

## ارائه مدل برنامه‌ریزی خطی برای کمینه‌سازی تناژ-مسافت انتقال مواد اولیه و محصولات نهایی در زنجیره صنعت سنگ ایران

رضا شکورشه‌ابی<sup>۱\*</sup>، اشکان قاسمی دولت آبادی<sup>۲</sup>، محسن گلیجانی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین  
۲- کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین  
۳- کارشناس ارشد صنایع معدنی، وزارت صنعت معدن و تجارت، تهران

(دریافت ۱۳۹۶/۱۲/۲۴، پذیرش ۱۳۹۷/۰۳/۰۳)

### چکیده

اصولاً در زنجیره صنعت سنگ تزئینی، هزینه حمل و نقل سنگ خام استخراج شده از معدن به کارخانجات سنگبری و سپس انتقال سنگ فرآوری شده به صورت پلاک و اسلب به بازار مصرف، تاثیر عمده‌ای بر قیمت تمام شده محصول نهایی دارد. در این تحقیق با هدف حداقل‌سازی تناژ انتقال در کل زنجیره، هریک از اجزای زنجیره شامل معادن، کارخانجات فرآوری و بازار مصرف به ده قطب اصلی تقسیم شد و مدل برنامه‌ریزی خطی بر اساس تابع هدف مینیمم‌سازی توأم تناژ حمل مواد اولیه از قطب‌های معدنی به قطب‌های فرآوری و انتقال سنگ فرآوری شده از کارخانجات به قطب‌های بازار برای تامین مصرف مورد نیاز طراحی شد. محدودیت‌های مدل بر اساس تناسب دو به دو ظرفیت‌های تولید در طول زنجیره تولید تعریف شد. پس از حل مدل با نرم‌افزار Gams، تناژ ارسالی بهینه دو به دو بین قطب‌ها در قالب سناریوی پایه ۱ محاسبه شد. همچنین دو سناریوی مجزا در زمینه افزایش ۲۰ درصدی ظرفیت تولید هر قطب معدنی و افزایش ۲۰ درصدی ظرفیت قطب‌های مصرف و فرآوری تعریف شد. سناریوی دوم موجب کاهش متوسط حمل به ازای هر تن محصول به میزان ۳/۹ درصد می‌شود، اما تاثیر مثبتی بر افزایش نسبت‌های بهره‌برداری از ظرفیت تولید قطب‌های معدنی و فرآوری ندارد. سناریوی سوم موجب افزایش نسبت بهره‌برداری از ظرفیت قطب‌های معدنی می‌شود، اما با افزایش ۲۸ درصدی مسافت کلی حمل سنگ خام از معدن به بازار و افزایش ۸/۲ درصدی مسافت حمل هر تن محصول در طول زنجیره، موجب افزایش هزینه تمام شده و کاهش رقابت‌پذیری محصول نهایی می‌شود.

### کلمات کلیدی

معادن و کارخانجات سنگ تزئینی، برنامه‌ریزی خطی، زنجیره تولید سنگ، کمینه‌سازی انتقال مواد، نرم‌افزار Gams.

## ۱- مقدمه

با توجه به گستردگی زنجیره ارزش افزوده محصولات معدنی، فرآوری مواد معدنی برای تبدیل به محصول واسطه‌ای و یا نهایی مورد نیاز بازار داخلی و یا صادرات از مهمترین فعالیت‌های ضروری تولید سودده در بخش معدن و صنایع معدنی است. سرمایه‌گذاری برای فرآوری مواد و تولید محصول نهایی در مجاورت معدن در مقیاس اقتصادی، با توجه به سرمایه‌بر بودن تولید، به ویژه در معادن کوچک و پراکنده توجیه اقتصادی ندارد، بنابراین، انتقال مواد اولیه و محصولات واسطه‌ای معدنی به ویژه برای معادن کوچک برای مصرف صنایع داخلی ضروری است. انتخاب کوتاه‌ترین مسیر انتقال مواد خام از معادن به کارخانجات فرآوری و صنایع معدنی و نیز حمل محصولات واسطه‌ای و یا نهایی از کارخانه به بازار مصرف، ضمن کاهش زمان انتقال و ضایعات احتمالی، موجب کاهش هزینه‌های حمل و در نهایت قیمت تمام شده محصول می‌شود.

سنگ‌های تزئینی و نما از گروه‌های مهم مواد معدنی‌اند که محصول نهایی آن‌ها به دلیل ویژگی‌های ذاتی مقاومت فشاری بالا و نفوذپذیری پایین، پس از عملیات برش و ساب در کارخانجات سنگبری به صورت سنگ نما، کف به کار می‌روند [۱]. زنجیره سنگ تزئینی به عنوان یکی از بزرگترین صنایع معدنی کشور شامل سه بخش اصلی معادن سنگ تزئینی، کارخانجات فرآوری و بازار مصرف است. ذخایر قطعی سنگ تزئینی کشور بیش از ۲٫۴ میلیارد تن برآورد شده است. این نقطه قوت به همراه مزیت ظرفیت بالای بخش فرآوری سنگ تزئینی در کشور، در صورت بهره‌برداری از سایر نقاط قوت و فرصت‌های کشور، موجبات تولید رقابت‌پذیر محصولات مختلف صنعت سنگ تزئینی را فراهم می‌کند [۲-۴]. بررسی مطالعات قبلی در صنعت سنگ ایران و مزیت‌های موجود در ذخایر سنگ تزئینی ایران از جمله تنوع و ذخایر بالای کشور معرف تاثیر بالای ارتقای زیرساخت‌های حمل و نقل در بهبود رقابت‌پذیری محصولات صنعت سنگ ایران است. [۵، ۶]

معادن سنگ تزئینی عمدتاً در چند ناحیه اصلی کشور فعال‌اند. استخراج در این گونه معادن کاملاً غیرانتخابی و با ضایعات بالا است، اما انتخاب و ارسال بلوک استخراج شده به کارخانجات فرآوری، برش و ساب سنگ برای تولید پلاک و اسلب ارسال می‌شود و جانمایی آن‌ها بر اساس نزدیکی به معادن و یا بازار مصرف که عمدتاً شهرهای پرجمعیت کشور

است شکل گرفته است. این کارخانجات عمدتاً در استان‌های مشخصی از کشور و در چند قطب خاص احداث شده‌اند و برای فروش موثر محصولات خود، نیاز به ارسال محصولات نهایی به بازار مصرف کل مناطق کشور و نیز صادرات به عنوان جزو نهایی زنجیره دارند. با توجه به عدم انعطاف‌پذیری در محل معادن و بازارهای مصرف، توزیع مکانی نامناسب کارخانجات فرآوری سنگ تزئینی، موجب شده که در برخی موارد تا ۲۵ درصد قیمت سنگ کوپ اولیه (با توجه به نوع و جنس آن) صرف هزینه حمل شود. در برخی موارد، گسترش نامتناسب ظرفیت واحدهای فرآوری موجب شده است تا تامین سنگ خام اولیه آن‌ها از معادن مجاور به سختی انجام گیرد و بخشی از ظرفیت نصب شده تولید، بلااستفاده مانده است و با افزایش قیمت تمام شده، موجب از دست رفتن رقابت‌پذیری محصول می‌شود. با توجه به بعد مسافت هر یک از بخش‌های یاد شده، انتقال سنگ ساختمانی از معادن به کارخانجات به صورت کوپ و نیز حمل محصولات نهایی به صورت اسلب از کارخانجات به بازارهای مصرف از طریق مسیر جاده‌ای، موجب ایجاد بخش مهمی از ترافیک و سوانح جاده‌ای کشور می‌شود. اگرچه حمل و نقل جاده‌ای برای انتقال سنگ کوپ، پلاک و اسلب به کار می‌رود و این در حالی است که در صورت رعایت مقیاس اقتصادی حمل و وجود زیرساخت‌های لازم، به کارگیری حمل و نقل ریلی برای انتقال سنگ خام و کار شده مشابه کشورهای صنعتی کارآیی بیشتری دارد.

برای مدلسازی انتقال مواد خام و محصولات نهایی زنجیره صنعت سنگ، ضرورت دارد تا مدلسازی توأم انتقال مواد خام از معادن سنگ تزئینی به کارخانجات فرآوری و سپس انتقال اسلب و پلاک تولیدی کارخانجات به بازارهای مصرف از طریق مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی انجام گیرد تا الگوی بهینه کلی تناژ حمل و نقل کوپ سنگ از معادن تا کارخانه سنگبری و انتقال سنگ برش یافته به صورت اسلب و بلوک از کارخانه تا بازار مصرف تعیین شود. از طرفی با توجه به ثابت بودن مکان استقرار معادن سنگ تزئینی به عنوان تامین‌کنندگان اصلی سنگ کوپ برای خوراک کارخانجات فرآوری سنگ تزئینی و نیز مشخص بودن بازارهای مصرف سنگ در کشور و توسعه ظرفیت انجام گرفته کارخانجات فرآوری، تابع هدف مساله، کاهش هزینه حمل مواد اولیه و محصولات نهایی از طریق تعیین مقدار بهینه حمل و نقل از نواحی معدنی به قطب‌های موجود فرآوری سنگ ساختمانی و نیز میزان حمل محصولات فرآوری شده از قطب‌های فرآوری به بازارهای مصرف اصلی

که از نظر نوع سنگ، تقریباً تمامی سنگ وارد شده به کشور نرم‌بر و در بخش صادرات نیز حدود ۶۰ هزار تن سنگ گرانیت به صورت خام صادر شده است (جدول ۲) [۸،۷].

جدول ۱: وضعیت معادن سنگ ساختمانی در کشور

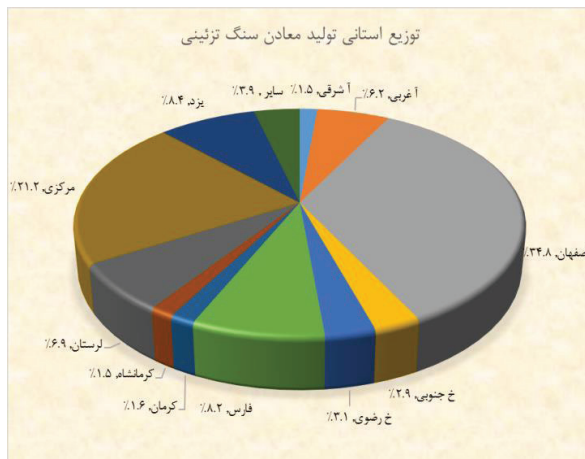
مجموع	گرانیت	تراورتن	مرمریت	مرمر	تعداد معادن فعال
۱,۱۶۳	۲۴۵	۲۸۱	۴۵۵	۱۸۲	
۲۸,۸۳۰	۸,۲۳۰	۳,۷۴۸	۹,۱۷۲	۷,۶۸۰	اشتغال
۱۲,۶۵۳	۱,۱۳۳	۷,۱۲۰	۴,۲۰۰	۲۰۰	تولید (هزار تن)

تعریف می‌شود که با توجه به تعریف و تحلیل سناریوهای مختلف امکان ساماندهی جغرافیایی و ظرفیت واحدهای صنعتی آتی مشخص می‌شود. اجرای این رویکرد کلی نگر، ضمن کاهش انتقال غیرضروری مواد و محصولات، با تعیین مناطق دارای توجیه سرمایه‌گذاری مولد و سودده، موجب افزایش رقابت پذیری واحدهای فرآوری سنگ ساختمانی می‌شود و مکان‌هایی را برای توسعه صنایع سنگبری پیشنهاد می‌کند که علاوه بر تامین نیاز بازار مصرف، سنگ خام مورد نیاز را به میزان ظرفیت دریافت کند و نیز کمترین مسافت حمل برای دریافت خوراک از معادن و ارسال محصولات به بازار هدف را داشته باشد.

