نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)
tuse.shahroodut.ac.ir
دوره‌ی ۱۲- شماره‌ی ۲/زمستان ۱۴۰۲

امکان‌سنجی تبدیل روش استخراج سطحی به زیرزمینی در معادن سنگ ساختمانی (مطالعه موردی: معدن سنگ ساختمانی کپیول)

مقاله پژوهشی

مهدی بیگدلی[۱]؛ محمد عطایی[۲]؛ رامین رفیعی [۳*]

۱- دانشجو کارشناسی ارشد استخراج مهندسی معدن؛ دانشگاه صنعتی شاهرود، Mbigdeli.mine@gmail.com
۲- استاد دانشکده مهندسی معدن نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه صنعتی شاهرود، ataei@shahroodut.ac.ir
۳- دانشیار دانشکده مهندسی معدن نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه صنعتی شاهرود، Raminrafiee@shahroodut.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۳/۰۹/۰۶؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷
شماره صفحات: ۱۸۹ تا ۲۰۳
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2025.15405.1494

واژگان کلیدی
امکان سنجی
سنگ ساختمانی
استخراج زیرزمینی
محیط زیست

چکیده

منابع سنگ ساختمانی یکی از منابع درآمدزا در هر کشوری محسوب می‌شوند. تمامی معادن سنگ ساختمانی موجود در ایران به صورت روباز استخراج می‌شوند. مشکلات و آلودگی‌های زیست‌محیطی معادن روباز از یک طرف و عمیق شدن این معادن، هزینه‌های زیاد باطله‌برداری و محدود بودن ذخایر سطحی، از مهم‌ترین عوامل حرکت به سوی استخراج زیرزمینی ذخایر سنگ ساختمانی است. روش‌های استخراج زیرزمینی ذخایر سنگ ساختمانی باعث کاهش مشکلات و آسیب‌های زیست‌محیطی، کاهش هزینه‌های باطله برداری و تولید محصول با کیفیت می‌شوند. هدف از این تحقیق، امکان‌سنجی کاربرد روش معدنکاری زیرزمینی در معادن سنگ ساختمانی با روباره زیاد است. در این مقاله، امکان‌سنجی کاربرد روش معدنکاری روباز و زیرزمینی برای معادن سنگ ساختمانی کپیول انجام شده است. نتایج امکان‌سنجی حاکی از آن است که نرخ بازده داخلی برای روش استخراج روباز برابر ۱۵/۵۰ درصد و برای روش استخراج زیرزمینی ۶۰ /۲۹ درصد است که نشان می‌دهد از لحاظ اقتصادی روش استخراج زیرزمینی نسبت به روش استخراج روباز ارجحیت دارد. همچنین آزمون تحلیل حساسیت برای سه پارامتر درآمد فروش، دارایی‌های ثابت و هزینه‌های عملیاتی نیز انجام شده است که نشان می دهد که با کاهش ۲۰ درصدی درآمد فروش سنگ و افزایش ۲۰ درصدی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌های عملیاتی، هنوز طرح استخراج به روش زیرزمینی در معدن مورد مطالعه از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر خواهد بود.

۱- مقدمه

سنگ، از قدیمی‌ترین مصالح ساختمانی مورد استفاده بشر است. استفاده از سنگ، برای مقاصد ساختمانی، از دیرباز تاکنون فرایند تکاملی خود را طی‌کرده است. امروزه صنعت سنگ ساختمانی سهم بزرگی در اقتصاد جهانی داشته و ارزش محصول نهایی و فرآوری شده آن چندین برابر محصول خام

* سمنان؛ شاهرود؛ میدان هفت تیر؛ بلوار دانشگاه؛ دانشگاه شاهرود؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ طبقه‌ی دوم؛ کدپستی: ۳۶۱۹۹۹۵۱۶۱؛ صندوق پستی: ۳۱۶؛ شماره‌ی تلفن: ۰۲۳-۳۲۳۹۵۵۰۹

است؛ به گونه‌ای که افزون بر پوشش‌دادن تمامی هزینه‌های مراحل اکتشاف، استخراج، تولید و فرآوری، درآمدهای قابل‌توجهی برای سرمایه‌گذاران در این بخش به همراه دارد (*Ataei, 2008*).

ارتفاع زیاد روباره و مشکلات زیست‌محیطی، همواره استخراج سطحی سنگ‌های ساختمانی ایران را با مشکل مواجه کرده است، به طوری که فشارهای شدید زیست‌محیطی منجر به بسته شدن بسیاری از معادن سطحی سنگ ساختمانی که این الزامات را رعایت نکرده‌اند، شده است. با افزایش نیازهای روز افزون جهان، ذخایر سطحی سنگ ساختمانی روز به روز در حال کاهش است و به ناچار باید از روش‌های استخراج زیرزمینی در ذخایر سنگ ساختمانی استفاده شود (*Ashmole & Motloung, 2008*). علاوه بر این می‌توان با به‌کارگیری روش‌های زیرزمینی در استخراج سنگ‌های ساختمانی مشکلات زیست محیطی را به حداقل رساند. ذخایر سنگ ساختمانی شناخته شده در کشور به صورت سطحی استخراج می‌شوند، این موضوع کمتر مورد توجه محققین و بهره برداران این معادن قرار گرفته است.

