



عنوان طرح:

بررسی امکان بازیابی باطله های معدن تراورتن انگوران و تبدیل  
آن به محصولات با ارزش افزوده

(گزارش مدیریتی)

شماره قرارداد: ۳۸۸۳۲:۵۱

کارفرما:

سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو)

مجری:

دکتر رحمان احمدی

(عضو هیات علمی دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره))

آذر ۱۳۹۹

سنگ تراورتن، پرکاربردترین سنگ صنعت ساختمانی است. ویژگی‌هایی متمایز کننده این سنگ مانند مقاومت بالا، صیقل پذیری، تنوع رنگی قابل قبول، زیبایی ظاهری منحصر به فرد و موارد دیگر، آن را به رایج‌ترین گزینه سنگ به ویژه برای نمای بیرونی ساختمان تبدیل کرده است. علاوه بر این، سنگ تراورتن نقش نسبتاً خوبی در عایق صوتی، گرمایی و سرمایی دارد که این ویژگی به دلیل حفره‌های داخل ساختار آن می‌باشد. یکی از موضوعاتی که در دنیا در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است، ارائه روش‌های نوین مدیریت استخراج و فرآوری سنگ‌های ساختمانی و همچنین مدیریت ضایعات سنگ در جهت استفاده از آنها برای تولید محصولات با ارزش افزوده نظیر سنگ‌های آنتیک (طبیعی و مصنوعی)، پودر سنگ، تولید کاغذ و موارد کاربردی دیگر می‌باشد. در کشور ما به دلایل مختلف هم در مرحله استخراج سنگ و هم در فرآیند فرآوری آن، میزان قابل توجهی ضایعات سنگ تولید می‌گردد که این مقدار از استاندارد جهانی بسیار بالاتر است. میزان ضایعات تولیدی سنگ در بخش استخراج تا ۸۰ درصد و در بخش فرآوری ۵۰ تا ۶۰ درصد برآورد می‌گردد. با توجه به هزینه‌های بالای استخراج و فرآوری، این حجم از سنگ باطله، فرآیند را به سمت غیر اقتصادی شدن سوق خواهد داد (Daneshmandi, 1397). شکل ۱ نمونه‌هایی از باطله‌های سنگ تراورتن را نشان می‌دهد.



شکل ۱-انواع باطله‌های حاصل از استخراج سنگ ساختمانی

(بلوک‌های معیوب با اشکال ناقص (راست)، بلوک‌های نامنظم با ابعاد زیر ۵۰ سانتی متر، نرمه‌ها -چپ) (Papantonopoulos, 2007)

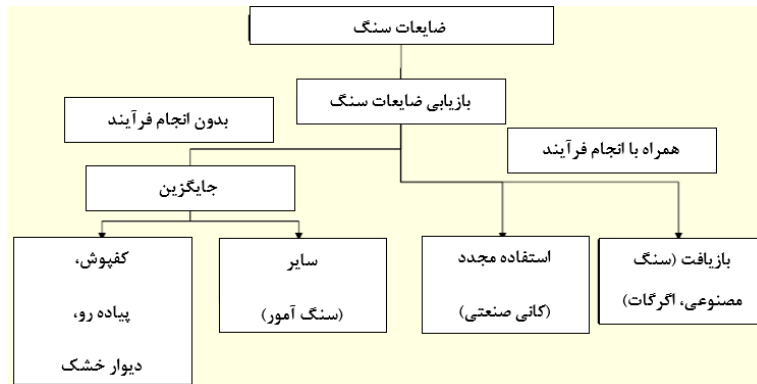
معدن تراورتن انگوران در محدوده استان زنجان و ۱۲۵ کیلومتری جنوب غرب شهر زنجان واقع شده است (شکل ۲). بنابر اطلاعات دریافتی، معدن انگوران از سال ۱۳۹۴ شروع به کار کرده است. سالیانه ۲۰۰ هزار تن سنگ تراورتن استخراج می‌شود که ۱۵۰۰۰ تن آن قابل مصرف و بقیه معادل ۱۸۵۰۰۰ تن باطله و ضایعات می‌باشد و به عنوان سنگ لاشه دیو می‌گردد (IMPASCO, 1399). دیوی فعلی باطله از زمان شروع کار معدن ۳۵۰۰۰۰ متر مکعب است که میزان آن با احتساب وزن مخصوص سنگ معادل ۲/۴ تن بر متر مکعب، ۸۴۰۰۰۰ تن برآورد می‌گردد. با فرض طول عمر طرح معادل ۱۰ سال و تولید باطله سالیانه ۱۸۵۰۰۰ تن و در نظر گرفتن ۸۴۰۰۰۰ تن دیوی باطله موجود، معادل ۲،۶۹۰،۰۰۰ تن ضایعات سنگ در طی ۱۰ سال وجود خواهد داشت. بر اساس مطالعات، عمده معادن تراورتن کشور در استان‌های اصفهان، مرکزی، آذربایجان شرقی و غربی و یزد قرار دارند. استان زنجان با ۱۳ معدن فعال و غیرفعال در رتبه ششم کشور قرار دارد. لذا پتانسیل این استان در موضوع سنگ ساختمانی تراورتن قابل توجه است.



شکل ۲- معدن سنگ ساختمانی تراورتن انگوران

شرایط دپوی باطله در معدن تراورتن انگوران به نحوی است که بهترین گزینه برای آن بازیافت و تبدیل آن به محصولات با ارزش افزوده بالا می باشد. مصرف واقعی سنگ در کشور با توجه با رکود ساخت و ساز، ۷/۵ میلیون تن و ظرفیت استخراج این ماده معدنی، سالانه افزون بر ۲۵ میلیون تن است (Daneshmandi, 1397). در کشور حدود ۶۰۰۰ تا ۶۵۰۰ واحد سنگ بری فعالیت دارند که بیش از نیمی از آنها در استان تهران واقع شده اند. ظرفیت تجهیزاتی بالقوه‌ای که اکنون در این کارخانه‌ها وجود دارد، برای تبدیل ۲۵ میلیون تن سنگ خام به سنگ فرآوری شده در سال کافی است. در شرایط یکسان، عمده‌ی ضایعات سنگ به نحوه‌ی عملکرد در معادن مربوط می‌شود. در بهترین حالت در ایران، تولید سنگ با ۵۰ درصد ضایعات همراه است که اقدامات ویژه‌ای به منظور مدیریت و بازیافت ضایعات صورت نگرفته است (Soroush, 1393). مدیریت ضایعات سنگ در دنیا سه عامل نحوه فعالیت‌های اکتشافی، عملیات استخراج و عملیات فرآوری را از جمله مهمترین عوامل تولید ضایعات معرفی کرده و برای حل این موضوع، پیشگیری از تولید ضایعات و در مرتبه دوم بازیافت و تولید محصولات ارزشمند از آن را به عنوان بهترین راهکار ارائه داده است (Papantonopoulos, 2007). توجه به پدیده دگرسانی سنگ، نوع لایه بندی سنگ، عدم وجود درزه و شیبستویته، قابلیت برش بالا و سختی مناسب سنگ از پارامترهای حیاتی در مبحث پیشگیری از تولید ضایعات در بخش اکتشاف است. در ادامه، توجه به روش استخراج سنگ، آموزش کامل نیروی انسانی، استفاده از تجهیزات مدرن، دقت در عملیات حمل و نقل سنگ از پارامترهای اساسی مدیریت ضایعات سنگ در حوزه استخراج می باشد. در بخش فرآوری نیز استفاده از تجهیزات مدرن و کارگران متخصص از پارامترهای اساسی و حائز اهمیت جهت کاهش تولید پسماندهای سنگ در نظر گرفته می شوند. شکل ۳ ساختار مدیریت ضایعات سنگ ساختمانی در دنیا با در نظر گرفتن رویکرد بازیابی برای استفاده مجدد از باطله‌ها را نشان می‌دهد.

