

یادداشت فنی

تعیین پارامترهای مقاومت برشی مواد دامپ باطله معدن با تکیه بر روش تحلیل برگشتی و تعیین ارتفاع پایدار و فاصله‌ی ایمن دامپ باطله تا دیواره‌ی معدن (مطالعه‌ی موردی: معدن شماره یک گل گهر سیرجان)

مرتضی روستا^۱، جواد غلام نژاد^{۲*}، علیرضا یاراحمدی بافقی^۳، حمیدرضا محمدی^۴، مهدی نجفی^۵

دریافت مقاله: ۹۴/۰۹/۲۶ پذیرش مقاله: ۹۶/۰۸/۳۰

چکیده

از آنجا که بر روی سطح دامپ باطله معدن گل گهر ترک‌های کششی مشاهده گردیده است، بنابراین می‌توان با تقریب خوبی فاکتور ایمنی را برابر یک در نظر گرفته و با استفاده از روش تحلیل برگشتی پارامترهای مقاومت برشی مواد دامپ باطله را تخمین زد. در این تحقیق از روش‌های عددی و تحلیلی با نرم‌افزارهای **FLAC/SLOPE** و **Slide** و نیز نمودارهای ارایه شده توسط هوک و بری (**Hoek and Bary**) برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی مواد استفاده گردیده و نتایج آن‌ها با هم مقایسه شده اند. مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای مواد دامپ با استفاده از دو روش عددی و تحلیلی به ترتیب $21/4$ کیلو پاسکال و 24 درجه و $19/2$ کیلو پاسکال و 24 درجه و با استفاده از نمودار ارایه شده هوک و بری نیز به ترتیب 21 کیلو پاسکال و 24 درجه بدست آمده اند. علاوه بر این به منظور تعیین فاصله بهینه و ایمن دامپ باطله از دیواره معدن از روش تحلیلی استفاده گردیده و تاثیر فواصل مختلف بر فاکتور ایمنی دیواره بررسی شده است. نتایج بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که در فواصل کمتر از 150 متری دامپ از دیواره، فاکتور ایمنی دیواره با شیب بیشتری کاهش می‌یابد و این فاصله را می‌توان بعنوان فاصله ایمن در نظر گرفت.

کلمات کلیدی: دامپ باطله، تحلیل برگشتی، نرم افزار **FLAC/SLOPE**، نرم‌افزار **Slide**، فاصله بهینه، معدن گل گهر سیرجان

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشگاه یزد، mrearoosta@gmail.com

^۲ دانشیار دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، (نویسنده مسئول)، j.gholamnejad@yazd.ac.ir

^۳ استادیار دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ayarahmadi@yazd.ac.ir

^۴ سرپرست واحد مکانیک سنگ شرکت معدنی و صنعتی گل گهر، hamid_azizabadi@yahoo.com

^۵ استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد mehdinajafi@yazd.ac.ir