شینوبه (۱۹۹۷)، به ارزیابی اقتصادی تبدیل روش معدنکاری روباز به روش معدنکاری زیرزمینی در معادن سنگ آهک پرداخته است. بر اساس این تحقیق، تصمیم‌گیری بین روش‌های روباز و زیرزمینی بر روی عوامل مختلف نظیر هندسه، نوع ذخیره، شرایط سنگ، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های عملیاتی، جنبه‌های زیست‌محیطی و ایمنی کار استوار است. مهم‌ترین مزایای معدنکاری زیرزمینی نیز استخراج انتخابی، تولید یکنواخت و کاهش مشکلات زیست‌محیطی معرفی شده است(*Shinobe, 1997*). بناردوس و همکاران (۲۰۰۱)، بر توسعه استخراج زیرزمینی معادن سنگ تأکید کرده اند. آن‌ها آنالیز هزینه و تجزیه و تحلیل مالی پروژه را با استفاده از معیارهای *NPV* و *IRR* برای روش استخراج زیرزمینی یک معدن واقع در بخش شرقی آتیکا برای یک دوره ۱۵ ساله انجام داده اند. نتایج تجزیه و تحلیل برای طرح استخراج زیرزمینی نشان می‌دهد که مقدار *NPV* تقریباً ۹/۷۵ میلیون دلار و *IRR*، ۱۲/۰۷ است. این ارقام نشان داد که طرح سرمایه‌گذاری استخراج زیرزمینی امیدوارکننده است (*Benardos et al., 2001*). کاردو و همکاران (۲۰۱۰)، به بررسی نخستین پروژه به‌کارگیری استخراج زیرزمینی برای معدن مرمریت اوروسی واقع در جزیره ساردینیا در ایتالیا پرداخته اند. در این تحقیق بر استخراج این نوع معادن به روش زیرزمینی به عنوان راه‌کاری برای کاهش اثرات نامطلوب زیست محیطی به ویژه آلودگی‌های بصری و چشم‌انداز تأکید شده است. افزون بر این فناوری‌های استخراج، برش و نگهداری انتخاب شده و بر این اساس ظرفیت تولید محاسبه و ملاحظات اقتصادی بررسی شده است. نتایج تجزیه و تحلیل اقتصادی نشان داد که منحنی ارزش خالص فعلی (*NPV*) برای یک دوره ۱۲ ساله تا نرخ ۴۰ درصد مثبت است. بنابراین روش استخراج زیرزمینی در معدن اوروسی یک روش معدنکاری مقرون‌به‌صرفه و پایدار معرفی شد (*Carddu et al., 2010*). بحری و همکاران (۲۰۱۶)، به بررسی کاربرد روش‌های استخراج زیرزمینی در معادن سنگ ساختمانی پرداختند. در این تحقیق، ابتدا روش‌های مختلف استخراج زیرزمینی سنگ‌های ساختمانی شرح داده شد و سپس مزایای این روش‌ها و درنهایت استفاده عملی از روش‌های استخراج زیرزمینی سنگ‌های ساختمانی در جهان ذکر شده است (*Bahri & Ghasemi, 2016*). حاجتی (۱۳۹۵)، با مروری بر ملاحظات زیست محیطی روش‌های استخراج سنگ ساختمانی، در کنار روش معمول استخراج روباز، روش استخراج زیرزمینی سنگ ساختمانی را نیز به همراه مزایا و معایب، شیوه طراحی و تجهیزات مورد نیاز آن (به عنوان نمونه ماشین هاواژ) بررسی کردند. طبق نتایج این تحقیق مشخص شد که با بهره‌گیری از تجهیزات لازم و آموزش افراد، می‌توان نگرانی‌های بخش خصوصی را تا حد امکان کاهش داد و فضای جامعه را برای استخراج بهینه از حداکثر ذخایر سنگ ساختمانی و تولید سنگ فرآوری شده با ارزش اقتصادی بالاتر فراهم کرد (*Hajati, 2016*). آکسوی و همکاران (۲۰۲۱)، ذخایر مرمری که می‌توانند از نظر ژئومکانیکی واجد شرایط حفاری زیرزمینی باشند، در سراسر ترکیه انتخاب و این ذخایر انتخابی را بر اساس سیستم *Q* طبقه‌بندی کرده اند. همچنین عوامل کمکی (توپوگرافی، مکان، روش تولید و غیره) در مورد این ذخایر نیز بررسی شد که نتایج نشان داد ذخایر مرمر موغلا سفید (*Mugla White*)، افیون پوست ببری (*Afyon Tiger Skin*)، بژ بوردور (*Burdur Beige*) و صورتی دیاربکر (*Diyarbakir Pink*) برای استخراج به روش زیرزمینی بسیار مناسب هستند

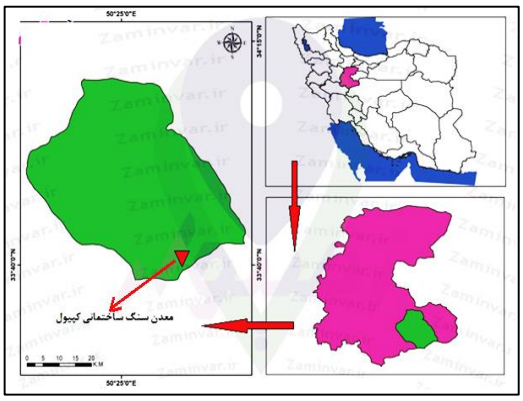
(Aksoy, et al., 2021).

معدنکاری زیرزمینی سنگ‌های ساختمانی در کشورهای متعددی در حال اجرا است که در ادامه تجربیات جهانی در این زمینه به طور مختصر شرح داده شده است. در ایتالیا، معادن بولزانو *(Bolzano)*، کاندوگلیا *(Candoglia)*، یوگلیا *(Puglia)* به روش امتدادی، معدن والداستا *(Vald Aosta)* به روش کارگاه و پایه و معادن کرارا *(Carrara)*، معدن رشته کوه آلپ، لیگوریا *(Liguria)* و وال برمیانا *(Val Bermbana)* به روش اتاق و پایه استخراج می‌شوند. بین قرن‌های ۱۷ تا ۱۸ معدن دادلی *(Dudley)*، معدن گاداستون *(Godstone)* و معدن بییر *(Beer)* در این کشور به استخراج سنگ آهک پرداخته اند. کشور کرواسی با استفاده از دستگاه‌های پیشرفته استخراج سنگ ساختمانی و تکیه به فناوری‌های جدید توانسته است، صادرات قابل توجهی نسبت به ذخیره خود داشته باشد. معادن کانفانر *(Kanfaner)* و وینکوران *(Vinkuran)* در کرواسی، به روش زیرزمینی در حال استخراج هستند. در کشور پرتغال بیشتر استخراج توسط دو شرکت به نام‌های پرپراگومس *(Pereira Gomes)* و کاروال‌هولدا *(Carvalholda)* در سه کارگاه زیرزمینی انجام می‌شود. سالیانه حدود ۷۰۰۰ تن سنگ از این معادن استخراج می‌شود. کشور روسیه از سال ۲۰۰۶ در معادن سایان *(Sayan)* و کیبک کوردن *(Kibik-Korden)* به خاطر عمق زیاد ذخیره به روش زیرزمینی روی آورد. در این معادن با تکیه به فناوری‌های ایتالیایی تونل‌های عمیقی حفر شده و به روش اتاق و پایه مشغول استخراج هستند *(Bahri & Ghasemi, 2016).*

در ایران نیز همانند سایر کشورهای جهان، با توجه به مسائل زیست‌محیطی و اقتصادی به ناچار زمانی باید به استخراج سنگ ساختمانی به روش زیرزمینی توجه شود*(Bahri&Ghasemi,2016)*. ازاین‌رو، امکان‌سنجی اقتصادی کاربرد روش استخراج معدنکاری زیرزمینی در معادن سنگ ساختمانی در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله ابتدا مشکلات اقتصادی در معادن سنگ ساختمانی عمیق و انواع مشکلات زیست‌محیطی معادن روباز سنگ ساختمانی ارائه شده است. سپس امکان‌سنجی اقتصادی با استفاده از نرم‌افزار *COMFAR* برای دو روش معدنکاری روباز و زیرزمینی برای معادن سنگ ساختمانی عمیق انجام شده است.

۲- مطالعه موردی

شهرستان محلات در جنوب استان مرکزی واقع شده است. معادن سرچشمه محلات شامل چند کارگاه استخراجی است که معدن سنگ تراورتن کپیول یکی از آن‌ها است. این معدن در ۷ کیلومتری شهر نیم‌ور از توابع استان مرکزی واقع شده است. در **شکل ۱**، موقعیت جغرافیایی معادن سرچشمه محلات نشان داده شده است *(Wikipedia, 2019).*



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی معادن سنگ سرچشمه محلات

۲-۱- اثرات زیست محیطی معادن سنگ ساختمانی

صنعت سنگ ساختمانی همانند هر فعالیت بشری دیگر اثرات منفی بر اکوسیستم و سلامتی انسان‌ها دارد. این اثرات با بهره‌برداری بیشتر از منابع زمین و در گذر زمان‌های طولانی خود را بهتر نمایان خواهد کرد. مهم‌ترین این اثرات شامل موارد زیر است *(Hajati, 2016).*

۱- آلودگی صوتی: این آلودگی ناشی از فعالیت ماشین‌آلات معدنی (مثل کامیون‌ها، دستگاه‌های حفاری، ژنراتورها، قله‌برها و ماشین‌های برش و ساب و...) است که میزان این آلودگی به دو پارامتر شدت صوت و میزان در معرض بودن بستگی دارد.