بر اساس بازدید میدانی و بررسی فعالیت‌های صورت گرفته از معدن و دپوهای باطله معدن تراورتن انگوران، تاکنون بر روی این باطله هیچگونه عملیات خاصی جهت تولید ماده‌ای با ارزش افزوده بالاتر صورت نگرفته است. با توجه به حجم بالای ضایعات تولید شده و خصوصیات سنگ معدن تراورتن انگوران، طرحی با عنوان " بررسی امکان بازیابی باطله‌های معدن تراورتن انگوران و تبدیل آن به محصولات با ارزش افزوده" تدوین و در دستور کار قرار گرفت.



شکل ۳- ساختار مدیریت باطله سنگ ساختمانی با در نظر گرفتن رویکرد بازیابی برای استفاده مجدد از باطله (Papantonopoulos, 2007).

در این طرح و در ابتدای گزارش، سوابق اکتشافی و استخراجی معدن، کلیاتی در ارتباط با مزایا و معایب سنگ تراورتن، عوامل تولید ضایعات سنگ تراورتن، وضعیت ضایعات سنگ تراورتن در ایران و دنیا و همچنین مدیریت آن و روش‌های بهبود عملکرد در زمینه ضایعات در بخش‌های استخراج و فرآوری مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. پس از این مرحله، مطالعات شناسایی شامل آنالیز XRF، آنالیز XRD، تست‌های فیزیکی نظیر اندازه‌گیری سختی، میزان جذب آب، مطالعات پتروگرافی بر روی نمونه‌های سنگ تراورتن برداشت شده از بخش ضایعات معدن به همراه تحلیل نتایج جهت کاربرد ضایعات مذکور در موارد مختلف صورت گرفت. در ادامه، امکانسنجی فنی و اقتصادی احداث واحدهای تولید سنگ آنتیک طبیعی و مصنوعی، تولید پودر سنگ و کاغذ سنگی از ضایعات سنگ تراورتن به عنوان چهار راهبرد کاربردی در موضوع مدیریت و بازیافت باطله‌های معدن تراورتن انگوران به طور کامل تشریح شد. در ادامه، اقدام به اولویت بندی طرح برتر بر اساس معیارهای اقتصادی، بازاریابی و فنی گردید. پس از انتخاب طرح برتر، شرایط فنی و اقتصادی اجرای این طرح با دو روش احداث کارگاه/کارخانه ثابت و یا موبایل (سیار) بررسی شد و مزایا و معایب آن تحلیل و ارزیابی اقتصادی گردید. در انتها نیز دو نمونه پودر سنگ و سنگ آنتیک طبیعی به عنوان شاهدهی بر اجرایی بودن این پیشنهادها از ضایعات سنگ تراورتن انگوران، در مقیاس آزمایشگاهی تولید گردید.

## ۲- نمونه برداری و مطالعات شناسایی ضایعات تراورتن

با هدف بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی باطله معدن انگوران، مطالعات جهت آنالیز XRF و XRD و بررسی میزان سختی، تخلخل، وزن مخصوص، جذب آب و پتروگرافی انجام گرفت. نمونه برداری از ضایعات معدن و کارخانه برش سنگ انجام گرفت که تصاویر آن در شکل ۴ قابل مشاهده است. نمونه‌ها پس از همگن سازی توسط انواع سنگ شکن و آسیا به پودر تبدیل و برای آنالیزهای مختلف ارسال شدند. با توجه به خصوصیات شیمیایی و فیزیکی باطله معدن تراورتن انگوران، اطلاعات زیر بدست آمد:

✓ از آنجاییکه سختی نمونه در حدی است که میزان برش‌دهی را تسهیل می‌کند و همچنین میزان تخلخل و جذب آب نیز در محدوده‌ای است که فرآیند اختلاط با ملات را بهبود می‌بخشد، لذا می‌توان در صنعت تولید سنگ آنتیک طبیعی و مصنوعی از این نوع سنگ استفاده کرد.



شکل ۴- تصاویری از باطله‌های موجود در معدن و کارگاه برش سنگ انگوران

- ✓ از آنجاییکه ترکیبات شیمیایی موجود در تراورتن شباهت زیادی با سنگ آهک و مرمریت دارد، لذا می‌توان از پودر سنگ تراورتن تولید شده بعنوان فیلر (پر کننده) در تولید بتن سبک استفاده کرد. وزن مخصوص کمتر تراورتن نسبت به مرمریت و گاهاً سنگ آهک، موجب بهبود ساختار بتن سبک خواهد شد.
- ✓ برخی از انواع کاغذهای سنگی نیاز به کلسیم کربنات با درخشندگی و شفافیت بالا بعنوان ماده اولیه دارند، لذا به طور قطع نمی‌توان گفت از باطله سنگ تراورتن انگوران می‌توان در این بخش استفاده کرد، اما با توجه به خلوص ۹۶ درصدی کلسیم کربنات در تراورتن و همچنین درصد بسیار ناچیز آهن، می‌توان نتیجه گرفت که تولید کاغذ از نوع دیگر می‌تواند در دستور کار قرار گیرد.

