشک برای ذرات درشت کارایی مناسب را دارا می‌باشند [۳۱]. جداکننده مغناطیسی خشک در دسترس، از نوع القائی با قابلیت تولید میدان مغناطیسی حداکثر به شدت ۱۷ تسلا بود. از پارامترهای قابل تنظیم دستگاه می‌توان به تیغه جداکننده باطله-میانی و میانی-کنسانتره اشاره کرد که با افزایش زاویه تیغه میانی-کنسانتره، عیار کنسانتره افزایش و بازیابی آن کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش زاویه تیغه باطله-میانی، حجم بیشتری از خوراک به باطله راه می‌یابد. برای انجام آزمایش‌های مغناطیسی خشک گرادبان بالا با توجه به توزیع عیار آهن و درصد وزنی در محدوده‌های مختلف ابعادی که در جدول ۲۱ آورده شده است، از دو محدوده ۱۰۰۰+۲۳۸۰- میکرون و ۱۵۰+۱۰۰۰- میکرون، نمونه معرف تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. تمامی آزمایش‌ها در شدت میدان ۱۷ تسلا و دور روتور ۸۰ دور بر دقیقه انجام شدند.

جدول ۲۱: تجزیه سرندي خشک و توزیع عیار آهن در طبقات

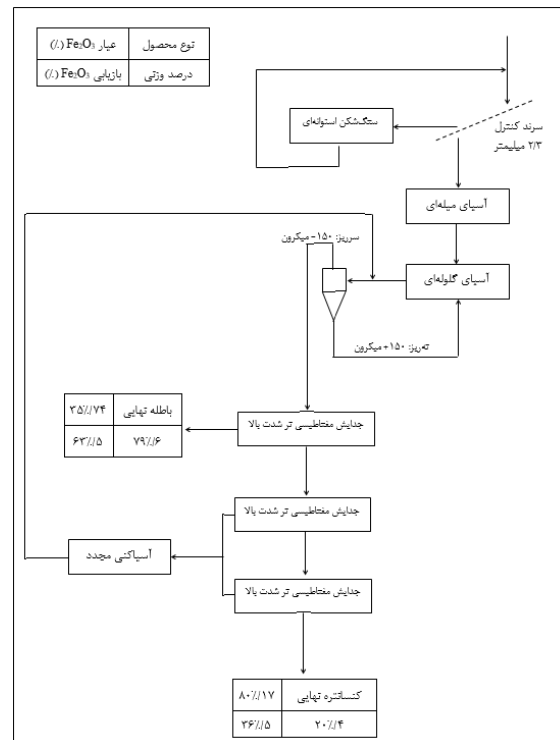
سرندي مختلف

محدوده ابعادی (میکرون)	درصد وزن روی سرندي	عیار آهن (درصد)
-۲۳۸۰+۲۰۰۰	۶۶	۳۰٫۶
-۲۰۰۰+۱۰۰۰	۲۴٫۳	۳۲٫۷۳
-۱۰۰۰+۶۰۰	۱۴٫۲	۳۴٫۳۸
-۶۰۰+۳۰۰	۱۶٫۴	۳۴٫۵۴
-۳۰۰+۲۱۲	۹٫۳	۳۱٫۵۹
-۲۱۲+۱۵۰	۳	۲۸٫۰۸
-۱۵۰	۲۶٫۲	۲۷٫۸۸

۴-۲-۴-۱- محدوده ابعادی ۱۰۰۰+۲۳۸۰- میکرون

به‌منظور این بخش از ذرات، با توجه به این‌که مقدار بسیار کمی خوراک به بخش کنسانتره راه یافت، بنابراین محصول میانی به‌عنوان کنسانتره در نظر گرفته شد. در حالت بهینه، زاویه تیغه باطله روی ۸۰ درجه قرار داشت. محصول حاصل از جدایش مرحله اول، مجدداً به دستگاه برگردانده و تحت یک مرحله پرعیارسازی با همان شرایط قبل قرار گرفت. شکل ۱۸ نمایی از این فرآیند را نشان می‌دهد. نتیجه این آزمایش‌ها در جدول ۲۲ آورده شده است.

در پیشنهاد فلوشیت موردنیاز دو فرض در نظر گرفته شده است. فرض اول این است که ماده معدنی در ابعاد درشت به کارخانه فرآوری باردهی می‌شود که در این صورت نیاز به بخش سنگ‌شکنی دومرحله‌ای برای کاهش ابعاد تا حد ۲۰ میلی‌متر است. بخشی از فلوشیت که شامل ابتدای مسیر تا قبل از آسیای گلوله‌ای است، در صورت استفاده از بار ورودی ریزتر از ۵ میلی‌متر (مانند نمونه تحویلی برای آزمایش‌ها) موردنیاز نخواهد بود و می‌تواند حذف شود. در این فلوشیت، دو مرحله آسیای میله‌ای و گلوله‌ای در نظر گرفته شد که برای واحدهای کوچک، یک مرحله آسیای گلوله‌ای در مسیر بسته (برای کاهش تولید نرمه) کافی است؛ بنابراین برای یک واحد کوچک، بخش خردایش می‌تواند در یک آسیای گلوله‌ای خلاصه شود. در برخی از حالت‌ها می‌توان از یک مرحله آسیای گلوله‌ای در مدار باز نیز استفاده کرد. در این فلوشیت، بخش طبقه‌بندی شامل هیدروسیکلون برای جدا کردن ابعاد ریزتر از ۱۵۰ میکرون برای ارسال به بخش جدایش مغناطیسی است که شامل سه جداکننده مغناطیسی شدت بالای پیوسته است. در این فلوشیت، کنسانتره تولیدی در رافر بعد از دو مرحله کلینر به تولید محصول هدف خواهد انجامید. باطله دو مرحله کلینر بعد از آسیای مجدد، وارد سیستم هیدروسیکلون و مسیر بسته می‌شوند (شکل ۱۷).



شکل ۱۷: فلوشیت برای دستیابی به عیار بیش از ۸۰ درصد هماتیت

جدول ۲۲: نتایج جدایش مغناطیسی خشک شدت بالا برای محدوده ابعادی ۱۰۰۰+۲۰۰۰- میکرون

نوع محصول	درصد وزنی	عیار هماتیت (درصد)	بازیابی هماتیت (درصد)
خوراک مرحله اول	۱۰۰	۴۴٫۸۴	۱۰۰
کنسانتره مرحله اول	۷۷٫۶۲	۵۶٫۰۶	۹۷٫۰۳
باطله مرحله اول	۲۲٫۳۸	۵٫۹۶	۲٫۹۷
خوراک مرحله دوم	۷۷٫۶۲	۵۶٫۰۶	۹۷٫۰۳
کنسانتره مرحله دوم	۷۴٫۰۶	۵۷٫۶	۹۵٫۱۱
باطله مرحله دوم	۳٫۵۶	۲۴٫۱۳	۱٫۹۲
کنسانتره نهایی	۷۴٫۰۶	۵۷٫۶	۹۵٫۱۱
باطله نهایی	۲۵٫۹۴	۲۴٫۱۳	۱٫۹۲

جدول ۲۳: نتایج جدایش مغناطیسی خشک شدت بالا برای محدوده ابعادی ۱۵۰+۱۰۰۰- میکرون

نوع محصول	درصد وزنی	عیار هماتیت (درصد)	بازیابی هماتیت (درصد)
خوراک مرحله اول	۱۰۰	۴۴٫۷۶	۱۰۰
کنسانتره مرحله اول	۲۹٫۳۲	۶۵٫۸۱	۴۳٫۱۱
میانی مرحله اول	۵۶٫۸۴	۴۴٫۰۹	۵۵٫۹۴
باطله مرحله اول	۱۳٫۸۴	۲٫۹	۰٫۹۵
خوراک مرحله دوم	۵۶٫۸۴	۴۴٫۰۹	۵۵٫۹۴
کنسانتره مرحله دوم	۲۲٫۹۵	۶۲٫۴۶	۳۲٫۵
میانی مرحله دوم	۲۸٫۷	۳۴٫۵	۲۲٫۴۹
باطله مرحله دوم	۵٫۱۹	۸٫۰۹	۰٫۹۵
کنسانتره نهایی	۵۲٫۲۷	۶۴٫۳۴	۷۵٫۱۴
میانی نهایی	۲۸٫۷	۳۴٫۵	۲۲٫۴۹
باطله نهایی	۱۹٫۰۳	۴٫۳۱	۲٫۳۷

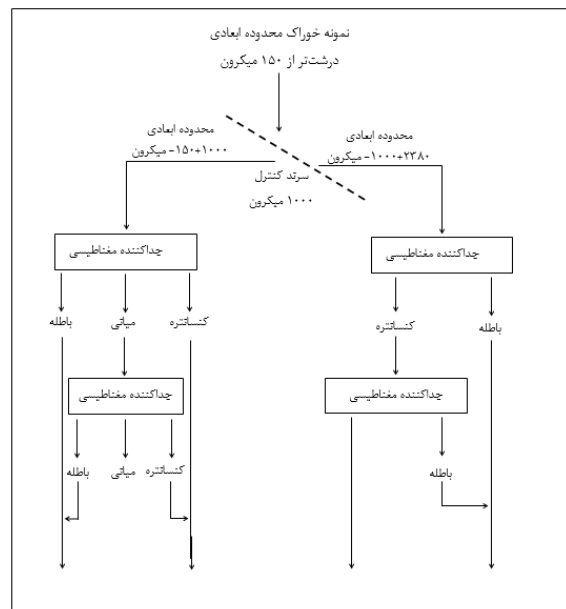
۵- نتیجه گیری

در این تحقیق فرآوری نمونه خاک سرخ معدن ساحل در غرب بندرعباس مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد.

- مطالعات XRD، آنالیز شیمیایی و کانی شناسی نشان داد که مهم ترین کانی های تشکیل دهنده نمونه، هماتیت، گوتیت، کوارتز، کلسیت و در مقادیر کمتر زاروسیت، فلدسپات، ژپیس و کانی های رسی و نمکی می باشند. عیار هماتیت در نمونه، ۴۴٫۷ درصد است. عمده کانی آهن دار نمونه، هماتیت است که به دو فرم بلوری و ریز و خاکی یافت می شود. هماتیت ریز و خاکی هم با هماتیت بلوری و هم با کانی های شفاف، درگیری نشان می دهد و حتی در ابعاد ریزتر از ۷۵ میکرون، درجه آزادی آن ۳۵ درصد برآورد شد.

- ابعاد اولیه نمونه ریزتر از ۵ میلی متر بود و اندیس کار آن برابر ۸٫۲۹ کیلووات ساعت بر تن کوچک به دست آمد که نشان دهنده مصرف کم انرژی برای دستیابی به ابعاد ریزتر از ۱۵۰ میکرون است.

- در آزمایش های مربوط به جدایش میز، پارامترهای شیب، آب خوراک و اثر متقابل شیب و آب شستشو، به ترتیب مؤثرترین پارامترها بر عیار هماتیت و شیب، مؤثرترین پارامتر بر بازیابی هماتیت را به خود



شکل ۱۸: نمایی از جدایش مغناطیسی خشک گرادان بالای محدوده های ابعادی ۱۰۰۰+۲۰۰۰- و ۱۵۰+۱۰۰۰- میکرون

۴-۲-۴- محدوده ابعادی ۱۵۰+۱۰۰۰- میکرون

به منظور این بخش از ذرات، زوایای مختلف تیغه ها مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت در حالت بهینه، زاویه تیغه باطله و کنسانتره به ترتیب روی ۸۰ و ۹۰ درجه تنظیم شد. برای این محدوده، سه محصول به دست آمد. سپس با توجه به حجم بالای محصول میانی، این قسمت مجدداً به دستگاه برگردانده و مورد جدایش مغناطیسی قرار گرفت، در این حالت نیز زاویه تیغه باطله و کنسانتره به ترتیب روی ۹۰ و ۸۰ درجه تنظیم شد. کنسانتره مرحله اول و مرحله دوم با یکدیگر مخلوط شده و به عنوان کنسانتره نهایی در نظر گرفته شد. نتیجه حاصل در جدول ۲۳ ارائه شده است.

- [8] Ghosh, G. K., 2019, "Red and lateritic soils and agri-productivity: Issues and strategies", *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 67(4), S104-S121.
- [9] Harben, P. W., 1999, "The Industrial Minerals and book: A Guide to Markets, Specifications, & Prices", *Industrial Minerals Information*, 296 pages.
- [10] "Hematite iron ore, from chemical formula to method of identification and application", *Majd Steel*, <http://www.majdstel.com>, 2025/06/03. [In Persian]
- [11] Cornell, R. M., Schwertmann, U., 2000, "The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses", 1st edition, Wiley-chv.
- [12] Aydin, G., Sivrikaya, O., Sozeri, H., 2009, "Production of hematite concentrate from low grade hematite ores", *Proceeding of the XIII Balkan mineral processing congress*, 466-469.
- [13] Liu, C. S., Li, J. S., Tang, H. Y., Gao, Y. W., 2014, "Research on mineral processing for high silica low grade hematite ore in Xinjiang", *Ironmaking & Steelmaking*, 41(7), 481-485.
- [14] Behnamfard, A., Khaphaje, E., 2019, "Characterization of Sangan low-grade iron ore and its processing by dry low-intensity magnetic separation", *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 53(2), 111-116.
- [15] Akbari, H., Noaparast, M., Shefaei Tonekaboni, Z., Hajati, A., 2016, "Gravity enrichment of hematite sample from Tang-Zagh mine by shaking table using Box-Behnken experimental design model", 10th Mining Engineering Student Conference, Kashan. [In Persian]
- [16] Kong, H., Zhou, T., Yang, X., Gong Y., Zhang, M., Yang, H., 2022, "Iron recovery technology of red mud—a review", *Energies*, 15(10), 3830.
- [17] Jiang, L., Liu P., Yang, X., Zhang, Y., Li, F., 2019, "Comparative Classification Studies of Red Mud by Using Hydrocyclones", *Miner. Eng.*, 131, 124-130.
- [18] Jamieson, E., Jones, A., Cooling, D., Stockton, N., 2006, "Magnetic Separation of Red Sand to Produce Value", *Miner. Eng.*, 19, 1603-1605.
- [19] Li, W., Han, Y., Liu, X., Shan, Y., Li, Y., 2019, "Effect of Fluidized Magnetizing Roasting on Iron Recovery and Transformation of Weakly Magnetic Iron Mineral Phase in Iron Tailings", *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, 55, 906-916.
- [20] Li, Y., Wang, J., Wang, X., Wang, B., Luan, Z., 2011, "Feasibility Study of Iron Mineral Separation from Red Mud by High Gradient اختصاص دادند و در نهایت کنسانتره‌ای با عیار ۵۵/۸۷ درصد هماتیت و بازیابی ۶۳/۲۵ درصد به دست آمد.
- بهترین نتایج با استفاده از جداکننده‌های مغناطیسی تر شدت بالا حاصل شد. با یک مرحله پرعیارسازی محصولی با عیار ۵۷/۵۳ درصد هماتیت و بازیابی ۶۴/۹ درصد به دست آمد. همچنین در ادامه آزمایش‌های تکمیلی جدایش مغناطیسی تر شدت بالا نیز محصولی با عیار ۸۰/۱۷ درصد هماتیت و بازیابی ۳۶/۵ درصد بعد از دو مرحله کلیتر حاصل شد.
- جدایش مغناطیسی خشک گرادیان بالا برای دو محدوده ابعادی ۱۰۰۰+۲۳۸۰- میکرون و ۱۵۰+۱۰۰۰- میکرون انجام شد که محدوده ابعادی ۱۵۰+۲۳۸۰- میکرون دارای محصولی با عیار ۵۷/۶ درصد هماتیت و بازیابی ۹۵/۱۱ درصد و محدوده ابعادی ۱۵۰+۱۰۰۰- میکرون نیز دارای محصولی با عیار ۶۴/۳۴ درصد هماتیت و بازیابی ۷۵/۱۴ درصد بود.
- ### مراجع
- [1] Chatterjee, K., 2009, "Uses of Industrial Minerals and Rocks and Freshwater", *Nova Science Publishers Inc.*, New York.
- [2] Potter, M. J., 2010, "2007 Minerals yearbook, Iron oxide pigments", U.S., *Geological Survey*.
- [3] Karimpour, M., 2006, "Industrial Minerals and Stones", *Ferdowsi University of Mashhad*, 398 p. [In Persian]
- [4] Chatterjee, k., 2007, "Uses of metals and metallic minerals", *New Age International Publishers*, New Delhi.
- [5] Farahmandpour, Sh., 2005, "Ochre and its application in the dye industry", *Master's thesis*, Supervisor: Dr. Faranak Feyzi, Mining Engineering Department, Islamic Azad University, South Tehran Branch. [In Persian]
- [6] Jafarzadeh, A., Ghorbani, M., Pezeshkpour, M., 1995, "Geology of Iran: Iron Deposits", *Ministry of Industries and Mines Publications*, *Geology and Mineral Exploration Organization of the Country*, 213 pages. [In Persian]
- [7] Renaud, K. M., 2023, "2017-2018 Minerals Yearbook, india", U.S., *Geological Survey*.

- [27] Su, W., Tan, X., Wang, Z., 2024, "Critical applications of scandium and progress in the extraction of different scandium resources", In E3S Web of Conferences (Vol. 520, p. 03001), EDP Sciences.
- [28] Yu, Q., Jin, Y., Lu, S., Ma, D., 2024, "Recent Research on Recovery of Iron and Aluminium from Bauxite Residue in China", TRAVAUX 53, Proceedings of the 42nd International ICSOBA Conference, Lyon, 27 - 31 Oct. 2024, pp. 701-710.
- [29] Fariss, A. H. B., Ibrahim, A. I. I., Ozdemir, A. C., Top, S., Kursunoglu, S., Altiner, M., 2025, "Beneficiation of Low-Grade Iron Ore Using a Dry-Roll Magnetic Separator and its Modeling via Artificial Neural Network", Journal of Sustainable Metallurgy, 1-17.
- [30] Nematollahi, H., 2003, "Mineral processing", Tehran University Press, third edition, 432 p. [In Persian]
- [31] Duckworth, W. E., 1968, "Statistical techniques in technological research: An aid to research productivity", London, Methuen.
- [32] Song, S., 2002, "Magnetite separation of Hematite and Limonite Fines as Hydrophobic Floccs from Iron Ores", Mineral Engineering, vol. 15, issue 6, pp. 415-422.
- Superconducting Magnetic Separation", Phys. C Supercond, vol. 471, issue 3-4, pp. 91-96.
- [21] Navi, N., Karamoozian, M., Khani, M. R., 2023, "Recovery of Iron from Bauxite Red Mud by Reduction Roasting Method", Journal of Mining and Environment, 14(4), 1295-1305.
- [22] Chen, R., Shi, L., Huang, H., Yuan, J., 2023, "Extraction of iron and alumina from red mud with a non-harmful magnetization sintering process", Minerals, 13(3), 452.
- [23] Xiao, J., Zou, K., Zhong, N., Gao, D., 2023, "Selective separation of iron and scandium from Bayer Sc-bearing red mud", Journal of Rare Earths, 41(7), 1099-1107.
- [24] Xiao, J., Zhong, N., Gao, D., Zou, K., Wang, Z., Huang, W., Xiong, W., 2022, "An efficient process to recover iron from Bayer red mud", JOM, 74(8), 3172-3180.
- [25] Wang, K., Dou, Z., Liu, Y., Li, X., Lv, G., Zhang, T. A., 2022, "Summary of research progress on separation and extraction of valuable metals from Bayer red mud", Environmental Science and Pollution Research, 29(60), 89834-89852.
- [26] Abolpour, B., Abbaslou, H., Balvardi, M., 2022, "Enrichment of hematite iron mineral by reduction method and investigation of its properties", Fifth National Congress of Chemistry and Nanochemistry from Research to Technology, Tehran, Iran. [In Persian]

¹ Khaphaje

[□] Kong

[□] Jiang

[□] Jamieson

[□] Li

[□] Song

[□] Huang

[□] Rai

[□] Xiao

^{□□} Navi

^{□□} Su

^{□□} Yu

¹³ Chen

^{□□} Fariss

¹⁵ ANOVA

¹⁶ Normal Plot of Residuals

¹⁷ curvature

¹⁸ Lack of Fit



مقاله مروری

استفاده از تکنولوژی پهبادهای در طراحی استخراج معادن روباز و زیرزمینی، وضعیت کنونی، چالش های پیش رو و چشم اندازهای آینده

امیرحسین واحدی^۱، علیرضا باغبانان^{۱*}، امین ازهری^۱، احمد رحمانی شهرکی^۱

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(دریافت: ۲۱ فروردین ۱۴۰۳، بازنگری: ۲۴ خرداد ۱۴۰۳، پذیرش: ۱۴ مهر ۱۴۰۳)

چکیده

فتوگرامتری دیجیتال در حال تبدیل شدن به یک روش رایج، پرکاربرد و پرترفدار برای نقشه برداری و مدل سازی های زمین شناسی و برداشت ویژگی های توده های سنگی است که در معادن به طور گسترده استفاده می شود. چالش ثبت داده های زمین شناسی و ساختاری در مناطق غیرقابل دسترس معادن، حتی در صورت استفاده از روش های فتوگرامتری زمینی، کماکان پابرجاست؛ بنابراین مدل های ژئوتکنیکی معادن و بانک داده های ژئومکانیکی معادن به صورت مجموعه داده های ناقص باقی می ماند. حفاریات عظیم زیرزمینی نگهداری نشده مانند کارگاه های استخراج، پتانسیل ایجاد ریزش های بزرگ را دارند، اما با رفع خلأهای برداشت داده های ژئوتکنیکی در مناطق غیرقابل دسترس، می توان خرابی های احتمالی را از طریق تحلیل سینماتیکی ناپیوستگی های برداشت شده ی منطقه پیش بینی کرد. پیاده سازی عملیات و سهولت کار با این پهبادهای در معادن زیرزمینی و پیشرفت های اخیر در سیستم های تشخیص موانع، امکان بررسی های دقیق تر و انجام فتوگرامتری در معادن را فراهم کرده است. همواره مسئله مدل سازی توده سنگ درزه دار مورد توجه متخصصان و مهندسان علم مکانیک سنگ بوده است، زیرا شناخت هرچه بهتر توده سنگ اثر مستقیم بر طراحی، هندسه معدن و سیستم نگهداری دارد. در این مطالعه مروری، ابتدا درآمدی بر اهمیت مطالعه درزه سنگ ها و عوامل مؤثر بر مکانیزم تشکیل آن ها بیان شده و سپس مطالعات موردی از مدل سازی توده سنگ درزه دار با استفاده از داده های هواپرد از طریق پهبادهای ارائه شده است. همچنین چالش های استفاده از انواع پهبادهای در صنعت معدنکاری برای مطالعات پیش رو ذکر شده است.

کلمات کلیدی

فتوگرامتری، مدل سازی توده سنگ، مدل سازی سه بعدی، برداشت درزه ها

*عهده دار مکاتبات: bagh110@iut.ac.ir

DOI: 10.22034/ANM.2024.21440.1632

۱- مقدمه

تکنیک‌های سنجش‌ازدور که معمولاً برای جمع‌آوری داده‌ها برای آنالیزهای ژئوتکنیکی استفاده می‌شوند و به منبعی قابل‌اعتماد برای جمع‌آوری داده‌های نقشه‌برداری و آنالیزهای مهندسی تبدیل شده‌اند [۱]. همچنین در بیشتر مواقع، داده‌های زمین‌شناسی را می‌توان از طریق همین تکنیک‌ها نیز جمع‌آوری کرد [۲]. با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور، مهندسان قادر به تعریف جهت‌ها و ساختارهای ناپیوستگی‌ها در توده سنگ و همچنین ایجاد بانک داده‌های قابل‌اعتماد برای ورودی‌های نرم‌افزار جهت تجزیه و تحلیل‌های مهندسی هستند [۳]. به‌طورمعمول، تکنیک‌های سنجش‌ازدور برای برداشت داده‌ها از مناطق بزرگ استفاده می‌شود که جمع‌آوری آن‌ها بدون کمک سنجش‌ازدور زمان بیشتری از مهندسیین و متخصصان گرفته و باعث افزایش زمان پروژه می‌شود. تکنیک‌های هوابرد و به‌طورکلی تکنیک‌های سنجش‌ازدور، به دلیل توانایی در ثبت سریع اطلاعات به‌ویژه اخذ اطلاعات از مناطقی که دسترسی و مطالعه آن‌ها دشوار است، بسیار پرکاربرد و سودمند هستند [۴].

در معدنکاری‌های زیرزمینی به دلیل عدم وجود اطلاعات کافی و همچنین دشواری تولید بانک داده‌ی قابل‌اعتماد از داده‌های زمین‌شناسی به‌ویژه در مناطق غیرقابل‌دسترس معادن، اغلب ریسک قابل‌توجهی برای مخاطرات جانی و مالی وجود دارد [۵]. از این‌رو امروزه علم معدنکاری به سمت استفاده از تکنیک‌های برداشت از راه دور که دسترسی بهتر و هزینه‌های کمتری دارند پیش می‌رود. فتوگرامتری ابزار سنجش‌ازدور سودمندی است که برای نقشه‌برداری و مدل‌سازی در معدنکاری و سایر علوم و صنایع به‌طور گسترده به‌ویژه در مناطقی که انسان نمی‌تواند به‌طور ایمن به آن‌ها دسترسی پیدا کند مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶]. مشکلات و مسائل ایمنی، فقدان تجهیزات مناسب، نیاز به نقشه‌برداری دقیق‌تر، بودجه محدود و محدودیت‌های زمانی همگی برهانی برای اجرای تکنیک‌های فتوگرامتری در کنار نقشه‌برداری‌ها و برداشت‌های سنتی است [۷]. اساس کار در استفاده از این فرآیند تصویربرداری از راه دور، ساخت مدل‌های سه‌بعدی برای انجام تحلیل‌های کمی، به‌ویژه برای تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی است [۳]. اگرچه در علم فتوگرامتری اصطلاحات

"نقشه‌برداری" و "مدل‌سازی" اغلب به‌جای یکدیگر استفاده می‌شوند، ولی باید توجه داشت که، "مدل‌سازی" به ارائه یک مدل سه‌بعدی از هندسه توده سنگ اشاره دارد و "نقشه‌برداری" به اندازه‌گیری جهت‌داری و پارامترهای ساختاری که از مدل گرفته‌شده است اشاره دارد (به‌عنوان مثال شیب و جهت شیب یک درزه). اگر از تکنیک‌های سنتی مانند برداشت میدانی برای جمع‌آوری اطلاعات ژئوتکنیکی استفاده شود، داده‌های نهایی برداشت‌شده باید توسط کارشناس ابتدا ثبت و سپس به نرم‌افزارهای پایین‌دستی وارد شوند تا بتوان از آن‌ها استفاده نمود؛ که می‌تواند در یک نرم‌افزار برای تجزیه و تحلیل و برای کاربرد در سایر فرآیندهای طراحی در محل استفاده یا وارد شود [۳]. فتوگرامتری دیجیتال اجازه می‌دهد که ویژگی‌های ژئوتکنیکی برداشت و تعیین‌شده در قالب‌های قابل‌اجرا برای تجزیه و تحلیل و کاربرد در نرم‌افزارهای دیگر استخراج شوند [۶].