۱. مقدمه

با توسعه‌ی معدن و استخراج بیشتر ماده‌ی معدنی، مواد باطله نیز به موازات افزایش تولید معدن افزایش خواهد یافت. این امر موجب بزرگتر شدن دامپ باطله‌ای که در مجاورت پیت معدن جهت دپوی مواد باطله ساخته شده است خواهد گردید. بدیهی است که بزرگتر شدن دامپ باطله به افزایش ارتفاع و نیز کاهش فاصله‌ی آن تا دیواره‌ی معدن منجر خواهد شد. از این رو بدلیل خسارات احتمالی ناشی از آن بیش از پیش باید مورد توجه قرار گیرد. تحقیقات مختلفی در مورد ارتفاع و زاویه‌ی شیب پایدار دامپ‌های باطله و نیز بررسی فاصله‌ی ایمن آن‌ها تا دیواره‌ی معدن که در مجاورت یکدیگر ساخته می‌شوند انجام گرفته است. اکبری جور و همکاران (۱۳۸۷) خواص مکانیکی مواد دامپ باطله‌ی معدن شماره ۳ گل گهر را با استفاده از آنالیز برگشتی تعیین کرده و با تحلیل پایداری دامپ به روش تعادل حدی ارتفاع و زاویه‌ی شیب پایدار دیواره‌ی دامپ را بدست آورده‌اند (اکبری جور و همکاران، ۱۳۸۷). کایتولا و همکاران و نیز داس در سال ۲۰۱۱ بر روی دامپ باطله‌ی معادن زغال هندوستان مطالعاتی با استفاده از تحلیل‌های عددی و تعادل حدی انجام داده‌اند و ارتفاع و زاویه‌ی شیب پایدار دامپ را محاسبه نمودند (Kainthola et al., 2011; Das, 2011). پیزولد (۲۰۱۲) با استفاده از تحلیل عددی پایداری دامپ و نیز فاصله‌ی بهینه‌ی دامپ باطله‌ی معدن سنگ آهن را محاسبه نموده است (Piesold, 2012). آدامزیک و همکاران (۲۰۱۳) با مطالعه بر روی دامپ باطله‌ی معدن اوسیلک لهستان، دامپ نهایی معدن را به روش تعادل حدی تحلیل نموده و زاویه‌ی شیب و ارتفاع نهایی پایدار را پیشنهاد داده‌اند (Adamczyk et al., 2013). معدن سنگ آهن شماره یک گل گهر با ذخیره‌ی بالغ بر ۲۵۰ میلیون تن سنگ آهن، در ۵۵ کیلومتری جنوب غربی سیرجان در استان کرمان واقع شده است. این معدن از نظر ذخیره، دومین آنومالی از ۶ آنومالی منطقه گل گهر است (کوشا معدن، ۱۳۸۴). عمده‌ی مواد باطله را خاک و سنگ‌های ریزدانه تشکیل داده است. اخیراً بدلیل طرح توسعه‌ی معدن و

افزایش تولید، دامپ باطله به دیواره‌ی معدن نزدیک شده و بدلیل افزایش ارتفاعی که پیدا کرده است و احتمال خطر ریزش آن از دپوی مواد در قسمتی از این دامپ جلوگیری به عمل آمده است. با بررسی‌های میدانی انجام گرفته، ترک‌های کششی بر روی بالاترین سطح دامپ و در ضلع غربی آن مشاهده گردیده است. این ترک‌ها به طول‌های تقریبی ۲۰ و ۳۰ متر و به فاصله بین ۷ تا ۱۷ متر از لبه دامپ بوجود آمده‌اند. هدف اصلی این تحقیق تعیین پارامترهای مقاومت برشی مواد دامپ باطله معدن و تعیین ارتفاع پایدار و فاصله‌ی ایمن دامپ باطله تا دیواره‌ی معدن توسط روش‌های تحلیلی و عددی است.

۲. تحلیل برگشتی

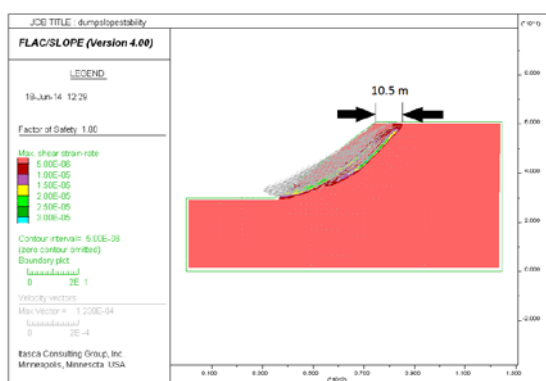
در این تحقیق تحلیل برگشتی به منظور تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی و نمودار هوک و بری بر اساس ترک‌های سطحی مشاهده شده در سطح دامپ باطله انجام شده است.