### ۳- بررسی فنی و اقتصادی تولید محصولات با ارزش افزوده بالا از ضایعات تراورتن

در این مرحله، ضمن تشریح فرآیند تولید محصولات مختلف از ضایعات سنگ ساختمانی تراورتن، مطالعات فنی و اقتصادی طرح‌ها، اولویت بندی طرح‌ها بر اساس شاخص‌ها و پارامترهای مختلف و همچنین بررسی اجرای طرح انتخابی با دو روش موبایل و یا ایستا (کارگاه ثابت) از دیدگاه اقتصادی، صورت گرفته است. محصولات مورد نظر تولیدی از ضایعات سنگ تراورتن شامل تولید سنگ آنتیک طبیعی و مصنوعی، تولید پودر سنگ تراورتن و تولید کاغذ یا مشتقات آن می‌باشند.

#### ۳-۱- تولید سنگ آنتیک طبیعی

بر اساس اطلاعات بدست آمده ۲۰ تا ۲۵ درصد ضایعات سنگ تراورتن قابل استفاده در بخش تولید سنگ آنتیک طبیعی می‌باشد. لذا بر اساس اطلاعات بخش مقدمه گزارش، ۶۳۸،۸۸۰ تن سنگ لاشه مطلوب برای اجرای طرح تولید سنگ آنتیک طی ۱۰ سال آینده موجود خواهد بود که ظرفیت سالانه ورودی آن، معادل ۶۳،۸۸۸ تن می‌باشد. در روش تولید سنگ آنتیک طبیعی، قطعات تفکیک شده براساس ضخامت و ابعاد در محل مناسب قرار داده می‌شوند. این سنگ‌ها توسط کارگرانی که استادکار و متخصص این کار در نظر گرفته شده‌اند به ابعاد قطعات کوچکتری مثلاً ۲×۲ cm یا ۱×۱ cm یا به هر شکل دیگری برش داده شده و به یکدیگر چسبانده می‌شوند. این سنگ‌ها که به اشکال و ابعاد مورد نظر تبدیل شده‌اند، به‌طور مجزا در دستگاه میکسر قرار گرفته و درون دستگاه، مقداری (حد معین) آب ریخته و دستگاه روشن می‌گردد تا پس از چند ساعت،

در اثر سایش قطعات برش خورده روی یکدیگر، شکلی کهنه به خود بگیرند. پس از آن، محصول به دست آمده جهت خشک شدن در محل‌های مخصوص، نگهداری می‌شود، با خشک شدن قطعات، بسته به نوع طرح، قالب‌هایی که از قبل به این منظور طراحی و با موادی مثل سیلیکون ساخته شده‌اند در اختیار کارگران این بخش قرار داده می‌شوند (Fazel, 1390).

در مبحث بررسی فنی و اقتصادی اجرای طرح تولید آنتیک طبیعی، نرخ تورم، نرخ مالیات، طول عمر طرح، ظرفیت ورودی و ظرفیت محصول به ترتیب معادل ۳۲٪، ۲۵٪، ۱۰ سال، ۶۳۸۸۸ تن و ۲۶۶۲۰ تن در نظر گرفته شد. در ادامه، شیفت کاری شامل ۳ شیفت ۸ ساعته در شبانه روز و ۳۳۰ روز کاری در سال و قیمت فروش محصول برای آنتیک طبیعی ۱۰ دلار بازای هر مترمربع لحاظ گردید. بر اساس بررسی‌های انجام شده، امکانات زیربنایی از جمله زمین، برق، چاه آب و باسکول در منطقه وجود دارد و برای اجرای این طرح، انشعاب برق ۱۵۰ کیلوواتی برای تولید سنگ آنتیک طبیعی کافی خواهد بود. مواد اولیه مصرفی هم به طور کامل در داخل کشور قابل تهیه است. در جدول ۱ نتایج حاصل از محاسبات بررسی فنی و اقتصادی با استفاده از نرم افزار کامفار بر مبنای هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی سالیانه آمده است.

جدول ۱- خلاصه نتایج محاسبات اقتصادی طرح تولید سنگ آنتیک طبیعی توسط نرم افزار کامفار

ردیف	شاخص اقتصادی	مقدار
۱	سرمایه گذاری ثابت	۶۹،۵۰۹ میلیون ریال
۲	سرمایه در گردش	۷،۳۶۹ میلیون ریال
۳	سرمایه گذاری کل	۷۶،۸۷۸ میلیون ریال
۴	هزینه تولید سالیانه	۳۷،۶۰۸ میلیون ریال
۵	فروش سالیانه	۵۳۲۴۰ میلیون ریال
۶	نرخ بازگشت داخلی سرمایه (IRR)	۵۶/۹۱٪
۷	ارزش خالص فعلی (NPV)	۸۹،۶۵۸ میلیون ریال
۸	مدت زمان بازگشت سرمایه در تورم ۳۲ درصد	۴ سال و ۴ ماه از شروع بهره برداری

مطابق اطلاعات جدول ۱، طرح تولید آنتیک طبیعی با هزینه سرمایه گذاری ۶۹،۵۰۹ میلیون ریال دارای نرخ بازگشت (IRR) ۵۶/۹۱ درصد و ارزش خالص فعلی (NPV) ۸۹،۶۵۸ میلیون ریال است که پس از گذشت ۴ سال و ۴ ماه از شروع بهره برداری، قابل بازگشت است.

### ۳-۲- تولید سنگ آنتیک مصنوعی

در طرح دوم، تولید سنگ آنتیک مصنوعی، ابتدا ضایعات سنگ پودر شده و سپس با مواد خاص، مخلوط و در ادامه، با اندازه و قطر خواسته شده شکل دهی می‌گردد. مراحل مختلف تولید سنگ آنتیک مصنوعی به شرح ذیل می‌باشد (Amiri, 1390):

- ✓ تهیه مواد اولیه و مخلوط کردن آنها با نسبت مناسب
- ✓ وارد شدن خوراک با فرمولاسیون مورد نظر به کارخانه
- ✓ استفاده از فشار خلأ برای فشرده شدن مخلوط مواد اولیه و رزین و تهیه بلوک های اولیه



- ✓ برش دادن بلوک‌های اولیه به بلوک‌های نازک تر
- ✓ سمباده زدن و صیقل کاری و پولیش برای ایجاد سطح صاف و براق در سنگ
- ✓ نقش زدن برای ایجاد طرح و رنگ در روی سنگ

در این طرح نیز نرخ تورم، نرخ مالیات، طول عمر طرح، ظرفیت ورودی و ظرفیت محصول به ترتیب معادل ۳۲٪، ۲۵٪، ۱۰ سال، ۶۳۸۸۸ تن و ۲۶۶۲۰ تن و شیفیت کاری شامل ۳ شیفیت ۸ ساعته در شبانه روز و ۳۳۰ روز کاری در سال و قیمت فروش محصول برای آنتیک مصنوعی ۳۵ دلار بازای هر مترمربع در نظر گرفته شده است. برای اجرای این طرح، یک انشعاب برق ۲۵۰ کیلوواتی مورد نیاز می باشد. مواد اولیه مصرفی هم به طور کامل در داخل کشور قابل تهیه می باشند. در جدول ۲ نتایج حاصل از محاسبات نرم افزار کامفار را برای طرح تولید سنگ آنتیک مصنوعی آورده شده است.