یکی از روش‌های محبوب و آسان که امروزه به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد روش ساختار ناشی از حرکت (SfM^1) است. این روش یک تکنیک عکس‌برداری و مدل‌سازی سه‌بعدی است که با استفاده از چندین عکس از یک شی یک مجموعه سه‌بعدی از نقاط را ایجاد می‌کند که به سطح شی مربوط می‌شود و به آن مجموعه ابرنقاط گویند. این روش در علوم زمین برای نقشه‌برداری توپوگرافی، بررسی‌های زمانی و فضایی، زمین‌شناسی و تکتونیک و سایر مقاصد مهندسی به کار می‌رود. به‌طورکلی ساخت یک مدل سه‌بعدی هندسی از یک شی توسط تصاویر دوبعدی اخذشده بر عهده این روش است که به‌طور خلاصه و کلی مراحل (مانند ۱) تصویربرداری (۲) شناسایی ویژگی‌های موجود در تصویر (۳) تولید مجموعه ابرنقاط و (۴) پردازش ابرنقاط و تولید مدل سه‌بعدی را طی می‌کند تا با استفاده از یکسری عکس دوبعدی، یک مدل یکپارچه سه‌بعدی تولید کند [۶]. سایر تکنیک‌های سنجش‌ازدور قادر به برداشت داده‌های ساختاری در محیط‌های زیرزمینی نیز هستند، اما اغلب داده‌های تصویری رنگ‌های قرمز، سبز و آبی (Red Green Blue) را برای شناسایی مرزهای زمین‌شناسی ارائه نمی‌کنند. به‌عنوان مثال، سیستم‌های اسکنر لیزری می‌توانند داده‌های ابرنقطه‌ای سه‌بعدی را برای شناسایی هندسه‌های توده سنگ فراهم کنند، اما این سیستم‌ها نیاز به گرفتن عکس‌های

مانع گریز و دوربین‌های سوار بر پهپاد، پتانسیل استفاده از پهپادها برای نقشه‌برداری از مناطقی که برای انسان قابل دسترسی نیستند را فراهم می‌کند.

امروزه مبحث برداشت درزه‌ها و طراحی الگوهای آتشیاری به شکل دقیق و اصلاح‌پذیر یکی از موضوعات چالش‌برانگیزی است که در معادن مورد بحث است که با توجه به ویژگی قابل ملاحظه‌ای که روش فتوگرامتری در بصری سازی و استخراج درزه‌ها دارد، امروزه روش‌های گسترده‌ای برای تلفیق مدل‌های سه‌بعدی فتوگرامتری و طراحی الگوهای آتشیاری توسعه داده شده است.

هدف از این تحقیق، مروری بر ارزیابی قابلیت استفاده از تصاویر و فتوگرامتری مبتنی بر پهپاد برای مدل‌سازی و نقشه‌برداری توده‌های سنگی قابل دسترس و غیرقابل دسترس در معادن روباز و زیرزمینی است. با پیشرفت روزبه‌روز کدهای کامپیوتری و به‌کارگیری الگوریتم‌های پیچیده و کاربردی پردازش‌های گرافیکی و توسعه تکنیک فتوگرامتری در علوم مختلف، پژوهشگران زیادی در سراسر دنیا در تلاش هستند تا از این تکنیک در جهت بهبود دهی و تسریع فرآیندهای کاری خود کمک بگیرند. در این رابطه در حیطه معدنکاری نیز پژوهشگرانی با انتشار نتایج تحقیقات خود این زمینه علمی و اشتراک‌گذاری آن‌ها راه را برای توسعه و تعمیق مدل‌سازی در معادن فراهم آورده‌اند که انگیزه این مطالعه مروری بوده است. یکی دیگر از اهداف مهم این گردآوری به دست آوردن اطلاعات جامعی از روش‌های گوناگون حل مسائل مختلف در زمینه فتوگرامتری است. به این منظور با تغییر دادن فرضیات یک مسئله می‌توان از روش‌های گوناگونی اعم از پیچیده و ساده برای حل آن بهره گرفت و داشتن این روندنماهای گوناگون مورد استفاده در پژوهش‌های مختلف می‌تواند اشراف کاملی بر انواع روش‌های کار در تحقیقات آینده به عمل آورد.

۲- هدف از مدل‌سازی توده سنگ درزه‌دار و اهمیت برداشت‌های دقیق در طراحی‌های مهندسی

درزه‌ها عبارت‌اند از ناپیوستگی‌هایی که غالباً در سنگ‌ها مشاهده می‌شود. درزه نگاری یکی از مهم‌ترین روش‌های شناخت محیط (توده سنگ) در علم زمین‌شناسی ساختاری است. مطالعه درزه‌ها در بسیاری از کارهای مهندسی ضرورت دارد، به‌عنوان مثال، هنگام استخراج سنگ‌های ساختمانی

تکمیلی جداگانه برای مدل‌سازی داده‌های رنگی بر روی ابر نقاط را دارند [۸، ۳].

روش دیگر، فتوگرامتری با ثبت داده‌های ساختاری و تولید تصاویر در یک فرآیند تصویربرداری است، در این تکنیک ابر نقطه‌ای که با استفاده از فتوگرامتری ایجاد می‌شود ذاتاً دارای مقادیر RGB است که بر روی هر نقطه نمایش داده می‌شود و رنگ واقعی هدف مورد نظر را نشان می‌دهد [۸]. با پیشرفت‌های تکنولوژیکی کنونی در دوربین‌های دیجیتال، فتوگرامتری به تدریج کیفیت بالاتر و خروجی‌های مطلوب‌تری را برای شناسایی ساختارها در مدل‌های سه‌بعدی توده‌های سنگ به دست می‌دهد. امروزه وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین (پهپادها) با دوربین‌های دیجیتال برای تکنیک‌های ثبت داده‌های سنجنش از راه دور برای بازرسی، تجزیه و تحلیل پوشش گیاهی، محاسبات حجمی، مطالعات تطبیقی بر اساس تغییرات در طول زمان، نظارت بر پیشرفت پروژه، ارزیابی پایداری شیب و سایر کاربردهای مهندسی استفاده می‌شود [۴، ۹-۱۱]. فتوگرامتری مبتنی بر پهپاد با مقرون به صرفه‌تر شدن و کاربرپسندتر شدن پهپادها، دوربین‌های مخصوص پهپادها و توسعه نرم‌افزارهای فتوگرامتری روزبه‌روز رایج‌تر می‌شود [۱۱]. استفاده از فتوگرامتری مبتنی بر پهپاد، جمع‌آوری سریع داده‌ها را امکان‌پذیر می‌کند، به‌ویژه در مناطقی که کاربر امکان دسترسی ایمن به آن مناطق را دارا نباشد [۹]. علاوه بر این، نرم‌افزارهای فتوگرامتری در مقایسه با عکس‌های زمینی با دقت بیشتر به سمت یکپارچه‌سازی تصاویر مبتنی بر پهپاد طراحی شده‌اند. در حوزه ژئوتکنیکی، پهپادها برای شناسایی مکان‌های پرتانسیل از نظر زمین‌شناسی و ارزیابی پایداری شیب، اندازه‌گیری ابعاد ساختارها و نقشه‌برداری ویژگی‌های زمین‌شناسی توده‌های سنگی در مناطق مورد مطالعه استفاده شده‌اند [۱۱، ۱۲].

با پیشرفت تکنولوژی، مدل‌های زمین‌شناسی سه‌بعدی و کاربردهای ذاتی آن‌ها در صنعت با داده‌های با وضوح بالاتر که با سرعت‌های بالاتری نیز گرفته می‌شوند، پیشرفت کرده‌اند [۱۳]. همچنین، با تحقیقات بیشتر در مورد حسگرهای تشخیص موانع، به‌ویژه در صنایع خودروسازی و ساخت دستگاه‌های خودکنترل (مانند اتومبیل‌های خودران)، حسگرها به‌گونه‌ای تکامل یافته‌اند که تنظیم دقیق‌تری داشته باشند و به‌طور مؤثر اجسامی را که در مسیر حسگر قرار دارند، شناسایی کرده و از آن‌ها دوری کنند. پیشرفت در حسگرهای

و ظهور روش فتوگرامتری، مهندسان و متخصصان تلاش بر آن داشته‌اند که بتوانند با توسعه تکنولوژی و دستگاه‌های نوین مدل‌های باکیفیت‌تری را از تصاویر دوبعدی استخراج کنند. در این میان فاکتورهای زیادی برای تعیین کیفیت تصاویر و مدل‌ها محاسبه و توسعه داده‌شده است که یکی از آن‌ها GSD^2 است؛ که به معنی فاصله نمونه‌برداری زمینی است این عبارت به فاصله‌ی بین دو مرکز پیکسل متوالی بر روی زمین اشاره دارد. به عبارت ساده، GSD به اندازه‌ی هر پیکسل تصویر ارتو بر روی زمین اشاره می‌کند. هر چه ابعاد GSD بزرگ‌تر باشد، وضوح تصویر کمتر و جزئیات محدودتری قابل‌مشاهده است GSD . رابطه مستقیمی با ارتفاع پرواز دارد، به طوری که برای یک دوربین هر چه ارتفاع پرواز بیشتر باشد، مقدار GSD نیز بزرگ‌تر خواهد شد.

در مدل‌سازی توده سنگ‌ها و درزه سنگ‌ها همواره هدف بر آن بوده است که با بهبود کیفیت تصاویر و بهتر شدن کیفیت دوربین‌ها و نرم‌افزارهای این حیطه، مدل‌هایی باکیفیت بالاتر و تحلیل‌هایی با دقت بیشتر ارائه شود تا بتوان علاوه بر بهبود ایمنی در محیط‌های کاری و کاهش هزینه‌های پروژه‌های صنعتی گامی در پیشبرد مرزهای دانش نیز برداشت [۱۴، ۱۶، ۱۷].

برداشت‌های دقیق با جزئیات هرچه بیشتر و با کیفیت بالا باعث می‌شود داده‌های باکیفیت‌تری از مدل سه‌بعدی نهایی استخراج گردد و در نتیجه داده‌هایی که در مراحل بعدی طراحی‌های مهندسی وارد می‌شود از صحت بالاتری برخوردار باشند. لذا یک مورد از مهم‌ترین مواردی که بر صحت و دقت مدل نهایی تأثیرگذار است کالیبره بودن دوربین و انجام فرایند کالیبراسیون است که با توجه به اهمیت این عملیات، امروزه در نرم‌افزارهای مدل‌سازی مانند AGIsoft این عملیات به صورت خودکار بر روی تصاویر اجرا و خطاهای اپتیکال حذف می‌گردند. برای اسکیل و جهت‌دار کردن مدل سه‌بعدی در نرم‌افزارهای سه‌بعدی سازی مانند AGIsoft، می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده نمود، از جمله این روش‌ها می‌توان به مقیاس دهی با استفاده از فاصله بین دونقطه، نقطه کنترل، مقیاس بار، تدقیق با استفاده از نقطه کنترل، سیستم مختصاتی و فرمت‌های خروجی اشاره کرد. این روش‌ها اجازه می‌دهند مدل سه‌بعدی را با دقت و صحت بالا مقیاس دهی کرد.

به‌خصوص سنگ‌هایی که بایستی در بلوک‌های بزرگ استخراج شوند، شناسایی درزه‌های محل، ضروری است [۱۴، ۱۵]. هنگام انتخاب محل تونل‌های راه‌سازی و معدنی بایستی قبلاً وضعیت درزه‌های محل موردبررسی قرار گیرند، زیرا وجود آن‌ها هم در امر حفاری و پیشروی و هم نگهداری تونل حفرشده می‌تواند باعث بروز مشکلات ناپایداری شود. لذا اطلاع از وجود درزه‌ها در همه‌ی کارهای مهندسی مرتبط با زمین از قبیل معدنکاری، تونلسازی، سدسازی و فعالیت‌های عمرانی در مقیاس بزرگ بسیار ضروری است.

چندین روش برای درک و تشخیص وضعیت درزه‌ها برای مهندسی و متخصصین وجود دارد. از جمله آن‌ها می‌توان به روش خط برداشت، اسکن لیزری و روش فتوگرامتری اشاره کرد. روش فتوگرامتری نسبت به دو روش ذکرشده مزیت و برتری‌هایی نظیر سرعت بالاتر، دسترسی سریع‌تر، هزینه کمتر را دارا است و همچنین تعداد داده‌های بیشتری را می‌توان با استفاده از فتوگرامتری از وضعیت توده سنگ به دست آورد. روش فتوگرامتری که روشی مبتنی بر تصویربرداری و پردازش تصاویر است، امروزه در سایر علوم و صنایع مانند صنایع هوایی، صنایع خودروسازی و جابه‌جایی سنجی نیز کاربردهای فراوانی پیدا کرده است. لذا فراگیری روش فتوگرامتری در صنعت معدنکاری و درزه نگاری می‌تواند به مهندسی معدن و مکانیک سنگ در صحت داده‌ها، طراحی کارآمدتر و افزایش ایمنی در طراحی نهایی بسیار مؤثر باشد. یکی از اهداف مدل‌سازی توده سنگ‌های درزه‌دار ساخت مدل‌های سه‌بعدی رقومی و تحلیل آن‌ها برای امور مربوط به طراحی‌های مهندسی و انجام تحلیل‌های عددی در فازهای مختلف پروژه است. این روش در عمل به متخصصین و مهندسان این آزادی عمل را می‌دهد که بتوانند با سهولت و ایمنی بالاتر تعداد زیادی از درزه‌های یک محیط سنگی را در زمان کمتر برداشت کنند. نتایج این برداشت‌ها هرچقدر با دقت بیشتری انجام شود در جنبه‌های مختلف و مدل‌سازی‌های آتی مانند مدل‌سازی جریان سیال، مدل‌سازی شبکه شکستگی مجزا و تحلیل پایداری تأثیر مستقیمی خواهند داشت.

همواره مدل‌سازی و تحلیل رفتاری توده سنگ‌های درزه‌دار دغدغه اصلی مهندسان و متخصصان مکانیک سنگ بوده است و در دهه‌های گذشته همواره تلاش برای شناخت توده سنگ‌های درزه‌دار ادامه داشته است. در طی دوره رشد

۳- کاربردهای روش تصویربرداری توسط پهپاد در معدنکاری

در سال‌های اخیر، پهپادها برای اهداف مختلفی مانند بازرسی‌های ایمنی، نظارت و کنترل و کمک به تصمیمات مدیریتی، نظارت بر عناصر سیستم‌های زیرساختی، پایش محصولات نهایی، نقشه‌برداری‌های هوایی، پایش وضعیت آب، طبقه‌بندی کاربری اراضی، کمک‌های بشردوستانه و امدادرسانی در بلایا، حفاظت، مراقبت‌های بهداشتی، پایش‌بینی آب‌وهوا و مخابرات مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۸]. استفاده از پهپادها و تحقیقات مرتبط با آن به دلیل کاهش قابل توجه هزینه در وسایل نقلیه و حسگرها و همچنین پیشرفت‌های قابل توجه در نرم‌افزار پردازش داده‌ها در صنایع مختلف در حال گسترش است [۱۹].

پهپادها نیز به‌عنوان ابزاری کارآمد در صنعت معدن، مراحل فرآیند معدنکاری در هر سه مرحله اکتشاف، بهره‌برداری و بازسازی پس از معدنکاری تقسیم کرد [۲۰]. در مرحله اکتشاف، کانسار مورد مطالعه توسط گروهی متخصص متشکل از کارشناسان زمین‌شناسی مانند زمین‌شناسان، کانی‌شناسان و ژئوفیزیکدانان شناسایی می‌شود. در مرحله بهره‌برداری، زیرساخت‌های تولید مواد معدنی ایجاد شده و مواد معدنی با استفاده از تجهیزات سنگین استخراج می‌شود. در نهایت، در مرحله بازسازی، کلیه مواد نامطلوب مانند ضایعات، باطله‌ها و خاک‌های سطحی آلوده از منطقه معدن حذف می‌شوند و سطح زیرزمینی به‌طور مناسب با مواد سنگی پر می‌شود [۲۱]. از آنجایی که پهپادها را می‌توان به دستگاه‌های نوری، دوربین‌هایی که محدوده‌های مختلف طیف الکترومغناطیسی را پوشش می‌دهند و ابزارهای ژئوفیزیکی مانند حسگرهای مغناطیسی و طبیعی اشعه گاما مجهز کرد، می‌توان از آن‌ها برای اهداف مختلفی مانند نقشه‌برداری زمین‌شناسی و توپوگرافی، محاسبه احجام و بلوک‌ها و حجم ذخایر، و نظارت مربوط به ایمنی پله‌های معدن، حمل‌ونقل جاده‌ای، و سدهای باطله استفاده کرد. مطالعات زیادی در زمینه فناوری پهپاد در صنعت معدن انجام شده است.

کرس و همکاران [۲۲] یک روند نمای کاری و کاربردی برای استفاده از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در بررسی‌های زمین‌شناسی انجام شده در ایالات متحده را ارائه کردند. آن‌ها همچنین کاربردهای عملی مانند نظارت بر

معدن و باطله‌ها را ارائه کردند. لی و چوی [۲۳] روندها و کاربردهای فناوری پهپاد در صنعت معدن را بررسی کردند. به‌طور خاص، در این مطالعات استفاده از پهپاد برای بررسی‌های توپوگرافی به‌طور مفصل ارائه شده است. یونگ [۲۴] توضیح مختصری در مورد نحوه استفاده از پهپادها در هر مرحله از توسعه معدن ارائه کرد. رن و همکاران [۲۵] مطالعات موردی در مورد استفاده از پهپادها برای عملیات معدنکاری، مانند نقشه‌برداری زمین و مدل‌سازی سه‌بعدی، ارزیابی آسیب، پایش محیط زیستی و پایش آلودگی‌های ناشی از معدنکاری را بررسی کردند. بوچینسکا [۲۶] چند مورد را که در آن از پهپادها در مرحله احیا استفاده شده بود، مرور کرد و درینگ و همکاران [۲۷] بررسی ساختار مدل‌سازی مبتنی بر پهپاد را انجام دادند که می‌تواند برای نقشه‌برداری و تجزیه و تحلیل دایک‌ها و سنگ‌های میزبان از آن‌ها استفاده شود. هدف از این بخش بررسی مقالات در مورد کاربردهای پهپاد در معدن و به دنبال آن مدل‌سازی توده سنگ‌های درزه‌دار است. کیفیت مدل‌های سه‌بعدی ایجاد شده در فوتوگرامتری هوایی به شدت توسط روش‌های تصویربرداری استفاده شده تحت تأثیر قرار می‌گیرد. کیفیت این تصاویر مستقیماً بر دقت و جزئیات مدل سه‌بعدی نهایی تأثیر می‌گذارد. به‌عنوان مثال، وضوح و همپوشانی تصاویر می‌توانند بر میزان جزئیات ثبت شده تأثیر بگذارند، با وضوح بالاتر و همپوشانی بیشتر، مدل‌های سه‌بعدی با دقت و جزئیات بیشتر ایجاد می‌شوند. علاوه بر این، نوع دوربین استفاده شده و الگوهای پرواز نیز می‌توانند بر کیفیت مدل سه‌بعدی تأثیر بگذارند. برای مثال، استفاده از دوربین‌های با وضوح بالا و الگوهای پرواز منظم می‌تواند دقت مدل را بهبود بخشند. علاوه بر این، نرم‌افزار پردازش استفاده شده برای همپوشانی و ترکیب تصاویر نیز می‌تواند بر کیفیت نهایی مدل سه‌بعدی تأثیر بگذارند. بنابراین، توجه دقیق به این عوامل ضروری است تا مدل‌های سه‌بعدی با کیفیت بالا در فوتوگرامتری هوایی ایجاد شود.

لذا سؤالات پژوهشی زیر برای رسیدن به این هدف طبقه‌بندی شده است و پاسخ به این سؤالات در جهت پیشبرد این تحقیق ضروری است:

- کاربردهای فعلی پهپادها در استخراج معدن در فاز بهره‌برداری روباز و زیرزمینی و پایش شیب‌های سنگی چیست؟

عکس هوایی در منطقه اندازه‌گیری به ابعاد 600×380 متر برداشت شد و مدل زمین به صورت سه‌بعدی با استفاده از این اطلاعات ساخته شد. مشاهده شد که استفاده از موقعیت‌های کنترل زمینی یک مثلث هوایی با دقت کمتر از ۱ سانتی‌متر را امکان‌پذیر می‌کند.

لی و چوی [۳۰، ۳۱] بررسی‌های توپوگرافی معادن روباز مختلف را با استفاده از پهپادهای بال چرخشی و بال ثابت انجام دادند. عکس‌های هوایی از منطقه مورد مطالعه به دست آمد و تصاویر ارتوموزائیک و مدل‌های سطحی دیجیتال با استفاده از آن‌ها تولید شد. علاوه بر این، مختصات موقعیت اندازه‌گیری شده با استفاده از یک سیستم موقعیت‌یابی جهانی تفاضلی با توجه به نقطه مرجع زمین با موارد استخراج‌شده از طریق فتوگرامتری پهپاد مقایسه شد. ریشه میانگین مربعات خطا، مختصات X ، Y و Z برابر ۱۰ سانتی‌متر برای پهپاد بال چرخشی و برابر ۱۵ سانتی‌متر برای پهپاد بال ثابت بود. پهپادهای بال ثابت و بال چرخشی در ویژگی‌هایی مانند ارتفاع پرواز، سرعت، زمان و عملکرد دوربین‌های متصل متفاوت هستند. لی و چوی [۳۲] نتایج حاصل از فتوگرامتری هوایی را که برای هر نوع پرنده متفاوت بود را در همان منطقه مورد مطالعه قرار دادند. برای دستیابی به این هدف، یک سایت ساخت‌وساز به‌عنوان منطقه تحقیقاتی تعیین شد. تصاویر ارتوموزائیک و مدل رقومی سطحی با وضوح ۴ سانتی‌متر بر پیکسل با استفاده از عکس‌های هوایی به‌دست‌آمده تولید شد. علاوه بر این، مختصات بر روی زمین با استفاده از سیستم موقعیت‌یابی جهانی تفاضلی برای هفت نقطه کنترل زمینی اندازه‌گیری شد. از مقایسه بین بررسی هوایی و بررسی زمینی، ریشه میانگین مربعات خطا تقریباً ۱۰ سانتی‌متر به دست آمد. پهپاد بال ثابت خطای نسبتاً ناچیزی را هنگام مقایسه نتایج دو نوع نقشه‌برداری هوایی نشان داد.

روسی و همکاران [۳۳] روشی را برای بازسازی زمین معدن با استفاده از عکس‌های هوایی عمود بر سطح و مورب که با استفاده از پهپاد برداشت‌شده بود، پیشنهاد کردند و پس از آن یک تحلیل امکان‌سنجی انجام دادند. آن‌ها معدنی در منطقه‌ای باری واقع در جنوب ایتالیا را به‌عنوان منطقه تحقیقاتی تعیین کردند. ابتدا از تصاویر عمودی استفاده شده است و سپس تصاویری را که از زوایای متفاوت به‌دست‌آمده بودند اضافه کردند. آن‌ها همچنین مجموعه دقیق نقاط

- عمدتاً از چه نوع پهپادهایی در معدن استفاده‌شده است؟

- چه نوع داده‌هایی توسط تصاویر پهپادها برای کاربردهای مدل‌سازی در معدن به‌دست‌آمده است؟
- چه مقیاس‌هایی از منطقه هدف برای کاربردهای پهپاد در معدن انتخاب شده است؟

۳-۱- کاربردهای پهپاد در نقشه‌برداری توپوگرافی در معادن روباز

معادن روباز که به‌سرعت در حال پیشرفت هستند، پایش و نقشه‌برداری از جمله مهم‌ترین نگرانی‌های مدیریتی در این معادن می‌باشند زیرا نقشه‌برداری توپوگرافی به تجهیزات نقشه‌برداری گران‌قیمت (دستگاه توتال و اسکنر لیزری زمینی) و تکنسین‌های حرفه‌ای نیاز دارد. با این حال، در صورت استفاده از پهپاد، می‌توان با بودجه‌ای معقول، به‌سرعت منطقه وسیعی از معدن روباز را تحت بررسی قرار داد. اکثر مطالعاتی که در اینجا بررسی شدند، عکس‌های هوایی را با استفاده از پهپاد به دست آوردند و از این عکس‌ها برای تولید مدل‌های سطحی و حجمی و مدل‌های سه‌بعدی معادن روباز استفاده کردند.

وانگ و همکاران [۲۸] کارایی پهپادهای کم ارتفاع را برای به دست آوردن تصاویر با وضوح بالا برای بازسازی هندسه یک معدن روباز بررسی کردند. علاوه بر این، خطای نسبی از طریق مقایسه مدل‌های رقومی سطحی تولیدشده از ابر نقطه پهپاد و آن‌هایی که از داده‌های اسکنر لیزری زمینی تولید می‌شوند، ارزیابی شد. آن‌ها ابرهای نقطه‌ای پهپاد را از طریق تکنیک‌های مدل‌سازی تصویر، مانند الگوریتم استریوی چندنمایشی توسعه دادند و سپس یک مدل رقومی سطحی را از منطقه مورد مطالعه توسعه دادند. با مقایسه این نتایج با مدل رقومی سطحی تولیدشده بر اساس داده‌های اسکنر لیزری، نقشه اختلافات سه‌بعدی بر اساس مدل رقومی سطحی نشان داد که بیشترین انحراف کمتر از ± 4 متر و خطای نسبی حجم ۱،۵۵ درصد بوده است.

چو و همکاران [۲۹] کاربرد مثلث‌بندی هوایی را با استفاده از یک پهپاد کوچک محیط یک معدن استفاده و کارایی آن را تأیید کردند. برای رسیدن به این هدف، یک معدن اسمکتیت واقع در کره مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها از شش موقعیت کنترل زمینی برای انجام مثلث‌بندی هوایی برای منطقه مورد مطالعه استفاده کردند. علاوه بر این، ۴۴۸

تصویر پیشنهاد کردند که می‌تواند مدل‌های سه‌بعدی دقیق را از تصاویر هوایی گرفته‌شده توسط پهپادها و مجموعه داده‌های چند نمای نامرتب تولید کند. آن‌ها جریان کار پیشنهادی را در یک معدن روباز اعمال و نشان دادند. ژیانگ و همکاران [۳۷] یک معدن روباز را در پکن، چین، به‌عنوان منطقه تحقیقاتی تعیین کردند و دو بار با استفاده از پهپاد برای ارزیابی تغییرات ژئومورفیک، عکس‌های هوایی با وضوح بالا گرفتند سپس مدل‌های رقومی را از طریق فتوگرامتری تولید کردند. سطح معدن روباز با محاسبه تفاوت بین دو مدل رقومی بر اساس الگوریتم سلول به سلول مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

برتا و همکاران [۳۸] عدم قطعیتی را که ممکن است در مدل‌های رقومی سطحی به‌دست‌آمده از طریق فتوگرامتری پهپاد ظاهر شود، ارزیابی کردند. برای دستیابی به این هدف، فتوگرامتری هوایی پهپاد در یک معدن روباز کوچک واقع در جنوب برزیل انجام شد. سپس، آن را با یک روش پیمایشی با استفاده از حسگرهای تدقیق‌کننده‌ی مختصات و اسکن لیزری مقایسه شد.