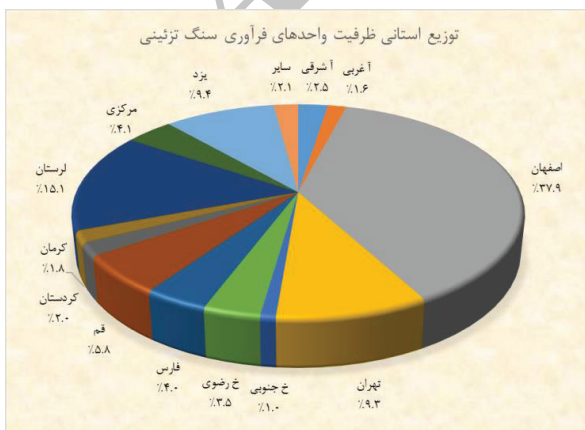
## ۲- بررسی و تحلیل صنعت سنگ ایران

انواع سنگ‌های تزئینی و نمای ایران از لحاظ تنوع رنگ و گوناگونی شامل گرانیت، مرمریت، تراورتن، مرمر و چینی در مجموع ۱۰ درصد از کل میزان ذخایر مواد معدنی کشور را تشکیل می‌دهند. تعداد کل معادن سنگ تزئینی معادل ۱۶۳۶ معدن و تعداد معادن فعال کشور بر اساس آمار سال ۱۳۹۳ مطابق جدول ۱ برابر با ۱۱۶۳ معدن با تولید ۱۲۶ میلیون تن سنگ خام و اشتغال نزدیک به ۲۹ هزار نفر است. از نظر پراکندگی جغرافیایی ذخایر سنگ‌های تزئینی و نما، اختلاف قابل توجهی بین استان‌های مختلف کشور وجود دارد به طوری که مطابق شکل ۱، استان‌های اصفهان، مرکزی، یزد و فارس بیشترین سهم از تولید سنگ تزئینی کشور را دارند [۷]. در حوزه فرآوری سنگ، بر اساس آمار تخمینی انجمن سنگ ایران تا سال ۱۳۹۳ از حدود ۶۵۰۰ واحد سنگبری، تعداد ۵۰۰۰ واحد با اشتغال ۱۲۳ هزار نفر فعال‌اند. کل ظرفیت فرآوری سنگ تزئینی معادل ۸۵،۷ میلیون مترمربع است. بیشترین ظرفیت فرآوری مربوط به استان‌های اصفهان، لرستان و تهران است (شکل ۲). تحلیل ظرفیت فرآوری بدون لحاظ کردن نوع سنگ مصرفی کارخانجات، تاثیر اهمیت دسترسی به بازار مصرف مرکز کشور بر گسترش واحدهای فرآوری کشور در استان‌های تهران و قم را نشان می‌دهد و واحدهای فرآوری در استان‌های مرکزی و اصفهان از هر دو مزیت نزدیکی به معادن و بازار مصرف مرکز کشور استفاده می‌کنند [۷].

حسب بررسی آمار تجارت خارجی سنگ تزئینی خام و کار شده، واردات سنگ خام و فرآوری شده و صادرات سنگ فرآوری در مقایسه با تولید داخل ناچیز بوده و صادرات سنگ خام از مبدا بندرعباس و عمدتاً به مقصد چین انجام شده است



شکل ۱: توزیع استانی تولید سنگ تزئینی در معادن کشور (محاسبات تحقیق)



شکل ۲: توزیع استانی ظرفیت واحدهای فرآوری سنگ تزئینی (محاسبات تحقیق)

جدول ۲: تراز وزنی تجارت خارجی سنگ تزئینی [۸]

سال	صادرات (هزار تن)		واردات (هزار تن)	
	سنگ خام	فرآوری شده	سنگ خام	فرآوری شده
۱۳۸۵	۵۹۱	۱۹۳	۲،۱	۲۷
۱۳۸۶	۶۶۰	۱۹۲	۱،۰۴	۴۷
۱۳۸۷	۵۶۲	۱۴۰	۴،۴	۹۷،۳
۱۳۸۸	۶۵۶	۱۰۴	۶	۱۴۷
۱۳۸۹	۸۲۲	۱۱۸	۶،۳	۱۷۱
۱۳۹۰	۶۳۰	۱۱۴	۳،۶	۱۵۱
۱۳۹۱	۶۰۰	۱۷۶	۴،۴	۶۷
۱۳۹۲	۶۰۱	۲۲۰	۲	۵۵
۱۳۹۳	۶۷۰	۴۱	۱۰	۳۵

مورد بررسی قرار می‌گیرد. حیطة بررسی این مسایل صرفا در محدوده یک معدن و یا مجموعه معدن و کارخانه فرآوری و با اخذ داده‌های زمان‌سنجی و یا تولید تعریف می‌شود و با فرض تخصیص انعطاف‌پذیر بارگیر به بارکننده، تابع هدف عمدتا بر مبنای برنامه‌ریزی خطی و یا آرمانی برای بهبود عملکرد سیستم کامیون- شاول از طریق بهره‌برداری حداکثری از کامیون‌ها [۱۲]، ماکزیمم کردن بهره‌وری شاول [۱۳] و فاکتور سازگاری، کاهش انحرافات در عیار خوراک ارسالی به کارخانه فرآوری نسبت به مقدار مطلوب [۱۴]، کاهش هزینه‌های عملیاتی، به حداقل رساندن مصرف سوخت در سیستم ترابری [۱۵]، بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی تخصیص و گسیل کامیون‌ها [۱۶، ۱۷] و انتخاب ناوگان مناسب و شبیه‌سازی عملکرد آن‌ها [۱۸] تعریف می‌شود.

در سری مطالعات دوم، مطالعه معمولا در سطح یک صنعت و یا زنجیره تولید و توزیع ماده اولیه و یا محصول مشخصی انجام گرفته است. جمع‌آوری داده‌ها در این نوع مطالعات با مشکلات خاصی مواجه است، این مطالعات در حوزه‌های مختلف اقتصادی انجام شده است.

- افندی‌زاده در تحقیقی با هدف تعیین مقدار حمل بهینه کالاهای وارداتی از مبادی ورودی به مناطق مختلف مصرف، مدل برنامه‌ریزی برای تعیین مقادیر حمل کالاهای وارداتی از مبادی ورودی به مراکز مصرف با هدف کمینه کردن کل هزینه‌های حمل و نقل ارائه کرد. در این تحقیق بنادر به عنوان مبادی ورودی کشور در نظر گرفته شده‌اند و برای منطقه‌بندی انتخابی با توجه به عوامل جمعیت، شبکه توزیع، موقعیت جغرافیایی استان‌ها، وضع موجود شبکه راه‌های استانی و میزان خدمات‌رسانی حمل و نقل، استان‌های کشور به عنوان مراکز مصرف در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر حمل بهینه کالاهای وارداتی از بنادر به مراکز استان‌ها، مقدار استفاده از ظرفیت هر یک از مبادی، آنالیز حساسیت مربوط به مساله و قیمت‌های سایه مربوط به محدودیت‌ها و هزینه‌های فرصت مشخص شده‌اند [۱۹].

- مدل بهینه خطی حمل و نقل بنزین از پالایشگاه‌ها و مبادی ورودی کشور به انبارهای شرکت نفت [۲۰]

- مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای حداقل کردن هزینه ارسال گاز طبیعی به بنادر مقصد به وسیله کشتی با در نظر گرفتن تنوع محصول [۲۱]

- تعیین برنامه بهینه حمل و نقل گندم از مراکز استان‌ها و مبادی واردات به مراکز ذخیره‌سازی و سپس انتقال به مناطق

### ۳- بررسی مطالعات قبلی

بهینه‌سازی یک سیستم معرف دستیابی به بهترین نتیجه در شرایط موجود است و هدف، کمینه یا بیشینه کردن تابعی است که این تابع معیاری از کارایی سیستم است. مسایل بهینه‌سازی به دو دسته بی‌محدودیت و با محدودیت تقسیم می‌شود، اما در اغلب مسایل کاربردی، بهینه‌سازی با محدودیت تعریف می‌شود که در آن، کمینه و یا بیشینه‌سازی تابع هدف با توجه به محدودیت‌های موجود سیستم از قبیل رفتار و عملکرد سیستم و یا محدودیت‌های منابع انجام می‌گیرد. برای بهینه‌سازی عمدتا چهار گروه روش‌های شمارشی، محاسباتی بر مبنای ریاضی، ابتکاری و فرا ابتکاری به کار می‌رود.

تکنیک‌های برنامه‌ریزی خطی به عنوان یکی از کاربردی‌ترین روش‌های محاسباتی بر مبنای توابع ریاضی تعریف می‌شود که در آن تابع هدف و محدودیت‌های مساله، به صورت یک تابع خطی از محدودیت‌های مساله تعریف می‌شود. اگرچه مسایل حمل و نقل عمدتا در قالب مسایل برنامه‌ریزی ریاضی بررسی می‌شود، اما به کارگیری روش‌های فرا ابتکاری و ابتکاری نیز در تحقیقات مختلف برای حل مسایل حمل و نقل و مقایسه جواب‌های آن با برنامه‌ریزی ریاضی انجام می‌شود [۹-۱۱]. با توجه به بررسی منابع مختلف و ارتباط آن با مساله حمل و نقل بهینه و هدف تحقیق، دو دسته مطالعات مختلف انجام گرفته است. در گروه اول مطالعات مساله حمل و نقل داخل یک معدن و بررسی انتخاب نوع و تعداد ناوگان مناسب ترابری با توجه به سهم بالای انتقال مواد از هزینه‌های تولید

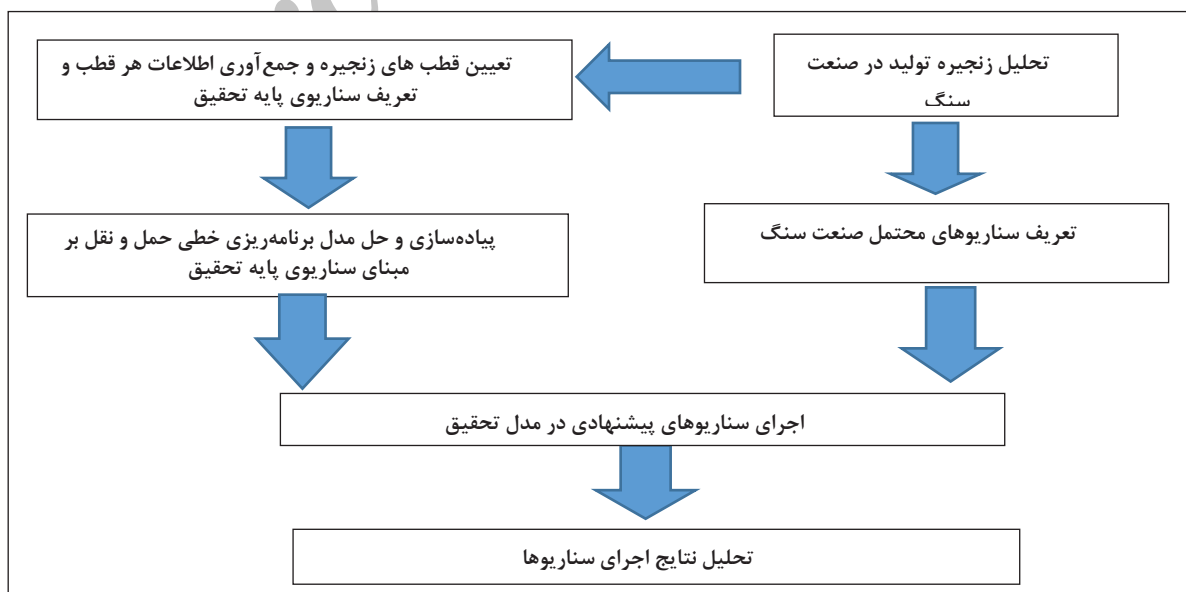
مصرف [۲۲]

زمینه تعیین حمل و نقل بهینه در صنعت سنگ انجام نشده است. در این تحقیق از نرم‌افزار گمز<sup>۱</sup> برای حل مدل خطی مساله استفاده شده است که قابلیت بالایی در حل مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی دارد.