جدول ۲- نتایج محاسبات اقتصادی طرح آنتیک مصنوعی توسط نرم افزار کامفار

ردیف	موارد	مقدار
۱	سرمایه گذاری ثابت	۱۳۰،۹۹۵ میلیون ریال
۲	سرمایه در گردش	۲۳،۴۱۳ میلیون ریال
۳	سرمایه گذاری کل	۱۵۴،۴۰۸ میلیون ریال
۴	هزینه تولید سالیانه	۱۴۹،۲۲۵ میلیون ریال
۵	فروش سالیانه	۱۸۶،۳۳۹ میلیون ریال
۶	نرخ بازگشت داخلی سرمایه (IRR)	۶۴/۷۱٪
۷	ارزش خالص فعلی (NPV)	۲۲۹،۱۵۳ میلیون ریال
۸	مدت زمان بازگشت سرمایه در تورم ۳۲ درصد	۳ سال و ۶ ماه از شروع بهره برداری

طرح تولید آنتیک مصنوعی با هزینه سرمایه گذاری ۱۳۰،۹۵۵ میلیون ریال دارای نرخ بازگشت (IRR) ۶۴/۷۱ درصد و ارزش خالص فعلی (NPV) ۲۲۹،۱۵۳ میلیون ریال است که پس از گذشت ۳ سال و ۶ ماه از شروع بهره برداری قابل بازگشت است.

### ۳-۳- تولید پودر سنگ

در یک نگاه جامع و کاربردی می توان گفت مهمترین کاربرد پودر سنگ در زمینه تولید مصالح ساختمانی از جمله تولید بتن است. در روش صنعتی پس از استخراج، سنگ از معدن به کارخانه سنگ کوبی انتقال یافته و توسط سنگ شکن‌های فکی کوبشی قدرتمندی، خرد می شود. قطعه سنگ‌هایی که از سنگ شکن خارج می شوند، در مرحله بعد تحت فرآیند آسیا به ذرات ریز و میکرونی تبدیل می گردند. سنگ‌های خرد شده، معمولاً با استفاده از سرنده و یا سیکلون‌های هوایی به محدوده های ابعادی مختلف تقسیم بندی می شوند که در محدوده ذرات نرم قرار می گیرد و پس از آن قابل مصرف در صنعت می باشند. از پودر سنگ و خرده سنگ تراورتن در تولید دی اکسیدکربن، پوست کنی برنج، خمیر کاغذ، صابون سازی و صنعت شیشه استفاده می شود. از پودر سنگ تراورتن به عنوان پرکننده در تهیه آسفالت، کود شیمیایی، حشره کش ها، رنگ سازی، لاستیک سازی و پلاستیک سازی نیز استفاده می شود (Hami, 1379). در این طرح، ۵۰ درصد از باطله های تولید شده در معدن تراورتن انگوران قابل استفاده در کارگاه برای تولید پودر سنگ می باشند. مفروضات اقتصادی از جمله نرخ تورم، نرخ مالیات، عمر طرح،

شيفت كاري، وضعيت زمين و چاه آب در اين پروژه مانند بخش قبل است، اما ظرفيت ورودی، ظرفيت محصول، قيمت فروش و انشعاب برق به ترتيب ۱۳۴۵۰۰ تن، ۱۳۱۸۱۰ تن، ۱۵۰۰ هزار ريال بازای تن و ۵۰۰ كيلووات در نظر گرفته شد. مواد اوليه مصرفی در اين طرح در داخل كشور قابل تهيه می باشند. جدول ۳، نتايج حاصل از محاسبات اقتصادي توليد پودر سنگ را توسط نرم افزار كامفار كه بر اساس هزينه‌های سرمايه گذاري و عملياتی سالانه است، نشان می‌دهد.

جدول ۳- خلاصه نتايج محاسبات اقتصادي طرح توليد پودر سنگ توسط نرم افزار كامفار

ردیف	موارد	مقدار
۱	سرمايه گذاري ثابت	۱۴۶،۰۳۹ ميليون ريال
۲	سرمايه در گردش	۱۶،۶۵۲ ميليون ريال
۳	سرمايه گذاري كل	۱۶۲،۶۹۱ ميليون ريال
۴	هزينه توليد سالانه	۱۳۶،۵۳۰ ميليون ريال
۵	فروش سالانه	۱۹۷،۷۱۵ ميليون ريال
۶	نرخ بازگشت داخلي سرمايه (IRR)	۸۲/۶۱٪
۷	ارزش خالص فعلي (NPV)	۴۱۹،۹۱۸ ميليون ريال
۸	مدت زمان بازگشت سرمايه در تورم ۳۲ درصد	۲ سال و ۶ ماه از شروع بهره برداري

بر اساس نتايج، طرح توليد پودر سنگ با هزينه سرمايه گذاري ۱۴۶،۰۳۹ ميليون ريال دارای نرخ بازگشت (IRR) ۸۲/۶۱ درصد و ارزش خالص فعلي (NPV) ۴۱۹،۹۱۸ ميليون ريال است كه پس از گذشت ۲ سال و ۶ ماه از شروع بهره برداري، قابل بازگشت است.

### ۳-۴- توليد كاغذ

كاغذسنگي در گراماژ ۴۵ تا ۵۰۰ توليد و برای انواع پوستر، ساك‌های دستی، كاغذ ديواری استفاده می‌شود. كاغذهای سنگي در ضخامت‌های بالا از استحكام زيادی برخوردارند و امکان پارگی آنها بسيار كم است. یکی از کاربردهای بسيار مهم كاغذ در ايران در زمينه بسته‌بندی سيمان می باشد. به طور خلاصه مواد تشكيل دهنده كاغذ سنگي به شرح ذيل است (Dtcompany, ۱۳۹۹):

- ✓ كربنات كلسيم (۸۰ درصد وزنی): با خلوص بالای ۹۰ درصد و در دانه بندی ۱۲۰۰ مش به صورت ميكرونيزه
- ✓ پلی پروپيلن يا پلی اتيلن: در حدود ۱۵ درصد وزنی
- ✓ افزودنی غير سمی: ۵ درصد وزنی

بسته به نوع كاغذ، مواد دیگری مثل پروپيلن، پلی اتيلن، رزين‌ها و انواع مواد شيميايي به پودر سنگ اضافه می‌شوند. اين مواد پس از مخلوط شدن، تغيير شكل يافتن و فرايند اكستروژن، به يك مستريچ خاص تبديل می‌شوند. در اين طرح نيز در حدود ۵۰ درصد از باطله های معدن انگوران قابل تبديل به كاغذ سنگي هستند. كليه مفروضات اقتصادي مانند بخش‌های قبلی است، ولی ظرفيت محصول، قيمت فروش و انشعاب برق به ترتيب معادل ۱۱۴۳۲۵ تن، ۱۵۲ ميليون ريال بر تن و يك مگاواتی در نظر



گرفته شده است. جدول ۴ نتایج حاصل از محاسبات نرم افزار کامفار را که بر اساس هزینه‌های سرمایه گذاری و عملیاتی سالیانه است برای طرح کاغذ سنگی نشان می‌دهد.