کراشاک و همکاران [۳۹] فتوگرامتری را با استفاده از یک پهپاد تجاری ارزان‌قیمت در معدن روباز انجام دادند و دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی ساخته‌شده از این طریق را ارزیابی کردند. گی و همکاران [۴۰] نتایج مطالعه انجام‌شده با استفاده از پهپادها در معدن روباز اولان و معدن زیرزمینی Tahmoor در نیو ساوت ولز (NSW)، استرالیا را ارائه کردند. آن‌ها از یک پهپاد برای ارزیابی حجم ذخایر، نظارت بر ایمنی و پایداری دیواره‌های شیب‌دار مرتفع و فرونشست معدن زیرزمینی در این معدن استفاده کردند. اسپوزیتو و همکاران [۴۱] از فتوگرامتری پهپاد برای تعیین کمیت حجم استخراج‌شده در معدن روباز Sa Pigada در ساردینیا، ایتالیا و برای ارزیابی تغییرات در سطح معدن استفاده کردند. در جدول ۱، تحقیقات گذشته بررسی‌شده در مورد کاربرد پهپادها در نقشه‌برداری توپوگرافی در مرحله بهره‌برداری معدنی خلاصه شده است.

۳-۲- استفاده از پهپادها در تجزیه و تحلیل شیب‌های سنگی

پهپادها را می‌توان برای تجزیه و تحلیل شیب سنگی از جمله تجزیه و تحلیل پایداری و ناپیوستگی شیب‌های سنگی که دسترسی مستقیم به آن‌ها چالش‌برانگیز است و

کنترل زمینی را برای ارجاع جغرافیایی و اعتبار سنجی فرآیند بررسی کردند. مشاهده شد که موقعیت نهایی ابرهای نقطه‌ای که نمایانگر هندسه‌ی اصلی محیط معدن در بازسازی توپوگرافی معدن است، می‌تواند به‌دقت چند سانتی‌متری دست یابد. مقایسه بررسی‌های انجام‌شده با استفاده از تصویر عمود بر سطح و مایل با بررسی‌های انجام‌شده با استفاده از ایستگاه‌گذاری، مزیت توصیف بهتر هندسه معدن، ناپیوستگی‌های سطحی و دیواره‌های شیب‌دار را نشان داد.

چریکو و دوایت [۳۴] اثربخشی استفاده از ارتوموزاییک با وضوح بالا و مدل رقومی سطح‌های به‌دست‌آمده را در نقشه‌برداری و نظارت بر سایت‌های معدن در غرب آفریقا ارزیابی کردند. هدف اصلی این مطالعه توسعه داده‌های جغرافیایی دوبعدی و سه‌بعدی است که می‌تواند برای مشاهده عمق معادن و تشخیص ویژگی‌های سایت‌های معدن مورد استفاده قرار گیرد. آن‌ها ارتوموزاییک‌ها و مدل رقومی سطحی با وضوح بالا را با استفاده از ویژگی‌های زاویه دید دوربین و میدان باریک سیستم دید دوربین جمع‌آوری نموده و آن‌ها را مقایسه کردند. مشاهده شد که با استفاده از تصاویر هوایی و فناوری فتوگرامتری می‌توان مدل رقومی سطح‌هایی با دقت و صحت بالا تهیه کرد.

گیل و همکاران [۳۵] تجزیه و تحلیل فضایی را برای بهینه‌سازی مکان نقاط شبکه مورد مطالعه در یک معدن روباز انجام دادند. آن‌ها از پهپادها برای عکاسی هوایی و از نرم‌افزار Quantum GIS برای تحلیل فضایی استفاده کردند. ابتدا یک عکس هوایی با استفاده از پهپاد گرفته شد و بر این اساس، یک مدل زمینی دیجیتال تولید شد. این مدل شامل ارتفاعات، پستی و بلندی‌ها، سایر عناصر جغرافیایی و ویژگی‌های طبیعی مانند رودخانه‌ها و خط‌الرأس‌ها است. با این حال، ارتفاع سطوح انعکاسی درختان، ساختمان‌ها و سایر ویژگی‌های زمین که توسط مدل رقومی سطحی ارائه شده است را نشان نمی‌دهد. پس از آن، یک تجزیه و تحلیل برای یک معدن روباز با استفاده از برنامه Quantum GIS و DEMs انجام شد. تجزیه و تحلیل فضایی نشان داد که استفاده از برنامه به‌طور فراوانی انتخاب اولیه مکان برای نقاط را تسهیل می‌کند. علاوه بر این، مطالعات مختلفی برای اندازه‌گیری پارامترهای گوناگون در معدن روباز با استفاده از پهپاد با تجزیه و تحلیل نتایج انجام شده است. تجار و همکاران [۳۶] یک الگوریتم برای بازسازی خودکار مبتنی بر

کار، عملیات حفاری و انفجار و عملیات دپوی ضایعات معدن کاربرد دارند. پهناده‌ها در شناسایی خطرات و منابع خطر در معدن و پایش فرونشست زمین برای جلوگیری از تخریب ساختارها و آسیب زیست‌محیطی ناشی از استخراج زغال‌سنگ نقش دارند. آن‌ها همچنین در شناسایی تغییر شکل‌ها در معادن روباز و زیرزمینی برای ایمنی و نگهداری تولید و نقشه‌برداری فرونشست چاله‌های فرو ناشی از فعالیت‌های معدنی برای ارزیابی ریسک به کار می‌روند.

طبقه‌بندی سنگ‌شناسی توده سنگ‌ها استفاده کرد. تمام کارهای تحقیقاتی موجود بررسی شده در این بخش از عکس‌های هوایی مبتنی بر هواپیماهای بدون سرنشین برای نقشه‌برداری از دیواره‌ها برای سهولت در کار درزه نگاری، تجزیه و تحلیل ویژگی‌های شیب‌های سنگی و بررسی زمین لغزش‌ها استفاده می‌کند. پهناده‌ها در حوزه معدنکاری به‌منظور ایمنی و مدیریت ریسک به کار گرفته می‌شوند. آن‌ها در پایش جابجایی سطح معدن، پایش پایداری، محیط

جدول ۱: خلاصه‌ای از کاربردهای پهناده برای نقشه‌برداری توپوگرافی در معادن روباز

منبع	سال	هدف مطالعه	نوع پهناده	نوع اکتساب داده	مقیاس منطقه‌ای هدف	سبک کنترل پرواز
وانگ و همکاران [۲۹]	۲۰۱۴	تجزیه و تحلیل دقت هندسه ۳ بعدی تولید شده از تصاویر پهناده	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	توسط اپراتور
چو و همکاران [۲۸]	۲۰۱۵	بررسی قابلیت کاربرد مثلث هوایی در محل با استفاده از تصاویر پهناده	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	بیان نشده
لی و چوی [۳۰]	۲۰۱۵	بررسی توپوگرافی معدن روباز	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	پرواز خودکنترل
لی و چوی [۳۱]	۲۰۱۵	بررسی توپوگرافی معدن روباز	بال ثابت	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	پرواز نیمه خودکنترل
چو و همکاران [۲۸]	۲۰۱۵	بررسی ویژگی‌های معادن روباز با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و متریک منظر	بال ثابت	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	پرواز خودکنترل
تچارف و همکاران [۳۶]	۲۰۱۵	پیشنهاد گردش کار برای بازسازی مبتنی بر تصویر که می‌تواند مدل‌های سه‌بعدی دقیق ایجاد کند	هر دو	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	بیان نشده
لی و چوی [۳۲]	۲۰۱۶	مقایسه فتوگرامتری هوایی با استفاده از دو نوع پهناده موجود	هر دو	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	پرواز نیمه خودکنترل
کرشاک و همکاران [۳۹]	۲۰۱۶	ارزیابی دقت مدل ارتفاعی دیجیتال مبتنی بر پهناده (DEM)	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	بیان نشده
گی و همکاران [40]	۲۰۱۶	ارزیابی حجم، نظارت بر ایمنی دیواره‌ها و نقشه‌برداری از معدن زیرزمینی با استفاده از پهناده	بال ثابت	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	بیان نشده
روسی و همکاران [۳۳]	۲۰۱۷	روش پیشنهادی برای بازسازی توپوگرافی با استفاده از تصاویر نادیر و مایل	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	پرواز خودکنترل
چیریکو و دوایت [۳۴]	۲۰۱۷	ارزیابی ارتو تصویر با وضوح بالا و مدل رقومی سطحی به دست آمده از فتوگرامتری	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	بیان نشده
اسپوزیتو و همکاران	۲۰۱۷	کمی‌سازی حجم استخراج شده، ارزیابی تغییرات سطح با استفاده از فتوگرامتری مبتنی بر پهناده	هر دو	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	پرواز خودکنترل
ژیانگ و همکاران [۳۷]	۲۰۱۸	تولید مدل رقومی و آنالیز سطح معدن از طریق فتوگرامتری پهناده	بال ثابت	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	پرواز خودکنترل
برتا و همکاران [۳۸]	۲۰۱۸	ارزیابی عدم قطعیت مدل‌های سطح دیجیتال قابل دستیابی از طریق فتوگرامتری پهناده	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	بیان نشده
گیل و همکاران [۳۵]	۲۰۱۹	بهینه‌سازی مکان نقاط شبکه رصدی در یک معدن روباز با استفاده از عکس هوایی	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	بیان نشده

استفاده از روش مرسوم و مدل به‌دست‌آمده از طریق فتوگرامتری هوایی نشان داد که مرزهای زمین‌شناسی شناسایی شده در دو مدل با یکدیگر منطبق نبوده و تفاوت به‌اندازه ۱ متر است. این تفاوت‌ها عمدتاً به دلیل دقت نقشه‌ها و مقاطع زمین‌شناسی آنالوگ و اشتباهات در مقیاس است. برتا و همکاران [۴۶] سنگ‌های موجود در معادن روباز را با استفاده از فتوگرامتری پهپاد و الگوریتم‌های هوشمند طبقه‌بندی کردند. آن‌ها ابتدا زمین را از طریق فتوگرامتری هوایی با استفاده از پهپاد مدل‌سازی کردند. سپس، یک ابر نقطه‌ای ایجاد کردند که نشان‌دهنده و نماینده منطقه معدن است. منطقه به چهار گروه دیوریت، گرانیت، خاک و پوشش گیاهی طبقه‌بندی شدند. الگوریتم‌های عمومی برای دسته‌بندی ابر نقطه به چهار کلاس استفاده شد. تجزیه و تحلیل نتایج هر الگوریتم یادگیری ماشین نشان داد که الگوریتم بردار پشتیبان با تابع پایه‌ی شعاعی بالاترین دقت را دارا است. این نتیجه تأثیر تغییرپذیری را بر هر نوع شناسایی بصری بر روی مواد سنگی نشان می‌دهد. مسئله نمونه‌برداری منظم در سه بعد که در آن نمونه‌ها را نمی‌توان مستقیماً در نماهای مختلف برداشت کرد، با نمونه‌های شبه منظم، با فاصله بین نقاط شناور که تقریباً برابر با میانگین فاصله ابر متراکم اولیه است، حل شده است [۷۶].

کاتوروزاو بیرچ [۴۷] از فناوری پهپاد برای نقشه‌برداری جبهه کار معادن روباز استفاده کردند و اثربخشی آن را نشان دادند. این مطالعه در استان Mpumalanga، آفریقای جنوبی انجام شد. این دیواره‌ی بزرگ با استفاده از تکنیک فتوگرامتری دیجیتال مبتنی بر پهپاد، مدل‌سازی و برداشت شد. داده‌های خام به‌دست‌آمده توسط سیستم تصویربرداری هوایی در یک دوره نسبتاً کوتاه ۴۸ ساعته پردازش شده است. و یک مدل سه‌بعدی از منطقه تحقیقاتی تولید شده است. مقایسه بین مدل سه‌بعدی مبتنی بر این سیستم و مدل منبع، همبستگی خوبی را نشان داد.

استید و همکاران [۴۸] کاربرد روش‌های میدانی و سنجش‌ازدور برای ویژگی‌های دیواره‌های شیب‌دار در مقیاس‌ها و فواصل مختلف را طی ۱۵ سال بررسی کردند که توسط گروه تحقیقاتی زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک بررسی شد. آن‌ها کاربردهای بالقوه، مزایا و محدودیت‌های تکنیک‌های مختلف سنجش‌ازدور را برای توصیف جامع دامنه‌های سنگ‌شناسی به‌طور خلاصه ارائه کردند. این مطالعه اهمیت روش‌های سنجش‌ازدور، پهپادها و غیره را در

مک لئود [۴۲] و مک لئود و همکاران [۴۳] امکان به دست آوردن یک ابر نقطه سه‌بعدی از تصاویر ویدئویی به‌دست‌آمده با یک پهپاد را با استفاده از یک نرم‌افزار فتوگرامتری مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از یک پهپاد سبک‌وزن با یک دوربین فیلم‌برداری مینیاتوری که به پرواز و نشست آن به‌صورت عمودی است، استفاده کردند. ابتدا عملکرد سیستم با گرفتن عکس‌های هوایی از شهر مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس کاربرد واقعی در معدن Wollastonite در انتاریو، کانادا ارزیابی شد. در این کار، غلظت کلی ابر نقطه پایین نشان داده شده است زیرا روش پردازش مورد استفاده در وضوح پیکسل نسبتاً پایین (۶۴۰ × ۴۸۰) اعمال می‌شود. علاوه بر این، نشان داده شد که نقطه روی سطح مسطح به‌خوبی نشان داده شده می‌تواند دقت را برای محدوده تقریباً ۰٫۵ متر در فاصله ۲۵ تا ۳۰ متر تعیین کند. اگرچه ابر نقطه‌ای توسعه‌یافته توسط این فناوری پراکنده بود، آن‌ها پیش‌بینی کردند که نتیجه کلی می‌تواند با افزایش وضوح تصویر اصلی و پردازش تصویر بهبود یابد.

ورولبولو و همکاران [۴۴] رانش زمین در مناطق صعب‌العبور را با استفاده از سیستم‌های پهپاد و فتوگرامتری زمینی دیجیتال ثبت کرد. در این تحقیق معدن Nástup Tušimice در جمهوری چک به‌عنوان منطقه مورد مطالعه تعیین شد و عکس‌های هوایی به‌طور خودکار با استفاده از یک پهپاد برداشت شد. سپس، آن‌ها یک عکس ارتوفتو ساختند و یک مدل سه‌بعدی از منطقه لغزش تهیه کردند. علاوه بر این، آن‌ها از فتوگرامتری زمینی دیجیتال برای مستندسازی دقیق‌تر منطقه مورد نظر استفاده کردند.

بلیستن و همکاران [۴۵] همچنین قابلیت استفاده از پهپادها را برای بصری سازی سه‌بعدی رخنمون‌های سنگی، از جمله در بخش‌های غیرقابل دسترس معادن نشان دادند. آن‌ها ذخیره پرلینت اسلواکی Lehôtka pod Brehmi را به‌عنوان منطقه تحقیقاتی تعیین کردند و از پهپادها برای تصویربرداری از رخنمون‌هایی با ارتفاع تقریبی ۷۵ متر استفاده نموده و مستندات فتوگرامتری را تهیه کردند. این پرواز در ارتفاع ۳۵ متری از بلندی متوسط منطقه تنظیم شد و در مجموع ۵۸ تصویر برداشت شد. هجده نقطه به‌عنوان نقطه کنترل روی زمین با مختصات به‌دست‌آمده استفاده شد. نرم‌افزار تجاری "AGISOFT PhotoScan" برای پردازش تصویر استفاده شد و یک مدل دیجیتالی از رخنمون هدف ایجاد شد. مقایسه همبستگی بین مدل به‌دست‌آمده با

شاخص قابلیت اطمینان توده سنگ تحت سطوح مختلف تخریب، سطوح ریسک مختلف دسته‌بندی شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که روش پیشنهادی می‌تواند با دقت بالا ریسک فروریزش سطحی را برآورد کند. همچنین، مشخص شد که این روش در معدن مولیبدن چائوپانگ شینهوا با موفقیت به کار گرفته شده است. مزایای این روش شامل دقت بالا، کاربرد آسان و قابل استفاده بودن برای انواع مختلف معادن است. باین حال این روش برای انجام آنالیزهای تخصصی و روش‌های عددی به داده‌های کافی نیاز دارد. در این تحقیق برای جمع‌آوری اطلاعات و مدل‌سازی‌های سه‌بعدی اولیه از تکنولوژی پهپاد استفاده شد.

در جدول ۲ دسته‌بندی مطالعات قبلی بررسی شده در مورد کاربردهای پهپاد برای تجزیه و تحلیل دیواره‌های شیب‌دار سنگی آورده شده است.

۳-۳- استفاده از فتوگرامتری هوابرد در نقشه‌برداری معادن زیرزمینی

تعداد کمی از پهپادها و ابزارهای برداشت وجود دارند که مختص محیط‌های زیرزمینی باشند. این‌گونه محیط‌ها معمولاً دارای شرایط دید محدود، دهانه‌های کوچک، تداخل مغناطیسی و عدم پوشش GPS^۳ هستند [۵۲]. باین حال، اگر سیستم‌های پهپاد مجهز به دوربین‌های با وضوح بالا، چراغ‌های LED و حسگرهای حرارتی باشند، اطلاعات مفیدی مانند تصویر (حرارتی و طیفی)، فاصله و پایش سیستم ناوربی را می‌توان در مناطقی به دست آورد که دسترسی کارگران معدن به این مناطق دشوار است.

کانلاکیس و همکاران [۵۳] از پهپادها برای فعال کردن بازرسی معادن مبتنی بر تکنیک‌های بصری استفاده کردند. بدین ترتیب، آن‌ها یک ارزیابی از فناوری فعلی سیستم‌های بومی‌سازی بصری برای استخراج زیرزمینی ارائه کردند. به‌علاوه این پژوهشگران تأیید کردند که فناوری بومی‌سازی مبتنی بر پهپاد می‌تواند در محیط‌های سخت و چالش‌برانگیز به کار رود درحالی‌که از روش‌ها و فناوری‌های قابل اعتماد و کم‌هزینه‌تر استفاده می‌کند.

بررسی شیب‌های سنگی نشان داد. باین حال، روش‌های سنتی و میدانی کماکان برای جمع‌آوری داده‌های مربوط به ناپیوستگی‌ها و سنگ بکر حائز اهمیت هستند.

هاو و همکاران [۴۹] با استفاده از تصاویر پهپاد DJI Matrice 300 RTK برای بررسی پایداری دیواره‌های یک معدن در چین اقدام نمودند و طی این مطالعه با تغییرات چگالی ابرنقاط حاصل‌شده از مدل‌سازی بیان داشتند که می‌توان فرایند تحلیل پایداری با استفاده از این تصاویر را با تغییر در الگوریتم‌های مدل‌سازی بهبود بخشید.

کالیو و همکاران [۵۰] باهدف جمع‌آوری داده‌های کمی و کیفی درباره جهت‌گیری فضایی درزه‌های یک دیواره بلند و تشخیص بلوک‌هایی با احتمال وجود ناپایداری اقدام به مدل‌سازی سه‌بعدی به‌وسیله‌ی فتوگرامتری هوایی نمودند و در طی این عملیات پروازی جهت بهبود دقت مدل‌سازی و استخراج خواص درزه‌ها از نقاط کنترل زمینی استفاده شد. همچنین این مطالعه توانسته است که تلفیق صحیحی از مدل‌سازی فتوگرامتری و تصاویر حرارتی را جهت توصیف و شناسایی نقاط با پتانسیل ریزش ارائه کند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بهره‌گیری از رویکردهای متدولوژیک در توصیف دیواره و شناسایی مناطق ناپایدار با موفقیت انجام شده است. ترکیب تصویربرداری حرارتی با فتوگرامتری، امکان مکان‌یابی سریع و قابل اعتماد بلوک‌های شناسایی‌شده را فراهم می‌کند؛ و درک از ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی دیواره را افزایش داده است. داده‌های به‌دست‌آمده از این تحقیق توسط بررسی‌های میدانی تأیید یافته‌اند که تصدیق می‌کنند دقت و انطباق روش برای استفاده عملی و مدیریت ریسک در محیط‌های مشابه مناسب است.

تحقیقی توسط جین و همکاران [۵۱] انجام شد که به بررسی ریسک فروریزش سطحی ناشی از معدنکاری زیرزمینی با استفاده از روش پاسخ پرداخت. این روش ارائه شد تا با استفاده از شاخص قابلیت اطمینان، به برآورد دقیق ریسک فروریزش سطحی کمک کند. در این تحقیق، ابتدا حساسیت پارامترهای مکانیکی توده سنگ آنالیز شد و سپس تابع سطح پاسخ برازش شد. درنهایت، با محاسبه

جدول ۲: خلاصه‌ای از کاربردهای پهپاد برای تجزیه و تحلیل دیواره‌های شیب‌دار

منبع	سال	هدف مطالعه	نوع پهپاد	نوع اکتساب داده	مقیاس منطقه‌ای هدف	سبک کنترل پرواز
مک لئود [۴۲]	۲۰۱۲	ارائه امکان ایجاد یک ابر نقطه سه‌بعدی از تصاویر ویدئویی به دست آمده با پهپاد	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	بیان نشده
مک لئود و همکاران [۴۳]	۲۰۱۳	ارائه امکان ایجاد یک ابر نقطه سه‌بعدی از تصاویر ویدئویی به دست آمده با پهپاد	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	بیان نشده
ورولوا و همکاران [۴۴]	۲۰۱۵	کاربرد فتوگرامتری دیجیتال زمینی مبتنی بر پهپاد در زمین لغزش‌ها	بال ثابت	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	پرواز خودکنترل
بلیستن و همکاران [۴۵]	۲۰۱۶	پیشنهاد سودمندی پهپاد در بررسی رخنمون‌های سنگ‌های زمین‌شناسی	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	پرواز خودکنترل
برتا و همکاران [۴۶]	۲۰۱۹	طبقه‌بندی سنگ در شیب با استفاده از فتوگرامتری هوایی و یادگیری ماشین	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	بیان نشده
کاتوروزا و برج [۴۷]	۲۰۱۹	نقشه‌برداری جبهه کار معادن با استفاده از فناوری پهپاد	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	بیان نشده
استد و همکاران [۴۸]	۲۰۱۹	بررسی کاربرد روش‌های میدانی و سنجش‌از دور برای اخذ ویژگی‌های شیب‌های سنگی	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	بیان نشده
هاو و همکاران [۴۹]	۲۰۲۳	بررسی پایداری یک دیواره سنگی	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	پرواز خودکنترل
کالبو و همکاران [۵۰]	۲۰۲۳	جمع‌آوری داده‌های کمی و کیفی درباره جهت‌گیری فضایی درزه‌های یک دیواره بلند و تشخیص بلوک‌هایی با احتمال وجود ناپایداری	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	بیان نشده
چین و همکاران [۵۱]	۲۰۲۳	بررسی ریسک فروریزش سطحی ناشی از معدنکاری زیرزمینی با استفاده از روش سطح پاسخ پرداخت.	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	بیان نشده

استفاده از GPS و با سرعت‌های پایین و متغیر پرواز کنند تا از برخورد با دیواره‌های سنگی و سیستم نگهداری جلوگیری کنند. آزمایش در یک ایستگاه فرعی با عرض ۶ متر، شیب ۴۵ درجه و با ۲۰ متر فاصله بین سطوح فرعی انجام شد. نور LED متصل به پهپاد برای آشکار کردن جزئیات دیواره‌های سنگی، ساختارهای توده سنگی، شواهد انفجار و سیستم نگهداری کافی بود. علاوه بر این، هیچ سیگنالی به‌عنوان سیگنال مزاحم در طول پرواز حتی زمانی که بالون از دیدمستقیم ناپدید شد، رخ نداد.

راج [۵۵] یک سیستم نظارتی با استفاده از هواپیماهای بدون سرنشین برای بهبود ایمنی تجهیزات نظارت، ارائه نتایج نظارت سریع و آنی و به حداقل رساندن حضور انسان در شرایط ناامن زیرزمینی پیشنهاد کرد. علاوه بر این، این مطالعه نشان داد که امکان بررسی و نظارت با استفاده از پهپادها در معادن زیرزمینی که امکان استفاده از GPS نیست

برای دستیابی به این هدف، آزمایشی بر روی یک سیستم محلی در معدن سنگ آهنی در سوئد، یکی از بزرگ‌ترین معادن در اروپا، انجام شد. نتایج تجربی نشان داد که دوربین‌های استریو را می‌توان برای پهپادهای خودران استفاده کرد. با این حال، وجود خطا در نتایج مشاهده شد. در همین حال نشان داده شده است که رویکرد وجود دوربین می‌تواند با موفقیت تحت محدودیت‌های خاصی استفاده شود. فریر و کوتا [۵۴] یک پهپاد خاص طراحی کردند تا تصاویر مناطقی از معادن زیرزمینی را که به دلیل استخراج و انفجار غیرقابل دسترس هستند ثبت کند. این پهپاد دارای یک بالون پر از گاز هلیوم، یک ملخ پهپاد با نورپردازی قدرتمند LED^۴ با کنترل از راه دور، باتری قابل شارژ، یک دوربین کنترل از راه دور، ثبت‌کننده تصویر و فرستنده فرکانس رادیویی برای کنترل تصویر است. علاوه بر این، با توجه به ویژگی معدن زیرزمینی، تجهیزات می‌توانند بدون

کرد. آن‌ها همچنین مطالعه‌ای در مورد شناسایی داده‌های زمین‌شناسی در مدل فتوگرامتری انجام دادند. این مطالعه نشان داد که می‌توان از فناوری‌ها و تکنیک‌های هوابرد برای به دست آوردن داده‌های با کیفیت بالا برای تجزیه و تحلیل ژئوتکنیکی استفاده کرد. سیستم پهپاد شامل حسگر تشخیص موانع، سیستم نورپردازی، تصاویر حرارتی و نرم‌افزار است. در نتیجه، می‌توان از یک دوربین حرارتی برای بررسی تضادهای دمایی و ارزیابی پایداری دهانه سازه‌های زیرزمینی استفاده کرد. استفاده از پهپاد در معدن گلدن لایت در ایالت مونتانا کشور آمریکا آزمایش شد. این مطالعه نشان داد که تصویر حرارتی فاقد پالایش و چگالی نقطه‌ای مدل است. باین‌حال، تشخیص زمین سست و ساختارهای دقیق راحت‌تر بوده است. این مطالعه نشان داد که ترکیب خوبی از فن‌آوری‌های هوایی با پهپادها می‌تواند به طور مؤثر فتوگرامتری را انجام دهد و داده‌های زمین‌شناسی را در محیط‌های معدنکاری زیرزمینی شناسایی کند.

که شدت نور کم بوده و فضاهای کاری و قابل دسترس محدود است، وجود دارد. از نتایج قابل اشاره در تحقیق می‌توان به: (۱) توسعه فناوری ضبط و کنترل تصویر برای کاربرد در فضاهای باریک و محیط‌های زیرزمینی، (۲) توسعه راه‌حلی به منظور استفاده از پهپادها حتی در محیط‌های تاریک، با به کارگیری نورهای طراحی شده ویژه متصل به هواپیماهای بدون سرنشین، (۳) ضبط تصویر با کیفیت و کمیت قابل توجه برای ایجاد ابر نقطه‌ای سه بعدی و (۴) شواهدی از ویژگی‌های توده سنگ و حرکت توده سنگ با پردازش داده‌های ابر نقطه‌ای تولید شده؛ اشاره کرد. این مطالعه نشان داد که ابرهای نقطه‌ای ایجاد شده با استفاده از پهپاد بسیار شبیه به ابر نقاط ایجاد شده با استفاده از اسکنر تشخیص نور و محدوده (LiDAR^۵) هستند. با وجود وضوح نقطه نسبتاً پایین‌تر، اطلاعات ژئوتکنیکی مهمی از جمله جهت‌داری شکستگی‌ها و تشخیص تغییرات آن‌ها تحت اثر عوامل مختلف به دست آمد.