۲- محل انباشت باطله: یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی در صنعت سنگ ساختمانی تولید حجم بسیار بالای ضایعات است. به طور متوسط در هنگام تولید بلوک‌های سنگی در معدن ۷۵-۳۵ درصد، در هنگام حمل‌ونقل و فرآوری ۴۰-۳۰ درصد و درمجموع حدوداً ۸۰-۵۰ درصد وزنی سنگ

خام استخراج شده به ضایعات تبدیل می‌شود. این ضایعات اکثراً به صورت دمپ‌های باطله در نقاط مختلف روی هم انباشته می‌شوند که با مرور زمان با انجام واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی بر اکوسیستم منطقه تأثیر منفی خواهد گذاشت. علاوه بر مشکلات زیست محیطی این حجم عظیم از باطله به لحاظ جمع‌آوری و بارگیری آن‌ها، هزینه‌های سنگینی بر صاحبان این صنعت تحمیل می‌کند. به دلیل دور بودن معادن سنگ ساختمانی نسبت به مناطق مسکونی، اکثر این معادن ضایعات خود را در اطراف معدن و به صورت پراکنده و نامنظم رها کرده‌اند. این موضوع باعث ایجاد یک چشم‌انداز نامطلوب شده است. به عنوان مثال، در **شکل ۲**، وضعیت انباشت باطله‌ها در معادن سنگ ساختمانی شرکت سرچشمه شهرستان محلات نشان داده شده است.

شکل ۲- تغییر چشم‌انداز طبیعی زمین در اثر استخراج سنگ ساختمانی و انباشت باطله در معدن سنگ ساختمانی سرچشمه شهرستان محلات

دست خورده شدن خاک که باعث از بین رفتن تراکم اولیه خاک و افزایش سرعت فرسایش خاک، ازبین رفتن زهکشی طبیعی منطقه، ایجاد آلایندگی در خاک و در نهایت دستکاری در کیفیت خاک‌های منطقه می‌شود.

انتشار گرد و غبار در هوا که باعث تأثیرگذاری منفی بر سلامت موجودات زنده، کاهش رشد گیاهان و تأثیرگذاری بر میدان دید در منطقه می‌شود.

به عنوان مثال، معدن تراورتن کپیول محلات به علت ارتفاع زیاد روباره و تأثیرات مخرب زیست‌محیطی مانند تأثیر بر بخش گلخانه‌ای و ایجاد گرد و غبار در محلات داشته است. با استخراج زیرزمینی سنگ‌های ساختمانی، می‌توان تا حدود زیادی در راستای کاهش تأثیرات زیست‌محیطی گام برداشت.

لازم به ذکر است استخراج زیرزمینی معادن سنگ ساختمانی نیز دارای معایبی می باشد که از جمله می توان به بازیابی کم به علت وجود پایه ها، تخریب و نشست، مدیریت مشکل به دلیل تعدد کارگاه ها و افزایش ابعاد پایه ها و به تبع کاهش نرخ تولید اشاره کرد. در ادامه امکان‌سنجی اقتصادی طرح استخراج به روش روباز و زیرزمینی در معدن سنگ ساختمانی کپیول مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- طرح استخراج به روش روباز و زیرزمینی

برآورد ذخیره قابل استخراج یکی از مهم‌ترین پارامترهای لازم برای طراحی معدن است. با توجه به اطلاعات گمانه‌های دریافتی برای معدن مذکور، مدل زمین شناسی ذخیره با استفاده از نرم‌افزار *Datamine* تهیه شده و میزان ذخیره سنگ تراورتن معدن سنگ ساختمانی کپیول برابر ۲۴۰هزارتن برآورد شده است. در روش سطحی برای دسترسی به ذخیره، عملیات پیش باطله‌برداری برای باز کردن پیت اصلی معدن در دوران ساخت و در دوران بهره‌برداری عملیات باطله برداری انجام شده و سنگ توسط دستگاه سیم برش الماسه استخراج می‌شود. در **شکل ۳**، روش استخراج سطحی برای دسترسی به ذخیره در معدن سنگ ساختمانی کپیول نشان داده شده است. در روش زیرزمینی برای دسترسی به کانسار، تونل دسترسی از سطح زمین حفر شده و سنگ توسط ماشین اره زنجیری به روش اتاق و پایه استخراج می‌شود.

شکل ۳- روش استخراج سطحی برای دسترسی به ذخیره در معدن سنگ ساختمانی کپیول

۳-۱- محاسبه حجم و هزینه باطله‌برداری برای استخراج به روش روباز

با توجه به حجم زیاد روباره در معدن سنگ ساختمانی کپیول،

برای دسترسی به ذخیره به روش روباز، باید عملیات پیش باطله‌برداری برای باز کردن معدن در دوران ساخت و در دوران بهره‌برداری عملیات باطله برداری انجام شود. در روش روباز دسترسی به ماده معدنی به صورت یک مخروط معکوس با زاویه ۴۵ درجه انجام می‌شود که با توجه گسترش طولی و عرضی ماده معدنی، حجم کل روباره محاسبه شده است. در **جدول ۱**، حجم کل روباره معدن سنگ ساختمانی کپیول و هزینه لازم برای باطله برداری معدن مذکور آورده شده است.

جدول ۱- حجم کل روباره و هزینه روباره برداری در معدن سنگ ساختمانی کپیول

ردیف	توصیف	واحد	مقدار
۱	حجم کل روباره	متر مکعب	۱,۵۰۰,۰۰۰
۲	ظرفیت اسمی بارگیری و باربری	متر مکعب بر ساعت	۴
۳	زمان کارکرد روزانه	ساعت	۸
۴	هزینه پیمانکاری باطله‌برداری	ریال بر متر مکعب	۳۰۰,۰۰۰
۵	هزینه باطله‌برداری سالیانه	میلیون ریال	۶۴,۸۰۰
۶	هزینه کل باطله‌برداری	میلیون ریال	۴۵۰,۰۰۰

