نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

دوره سوم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۲۹ تا ۴۶
Vol. 3, No. 1, Spring 2018, pp. 29-46

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

رضا شکورشهابی[1*]، اشکان قاسمی دولت آبادی[2]، محسن گلیجانی[3]

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

(دریافت ۱۳۹۶/۱۲/۲۴، پذیرش ۱۳۹۷/۰۳/۰۳)

چکیده

اصولا در زنجیره صنعت سنگ تزیینی، 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 توام 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 هرتن 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 تزیینی، برنامه‌ریزی خطی، زنجیره تولید سنگ، کمینه‌سازی انتقال مواد، نرم‌افزار Gams.

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: shahabi@eng.ikiu.ac.ir

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 فعالیت های 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 هزینه های حمل و در نهایت قیمت تمام شده محصول می‌شود.

سنگ‌های تزیینی 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 می روند[۱]. زنجیره سنگ تزیینی به عنوان یکی از بزرگترین صنایع معدنی کشور شامل سه بخش اصلی معادن سنگ تزیینی، کارخانجات فرآوری و بازار مصرف است. ذخایر قطعی سنگ تزیینی کشور بیش از ۲٫۴ میلیارد تن برآورد شده است. این نقطه قوت به همراه مزیت ظرفیت بالای بخش فرآوری سنگ تزیینی در کشور، در صورت بهره‌برداری از سایر نقاط قوت و فرصت‌های کشور، موجبات تولید رقابت‌پذیر محصولات مختلف صنعت سنگ تزیینی را فراهم می‌کند[۴-۲]. بررسی مطالعات قبلی در صنعت سنگ ایران و مزیت‌های موجود در ذخایر سنگ تزیینی ایران از جمله تنوع و ذخایر بالای کشور معرف تاثیر بالای ارتقای زیرساخت‌های حمل و نقل در بهبود رقابت‌پذیری محصولات صنعت سنگ ایران است.[۶،۵،۲]

معادن سنگ تزیینی عمدتا در چند ناحیه اصلی کشور فعال‌اند. استخراج در این گونه معادن کاملا 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 عمدتا شهرهای پرجمعیت کشور است شکل گرفته است. این کارخانجات عمدتا 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 تزیینی، 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 توام انتقال مواد خام از معادن سنگ تزیینی 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 تزیینی به عنوان تامین‌کنندگان اصلی سنگ کوپ برای خوراک کارخانجات فرآوری سنگ تزیینی 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

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.

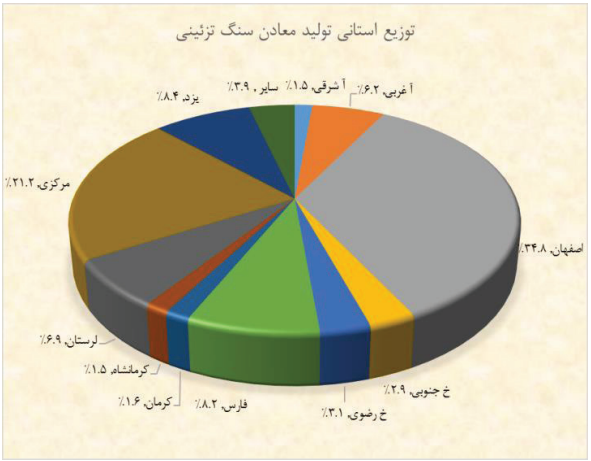
۲- بررسی و تحلیل صنعت سنگ ایران

انواع سنگ‌های تزیینی 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 تزیینی معادل ۱۶۳۶ معدن و تعداد معادن فعال کشور بر اساس آمار سال ۱۳۹۳ مطابق جدول ۱ برابر با ۱۱۶۳ معدن با تولید ۱۲٫۶ میلیون تن سنگ خام و اشتغال نزدیک به ۲۹ هزار نفر است. از نظر پراکندگی جغرافیایی ذخایر سنگ‌های تزیینی 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 تزیینی 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 تزیینی 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].