۲-۱- تحلیل برگشتی به روش‌های تحلیلی و عددی

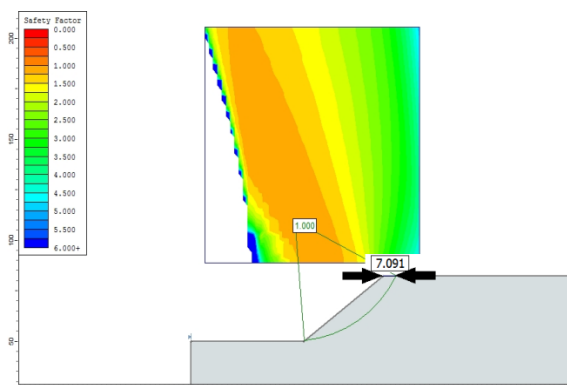
روش تحلیل برگشتی بطور موفقیت آمیزی طی چندین دهه در مکانیک خاک استفاده شده است و با درجه اطمینان خوبی در طراحی شیب‌های خاکی استفاده می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که نتایج بدست آمده تنها به تشکیلات خاص زمین شناسی مورد استفاده در تحلیل محدود است (Hoek and Bary, 1981). بنابراین استفاده از نتایج تحلیل برگشتی رفتار شیب، اطلاعات با ارزشی را در اختیار قرار می‌دهد. از آنجا که در معدن مذکور ابزار بندی به منظور بررسی وضعیت دامپ باطله انجام نمی‌شود از میزان جابه‌جایی‌های صورت گرفته در دیواره اطلاعاتی در دسترس نیست که بر اساس آن بتوان تحلیل برگشتی به روش بیان شده انجام داد. بر این اساس می‌توان بیان نمود که بوجود آمدن ترک کششی بر روی سطح دامپ باطله، شیب آن را در آستانه ریزش قرار داده است. با وجود ترک کششی در سطح دامپ می‌توان فاکتور ایمنی را برابر یک در نظر گرفته و مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی را بدست آورد. برای این منظور از نرم‌افزار

تحلیلی Slide و نرم‌افزار عددی FLAC/SLOPE استفاده شده است. به منظور تحلیل برگشتی مقطع دوبعدی از پله دامپ باطله در نرم افزار Slide سطوح لغزشی که فاکتور ایمنی آن‌ها برابر یک نیز هست در نظر گرفته می‌شوند. بهترین سطح لغزش انتخابی سطحی است که فاصله آن از لبه دامپ برابر با فاصله ترک کششی از لبه دامپ باشد. در شکل (۱) مقطع پله و سطح ایجاد شده در نرم افزار Slide نشان داده شده است. با تغییر مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک، فاصله سطح لغزش انتخابی نیز از لبه پله دامپ تغییر می‌کند. بنابراین چسبندگی و زاویه اصطکاک مربوط به سطح لغزش انتخاب شده را می‌توان به عنوان مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مواد در نظر گرفت. در جدول (۱) مقادیر بدست آمده از نرم افزار Slide برای چسبندگی و زاویه اصطکاک مواد

تحلیلی Slide و نرم‌افزار عددی FLAC/SLOPE استفاده شده است. به منظور تحلیل برگشتی مقطع دوبعدی از پله دامپ باطله در نرم افزار Slide سطوح لغزشی که فاکتور ایمنی آن‌ها برابر یک نیز هست در نظر گرفته می‌شوند. بهترین سطح لغزش انتخابی سطحی است که فاصله آن از لبه دامپ برابر با فاصله ترک کششی از لبه دامپ باشد. در شکل (۱) مقطع پله و سطح ایجاد شده در نرم افزار Slide نشان داده شده است. با تغییر مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک، فاصله سطح لغزش انتخابی نیز از لبه پله دامپ تغییر می‌کند. بنابراین چسبندگی و زاویه اصطکاک مربوط به سطح لغزش انتخاب شده را می‌توان به عنوان مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مواد در نظر گرفت. در جدول (۱) مقادیر بدست آمده از نرم افزار Slide برای چسبندگی و زاویه اصطکاک مواد



شکل ۲. تحلیل دامپ باطله در FLAC/SLOPE



شکل ۱. تحلیل دامپ باطله در نرم افزار Slide

جدول ۱. چسبندگی و زاویه اصطکاک مربوط به سطح لغزش و فاصله سطح لغزش از لبه پله در نرم افزار Slide

								پارامتر	واحد	مقدار
۱/۸	۴/۹	۷/۳۵	۱۰/۶	۱۶/۴	۱۹/۲	۲۶/۴	۲۷/۲	چسبندگی	کیلوپاسکال	
۳۵	۳۲	۳۰	۲۸	۲۵	۲۴	۲۱	۱۹	زاویه‌ی اصطکاک داخلی	درجه	
۰/۸	۲/۳	۳/۷	۵/۷	۵/۸	۷/۱	۷	۵/۸	فاصله‌ی سطح لغزش از لبه پله	متر	

اصطکاک داخلی و چسبندگی بدست آمده از نمودارهای هوک و بری نشان داده شده است. با توجه به جدول (۲) می‌توان دریافت که زوج مقدار ۲۱ کیلوپاسکال و ۲۴ درجه برای چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی که از نمودارهای هوک و بری بدست آمده‌اند با مقادیر بدست آمده از روش های عددی و تحلیلی نیز مطابقت خوبی دارد و تحلیل پایداری بر اساس آن صورت پذیرفته است.