#### ۴- داده‌ها و روش تحقیق

هزینه جابه‌جایی سنگ خام استخراج شده از معدن به کارخانجات برای فرآوری و تولید پلاک و اسلب و سپس انتقال سنگ فرآوری شده به بازار مصرف بخش عمده‌ای از هزینه‌های تولید را پوشش می‌دهد و تاثیر عمده‌ای بر رقابت‌پذیری محصولات نهایی صنعت دارد. انتخاب معادن مناسب برای تامین سنگ خام و مقاصد مناسب برای فروش به وسیله کارخانجات فرآوری با هدف کوتاه‌ترین مسیر حمل و لحاظ کردن نیازها و ظرفیت‌های مربوط، موجب کاهش هزینه‌های زنجیره تامین و بهبود رقابت‌پذیری محصولات صنعت سنگ می‌شود، بنابراین در این تحقیق تلاش شده است تا با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی، بهینه‌سازی تناژ حمل و نقل سنگ خام از معادن به کارخانجات و سنگ فرآوری شده به صورت پلاک و اسلب از کارخانجات به بازار متناسب با موقعیت معادن و بازارهای مصرف انجام گیرد. روش کلی تحقیق در شکل ۳ ارائه شده است. در ابتدا پس از تحلیل زنجیره صنعت سنگ، برای هر یک از بخش‌های معدن، فرآوری سنگ تزیینی و بازار

الگوی ریاضی بهینه فروش سیمان سیستان به کمک الگوریتم حمل و نقل مرکب با لحاظ نمودن کوتاه‌ترین مسیر تامین بازار مصرف داخلی و خارجی شرکت [۲۳] - مدل ریاضی بهینه‌سازی زنجیره تامین گاز مایع با هدف طراحی مسیرهای بهینه و به کارگیری نفتکش‌های میانی با هدف حداکثر کردن کارایی زنجیره تامین [۲۴] - طراحی مدل ریاضی شبکه حمل و نقل چند سطحی شرکت پست جمهوری اسلامی ایران برای توزیع مرسولات بر مبنای کوتاه‌ترین مسیر و کمترین زمان توزیع با انتخاب نوع وسیله نقلیه و سپس تخصیص وزن محموله‌ها به هر یک از مسیرهای انتخاب شده [۲۵]. - بهینه‌سازی زنجیره تولید و فرآوری و توزیع چند شیوه‌ای محصولات معدنی در حالت عدم قطعیت [۲۶] - ارائه مدل خطی تولید و توزیع فولاد در کانادا بر مبنای مینیمم هزینه خرید مواد خام، تولید و توزیع محصولات نهایی، تقاضای بازار و قیمت‌های فروش [۲۷] با توجه به پیچیدگی توابع هدف و همچنین تعدد متغیرها و محدودیت‌های مسایل و سختی به کارگیری تکنیک‌های معمول بهینه‌سازی، نیاز به برنامه‌های کامپیوتری و حل مسایل با تکنیک‌های هوش مصنوعی و روش‌های فرا ابتکاری ضروری است [۱۱]. بررسی مطالعات قبلی نشان می‌دهد تحقیقی در



شکل ۳: فرآیند تحقیق

قطب سنگبری با قطب مصرف در یک استان مشترک است، میانگین فاصله حمل بین دو قطب در استان و بر اساس وسعت استان لحاظ شده است.

۵- برای یکسان شدن ساختار مواد معدنی و محصول فرآوری شده و بازار مصرف، علیرغم اینکه خروجی واحدهای فرآوری به قطب بعدی به صورت پلاک است، اما پلاک‌های تهیه شده بر اساس تناژ در محاسبات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۶- قیمت حمل هر یک از انواع سنگ‌های ساختمانی به جنس سنگ بستگی ندارد.

۷- بر اساس بررسی‌های میدانی، تفاوت هزینه حمل سنگ بریده شده نسبت به سنگ خام معادل ۴۰ درصد است که برای مدلسازی آن به عنوان ضریبی مشخص در فواصل حمل اضافه شده است.

۸- استان‌هایی که میزان تولید سنگ ساختمانی در آن‌ها ناچیز است در استان‌های دیگر ادغام نشده و در صورت نبود حذف شده‌اند.

۹- محل مصرف نهایی سنگ تزئینی با محل بازار ممکن است متفاوت باشد که در تحلیل لحاظ نشده است.

۱۰- سنگ لاشه اگر چه برای مصارف ساختمانی نیز استفاده می‌شود، اما در مقادیر تناژ تولید و فرآوری لحاظ نشده است.

#### ۴-۱- تحلیل قطب‌های زنجیره صنعت سنگ

#### ۴-۱-۱- شناسایی و تحلیل قطب‌های معدنی

معادن به عنوان اولین جزء زنجیره تامین صنعت سنگ، نقش اساسی در تامین خوراک کارخانجات فرآوری مواد معدنی دارند. برای تحلیل قطب‌های تولید معدنی، با توجه به میزان ذخایر و تولید استان‌ها، کل تولید سنگ تزئینی کشور پس از کسر ۱۰ درصد ضایعات مربوط به استخراج، بارگیری و انتقال، در قالب ۱۰ قطب مجزا شامل  $M_1$  تا  $M_{10}$  مطابق جدول ۳ تفکیک و تحلیل شد. بدین ترتیب که نواحی که بیشترین تولید سنگ تزئینی را دارند به عنوان قطب معدنی تعیین و تولید استان‌های مجاور به تولید به آن‌ها اضافه شده است. همچنین با توجه به موقعیت ذخایر سنگ تزئینی استان، مرکز هر قطب معدنی تعیین شد. به عنوان مثال استان مرکزی به عنوان یکی از استان‌ها با ظرفیت تولید بالا در سنگ‌های تزئینی شناخته می‌شود و بیشترین تمرکز معادن سنگ تزئینی در منطقه محلات قرار دارد و معادن استان قم در مجاورت استان مرکزی

مصرف ۱۰ قطب جداگانه تعریف شد که با توجه به گستردگی توزیع واحدهای هر قطب، یک مرکز برای هر قطب تعریف و تحلیل فاصله حمل بین مراکز این قطب‌ها انجام شد. فاصله قطب معدن و فرآوری شامل فاصله بین مرکز قطب معدن که در آن سنگ به صورت کوپ تولید شده تا مرکز قطب سنگبری که در آن فرآوری سنگ‌ها و تولید پلاک انجام می‌گیرد، است. فاصله قطب فرآوری تا کارخانه نیز بر مبنای فاصله حمل از مرکز قطب سنگبری‌ها تا بازار مصرف که عمدتاً شهرهای بزرگ است، محاسبه می‌شود. تابع هدف مینی‌م‌سازی توأم تناژ حمل انتقالی بین هر قطب معدنی تا فرآوری و همچنین بین هر قطب فرآوری تا قطب مصرف با در نظر گرفتن فواصل قطب‌ها است. مهمترین محدودیت‌های مساله، محدودیت ظرفیت تولید معادن، ظرفیت کارخانجات و بازار مصرف است. برآورد ظرفیت بازار مصرف از طریق تحلیل سرانه مصرف استان مربوط انجام می‌گیرد. خروجی مساله، پس از تبدیل آن به صورت یک مدل برنامه‌ریزی خطی و حل آن در نرم‌افزار گمز، تناژ بهینه سنگ خام قابل حمل از هر قطب معدن تا قطب فرآوری و نیز تناژ حمل پلاک و اسلب انتقالی از هر قطب فرآوری تا قطب مصرف است. سناریوی پایه، وضع موجود صنعت سنگ تعریف شد، اما در مرحله بعد با تعریف سناریوهای محتمل مبتنی بر شرایط آتی زنجیره صنعت سنگ کشور، نتایج اجرای هر سناریو در قالب مدل پیشنهادی تحلیل شده است. با توجه به ملاحظات خاص این صنعت از جمله توزیع جغرافیایی ناهمگون صنعت و فراهم شدن امکان مدلسازی، مهمترین مفروضات تحقیق به شرح زیر است:

- ۱- مرکز هر قطب معدنی و فرآوری بر اساس تمرکز معادن فعال سنگ ساختمانی و یا واحدهای سنگبری در ناحیه مورد مطالعه تعیین شده است.
- ۲- انتخاب مبادی و مقاصد فرآوری و مصرف صرفاً بر مبنای حداقل مسافت حمل انجام می‌شود و سایر مسایل از جمله قیمت تمام شده فرآوری در واحدها، قیمت فروش و سلیقه مصرف‌کنندگان و یا مسایل فنی کارخانه‌ها در آن لحاظ نشده است.
- ۳- حمل و نقل در داخل معدن و همچنین درون کارخانه یا درون شهر (به عنوان بازار مصرف) هر چند نیازمند طی کردن مسافت است، اما به دلیل ناچیز بودن طول مسیر نسبت به مسیر بین قطب‌های یاد شده در بالا در ماتریس‌های مسافت لحاظ نشده است.
- ۴- برای استان‌هایی که قطب معادن با قطب سنگبری و یا

جدول ۳: قطب‌های معدنی و استان‌های ادغام شده در آن

نماد قطب	نام قطب معدنی	مرکز قطب	نام استان‌های تحت پوشش قطب	میزان تولید کل (هزارتن)
M <sub>1</sub>	آذربایجان شرقی	آذرشهر	آذربایجان شرقی، اردبیل و زنجان	۳۳۶/۷۷۱
M <sub>2</sub>	آذربایجان غربی	خوی	آذربایجان غربی و کردستان	۸۹۰/۲۵۳
M <sub>3</sub>	اصفهان	انارک	اصفهان، سمنان، چهارمحال و بختیاری	۴۴۹۴/۴۲۰
M <sub>4</sub>	کرمان	سیرجان	کرمان و هرمزگان	۲۲۶/۲۶۷
M <sub>5</sub>	خراسان رضوی	بجستان	خراسان رضوی و شمالی	۴۰۲/۵۹۰
M <sub>6</sub>	خراسان جنوبی	نهبندان	خراسان جنوبی، سیستان و بلوچستان	۳۹۶/۲۰۵
M <sub>7</sub>	مرکزی	محلان	مرکزی، قم، قزوین و همدان	۲۷۵۲/۶۰۰
M <sub>8</sub>	لرستان	دورود	لرستان، کرمانشاه و خوزستان	۱۰۶۴/۲۰۰
M <sub>9</sub>	فارس	صفا شهر	فارس	۱۰۳۱/۴۲۵
M <sub>10</sub>	یزد	بافق	یزد	۱۰۵۸/۳۴۰
مجموع				۱۲۶۵۳/۰۷۱

جدول ۴: مشخصات قطب‌های فرآوری سنگ تزئینی

نماد	نام قطب فرآوری	مرکز قطب	نام استان‌های تحت پوشش قطب	ظرفیت فرآوری (هزارتن)
F <sub>1</sub>	آذربایجان شرقی	تبریز	آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، زنجان	۵۲۰/۵۰
F <sub>2</sub>	تهران	حسن‌آباد	تهران، قم، سمنان	۱۶۵۶/۶۷
F <sub>3</sub>	اصفهان	نجف‌آباد	اصفهان	۴۱۶۰/۹۷
F <sub>4</sub>	کرمان	کرمان	کرمان، سیستان و بلوچستان	۲۱۷/۵۶
F <sub>5</sub>	خراسان رضوی	مشهد	خراسان‌های رضوی، شمالی و جنوبی	۴۹۶/۶۹
F <sub>6</sub>	هرمزگان	بندرعباس	هرمزگان	۴۵
F <sub>7</sub>	مرکزی	تیمور	مرکزی، قزوین، کردستان	۶۶۱/۱۴
F <sub>8</sub>	لرستان	خرم‌آباد	لرستان، کرمانشاه، خوزستان	۱۷۲۷/۶۸
F <sub>9</sub>	فارس	صفاشهر	فارس	۴۲۹/۱۷
F <sub>10</sub>	یزد	یزد	یزد	۱۳۰۰
مجموع				۱۰۹۳۹/۱