جدول ۴- خلاصه نتایج محاسبات اقتصادی طرح کاغذ سنگی توسط نرم افزار کامفار

ردیف	موارد	مقدار
۱	سرمایه گذاری ثابت	۴۲۷،۳۷۸ میلیون ریال
۲	هزینه تولید سالیانه	۱۷،۳۳۰،۹۳۷ میلیون ریال
۳	فروش سالیانه	۱۷،۳۷۷،۴۰۰ میلیون ریال
۴	نرخ بازگشت داخلی سرمایه (IRR)	۵۰/۸۹٪
۵	ارزش خالص فعلی (NPV)	۳۶۷،۶۶۶ میلیون ریال
۶	مدت زمان بازگشت سرمایه در تورم ۳۲ درصد	۵ سال از شروع بهره برداری

طرح تولید کاغذ سنگی با هزینه سرمایه گذاری ۴۲۷،۳۷۸ میلیون ریال دارای نرخ بازگشت (IRR) ۵۰/۸۹ درصد و ارزش خالص فعلی (NPV) ۳۶۷،۶۶۶ میلیون ریال است که پس از گذشت ۵ سال از شروع بهره برداری قابل بازگشت خواهد بود.

#### ۴- اولویت بندی و انتخاب طرح برتر

جدول ۵ مقایسه بین شاخص‌های اقتصادی طرح‌های پیشنهادی جهت کاربرد ضایعات سنگ تراورتن نشان می‌دهد.

جدول ۵- مقایسه شاخص‌های اقتصادی طرح‌های پیشنهادی

طرح پیشنهادی	سرمایه گذاری (میلیون ریال)	نرخ بازگشت داخلی (درصد)	ارزش خالص فعلی (میلیون ریال)	زمان بازگشت سرمایه	پیچیدگی فرآیند
تولید سنگ آنتیک طبیعی	۶۹،۵۰۹	۵۶/۹۱٪	۸۹،۶۵۸	۴ سال و ۴ ماه	متوسط
تولید سنگ آنتیک مصنوعی	۱۳۰،۹۹۵	۶۴/۷۱٪	۲۲۹،۱۵۳	۳ سال و ۶ ماه	متوسط
تولید پودر سنگ تراورتن	۱۴۶،۰۳۹	۸۲/۶۱٪	۴۱۹،۹۱۸	۲ سال و ۶ ماه	ساده
تولید کاغذ سنگی	۴۲۷،۳۷۸	۵۰/۸۹٪	۳۶۷،۶۶۶	۵ سال	سخت

بر اساس نتایج و شاخص‌های اقتصادی، بهترین گزینه، احداث کارخانه پودر سنگ تراورتن از ضایعات معدن انگوران است که در صنایع سیمان و بتن سبک قابل استفاده خواهد بود. اما، باید توجه داشت که عوامل مختلفی از جمله شرایط سیاسی، اجتماعی، اقتصادی و بازار فروش در انتخاب یک گزینه و کاربرد مناسب، تاثیرگذار بوده که باید به آنها نیز توجه خاص و لازم صورت گیرد.

پیچیدگی یا سادگی فرآیند تولید در انتخاب طرح نهایی جهت استفاده از ضایعات تراورتن بسیار حائز اهمیت است. همانطور که مشاهده شد، در فرآیند تولید پودر سنگ از باطله‌های تراورتن، پیچیدگی زیادی وجود ندارد. به طوریکه با انتقال باطله‌های تراورتن از معدن به کارگاه، سنگ‌ها در مسیر مدار سنگ شکنی و سپس پودرکنی قرار می‌گیرند و تنها عامل مهم در آن، کنترل بخش تعمیر و نگهداری تجهیزات خردایش است که کمی کار را مشکل می‌نماید. اما، در مجموع، تولید پودر سنگ نسبت به تولید سنگ آنتیک طبیعی و مصنوعی و یا تولید کاغذ سنگی از پیچیدگی کمتری برخوردار است. به طور مثال در تولید سنگ آنتیک طبیعی و مصنوعی، مهارت کارگران از اهمیت بالایی برخوردار است.

در بحث سرمایه گذاری باید عنوان کرد که تولید کاغذ مصنوعی دارای بیشترین حجم سرمایه گذاری است. مواد اولیه تولید کاغذ سنگی مبالغ بالایی دارد که موجب افزایش در سرمایه در گردش این طرح می‌شود. در حالیکه برای تولید پودر سنگ، سنگ آنتیک طبیعی و مصنوعی نیاز به صرف مبالغ زیاد برای تهیه مواد خام و اولیه نیست. از دیگر عوامل بسیار تاثیرگذار در انتخاب طرح بهینه کاربرد ضایعات تراورتن، بررسی روند و یا سهولت فروش محصولات تولیدی است. در طرح حاضر، چهار نوع محصول مجزا وجود دارد. می‌توان گفت که بازار فروش سنگ آنتیک طبیعی و مصنوعی از باطله‌های تراورتن جایگاه نسبتاً مناسبی در کشور برخوردار است. با توجه به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پودر سنگ تراورتن می‌توان از این محصول در تولید بتن سبک و یا سیمان بعنوان فیلر استفاده کرد که قیمت تمام شده این محصول نیز کاهش خواهد یافت، اما همچنان باید به طور ویژه بازار فروش این محصول مورد مطالعه و ارزیابی قرار گیرد و حتی نسبت به بازاریابی و تبلیغات محصول، اقدامات لازم صورت گیرد. در مورد بازار محصولات کاغذ سنگی از باطله‌های تراورتن باید گفت که رقابت تنگاتنگی میان این محصول و کاغذ سنگی ساخته شده از کربنات کلسیم (سنگ آهک) وجود خواهد داشت. لذا نیاز به بررسی هرچه بیشتر و دقیقتر در مورد بازار این محصول می‌باشد. اما باید اذعان کرد که بر اساس مطالعات شناسایی انجام شده، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی لازم و مکفی برای استفاده از باطله‌های تراورتن در تولید کاغذ سنگی وجود دارد.