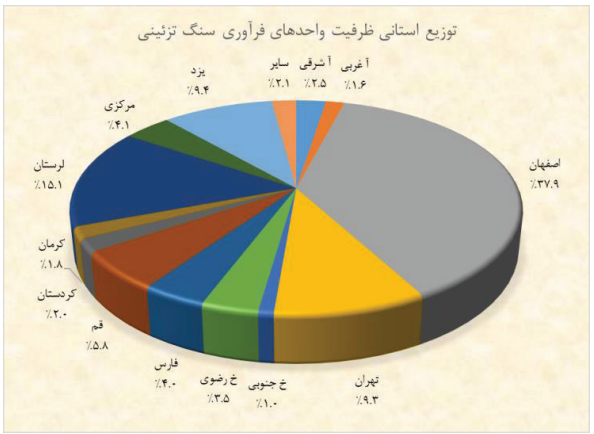
حسب بررسی آمار تجارت خارجی سنگ تزیینی خام و کار شده، واردات سنگ خام و فرآوری شده و صادرات سنگ فرآوری در مقایسه با تولید داخل ناچیز بوده و صادرات سنگ خام از مبدا بندرعباس و عمدتا به مقصد چین انجام شده است که از نظر نوع سنگ، تقریبا تمامی سنگ وارد شده به کشور نرم‌بر و در بخش صادرات نیز حدود ۶۰ هزار تن سنگ گرانیت به صورت خام صادر شده است (جدول ۲)[۸،۷].

جدول ۱: وضعیت معادن سنگ ساختمانی در کشور

	مرمر	مرمریت	تراورتن	گرانیت	مجموع
تعداد معادن فعال	۱۸۲	۴۵۵	۲۸۱	۲۴۵	۱٫۱۶۳
اشتغال	۷۶۸۰	۹۱۷۲	۳٫۷۴۸	۸٫۲۳۰	۲۸٫۸۳۰
تولید (هزار تن)	۲۰۰	۴٫۲۰۰	۷٫۱۲۰	۱٫۱۳۳	۱۲٫۶۵۳



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



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

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

سال	صادرات (هزار تن)		واردات (هزارتن)	
	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

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 کارآیی 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 [۱۱-۹]. 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 مورد بررسی قرار می‌گیرد. حیطه 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 کامیون ها[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 [۱۷،۱۶] 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 بهینه حمل کالاهای وارداتی از مبادی ورودی به مراکز مصرف با هدف کمینه کردن کل هزینه‌های حمل و نقل ارایه 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

مصرف[۲۲]

- الگوی ریاضی بهینه فروش سیمان سیستان به کمک الگوریتم حمل و نقل مرکب با لحاظ نمودن کوتاه ترین 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].

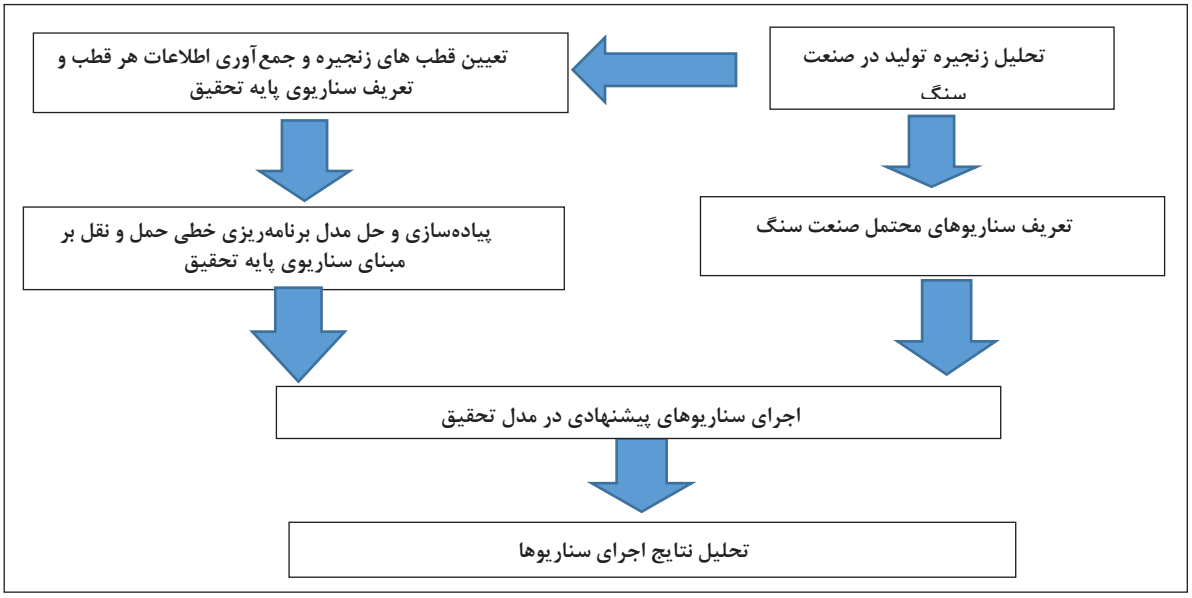
- بهینه‌سازی زنجیره تولید و فرآوری و توزیع چند شیوه‌ای محصولات معدنی در حالت عدم قطعیت[۲۶]