۳-۲- ابعاد اتاق و پایه‌ها در معدنکاری زیرزمینی

روش اتاق و پایه یکی از قدیمی‌ترین روش‌های استخراج معادن زیرزمینی است که برای استخراج لایه‌های تقریباً افقی و یا با شیب کم که ضخامتی بین ۲ تا ۴/۵ متر داشته باشند، مناسب است (*Ataei, 2015*). برای تعیین ابعاد اتاق و پایه‌ها ابتدا امتیاز رده‌بندی Q با توجه به **جدول ۲**، تعیین و سپس با استفاده از رابطه تخمین دهانه باز (رابطه ۲)، مقدار دهانه اتاق ۲۰ متر برآورد شده است. (در این رابطه مقدار ESR برابر ۱/۵ در نظر گرفته شده است). در ادامه، با توجه به ابعاد اتاق و روابط تئوری سطح تأثیر (رابطه ۳) و روابط تجربی ارائه شده برای محاسبه مقاومت پایه‌ها در سنگ‌های سخت (**جدول ۳**)، عرض پایه‌ها برآورد شده است. ارتفاع پایه برابر ضخامت کانسار (۳ متر) در نظر گرفته شده است. با استفاده از رابطه ۱ مقدار امتیاز رده بندی Q، ۹۰ محاسبه شده است.

$$Q = \frac{RQD}{Jn} \times \frac{Jr}{Ja} \times \frac{Jw}{SRF} \qquad (۱)$$

$$B = 2ESR.Q^{0.4} \qquad (۲)$$

$$F_S = \frac{\sigma_P}{S_P} = \frac{\sigma_P}{\frac{\gamma h}{1-R}} \qquad (۳)$$

جدول ۲- پارامترهای تعیین امتیاز رده‌بندی Q در معدن سنگ ساختمانی کپیول

ردیف	شاخص	نماد	مقدار
۱	شاخص کیفیت توده سنگ	RQD	۹۰
۲	عدد دسته درزه ها	J_n	۲
۳	عدد زبری درزه‌ها	J_r	۳
۴	عدد هوازدگی درزه‌ها	J_a	۱
۵	عدد فشار آب درزه‌ها	J_w	۱
۶	ضریب کاهش تنش	SRF	۱/۵

در رابطه ۳، F_s ضریب ایمنی، σ_p مقاومت پایه (مگاپاسگال)، S_p تنش متوسط وارد بر پایه (مگاپاسگال)، وزن مخصوص روباره (کیلوگرم بر مترمکعب) و h برابر عمق معدن (متر) است. طبق گزارش معدنی در معدن سنگ ساختمانی کپیول، تنش قائم برابر ۱/۱۱۴ مگاپاسکال، عمق معدن برابر ۵۰ متر، مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه سنگی برابر ۸۶ مگاپاسکال است. در این تحقیق مقدار ضریب ایمنی

۲ در نظر گرفته شده است. با توجه به این اطلاعات و رابطه ۳، عرض پایه، با چهار رابطه تجربی ارائه شده در **جدول ۳**، تعیین و پس از میانگین‌گیری مقدار متوسط عرض پایه برابر ۷ متر محاسبه شده است.

جدول ۳- روابط تجربی ارائه شده برای محاسبه مقاومت پایه‌ها در سنگ‌های سخت *(Ataei, 2015)*

ردیف	نویسنده	روابط	مقدار عرض پایه محاسبه شده (متر)	شرح
۱	*Krauland و Soder (1987)*	$\sigma_p = 0.3545\sigma_c(0.778 + 0.222\frac{W}{H})$	۴	σ_p :مقاومت پایه (مگاپاسکال)، σ_c: مقاومت فشاری نمونه (مگاپاسکال)، W: عرض پایه (متر)، H: ارتفاع پایه (متر)
۲	*Potvin* و همکاران *(1989)*	$\sigma_p = 0.42\sigma_c(\frac{W}{H})$	۳	σ_p :مقاومت پایه (مگاپاسکال)، σ_c: مقاومت فشاری نمونه (مگاپاسکال)، W: عرض پایه (متر)، H: ارتفاع پایه (متر)
۳	*Sjoberg (1992)*	$\sigma_p = 0.308\sigma_c(0.778 + 0.222\frac{W}{H})$	۶	σ_p :مقاومت پایه (مگاپاسکال)، σ_c: مقاومت فشاری نمونه (مگاپاسکال)، W: عرض پایه (متر)، H: ارتفاع پایه (متر)
۴	*Van Heerden (1975)*	$\sigma_p = 10 + 4.2\frac{W}{H}$	۱۵	σ_p :مقاومت پایه (مگاپاسکال)، W: عرض پایه (متر)، H: ارتفاع پایه (متر)

با توجه به محاسبات انجام شده ابعاد پایه‌ها برای معدن سنگ ساختمانی کپیول برابر ۳×۷×۷ متر و ابعاد اتاق برابر ۳×۲۰×۲۰ متر و مقدار ضریب بازیابی R، برابر ۹۳ درصد محاسبه شده است. به عبارت دیگر ۹۳ درصد از کل ذخیره (۲۴۰۰۰۰ تن)، یعنی ۲۲۳۰۰۰ تن از کانسار قابل استخراج بوده و مابقی به عنوان پایه باقی گذاشته می‌شود.

۳-۳- وضعیت مالی و اقتصادی طرح استخراج به روش روباز و زیرزمینی

در **جدول ۴** و **جدول ۵**، خلاصه‌ای از اطلاعات زمانی و مشخصات مالی طرح استخراج به روش روباز و زیرزمینی در معدن سنگ ساختمانی کپیول ارائه شده است. در هر دو طرح استخراج روباز و زیرزمینی مقدار تولید در سال اول و دوم به ترتیب برابر ۷۰ و ۸۵ درصد ظرفیت و در سال سوم بهره برداری به ظرفیت ۱۰۰ درصد می‌رسد. دوران بهره‌برداری در طرح استخراج به روش روباز با توجه به ظرفیت تولید سالانه، ۷ ساله و در روش زیرزمینی ۹ ساله در نظر گرفته شده است. (کلیه برآورد های ریالی در این مقاله مربوط به سال ۱۳۹۸ می‌باشد).

جدول ۴- خلاصه‌ای از مشخصات طرح استخراج به روش روباز

ردیف	شرح	واحد	سال اول	سال دوم	سال سوم	سال چهارم	سال پنجم	سال ششم	سال هفتم
۱	محصول	هزارتن در سال				۳۶ (سنگ تراورتن)			
۲	مقدار کل ذخیره	هزارتن				۲۴۰			
۳	قیمت متوسط فروش	میلیون ریال بر تن				۴			
۴	حقوق دولتی	میلیون ریال				۵,۷۶۰			
۵	نرخ بهره بانکی	درصد				۱۵			
۶	نرخ مالیات	درصد				۲۵			

جدول ۵- خلاصه‌ای از مشخصات طرح استخراج به روش زیرزمینی

ردیف	شرح	واحد	سال اول	سال دوم	سال سوم	سال چهارم	سال پنجم	سال ششم	سال هفتم	سال هشتم	سال نهم
۱	محصول	تن در سال					۲۶ (سنگ تراورتن)				
۲	مقدار کل ذخیره	هزار تن					۲۴۰				
۳	ابعاد پایه‌ها	متر					۷×۷×۳				
۴	ابعاد اتاق‌ها	متر					۲۰×۲۰×۳				
۵	مقدارِ ذخیره قابل استخراج	هزار تن					۲۲۳				
۶	قیمت متوسط فروش محصول	میلیون ریال برتن					۴				
۷	حقوق دولتی	میلیون ریال					۴,۱۶۰				
۸	نرخ بهره بانکی	درصد					۱۵				
۹	نرخ مالیات	درصد					۲۵				

۳-۴- هزینه‌های سرمایه گذاری ثابت و عملیاتی برای طرح استخراج به روش روباز و زیرزمینی

در **جدول ۶** و **جدول ۷**، مقادیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری ثابت و عملیاتی برای طرح استخراج به روش روباز و زیرزمینی آورده شده است.