۲-۲- تحلیل برگشتی با استفاده از نمودارهای هوک و بری با توجه به عدم امکان تهیه‌ی نمونه‌ی دست نخورده از مواد دامپ و با فرض ریزش دایره‌ای کامل و با استفاده از نمودارهای ارایه شده توسط هوک و بری، چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک مواد دامپ را می‌توان محاسبه نمود (Wyllie et al., 2004). در جدول (۲) مقادیر زاویه‌ی

جدول ۲. زوج مقادیر زاویه اصطکاک و چسبندگی حاصل از نمودار هوک و بری

مقدار							واحد	پارامتر
۲۵	۲۱	۱۵	۱۲	۹	۶	۰	کیلوپاسکال	چسبندگی
۲۲	۲۴	۲۷	۲۹	۳۱	۳۳	۳۷	درجه	زاویه اصطکاک داخلی

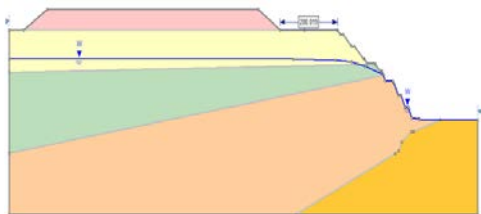
۲. تعیین ارتفاع پایدار دامپ باطله

با توجه به تحلیل پایداری انجام شده بر روی دامپ باطله، فاکتور ایمنی قسمت‌هایی از دامپ باطله کمتر از فاکتور ایمنی است. بنابراین برای بالا بردن فاکتور ایمنی می‌توان از کاهش شیب پله و یا کاهش ارتفاع پله استفاده کرد. از آنجا که کاهش ارتفاع پله از لحاظ اجرایی امکان‌پذیر نیست، بنابراین با تغییر زاویه‌ی شیب پله در ارتفاع‌های مختلف پله با استفاده از روش عددی و نرم افزار FLAC، فاکتور ایمنی برای هر حالت بدست آمده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های انجام شده بیانگر آن است که برای ساخت پله‌ی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متری فاکتور ایمنی به ترتیب برابر با ۱/۱، ۲۲۴/۲۹۹۵ و ۱/۲۰۸ و زاویه شیب دیواره ۳۴، ۳۰ و ۲۸ درجه است. در صورتی که نمودار

تغییرات ارتفاع دامپ و زاویه‌ی شیب ترسیم گردد رابطه‌ای تقریباً خطی با $R^2 = 0/96$ برقرار است.

۳. تعیین فاصله‌ی مناسب دامپ باطله تا دیواره‌ی معدن

با توجه به طرح توسعه‌ی معدن و افزایش عمق آن و نیز شیب نهایی دیواره‌های معدن، انتظار می‌رود که با پسروری دیواره‌ی جنوبی معدن و نزدیک شدن به دامپ باطله تحت تاثیر نیروی وزن ناشی از دامپ باطله قرار بگیرد. در این بخش کاهش فاصله‌ی دامپ تا دیواره معدن بررسی شده است. برای این منظور از مقطع زمین شناسی ۱۰۰۵۰۰ دیواره‌ی جنوبی برای هندسه‌ی فعلی و نهایی دیواره و شامل دامپ باطله در نرم افزار Slide استفاده شده است. شکل (۳) هندسه‌ی فعلی دیواره و شکل (۴) هندسه‌ی نهایی دیواره جنوبی در مقطع ۱۰۰۵۰۰ را نشان می‌دهد.