#### ۴-۱-۲- شناسایی و تحلیل قطب‌های فرآوری

واحد های فرآوری صنعت سنگ ساختمانی در شهرک‌های صنعتی استان‌های مختلف ایجاد شده است و تولید پلاک و اسلب از کوپ‌های معدنی انجام می‌گیرد. این کارخانجات اغلب با توجه به موقعیت استانی و جمعیتی و یا موقعیت معادن استان در بخشی از شهرک‌های صنعتی استان تمرکز بیشتری دارند. تعیین قطب‌های فرآوری با توجه به ظرفیت واحدهای فرآوری سنگ تزئینی انجام گرفت که ۱۰ قطب استانی با ظرفیت تولید بیشتر مشابه قطب‌های معدنی انتخاب شد (جدول ۴). واحدهای فرآوری سایر استان‌ها بر اساس نزدیکی فاصله در یکی از این قطب‌های تعیین شده ادغام می‌شود تا

به میزان تولید استان مرکزی که قطب آن محلان تعیین شده است اضافه شد. میزان تولید هر یک از قطب‌های معدنی در جدول ۳ درج شده است، بنابراین میزان تولید هر قطب بر اساس مجموع تولیدات استان‌های زیر مجموعه و همین‌طور میزان تولید تمامی سنگ‌های ساختمانی آن از لحاظ جنس سنگ است. در سناریوی پایه، واردات سنگ تزئینی خام به کشور به عنوان یکی از قطب‌های تامین خوراک واحدهای فرآوری فرض شد و با توجه به این که ۱۰ هزار تن از مبادی شرقی و از کشور افغانستان انجام گرفته است، بنابراین مقدار آن به صورت مساوی در دو قطب معدنی خراسان رضوی و جنوبی دارای مرز مشترک با افغانستان لحاظ شد.

مصرف کننده نهایی یا فروشنده می شود و تغییرات جزئی در ابعاد سنگ انجام می گیرد، بنابراین محل مصرف نهایی با محل تحویل کالا ممکن است تفاوت جزئی داشته باشد. ۹ قطب اصلی بازار کشور بر مبنای شهرهای پرجمعیت به همراه پایانه صادراتی بندرعباس به عنوان قطب دهم تعریف شده است تا کل تقاضای مصرف و تجارت خارجی را پوشش دهد. ضمناً از انتخاب شهرهایی که فاصله کمتر از ۲۰۰ کیلومتر با یکدیگر داشته‌اند اجتناب شده است. بدین گونه که شهرهای قم و کرج هر چند از شهرهای پرجمعیت کشورند، اما به دلیل نزدیکی به تهران در آن ادغام شده‌اند. تخمین ظرفیت تقاضای بازار، با توجه به نبود آمار دقیقی از مصارف مناطق شهری، بر اساس تحلیل سرانه مصرف سنگ ساختمانی طبق جدول ۵ انجام گرفت. بدین صورت که با توجه به سرانه سالانه متوسط مصرف ظاهری ۱/۱ مترمربع بر هر نفر و تفاوت مقادیر تقاضای مناطق مختلف، با توجه به سرانه تولید ناخالص داخلی استان‌ها به پنج سطح تقسیم شده‌اند و متناسب با آن، ضرایب کاهنده و افزایشنده برای سرانه مصرف هر منطقه لحاظ شده است، سپس با توجه به جمعیت تحت پوشش هر قطب، برآورد تقاضای هر قطب طبق جدول ۶ انجام گرفت. ضمناً محاسبات تبدیل

تمام ظرفیت فرآوری سنگ تزئینی کشور مورد بررسی قرار گیرد. کارخانجات فرآوری سنگ ساختمانی به دو دسته نرم بر و سخت بر تقسیم می شوند و انواع سنگ‌های ساختمانی در دو دسته نرم بر شامل تراورتن، مرمر و مرمریت و سنگ‌های سخت بر از قبیل گرانیت جای می گیرند. اگرچه واحدهای سخت بر قادر به بریدن سنگ‌های نرم اند ولی واحدهای نرم بر توانایی بریدن سنگ‌های سخت را به لحاظ تجهیزاتی ندارند. برای یکسان سازی واحد سنجش حمل مواد معدنی خام و محصول فرآوری شده در مدل بر مبنای تن متریک، با بررسی میدانی و گزارش‌های کارشناسی، از هر یک تن کوپ سنگ ساختمانی نرم بر بطور متوسط ۸ متر مربع پلاک سنگ ساختمانی و از هر تن سنگ سخت بر حدود ۷/۲ متر مربع پلاک تولید می شود [۵]. همچنین میزان واردات سنگ‌های ساختمانی فرآوری شده و صادرات سنگ خام فرآوری نشده که به صورت کوپ است در این بخش لحاظ می شود.

#### ۴-۱-۳- شناسایی و تحلیل قطب‌های مصرف

آخرین بخش زنجیره صنعت سنگ، بازار مصرف است، سنگ تزئینی فرآوری شده به صورت اسلب تحویل

جدول ۵: برآورد سرانه مصرف در قطب‌های کشور

D <sub>10</sub>	D <sub>9</sub>	D <sub>8</sub>	D <sub>7</sub>	D <sub>6</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	نام قطب مصرف
گیلان	فارس	کرمانشاه	خوزستان	هرمزگان	خراسان رضوی	کرمان	اصفهان	تهران	آذربایجان شرقی	
۱/۱	۱/۱	۰/۹	۱/۱	۱	۱/۱	۰/۹	۱/۲	۱/۴	۱/۱	برآورد سرانه مصرف (مترمربع بر نفر)

جدول ۶: مشخصات قطب‌های مصرف سنگ تزئینی

نماد قطب	نام قطب مصرف	مرکز قطب	استان‌های تحت پوشش قطب	جمعیت قطب	مصرف کل
D <sub>1</sub>	آذربایجان شرقی	تبریز	آشرفی، آغری، اردبیل، زنجان	۹,۰۷	۱۲۴۷,۰۵
D <sub>2</sub>	تهران	تهران	تهران، البرز، قزوین، قم، سمنان	۱۷,۵۸	۲۹۶۶,۱۰
D <sub>3</sub>	اصفهان	نجف آباد	اصفهان، یزد، چهارمحال و بختیاری، مرکزی	۸,۲۶	۱۲۳۹,۴۴
D <sub>4</sub>	کرمان	کرمان	کرمان، سیستان و بلوچستان	۵,۴۷	۶۱۵,۷۵
D <sub>5</sub>	خراسان رضوی	مشهد	خراسان رضوی، شمالی و جنوبی، گلستان	۹,۳۰	۱۲۷۸,۹۸
D <sub>6</sub>	هرمزگان	بندرعباس	هرمزگان و پایانه صادرات	۱,۵۸	۲۳۷,۷۷
D <sub>7</sub>	خوزستان	اهواز	خوزستان، لرستان	۶,۲۹	۸۶۴,۳۲
D <sub>8</sub>	کرمانشاه	کرمانشاه	کرمانشاه، کردستان، همدان، ایلام	۵,۷۵	۶۴۷,۴۱
D <sub>9</sub>	فارس	شیراز	فارس، کهگیلویه و بویراحمد، بوشهر	۶,۲۹	۸۶۴,۶۳
D <sub>10</sub>	گیلان	رشت	گیلان، مازندران	۵,۵۵	۷۶۳,۷۹
			مجموع	۷۵,۱۵	۱۰۷۲۵,۲۴



مقادیر مترمکعب به تن متریک، مشابه بخش فرآوری است.

و فرآوری و قطب‌های فرآوری و بازار مصرف مطابق جداول ۷ و ۸ و با در نظر گرفتن مفروضات زیر تشکیل شد.

- نوع حمل و نقل جاده‌ای و غیرترکیبی تعریف شد.  
- مسیرهای جاده‌ای ثابت فرض می‌شود و از جاده‌ها و خطوط آهن در حال احداث و غیر آسفالت‌ه صرف نظر شده است.  
- در مواردی که قطب معادن با قطب فرآوری و یا قطب مصرف با قطب فرآوری یکی باشد، فاصله بر اساس میانگین

#### ۴-۱-۴- تشکیل ماتریس فواصل بین قطب‌ها

در مرحله بعد نیاز است تا فواصل بین هر یک از مجموعه قطب‌ها از هم مشخص شود. با توجه به هدف تحقیق و نیز حمل کامل سنگ تزیینی از طریق حمل و نقل جاده‌ای، فاصله جاده‌ای میان آن‌ها به دست آمد و ماتریس فواصل بین قطب‌های معدنی

جدول ۷: فاصله بین قطب‌های معدنی و قطب‌های فرآوری

F <sub>10</sub>	F <sub>9</sub>	F <sub>8</sub>	F <sub>7</sub>	F <sub>6</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>1</sub>	فرآوری / معدن	
یزد	فارس	لرستان	مرکزی	هرمزگان	خراسان رضوی	کرمان	اصفهان	تهران	آذربایجان شرقی		
۱۲۹۲	۱۳۱۳	۶۹۴	۸۳۱	۱۹۰۸	۱۵۷۵	۱۸۳۹	۱۱۳۴	۷۲۰	۶۱	آذربایجان شرقی	M <sub>1</sub>
۱۳۰۷	۱۲۴۷	۱۰۰۷	۹۱۱	۱۹۶۴	۱۶۸۱	۲۱۲۶	۱۰۸۰	۸۳۳	۱۶۶	آذربایجان غربی	M <sub>2</sub>
۸۰	۵۲۰	۴۹۹	۴۴۴	۸۴۰	۹۸۰	۴۹۸	۲۶۵	۵۲۵	۱۱۰۰	اصفهان	M <sub>3</sub>
۴۰۵	۳۰۰	۱۰۵۴	۱۰۶۳	۳۰۸	۱۰۹۵	۱۸۹	۶۹۸	۹۸۷	۱۵۴۵	کرمان	M <sub>4</sub>
۶۵۵	۹۰۴	۱۴۲۰	۱۰۲۷	۱۶۵۰	۳۰۰	۷۷۸	۹۱۵	۹۱۳	۱۵۰۴	خراسان رضوی	M <sub>5</sub>
۸۲۱	۱۰۷۰	۱۴۶۷	۱۲۶۰	۸۷۸	۶۸۲	۵۵۰	۱۰۹۸	۱۳۷۴	۱۸۹۲	خراسان جنوبی	M <sub>6</sub>
۴۸۷	۵۳۰	۲۵۳	۶۰	۱۱۴۹	۱۰۸۸	۱۰۴۶	۲۲۱	۲۳۸	۹۴۱	مرکزی	M <sub>7</sub>
۶۱۹	۶۰۲	۸۵	۱۸۹	۱۳۲۴	۱۲۱۴	۱۱۶۲	۲۸۵	۳۶۷	۷۹۲	لرستان	M <sub>8</sub>
۳۸۱	۷۰	۱۱۲۰	۷۰۱	۷۴۷	۱۳۰۲	۶۸۰	۳۲۹	۷۸۲	۱۴۲۵	فارس	M <sub>9</sub>
۱۲۵	۳۹۰	۸۲۷	۶۱۹	۷۴۵	۹۸۹	۴۲۵	۴۷۱	۷۰۷	۱۲۶۳	یزد	M <sub>10</sub>