ترنر و همکاران [۵۶] با استفاده از یک پهپاد در یک معدن زیرزمینی، یک مدل سه بعدی با تصاویر حرارتی ایجاد

جدول ۳: خلاصه‌ای از کاربردهای پهپاد برای نقشه برداری در معادن زیرزمینی

منبع	سال	هدف مطالعه	نوع پهپاد	نوع اکتساب داده	مقیاس منطقه‌ای هدف	سبک کنترل پرواز
کانلاکیس و همکاران [۵۰]	۲۰۱۶	ارزیابی فناوری برای سیستم‌های بومی سازی بصری برای استخراج زیرزمینی	بال چرخشی	داده‌های فاصله	مقیاس معدن	پرواز خودکنترل
فریر و کوتا [۵۱]	۲۰۱۷	طراحی پهپاد برای تصویربرداری در مناطق غیر قابل دسترسی در معادن زیرزمینی	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	بیان نشده
میچل و مارشال [۵۴]	۲۰۱۷	ساخت نمونه اولیه پهپاد برای اسکن معدن زیرزمینی	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	پرواز خودکنترل
ازهارای و همکاران [۵]	۲۰۱۷	تولید مدل‌های سه بعدی محیط‌های عملیاتی به وسیله پهپاد زیرزمینی	بال چرخشی	داده عکس	مقیاس معدن	بیان نشده
ترنر و همکاران [۵۳]	۲۰۱۸	ایجاد مدل سه بعدی معدن زیرزمینی با استفاده از تصویر پهپادی	بال چرخشی	تصویر حرارتی	مقیاس منطقه‌ای	بیان نشده
راج [۵۲]	۲۰۱۹	پیشنهاد سیستم پایش مبتنی بر پهپاد قابل استفاده در معادن زیرزمینی	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	پرواز نیمه خودکنترل
ترنر و همکاران [۴۹]	۲۰۲۰	پیشنهاد روشی برای تشخیص و تعیین کمیت ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی با استفاده از تصاویر حرارتی و چند طیفی	بال چرخشی	تصویر حرارتی و تصویر چند طیفی	مقیاس منطقه‌ای	پرواز نیمه خودکنترل

هوایم‌های بدون سرنشین در معادن زیرزمینی پیشنهاد شده است، اما معمولاً از تکنیک‌های دستی برای کنترل و ناوبری استفاده می‌شود. پهپاد طراحی شده حداقل باید قابلیت ناوبری کاملاً مستقل در محیط فاقد GPS را دارا باشد و در محیطی پرواز کند که نوری به‌جز نوری که پهپاد ارائه می‌دهد، نباشد.

ماهیت محیط‌های معدن زیرزمینی و سایر محدودیت‌ها (به‌عنوان مثال، دیوارهای اطراف، کابل‌ها و تجهیزات) مستلزم آن است که پهپاد در برابر برخورد با موانع احتمالی مقاوم باشد. در حالت ایدئال، پهپاد باید بتواند موانع را در طول پرواز خود در محیط داخلی شناسایی کرده و از آن‌ها اجتناب کند. پهپاد همچنین باید بتواند محیط‌های خشن معادن زیرزمینی را تحمل کند و در گردوغبار و دود سنگین نیز پرواز کند؛ بنابراین، پهپاد باید ضد آب، ضد گردوغبار و ضد ضربه باشد و در برابر تغییرات فشار، دما و رطوبت در سراسر محیط معدن مقاوم باشد. برای کاربردهای معدن زغال‌سنگ زیرزمینی، به دلیل وجود متان و خطرات احتمالی انفجار و یا آتش‌سوزی، باتری و حسگرهای الکترونیکی باید عایق‌بندی شوند. علاوه بر الزامات ذکر شده، پهپاد باید ویژگی‌های دیگری از جمله مصرف انرژی کم و تشخیص بدن انسان را دارا باشد [۶۱].

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این گردآوری، مقالات تحقیقاتی و پایان‌نامه‌های کارشناسی ارشد و دکترا که طیف وسیعی از کاربردهای پهپادها در حوزه معدن را در بر می‌گرفتند، بررسی شدند. در این بررسی، مطالعات در سه دسته به شرح زیر طبقه‌بندی شده است:

- (۱) نقشه‌برداری توپوگرافی در معادن روباز در مرحله بهره‌برداری
- (۲) تجزیه و تحلیل شیب سنگ در مرحله بهره‌برداری
- (۳) نقشه‌برداری در معادن زیرزمینی در مرحله بهره‌برداری

شکل ۱ توزیع درصد هر کاربرد پهپاد در معدن و مطالعات طبقه‌بندی شده تحت آن کاربرد را نشان می‌دهد. کاربردهای پهپاد در مرحله بهره‌برداری ۵۴ درصد از کل مطالعات بررسی شده را تشکیل می‌دهند. نقشه‌برداری توپوگرافی در معادن روباز کاربرد رایج در مرحله بهره‌برداری بود که ۲۳ درصد از کل مطالعات را شامل می‌شود و همچنین

آن‌ها [۵۶] همچنین با استفاده از تصاویر حرارتی و چندطیفی به‌دست‌آمده با استفاده از پهپاد، تشخیص و تعیین کمیت ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی در توده‌های سنگ سخت را بررسی کردند. طیف‌های حرارتی چندگانه، تصاویر حاوی داده‌های رنگ ابرنقاط و مجموعه داده‌های LiDAR در همان منطقه مورد مطالعه به دست آمد. از داده‌ها برای تولید ابر نقاط و مش‌های سه‌بعدی، ارجاع جغرافیایی و ترسیم ناپیوستگی‌های محل معدن استفاده شد. علاوه بر این مطالعات، میچل و مارشال [۵۷] کاربردهای بالقوه پهپادها را در معادن زیرزمینی ارائه کردند. همچنین یک نمونه اولیه از پهپادها را با قابلیت چرخش خودکار برای اسکن معدن زیرزمینی توسعه دادند.

ازهارای و همکاران [۵۸] ساخت مجموعه حسگر پهپاد را تجزیه و تحلیل کردند که می‌تواند مدل‌های سه‌بعدی را در زمان کمتری ایجاد کند و آگاهی زمینه‌ای بالایی را برای اپراتورها فراهم کند. جدول ۳ خلاصه‌ای از مطالعات پیشین در مورد کاربردهای پهپادها در نقشه‌برداری در معادن زیرزمینی را نشان می‌دهد.

۴- چالش‌های موجود در استفاده از پهپادها در معادن و چشم‌اندازهای آینده

در معادن روباز، شرایط آب و هوایی با ایجاد انحراف در مسیرهای از پیش تعیین‌شده‌ی پهپاد در مقایسه با معادن زیرزمینی، چالش‌هایی را ایجاد می‌کند. در برخی موارد، شرایط آب و هوایی می‌تواند منجر به آسیب رساندن به پهپادها در حال پرواز و مختل کردن مأموریت‌های آن‌ها شود [۵۹، ۶۰].

در صنعت معدن و همچنین سایر صنایع، مصرف انرژی در طول یک مأموریت پروازی می‌تواند چالش‌های زیادی را تحمیل کند. به‌طور معمول، پهپادها با باتری کار می‌کنند و انرژی را برای شناور شدن، پرواز، اتصال بی‌سیم، داده‌ها و پردازش تصویر مصرف می‌کنند. با توجه به محدودیت‌های انرژی، باید تصمیم‌گیری شود که آیا تجزیه و تحلیل داده‌ها و تصویر باید در لحظه یا غیر برخط و پس از اتمام پرواز برای کاهش مصرف انرژی انجام شود [۵۹، ۶۱، ۶۲]. در معادن زیرزمینی، فضای محدود، گرما و رطوبت، هوای غبارآلود و شرایط نوری نامناسب عمده‌ترین مسائلی است که کارگران معدن با آن مواجه هستند. برخی از مفاهیم برای استفاده از

- با توجه به مقیاس‌های منطقه موردنظر برای کاربردهای پهپاد، مطالعات معدن و مقیاس منطقه‌ای در مرحله بهره‌برداری شایع‌تر بود و یک سبک مستقل از کنترل پرواز معمولاً برای کاربردهای پهپاد در تمام مراحل فرآیند استخراج مورد استفاده قرار گرفته است.

- با توجه به مطالعات انجام‌شده از پهپادها در حوزه معدن، مشاهده شده است که پهپادها دارای مزایای قابل‌استفاده و مدیریت با هزینه کم، توانایی کار در مناطق صعب‌العبور برای افراد و تسریع به دست آوردن داده‌های موردنیاز می‌باشند.

- بررسی و مطالعات مبتنی بر پهپاد می‌تواند داده‌هایی با وضوح و چگالی نقاط بالا به دست آورد زیرا پهپادها می‌توانند در ارتفاعات پایین پرواز کنند. علاوه بر این، کنترل و مانور آسان پهپادها تنها با حداقل آموزش یک مزیت است؛ بنابراین، این ابزارها به‌طور فعال برای وظایف توسعه معدن مانند نقشه‌برداری هوایی، اکتشاف ژئوفیزیک هوابرد و نظارت بر محیط‌زیست مورد استفاده قرار می‌گیرند.

- پهپادها همچنین دارای معایبی هستند، مانند ظرفیت بار کم، زمان کوتاه پرواز و وابستگی به شرایط آب و هوایی. همچنین به دلیل ظرفیت حمل بار پایین پهپادها، محدودیتی برای تعداد سنسورهایی که می‌توان روی پهپادها نصب کرد وجود دارد.

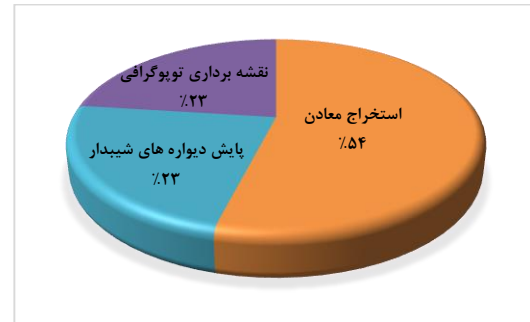
- تغییرات ناگهانی آب‌وهوا در فضای کاری می‌تواند هزینه‌های بیشتری هم از نظر مالی و هم از نظر زمانی به مطالعات تحمیل کند.

با توجه به اینکه امروزه تکنیک فتوگرامتری برای سه‌بعدی سازی و بصری سازی پروژه‌های مهندسی رو به افزایش است لذا در دست داشتن سخت‌افزار و نرم‌افزار مناسب و توسعه روش‌هایی با سرعت پردازش بالا می‌تواند به آینده حضور این پرنده‌های بدو سرنشین در معدن به‌طور فزاینده‌ای کمک کند.

۶- جدول واژگان و اصطلاحات

اصطلاحات پرکاربرد استفاده شده در جدول ۴ آورده شده است.

۲۳ درصد از مطالعات به بررسی و پایش دیواره‌های شیب‌دار اختصاص داده شده است. این نمودار حوزه‌های مختلف مرور منابع را توسط نویسندگان نشان می‌دهد و از بین مطالعاتی که برای این تحقیق انتخاب شده‌اند دسته‌بندی گردیده است. لذا تفسیر این نمودار صرفاً بر اساس مطالعات تشکیل‌دهنده آن بوده و به تنوع مقالات بررسی‌شده مرتبط است.



شکل ۱: توزیع درصد مطالعات بررسی‌شده کاربردهای پهپاد در معدن

این بررسی تجزیه‌وتحلیلی از مطالعات انجام‌شده در ۱۰ سال گذشته توسط محققین برای استفاده از فناوری پهپاد در فرآیند معدنکاری که تمرکز بیشتر آن‌ها بر مدل‌سازی‌ها و استخراج داده‌های مفید جهت مدل‌سازی است، ارائه می‌کند.

- این بررسی‌ها نشان داد که کاربردهای فعلی پهپادها در معدن را می‌توان به (۱) تجزیه‌وتحلیل زمین‌شناسی و ساختاری از طریق روش سنجش‌ازدور، (۲) نقشه‌برداری توپوگرافی در معادن روباز، (۳) تجزیه‌وتحلیل شیب‌های سنگی، (۴) اتخاذ تصمیمات مدیریتی بر پایه اطلاعات نظارتی مبتنی بر پهپادها، (۵) بررسی در معدن زیرزمینی در مرحله بهره‌برداری و (۶) مدل‌سازی سه‌بعدی با دقت بالا طبقه‌بندی کرد.

- در بین مطالعات گزارش‌شده تاکنون، نقشه‌برداری توپوگرافی در معادن روباز بیشترین کاربرد را داشته است.

- متداول‌ترین نوع پهپادها و داده‌هایی که توسط حسگرها مانند حسگرهای نویزگیر نوری و حسگرهای مانع‌گریز برای کاربردهای پهپاد در معدن به دست می‌آیند، به ترتیب بال چرخشی و تصاویر یا ویدئوهای ضبط‌شده توسط دوربین‌های دیجیتال بودند و پهپادهای بال ثابت برای نقشه‌برداری‌های وسیع بعد از پهپادهای بال چرخشی بیشترین کاربرد را داشته‌اند.

جدول ۴: خلاصه ای از اصطلاحات پرکاربرد استفاده شده

اصطلاح / اختصار	اختصار / ترجمه انگلیسی	ترجمه فارسی	توضیحات
فتوگرامتری هوایی	Aerial Photogrammetry	-	روشی جهت ساخت مدل‌های سه‌بعدی با استفاده از عکس.
پهپاد	Drone	-	پرنده بدون سرنشین که جهت اخذ تصاویر هوایی استفاده می‌شود
پهپاد بال ثابت	Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicle (FWUAV)	-	نوعی پهپاد که طراحی بال‌های آن برگرفته از بال هواپیما است
پهپاد بال چرخشی	Rotary-Wing Unmanned Aerial Vehicle (RUAV)	-	نوعی پهپاد که طراحی بال‌های آن برگرفته از بال هلیکوپتر است
ابر نقاط سه‌بعدی	Three-Dimensional Point Cloud	-	مجموعه نقاطی که علاوه بر داده‌های مختصاتی داده‌های رنگی را نیز در خود ذخیره می‌کند.
گردش کار	workflow	-	روند و نحوه توسعه انجام کار را نشان می‌دهد.
کالیبراسیون	Calibration	-	به عملیات حذف یکسری خطای مرتبط با تجهیزات گفته می‌شود.
روندنما	flowchart	-	روند انجام مرحله به مرحله یک عملیات را با استفاده از روندنما می‌توان ترسیم نمود.
مدل رقومی	Digital elevation Model	-	نمایشی از سطح توپوگرافی زمین را با این نوع مدل می‌توان به دست آورد
مأموریت پروازی	Flight Mission	-	مسیر و نحوه عکس‌برداری که به صورت از پیش تعیین شده یا دستی می‌توان آن را به برنامه پروازی پهپاد وارد کرد.
LiDAR	Light Detection and Ranging	اسکنر تشخیص نور و محدوده	اسکنر شناسایی و تعیین مسافت با استفاده از نور
SfM	Structure from Motion	ساختار ناشی از حرکت	یک روش تبدیل تصاویر دوبعدی به مدل یکپارچه سه‌بعدی.
RGB	Red, Green, Blue	قرمز، سبز آبی	داده‌های رنگی که در ابرنقاط ذخیره می‌شوند را گویند.
GSD	Ground sample distance	فاصله نمونه‌برداری زمینی	اندازه هر پیکسل روی تصویر است که نشان می‌دهد چه ابعادی روی زمین، برای مشخص شدن ارتفاع پرواز در نقشه‌برداری با پهپاد مورد استفاده قرار می‌گیرد.
GCP	Ground Control point	نقاط کنترل زمینی	نقاطی که با وارد کردن مختصات آن‌ها به مدل نهایی می‌توان مدل را از نظر مختصات تدقیق نمود.

Canada Rock Mechanics Symposium, 2009: OnePetro.

[4] J. Coggan, A. Wetherelt, X. Gwynn, and Z. Flynn, "Comparison of hand-mapping with remote data capture systems for effective rock mass characterisation," in *11th ISRM Congress*, 2007: OnePetro.

[5] F. Azhari, S. Kiely, C. Sennersten, C. Lindley, M. Matuszak, and S. Hogwood, "A comparison of sensors for underground void mapping by unmanned aerial vehicles," in *UMT 2017: Proceedings of the First International Conference on*

مراجع

[1] L. G. De Vallejo and M. Ferrer, *Geological engineering*. CRC press, 2011.

[2] M. Lato and M. Vöge, "Automated discontinuity orientation mapping from lidar data," in *ISRM International Symposium-EUROCK 2012*, 2012: OnePetro.

[3] M. Levy and P. Visca, "Statistical characterization of rock structure using LiDAR," in *43rd US Rock Mechanics Symposium & 4th US-*

- Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 33, no. 3, pp. 443-454, 2015.
- [18] J. C. Rosser Jr, V. Vignesh, B. A. Terwilliger, and B. C. Parker, "Surgical and medical applications of drones: A comprehensive review," *JSLs: Journal of the Society of Laparoendoscopic Surgeons*, vol. 22, no. 3, 2018.
- [19] S. Manfreda *et al.*, "On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring," *Remote Sensing*, vol. 10, no. 4, p. 641, 2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/4/641>.
- [20] W. A. Hustrulid, M. Kuchta, and R. K. Martin, *Open pit mine planning and design, two volume set & CD-ROM pack*. CRC Press, 2013.
- [21] Y. Choi, J. Baek, and S. Park, "Review of GIS-Based Applications for Mining: Planning, Operation, and Environmental Management," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 7, p. 2266, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/7/2266>.
- [22] J. J. Cress, M. Hutt, J. Sloan, M. Bauer, M. Feller, and S. Goplen, *US geological survey unmanned aircraft systems (uas) roadmap 2014*. US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, VA, USA, 2015.
- [23] S. Lee and Y. Choi, "Reviews of unmanned aerial vehicle (drone) technology trends and its applications in the mining industry," *Geosystem Engineering*, vol. 19, no. 4, pp. 197-204, 2016.
- [24] M. Paisiriyuenyong and M. C. Smith, "Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Technology in Thailand, and Applying Marketing in the Mining Industry," Thammasat University Bangkok, Thailand, 2016.
- [25] H. Ren, Y. Zhao, W. Xiao, and Z. Hu, "A review of UAV monitoring in mining areas: Current status and future perspectives," *International Journal of Coal Science & Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 320-333, 2019.
- [26] A. Buczyńska, "Remote sensing and GIS technologies in land reclamation and landscape planning processes on post-mining areas in the Polish and world literature," in *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2209, no. 1: AIP Publishing LLC, p. 040002.
- [27] G. M. Dering, S. Micklethwaite, S. T. Thiele, S. A. Vollgger, and A. R. Cruden, "Review of drones, photogrammetry and emerging sensor technology for the study of dykes: Best practises and future potential," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 373, pp. 148-166, 2019.
- [28] Q. Wang *et al.*, "Accuracy evaluation of 3d geometry from low-attitude uav collections a case at *Underground Mining Technology*, 2017: Australian Centre for Geomechanics, pp. 419-430.
- [6] J. Kottenstette, "Measurement of geologic features using close range terrestrial photogrammetry," in *Alaska Rocks 2005, The 40th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, 2005: OnePetro.
- [7] T. Dang, "The use of photogrammetry in measuring geologic structures and creating a 3D model on exposed rock faces," in *ISRM VietRock International Workshop, 2015*: OnePetro.
- [8] Q. Liu, "Remote sensing technologies in rock mass characterization," in *ISRM SINOROCK 2013*, 2013: OnePetro.
- [9] F. Remondino, L. Barazzetti, F. Nex, M. Scaioni, and D. Sarazzi, "UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling—current status and future perspectives," *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, vol. 38, no. 1, p. C22, 2011.
- [10] J. Birch, "Using 3DM analyst mine mapping suite for slope stability-case studies," *Proceedings of ACG geotechnical engineering for open pit mines, section*, vol. 17, pp. 1-15, 2009.
- [11] W. Greenwood, D. Zekkos, J. Lynch, J. Bateman, M. Clark, and D. Chamlagain, "UAV-Based 3-D characterization of rock masses and rock slides in Nepal," in *50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, 2016: OnePetro.
- [12] A. Tamburini, D. Martelli, W. Alberto, and F. Villa, "Geomechanical rock mass characterization with Terrestrial Laser Scanning and UAV," in *49th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, 2015: OnePetro.
- [13] I. Colomina and P. Molina, "Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review," *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, vol. 92, pp. 79-97, 2014.
- [14] S. D. Priest, *Discontinuity analysis for rock engineering*. Springer Science & Business Media, 1993.
- [15] G. P. Giani, *Rock slope stability analysis*. CRC Press, 1992.
- [16] C. Cryderman, S. B. Mah, and A. Shufletoski, "Evaluation of UAV photogrammetric accuracy for mapping and earthworks computations," *Geomatica*, vol. 68, no. 4, pp. 309-317, 2014.
- [17] D. H. Kim, I. Gratchev, and A. Balasubramaniam, "A photogrammetric approach for stability analysis of weathered rock slopes,"

- [39] B. Kršák *et al.*, "Use of low-cost UAV photogrammetry to analyze the accuracy of a digital elevation model in a case study," *Measurement*, vol. 91, pp. 276-287, 2016.
- [40] L. Ge, X. Li, and A. H.-M. Ng, "UAV for mining applications: A case study at an open-cut mine and a longwall mine in New South Wales, Australia," in *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2016: IEEE, pp. 5422-5425.
- [41] G. Esposito, G. Mastrococco, R. Salvini, M. Oliveti, and P. Starita, "Application of UAV photogrammetry for the multi-temporal estimation of surface extent and volumetric excavation in the Sa Pigada Bianca open-pit mine, Sardinia, Italy," *Environmental Earth Sciences*, vol. 76, no. 3, pp. 1-16, 2017.
- [42] T. K. McLeod "3D imaging applications in Earth Sciences using video data acquired from an unmanned aerial vehicle," Carleton University, 2013 .
- [43] T. McLeod *et al.*, "Using video acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) to measure fracture orientation in an open-pit mine," *Geomatica*, vol. 67, no. 3, pp. 173-180, 2013.
- [44] D. Vrublová, R. Kapica, E. Jiráňková, and A. Strus, "Documentation of landslides and inaccessible parts of a mine using an unmanned UAV system and methods of digital terrestrial photogrammetry," *GeoScience Engineering*, vol. 61, no. 3, p. 8, 2015.
- [45] P. Blistan, E. Kovanič, V. Zelizňáková, and J. Palková, "Using UAV photogrammetry to document rock outcrops," *Acta Montanistica Slovaca*, vol. 21, no. 2, 2016.
- [46] F. Beretta, Á. L. Rodrigues, R. d. L. Peroni, and J. F. C. L. Costa, "Using UAV for automatic lithological classification of open pit mining front," *REM-International Engineering Journal*, vol. 72, pp. 17-23, 2019.
- [47] M. Katuruza and C. Birch, "The use of unmanned aircraft system technology for highwall mapping at Isibonelo Colliery, South Africa," *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 119, no. 3, pp. 291-295, 2019.
- [48] D. Stead, D. Donati, A. Wolter, and M. Sturzenegger, "Application of remote sensing to the investigation of rock slopes: Experience gained and lessons learned," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 8, no. 7, p. 296, 2019.
- [49] J. Hao, X. Zhang, C. Wang, H. Wang, and H. Wang, "Application of UAV Digital Photogrammetry in Geological Investigation and Stability Evaluation of High-Steep Mine Rock Slope," *Drones*, vol. 7, no. 3, p. 198, 2023.
- zijin mine," *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 40, no. 4, p. 297, 2014.
- [29] S.-J. Cho, E.-S. Bang, and I.-M. Kang, "Construction of precise digital terrain model for nonmetal open-pit mine by using unmanned aerial photograph," *Economic and Environmental Geology*, vol. 48, no. 3, pp. 205-212, 2015.
- [30] S. Lee and Y. Choi, "Topographic survey at small-scale open-pit mines using a popular rotary-wing unmanned aerial vehicle (drone)," *Tunnel and underground space*, vol. 25, no. 5, pp. 462-469, 2015.
- [31] S. Lee and Y. Choi, "On-site demonstration of topographic surveying techniques at open-pit mines using a fixed-wing unmanned aerial vehicle (drone)," *Tunnel and Underground Space*, vol. 25, no. 6, pp. 527-533, 2015.
- [32] S. Lee and Y. Choi, "Comparison of topographic surveying results using a fixed-wing and a popular rotary-wing unmanned aerial vehicle (drone)," *Tunnel and Underground Space*, vol. 26, no. 1, pp. 24-31, 2016.
- [33] P. Rossi, F. Mancini, M. Dubbini, F. Mazzone, and A. Capra "Combining nadir and oblique UAV imagery to reconstruct quarry topography: Methodology and feasibility analysis," *European Journal of Remote Sensing*, vol. 50, no. 1, pp. 211-221, 2017.
- [34] P. G. Chirico and J. D. DeWitt, "Mapping informal small-scale mining features in a data-sparse tropical environment with a small UAS," *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 69-91, 2017.
- [35] M. Gil and P. Frąckiewicz, "Optimization of the location of observation network points in open-pit mining's ", 2019 :GIS Forum.
- [36] A. Tscharf, M. Rumpler, F. Fraundorfer, G. Mayer, and H. Bischof, "On the use of UAVs in mining and archaeology-geo-accurate 3d reconstructions using various platforms and terrestrial views," *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 2, no. W1, pp. 15-22, 2015.
- [37] J. Xiang, J. Chen, G. Sofia, Y. Tian, and P. Tarolli, "Open-pit mine geomorphic changes analysis using multi-temporal UAV survey," *Environmental earth sciences*, vol. 77, no.6, pp. 1-18, 2018.
- [38] F. Beretta, H. Shibata, R. Cordova, R. d. L. Peroni, J. Azambuja, and J. F. C. L. Costa, "Topographic modelling using UAVs compared with traditional survey methods in mining," *REM-International Engineering Journal*, vol. 71, pp. 463-470, 2018.

- [57] J. Mitchell and J. A. Marshall, "Design of a novel auto-rotating uav platform for underground mine cavity surveying," 2017.
- [58] F. Azhari, S. Kiely, C. Sennersten, C. Lindley, M. Matuszak, and S. Hogwood, "A comparison of sensors for underground void mapping by unmanned aerial vehicles," presented at the UMT 2017: Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology, Sudbury, 11-13 October, 2017. [Online]. Available: https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1710_33_Sennersten/
- [59] H. Shakhatreh *et al.*, "Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges," *Ieee Access*, vol. 7, pp. 48572-48634, 2019.
- [60] B. R. Jordan, "A bird's-eye view of geology: The use of micro drones/UAVs in geologic fieldwork and education," *GSA today*, vol. 25, no. 7, pp. 50-52, 2015.
- [61] B. Vergouw, H. Nagel, G. Bondt, and B. Custers, "Drone technology: Types, payloads, applications, frequency spectrum issues and future developments," in *The future of drone use*: Springer, 2016, pp. 21-45.
- [62] L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun, "Survey of important issues in UAV communication networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1123-1152, 2015.
- [50] D. Caliò, S. Mineo, and G. Pappalardo, "Digital Rock Mass Analysis for the Evaluation of Rockfall Magnitude at Poorly Accessible Cliffs," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 6, p. 1515, 2023.
- [51] C.-y. JIN, J.-y. ZHANG, Z.-j. YU, and Q. WANG, "Reliability Analysis of Surface Subsidence Based on Response Surface Methodology," *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, vol. 44, no. 12, p. 1734.
- [52] R. Turner, N. Bhagwat, L. Galayda, C. Knoll, E. Russell, and M. MacLaughlin, "Geotechnical Characterization of Underground Mine Excavations from UAV-Captured Photogrammetric & Thermal Imagery," in *52nd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, 2018: OnePetro.
- [53] C. Kanellakis and G. Nikolakopoulos, "Evaluation of visual localization systems in underground mining," in *2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, 2016: IEEE, pp. 539-544.
- [54] G. Freire and R. Cota, "Capture of images in inaccessible areas in an underground mine using an unmanned aerial vehicle," in *UMT 2017: Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology*, 2017: Australian Centre for Geomechanics.
- [55] P. Raj, "Use of Drones in an Underground Mine for Geotechnical Monitoring," The University of Arizona, 2019.
- [56] R. M. Turner, M. M. MacLaughlin, and S. R. Iverson, "Identifying and mapping potentially adverse discontinuities in underground excavations using thermal and multispectral UAV imagery," *Engineering Geology*, vol. 266, p. 105470, 2020.