۳-۵- تحلیل شاخص‌های مالی طرح استخراج به روش روباز و زیرزمینی

ارزیابی مالی طرح شامل بیان هزینه‌های ثابت سرمایه‌گذاری و منابع تأمین مالی آن است.

علاوه بر آن درآمد حاصل از فروش و کلیه هزینه‌های عملیاتی ثابت و متغیر در ارتباط با طرح محاسبه شده و درنهایت به محاسبه شاخص نرخ بازده داخلی *(IRR) (Internal Rate of Return)* در ارتباط با سرمایه‌گذاری طرح و همچنین دوره بازگشت سرمایه پرداخته شده است.

تمامی مراحل فوق با استفاده از نرم افزار *COMFAR* انجام شده است. در **جدول ۸**، شاخص‌های مالی طرح استخراج به روش روباز و زیرزمینی ارائه شده است.

جدول ۶- هزینه‌های سرمایه‌گذاری ثابت طرح استخراج به روش روباز و زیرزمینی

ردیف	شرح	هزینه (میلیون ریال)		نحوه مستهلک کردن دارایی	
		روباز	زیرزمینی	سال	قراضه
۱	هزینه‌های آماده‌سازی	۶۵,۵۶۰	۴,۳۰۲	۲۰	٪۱۰
۲	کارهای عمرانی و ساخت	۴,۴۰۰	۴,۴۰۰	۱۵	٪۱۰
۳	تأمین ماشین‌آلات و تجهیزات	۷۷,۷۵۰	۱۱۹,۱۷۵	۱۰	٪۱۰
۴	هزینه‌های پیش‌بینی‌نشده	۱۴,۷۷۱	۱۲,۶۹۴	۱۰	٪۱۰
۵	کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری ثابت	۱۶۲,۴۸۱	۱۳۹,۶۳۳	---	---
۶	سرمایه در گردش	۷,۴۰۶	۳,۲۶۰	---	---
۷	**جمع کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری**	**۱۶۹,۸۸۶**	**۱۴۳,۹۲۵**	---------	

جدول ۷- هزینه‌های عملیاتی سالیانه طرح استخراج به روش روباز و زیرزمینی

ردیف	شرح	هزینه (میلیون ریال)		درصد هزینه‌های متغیر
		روباز	زیرزمینی	
۱	تأمین مواد مصرفی	۲,۳۱۹	۲,۱۶۰	٪۵۰
۲	باطله برداری	۵۵,۰۰۰	---	٪۱۰۰
۳	تأمین سوخت و انرژی	۴,۰۸۰	۳,۵۸۰	٪۸۰
۴	تعمیر و نگهداری	۷,۹۹۵	۱۲,۱۳۸	٪۱۰۰
۵	حقوق دولتی	۵,۷۶۰	۴,۱۶۰	٪۱۰۰
۶	نیروی انسانی	۱۱,۲۳۲	۱۰,۷۵۴	٪۷۰
۷	بالاسری	۳,۳۷۰	۳,۲۲۶	٪۷۰
۸	پیش‌بینی‌نشده	۸,۹۷۶	۳,۶۰۲	٪۱۰۰
	جمع	**۹۸,۷۳۱**	**۳۹,۶۲۰**	-----

جدول ۸- شاخص‌های مالی طرح استخراج به روش روباز و زیرزمینی

ردیف	شرح	واحد	روباز	زیرزمینی
۱	نرخ بازده داخلی کل طرح (IRR)	درصد	۱۵/۵۰	۲۹/۶۰
۲	دوره بازگشت سرمایه عادی	سال	۶/۰۷	۴/۲۶
۳	دوره بازگشت سرمایه متحرک	سال	۸/۹۰	۵/۶۰

نرخ بازده داخلی *(IRR)*، نرخ تنزیلی است که مقدار ارزش خالص فعلی *(Net Present Value) (NPV)* را صفر می‌کند. شاخص مالی حداقل نرخ بازده جذب *(Minimum Attractive Rate of Return)(MARR)* مبنای پذیرش یا رد طرح بر اساس *IRR* است. به این صورت که اگر شاخص *IRR* طرح بزرگ‌تر و یا مساوی *MARR* باشد، طرح توجیه‌پذیر است و در غیر این صورت، طرح توجیه اقتصادی نخواهد داشت *(Fazlavi, 2004)*. محاسبات نشان می‌دهند مقدار *IRR* برای طرح استخراج به روش روباز برابر ۱۵/۵۰ درصد و برای طرح استخراج به روش زیرزمینی برابر ۲۹/۶۰ درصد است که برای هر دو طرح مقدار *IRR* بزرگ‌تر از حداقل نرخ جذب‌کننده (۱۵٪) است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هر دو طرح از طرح از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیرهستند.

دوره بازگشت سرمایه نشان‌دهنده سال‌های بعد از دوران سرمایه‌گذاری است که اصل وجوه نقد سرمایه‌گذاری شده بر اثر فعالیت‌های ناشی از طرح به داخل شرکت جریان خواهد یافت. به عبارت دیگر تعداد سال‌هایی که نیاز است تا جریان نقدی مثبت گردد. هرچه این شاخص کوچک‌تر باشد بیانگر سرعت بیشتر جبران جریان نقدی خروجی توسط جریان نقدی ورودی است *(Fazlavi, 2004)*. محاسبات نشان می‌دهد که دوره بازگشت سرمایه برای طرح استخراج به روش روباز بیش از ۸ سال و برای طرح استخراج به روش زیرزمینی برابر ۵/۶ سال است.

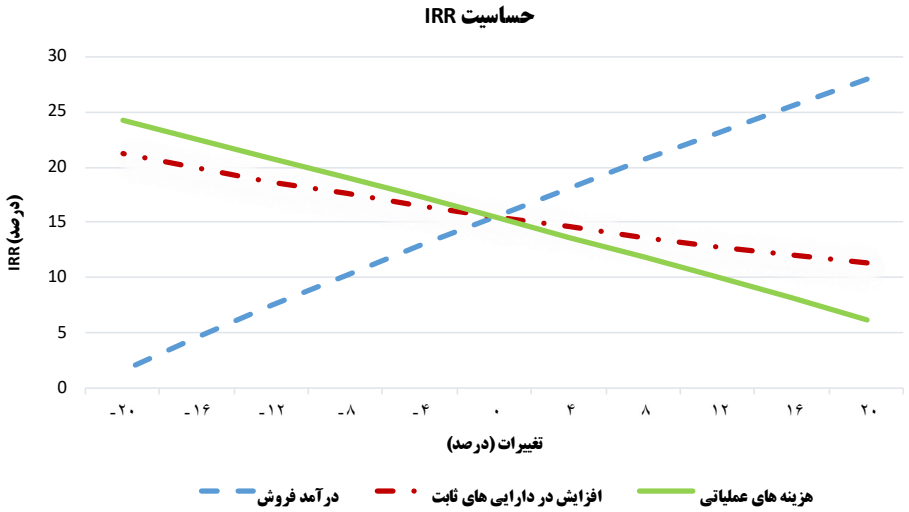
از نتایج فوق برمی‌آید که، برای طرح استخراج به روش روباز نرخ بازگشت داخلی سرمایه *(IRR)* بزرگ‌تر از حداقل نرخ جذب‌کننده است اما دوره بازگشت سرمایه متحرک (با در نظر گرفتن ارزش زمانی پول) بیش از ۸ سال (بیشتر از عمر معدن) است که بیانگر عدم توجیه‌پذیری طرح استخراج به روش روباز خواهد بود ولی برای طرح استخراج به روش زیرزمینی نرخ بازگشت داخلی سرمایه *(IRR)* بزرگ‌تر از حداقل نرخ جذب‌کننده و دوره بازگشت سرمایه ۵/۶ ساله است. بنابراین طرح استخراج به روش زیرزمینی برای معدن سنگ ساختمانی کپیول از توجیه اقتصادی مناسبی برخوردار بوده و لذا این طرح برای سرمایه‌گذار جذابیت دارد.