جدول ۸: فاصله میان هر قطب فرآوری تا قطب مصرف‌کننده بر حسب کیلومتر

F <sub>10</sub>	F <sub>9</sub>	F <sub>8</sub>	F <sub>7</sub>	F <sub>6</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>1</sub>	مصرف / فرآوری	
یزد	فارس	لرستان	مرکزی	هرمزگان	خراسان رضوی	کرمان	اصفهان	تهران	آذربایجان شرقی		
۱۱۴۵	۱۲۹۰	۸۰۰	۷۵۰	۱۸۱۰	۱۵۲۰	۱۵۱۵	۹۳۵	۶۹۰	۵۵	آذربایجان شرقی	D <sub>1</sub>
۶۳۰	۷۵۰	۴۹۰	۲۸۰	۱۳۲۰	۸۹۰	۹۹۰	۴۷۰	۶۰	۶۳۰	تهران	D <sub>2</sub>
۳۲۵	۳۰۰	۳۸۰	۲۱۰	۹۸۰	۱۱۶۰	۷۰۰	۶۵	۴۰۰	۹۰۵	اصفهان	D <sub>3</sub>
۳۶۵	۶۶۰	۱۰۷۰	۱۰۰۰	۴۹۰	۹۱۰	۷۰	۷۲۵	۹۳۰	۱۵۱۵	کرمان	D <sub>4</sub>
۹۲۰	۱۲۴۵	۱۳۰۰	۱۱۰۰	۱۴۰۰	۸۰	۹۱۰	۱۱۶۰	۸۹۰	۱۵۲۰	خراسان رضوی	D <sub>5</sub>
۶۶۰	۷۰۰	۱۳۰۰	۱۳۰۰	۶۵	۱۴۰۰	۴۹۰	۱۰۰۰	۱۲۷۰	۱۸۱۰	هرمزگان	D <sub>6</sub>
۸۵۰	۶۴۰	۳۴۰	۶۰۰	۱۱۴۰	۱۶۳۰	۱۰۹۰	۵۵۰	۷۸۰	۱۱۳۰	خوزستان	D <sub>7</sub>
۹۳۰	۹۸۰	۲۰۰	۳۴۰	۱۶۲۰	۱۴۳۰	۱۲۹۰	۶۰۰	۵۵۰	۷۲۰	کرمانشاه	D <sub>8</sub>
۴۵۰	۱۰۰	۸۴۰	۶۹۰	۶۰۰	۱۳۵۰	۵۶۰	۴۳۰	۷۹۰	۱۳۹۰	فارس	D <sub>9</sub>
۹۵۰	۱۰۵۰	۶۵۰	۵۰۰	۱۵۵۰	۱۲۲۵	۱۳۱۵	۴۸۰	۳۸۰	۵۰۰	گیلان	D <sub>10</sub>

محصولات در زنجیره صنعت سنگ، سه حوزه مجزای معادن، کارخانجات فرآوری و بازار مصرف نهایی تشکیل و هر حوزه بر اساس موقعیت مکانی و ظرفیت به ده قطب اصلی تقسیم شد. برای تحلیل مساله از مدل برنامه‌ریزی خطی استفاده شد و پس از تشکیل ماتریس فواصل حمل و نقل جاده‌ای بین قطب‌ها در کشور، مدل برنامه‌ریزی خطی حمل و نقل بخشی مواد اولیه و محصولات بین قطب‌ها تشکیل شد.

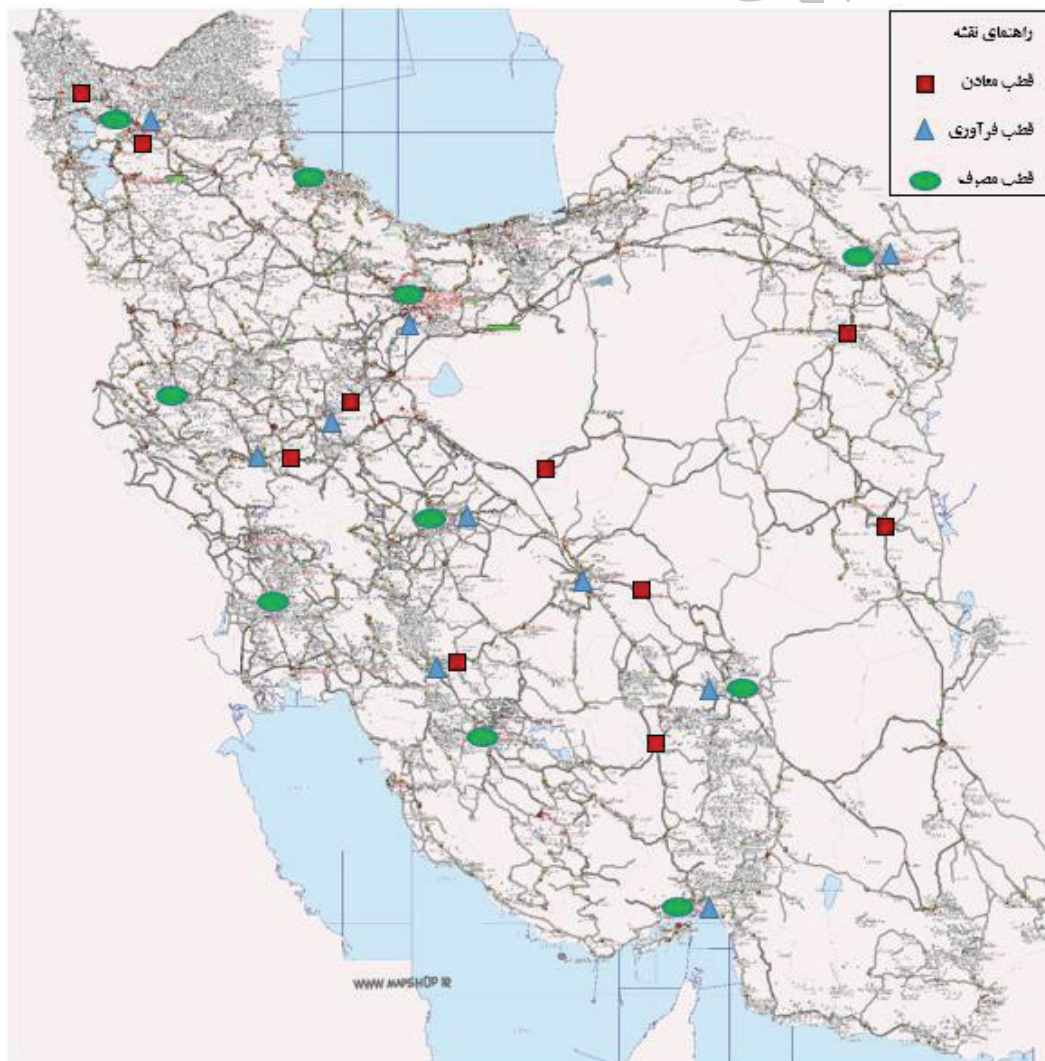
تابع هدف خطی مینی‌م‌سازی توأم تناژ حمل مواد اولیه از قطب‌های معدنی به قطب‌های فرآوری و نیز مینی‌م‌انتقال سنگ فرآوری شده از کارخانجات به قطب‌های مصرف طراحی شد. محدودیت‌های مساله بر مبنای تامین نیاز قطب‌های فرآوری و مصرف با توجه به رعایت محدودیت‌های فنی و

حمل در سطح استان محاسبه شده است. - به دلیل گرانت‌تر بودن حمل هر تن سنگ بریده شده نسبت به هر تن کوپ، در محاسبات نهایی، افزایش هزینه حمل به صورت یک ضریب بالاسری در جدول فواصل قطب فرآوری به مصرف اعمال می‌شود.

پس از شناسایی هر یک از قطب‌های ده‌گانه معدن، فرآوری و بازار مصرف در بخش‌های قبلی، جانمایی هر یک از قطب‌ها در سطح کشور در شکل ۴ ارائه شده است.

#### ۴-۲- مدل برنامه‌ریزی خطی زنجیره حمل و نقل مواد و محصولات

برای پیاده‌سازی مدل برنامه‌ریزی حمل و نقل مواد و



شکل ۴: جانمایی هر یک از قطب‌های معدن، فرآوری و مصرف در سطح کشور

جدول فواصل حمل بین قطب‌ها شامل  $E_{jk}$  و  $C_{ij}$  است که به ترتیب معرف فواصل بین قطب معدن  $i$  تا قطب فرآوری  $j$  و جابه‌جایی بین قطب فرآوری  $j$  تا قطب مصرف  $k$  است. همچنین برای تابع هدف یاد شده چهار دسته محدودیت کلی بر مبنای ملاحظات صنعت سنگ به شرح زیر تعریف می‌شود: **محدودیت اول:** مجموع تناژ حمل شده از هر قطب معدنی به قطب‌های مختلف فرآوری طبق رابطه شماره ۲، حداکثر معادل با میزان تولید آن قطب معدنی است. در این رابطه  $Cap_i$  معادل با تولید سنگ قطب  $i$  ام است.

(۲)

$$\sum_{j=1}^M X_{ij} \leq Cap_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, M$$

**محدودیت دوم:** میزان تناژ انتقال یافته از قطب‌های معدنی به هر قطب فرآوری مطابق رابطه ۳، باید کوچکتر یا برابر با میزان ظرفیت قطب فرآوری باشد. در این رابطه  $V_j$  معادل با ظرفیت قطب  $j$  ام است.

(۳)

$$\sum_{i=1}^N X_{ij} \leq V_j \quad j = 1, 2, \dots, M$$

**محدودیت سوم:** میزان تناژ انتقال یافته از مجموع قطب‌های فرآوری به هر قطب مصرف باید برابر و یا بیشتر از میزان تقاضای مصرف طبق رابطه شماره ۴ باشد تا بتواند تمام تقاضای قطب مصرف را پوشش دهد.

(۴)

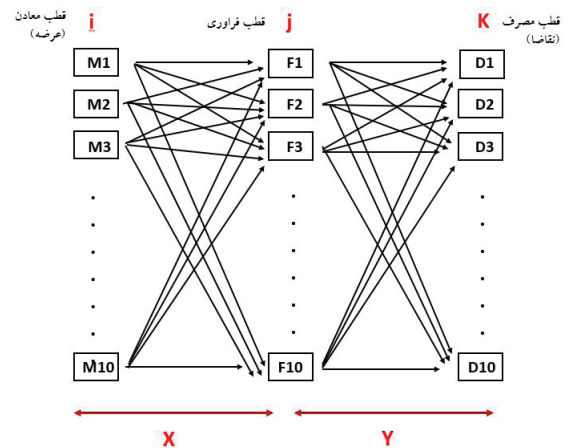
$$\sum_{j=1}^M Y_{jk} \geq D_k \quad k = 1, 2, \dots, T$$

**محدودیت چهارم:** مهمترین محدودیت مساله در ارتباط با ضایعات صنعت سنگ در کارخانجات تعریف می‌شود که با توجه به هدررفت سنگ در کارخانجات، حداکثر میزان خروجی هر قطب فرآوری معادل با مجموع ورودی از قطب‌های معدنی مختلف است، بنابراین طبق رابطه شماره ۵، مجموع تناژ انتقال یافته از قطب‌های معدنی به یک قطب فرآوری باید بیشتر و یا برابر با میزان تناژ حمل شده از آن قطب فرآوری به قطب‌های مصرف باشد.