در انتها، باید گفت که عوامل بسیار متعددی در انتخاب یک طرح بهینه وجود دارد که در این گزارش، عوامل با اهمیتی از جمله نرخ بازگشت سرمایه، ارزش خالص فعلی طرح، میزان سرمایه گذاری، مدت بازگشت سرمایه، پیچیدگی و سادگی فرآیند، بازار فروش محصولات بررسی گردید. بر اساس مطالب فوق، اولویت‌های پیشنهادی در این طرح جهت تولید محصولات با ارزش افزوده بالاتر از ضایعات تراورتن انگوران مطابق با جدول ۶، قابل ارائه می‌باشند.

جدول ۶- مقایسه اولویت‌های اجرایی در طرح‌های پیشنهادی

اولویت	نام طرح	سرمایه گذاری	نرخ بازگشت داخلی	زمان بازگشت سرمایه	پیچیدگی فرآیند	هزینه های عملیاتی سالانه	بازار
۱	تولید پودر سنگ تراورتن	متوسط	عالی	کم	ساده	متوسط	نیاز به بازاریابی ویژه
۲	تولید سنگ آنتیک طبیعی	کم	خوب-متوسط	متوسط	نسبتاً ساده	متوسط	خوب
۳	تولید سنگ آنتیک مصنوعی	متوسط	خوب	نسبتاً کم	متوسط	نسبتاً بالا	خوب
۴	تولید کاغذ سنگی	زیاد	متوسط	متوسط	سخت	بالا	نسبتاً خوب

همانطور که مشاهده شد چنانچه بتوان بازار مناسبی برای پودر سنگ تراورتن بعنوان فیلر در بتن سبک و یا سیمان پیدا کرد، به طور قطع، ایده آل ترین طرح خواهد بود. تولید سنگ آنتیک طبیعی با توجه به میزان سرمایه گذاری و سادگی فرآیند و در نتیجه سودآوری نسبتاً خوبی که دارد در اولویت دوم قرار می‌گیرد. تولید سنگ آنتیک مصنوعی با توجه به سرمایه گذاری بیشتر و پیچیدگی بیشتر فرآیند در اولویت سوم قرار دارد. اما باید گفت که سودآوری نسبتاً بیشتری نسبت به سنگ آنتیک طبیعی دارد. با توجه به هزینه سرمایه گذاری بالا، پیچیدگی بیشتر فرآیند، هزینه عملیاتی بالا و سود نسبتاً خوب، تولید کاغذ سنگی در اولویت آخر قرار می‌گیرد.

پس از انتخاب طرح برتر استفاده از ضایعات تراورتن، دو روش اجرایی طرح بصورت موبایل (سیار) یا راه اندازی کارخانه ثابت از دیدگاه اقتصادی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت.

جدول ۷، نتایج محاسبات اقتصادی طرح تولید پودر سنگ با روش موبایل (سیار) توسط نرم افزار کامفار را نشان می‌دهد.

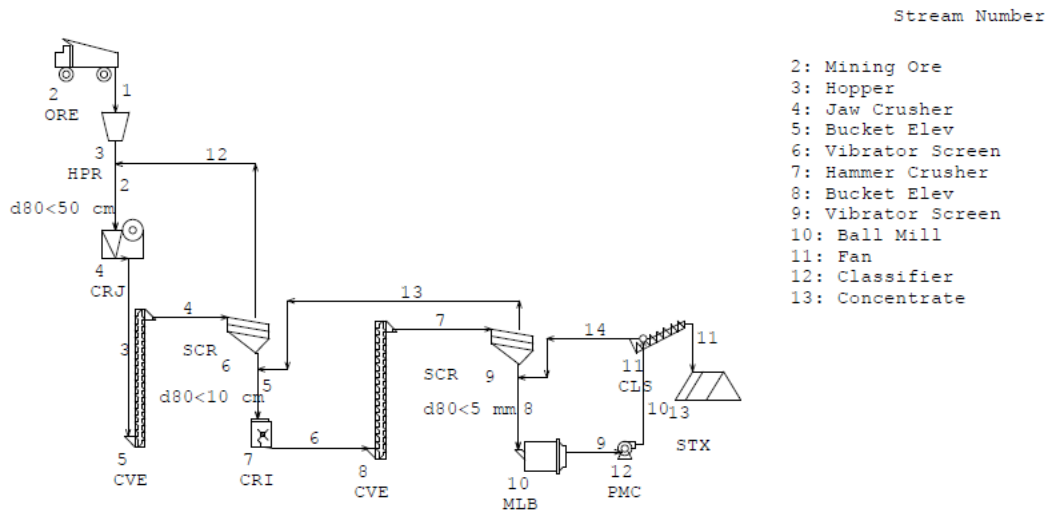
جدول ۷- خلاصه نتایج محاسبات اقتصادی طرح تولید پودر سنگ موبایل توسط نرم افزار کامفار

ردیف	موارد	مقدار
۱	سرمایه گذاری ثابت	۱۰۱,۲۷۸ میلیون ریال
۲	سرمایه در گردش	۹,۴۴۱ میلیون ریال
۳	سرمایه گذاری کل	۱۱۰,۷۱۹ میلیون ریال
۴	هزینه تولید سالیانه	۶۵,۷۳۷ میلیون ریال
۵	فروش سالیانه	۱۰۵,۸۴۰ میلیون ریال
۶	نرخ بازگشت داخلی سرمایه (IRR)	۷۳/۴۳٪
۷	ارزش خالص فعلی (NPV)	۵۲۴,۹۳۹ میلیون ریال
۸	مدت زمان بازگشت سرمایه در تورم ۳۲ درصد	۳ سال و ۲ ماه از شروع بهره برداری