۴- تحلیل حساسیت

در مبحث آنالیز حساسیت، وضعیت طرح استخراج به روش روباز و زیرزمینی ازنظر *IRR* در حالت‌های گوناگون بررسی شده است. در این بخش تأثیر افزایش و کاهش عوامل اصلی طرح نظیر درآمد فروش، دارایی‌های ثابت و هزینه‌های عملیاتی بر روی *IRR* آنالیز شده است.

۴-۱- طرح استخراج به روش روباز

در **شکل ۴**، نمودار تغییرات در درآمد فروش، دارایی‌های ثابت و هزینه‌های عملیاتی و تأثیر آن بر نرخ بازگشت داخلی سرمایه *(IRR)* نشان داده شده است. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که درآمد فروش بیشترین تأثیر و افزایش در دارایی‌های ثابت کمترین تأثیر را بر روی مقدار *IRR* دارد. در **جدول ۹**، تغییرات درآمد حاصل از فروش، دارایی‌های ثابت و هزینه‌های عملیاتی و تأثیر آن‌ها بر نرخ بازگشت داخلی سرمایه *(IRR)* آورده شده است.



شکل ۴- نمودار تحلیل حساسیت *IRR* نسبت به تغییرات در درآمد فروش، دارایی‌های ثابت و هزینه‌های عملیاتی طرح استخراج روباز

جدول ۹- مقادیر *IRR* در حالت‌های گوناگون تغییرات در درآمد فروش، دارایی‌های ثابت و هزینه‌های عملیاتی در طرح استخراج روباز

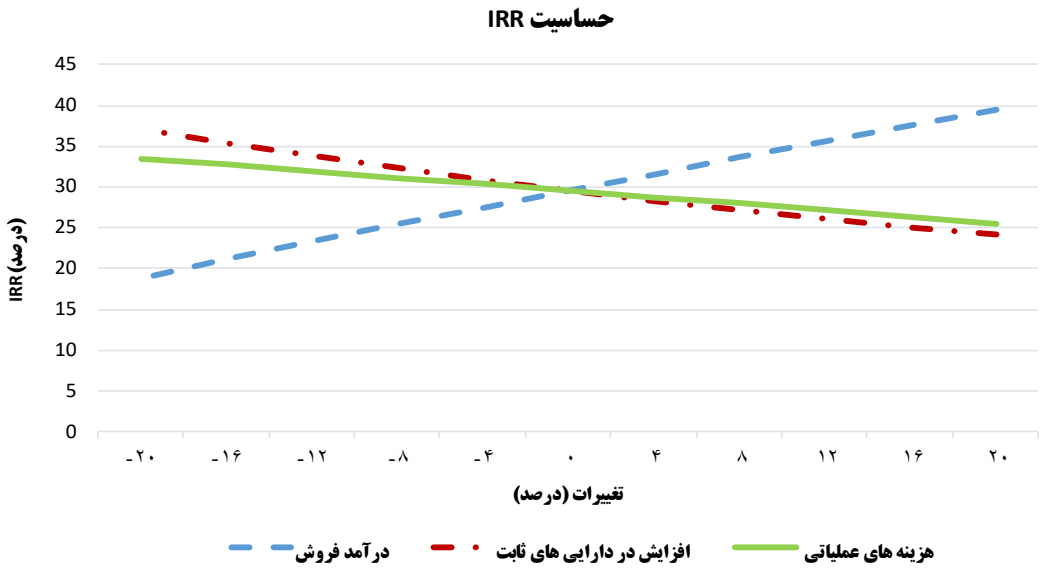
تغییرات (درصد)	۲۰	۱۶	۱۲	۸	۴	۰	-۴	-۸	-۱۲	-۱۶	-۲۰
مقدار *IRR* با تغییرات در درآمد فروش (درصد)	۲۷/۹۸	۲۵/۵۶	۲۳/۱۱	۲۰/۶۲	۱۸/۰۹	۱۵/۵۰	۱۲/۸۷	۱۰/۱۸	۷/۴۳	۴/۶۰	۱/۶۴
مقدار *IRR* با تغییرات در دارایی‌های ثابت (درصد)	۱۱/۲۵	۱۲/۰۱	۱۲/۸۲	۱۳/۶۶	۱۴/۵۶	۱۵/۵۰	۱۶/۵۱	۱۷/۵۷	۱۸/۷۱	۱۹/۹۳	۲۱/۲۳
مقدار *IRR* با تغییرات در هزینه‌های عملیاتی (درصد)	۶/۱۸	۸/۱۰	۹/۹۹	۱۱/۸۶	۱۳/۶۹	۱۵/۵۰	۱۷/۲۹	۱۹/۰۶	۲۰/۸۰	۲۲/۵۲	۲۴/۲۳

با توجه به **جدول ۹**، کاهش درآمد حاصل از فروش باعث کاهش نرخ بازگشت داخلی سرمایه *(IRR)* خواهد شد. با

کاهش درآمد فروش تا ۴ درصد، مقدار *IRR* برابر ۱۲/۸۷ درصد خواهد شد که این مقدار از حداقل نرخ جذب‌کننده (۱۵٪) کمتر بوده و منجر به عدم توجیه اقتصادی طرح استخراج به روش روباز خواهد شد. کاهش دارایی‌های ثابت باعث افزایش نرخ بازگشت داخلی سرمایه *(IRR)* و افزایش در دارایی‌های ثابت باعث کاهش *IRR* خواهد شد. با افزایش دارایی‌های ثابت تا ۴ درصد، مقدار *IRR* برابر ۱۴/۵۶ درصد خواهد شد که این مقدار از حداقل نرخ جذب‌کننده (۱۵٪) کمتر بوده که منجر به عدم توجیه اقتصادی طرح استخراج به روش روباز خواهد شد. کاهش هزینه‌های عملیاتی، افزایش *IRR* را در پی خواهد داشت و افزایش هزینه‌های عملیاتی، باعث کاهش *IRR* خواهد شد. با افزایش هزینه‌های عملیاتی تا ۴ درصد، مقدار *IRR* برابر ۱۳/۶۹ درصد خواهد شد که این مقدار از حداقل نرخ جذب‌کننده (۱۵٪) کمتر بوده که منجر به عدم توجیه‌پذیری اقتصادی طرح استخراج به روش روباز خواهد شد.