شکل ۴. هندسه نهایی دیواره معدن به همراه دامپ باطله در مقطع ۱۰۰۵۰۰ جنوبی








شکل ۳. هندسه فعلی دیواره معدن به همراه دامپ باطله در مقطع ۱۰۰۵۰۰ جنوبی

آن ۲۲۵ متر است همچنین برای هندسه نهایی، طول مدل ۱۶۴۰ متر و ارتفاع آن حدود ۵۰۰ متر است. خصوصیات ژئومکانیکی لایه‌های مختلف زمین‌شناسی موجود در مدل نیز در جدول (۳) نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که در شکل‌های (۳) و (۴) مشاهده می‌شود فاصله‌ی دامپ باطله تا دیواره فعلی معدن حدود ۲۵۰ متر و فاصله‌ی آن تا دیواره نهایی معدن حدود ۲۰۰ متر است. طول مدل ساخته شده برای هندسه فعلی برابر ۱۳۶۵ متر و ارتفاع

جدول ۳. خصوصیات لایه‌های مختلف زمین شناسی استفاده شده در تحلیل

جنس	رنگ	وزن مخصوص (kN/m^3)	معیار مقاومت	چسبندگی (kN/m^2)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
کنگومرا		۲۳/۳	موهر-کولمب	۲۰۰۰	۴۶
رس		۲۱	موهر-کولمب	۱۰۰۰	۱۶
میکاشیست		۲۷/۷	موهر-کولمب	۴۲۰	۲۱
کوارتزشیست		۲۷	موهر-کولمب	۳۷۲	۲۷
دامپ باطله		۲۰	موهر-کولمب	۲۱	۲۴

در تحلیل دیواره نهایی، با کاهش فاصله‌ی دامپ باطله تا دیواره‌ی معدن بصورت فواصل ۵۰ متری فاکتور ایمنی در هر مرحله بدست آمده است. نتایج بدست آمده در جدول ۴ آورده شده‌اند. با توجه به جدول مذکور می‌توان دریافت که فاصله‌ی سطح ریزش بدست آمده در فواصل کمتر از ۱۵۰ متر، بیشتر از فاصله‌ی دامپ تا دیواره‌ی معدن است؛ بدین معنا که سطح ریزش بحرانی بدست آمده مواد دامپ باطله را نیز در بر می‌گیرد. بنابراین می‌توان فاصله‌ی ایمن دامپ باطله تا دیواره معدن را ۱۵۰ متر در نظر گرفت.

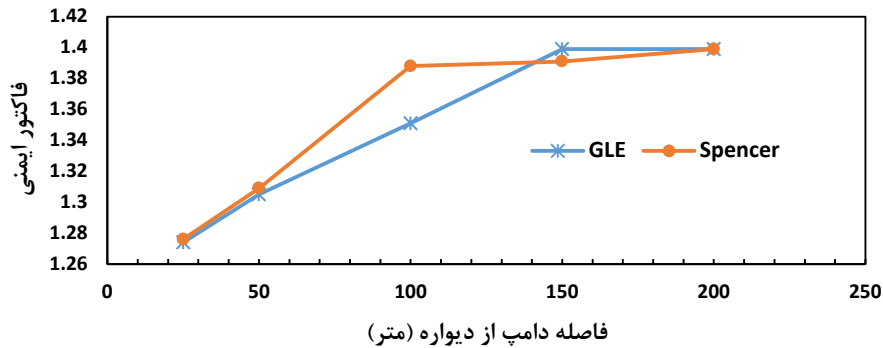
در تحلیل دیواره فعلی معدن دو حالت، تحلیل بدون دامپ باطله و تحلیل در حالت وجود دامپ باطله در نظر گرفته شده است. جهت انجام تحلیل از روش‌های GLE و اسپنسر استفاده شده است (Itasca, 2005). فاکتور ایمنی حاصل از تحلیل برای وجود دامپ و عدم وجود دامپ به روش اسپنسر به ترتیب برابر با ۴/۱۴ و ۵/۵۷ و به روش GEL به ترتیب برابر با ۴/۱۳ و ۵/۱۴ است. مقادیر بدست آمده نشان از پایداری دیواره فعلی معدن دارند. نکته‌ی قابل توجه دیگر این است که وجود دامپ باطله سبب می‌شود که فاکتور ایمنی حدود یک واحد کاهش یابد.

جدول ۴. فاکتور ایمنی مربوط به دیواره نهایی مقطع ۱۰۰۵۰۰ جنوبی

فاصله دامپ تا دیواره (متر)	فاصله سطح ریزش تا دیواره (متر)		فاکتور ایمنی	
	اسپنسر	GLE	اسپنسر	GLE
۲۵	۱۲۰	۱۲۰	۱/۲۷۶	۱/۲۷۴
۵۰	۱۴۰	۱۴۰	۱/۳۰۹	۱/۳۰۵
۱۰۰	۶۸	۱۳۲	۱/۳۸۸	۱/۳۵۱
۱۵۰	۳۲	۱۳۰	۱/۳۹۹	۱/۳۹۹
۲۰۰	۱۱۴	۱۰۲	۱/۳۹۹	۱/۳۹۹

از ۱۵۰ متری دامپ باطله از دیواره‌ی معدن کاهش فاکتور ایمنی بیشتر بوده و شیب نمودار بیشتر است و برای فواصل بیشتر از ۱۵۰ متر نمودار حالت افقی به خود می‌گیرد.