¹ Structure from Motion² Ground Sample Distance³ Global Positioning System⁴ Light Emitted Diode⁵ Light Detection and Ranging



Research article

Improving the performance of the dynamic air separator of the pelletizing plant of the GoleGohar Mining and Industrial Company

Mohammad Ansari¹, Payman Khademi¹, Amir Ali Pourkhosravani¹, Ali reza Ghasemi¹, Vahid Karbakhsh¹, Samad Banisi^{1*}

1- Dept. of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

(Received: 09 February 2025, Revise: 22 March 2025, Accepted: 16 April 2025)

DOI: [10.22034/ANM.2025.22774.1666](https://doi.org/10.22034/ANM.2025.22774.1666)

Keywords

English Extended Abstract

Dynamic air separator
CFD
DEM
Characterization
GoleGohar

Summary

This study focuses on improving the performance of a dynamic air separator in the pelletizing plant of GoleGohar Mining and Industrial Company. The research combines simulation tools such as Computational Fluid Dynamics (CFD) and Discrete Element Method (DEM), laboratory measurements, and field observations to analyze the separator's performance and identify operational issues. The study investigates the impact of various operational parameters on the separator's efficiency and sensitivity to each parameter. Two control strategies for adjusting the cage rotation speed were tested, revealing that constant cage speed resulted in a finer product with less fluctuation in the Blaine number in compare with the variable cage speed (from 1154 ± 240 to 1195 ± 72 cm^2/g). The accumulation of fine particles (average size of $7 \mu\text{m}$) in the volute chamber was identified, attributed to issues such as improper discharge valve operation, uneven air distribution, and reduced bag filter efficiency. Corrective measures, including adjusting the cyclone discharge valve, repositioning damper plates, increasing air velocity, and modifying the cage guide vanes, reduced material deposition in the volute chamber from 30% to 10% of the cross-sectional area. DEM simulations highlighted the importance of uniform feed distribution on the separator's efficiency, leading to a proposed design modification that improved feed distribution and improved particle distribution relative standard deviation from 30% to 5%.

Introduction

The characterization and performance analysis of industrial equipment in mineral processing plants is crucial for advancing the field, as it provides a deeper understanding of system performance and facilitates process optimization. Dynamic air separators are increasingly used in dry grinding circuits due to their ability to efficiently separate fine particles, which is essential for achieving high product quality and operational efficiency. These separators have evolved through three generations, with the latest high-efficiency separators offering advanced rotor designs, improved air circulation, and better control over product quality and operational parameters.

Previous researchs have demonstrated the potential of high-efficiency separators to reduce energy consumption and improve separation efficiency in various industries, including cement and mineral processing. This study aims to provide a comprehensive performance analysis and troubleshooting of a third-generation dynamic air separator used in GoleGohar pelletizing plant. The separator's self-regulating nature, while advantageous for continuous operation, presents challenges in maintaining consistent product quality, necessitating precise control and optimization strategies.



Methodology and Approaches

The study employed a multi-faceted approach to analyze and optimize the performance of a dynamic air separator. A detailed 3D geometric model of the separator was developed using SolidWorks™, based on technical drawings provided by the manufacturer. This model served as a foundational tool for understanding the separator's internal structure, enabling accurate Computational Fluid Dynamics (CFD) and Discrete Element Method (DEM) simulations. DEM simulations were conducted using an in-house developed software package (KMPC-DEM) to analyze the distribution of materials on the distributor plate, focusing on achieving uniform material flow to enhance separation efficiency. The simulations revealed challenges in maintaining uniform distribution, leading to the proposal of a modified distributor design to improve performance.

CFD simulations, performed using Ansys Fluent™, investigated airflow patterns within the separator's volute chamber and dampers. The Reynolds Stress Model (RSM) was used to capture turbulent and swirling flows, with boundary conditions set to replicate real operational scenarios. The results, including velocity contours and pressure fields, were correlated with field observations to identify areas of material accumulation and wear, guiding design modifications to optimize airflow and reduce wear.

Field monitoring and measurements were conducted to validate simulation results and assess the separator's performance. Physical inspections, imaging, and sampling were used to track wear patterns, material accumulation, and operational changes. Particle size analysis, using sieve analysis, cyclosizer testing, and laser particle size analysis (LPSA), provided detailed insights into material distribution and separator efficiency. Pressure monitoring, using a calibrated pressure gauge, helped evaluate the impact of damper settings and airflow variations on separator's performance. These combined methods provided a comprehensive understanding of the separator's operation, enabling targeted optimizations to improve efficiency and reliability.

Results and Conclusions

The study through the investigation of operational parameters revealed that maintaining a constant cage speed led to higher fluctuations in product fineness, whereas implementing a variable-speed strategy significantly improved product stability, increasing the Blaine number from $1154 \pm 240 \text{ cm}^2/\text{g}$ to $1195 \pm 72 \text{ cm}^2/\text{g}$. These findings highlighted the importance of precise control strategies in achieving consistent product quality.

Field inspections identified excessive fine particle accumulation in the volute chamber, with an average particle size of $7 \mu\text{m}$. This issue was attributed to improper cyclone underflow discharge mechanism, suboptimal damper configurations, reduced bag filter efficiency, and non-uniform airflow distribution caused by incorrect guide vane settings. A series of corrective measures, including optimized damper arrangements, improved dust collection efficiency, and guide vane modifications, reduced material accumulation in the volute chamber from 30% to 10% of its cross-sectional area.

DEM simulations indicated that the initial feed distribution on the distributor plate was non-uniform. A modified distributor design was proposed, which significantly improved feed uniformity. It was testified by the reduction of the relative standard deviation of particles distributed around the plate from 30% to 5%, ensuring more consistent particle interaction with aerodynamic forces and enhancing overall separation efficiency.

Overall, this research demonstrated that a systematic approach combining computational modeling, experimental validation, and field observations can effectively optimize separator performance. The findings provided valuable insights for improving classification efficiency, reducing material buildup, and stabilizing product quality in industrial dry grinding circuits.

Figures and Tables

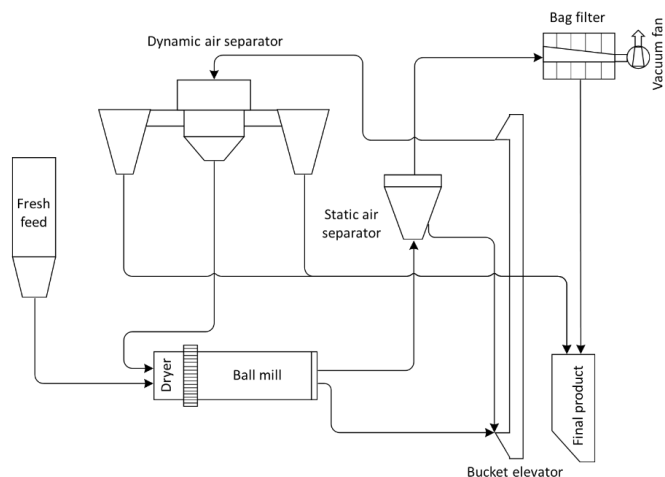
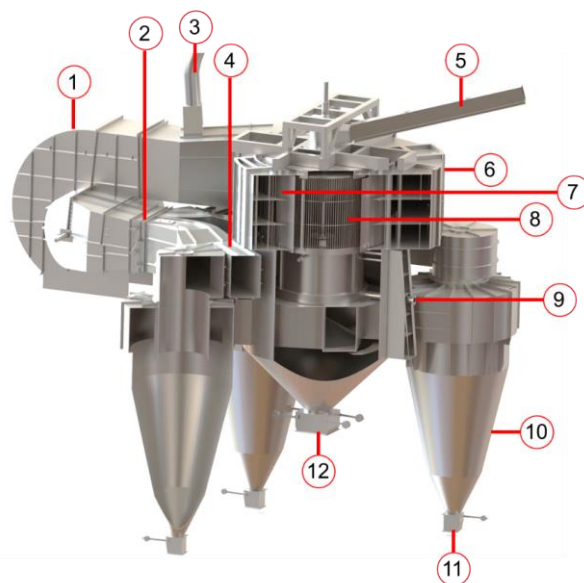


Fig. 1. The grinding circuit of the GoleGohar pelletizing plant



- | | | | |
|-------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------|
| 1- Fan | 2- Damper | 3- Dust Collection Pipe | 4- Cyclones Overflow |
| 5- Feeding Duct | 6- Volute Chamber | 7- Guide Vanes | 8- Rotating Cage |
| 9- Fresh Air Inlet Pipe | 10- Cyclone | 11- Cyclone Pendulum Valve | 12- Coarse Product |

Fig. 2. A cross-sectional view of the detailed 3D model of the dynamic air separator

References

[1] Y. Zhang, A. Kavetsky, T. Napier-Munn, D. Rapson, Effects of separator efficiency on clinker grinding circuits: a computer simulation study, ZKG International: Ausgabe B, 41 (1988) 501-505.



- [2] M. Shapiro, V. Galperin, Air classification of solid particles: a review, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44 (2005) 279-285.
- [3] O. Altun, H. Benzer, Selection and mathematical modelling of high efficiency air classifiers, *Powder Technology*, 264 (2014) 1-8.
- [4] R. Guizani, H. Mhiri, P. Bournot, CFD study of the effect of rotation speed on dynamic air separator flow characteristics and pressure drop, 2014 5th International Renewable Energy Congress (IREC), 2014, pp. 1-6.
- [5] C. Herrmann, Increased Cement Grinding Efficiency by Using High-Efficiency Separators, *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-22 (1986) 330-337.
- [6] L. Guo, J. Liu, S. Liu, J. Wang, Velocity measurements and flow field characteristic analyses in a turbo air classifier, *Powder Technology*, 178 (2007) 10-16.
- [7] Y. Feng, J. Liu, S. Liu, Effects of operating parameters on flow field in a turbo air classifier, *Minerals Engineering*, 21 (2008) 598-604.
- [8] B. Beke, *The Process of Fine Grinding*, M. Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers 1981.
- [9] K. Nageswararao, A critical analysis of the fish hook effect in hydrocyclone classifiers, *Chemical Engineering Journal*, 80 (2000) 251-256.
- [10] B.C. Flintoff, L.R. Plitt, A.A. Turak, *Cyclone modelling: A review of present technology*, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 1987.
- [11] A.K. Majumder, P. Yerriswamy, J.P. Barnwal, The "fish-hook" phenomenon in centrifugal separation of fine particles, *Minerals Engineering*, 16 (2003) 1005-1007.
- [12] Q.L.J.Y.Y. Huang, Turbo air classifier guide vane improvement and inner flow field numerical simulation, *Powder Technology*, 226 (2012) 10-15.
- [13] C. Eswaraiah, S.I. Angadi, B.K. Mishra, Mechanism of particle separation and analysis of fish-hook phenomenon in a circulating air classifier, *Powder Technology*, 218 (2012) 57-63.
- [14] M. Esmaeilpour, A. Mohebbi, V. Ghalandari, CFD simulation and optimization of an industrial cement gas-solid air classifier, *Particuology*, 89 (2024) 172-184.
- [15] P. Cleary, Discrete element modelling of industrial granular flow applications, *TASK. Quarterly - Scientific Bulletin*, 2 (1998).
- [16] H.P. Zhu, A.B. Yu, A theoretical analysis of the force models in discrete element method, *Powder Technology*, 161 (2006) 122-129.
- [17] A. EDEM, *EDEM 2022 User's Guide*, 2022.
- [18] A.R. Ghasemi, A.R. Hasankhoei, G.A. Parsapour, E. Razi, S. Banisi, A combined physical and DEM modelling approach to improve performance of rotary dryers by modifying flights design, *Drying Technology*, 39 (2021) 548-565.
- [19] A.R. Hasankhoei, M. Maleki-Moghaddam, A. Haji-Zadeh, M.E. Barzgar, S. Banisi, On dry SAG mills end liners: Physical modeling, DEM-based characterization and industrial outcomes of a new design, *Minerals Engineering*, 141 (2019) 105835.
- [20] S.B. Pope, *Turbulent flows*, *Measurement Science and Technology*, 12 (2001) 2020-2021.



Research article

Stability Analysis of Intersection Resulted from Slope and Access Tunnels in Tabas Coal Mine using Finite Difference Numerical Method

Alireza Tarakameh¹, Satar Mahdevari^{1*}, Kourosch Shahriar¹

1- Dept. of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 21 October 2024, Revise: 27 May 2025, Accepted: 28 May 2025)

DOI: [10.22034/ANM.2025.22282.1646](https://doi.org/10.22034/ANM.2025.22282.1646)

Keywords

Bifurcation
Stability analysis
Induced stress
Plastic zone
Finite difference method
Parvadeh Tabas coal mine

English Extended Abstract

Summary

The demand for underground infrastructures has increased significantly in recent decades due to urbanization, industrial needs, and mineral extraction. In coal mining, the design and construction of intersecting tunnels, especially bifurcated intersections, pose unique challenges. These intersections are often subject to complex stress redistribution, displacement, and plastic deformation. Failure to address these conditions can jeopardize the overall stability and safety of the mining operation.

This study presents a numerical investigation into the stability of a bifurcated tunnel intersection (H16) in the Parvadeh coal mine, Tabas, South Khorasan, Iran. The intersection, formed by S2 slope tunnel and MG5 access tunnel, is situated at a depth of 570 m, within a geologically complex and mechanically heterogeneous rock mass. The Finite Difference Method (FDM), implemented in FLAC3D, was used to model excavation sequences, stress redistribution, plastic deformation, and the effectiveness of proposed support systems. A sensitivity analysis examined the influence of critical geotechnical parameters. Results highlighted key areas of instability, optimal reinforcement strategies, and practical implications for mine design. Field validation also confirms the reliability of the numerical model.

Introduction

With the continuous advancement of society, the need for the construction of underground structures has significantly increased. Depending on the function of the civil structure or the mine design, some tunnels are inevitably excavated in an intersecting manner. With the growing reliance on underground resources and infrastructures, the stability of complex tunnel has gained strategic importance. One type of intersecting tunnel is the bifurcated tunnel, whose stability analysis is of particular importance due to its complex geometric conditions and induced stresses [1]. The span width of bifurcated tunnels at the intersection point is generally greater than that of the regular tunnel section, which leads to increased displacements and reduced structural stability at the intersection. Tunnel intersections are highly vulnerable to instability, which can compromise operational safety and lead to significant economic losses. Therefore, any instability occurring at the tunnel intersection can affect the overall structural stability, making it a critical issue from an engineering perspective [2].

In this study, the stability of a bifurcated intersection in the Parvadeh coal mine—formed by the intersection of S2 slope tunnel and MG5 access tunnel—is investigated as a case study. The aim of this research is to analyze the structural stability at the bifurcated intersection by examining the induced stress field, the

*Corresponding author: E-mail: satar.mahdevari@aut.ac.ir



intensity of stress concentration, and the extent of the plastic zone around the intersection area.

Methodology and Approaches

Numerical modeling was carried out using the FDM within the FLAC3D software environment. Figure 1 presents the geological column of the study area. The tunnel cross-section in the bifurcated intersection zone mainly consists of sandstone, siltstone, and silty-sandstone layers, with the C2 coal seam also observed in the roof. As shown, the H16 bifurcated intersection is characterized by a wide cross-section and an asymmetric geometry, connecting the S2 slope tunnel to the MG5 access tunnel at an angle of 78 degrees at a depth of 570 m. Due to the mine design and ongoing extraction operations, various structures are located around the H16 bifurcated intersection. The excavation of each tunnel disturbs the in-situ stress field, resulting in overlapping induced stresses. Moreover, the considerable depth of this intersection generates relatively high in-situ stresses, with the vertical stress reaching up to 15 MPa. Additionally, the inclination angle of the S2 slope tunnel is about 15 degrees from the horizontal, while the MG5 access tunnel has an inclination angle of approximately 6 degrees. To ensure that the modeling conditions closely resemble the actual ground conditions, the model dimensions were selected in such a way that the influence of boundary conditions on the overall model behavior is minimized. The physical and mechanical properties of the rock layers within the study area are summarized in Table 1.

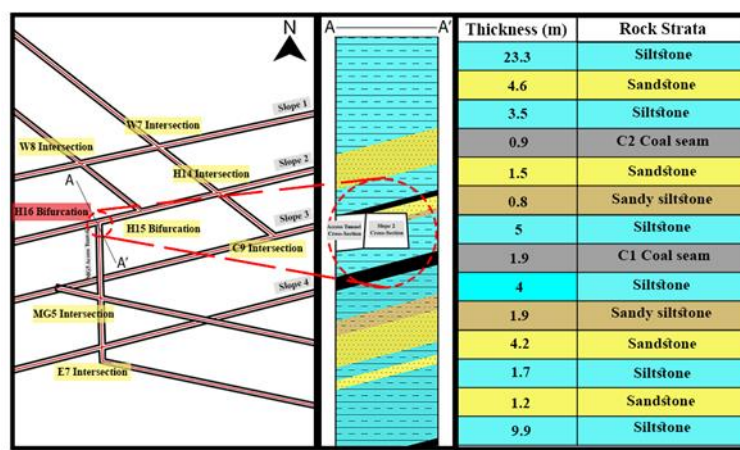


Fig. 1. Geological cross-section of the H16 intersection area

Table 1. Geomechanical and physical properties of rock strata in the study area

Rock Strata	Unit weight (kg/m^3)	Modulus of deformation (GPa)	Cohesion (MPa)	Friction angle (deg)	Poisson's ratio
Siltstone	2400	1.268	0.72	18.23	0.25
Sandy siltstone	2600	2.167	0.21	27.05	0.25
Sandstone	2700	2.164	1.22	27.03	0.25
Coal seam	1600	0.621	0.43	11.83	0.32

Given that the maximum tunnel span at the intersection is 6.9 m, based on Saint-Venant's principle, the model dimension in the Y-axis direction was chosen to be five times the tunnel width on each side, resulting in a total width of 70 m. The model length along the X-axis, which aligns with the tunnel advance direction, was set to 100 m, with the intersection located at the center of this axis. The model height in the Z-direction was



also set to 100 m, incorporating 30 m below and 70 m above the intersection to account for immediate roof and floor interactions.

Groundwater effects were not considered in the analysis, and only in-situ stresses were applied as initial conditions. The overburden weight was modeled as vertical stress acting on the top boundary, while the side boundaries were fixed against horizontal displacement, and the bottom boundary was fixed against both vertical and horizontal displacements. Additionally, the horizontal-to-vertical stress ratio was set to 1.15, and the Mohr–Coulomb failure criterion was adopted to simulate the mechanical behavior of the surrounding rock mass.

The support system of the slope tunnel consists of 22 mm diameter rock bolts with a length of 2.4 m, arranged in a regular pattern with 1-meter spacing. These bolts are fully grouted with resin and installed in combination with wire mesh. In addition, sliding steel frames of type TH36 are used at 800 mm intervals to ensure the stability of the S2 slope tunnel; the space between the steel frames and the tunnel wall is filled with backfill material. The mechanical properties of the support systems are summarized in Table 2.

Table 2. Specifications of the proposed support system

Parameter	Unit	Roof Anchor Cable	Roof flexibolt	Rock bolt
Diameter	(mm)	42	21.7	22
Length	(m)	9	6	2.4
Tensile Strength	(kN)	590	490	310
Compressive Strength	(kN)	-	-	250
Pretension	(kN)	250	-	-
Allowable Strain	(%)	-	-	18
Anchorage Length (Bond)	(m)	5	4	2.4
Grouting Material		Grout	Resin	Resin

As the slope tunnel approaches the intersection, due to the increased span and cross-sectional area, a reinforced support system is employed. Specifically, within a 9-meter radius from the center of the intersection, denser-patterned rock bolts with a length of 2.7 m are installed in the slope tunnel. At the intersection itself, the support system includes 9-meter prestressed anchors, 6-meter flexibolts, and rock bolts spaced at 800 mm intervals.

Due to the increased cross-sectional area at the bifurcated intersection, IPB260 and IPB320 beams were used instead of sliding steel frames. The arrangement of grouted rock bolts in the roof and walls of the access tunnel follows a square pattern with 800 mm spacing. Additionally, 6-meter flexibolts were installed in the roof, and IPB260 steel frames were also used as part of the support system in this tunnel.

Results and Conclusions

Nephogram showing the distribution of vertical stresses in the right wall of the slope tunnel is presented in Figure 2. As observed, the vertical stress initially increases with distance from the right wall of the slope tunnel and begins to decrease at approximately 14 m from the center of the intersection, eventually stabilizing. The maximum vertical stress in the stress concentration zone reaches 25.5 MPa. By comparing the contour lines around the tunnel cross-section, it is evident that the stress concentration at the intersection is effectively controlled through the installation of the proposed support system.

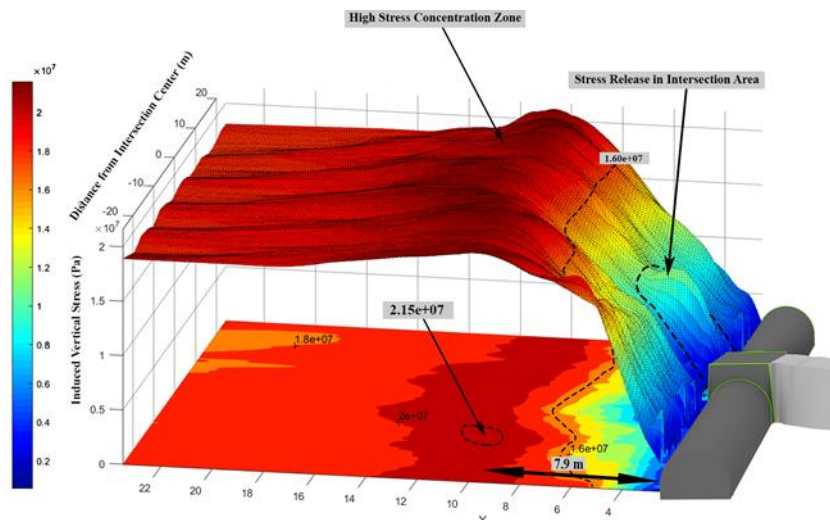


Fig. 2. Nephogram of vertical stresses in the right wall of the slope tunnel

With increasing distance from the bifurcated intersection, greater stress concentration occurs in the access tunnel. For greater clarity, a 3D view of the induced vertical stresses on both sides of the bifurcated intersection is shown in Figure 3. According to the stress distribution curves, the vertical stress levels in the rock mass on the left side—where the intersection angle is smaller—are significantly higher than on the right side. Moreover, the zone of maximum induced vertical stress on the left side occurs closer to the sharp corner of the intersection compared to its counterpart on the right. Additionally, both the peak value and the extent of the area with more intense stress distribution are greater on the left side.

Also, based on the stress concentration contours in the area between the slope tunnel and the access tunnel, on the left side of the bifurcation, the stress concentration was increased to 1.65 near the slope tunnel, and to 1.71 near the access tunnel. Moving away from the intersection at the roof of the access tunnel, the stress level increases, which can be due to its non-circular and wide cross-section. Overall, the trend of induced vertical stress initially increases continuously, then decreases with increasing distance from the intersection, and finally stabilizes. This distribution forms dome-shaped iso-stress contours with a peak value at the center, gradually diminishing as the dome expands.

Based on the shear stress curves in the rock mass on the left side of the intersection, the shear stress reaches 7.98 MPa at a distance of approximately 12 m from the sharp corner of the intersection (Figure 4a). Additionally, within 2 m of this corner, the shear stress field increases to 5.87 MPa. Overall, it can be concluded that the intensity of shear stress concentration is higher in the rock foundation on the left side. According to Figure 4b, the shear stress on the right side of the bifurcated intersection reaches 7.11 MPa at a distance of 11.3 m from the corner. Furthermore, the trend of shear stress variation in the rock mass on the right side increases in the direction of the access tunnel. In contrast, the shear stress distribution in the left-side rock mass tends to be more symmetrical relative to both the slope tunnel and the access tunnel.

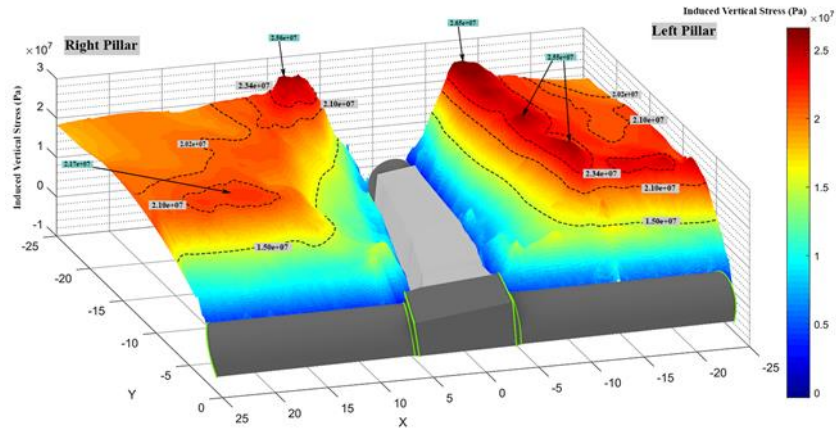


Fig. 3. 3D view of induced vertical stresses on both sides of the bifurcated intersection

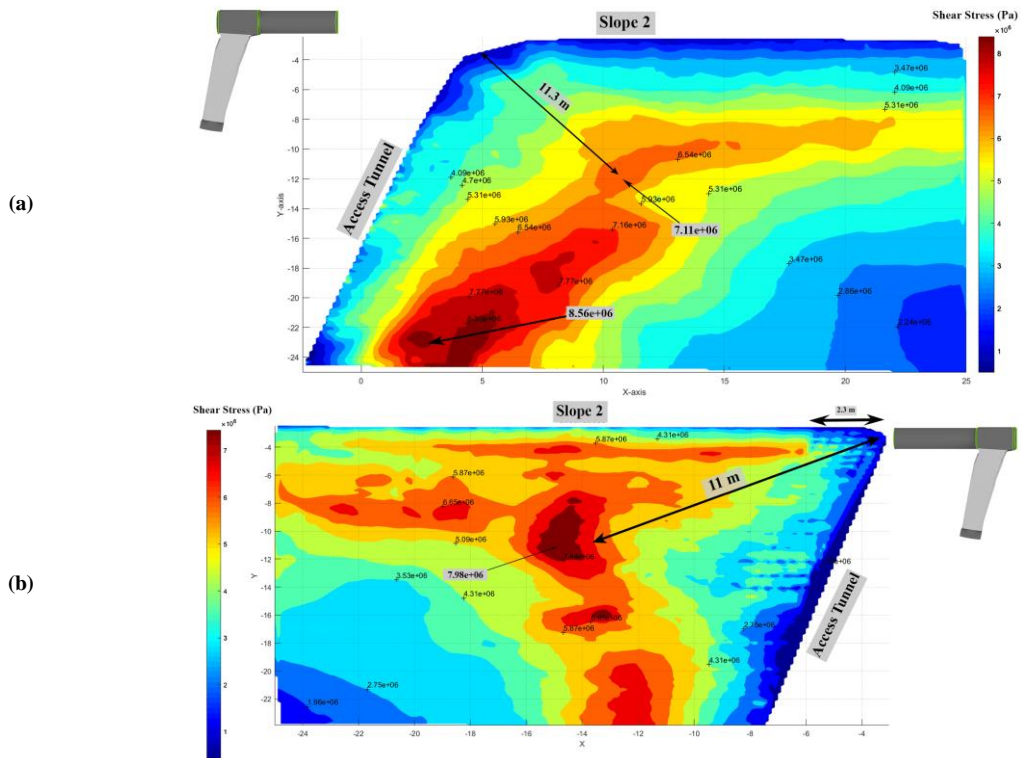


Fig. 4. Shear stress variation curves in the zone between slope tunnel and access tunnel (plan view)

The extent of the plastic zone in four areas of tunnel roof, tunnel floor, right wall, and left wall decreases with increasing distance from the center of the intersection. However, the depth of the plastic zone is greater in the left wall of the slope tunnel. Similarly, in the access tunnel, the spread of the plastic zone—particularly in the walls—continuously decreases as the distance from the intersection increases. Due to the existence of rock strata with different strengths, the plastic zone at different distances from the intersection is almost asymmetric. This phenomenon is illustrated in Figure 5, which shows the positioning of a weak coal seam located 20 m from the intersection. By comparing various distances and the relative position of the coal seam to the excavation profile, it can be concluded that the plastic zone is smaller when the weak layer lies in the roof of the excavation, compared to when it lies in the floor. In



other words, the presence of a coal seam at the tunnel floor intensifies the spread of the plastic zone, which in turn increases the risk of floor instability and heaving in both the tunnels and the bifurcated intersection.