(۵)

$$\sum_{i=1}^N X_{ij} \geq \sum_{k=1}^T Y_{jk}$$

ظرفیتی کارخانجات و معدن تعریف می‌شود. برای این مدل مطابق شکل ۵، قطب‌های معدن به عنوان عرضه‌کننده مواد اولیه با نماد  $M_1$  تا  $M_{10}$ ، قطب کارخانجات فرآوری به عنوان متقاضی مواد اولیه و تولیدکننده محصول نهایی با نماد  $F_1$  تا  $F_{10}$  و برای قطب‌های مصرف به عنوان نماد تقاضای محصول نهایی از  $D_1$  تا  $D_{10}$  نامگذاری شده است.



شکل ۵: مدل حمل و نقل مواد و محصولات در زنجیره صنعت سنگ

برای قطب معدن اندیس  $i$ ، قطب فرآوری اندیس  $j$  و برای قطب مصرف اندیس  $k$  تعیین شد. ماتریس‌های  $X$  و  $Y$  مجموعه متغیرهای تصمیم مساله‌اند که تناژ بهینه حمل بین قطب معدن تا قطب کارخانه با ماتریس  $X$  و تناژ بهینه حمل از قطب کارخانه تا قطب مصرف با ماتریس  $Y$  بیان می‌شود. تابع هدف مساله بر مبنای مینیمم‌سازی توام دو تابع خطی شامل تناژ حمل مواد اولیه از قطب‌های معدنی به قطب‌های فرآوری و تابع تناژ انتقال سنگ فرآوری شده از کارخانجات به قطب‌های مصرف مطابق رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M X_{ij} \times C_{ij} + \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^T Y_{jk} \times E_{ij} \quad X_{ij}, Y_{jk} \geq 0$$

که در آن:

$X_{ij}$ : میزان جابه‌جایی بین قطب معدن  $i$  تا قطب فرآوری  $j$

$Y_{jk}$ : میزان جابه‌جایی بین قطب فرآوری  $j$  تا قطب مصرف  $k$

است.

## ۴-۳- مدل‌سازی مساله در نرم‌افزار گمز

این مدل‌سازی با توجه به طراحی مدل خطی مساله، برنامه‌نویسی تابع هدف و محدودیت‌های مساله انجام گرفت. علیرغم وجود نرم‌افزارهای مختلف برای حل مسایل برنامه‌ریزی ریاضی از جمله لینگو<sup>۲</sup> و لیندو<sup>۲</sup>، نرم‌افزار گمز برای برنامه‌نویسی مدل مساله انتخاب شد که از جمله بهترین نرم‌افزارها برای حل مسایل بهینه‌سازی موارد بزرگ و پیچیده در حالات مختلف است. از ویژگی‌های این نرم‌افزار امکان استفاده از موتورهای حل مختلف متناسب با مولفه‌های مساله و قابلیت ماتریسی و برنامه‌نویسی و نیز ارتباط با نرم‌افزار Matlab است. موتور حل Cplex در نرم‌افزار گمز انتخاب شد.

فواصل قطب معدن تا قطب فرآوری و فواصل بین قطب فرآوری تا قطب مصرف در قالب دو ماتریس جداگانه  $10 \times 10$  شامل  $(E_{jk}$  و  $C_{ij}$ ) و بردارهای ستونی مربوط به میزان تولید معادن  $(Cap_i)$ ، ظرفیت فرآوری  $(V_j)$  و تقاضای مصرف هر قطب  $(D_k)$  تشکیل شد. به دلیل بالاتر بودن هزینه حمل هر تن سنگ بریده شده نسبت به هر تن کوب، ضریب افزایشی در ماتریس فواصل قطب فرآوری به مصرف اعمال شد.

## ۴-۴- نتایج اجرای مدل

پس از اجرای برنامه، خروجی‌های نرم‌افزار اخذ و تحلیل بهینگی پاسخ بر روی آن‌ها انجام گرفت. پس از بررسی خروجی مدل پایه تناژ ارسالی بهینه دو به دو بین قطب‌های معدن و کارخانه و نیز قطب‌های کارخانه تا بازار مصرف مطابق جداول ۹ و ۱۰ محاسبه شد. با مقایسه تناژ ارسالی به کارخانجات با تولیدات معدن و نیز مقایسه تناژ بلوک ارسالی از کارخانجات به بازار مصرف موارد زیر نتیجه‌گیری شد.

- با توجه به جدول شماره ۹، به دلیل عدم توازن در برخی قطب‌ها، ۸۴٫۸ درصد از ظرفیت ۱۲٫۶ میلیون تنی تولیدات قطب‌های معدنی، قابل انتقال برای فرآوری در قطب‌های فرآوری و کارخانجات است.

- آذربایجان غربی و خراسان جنوبی پایین‌ترین نسبت تناژ حمل شده به تناژ تولیدی را در این قطب‌ها دارند. نبود ظرفیت کافی در قطب‌های فرآوری مربوط و قطب‌های مجاور و نیز بعد مسافت با سایر قطب‌های فرآوری، موجب عدم صرفه اقتصادی حمل به قطب‌های فرآوری دورتر شده است و بنابراین بیشترین مازاد تولید استخراج به نسبت ظرفیت واحدهای فرآوری مجاور

جدول ۹: تناژ انتقال سنگ خام از معدن به کارخانجات فرآوری بر مبنای اجرای مدل سناریوی ۱

F <sub>10</sub>	F <sub>9</sub>	F <sub>8</sub>	F <sub>7</sub>	F <sub>6</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>1</sub>	نسبت بهره‌برداری از ظرفیت تولید قطب معدنی (درصد)	تناژ انتقال سنگ خام از معدن به کارخانجات (هزار تن)
									آذر- شرقی	۳۳۷	M <sub>1</sub>
									آ- غربی	۱۸۴	M <sub>2</sub>
۳۱۷		۱۷					۴۱۶۱		اصفهان	۱۰۰	M <sub>3</sub>
				۴۵		۱۸۱			کرمان	۱۰۰	M <sub>4</sub>
					۴۰۳				خ-	۱۰۰	M <sub>5</sub>
					۹۴				خ-	۲۳٫۸	M <sub>6</sub>
		۴۳۵	۶۶۱					۱۶۵۷	مرکزی	۱۰۰	M <sub>7</sub>
		۱۰۶۴							لرستان	۱۰۰	M <sub>8</sub>
	۴۲۹								فارس	۴۱٫۶	M <sub>9</sub>
۷۰۶						۳۶			یزد	۷۰	M <sub>10</sub>

مصرف خوزستان و کرمانشاه است و باقیمانده ظرفیت فرآوری در سناریوی فعلی مازاد است.

#### ۵- تحلیل سناریوهای تحقیق

با توجه طراحی مدل سناریوی پایه ۱ در بخش قبلی، دو سناریوی مجزا مورد بررسی قرار گرفت. سناریوی دوم بر مبنای افزایش سطح عرضه سنگ خام به وسیله معادن به میزان ۲۰ درصد نسبت به شرایط سناریوی پایه است. در سناریوی سوم نیز تاثیر افزایش سطح تقاضا و ظرفیت فرآوری کارخانجات به میزان ۲۰ درصد نسبت به شرایط سناریوی پایه مورد بررسی قرار گرفت.

#### ۵-۱- تحلیل نسبت بهره‌برداری از ظرفیت معادن و کارخانجات صنعت سنگ

- پیاده‌سازی سناریوی دوم در خصوص افزایش عرضه سنگ به ۱۵,۱۸ میلیون تن، اگرچه باعث تغییر در تناژ ارسالی برخی قطب‌ها می‌شود، اما به دلیل عدم افزایش توام ظرفیت فرآوری، مشکلات مربوط به عدم بهره‌گیری از ظرفیت مازاد معدن را نسبت به سناریوی پایه بیشتر می‌کند. مطابق جدول ۱۱، نسبت بهره‌برداری از ظرفیت تولید معادن از ۸۴,۸ درصد به حدود ۷۰,۶ درصد کاهش می‌یابد. همچنین مطابق جدول ۱۲ قطب‌های آذربایجان غربی و خراسان جنوبی شرایط

خود را دارند. استان خراسان جنوبی به دلیل بعد مسافت با کارخانجات، سنگ خام تولید شده خود را باید در خود استان فرآوری کند و توسعه کارخانجات فرآوری موجب بهره‌گیری از ظرفیت معادن می‌شود.

- در مرحله بعد بخشی از ظرفیت تولیدات قطب‌های معدنی فارس و یزد به دلیل بعد مسافت، قابل حمل به قطب‌های فرآوری نیست. در خصوص قطب معدنی یزد، ۷۰۶ هزار تن از ۱۰۵۸ هزار تن تولیدات قطب، در خود استان قابل فرآوری است، از طرفی ظرفیت فرآوری قطب اصفهان نیز به دلیل بالا بودن تولیدات معدنی قطب، کاملاً صرف تامین نیازهای فرآوری خود قطب می‌شود، بنابراین مقدار ناچیزی از تولیدات قطب یزد به دلیل وجود ظرفیت مازاد فرآوری به قطب کرمان، ارسال می‌شود. قطب فارس نیز به دلیل عدم ظرفیت فرآوری کافی در خود استان و نیز نبود ظرفیت مازاد فرآوری در قطب‌های مجاور، نسبت بهره‌برداری حدود ۴۲ درصد دارد. قطب معدنی فارس بیش از سایر قطب‌های دیگر، پتانسیل مشارکت در امر صادرات و استفاده بهینه از ظرفیت معادن و کارخانجات فرآوری را دارد. - با توجه به جدول ۱۰، حدود ۹۸ درصد ظرفیت فرآوری در قطب‌های مربوط، قابل حمل به قطب‌های تقاضا برای تامین مصرف آن‌ها است، قطب اصفهان بیشترین میزان ارسال بین استانی در کشور را دارد، اما در قطب لرستان، حدود ۸۷,۶ درصد از ظرفیت تولیدات کارخانه قابل حمل به قطب‌های

جدول ۱۰: تناژ انتقال بلوک سنگ بریده شده از کارخانجات فرآوری به بازارهای مصرف بر مبنای اجرای مدل سناریوی ۱

D <sub>10</sub>	D <sub>9</sub>	D <sub>8</sub>	D <sub>7</sub>	D <sub>6</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	تناژ انتقال بلوک فرآوری شده از کارخانجات به بازار مصرف (هزار تن)	
گیلان	فارس	کرمانشاه	خوزستان	بندر عباس	خ-رضوی	کرمان	اصفهان	تهران	آ- شرقی	۵۲۱	F <sub>1</sub>
								۱۶۵۷			F <sub>2</sub>
۷۶۴	۴۳۵				۳۵۲		۱۲۳۹	۶۴۸	۷۲۲		F <sub>3</sub>
						۲۱۷					F <sub>4</sub>
					۴۹۷						F <sub>5</sub>
				۴۵							F <sub>6</sub>
								۶۶۱			F <sub>7</sub>
		۶۴۷	۸۶۴						۴		F <sub>8</sub>
	۴۲۹										F <sub>9</sub>
				۱۹۳	۴۳۱	۳۹۹					F <sub>10</sub>

و نیز افزایش ظرفیت واحدهای فرآوری به عنوان واحدهای تقاضای سنگ خام تولیدی معادن، بر روی تامین خوراک کارخانجات بررسی شد. مطابق جدول ۱۱، نسبت بهره‌برداری از ظرفیت قطب معدنی کل کشور به ۹۸٫۸ درصد افزایش می‌یابد. نسبت بهره‌برداری ظرفیت معادن در همه قطب‌ها به جز خراسان جنوبی و کرمان کامل و نسبت بهره‌برداری ظرفیت فرآوری در همه قطب‌ها تقریباً کامل است.