بر اساس نتایج بدست آمده، نرخ بازگشت داخلی برای اجرای طرح بصورت موبایل بیش از ۷۳ درصد با ارزش خالص فعلی ۵۲۴,۹۳۹ میلیون ریال برآورد گردید. این در حالی است که نرخ بازگشت داخلی برای اجرای طرح به صورت ایستا ۸۲/۶۱ درصد با ارزش خالص فعلی ۴۱۹,۹۱۸ میلیون ریال است. سرمایه گذاری این طرح به صورت موبایل پس از گذشت ۳ سال و ۲ ماه از زمان بهره برداری کارگاه موبایل و در طرح ایستا پس از ۲ سال و ۶ ماه قابل بازگشت است. با احتساب نرخ تورم ۳۲ درصد طرح تولید پودر سنگ به صورت موبایل از توجیه اقتصادی بالایی برخوردار است. هزینه سرمایه گذاری نسبتاً بیشتر طرح موبایل نسبت به طرح ایستای کارگاه (کارگاه یا کارخانه ثابت) پودر سنگ، ظرفیت ورودی کمتر در طرح موبایل بواسطه محدودیت‌های جانمایی تجهیزات و در نتیجه نرخ بازگشت سرمایه نسبتاً کمتر طرح موبایل از معایب این طرح در مقایسه با طرح ایستا است. در مقابل، امکان انتقال تجهیزات موبایل به دپوی باطله و در نتیجه حذف هزینه انتقال مواد از دپو به کارخانه که موجب کاهش در هزینه‌های عملیاتی و سودآوری بیشتر در طرح موبایل خواهد شد، امکان انتقال تجهیزات موبایل به دپوهای دیگر (مواد معدنی مختلف) که این مورد برای یک کارخانه ایستا امکانپذیر نیست و ارزش خالص فعلی (NPV) بالاتر طرح موبایل نسبت به طرح ایستا از جمله مزایای این طرح است. در کل می‌توان اجرای طرح تولید پودر سنگ تراورتن به صورت موبایل را سرمایه گذاری با یک افق بلند مدت دانست، شایان ذکر است که مزایای بازدهی در کوتاه مدت این طرح نیز بسیار قابل توجه است چرا که دارای نرخ بازگشت داخلی بیش از ۷۰ درصد است.

## ۵- تولید محصول در مقیاس آزمایشگاهی

بر اساس نتایج و اطلاعات بدست آمده، دو محصول پودر سنگ و سنگ آنتیکی طبیعی از ضایعات سنگ تراورتن انگوران در مقیاس آزمایشگاهی تولید گردید. شکل ۵، فرآیند تولید پودر سنگ تراورتن در مقیاس صنعتی را نشان می‌دهد.



شکل ۵- فلوشیت پیشنهادی اولیه کارگاه تولید پودر سنگ تراورتن

هدف نهایی، تولید محصول پودر با دانه بندی  $d_{80}=75$  میکرون بوده است. لذا در مرحله اول ابعاد کوچکتر از ۳۰ سانتیمتر جدا و وارد سنگ شکن فکی آزمایشگاهی گردید، محصول خرد شده از سرند کنترل با ابعاد تقریبی ۲۰ میلیمتر عبور داده شد، ذرات ریزتر از سرند کنترلی در آزمایشگاه دپو و ذرات بزرگتر از سرند مجدداً به سنگ شکن فکی منتقل گردید، این فرآیند، تا اتمام کامل خردایش، تکرار شد. در مرحله بعد، محصول سنگ شکن فکی وارد سنگ شکن مخروطی گردید. محصول خرد شده توسط سنگ شکن مخروطی، وارد آسیای میله‌ای گردید. با توجه به زمان ماند آسیا که معادل ۲۵ دقیقه بوده است، محصول نهایی با ابعاد  $d_{80}=75$  میکرون تولید شد (شکل ۶).



شکل ۶- نمایی از محصول نهایی به عنوان پودر سنگ تولید شده در مقیاس آزمایشگاهی

با هدف تولید نمونه آزمایشگاهی سنگ آنتیک طبیعی نیز تعدادی از قطعات سنگ‌های تراورتن معدن انگوران که ترکیبی از قطعات برش، ساب و رزین کاری شده بود به همراه باطله‌های سنگ تراورتن در ابعاد ۲۰ تا ۵۰ سانتیمتر به آزمایشگاه منتقل شدند. بخشی از باطله‌های دارای ناخالصی بیشتر (سیلیس) در این مرحله مورد استفاده قرار نگرفت. سنگ‌های انتخاب شده از

نواحی مناسب توسط تیغه، برش و پس از انجام فرآیند ساب و رزین کاری به اندازه‌های مناسب مربعی و مکعبی موزون، تبدیل شد. با توجه به الگوهای مختلف موجود در بازار، الگوی این طرح بر اساس یک وجه هلالی و یک وجه صاف انتخاب گردید (شکل ۷).



شکل ۷- طرح سنگ آنتیک طبیعی تولید شده در مقیاس آزمایشگاهی

## ۵- نتیجه گیری و جمع بندی

مدیریت ضایعات سنگ‌های ساختمانی در دنیا دو موضوع اصلی را که شامل کاهش در میزان تولید باطله و بازیافت و تولید محصولات ارزشمند از ضایعات است را دنبال می‌کند، که در گزارش حاضر به طور مفصل تشریح شده است. پس از بازدید میدانی از معدن تراورتن انگوران و بررسی عملکرد تولید و روند ایجاد ضایعات، عملیات نمونه برداری از دپوی ضایعات استخراج صورت گرفت. بر اساس بررسی‌های انجام شده، برای بهبود عملکرد مدیریت ضایعات در مرحله استخراج باید بهترین روش استخراج (سیم برش) و باتوجه به وجود ناپیوستگی، بهترین مسیر استخراج انتخاب گردد. سنگ تراورتن بایستی دارای ناخالصی کمتر (هزینه استخراج کمتر) باشد تا مطلوبترین بلوک از دیدگاه هندسی شناسایی و استخراج و میزان اتلاف کاهش یابد. همچنین در این راستا توجه به ارائه یک رویکرد علمی در مرحله فرآوری سنگ، آموزش نیروی کار، توجه به تأمین مواد اولیه و تجهیزات به روز از دیگر عوامل موثر در مدیریت بهینه ضایعات سنگ ساختمانی تراورتن است. در ادامه، خواص سنجی ضایعات معدن تراورتن انگوران نشان داد که میزان سختی این نمونه سبب تسهیل در برش دهی سنگ شده و میزان جذب آب سنگ موجب تسهیل در تشکیل و جذب ملات می‌گردد، لذا برای تولید سنگ آنتیک مناسب است. ترکیب شیمیایی و وزن مخصوص آن حاکی از قابلیت استفاده آن در تولید بتن سبک بعنوان فیلر می باشد. میزان خلوص کربنات کلسیم و میزان آهن نمونه نیز نشان داد که قابلیت کاربرد در برخی از انواع کاغذ سنگی را دارا می باشد. با هدف ارائه بهترین راهکار مدیریت بازیافت ضایعات تراورتن، ۴ پیشنهاد به کارفرما ارائه گردید. در ابتدا، امکانسنجی فنی و اقتصادی احداث واحدهای تولید سنگ آنتیک طبیعی و مصنوعی از ضایعات سنگ تراورتن با ظرفیت ورودی حدود ۶۳،۰۰۰ تن ضایعات تراورتن در سال انجام شد. محاسبات اقتصادی با نرم افزار کامفار نشان داد که طرح تولید آنتیک طبیعی دارای نرخ بازده داخلی ۵۶/۹۱ درصد با ارزش خالص فعلی ۹۰،۰۰۰ میلیون ریالی است. در مقابل، طرح تولید آنتیک طبیعی دارای نرخ بازده داخلی