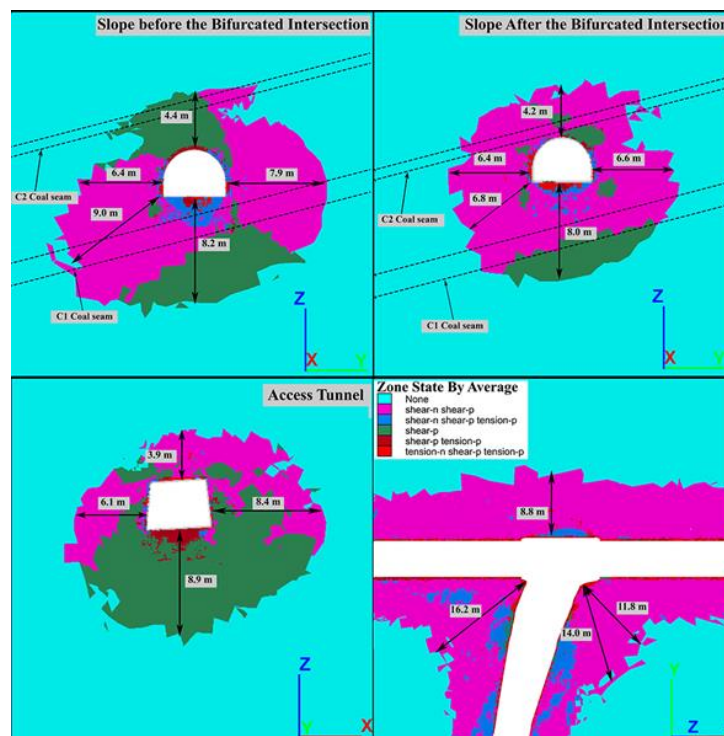


Fig. 5. Plastic zone at 20-meter distances from the center of bifurcated intersection

Considering the influence of input parameters on the results of the numerical model, this study investigates the effect of variations in three key input parameters—namely, deformation modulus, internal friction angle, and tunnel depth—on the maximum vertical displacement of the intersection roof. It is evident that in all cases, an increase in the deformation modulus and internal friction angle leads to a reduction in vertical displacements in the numerical model. Additionally, as the tunnel depth increases, the maximum displacement also increases, resulting in a decrease in the stability of the intersection.

To address excessive displacements and intersection instabilities in this mine, several practical measures are recommended. To control floor heave in tunnels, it is proposed to excavate tunnels with an inverted arch or modify the tunnel cross-section to a circular shape, accompanied by the installation of a floor support system. To manage displacements caused by access tunnel excavation, reducing the excavation step size is suggested to control the induced stresses around the intersection. Additionally, to mitigate deformations resulting from stress concentration, studying the behavior of tunnels with modified cross-sections—particularly circular profiles—is recommended. Implementing partial-face excavation instead of full-face excavation in the intersection zone may also be an effective approach to enhance the stability of bifurcated junctions.

References

- [1] Chortis, F., & Kavvadas, M. Three-Dimensional Numerical Analyses of Perpendicular Tunnel Intersections. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(3), 1771-1793. (2020)
- [2] Tan, Z., Zhou, Z., Kong, H., Zhao, B., & Zhao, J. Single excavation face method for super-large-span bifurcated tunnels. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 1-13. (2021)



- [3] Wang, J., Cao, A., Li, Z., et al. Mechanical Behavior and Excavation Optimization of a Small Clear-Distance Tunnel in an Urban Super Large and Complex Underground Interchange Hub. *Applied Sciences*, 13(1). (2022)
- [4] Singh, R. N., Porter, I., & Hematian, J. Finite element analysis of three-way roadway junctions in longwall mining. *International Journal of Coal Geology*, 45(2-3), 115-125. (2001)
- [5] Hsiao, F. Y., Wang, C. L., & Chern, J. C. Numerical simulation of rock deformation for support design in tunnel intersection area. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(1), 14-21. (2009)
- [6] Liu, X., & Wang, Y. Three Dimensional Numerical Analysis of Underground Bifurcated Tunnel. *Geotechnical and Geological Engineering*, 28(4), 447-455. (2010)
- [7] Guo, Z., Shi, J., Wang, J., Cai, F., & Wang, F. Double-directional control bolt support technology and engineering application at large span Y-type intersections in deep coal mines. *Mining Science and Technology (China)*, 20(2), 254-259. (2010)
- [8] Li, G., He, M., Zhang, G., & Tao, Z. Deformation mechanism and excavation process of large span intersection within deep soft rock roadway. *Mining Science and Technology (China)*, 20(1), 28-34. (2010)
- [9] Lin, P., Zhou, Y., Liu, H., & Wang, C. Reinforcement design and stability analysis for large-span tailrace bifurcated tunnels with irregular geometry. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 189-204. (2013)
- [10] Nik, M. G., & Farahani, A. F. Assessment the Stability of Tunnels in Y Shaped Intersections with Regard to the Intersection Angles, Case Study: Penstock Tunnels of Rudbar Dam. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 48(2). (2016)
- [11] Golshani, A., Joneidi, M., & Majidian, S. 3D numerical modeling for construction of tunnels intersections- case study of Hakim tunnel. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(43), 1523-1527. (2016)
- [12] Liu, H.-l., Li, S.-c., Li, L.-p., & Zhang, Q.-q. Study on deformation behavior at intersection of adit and major tunnel in railway. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(6), 2459-2466. (2017)
- [13] Zhou, D., Ding, W., Xie, D., & Chen, S. Reinforcement Analysis of Bifurcated Highway Tunnels with Large Section of Different Surrounding Rock Grades in Tiger Leaping Gorge. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 741(1). (2020)
- [14] Gkikas, V. I., & Nomikos, P. P. Primary Support Design for Sequentially Excavated Tunnel Junctions in Strain-Softening Hoek–Brown Rock Mass. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(3), 1997-2018. (2020)
- [15] Xie, S., Wu, Y., Chen, D., Liu, R., Han, X., & Ye, Q. Failure analysis and control technology of intersections of large-scale variable cross-section roadways in deep soft rock. *International Journal of Coal Science & Technology*, 9(1). (2022)
- [16] Xu, H., Zhang, Y., Yang, J., et al. Study on the Constant Resistance Coupling Support Technology for Rock Column at the Intersection Point of Deep Soft Rock Large Section Roadway: A Case Study in China. *Shock and Vibration*, 2022, 1-12. (2022)
- [17] Sun, X.-m., Qi, Z.-m., Zhang, Y., Miao, C.-y., Zhao, C.-w., & He, M.-c. Failure mechanism and control countermeasures of surrounding rock at deep large section chamber intersection in the Wanfu Coal Mine. *Journal of Mountain Science*, 20(7), 2058-2075. (2023)
- [18] Jiang, J., Tao, R., Hesham El Naggari, M., Liu, H., & Du, X. Seismic performance and vulnerability analysis for bifurcated tunnels in soft soil. *Computers and Geotechnics*, 167. (2024)
- [19] (IRITEC), (2003). Tabas Coal Mine Project, detailed design report (Vol. 1, pp. 464).
- [20] Mahdevari, S., Shahriar, K., Sharifzadeh, M., & Tannant, D. D. Stability prediction of gate roadways in longwall mining using artificial neural networks. *Neural Computing and Applications*, 28(11), 3537-3555. (2016)
- [21] Tabas engineering technical. office. (2023). engineering report.



Research article

Application of resampling algorithms in the imbalanced geochemical data classification: Case study; Geochemical data of Qayen 1:100000 sheet

Hamid Geranian^{1*}

1- Dept. of Mining Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

(Received: 19 January 2025, Revise: 17 April 2025, Accepted: 27 May 2025)

DOI: [10.22034/anm.2025.22666.1661](https://doi.org/10.22034/anm.2025.22666.1661)

Keywords

SMOTE algorithm
ADASYN algorithm
RUS algorithm
OSS algorithm
SMOTE-Tomek algorithm
ADASYN-CNN algorithm
Qayen Sheet

English Extended Abstract

Summary

The geochemical data exhibit an imbalance, with a high number of samples belong to the low-grade or background class, and a low number of samples in the high-grade or anomaly class. This imbalance in the dataset can lead to the development of a biased model, decreasing the likelihood of new samples belonging to classes with fewer representations and resulting in reduced accuracy and precision of the model. This paper introduces oversampling techniques such as SMOTE and ADASYN, undersampling methods like RUS and OSS, and hybrid-sampling approaches such as SMOTE-Tomek and ADASYN-CNN to address this data imbalance. The performance of these algorithms on geochemical data from the Qayen sheet is evaluated using SVM and ANN classification methods. The results demonstrate that data balancing leads to a significant increase in metrics such as accuracy, sensitivity, specificity, precision, F-score, F-value, G-mean, and AUC by 10 to 50 percent, while reducing error metrics by about 10 percent. The oversampling, hybrid-sampling, and undersampling algorithms exhibit high performance levels in improving the classification results, respectively. The geochemical anomaly maps generated with the help of these balancing algorithms show a greater number of anomaly areas in the study area, effectively aligning with mineralized rock units. Notably, oversampling techniques like SMOTE and ADASYN, followed by the hybrid-sampling method ADASYN-CNN, demonstrate superior performance in this regard. Therefore, this paper recommends oversampling and then hybrid-sampling algorithms before classifying exploration data to enhance model accuracy and better identify geochemical anomalies in the target area.

Introduction

Classification is a supervised machine learning technique that seeks to build a model from a dataset comprising multiple classes by analyzing the statistical relationships between them, determining the probability of a new sample belonging to each class. The accuracy of model estimation heavily relies on the distribution of samples within the dataset. A balanced dataset indicates an equal distribution of samples across different classes. However, in real-world data, we often encounter imbalanced datasets. Various approaches have been proposed to address the issue of classifying imbalanced datasets, including data sampling, algorithmic modification, and cost-sensitive learning methods [1,2]. This paper focuses on the algorithms associated with the first approach. To achieve this, geochemical data from the 1: 100,000 Qayen sheet in South Khorasan Province were utilized, employing support vector machine (SVM) and artificial neural network (ANN) classification methods.



Methodology and Approaches

In a two-class training dataset with n samples, if the number of samples in the first class (n_1) significantly exceeds the number of samples in the second class (n_2) such that $n_1 \gg n_2$ and $n = n_1 + n_2$, we are faced with the challenge of classifying an imbalanced dataset. The majority class is represented by the first class while the second class is considered the minority class, and the ratio n_1/n_2 is referred to as the imbalance ratio. Three approaches have been suggested to address this issue: oversampling techniques, undersampling techniques, and hybrid methods. This study introduces oversampling methods such as SMOTE and ADASYN, undersampling techniques like RUS and OSS, as well as hybrid-sampling approaches including SMOTE-Tomek and ADASYN-CNN, in order to achieve dataset balance [3,4,5]. Furthermore, the performance of these methods on the geochemical data of stream sediments from the Qayen sheet has been examined using SVM and ANN classification methods. Accuracy, sensitivity, specificity, precision, F-score, F-value, G-mean, and AUC metrics have been employed to assess the confusion matrix of the classification techniques [6,7].

Results and Conclusions

Initially, the dataset is randomly split into two parts: training data (comprising approximately 80 percent of the data, specifically 450 samples from the majority class and 71 samples from the minority class, totaling 521 samples) and testing data (comprising around 20 percent of the data, which equates to 113 samples from the majority class and 18 samples from the minority class, totaling 131 samples). The classification outcomes of the imbalanced dataset reveal that despite the high average classification accuracy in both methods, approximately 87 percent, the classification accuracy of the minority class is notably low. Consequently, there is a necessity to balance the training data. Tables 1 and 2 exhibit the classification outcomes of the testing data using balanced models and the metrics from the confusion matrix, respectively. These tables illustrate that data balancing has succeeded in enhancing the value of all metrics and diminishing the error metric's value. Overall, the ADASYN-CNN algorithm within the SVM method and the SMOTE algorithm within the ANN method can be recommended as the top methods, as they possess the highest cumulative metric values.

Table 1. Classification results of testing data with balanced models using the SVM and ANN methods

Type of data		Predicated samples							
		SMOTE				ADASYN			
		SVM		ANN		SVM		ANN	
		Background	Anomaly	Background	Anomaly	Background	Anomaly	Background	Anomaly
True samples	Background	102	11	111	2	100	13	112	1
	Anomaly	1	17	2	16	1	17	3	16
	Accuracy	90.3	64.4	98.2	89.9	88.5	94.4	99.1	89.9
		RUS				OSS			
True samples	Background	88	25	95	18	89	24	99	14
	Anomaly	5	13	2	16	5	13	2	16
	Accuracy	77.9	72.2	84.1	89.9	78.8	72.2	87.6	89.9
		SMOTE-Tomek				ADASYN-CNN			
True samples	Background	93	20	107	6	101	12	110	3
	Anomaly	1	17	1	17	1	17	2	16
	Accuracy	82.3	94.4	94.7	94.4	98.3	94.4	97.3	89.9



Table 2. Values of the confusion matrix metrics for the testing data

Method		Type of data						
		Imbalanced	Balanced					
			SMOTE	ADASYN	RUS	OSS	SMOTE-Tomek	ADASYN-CNN
SVM	AC	0.809	0.908	0.893	0.771	0.779	0.839	0.901
	ER	0.191	0.092	0.107	0.229	0.221	0.161	0.099
	S	0.867	0.903	0.885	0.885	0.779	0.823	0.983
	SP	0.444	0.994	0.994	0.994	0.722	0.994	0.994
	P	0.907	0.990	0.990	0.946	0.947	0.989	0.990
	F-Score	0.887	0.945	0.935	0.914	0.855	0.898	0.986
	F-Value	0.889	0.971	0.967	0.933	0.908	0.951	0.989
	G-Mean	0.620	0.923	0.914	0.914	0.750	0.934	0.963
	AUC	0.656	0.923	0.915	0.750	0.755	0.884	0.919
ANN	AC	0.855	0.969	0.977	0.847	0.878	0.947	0.962
	ER	0.145	0.031	0.023	0.153	0.122	0.053	0.038
	S	0.903	0.982	0.991	0.841	0.876	0.947	0.973
	SP	0.555	0.899	0.899	0.899	0.899	0.944	0.899
	P	0.927	0.982	0.974	0.979	0.980	0.991	0.982
	F-Score	0.915	0.982	0.982	0.905	0.925	0.969	0.977
	F-Value	0.922	0.982	0.977	0.948	0.957	0.982	0.981
	G-Mean	0.708	0.939	0.943	0.870	0.887	0.945	0.935
	AUC	0.729	0.936	0.912	0.865	0.882	0.946	0.931

In the following, models generated from a balanced dataset utilized to produce a composite geochemical anomaly map of the study area. To achieve this, we employed the inverse square distance method to estimate the concentration of each element in 500×500 m cells. The Qayen sheet comprises a total of 12221 cells, resulting in a data matrix of 27×12221. Figures 1 and 2 display the geochemical anomaly map of the study area generated using SVM and ANN classification methods, utilizing imbalanced and balanced datasets, respectively. The anomaly zones in the SVM and ANN maps cover approximately 16 and 50.25 km², respectively. Figure 1 highlights that the identified geochemical anomalies exhibit limited overlap with the igneous rock units within the study area. The balancing algorithms utilized in modeling the geochemical anomaly maps expanded the anomaly areas and effectively aligned them with mineralized rock units. Furthermore, oversampling algorithms such as SMOTE and ADASYN, followed by the hybrid ADASYN-CNN algorithm, demonstrated superior performance in achieving this outcome.

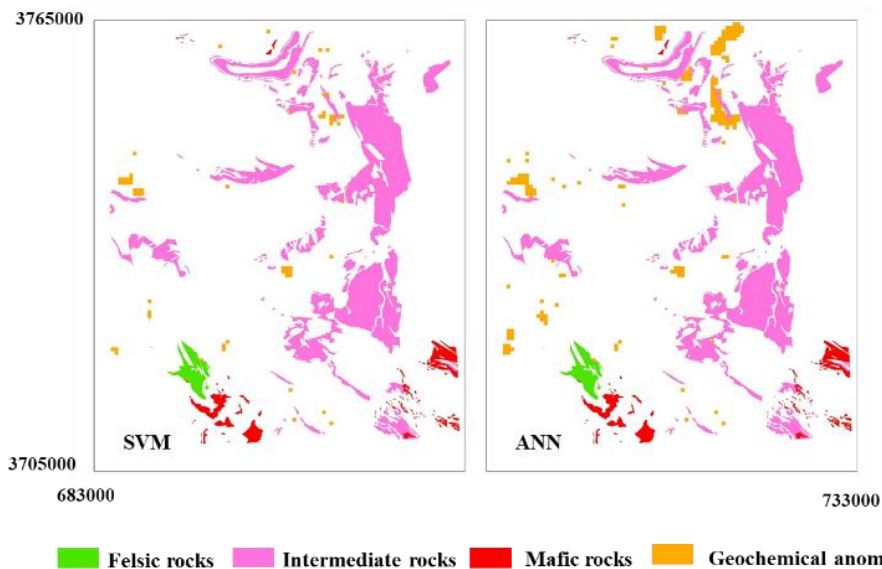
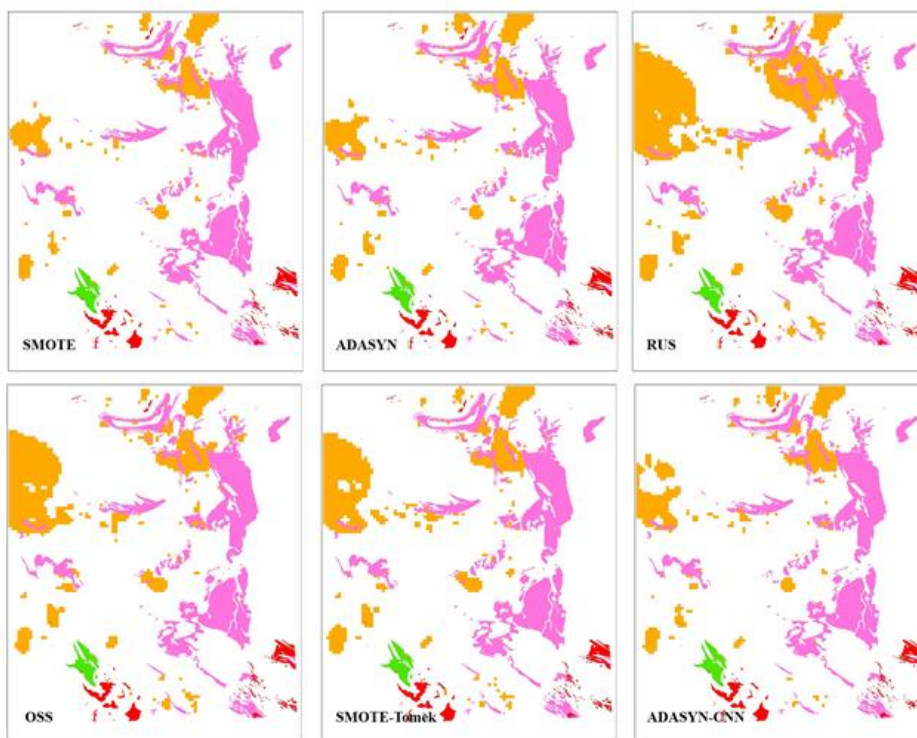


Fig. 1. Map of composite geochemical anomalies estimated with the imbalanced dataset along with the location of igneous rock units in the study area



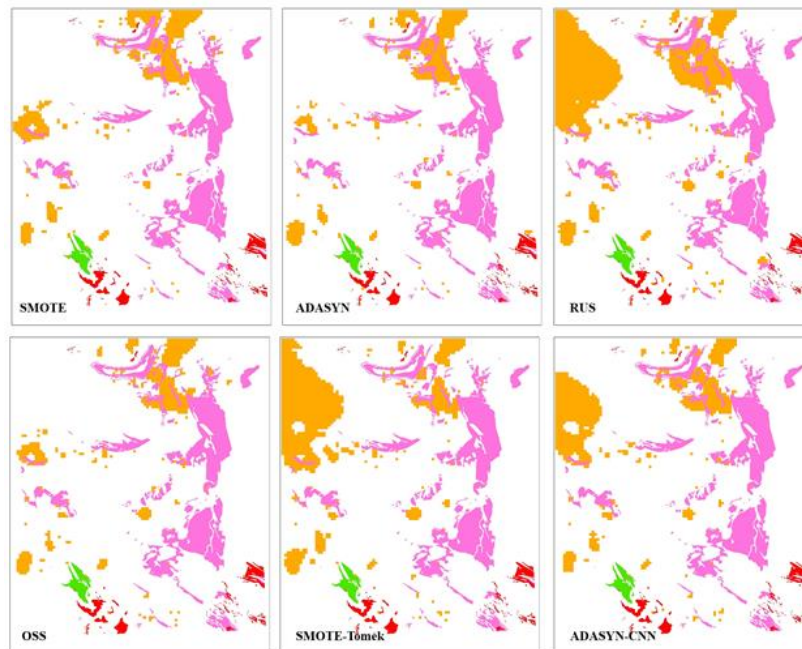


Fig. 2. Map of composite geochemical anomalies estimated with the balanced dataset (Legend is the same as in Fig. 1)

Hence, this paper recommends balancing the dataset before classification to enhance the accuracy, precision, and efficiency of the classification model. Additionally, another suggestion outlined in this paper is to utilize oversampling algorithms followed by hybrid-sampling algorithms prior to classifying the exploration data.

References

- [1] Yuan, Y., Wei, J., Huang, H., Jiao, W., Wang, J. and Chen, H. (2023). Review of resampling techniques for the treatment of imbalanced industrial data classification in equipment condition monitoring. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 126: 106911.
- [2] Payal Gulati, P. (2020). Hybrid Resampling Technique to Tackle the Imbalanced Classification Problem. *Computer Science*, Corpus ID: 241168640.
- [3] Brownlee, J. (2021). *Imbalanced Classification with Python*, Machine Learning Mastery, 463 P.
- [4] Wongvorachan, T., He, S. and Bulut, O. (2023). A Comparison of Undersampling, Oversampling, and SMOTE Methods for Dealing with Imbalanced Classification in Educational Data Mining. *Information* 14: 54.
- [5] Brandt, J. and Lanzén, E. (2021). A Comparative Review of SMOTE and ADASYN in Imbalanced Data Classification. *Department of Statistics, Uppsala University*, 42 P.
- [6] Han, J., Kamber, M. and Pei, J. (2022). *Data mining: concepts and techniques*, 4th Edition, Morgan Kaufmann, 752 P.
- [7] Zoyunl Abedin¹, M., Guotai, C., Hajek, P. and Zhang, T. (2023). Combining weighted SMOTE with ensemble learning for the class-imbalanced prediction of small business credit risk. *Complex & Intelligent Systems* 9: 3559-3579.
- [8] Zaki, M.J. and Meira, W. (2020). *Data Mining and Machine Learning: Fundamental Concepts and Algorithms*, Cambridge University Press, New York, 777 P.
- [9] Cerulli, G. (2023). *Fundamentals of Supervised Machine Learning: With Applications in Python, R, and Stata*, Springer Cham, 391 P.



- [10] Moradzadeh, A., Zare, M., Kamkar Rouhani, A. and Doulati Aredehjan, F. (2019). Classification of environmental geochemical data using discriminant analysis and neural network in carbonate-sulfide waste dumps of lead and zinc mines. *Journal of Mining Engineering* 14(44): 12-25 [In Persian].
- [11] Geranian, H., Tabatabaei, S.H., Asadi, H.H. and Carranza, E.J.M. (2016). Application of discriminant analysis and support vector machine in mapping gold potential areas for further drilling in the Sari-Gunay gold deposit, NW Iran. *Nat. Resour. Res.* 25: 145–159.
- [12] Zaremotlagh, S. and Hezarkhani, A. (2017). The use of decision tree induction and artificial neural networks for recognizing the geochemical distribution patterns of LREE in the Choghart deposit, Central Iran. *Journal of African Earth Sciences* 128: 37-46.
- [13] Degtyareva, K., Kukartseva, O., Tynchenko, V., Mariupolskiy, T. and Pereverzev, D. (2024). Analysis of geochemical characteristics of rocks using machine learning methods. *E3S Web of Conferences* 583, 01007.
- [14] Geranian, H., Tabatabaei, S.H. and Asadi, H.H. (2013). Application of classifiers based on Bayes decision theory in gold potential mapping in Sari Gunay epithermal gold deposit. *Geochemistry Journal* 1(4): 347-355 [In Persian].
- [15] Ziaii, M., Abedi, A. and Ziaei, M. (2009). Geochemical and mineralogical pattern recognition and modeling with a Bayesian approach to hydrothermal gold deposits. *Applied Geochemistry* 24(6): 1142-1146.
- [16] Yin, S., Lin, X., Huang, Y., Zhang, Z. and Li, X. (2023). Application of improved support vector machine in geochemical lithology identification. *Earth. Sci. Inform.* 16: 205–220.
- [17] Mahdiyanfar, H., Mohammadpoor, M. and Mahdavi, M. (2022). Determination of alteration genesis and quantitative relationship between alteration and geochemical anomaly using support vector machines. *International Journal of Mining and Geo-Engineering* 56(1): 33-391.
- [18] Trott, M., Leybourne, M., Hall, L. and Layton-Matthews, D. (2022). Random forest rock type classification with integration of geochemical and photographic data. *Applied Computing and Geosciences* 15: 100090.
- [19] Zhang, Y., Ye, X., Xie, S., Dong, J., Yaisamut, O., Zhou, X. and Zhou, X. (2023). Prediction of Au-Polymetallic Deposits Based on Spatial Multi-Layer Information Fusion by Random Forest Model in the Central Kunlun Area of Xinjiang, China. *Minerals* 13(10): 1302.
- [20] Chen, Y. and Zhao, Q., (2021). Mineral exploration targeting by combination of recursive indicator elimination with the ℓ_2 -regularization logistic regression based on geochemical data. *Ore Geology Reviews* 135: 104213.
- [21] Hanson, D.R. and Lawson, H.E. (2023). Using Machine Learning to Evaluate Coal Geochemical Data with Respect to Dynamic Failures. *Minerals* 13(6): 808.
- [22] Puzyrev, V., Zelic, M. and Duuring, P. (2023). Applying neural networks-based modelling to the prediction of mineralization: A case-study using the Western Australian Geochemistry (WACHEM) database. *Ore Geology Reviews* 152: 105242.
- [23] Tahmooresi, M., Babaei, B. and Dehghan, S. (2022). Geochemical exploration numerical modeling using convolutional neural network (Case study: Gonabad region). *Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering* 12(31): 47-58.
- [24] Chen, Y., Zhao, Q. and Lu, L. (2022). Combining the outputs of various k-nearest neighbor anomaly detectors to form a robust ensemble model for high-dimensional geochemical anomaly detection. *Journal of Geochemical Exploration* 231(1):106875.
- [25] Chen, Y. and Lu, L. (2023). The Anomaly Detector, Semi-supervised Classifier, and Supervised Classifier Based on K-Nearest Neighbors in Geochemical Anomaly Detection: A Comparative Study. *Math. Geosci.* 55: 1011–1033.