بر اساس نتایج جدول ۴، نمودار تغییر فاکتور ایمنی در شکل (۵) نشان داده شده است. با کاهش فاصله‌ی دامپ و دیواره، فاکتور ایمنی در هر دو روش اسپنسر و GLE کاهش می‌یابد. همان‌طور که از شکل (۵) مشاهده می‌گردد، در فواصل کمتر



شکل ۵. تغییر فاکتور ایمنی در فواصل مختلف دامپ از دیواره

۴. نتیجه گیری

روش تحلیل برگشتی می‌تواند بعنوان راه حلی کم هزینه و سریع برای بدست آوردن پارامترهای مقاومت برشی باشد. نتایج تحلیل برگشتی مورد استفاده در این تحقیق نشان داد که مقادیر بدست آمده برای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مواد از روش تحلیلی و با استفاده از نرم افزار Slide و روش عددی و نیز نمودارهای ارایه شده ی هوک و بری، با استفاده از تحلیل برگشتی (در نظر گرفتن ترک کششی سطح دامپ باطله به عنوان معیار ریزش) به ترتیب ۲۱ کیلوپاسکال و ۲۴ درجه بدست آمده‌اند که نتایج هر سه روش مطابقت خوبی با یکدیگر دارند. علاوه بر این تحلیل عددی انجام

گرفته نشان داده است که در صورت افزایش ارتفاع دامپ باطله، به منظور داشتن شیبی پایدار با فاکتور ایمنی ۱/۲ باید زاویه شیب حداکثر ۳۶ درجه برای ارتفاع ۲۰ متری پله، زاویه ۳۰ درجه برای ارتفاع ۳۰ متری پله و زاویه ۲۸ درجه برای ارتفاع ۴۰ متر پله در نظر گرفت. با کاهش فاصله دامپ باطله و دیواره‌ی معدن، فاکتور ایمنی دیواره کاهش می‌یابد. این کاهش فاکتور ایمنی در فواصل کمتر از ۱۵۰ متری دامپ تا دیواره شیب بیشتری داشته و با توجه به سطوح ریزش بحرانی بدست آمده، می‌توان فاصله‌ی ایمن دامپ باطله تا دیواره معدن را ۱۵۰ متر در نظر گرفت.

منابع

- اکبری جور، حسین. و میردار منصور پناهی، علی. (۱۳۸۷). تحلیل برگشتی ریزش های موضعی دیواره دامپ باطله معدن ۳ منطقه گل گهر. دومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تهران.
- مهندسین مشاور کوشا معدن، (۱۳۸۴). طرح بهره برداری از معدن سنگ آهن گل گهر. مدیریت امور معدن شرکت سنگ آهن گل گهر، سیرجان.
- Adamczyk, J., Cała, M., Flisiak, J., Kolano, M., & Kowalski, M. (2013). Slope stability analysis of waste dump in Sandstone Open Pit Osielec. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 35(1), 3-17.
- Das, G. (2011). *Analysis of Slope Stability for Waste Dumps in a mine* (Doctoral dissertation, National Institute of Technology Rourkela).
- Hoek, E., & Bray, J. D. (1981). *Rock slope engineering*. CRC Press. Institution Mining and Metallurgy, London.
- Itasac. (2005). *FLAC Slope v.4.00*. User manuals.
- Kainthola, A., Verma, D., Gupte, S. S., & Singh, T. N. (2011). A coal mine dump stability analysis—a case study. *Geomaterials*, 1(01), 1.
- Piesold, K. (2012). Mary River railway slope stability analysis for the waste rock dump. Baffinland Iron Mines Corporation.
- Rockscience, (2007), "Slide v.6", User manuals.
- Wyllie, D. C., & Mah, C. (2004). *Rock slope engineering*. CRC Press, London, PP:180-183