۶۴/۷۱ درصد و ارزش خالص فعلی ۲۲۹،۱۵۳ میلیون ریالی است. مجموعه پارامترها نشان داد که با فرض احتساب نرخ تورم معادل سالیانه ۳۲ درصد، هر دو طرح فوق از توجیه اقتصادی بالایی برخوردار هستند. علاوه بر این، محاسبات شاخص‌های اقتصادی برای تولید پودر سنگ تراورتن و محصول کاغذ سنگی از ضایعات تراورتن نشان داد که طرح تولید پودر سنگ تراورتن دارای نرخ بازده داخلی ۸۳ درصد با ارزش خالص فعلی ۴۱۹،۹۱۸ میلیون ریالی است. این در حالی است که، طرح تولید کاغذ سنگی دارای نرخ بازده داخلی ۵۱ درصد و ارزش خالص فعلی ۳۶۷،۶۶۶ میلیون ریالی می‌باشد. مقایسه پارامترهای نرخ بازگشت سرمایه، خالص ارزش فعلی، مدت زمان بازگشت سرمایه، مقدار سرمایه گذاری، پیچیدگی فرآیند تولید و بازار محصولات در ۴ طرح پیشنهادی نشان داد که بهترین گزینه، تولید پودر سنگ تراورتن از ضایعات آن است که در صنایع سیمان و بتن بعنوان فیلر و پرکننده قابل استفاده می‌باشد ولی باید ابتدا بازار فروش این محصول فراهم باشد. تولید سنگ آنتیک طبیعی با توجه به میزان سرمایه گذاری و سادگی فرآیند و در نتیجه سودآوری نسبتاً خوبی که دارد در اولویت دوم قرار می‌گیرد. تولید سنگ آنتیک مصنوعی با توجه به سرمایه گذاری بیشتر و پیچیدگی بیشتر فرآیند در اولویت سوم قرار دارد اما باید گفت که سودآوری نسبتاً بیشتری نسبت به سنگ آنتیک طبیعی دارد. با توجه به هزینه سرمایه گذاری بالا، پیچیدگی بیشتر فرآیند، هزینه عملیاتی بالا و سود نسبتاً خوب، تولید کاغذ سنگی در اولویت آخر قرار می‌گیرد. در ادامه به بررسی موبالیتته کردن طرح برتر پرداخته شد، میزان سرمایه گذاری ثابت در طرح کارگاه موبایل تولید پودر سنگ تراورتن از باطله‌های معدن انگوران معادل ۱۰۱،۲۷۸ میلیون ریال برآورد گردید که با احتساب سرمایه در گردش، دارای سرمایه گذاری کل به مقدار ۱۱۰،۷۱۹ میلیون ریال است. در این صورت نرخ بازگشت داخلی برای این طرح بیش از ۷۳ درصد با ارزش خالص فعلی ۵۲۴،۹۳۹ میلیون ریال محاسبه شد. سرمایه گذاری این طرح پس از گذشت ۳ سال و ۲ ماه از زمان بهره برداری و با احتساب نرخ تورم ۳۲ درصد باز خواهد گشت. لذا این طرح کاملاً توجیه اقتصادی دارد و در مجموع با افق سرمایه گذاری بلند مدت، بازدهی بیشتری نسبت به اجرای طرح به صورت ایستا دارد. اولین مزیت کارگاه موبایل پودر سنگ این است که هزینه‌های حمل باطله‌های معدن انگوران به کارگاه ایستا حذف خواهد شد و چنانچه این موضوع به ترازنامه‌های مالی انتقال یابد موجب سودآوری بیشتر نسبت به کارگاه ایستا خواهد شد. دومین مزیت کارگاه موبایل در این است که قابلیت انتقال به محل دپوهای مختلف باطله اعم از تراورتن و یا هر نوع ماده معدنی فلزی و غیرفلزی در اقصی نقاط کشور را دارد که این امر موجب پدید آمدن موقعیت‌های کاری مختلف برای کارفرمای محترم در آینده می‌شود. در پایان، محصول سنگ آنتیک طبیعی و همچنین پودر سنگ از باطله‌های سنگ تراورتن انگوران جهت مصرف در ترکیب بتن در مقیاس آزمایشگاهی تولید شد. مطلب مهم دیگر بحث تفکیک ضایعات بر اساس ابعاد در محل دپو و در حین استخراج است. ابعاد زیر ۴۰ سانتیمتر قابلیت ورود به مدار خردایش و سپس پودر شدن تا زیر ۷۵ میکرون بعنوان محصول پودر سنگ و یا خوراک ورودی طرح آنتیک مصنوعی و کاغذ را دارند. برای کارگاه آنتیک طبیعی می‌توان ابعاد ۱۰ تا ۱ سانتیمتر را از ابتدا جدا کرد. جدایش نرمه نیز از همان ابتدا موجب کاهش در مصرف انرژی در مدار خردایش، سپس تهیه خوراک ورودی طرح آنتیک مصنوعی و کاغذ خواهد شد. لذا توجه به امر تفکیک ضایعات در مبدا تشکیل بر اساس ذرات بسیار حائز اهمیت است. ابعاد بزرگتر از ۴۰ سانتیمتر نیز پس از برش بعنوان سنگفرش جداسازی و قابل مصرف خواهند بود.



## فهرست منابع

- امیری، علیرضا، (۱۳۹۰). سنگ مصنوعی و تکنولوژی ساخت آن. مرجع مهندسی عمران. دانشمندی، افسانه، ۱۳۹۷، برگرفته از سایت خبری [www.iribnews.ir](http://www.iribnews.ir).
- دیتی کمپانی، ۱۳۹۹، خط تولید کاغذ از سنگ آهک، برگرفته از سایت [www.dtcompany.com](http://www.dtcompany.com)
- حامی، احمد، ۱۳۷۹، برگرفته از کتاب مصالح ساختمانی، انتشارات دانشگاه تهران
- سروش، حسین، ۱۳۹۳، برگرفته از خبرگزاری [www.minews.ir](http://www.minews.ir)
- فاضل، محمد، ۱۳۹۰، کتاب راهنمای سنگ ایران.
- G. Papantonopoulos (۲۰۰۷). A study on best available techniques for the management of stone wastes. ۳<sup>rd</sup> International Conference on Sustainable Development Indicators in the Minerals Industry.