- [26] Parsa, M. (2021). A data augmentation approach to XGboost-based mineral potential mapping: An example of carbonate-hosted Zn-Pb mineral systems of Western Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 228: 106811.
- [27] Ibrahim, B., Majeed, F., Ewusi, A. and Ahenkorah, I. (2022). Residual geochemical gold grade prediction using extreme gradient boosting. *Environmental Challenges* 6: 100421.
- [28] Ghosh, K., Bellinger, C., Corizzo, R., Branco, P., Krawczyk, B., and Japkowicz, N. (2024). The class imbalance problem in deep learning. *Machine Learning* 113: 4845–4901.
- [29] Khushi, M., Shaukat, K., Mahboob Alam, T., Hameed, I.A., Uddin, S., and Luo, S. (2021). A Comparative Performance Analysis of Data Resampling Methods on Imbalance Medical Data. *IEEE Access* 9: 109960-109975.
- [30] Altalhan, M., Algarni, A., and Turki-Hadj Alouane, M. (2025). Imbalanced Data Problem in Machine Learning: A Review. *IEEE Access* 13: 13686-13699.
- [31] Liu, L., Wu, X., Li, S., Tan, S., and Bai, Y. (2022). Solving the class imbalance problem using ensemble algorithm: application of screening for aortic dissection. *BMC Medical Informatics and Decision Making* volume 22: Article number: 82.
- [32] Wang, W., and Sun, D. (2021). The improved AdaBoost algorithms for imbalanced data classification. *Information Sciences* 563: 358-374.
- [33] Salehi, A. R., and Khedmati, M. (2024). A cluster-based SMOTE both-sampling (CSBBoost) ensemble algorithm for classifying imbalanced data. *Scientific Reports* 14(1): 5152.
- [34] Araf, I., Idri, A., and Chairi, I. (2024). Cost-sensitive learning for imbalanced medical data: a review. *Artificial Intelligence Review* 57(4): 80.
- [35] Xiao, J., Li, S., Tian, Y., Huang, J., Jiang, X., and Wang, S. (2025). Example dependent cost sensitive learning based selective deep ensemble model for customer credit scoring. *Scientific Reports* 15(1): 6000.
- [36] Liu, Y., Li, Z., Chen, J., Zhang, T., Pan, T., and He, S. (2025). A batch-adapted cost-sensitive contrastive feature learning network for industrial diagnosis with extremely imbalanced data. *Measurement* 244: 116478.
- [37] Abhishek, K. and Abdelaziz, M. (2023). *Machine Learning for Imbalanced Data: Tackle imbalanced datasets using machine learning and deep learning techniques*, Packt Publishing, 344 p.
- [38] Yang, Y., Akbarzadeh Khorshidi, H. and Aickelin, U. (2024). A review on over-sampling techniques in classification of multi-class imbalanced datasets: insights for medical problems. *Front. Digit. Health* 26: 1430245.
- [39] Chawla, N.V., Bowyer, K.W., Hall, L.O. and Kegelmeyer, W.P. (2002). SMOTE: Synthetic Minority Over-Sampling Technique. *Journal of Artificial Intelligence Research* 16: 321–357.
- [40] Hu, S., Liang, Y., Ma, L. and He, Y. (2009). MSMOTE: Improving Classification Performance when Training Data is imbalanced. 2009 Second International Workshop on Computer Science and Engineering, 13-17.
- [41] Tahmooresi, M., Babaei, B. and Dehghan, S. (2022). Geochemical exploration numerical modeling using convolutional neural network (Case study: Gonabad region). *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering* 12(31): 47-58.
- [42] Kosolwattana, T., Liu, C., Hu, R. Han, S., Chen, H. and Lin, Y. (2023). A self-inspected adaptive SMOTE algorithm (SASMOTE) for highly imbalanced data classification in healthcare. *BioData Mining* 16: 15.
- [43] Hengyu, Z. (2020). Improved SMOTE algorithm for imbalanced dataset. Chinese Automation Congress (CAC), Shanghai, China, 693-697.



- [44] Lee, H., Kim, J. and Kim, S. (2017). Gaussian-Based SMOTE Algorithm for Solving Skewed Class Distributions. *Int. J. Fuzzy Log. Intell. Syst.* 17(4): 229-234.
- [45] He, H., Bai, Y., Garcia, E.A. and Li, S. (2008). ADASYN: Adaptive synthetic sampling approach for imbalanced learning, IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IEEE World Congress on Computational Intelligence), Hong Kong, 1322-1328.
- [46] Kurniawati, Y.E., Permanasari, A.E. and Fauziati, S. (2018). Adaptive Synthetic-Nominal (ADASYN-N) and Adaptive Synthetic-KNN (ADASYN-KNN) for Multiclass Imbalance Learning on Laboratory Test Data, 4th International Conference on Science and Technology (ICST), Yogyakarta, Indonesia, 1-6.
- [47] Qing, Z., Zeng, Q., Wang, H., Liu, Y., Xiong, T. and Zhang, S. (2022). ADASYN-LOF Algorithm for Imbalanced Tornado Samples. *Atmosphere*, 13(4): 544.
- [48] Devi, D., Biswas, S.K. and Purkayastha, B. (2020). A Review on Solution to Class Imbalance Problem: Undersampling Approaches, International Conference on Computational Performance Evaluation (ComPE), Shillong, India, 626-631.
- [49] Mazhari, S.A. and Safari, M. (2013). High-K Calc-alkaline Plutonism in Zouzan, NE of Lut Block, Eastern Iran: An Evidence for Arc Related Magmatism in Cenozoic. *Journal Geological Society of India* 81: 698-708.
- [50] Geranian, H. and Carranza, E.J.M. (2022). Mapping of Regional-scale Multi-Element Geochemical Anomalies Using Hierarchical Clustering Algorithms. *Natural Resources Research* 31(4): 1841-1865.
- [51] Seyedrahimi-Niaq, M., Mahdiyanfar, H. and Mokhtari, A. R. (2023). Application of geochemical structural methods to determine lead-contaminated areas related to mining activities. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering* 13(34): 41-55.
- [52] Kubat, M. and Matwin, S. (1997). Addressing the course of imbalanced training sets: One-sided selection. *Proceedings of the 14th international conference on machine learning*, Morgan Kaufmann, pp. 179-186.
- [53] Jia, C. and Zuo, Y. (2017). S-SulfPred: A sensitive predictor to capture S-sulfenylation sites based on a resampling one-sided selection undersampling-synthetic minority oversampling technique. *Journal of Theoretical Biology* 422: 84-89.
- [54] Batista, G., Bazzan, A. and Monard, MC. (2003). Balancing Training Data for Automated Annotation of Keywords: A Case Study. II Brazilian Workshop on Bioinformatics, 10-18.
- [55] Hart, P.E. (1968). The Condensed Nearest Neighbour Rule. *IEEE Transactions on Information Theory* 14(5): 515-516.
- [56] Hassani Pak, A.A. (2016). Principles of Geochemical Exploration. Tehran University Press, Tehran [In Persian].
- [57] Fakhari, S., Jafarirad, A., Afzal, P., and Lotfi, M. (2019). Delineation of hydrothermal alteration zones for porphyry systems utilizing ASTER data in Jebal-Barez area, SE Iran. *Iranian Journal of Earth Sciences*, 11: 80-92.
- [58] Mokhtari, Z., and Seifi, A. (2021). Detection of Hydrothermal Alteration Zones Using ASTER Remote Sensing Data in Turquoise mine of Neyshabur. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 11(28): 1-22 [In Persian].



Research article

Numerical Modeling for Determining the Optimal cable Bolt Pattern in the Stability Analysis of Underground Spaces

Mosleh Eftekhari^{1*}, Mohammad Hossein Mokhtarzadeh¹, Amir Hossein Kazemini Nik²

1- Dept. of Mining and Materials Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Dept. of Mining Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

(Received: 25 May 2025, Revise: 19 August 2025, Accepted: 06 September 2025)

DOI: [10.22034/ANM.2025.23174.1678](https://doi.org/10.22034/ANM.2025.23174.1678)

Keywords

English Extended Abstract

Cable bolt
Cable bolt Pattern
Stability analysis
Optimization
Tunnels and Underground spaces

Summary

One of the most important challenges in underground excavation projects is ensuring stability in weak ground conditions. Cable bolts are widely used as a reinforcement system due to their high load-bearing capacity and flexibility in various geological environments. In this study, numerical modeling using FLAC3D was conducted to evaluate different cable bolt patterns, including conventional, short–long, and spiral arrangements. The results showed that the short–long pattern, with alternating bolt lengths of 5 and 7.5 m at a spacing of 1.5 × 2.2 m, reduced tunnel displacement from 7.0 cm (Sakurai's allowable limit) to 5.5 cm while lowering cable consumption by about 10% (equivalent to 175 m in a 28 m tunnel). The spiral arrangement using 7.5 m bolts achieved the lowest displacement (3.5 cm), although it required more complex installation. Overall, the short–long pattern was identified as the most practical and cost-effective option, balancing stability improvement and material savings, and is therefore recommended as the optimal support design in weak ground conditions.

Introduction

The stability of underground excavations is one of the most critical issues in mining and civil engineering. Among the available support systems, cable bolts are widely applied due to their high load-bearing capacity and suitability in weak ground conditions. However, inappropriate design or arrangement may lead to unnecessary material consumption or insufficient support. This study focuses on determining an optimal cable bolt pattern to enhance tunnel stability while minimizing material usage.

Methodology and Approaches

A continuous medium was numerically modeled using FLAC3D software to simulate the behavior of underground tunnels supported by cable bolts. Several bolt patterns were investigated, including the conventional arrangement, the short–long alternating pattern, and the spiral arrangement. The analysis considered tunnel displacement, plastic zone development, and material consumption to evaluate the efficiency of each support scheme.

Results and Conclusions

Simulation results showed that the short–long cable bolt pattern significantly reduced tunnel displacement compared to the conventional arrangement, achieving stability with about 10% less material consumption. The spiral arrangement further decreased displacement but required more complex installation. Overall, the short–long pattern was identified as the most practical and economical

*Corresponding author: E-mail: mosleh.eftekhari@modares.ac.ir



option, providing improved stability while reducing support costs.

References

- [1] Bagheri, M.; Jalalifar, H.; R. Rahmancejad, R.,(2008), The Evaluation and Applicability of Rock Bolts in Coal Mines with regard to the Kerman Province Mines. In: Proceedings of the Aachen international symposium on Roofbolting in Mining, March 2008. Publisher: Wissenschaftsverlag Mainz in Aachen; pp 257- 274.
- [2] Sanmariam Esfahani, N., Azari, A., Baghbanan, A., Hashem Al-Hosseini, H. (2023). Evaluation of optimal rock bolt arrangement for the stability of a jointed rock mass using 3D DEM-DFN method – Case study: Kolab 2 cavern. *Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 13(34), 67–81. [In Persian]
- [3] Croney P. Legge T. and Dhalla A., (1978), Location of block release mechanism in tunnels from geological data and the design of associated support. *Computer Methods in Tunnel Design*. Institute of Civil Engineers. London, pp 97-119.
- [4] Everling G., (1964), Model test concerning the interaction of ground and roof support in gate roads. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 1, pp 319-326.
- [5] Fahimifar, A.; Soroush, H. (2004): A theoretical approach for analysis of the interaction between grouted rockbolts and rock masses. In: *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(2004), Issue 4; Publisher: Elsevier Press; pp 333-343.
- [6] Farmer IW, Shelton PD., (1980), Factors that affect underground rockbolt reinforcement systems design. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy* (1980);89:68-83.
- [7] .Goodman R. E. and Shi G., (1985), *Block Theory and Its Application to Rock Engineering*. Englewood Cliffs, New Jersey.
- [8] Habenicht H., (1983), The anchoring effects – our present knowledge and its shortcomings – A key note lecture. *Proc. of Int. Symp. on Rock Bolting, Abisko*, pp 253-268.
- [9] Hobbs D. W., (1968), Scale model studies of strata movement around mine roadways. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 5, pp 219-235.
- [10] Hoek E., (1963), Experimental study of rock stress problems in deep level mining. *Proc. 1st Congr. on Experimental Mechanics*, New York, pp 177-193.
- [11] Hoek E. ,(2007), Model to demonstrate how bolts work. In: *Practical rock engineering*.
- [12] Itasca Consulting Group, (2015), *FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua*, Version 5.1., ITASCA Consulting Group, Inc, Minneapolis, MN.
- [13] Junlu, L. (1999): A new rockbolt design criterion and knowledge expert system for stratified roof. The Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University; Dissertation. In: website: www.eng.unsw.edu.au/faculty/publicat/2007/Eng%20Research%20Guide.pdf.
- [14] Kaiser PK, Tannant DD, McCreath DR. ,(1996), *Canadian rock burst support handbook*. Sudbury, Canada: Geomechanics Research Center.
- [15] Li C. C., (2017), Principles of rockbolting design, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp 396-414.
- [16] Kovari, K. (2004): History of rockbolt and the sprayed concrete lining method. In: *Proceedings of the Aachen International symposium on Roofbolting in Mining* (2004); Publisher: Wissen-schaftsverlag Mainz in Aachen; pp 39 – 85.
- [17] Rabcewicz, L. V. (1964). The new Austrian tunnelling method. *Water power*
- [18] Panek LA., (1964), Design for bolting stratified roof. *Transactions of the Society of Mining Engineers* ;229:9-13.
- [19] Coates DF, Cochrane TS. , (1970), Development of design specifications for rock bolting from research in Canadian mines. *Research Report R224*. Mining Research Centre, Energy, Mines and Resources Canada.



- [20] Lang T. ,(1972), Rock reinforcement. Bulletin of the International Association of Engineering Geology;9: 15-39.
- [21] Barton N, Lien R, Lunde J. ,(1974), Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics;6(4),pp 189-239.
- [22] Schach R, Garschol K, Heltzen AM., (1979),Rock bolting: a practical handbook. Oxford: Pergamon
- [23] .Farmer IW, Shelton PD., (1980), Factors that affect underground rockbolt reinforcement systems design. Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy (1980);89:68-83.
- [24] Crawford AM, Ng L, Lau KC. ,(1985), The spacing and length of rock bolts for underground openings in jointed rock. In: Einsenstein Z, editor. Proceedings of the 84 5th international conference on numerical methods in geomechanics. A.A. Balkema. pp 293-300.
- [25] Stillborg B., (1994), Professional user's handbook for rockbolting. ClausthalZellerfeld: Trans Tech Publications.
- [26] .Schubert W., (2001), Recent experience with squeezing rock in Alpine tunnels. In: CUC erock support in medium to poor rock conditions.
- [27] Li CC., (2012), Design principles of rock support for underground excavations. In: Eurock 2012. Stockholm, Sweden.
- [28] Ziping, H. (2001): Stabilizing of rock cavern roofs by rockbolts. Department of geology and mineral resources engineering; Faculty of applied earth science; Norwegian University of Science and Technology; PhD thesis.
- [29] .Ng C.W.W., Lee G.T.K., (2002) , A three-dimensional parametric study of the use of soil nails for stabilising tunnel faces", Computers and Geotechnics, Vol. 29:pp 673-697.
- [30] .Fellin W., King J., Kirsch A., (2010), Oberguggenberger M., "Uncertainty modelling and sensitivity analysis of tunnel face stability", Structural Safety Vol. 32 402-410.
- [31] Sakurai, Sh.; 2010; "Modeling strategy for jointed rock masses reinforced by rock bolts in tunneling practice". Acta Geotechnica, Vol. 5.2, pp. 121-126.
- [32] Kaya, A.; Bulut, F.; and Sayin A.; 2011; "Analysis of support requirements for a tunnel portal in weak rock: A case study from Turkey". Scientific Research and Essays, Vol. 6(31), pp.6566-6583.
- [33] Lorig, L. J.; Varona, P.; 2013; "Guidelines for numerical modelling of rock support for mines." Proceedings of the Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction. Australian Centre for Geomechanics, pp. 81-105.
- [34] Mark C., (2015) , Design of roof bolts systems, Ergonomics in Mining project.
- [35] Boon, C. W.; Houlsby, G. T.; Utili, S.; 2015; "Designing tunnel support in jointed rock masses via the DEM." Rock mechanics and rock engineering, Vol. 48.2, pp. 603-632.
- [36] Shreedharan, S.; Kulatilake, P.; 2016; "Discontinuum-equivalent continuum analysis of the stability of tunnels in a deep coal mine using the distinct element method". Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 49.5: pp. 1903-1922.
- [37] Skrzypkowski, K., Korzeniowski, W., Zagórski, K., & Zagórska, A. (2019). Flexibility and Load-Bearing Capacity of Roof Bolting as Functions of Mounting Depth and Hole Diameter. *Energies*, 12(19), 3754.
- [38] Sarfarazi, Vahab & Asgari, Kaveh & Nasrollahi, Mehdi. (2021). Interaction between rock bolt and rock bridge under tensile loading. *Geomechanics and Geoengineering*. 25. 455-471. 10.12989/gae.2021.25.6.455.
- [39] Fu, J., Sarfarazi, V., Haeri, H., Zarei, A. S., Bahrami, R., Imani, M., & Marji, M. F. (2024). Experimental and Numerical Analyses of Shear Failure Mechanisms of Rock Bolt Surrounded by Bedded Rock. *International Journal of Geomechanics*, 24(12), 04024276.
- [40] Longji Guo, Zhigang Tao, Manchao He, Massimo Coli. (2024). Excavation compensation and bolt support for a deep mine drift, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Volume 16, Issue 8, Pages 3206-3220, ISSN 1674-7755.
- [41] Chenglei Du, Yong Cheng, Quansheng Liu, Zitao Cheng, Yiwei Liu, You Lu, Haitao Jiang. (2025). A new type of rockbolt model in 3D FDEM and its application to tunnel excavation, *Tunnelling and Underground Space*



Technology, Volume 155, Part 1, 106210, ISSN 0886-7798

- [42] Sarfarazi, V. , Zhou, L. , Haeri, H. , Salehipour, P. , Elahi, A. , Moayer, A. and Fatehi Marji, M. (2025). Failure Mechanisms of Concrete-Bolt Attachment Surface: Impact of Cable Bolt Indent Number and Shape. *Journal of Mining and Environment*, 16(1), 223-239.
- [43] Karami, M., Abreh, B., Faramarzi, L. (2012). *Practical training in FLAC3D software*. Isfahan University of Technology - Academic Jahad Publications. [In Persian]
- [44] Hosseini, M., Afzal Aghaei, A. (2012). Back analysis of Siyah Bisheh dam power plant cavern using instrumentation data. *Journal of Mining Engineering*, 7, [In Persian].



Research article

Enrichment of low-grade Hematite sample by gravity and magnetic methods (Case study: Red soil of Sahel mine)

Seyed Hamzeh Amiri¹, Marzieh Hosseini Nasab^{2*}, Mohammad Noaparast¹, Seyyed Ziaodin Shafaei¹

1- Dept. of Mining Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Dept. of Mining Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

(Received: 04 March 2025, Revise: 06 September 2025, Accepted: 09 September 2025)

DOI: 10.22034/anm.2025.22874.1669

Keywords

Red soil
Hematite
Shaking Table
Magnetic Separation
Full factorial

English Extended Abstract

Summary

In this research, concentration of red soil ore located in Bandar Abbas west was investigated. Mineralogical studies showed that iron minerals in sample contain Hematite and Goethite, Calcite and Quartz are main part of gangue minerals. According to chemical assaying, the average iron grade of ore was 44.71% Hematite (31.3% Fe) and our aim is achieve to grade above 55% Hematite. Gravity (Shaking Table), Wet High-Intensity Magnetic Separation, and Dry High-Gradient Magnetic Separation tests were carried out on sample for concentration and reducing gangue minerals. The tests of Shaking Table were designed by use of full factorial method and effect of dip, cleaning water and feed water flow rates were investigated. For Shaking Table tests in size fraction +150 microns with feed water flow rate 8 l/min, dip 8° and wash water flow rate 11.5 l/min –regarding as best performance condition- concentration assay and recovery were 55.87% Hematite and 63.25% respectively and it can be used for pre-concentration. According to assay distribution after feed disliming, Dry High-Gradient Magnetic Separation for two-size fraction -2380+1000 and -1000+150 microns was used. For size fraction of -2380+1000 microns concentration assay and relative recovery were 57.6% Hematite and 95.11% respectively and for size fraction -1000+150 microns concentration assay and relative recovery were 64.34% Fe₂O₃ and 75.14% respectively. For Wet High-Intensity Magnetic Separation, concentration assay and relative recovery were 57.53% Hematite and 64.9% respectively. Also after using more tests related to Wet High-Intensity Magnetic Separation and applying two cleaner stages, concentration grade reach to 80.17% Hematite.

Introduction

Today, the extensive applications and needs of various industries for red soil have led humans to exploit new reserves of red soil and even to produce artificial red soil due to the low quality and quantity of natural red soil [1-3].

The sample studied in this research belongs to the Sahel mine in Hormozgan province, which is located 20 km west of Bandar Abbas. This mine is an example of the numerous and low reserves in the region that are not economically exploited. The present study aims to increase productivity and benefit for mines whose extracted products are currently sold without processing and only in the form of granules to cement production units in the region and the southern Persian Gulf countries.

Since the difference in specific gravity is significant for iron-bearing and waste minerals, most physical enrichment methods can be applied to iron ores [4]. The common method of concentrating iron ores,

*Corresponding author: E-mail: hosseininasab@eng.usb.ac.ir



especially deposits such as red soil that contain iron oxide particles in the form of Hematite that have weak magnetic properties, is magnetic concentration, which is the cheapest and most efficient method of concentrating and removing iron impurities [5].

Methodology and Approaches

All materials were crushed to a size smaller than 2.35 mm. After crushing the sample using a roller crusher, the sample was mixed and homogenized. The d80 of the final product is approximately 1110 μm .

The results of XRD analysis showed that the main minerals in the sample were Hematite, calcite, and quartz. The Titration analysis showed that the amount of iron in the sample was 31.3 percent (44.71% Hematite).

The Bond work index and the optimal grinding time of the sample were determined.

Processing tests include shaking table, dry and wet magnetic tests performed to enrich the red soil sample. Design Expert 7 software was used to design the experiments.

Results and Conclusions

As the slope of Shaking Table increases, the grade increases, and as the feed water flow rate increases, the grade decreases. To achieve high grade, the slope factor should be selected at a high level, the feed water at a low level, and the wash water factor (due to the interaction) at the opposite level of the slope.

By increasing the feed water parameter, the retention time of the particles in the magnetic separator is reduced, so completely valuable particles enter the concentrate and increase the grade.

Considering the initial sample dimensions, which were smaller than 5 mm, the Bond work index of the sample was 8.29 kWh/short ton, which indicates low energy consumption for achieving dimensions smaller than 150 microns.

In 4 minutes, 90% of the material passes through the 150 μm screen, and therefore the optimal grinding time can be considered to be 4 minutes.

In the experiments with the table separator, the parameters of table slope, feed water and interaction of slope and wash water were the most effective parameters on Fe_2O_3 grade and slope was the most effective parameter on Fe_2O_3 recovery, respectively, and finally a concentrate with a grade of 55.87% Fe_2O_3 and a relative recovery of 63.25% was obtained.

The best results were obtained using high wet intensity magnetic separators. With an enrichment step, a product with a grade of 57.53% Fe_2O_3 and a recovery of 64.9% was obtained. Also, in the continuation of the supplementary high intensity wet magnetic separation experiments, a product with a grade of 80.17% Fe_2O_3 and a recovery of 36.5% was obtained after two cleaning stages.

High gradient dry magnetic separation was performed for two dimensional ranges of -2380+1000 microns and -1000+150 microns, where the dimensional range of -2380+1000 microns had a product with a grade of 57.6% Fe_2O_3 and a relative recovery of 95.11%, and the dimensional range of -1000+150 microns had a product with a grade of 64.34% Fe_2O_3 and a relative recovery of 75.14%.

Considering the fineness of part of the sample, it is recommended to conduct flocculation experiments costs.

References

- [1] Potter, M. J., (2010). "2007 Minerals yearbook, Iron oxide pigments", U.S., Geological Survey.
- [2] Karimpour, M., (2006). Industrial Minerals and Stones, Ferdowsi University of Mashhad, 398 p. [In Persian]
- [3] Farahmandpour, Sh., (2005). "Ochre and its application in the dye industry", Master's thesis, Supervisor: Dr. Frank Feyzi, Mining Engineering Department, Islamic Azad University, South Tehran Branch. [In Persian]
- [4] Nematollahi, H., (2003). Mineral Processing, Tehran University Press, 432 p. [In Persian]
- [5] Derakhshi, M. (1973). Investigation of Magnetic Separation, Amirkabir University Master's Seminar. [In Persian]
- [6] Chatterjee, K., 2009, "Uses of Industrial Minerals and Rocks and Freshwater", Nova Science Publishers Inc., New



York.