۴-۲- طرح استخراج به روش زیرزمینی

در **شکل ۵**، نمودار تغییرات درآمد فروش، دارایی‌های ثابت و هزینه‌های عملیاتی و تأثیر آن بر نرخ بازگشت داخلی سرمایه *(IRR)* نشان داده شده است. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که درآمد فروش بیشترین تأثیر و هزینه‌های عملیاتی کمترین تأثیر را بر روی *IRR* دارد.



شکل ۵- نمودار تحلیل حساسیت *IRR* نسبت به تغییرات در درآمد فروش، دارایی‌های ثابت و هزینه‌های عملیاتی در طرح استخراج زیرزمینی

در **جدول ۱۰** تغییرات درآمد حاصل از فروش، دارایی‌های ثابت و هزینه‌های عملیاتی و تأثیر آن‌ها بر نرخ بازگشت داخلی سرمایه *(IRR)* آورده شده است.

با توجه به جدول ۱۰، کاهش درآمد حاصل از فروش باعث کاهش نرخ بازگشت داخلی سرمایه *(IRR)* خواهد شد. با کاهش درآمد فروش تا ۲۰ درصد، مقدار *IRR* برابر ۱۸/۸۵ درصد خواهد شد که این مقدار از حداقل نرخ جذب‌کننده (۱۵٪) بیشتر بوده و نشان دهنده این است که هنوز طرح از مرز اقتصادی بودن فراتر خواهد بود. افزایش در دارایی‌های ثابت باعث کاهش *IRR* خواهد شد. با افزایش دارایی‌های ثابت تا ۲۰ درصد، مقدار *IRR* برابر ۲۴/۱۷ درصد خواهد شد که هنوز طرح از مرز اقتصادی بودن فراتر خواهد بود. افزایش هزینه‌های عملیاتی، کاهش *IRR* را در پی خواهد داشت. با افزایش هزینه‌های عملیاتی تا ۲۰ درصد، مقدار *IRR* برابر ۲۵/۵۶ درصد خواهد شد که هنوز طرح زیرزمینی از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر خواهد بود.

جدول ۱۰- مقادیر *IRR* در حالت‌های گوناگون تغییرات در درآمد فروش، دارایی‌های ثابت و هزینه‌های عملیاتی در طرح استخراج زیرزمینی

تغییرات (درصد)	۲۰	۱۶	۱۲	۸	۴	۰	-۴	-۸	-۱۲	-۱۶	-۲۰
مقدار *IRR* با تغییرات در درآمد فروش (درصد)	۳۹/۴۹	۳۷/۵۷	۳۵/۶۱	۳۳/۶۴	۳۱/۶۳	۲۹/۶۰	۲۷/۵۳	۲۵/۴۳	۲۳/۲۸	۲۱/۰۹	۱۸/۸۵
مقدار *IRR* با تغییرات در دارایی‌های ثابت (درصد)	۲۴/۱۷	۲۵/۱۳	۲۶/۱۵	۲۷/۲۳	۲۸/۳۸	۲۹/۶۰	۳۰/۹۱	۳۲/۳۱	۳۳/۸۱	۳۵/۴۴	۳۷/۲۰
مقدار *IRR* با تغییرات در هزینه‌های عملیاتی (درصد)	۲۵/۵۶	۲۶/۳۸	۲۷/۱۹	۲۸	۲۸/۸۰	۲۹/۶۰	۳۰/۳۹	۳۱/۱۸	۳۱/۹۶	۳۲/۷۴	۳۳/۵۲

۴-۲-۱- تحلیل حساسیت با توجه به تغییرات ابعاد پایه

با افزایش ابعاد پایه‌ها در روش اتاق و پایه، فاکتور ایمنی افزایش ولی درصد استخراج کاهش می‌یابد. کاهش درصد استخراج باعث کاهش نرخ بازگشت سرمایه داخلی (IRR) خواهد شد. در **جدول ۱۱**، تغییرات IRR با افزایش ابعاد پایه‌های معدنی (با فرض ثابت بودن مقدار دهانه اتاق) نشان داده شده است. با توجه به **جدول ۱۱**، با افزایش ابعاد پایه‌ها تا ۳×۱۲×۱۲، مقدار *IRR* برابر ۲۸/۲۲ درصد است که از حداقل نرخ جذب‌کننده (۱۵٪) بیشتر بوده و هنوز طرح استخراج به روش زیرزمینی از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر خواهد بود.

۴-۳- مقایسه دو روش استخراج روباز و زیرزمینی

در **جدول ۱۲**، دو طرح معدنکاری روباز و زیرزمینی از نظر کلیه شاخص‌های مالی با یکدیگر مقایسه و در هر مورد روش استخراج برتر مشخص شده است. با توجه به مقایسات انجام گرفته در **جدول ۱۲**، توجیه‌پذیری روش معدنکاری زیرزمینی برای اجرا در معدن سنگ ساختمانی کپیول کاملاً مشهود است.

جدول ۱۱- تغییرات *IRR* با افزایش ابعاد پایه‌ها

ابعاد پایه ها	*IRR* (درصد)
۳×۷×۷	۲۹/۶۰
۳×۱۰×۱۰	۲۸/۹۸
۳×۱۲×۱۲	۲۸/۲۲

جدول ۱۲- مقایسه دو روش معدنکاری روباز و زیرزمینی در معدن سنگ ساختمانی کپیول

ردیف	شرح	واحد	روباز	زیرزمینی	روش معدنکاری برتر
۱	عمر پروژه	سال	۸	۱۰	---
۲	ذخیره قابل استخراج	هزارتن	۲۴۰	۲۲۳	روباز
۳	هزینه سرمایه‌گذاری ثابت	میلیون ریال	۱۶۲,۴۸۱	۱۴۰,۶۶۴	زیرزمینی
۴	سرمایه در گردش	میلیون ریال	۷,۴۰۶	۳,۲۶۰	زیرزمینی
۵	بودجه موردنیاز برای شروع طرح	میلیون ریال	۱۶۹,۸۸۷	۱۴۳,۹۲۵	زیرزمینی
۶	هزینه‌های عملیاتی	میلیون ریال	۹۸,۷۳۲	۳۹,۶۲۰	زیرزمینی
۷	سود خالص	میلیون ریال	۲۵,۰۲۳	۳۸,۹۹۵	زیرزمینی
۸	ارزش خالص فعلی سرمایه‌گذاری	میلیون ریال	۳,۱۵۲	۹۱,۲۸۲	زیرزمینی
۹	نرخ بازگشت داخلی سرمایه	درصد	۱۵/۵۰	۲۹/۶۰	زیرزمینی
۱۰	دوره بازگشت سرمایه عادی	سال	۶	۴	زیرزمینی
۱۱	دوره بازگشت سرمایه متحرک	سال	۸/۹	۵/۶	زیرزمینی