#### ۵-۲- تحلیل تناژ مواد اولیه و محصول حمل شده در زنجیره صنعت

با مقایسه مقادیر کل تناژ سنگ خام حمل شده از قطب معدن تا قطب فرآوری و همچنین تناژ سنگ برش یافته از

بحرانی‌تری در خصوص عدم بهره‌گیری از ظرفیت تولید قطب معدنی در قطب‌های مجاور فرآوری نسبت به سایر قطب‌ها دارند. در خصوص عدم بهره‌گیری از قطب معدنی یزد به دلیل مسافت کمتر مرکز قطب معدنی اصفهان (انارک) با قطب فرآوری یزد نسبت به مرکز قطب معدنی یزد (باقق)، سنگ معدنی ارسالی قطب اصفهان در قطب کارخانجاتی یزد فرآوری شده و کل ظرفیت فرآوری قطب یزد به کار گرفته می‌شود، اما ظرفیت قطب معدنی یزد بدون استفاده می‌ماند. در سناریوی دوم طبق جدول ۱۳، نسبت بهره‌برداری از ظرفیت قطب‌های فرآوری با تغییرات جزئی در برخی قطب‌ها از جمله اصفهان و مرکزی بهبود می‌یابد.

- در سناریوی سوم، تاثیر افزایش ۲۰ درصدی توام تقاضا

جدول ۱۱: مقایسه نسبت بهره‌برداری کلی قطب‌های معدنی در هریک از سناریوهای تحقیق

سناریوی ۳	سناریوی ۲	سناریوی ۱	
۱۳۰۲۲	۱۵۱۸۴	۱۲۶۵۳	تولید سنگ تزئینی معادن (هزار تن)
۱۲۸۷۰	۱۰۷۲۵	۱۰۷۲۵	تناژ حمل شده برای فرآوری
۹۸٫۸	۷۰٫۶	۸۴٫۸	نسبت تناژ حمل شده به تولیدی (درصد)

جدول ۱۳: مقایسه نسبت بهره‌برداری تفکیکی قطب‌های فرآوری در هریک از سناریوهای تحقیق

سناریوی ۳	سناریوی ۲	سناریوی ۱	نسبت بهره‌برداری قطب فرآوری (درصد)
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	F <sub>1</sub> آذربایجان
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	F <sub>2</sub> تهران
۹۸٫۸	۹۴٫۸	۱۰۰	F <sub>3</sub> اصفهان
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	F <sub>4</sub> کرمان
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	F <sub>5</sub> خراسان
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	F <sub>6</sub> بندر عباس
۱۰۰	۱۰۰	۸۷٫۶	F <sub>7</sub> مرکزی
۹۰٫۵	۱۰۰	۱۰۰	F <sub>8</sub> لرستان
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	F <sub>9</sub> فارس
۱۰۰	۱۰۰	۹۸	F <sub>10</sub> یزد

جدول ۱۲: مقایسه نسبت بهره‌برداری تفکیکی قطب‌های معدنی در هریک از سناریوهای تحقیق

سناریوی ۳	سناریوی ۲	سناریوی ۱	نسبت بهره‌برداری قطب معدنی (درصد)
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	M <sub>1</sub> آذربایجان
۱۰۰	۱۰۰٫۹	۲۰٫۶	M <sub>2</sub> آذربایجان غربی
۱۰۰	۸۲٫۳	۱۰۰	M <sub>3</sub> اصفهان
۸۸٫۴	۹۶٫۴	۱۰۰	M <sub>4</sub> کرمان
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	M <sub>5</sub> خراسان رضوی
۷۹٫۱	۲٫۹	۲۳٫۸	M <sub>6</sub> خراسان جنوبی
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	M <sub>7</sub> مرکزی
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	M <sub>8</sub> لرستان
۱۰۰	۳۴٫۷	۴۱٫۶	M <sub>9</sub> فارس
۱۰۰	۰	۷۰	M <sub>10</sub> یزد

نهایی تولید (ستون آخر جدول ۱۴ و شکل ۷) ممکن است موجب افزایش هزینه انتقال مواد اولیه و واسطه و کاهش رقابت‌پذیری محصول نهایی شود.

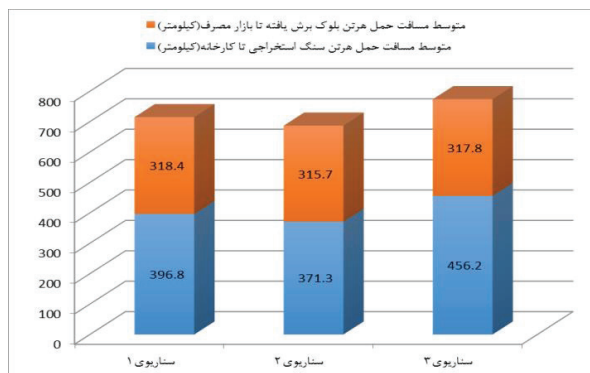
#### ۶- بحث

با توجه به ثابت بودن موقعیت معادن سنگ تریینی به عنوان تامین‌کننده اصلی مواد در زنجیره تولید صنعت سنگ کشور و نیز مشخص بودن بازارهای مصرف سنگ در انتهای زنجیره و توسعه ظرفیت انجام گرفته کارخانجات فرآوری سنگ خام معادن، با شبیه‌سازی سناریوهای مختلف آتی، امکان تحلیل پیامدهای اجرای هر سناریو فراهم می‌شود. در سناریوی پایه ۱ که شبیه‌سازی توازن فعلی صنعت سنگ است، به دلیل عدم توازن در برخی قطب‌ها، ۸۴٫۸ درصد از ظرفیت ۱۲٫۶ میلیون تنی تولیدات معادن قابل انتقال برای فرآوری در

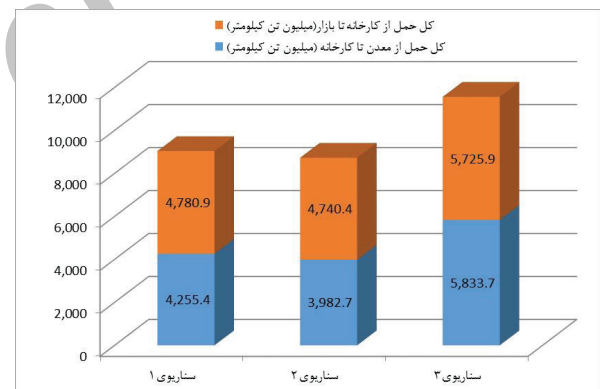
کارخانه تا مرکز قطب مصرف به تفکیک هر سناریو طبق جدول ۱۴ و شکل‌های ۶ و ۷ نتایج زیر به دست می‌آید:

- پیاده‌سازی سناریوی دوم، با کاهش ۶٫۴ درصدی مسافت کلی حمل سنگ خام از معدن به کارخانه و کاهش ۳٫۵ درصدی کل حمل در زنجیره تولید، موجب بهبود رقابت‌پذیری محصول نهایی از بعد کاهش هزینه انتقال مواد اولیه و محصولات واسطه‌ای می‌شود، به طوری که متوسط مسافت حمل در کل زنجیره تولید و فروش به ازای هر تن محصول نیز در سناریوی دوم (ستون آخر جدول ۱۴ و شکل ۷)، نسبت به سناریوی پایه ۳٫۹ درصد کاهش می‌یابد.

- پیاده‌سازی سناریوی سوم، اگرچه موجب بهبود نسبت بهره‌برداری از ظرفیت قطب‌های معدن می‌شود، اما با افزایش ۲۸ درصدی مسافت کلی حمل سنگ خام از معدن به کارخانه و افزایش ۸٫۲ درصدی مسافت مورد نیاز انتقال هر تن محصول



شکل ۷: مقایسه متوسط مسافت حمل هر تن سنگ خام و بلوک برش یافته در زنجیره کامل تولید و فروش به ازای سناریوهای تحقیق



شکل ۶: مقایسه کل حمل مواد اولیه و واسطه به ازای سناریوهای تحقیق

جدول ۱۴: مقایسه نسبت بهره‌برداری تفکیکی قطب‌های فرآوری در هر یک از سناریوهای تحقیق

سناریو	کل حمل از معدن تا کارخانه (میلیون تن کیلومتر)	کل حمل از کارخانه تا بازار (میلیون تن کیلومتر)	مجموع حمل از معدن تا بازار مصرف (میلیون تن کیلومتر)	متوسط مسافت حمل هر تن سنگ استخری تا کارخانه (کیلومتر)	متوسط مسافت حمل هر تن بلوک برش یافته تا بازار مصرف (کیلومتر)	متوسط مسافت حمل از معدن تا بازار (کیلومتر)
سناریوی پایه ۱	۴۲۵۵٫۴	۴۷۸۰٫۹	۹٫۰۳۶	۳۹۶٫۸	۳۱۸٫۴	۷۱۵٫۲
سناریوی ۲	۳۹۸۲٫۷	۴۷۴۰٫۴	۸٫۷۲۳	۳۷۱٫۳	۳۱۵٫۷	۶۸۷٫۱
سناریوی ۳	۵۸۶۸٫۹	۵۷۲۵٫۹	۱۱٫۵۹۵	۴۵۶٫۲	۳۱۷٫۸	۷۷۴٫۰

قطب‌های کارخانجات و سایر یافته‌ها به شرح زیر است:

- قطب‌های معدنی آذربایجان غربی و خراسان جنوبی پایین‌ترین نسبت تناژ سنگ حمل شده به تناژ سنگ تولیدی را دارند. این قطب‌ها، به دلیل نبود ظرفیت کافی در قطب‌های فرآوری مربوط و قطب‌های مجاور و نیز بعد مسافت با سایر قطب‌های فرآوری، بیشترین مازاد تولید استخراج را دارند، بنابراین ایجاد و توسعه کارخانجات فرآوری در این نواحی، برای بهره‌گیری از ظرفیت موجود معادن پیشنهاد می‌شود.

- بخشی از ظرفیت تولیدات قطب‌های معدنی فارس و یزد به دلیل بعد مسافت، قابل حمل به قطب‌های فرآوری نیست.

- قطب معدنی فارس بیش از سایر قطب‌ها، پتانسیل مشارکت در امر صادرات و استفاده بهینه از ظرفیت معادن و کارخانجات فرآوری را دارد.

- حدود ۹۸ درصد ظرفیت فرآوری کشور، قابل حمل به قطب‌های تقاضا برای تامین مصرف آن‌ها است. قطب اصفهان بیشترین میزان ارسال بین استانی در کشور را دارد و در قطب لرستان، حدود ۸۷٫۶ درصد از ظرفیت تولیدات کارخانه، قابل حمل به قطب‌های مصرف خوزستان و کرمانشاه است، اما باقیمانده ظرفیت فرآوری در سناریوی فعلی مازاد است. همچنین دو سناریوی مجزا در این مدل مورد بررسی قرار گرفت. سناریوی دوم بر مبنای افزایش سطح عرضه سنگ خام به وسیله معادن به میزان ۲۰ درصدی نسبت به شرایط سناریوی پایه و سناریوی سوم نیز تاثیر افزایش سطح تقاضا و ظرفیت فرآوری کارخانجات به میزان ۲۰ درصد نسبت به شرایط سناریوی پایه تعریف شد. بر این اساس از هر یک از سناریوها نتیجه گرفته شد که پیاده‌سازی سناریوی دوم در خصوص افزایش عرضه سنگ به ۱۵٫۱۸ میلیون تن، اگرچه باعث تغییر در تناژ ارسالی برخی قطب‌ها می‌شود و نسبت بهره‌برداری از ظرفیت قطب‌های فرآوری با تغییرات جزئی بهبود می‌یابد، اما به دلیل عدم افزایش توام ظرفیت فرآوری و مصرف، نسبت بهره‌برداری از ظرفیت تولید معادن از ۸۴٫۸ درصد به حدود ۷۰٫۶ درصد کاهش می‌یابد.

- قطب‌های آذربایجان غربی و خراسان جنوبی شرایط بحرانی‌تری در خصوص عدم بهره‌گیری از ظرفیت تولید قطب معدنی در قطب‌های مجاور فرآوری دارند.