- [7] Chatterjee, k., 2007, "Uses of metals and metallic minerals", New Age International Publishers, New Delhi.
- [8] Jafarzadeh, A., Ghorbani, M., Pezeshkpour, M., 1995, "Geology of Iran: Iron Deposits", Ministry of Industries and Mines Publications, Geology and Mineral Exploration Organization of the Country, 213 pages. [In Persian]
- [9] Renaud, K. M., 2023, "2017-2018 Minerals Yearbook, india", U.S., Geological Survey.
- [10] Ghosh, G. K., 2019, "Red and lateritic soils and agri-productivity: Issues and strategies", Journal of the Indian Society of Soil Science, 67(4), S104-S121.
- [11] Harben, P. W., 1999, "The Industrial Minerals andybook: A Guide to Markets, Specifications, & Prices", Industrial Minerals Information, 296 pages.
- [12] "Hematite iron ore, from chemical formula to method of identification and application", Majd Steel, <http://www.majdstel.com> ·2025/06/03. [In Persian]
- [13] Cornell, R. M., Schwertmann, U., 2000, "The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses", 1st edition, Wiley-chv.
- [14] Aydin, G., Sivrikaya, O., Sozeri, H., 2009, "Production of hematite concentrate from low grade hematite ores", Proceeding of the XIII Balkan mineral processing congress, 466-469.
- [15] Liu, C. S., Li, J. S., Tang, H. Y., Gao, Y. W., 2014, "Research on mineral processing for high silica low grade hematite ore in Xinjiang", Ironmaking & Steelmaking, 41(7), 481-485.
- [16] Behnamfard, A., Khaphaje, E., 2019, "Characterization of Sangan low-grade iron ore and its processing by dry low-intensity magnetic separation", International Journal of Mining and Geo-Engineering, 53(2), 111-116.
- [17] Akbari, H., Noaparast, M., Shefaei Tonekaboni, Z., Hajati, A., 2016, "Gravity enrichment of hematite sample from Tang-Zagh mine by shaking table using Box-Behnken experimental design model", 10th Mining Engineering Student Conference, Kashan. [In Persian]
- [18] Kong, H., Zhou, T., Yang, X., Gong Y., Zhang, M., Yang, H., 2022, "Iron recovery technology of red mud—a review", Energies, 15(10), 3830.
- [19] Jiang, L., Liu P., Yang, X., Zhang, Y., Li, F., 2019, "Comparative Classification Studies of Red Mud by Using Hydrocyclones", Miner. Eng., 131, 124–130.
- [20] Jamieson, E., Jones, A., Cooling, D., Stockton, N., 2006, "Magnetic Separation of Red Sand to Produce Value", Miner. Eng., 19, 1603–1605.
- [21] Li, W., Han, Y., Liu, X., Shan, Y., Li, Y., 2019, "Effect of Fluidized Magnetizing Roasting on Iron Recovery and Transformation of Weakly Magnetic Iron Mineral Phase in Iron Tailings", Physicochem. Probl. Miner. Process., 55, 906–916.
- [22] Li, Y., Wang, J., Wang, X., Wang, B., Luan, Z., 2011, "Feasibility Study of Iron Mineral Separation from Red Mud by High Gradient Superconducting Magnetic Separation", Phys. C Supercond, vol. 471, issue 3-4, pp. 91–96.
- [23] Navi, N., Karamoozian, M., Khani, M. R., 2023, "Recovery of Iron from Bauxite Red Mud by Reduction Roasting Method", Journal of Mining and Environment, 14(4), 1295-1305.
- [24] Chen, R., Shi, L., Huang, H., Yuan, J., 2023, "Extraction of iron and alumina from red mud with a non-harmful magnetization sintering process", Minerals, 13(3), 452.
- [25] Xiao, J., Zou, K., Zhong, N., Gao, D., 2023, "Selective separation of iron and scandium from Bayer Sc-bearing red mud", Journal of Rare Earths, 41(7), 1099-1107.
- [26] Xiao, J., Zhong, N., Gao, D., Zou, K., Wang, Z., Huang, W., Xiong, W., 2022, "An efficient process to recover iron from Bayer red mud", JOM, 74(8), 3172-3180.
- [27] Wang, K., Dou, Z., Liu, Y., Li, X., Lv, G., Zhang, T. A., 2022, "Summary of research progress on separation and extraction of valuable metals from Bayer red mud", Environmental Science and Pollution Research, 29(60), 89834-89852.
- [28] Abolpour, B., Abbaslou, H., Balvardi, M., 2022, "Enrichment of hematite iron mineral by reduction method and



دانشگاه
وازد

*Journal of Analytical and Numerical
Methods in Mining Engineering*

Journal home page: <http://anm.vazd.ac.ir/>



investigation of its properties", Fifth National Congress of Chemistry and Nanochemistry from Research to Technology, Tehran, Iran. [In Persian]

- [29] Su, W., Tan, X., Wang, Z., 2024, "Critical applications of scandium and progress in the extraction of different scandium resources", In E3S Web of Conferences (Vol. 520, p. 03001), EDP Sciences.
- [30] Yu, Q., Jin, Y., Lu, S., Ma, D., 2024, "Recent Research on Recovery of Iron and Aluminium from Bauxite Residue in China", TRAVAUX 53, Proceedings of the 42nd International ICSOBA Conference, Lyon, 27 - 31 Oct. 2024, pp. 701-710.
- [31] Fariss, A. H. B., Ibrahim, A. I. I., Ozdemir, A. C., Top, S., Kursunoglu, S., Altiner, M., 2025, "Beneficiation of Low-Grade Iron Ore Using a Dry-Roll Magnetic Separator and its Modeling via Artificial Neural Network", Journal of Sustainable Metallurgy, 1-17.
- [32] Song, S., 2002, "Magnetite separation of Hematite and Limonite Fines as Hydrophobic Floccs from Iron Ores", Mineral Engineering, vol. 15, issue 6, pp. 415-422.



Review article

A Review of the Utilization of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Open-pit and Underground Mining Design: Current State, Challenges, and Future Prospects

Amirhossein Vahedi¹, Alireza Baghbanan^{1*}, Amin Azhari¹, Ahmad Rahmani-Shahraki¹

1- Dept. of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

(Received: 09 April 2024, Revise: 05 October 2024, Accepted: 05 October 2024)

DOI: [10.22034/anm.2024.21440.1632](https://doi.org/10.22034/anm.2024.21440.1632)

Keywords

Photogrammetry
Unmanned Aerial Vehicle (UAV)
3D Rockmass modeling
Joint mapping

English Extended Abstract

Summary

A digital photogrammetry has become a widely utilized technique for mapping geological features and characterizing rock masses in mining operations. Despite its advantages, challenges persist in capturing geotechnical data in remote mining areas, leading to incomplete models that could result in significant risks, such as collapses in underground excavations. Kinematic analysis of discontinuities can help predict potential failures, addressing data gaps. The integration of unmanned aerial vehicles (UAVs) has improved data collection, enabling high-resolution imagery and accurate topographic data even in difficult conditions. In this review study, an introduction to the significance of investigating jointed rock masses and the factors influencing their formation mechanisms is first presented. Subsequently, case studies of modeling jointed rock masses using aerial data collected via drones are provided. Additionally, the challenges associated with utilizing various types of drones in the mining industry for future studies are discussed.

Introduction

The integration of drone technology into mining operations has revolutionized the way geological surveys and resource management are conducted in both open-pit and underground mining environments. With the increasing demand for efficient and precise data collection, drones have emerged as a vital tool for enhancing operational efficiency, safety, and environmental sustainability in the mining sector. This review synthesizes insights from over 60 scholarly articles, highlighting the current state of drone applications in mining, encompassing various methodologies and technological advancements that have shaped contemporary practices. The primary objective of this study is to critically evaluate the existing literature on the utilization of drone technology in mining design and extraction processes. By examining both open-pit and underground mining contexts, this review aims to identify key challenges that practitioners face when implementing drone technology, such as regulatory compliance, data processing complexities, and operational limitations. Furthermore, it seeks to explore future prospects for drone applications in mining, offering recommendations for overcoming existing barriers and enhancing the efficacy of this transformative technology in the industry.

Methodology and Approaches

This review article utilizes a systematic literature review methodology to assess the current applications of drone technology in the design and extraction processes of both open-pit and underground mining. The research commenced with a comprehensive search for relevant scholarly articles published in peer-reviewed journals, conference proceedings, and industry reports. Academic databases such as Scopus, Web of Science,

*Corresponding author: E-mail: bagh110@iut.ac.ir



and Google Scholar were employed, focusing on keywords including "drone technology," "photogrammetry," "geospatial data," "mining," and "rock mass modeling".

The selection criteria for the articles included relevance to mining contexts, recency—favoring publications from the last decade to capture the latest advancements—and peer-reviewed status to ensure credibility. This approach ensured that only high-quality studies were included in the review.

Key information was extracted from the identified articles and categorized thematically. The extraction focused on several critical aspects: technological innovations, including types of drones and sensors used; case studies illustrating practical applications of drone technology in various mining scenarios; challenges faced in implementing these technologies, such as regulatory compliance and the need for specialized training; and future directions that highlight potential advancements like artificial intelligence integration for enhanced data analysis.

The findings were organized into categories such as application phases (exploration, exploitation, reclamation), technological advancements (e.g., LiDAR and multispectral imaging), challenges related to operational training and regulatory compliance, and future directions emphasizing AI integration and real-time data processing optimization. This thematic analysis facilitated a structured synthesis of findings that underscores best practices for integrating drones into mining design and extraction processes.

Additionally, the review highlights the importance of accurate geotechnical data acquisition for effective rock mass modeling. It emphasizes that precise data collection significantly influences various aspects of engineering design, including slope stability assessments and resource estimation. The study also acknowledges limitations in encompassing all emerging technologies or regional practices due to the dynamic nature of the field. Future research should continue to explore innovative applications of drone technology as they evolve within the mining industry, aiming to enhance safety, efficiency, and accuracy in mining operations through advanced data collection techniques.

Moreover, this review aims to provide a comprehensive understanding of how photogrammetry can enhance rock mass modeling by integrating high-resolution aerial imagery with advanced analytical techniques. By addressing various methodologies employed in drone-based data collection, this study seeks to inform future research directions and practical applications in mining engineering.

Results and Conclusions

The findings of this review highlight the significant advancements in drone technology and its applications in both open-pit and underground mining. The analysis of over 60 scholarly articles reveals that the integration of drone-based photogrammetry has substantially improved data collection efficiency, accuracy, and safety in mining operations. The results indicate that drones facilitate rapid surveying of geological features, enabling the creation of high-resolution three-dimensional models that are essential for geotechnical assessments. The use of Structure from Motion (SfM) techniques has emerged as a particularly effective method for generating detailed point clouds, which can be utilized for various engineering analyses, including slope stability evaluations and resource estimation. The accompanying figure illustrates the comparative advantages of drone-based photogrammetry over traditional surveying methods. It depicts the time efficiency, cost-effectiveness, and data quality improvements achieved through drone applications. Notably, the figure emphasizes the ability of drones to access remote or hazardous areas safely, thereby mitigating risks associated with manual data collection. As a result, the review concludes that while challenges such as regulatory compliance and the need for specialized training persist, the future prospects for drone technology in mining are promising. Continued advancements in sensor technology and software development are expected to further enhance the capabilities of drones, making them indispensable tools for modern mining operations. This study underscores the importance of adopting innovative technologies to improve operational efficiency and safety in the mining industry while paving the way for future research and development in this rapidly evolving field.



References

- [1] L. G. De Vallejo and M. Ferrer, Geological engineering. CRC press, 2011.
- [2] M. Lato and M. Vöge, "Automated discontinuity orientation mapping from lidar data," in ISRM International Symposium-EUROCK 2012, 2012: OnePetro.
- [3] M. Levy and P. Visca, "Statistical characterization of rock structure using LiDAR," in 43rd US Rock Mechanics Symposium & 4th US-Canada Rock Mechanics Symposium, 2009: OnePetro.
- [4] J. Coggan, A. Wetherelt, X. Gwynn, and Z. Flynn, "Comparison of hand-mapping with remote data capture systems for effective rock mass characterisation," in 11th ISRM Congress, 2007: OnePetro.
- [5] F. Azhari, S. Kiely, C. Sennersten, C. Lindley, M. Matuszak, and S. Hogwood, "A comparison of sensors for underground void mapping by unmanned aerial vehicles," in UMT 2017: Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology, 2017: Australian Centre for Geomechanics, pp. 419-430.
- [6] J. Kottenstette, "Measurement of geologic features using close range terrestrial photogrammetry," in Alaska Rocks 2005, The 40th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS), 2005: OnePetro.
- [7] T. Dang, "The use of photogrammetry in measuring geologic structures and creating a 3D model on exposed rock faces," in ISRM VietRock International Workshop, 2015: OnePetro.
- [8] Q. Liu, "Remote sensing technologies in rock mass characterization," in ISRM SINOROCK 2013, 2013: OnePetro.
- [9] F. Remondino, L. Barazzetti, F. Nex, M. Scaioni, and D. Sarazzi, "UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling-current status and future perspectives," International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, vol. 38, no. 1, p. C22, 2011.
- [10] J. Birch, "Using 3DM analyst mine mapping suite for slope stability-case studies," Proceedings of ACG geotechnical engineering for open pit mines, section, vol. 17, pp. 1-15, 2009.
- [11] W. Greenwood, D. Zekkos, J. Lynch, J. Bateman, M. Clark, and D. Chamlagain, "UAV-Based 3-D characterization of rock masses and rock slides in Nepal," in 50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 2016: OnePetro.
- [12] A. Tamburini, D. Martelli, W. Alberto, and F. Villa, "Geomechanical rock mass characterization with Terrestrial Laser Scanning and UAV," in 49th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 2015: OnePetro.
- [13] I. Colomina and P. Molina, "Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review," ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing, vol. 92, pp. 79-97, 2014.
- [14] S. D. Priest, Discontinuity analysis for rock engineering. Springer Science & Business Media, 1993.
- [15] G. P. Giani, Rock slope stability analysis. CRC Press, 1992.
- [16] C. Cryderman, S. B. Mah, and A. Shufletoski, "Evaluation of UAV photogrammetric accuracy for mapping and earthworks computations," Geomatica, vol. 68, no. 4, pp. 309-317, 2014.
- [17] D. H. Kim, I. Gratchev, and A. Balasubramaniam, "A photogrammetric approach for stability analysis of weathered rock slopes," Geotechnical and Geological Engineering, vol. 33, no. 3, pp. 443-454, 2015.
- [18] J. C. Rosser Jr, V. Vignesh, B. A. Terwilliger, and B. C. Parker, "Surgical and medical applications of drones: A comprehensive review," JSLS: Journal of the Society of Laparoendoscopic Surgeons, vol. 22, no. 3, 2018.



- [19] S. Manfreda et al., "On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring," *Remote Sensing*, vol. 10, no. 4, p. 641, 2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/4/641>.
- [20] W. A. Hustrulid, M. Kuchta, and R. K. Martin, *Open pit mine planning and design*, two volume set & CD-ROM pack. CRC Press, 2013.
- [21] Y. Choi, J. Baek, and S. Park, "Review of GIS-Based Applications for Mining: Planning, Operation, and Environmental Management," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 7, p. 2266, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/7/2266>.
- [22] J. J. Cress, M. Hutt, J. Sloan, M. Bauer, M. Feller, and S. Goplen, *Us geological survey unmanned aircraft systems (uas) roadmap 2014*. US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, VA, USA, 2015.
- [23] S. Lee and Y. Choi, "Reviews of unmanned aerial vehicle (drone) technology trends and its applications in the mining industry," *Geosystem Engineering*, vol. 19, no. 4, pp. 197-204, 2016.
- [24] M. Paisiriyuenyong and M. C. Smith, "Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Technology in Thailand, and Applying Marketing in the Mining Industry," *Thammasat University Bangkok, Thailand*, 2016.
- [25] H. Ren, Y. Zhao, W. Xiao, and Z. Hu, "A review of UAV monitoring in mining areas: Current status and future perspectives," *International Journal of Coal Science & Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 320-333, 2019.
- [26] A. Buczyńska, "Remote sensing and GIS technologies in land reclamation and landscape planning processes on post-mining areas in the Polish and world literature," in *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2209, no. 1: AIP Publishing LLC, p. 040002.
- [27] G. M. Dering, S. Micklethwaite, S. T. Thiele, S. A. Vollgger, and A. R. Cruden, "Review of drones, photogrammetry and emerging sensor technology for the study of dykes: Best practises and future potential," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 373, pp. 148-166, 2019.
- [28] Q. Wang et al., "Accuracy evaluation of 3d geometry from low-attitude uav collections a case at zijin mine," *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 40, no. 4, p. 297, 2014.
- [29] S.-J. Cho, E.-S. Bang, and I.-M. Kang, "Construction of precise digital terrain model for nonmetal open-pit mine by using unmanned aerial photograph," *Economic and Environmental Geology*, vol. 48, no. 3, pp. 205-212, 2015.
- [30] S. Lee and Y. Choi, "Topographic survey at small-scale open-pit mines using a popular rotary-wing unmanned aerial vehicle (drone)," *Tunnel and underground space*, vol. 25, no. 5, pp. 462-469, 2015.
- [31] S. Lee and Y. Choi, "On-site demonstration of topographic surveying techniques at open-pit mines using a fixed-wing unmanned aerial vehicle (drone)," *Tunnel and Underground Space*, vol. 25, no. 6, pp. 527-533, 2015.
- [32] S. Lee and Y. Choi, "Comparison of topographic surveying results using a fixed-wing and a popular rotary-wing unmanned aerial vehicle (drone)," *Tunnel and Underground Space*, vol. 26, no. 1, pp. 24-31, 2016.
- [33] P. Rossi, F. Mancini, M. Dubbini, F. Mazzone, and A. Capra, "Combining nadir and oblique UAV imagery to reconstruct quarry topography: Methodology and feasibility analysis," *European Journal of Remote Sensing*, vol. 50, no. 1, pp. 211-221, 2017.
- [34] P. G. Chirico and J. D. DeWitt, "Mapping informal small-scale mining features in a data-sparse tropical environment with a small UAS," *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 69-91, 2017.
- [35] M. Gil and P. Frąckiewicz, "Optimization of the location of observation network points in open-pit mining's,"



2019: GIS Forum.

- [36] A. Tscharf, M. Rumpler, F. Fraundorfer, G. Mayer, and H. Bischof, "On the use of UAVs in mining and archaeology-geo-accurate 3d reconstructions using various platforms and terrestrial views," *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 2, no. W1, pp. 15-22, 2015.
- [37] J. Xiang, J. Chen, G. Sofia, Y. Tian, and P. Tarolli, "Open-pit mine geomorphic changes analysis using multi-temporal UAV survey," *Environmental earth sciences*, vol. 77, no. 6, pp. 1-18, 2018.
- [38] F. Beretta, H. Shibata, R. Cordova, R. d. L. Peroni, J. Azambuja, and J. F. C. L. Costa, "Topographic modelling using UAVs compared with traditional survey methods in mining," *REM-International Engineering Journal*, vol. 71, pp. 463-470, 2018.
- [39] B. Kršák et al., "Use of low-cost UAV photogrammetry to analyze the accuracy of a digital elevation model in a case study," *Measurement*, vol. 91, pp. 276-287, 2016.
- [40] L. Ge, X. Li, and A. H.-M. Ng, "UAV for mining applications: A case study at an open-cut mine and a longwall mine in New South Wales, Australia," in *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2016: IEEE, pp. 5422-5425.
- [41] G. Esposito, G. Mastrorocco, R. Salvini, M. Oliveti, and P. Starita, "Application of UAV photogrammetry for the multi-temporal estimation of surface extent and volumetric excavation in the Sa Pigada Bianca open-pit mine, Sardinia, Italy," *Environmental Earth Sciences*, vol. 76, no. 3, pp. 1-16, 2017.
- [42] T. K. McLeod, "3D imaging applications in Earth Sciences using video data acquired from an unmanned aerial vehicle," Carleton University, 2013.
- [43] T. McLeod et al., "Using video acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) to measure fracture orientation in an open-pit mine," *Geomatica*, vol. 67, no. 3, pp. 173-180, 2013.
- [44] D. Vrublová, R. Kapica, E. Jiránková, and A. Strus, "Documentation of landslides and inaccessible parts of a mine using an unmanned UAV system and methods of digital terrestrial photogrammetry," *GeoScience Engineering*, vol. 61, no. 3, p. 8, 2015.
- [45] P. Blistan, L. Kovanič, V. Zelizňaková, and J. Palková, "Using UAV photogrammetry to document rock outcrops," *Acta Montanistica Slovaca*, vol. 21, no. 2, 2016.
- [46] F. Beretta, Á. L. Rodrigues, R. d. L. Peroni, and J. F. C. L. Costa, "Using UAV for automatic lithological classification of open pit mining front," *REM-International Engineering Journal*, vol. 72, pp. 17-23, 2019.
- [47] M. Katuruza and C. Birch, "The use of unmanned aircraft system technology for highwall mapping at Isibonelo Colliery, South Africa," *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 119, no. 3, pp. 291-295, 2019.
- [48] D. Stead, D. Donati, A. Wolter, and M. Sturzenegger, "Application of remote sensing to the investigation of rock slopes: Experience gained and lessons learned," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 8, no. 7, p. 296, 2019.
- [49] J. Hao, X. Zhang, C. Wang, H. Wang, and H. Wang, "Application of UAV Digital Photogrammetry in Geological Investigation and Stability Evaluation of High-Steep Mine Rock Slope," *Drones*, vol. 7, no. 3, p. 198, 2023.
- [50] D. Calì, S. Mineo, and G. Pappalardo, "Digital Rock Mass Analysis for the Evaluation of Rockfall Magnitude at Poorly Accessible Cliffs," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 6, p. 1515, 2023.



- [51] C.-y. JIN, J.-y. ZHANG, Z.-j. YU, and Q. WANG, "Reliability Analysis of Surface Subsidence Based on Response Surface Methodology," *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, vol. 44, no. 12, p. 1734.
- [52] R. Turner, N. Bhagwat, L. Galayda, C. Knoll, E. Russell, and M. MacLaughlin, "Geotechnical Characterization of Underground Mine Excavations from UAV-Captured Photogrammetric & Thermal Imagery," in *52nd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, 2018: OnePetro.
- [53] C. Kanellakis and G. Nikolakopoulos, "Evaluation of visual localization systems in underground mining," in *2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, 2016: IEEE, pp. 539-544.
- [54] G. Freire and R. Cota, "Capture of images in inaccessible areas in an underground mine using an unmanned aerial vehicle," in *UMT 2017: Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology*, 2017: Australian Centre for Geomechanics.
- [55] P. Raj, "Use of Drones in an Underground Mine for Geotechnical Monitoring," The University of Arizona, 2019.
- [56] R. M. Turner, M. M. MacLaughlin, and S. R. Iverson, "Identifying and mapping potentially adverse discontinuities in underground excavations using thermal and multispectral UAV imagery," *Engineering Geology*, vol. 266, p. 105470, 2020.
- [57] J. Mitchell and J. A. Marshall, "Design of a novel auto-rotating uav platform for underground mine cavity surveying," 2017.
- [58] F. Azhari, S. Kiely, C. Sennersten, C. Lindley, M. Matuszak, and S. Hogwood, "A comparison of sensors for underground void mapping by unmanned aerial vehicles," presented at the *UMT 2017: Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology*, Sudbury, 11-13 October, 2017. [Online]. Available: https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1710_33_Sennersten/.
- [59] H. Shakhathreh et al., "Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges," *Ieee Access*, vol. 7, pp. 48572-48634, 2019.
- [60] B. R. Jordan, "A bird's-eye view of geology: The use of micro drones/UAVs in geologic fieldwork and education," *GSA today*, vol. 25, no. 7, pp. 50-52, 2015.
- [61] B. Vergouw, H. Nagel, G. Bondt, and B. Custers, "Drone technology: Types, payloads, applications, frequency spectrum issues and future developments," in *The future of drone use: Springer*, 2016, pp. 21-45.
- [62] L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun, "Survey of important issues in UAV communication networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1123-1152, 2015.

Table of Content

Improving the performance of the dynamic air separator of the pelletizing plant of the GoleGohar Mining and Industrial Company 1

Mohammad Ansari; Payman Khademi; Amir Ali Pourkhosravani; Ali reza Ghasemi; Vahid Karbakhsh; Samad Banisi

Stability Analysis of Intersection Resulted from Slope and Access Tunnels in Tabas Coal Mine using Finite Difference Numerical Method 17

Alireza Tarakameh; Satar Mahdevari; Kourosh Shahriar

Application of resampling algorithms in the imbalanced geochemical data classification Case study; Geochemical data of Qayen 1:100000 sheet 31

Hamid Geranian

Numerical Modeling for Determining the Optimal cable Bolt Pattern in the Stability Analysis of Underground Spaces 49

Mosleh Eftekhari; Mohammad Hossein Mokhtarzadeh; Amir Hossein Kazemini Nik

Enrichment of low-grade Hematite sample by gravity and magnetic methods (Case study: Red soil of Sahel mine) 69

Seyed Hamzeh Amiri; Marzieh Hosseini Nasab; Mohammad Noaparast; Seyyed Ziaodin Shafaei

A Review of the Utilization of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Open-pit and Underground Mining Design: Current State, Challenges, and Future Prospects 89

Amirhossein Vahedi; Alireza Baghbanan; Amin Azhari; Ahmad Rahmani-Shahraki

Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering

Grantee and Publisher: Yazd University, Department of Mining and Metallurgy

Director in chief: Dr. Alireza Yarahmadi Bafghi

Editor in chief: Dr. Mohammad Fatehi Marji

Manager: Dr. Manouchehr Sanei

Executive Director: Mrs. Mahdieh Dehghan Harati

Editorial Board:

Dr. Abdolhamid Ansari (Associate prof., Mining, Geo-Physics, Yazd University, Iran)

Dr. Raheb Bagherpour (Professor, Mining Exploration, Isfahan University of Technology, Iran)

Dr. Reza Dehghan (Associate prof., Mineral Processing, Yazd University, Iran)

Dr. Mohammad Fatehi Marji (Professor, Rock Mechanics, Yazd University, Iran)

Dr. Javad Gholamnejad (Associate prof., Mining Exploitation, Yazd University, Iran)

Dr. abolghasem kamkar Rouhani (Professor, Mining Exploration, Shahrood University of Technology, Iran)

Dr. Ahmad Khodadadi (Professor, Mineral Processing, Tarbiat Modares University, Iran)

Dr. Ahmadreza Mokhtari (Associate Prof., Mining Exploration, Isfahan University of Technology, Iran)

Dr. Reza Rahmnejad (Professor, Rock Mechanics, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran)

Dr. Hojjatollah Ranjbar (Professor, Economic Geology, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran)

Dr. Alireza Yarahmadi Bafghi (Associate Prof., Geo-mechanics, Yazd University, Iran)

International Editorial Board:

Dr. Celal Karpuz (Professor, Rock Mechanics, Middle East Technical University, Ankara, Turkey)

Dr. Thierry Verdel (Professor, Risks and Vulnerability in Geomechanics, Institute National Polytechnique de Lorraine (INPL), Nancy, France)

Editor:

Mrs. Mahdieh Dehghan Harati, Dr. Manouchehr Sanei

Supporters:

Iran Central Iron Ore Company- Bafgh (ICIOC)

Mining Technologies Research Center, Yazd University

Iranian Society of Mining Engineering

Address:

Department of Mining and Metallurgy, Yazd University, Pajouhesh Street, Safaeieh, Yazd, Iran

Postal Box: 89195-741 - **Tell:** +9835-38200131 - **Fax:** +9835-38200131

Email: mm-journal@journals.yazd.ac.ir

Website: www.anm.yazd.ac.ir

*In The Name of Allah, the Most
Compassionate, the Most Merciful*

Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering



Islamic World Science Citation Center



Directory of Open Access Journals



Volume 16, No. 46, Spring 2026

Journal of Analytical & Numerical Methods in Mining Engineering



Volume 16, No.46, Spring 2026

ISSN: 2251-6565

Improving the performance of the dynamic air separator of the ...

M. Ansari; P. Khademi; A. Pourkhosravani; A. Ghasemi; V. Karbakhsh; S. Banisi

Stability Analysis of Intersection Resulted from Slope and Access ...

A. Tarakameh; S. Mahdevari; K. Shahriar

Application of resampling algorithms in the imbalanced geochemical ...

H. Geranian

Numerical Modeling for Determining the Optimal cable Bolt Pattern in ...

M. Eftekhari; M. H. Mokhtarzadeh; A. H. Kazemini Nik

Enrichment of low-grade Hematite sample by gravity and magnetic ...

S. H. Amiri; M. Hosseini Nasab; M. Noaparast; S. Z. Shafaei

A Review of the Utilization of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Open ...

A. vahedi; A. Baghbanan; A. Azhari; A. Rahmani-Shahraki