۵- نتیجه گیری

طبق آمار ارایه شده استخراج زیرزمینی ذخایر سنگ ساختمانی در سال های اخیر رشد چشم‌گیری داشته است. در ایران تمامی معادن سنگ ساختمانی به روش روباز استخراج می‌شوند. از آثار سوء معدنکاری روباز ذخایر سنگ ساختمانی می‌توان به آسیب به عوارض سطح زمین و پوشش‌گیاهی منطقه، افزایش هزینه‌های باطله‌برداری و افزایش هزینه‌های باربری اشاره کرد. به منظور کاهش این آثار، استخراج زیرزمینی ذخایر سنگ ساختمانی گزینه مناسبی است. با توجه به امکان‌سنجی اقتصادی کاربرد روش استخراج زیرزمین در معدن مورد مطالعه، برای طرح استخراج به روش روباز نرخ بازده داخلی برابر ۱۵/۵۰ درصد و برای طرح استخراج به روش زیرزمینی ۲۹/۶۰ درصد است که نشان دهنده ارجحیت طرح استخراج زیرزمینی نسبت به روباز در معدن مورد مطالعه است. در طرح استخراج به روش زیرزمینی، ابعاد اتاق برابر ۳×۲۰×۲۰ متر و ابعاد پایه‌ها برابر ۳×۷×۷ متر برآورد شده است .آزمون تحلیل حساسیت برای ابعاد پایه‌ها در روش اتاق و پایه نشان می دهد که اگر ابعاد پایه‌ها تا ۳×۱۲×۱۲ متر افزایش پیدا کند، هنوز طرح استخراج به روش زیرزمینی اقتصادی است. همچنین آزمون تحلیل حساسیت برای سه عامل درآمد فروش، دارایی‌های ثابت و هزینه‌های عملیاتی نیز انجام شد و نتایج نشان داد که با کاهش ۲۰ درصدی در درآمد فروش سنگ تراورتن و افزایش ۲۰ درصدی در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌های عملیاتی، هنوز طرح استخراج به روش زیرزمینی در معدن مورد مطالعه از لحاظ اقتصادی توجیه پذیر خواهد بود.

۶- سیاهه‌ی نمادها

جدول ۱۳- سیاهه ی نمادها

نماد	واحد	شرح
σ_p	*Mpa*	مقاومت پایه
σ_c	*Mpa*	مقاومت فشاری نمونه
S_p	*Mpa*	تنش وارد بر پایه
γ	Kg/m^3	وزن مخصوص
h	*m*	عمق معدن
w	*m*	عرض پایه
H	*m*	ارتفاع پایه
F_s	-	ضریب ایمنی

۷- مراجع

Aksoy, C. Okay, and G. Gulsev Uyar Aksoy. "Pillar Design with Numerical Modeling for Underground Marble Quarries of Future." Paper presented at the 5th Symposium of the Macedonian Association for Geotechnics, Ohrid, Macedonia, June 2022.

Ashmole, I., & Motloung, M. (2008). Dimension stone: the latest trends in exploration and production technology. In Proceedings of the International Conference on Surface Mining (pp. 5-8).

Ataei, M. (2008). Extraction of building stones. Shahrood University of Technology Publications, First Edition, Shahrood, Iran.

Ataei, M. (2015). Self-supporting methods in underground mining. Shahrood University of Technology Publications, Shahrood, Iran.

Bahri, Maziyar & Ghasemi, Ebrahim. (2016). Applicability of underground mining methods in natural stone mines. 2nd Iranian Mining Technologies Conference and Exhibition (pp. 21-26).

Benardos, A. G., Kaliampakos, D. C., Prousiotis, J. G., Mavrikos, A. A., & Skoparantzos, K. A. (2001). Underground aggregate mining in Athens: a promising investment plan. Tunnelling and

underground space technology, 16(4), 323-329.

Careddu, N., Siotto, G., & Tuveri, A. (2010). Evolution of a marble quarry: from open cast to underground exploitation. In Proc. Global Stone Congress Of Italy (pp. 2-5).

Fazlavi, A. (2004). Mining economics. Saye Gostar Publications, Qazvin, Iran.

Hajati, A. (2016). Underground extraction of dimension stones: A new approach for industry development in Iran. Journal of Mining Engineering Organization, (30), 20-28.

https://fa.wikipedia.org /. Accessed27 July, 2019.

Shinobe, A. (1997). Economics of underground conversion in an operating limestone mine (Doctoral dissertation, McGill University Libraries).

Tunneling & Underground Space Engineering

(TUSE)

tuse.shahroodut.ac.ir

Volume 12-Issue 2\Winter 2024

نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

Feasibility study of converting surface mining to underground mining in dimension stone mines (A case study: Kapil dimension stone mine)

M. Bigdeli[1]; M. Ataei[2]; R. Rafiee[3*]

1- MSc Student; Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology
mbigdeli.mine@gmail.com

2- Professor; Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology,
Ataei@shahroodut.ac.ir

3- Associate Professor; Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology,
Raminrafiee@shahroodut.ac.ir

Received: 7 Jul 2024; Accepted: 3 Jan 2025
DOI: 10.22044/tuse.2025.14743.1488

Keywords

Feasibility study
Dimension stone
Underground mining
Environment

Extended Abstract

Summary

Dimension stone resources play a crucial role in the economic and industrial development of any country. In Iran, all dimension stone mines are currently extracted using open-pit mining methods. However, open-pit mining poses significant challenges, including environmental degradation, high waste removal costs, and limited surface reserves. This study investigates the feasibility of underground mining as an alternative method to overcome these challenges. The research findings highlight the economic advantages and reduced environmental impact of underground mining compared to open-pit mining methods.

Introduction

The extraction of dimension stone through open-pit mining has been the predominant method in Iran, but it is increasingly being challenged by environmental concerns and economic inefficiencies. The depletion of surface reserves, coupled with rising waste removal costs, necessitates exploring alternative extraction methods. Underground mining offers a viable solution with the potential to minimize surface damage, reduce costs, and enhance product quality. This study aims to assess the feasibility of underground mining in high overburden dimension stone mines, and as a case study, Kapil dimension stone mine is considered.

Methodology and Approaches

To evaluate the economic viability of underground mining, a comparative analysis was conducted between open-pit and underground mining methods. The internal rate of return (IRR) was calculated for both methods. Additionally, a sensitivity analysis was performed on three key financial parameters: revenue from stone sales, fixed assets, and operating costs. The study analyzed how fluctuations in these factors could impact the economic feasibility of underground mining.

Results and Conclusions

The economic analysis indicated that the IRR for open-pit mining was 15.50%, whereas for underground mining, it was significantly higher, i.e. 29.60%. This demonstrates the economic advantage of underground mining over open-pit mining. Sensitivity analysis further reveals that even with a 20% decrease in revenue from stone sales and a 20% increase in both investment and operating costs, underground mining remains economically viable.

Based on these findings, it is recommended that mines experiencing environmental and economic challenges should consider transitioning to underground mining. This method offers enhanced efficiency, lower

environmental impact, and improved product quality. Future research should focus on optimizing underground mining techniques to maximize benefits in dimension stone extraction in Iran.