- در سناریوی دوم، کل ظرفیت فرآوری قطب یزد به وسیله سنگ معدنی ارسالی از قطب معدنی اصفهان به کار گرفته می‌شود، اما ظرفیت قطب معدنی یزد بدون استفاده می‌ماند.

- در سناریوی دوم مسافت حمل سنگ خام از معدن به کارخانه و کل حمل در زنجیره تولید به ترتیب با کاهش ۶٫۴ درصدی و ۳٫۵ درصدی، موجب بهبود رقابت‌پذیری محصول نهایی از بعد کاهش هزینه انتقال مواد اولیه و محصولات واسطه‌ای می‌شود.

- مسافت متوسط حمل در کل زنجیره تولید و فروش به ازای هر تن محصول، در سناریوی دوم نسبت به سناریوی پایه ۳٫۹ درصد کاهش می‌یابد.

- در سناریوی سوم، تاثیر افزایش ۲۰ درصدی توام تقاضا و ظرفیت واحدهای فرآوری بر روی تامین خوراک کارخانجات بررسی شد. نسبت بهره‌برداری از ظرفیت قطب معدنی کل کشور به ۹۸٫۸ درصد افزایش می‌یابد و نسبت بهره‌برداری ظرفیت معادن در عمده قطب‌های معدنی و فرآوری تقریباً کامل است.

- سناریوی سوم، اگرچه موجب بهبود نسبت بهره‌برداری از ظرفیت قطب‌های معدنی می‌شود، اما با افزایش ۲۸ درصدی مسافت کلی حمل سنگ خام از معدن به کارخانه و افزایش ۸٫۲ درصدی مسافت حمل هر تن محصول در طول زنجیره، موجب افزایش هزینه انتقال مواد اولیه و واسطه و کاهش رقابت‌پذیری محصول نهایی می‌شود.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق عدم توازن مربوط به انتقال مواد و محصولات واسطه‌ای در طول زنجیره تامین صنعت سنگ کشور در حالات مختلف بررسی شد و الگوی حمل و نقل کوپ سنگ از معادن تا کارخانه سنگبری و نیز انتقال سنگ برش یافته به صورت اسلب و بلوک از کارخانه تا بازار مصرف از طریق برنامه‌ریزی خطی بر مبنای کاهش هزینه انتقال مواد اولیه و محصولات نهایی در سه سناریوی مختلف تعیین شد. در سناریوی پایه ۱ برخی قطب‌های معدنی توازن ندارند، به طوری که ۸۴٫۸ درصد از ظرفیت ۱۲٫۶ میلیون تنی تولیدات معادن قابل مصرف در قطب‌های کارخانجات است. اجرای سناریوی دوم موجب کاهش متوسط حمل به ازای هر تن محصول به میزان ۳٫۹ درصد می‌شود، اما تاثیر مثبتی بر افزایش نسبت‌های بهره‌برداری از ظرفیت تولید قطب‌های معدنی و فرآوری ندارد. سناریوی سوم اگرچه موجب افزایش نسبت بهره‌برداری از ظرفیت قطب‌های معدنی می‌شود، اما با افزایش ۲۸ درصدی مسافت کلی حمل سنگ خام از معدن به بازار و افزایش ۸٫۲ درصدی مسافت



صنعت معدن و تجارت (۱۳۸۴-۱۳۹۱). دفتر آمار و فرآوری داده‌ها.

[۹] آقاجانی، ح؛ ۱۳۷۵؛ "کاربرد برنامه‌ریزی خطی-مدل حمل و نقل-در بهینه‌سازی سیستم حمل و نقل". فصلنامه دانش مدیریت، شماره ۳۱ و ۳۲، ص ۱۱۴-۱۱۹.

[۱۰] لاپرت، ژ؛ ۱۳۹۲؛ "تحقیق در عملیات و بهینه‌سازی: گذشته، حال و آینده". فصلنامه آموزش مهندسی ایران، دوره ۵۸، ص ۱۵۸-۱۳۷.

[۱۱] سهرابی، ب؛ ۱۳۸۱؛ "تحقیق در عملیات و هوش مصنوعی: ابزارهای مناسبی برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی". فصلنامه دانش مدیریت، دوره ۵۷، ص ۱۱۶-۱۰۹.

[۱۲] اورعی، ک؛ احمدی، م؛ عاصی، ب؛ ۱۳۸۵؛ "مدل برنامه‌ریزی آرمانی فازی به منظور بهینه‌سازی کارایی سیستم حمل معادن روباز". فصلنامه امیرکبیر، دوره ۱۷، شماره ۶۴، ص ۶۹-۶۱.

[۱۳] ماکویی، ا؛ تیموری، ا؛ سرکیسیان، آ؛ ۱۳۸۹؛ "توسعه مدل ریاضی برنامه‌ریزی حمل و نقل در معادن روباز با هدف بهبود بهره‌وری". نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، دوره ۳، شماره ۲۱، ص ۹۲-۸۱.

[14] Mohtasham, M., H. Mirzaei Nasirabad, and A. Mahmoodi Markid, 2017. "Development of a goal programming model for optimization of truck allocation in open pit mines". *Journal of Mining and Environment*, 8(3): p. 359-371.

[15] Bajany, D., Xia, X., and Zhang, L. (2017). "A MILP Model for Truck-shovel Scheduling to Minimize Fuel Consumption". *Energy Procedia*, 105: 2739-2745.

[۱۶] حقیر چهره‌قانی، س؛ خدایاری، ع.؛ حسین، م؛ ۱۳۸۶؛ "بهینه‌سازی تخصیص و گسیل کامیون در سامانه ترابری معدن مس سرچشمه". دانشکده فنی دانشگاه تهران، دوره ۴۱، شماره ۳، ص ۲۹۶-۲۸۷.

[17] Chang, Y., Ren, H., and Wang, S. (2015). "Modelling and optimizing an open-pit truck scheduling problem". *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2015: 1-8.

[۱۸] آزادی، ن؛ ۱۳۹۳؛ "بهبود اندازه ناوگان حمل و نقل معدن مس سونگون با استفاده از روش شبیه‌سازی". مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۲، شماره ۳۹، ص ۱۱۰-۹۹.

[۱۹] افندی زاده، ش؛ شاه نظری، م؛ ۱۳۸۵؛ "بررسی و ارزیابی شرایط تعادلی عرضه و تقاضا برای حمل کالا از مبادی ورودی به مناطق مصرف". پژوهشنامه حمل و نقل، دوره ۳، شماره ۲، ص ۸۴-۷۵.

[۲۰] محمدزاده، ج؛ ۱۳۸۷؛ "مدل بهینه‌سازی حمل و نقل فرآورده‌های سوختی (بنزین) از پالایشگاه‌ها و مبادی ورودی کشور به انبارهای شرکت نفت". فصلنامه دانش مدیریت، دوره ۴۴، ص ۱۴۰-۱۲۵.

حمل هر تن محصول در طول زنجیره، موجب افزایش هزینه تمام شده تولید و کاهش رقابت‌پذیری محصول نهایی می‌شود. سایر مولفه‌ها از جمله قیمت و کیفیت محصول در تابع هدف لحاظ نشده است. محدودیت‌های مدل نیز بر مبنای توازن تامین خوراک مورد نیاز کارخانجات بر مبنای ارسال مواد از قطب‌های معدنی و نیز تامین نیازهای قطب‌های مصرف است. در راستای تکمیل این پژوهش موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

- ترکیب هزینه حمل و نقل با قیمت سنگ خام، اعمال قیمت سایه و نیز تفکیک نوع ورودی کارخانجات فرآوری - توسعه مدل در دیگر حوزه‌های مرتبط با صنایع معدنی از جمله معادن سنگ آهن و کارخانجات فولاد و یا بررسی حمل و نقل سنگ ترکیبی - استفاده از روش‌های هوش مصنوعی از جمله تکنیک الگوریتم ژنتیک برای حل مدل و یافتن مقادیر بهینه در حالات خاص

## ۸- مراجع

[1] Winkler, E. (2013). "Stone in architecture: properties, durability". Springer Science & Business Media, 1-31.

[۲] احمدی؛ ۱۳۹۵؛ "راهنمای راهکارهای بازاریابی مبتنی بر اثربخشی برای افزایش صادرات صنعت سنگ ساختمانی ایران". مهندسی منابع معدنی، دوره ۲، ص ۶۷-۵۳.

[3] Ghorbani, M. (2013). "The Position of Iranian Mining Industry in the World, in *The Economic Geology of Iran*". Springer, 297-332.

[4] Fouladgar, M. M., Yazdani-Chamzini, A., and Zavadskas, E. K. (2011). "An integrated model for prioritizing strategies of the iranian mining sector: Irano kasybos sektorius strategijų prioriteto nustatymo integruotas modelis". *Technological and Economic Development of Economy*, 17(3): 459-483.

[5] Tahernejad, M., Ataei, M., and Khalokakaie, R. (2012). "Selection of the best strategy for Iran's quarries: SWOT-FAHP method". *Journal of Mining and Environment*, 3(1): 1-13.

[۶] احمدی؛ ۲۰۱۵؛ "راهکارهای بهبود مراحل زنجیره تولید صنعت سنگ ساختمانی کشور ایران-مطالعه میدانی: صنعت سنگ تراورتن منطقه محلات". مهندسی منابع معدنی.

[۷] وزارت صنعت، معدن و تجارت؛ ۱۳۹۴؛ "صنعت معدن و تجارت به روایت آمار و اطلاعات گزارش شماره ۱۲ (عملکرد ۱۳۹۳)". دفتر آمار و فرآوری داده‌ها.

[۸] وزارت صنعت، معدن و تجارت؛ ۱۳۹۲؛ "عملکرد ۸ ساله بخش

میانی". فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی حمل و نقل.

- [26] Montiel, L., and Dimitrakopoulos, R. (2015). "Optimizing mining complexes with multiple processing and transportation alternatives: An uncertainty-based approach". *European Journal of Operational Research*, 247(1): 166-178.
- [27] Chen, M., and Wang, W. (1997). "A linear programming model for integrated steel production and distribution planning". *International Journal of Operations & Production Management*, 17(6): 592-610.

[۲۱] شفیق پور عمرانی، ب؛ رشیدی کمیجانی، ع؛ جمالی فیروزآبادی، ک؛ ۱۳۹۴؛ "بهینه سازی حمل و نقل گاز طبیعی مایع با در نظر گرفتن تنوع محصول". پژوهشگر دوره ۱۲، شماره ۳۷، ص ۴۵-۵۶.

[۲۲] کوپاهی، م؛ کیانی، غ؛ ۱۳۸۵؛ "تعیین برنامه بهینه حمل و نقل گندم در ایران با استفاده از روش برنامه ریزی خطی". مجله علوم کشاورزی ایران، دوره ۳۷، شماره ۲، ص ۱۳۵-۱۲۷.

[۲۳] فارسی مقدم، ا؛ ۱۳۹۱؛ "طراحی مدل بهینه فروش سیمان با استفاده از الگوریتم حمل و نقل (مطالعه: کارخانه سیمان سیستان)". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

[۲۴] اصغرپور، م؛ هاشمی، ذ؛ ۱۳۸۳؛ "طراحی مدل ریاضی شبکه حمل و نقل شرکت پست ج.ا.ا.". فصلنامه دانش مدیریت، دوره ۱۷، شماره ۳، ص ۲۹-۴۸.

[۲۵] رشیدی، ع؛ توکلی، ز؛ ۱۳۹۶؛ "یک مدل ریاضی برای بهینه سازی زنجیره تامین گاز مایع با در نظر گرفتن نفتکش های

<sup>۱</sup> Gams software

<sup>۲</sup> Lingo

<sup>۳</sup> Lindo

Archive of SID