- ارایه 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 زمینه تعیین حمل و نقل بهینه در صنعت سنگ انجام نشده است. در این تحقیق از نرم‌افزار گمز[1] 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 ارایه 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 ارایه شده است. در ابتدا پس از تحلیل زنجیره صنعت سنگ، برای هر یک از بخش‌های معدن، فرآوری سنگ تزیینی و بازار



شکل ۳: فرآیند تحقیق

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 معادن 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 عمدتا شهرهای بزرگ است، محاسبه می‌شود. تابع هدف مینیمم‌سازی توام 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 صرفا 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 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 فرآوری‌شده 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 تزیینی 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 تزیینی 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 تزیینی 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 تزیینی استان، مرکز هر قطب معدنی تعیین شد. به عنوان مثال استان مرکزی به عنوان یکی از استان‌ها با ظرفیت تولید بالا در سنگ‌های تزیینی شناخته می‌شود و بیشترین تمرکز معادن سنگ تزیینی در منطقه محلات قرار دارد و معادن استان قم در مجاورت استان مرکزی

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_1	آذربایجان شرقی	آذرشهر	آذربایجان شرقی، اردبیل و زنجان	۳۳۶٫۷۷۱
M_2	آذربایجان غربی	خوی	آذربایجان غربی و کردستان	۸۹۰٫۲۵۳
M_3	اصفهان	انارک	اصفهان، سمنان، چهارمحال و بختیاری	۴۴۹۴٫۴۲۰
M_4	کرمان	سیرجان	کرمان و هرمزگان	۲۲۶٫۲۶۷
M_5	خراسان رضوی	بجستان	خراسان‌رضوی و شمالی	۴۰۲٫۵۹۰
M_6	خراسان جنوبی	نهبندان	خراسان‌جنوبی، سیستان و بلوچستان	۳۹۶٫۲۰۵
M_7	مرکزی	محلات	مرکزی، قم، قزوین و همدان	۲۷۵۲٫۶۰۰
M_8	لرستان	دورود	لرستان، کرمانشاه و خوزستان	۱۰۶۴٫۲۰۰
M_9	فارس	صفا شهر	فارس	۱۰۳۱٫۴۲۵
M_{10}	یزد	بافق	یزد	۱۰۵۸٫۳۴۰
مجموع				۱۲۶۵۳٫۰۷۱

جدول ۴: مشخصات قطب‌های فرآوری سنگ تزیینی

نماد	نام قطب فرآوری	مرکز قطب	نام استانهای تحت پوشش قطب	ظرفیت فرآوری(هزارتن)
F_1	آذربایجان شرقی	تبریز	آذربایجان‌شرقی، آذربایجان‌غربی، اردبیل، زنجان	۵۲۰٫۵۰
F_2	تهران	حسن‌آباد	تهران، قم، سمنان	۱۶۵۶٫۶۷
F_3	اصفهان	نجف‌آباد	اصفهان	۴۱۶۰٫۹۷
F_4	کرمان	کرمان	کرمان، سیستان و بلوچستان	۲۱۷٫۵۶
F_5	خراسان‌رضوی	مشهد	خراسان‌های رضوی، شمالی و جنوبی	۴۹۶٫۶۹
F_6	هرمزگان	بندرعباس	هرمزگان	۴۵
F_7	مرکزی	تیمور	مرکزی، قزوین،کردستان	۶۶۱٫۱۴
F_8	لرستان	خرم‌آباد	لرستان، کرمانشاه، خوزستان	۱۷۲۷٫۶۸
F_9	فارس	صفاشهر	فارس	۴۲۹٫۱۷
F_{10}	یزد	یزد	یزد	۱۳۰۰
مجموع				۱۰۹۳۹٫۱

به میزان تولید استان مرکزی که قطب آن محلات 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 تزیینی 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.

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 تزیینی 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

تمام ظرفیت فرآوری سنگ تزیینی کشور مورد بررسی قرار گیرد. کارخانجات فرآوری سنگ ساختمانی به دو دسته نرم‌بر و سخت‌بر تقسیم می‌شوند و انواع سنگ‌های ساختمانی در دو دسته نرم‌بر شامل تراورتن، مرمر و مرمریت و سنگ‌های سخت‌بر از قبیل گرانیت جای می‌گیرند. اگرچه واحدهای سخت‌بر قادر به بریدن سنگ‌های نرم‌اند ولی واحدهای نرم‌بر توانایی بریدن سنگ‌های سخت را به لحاظ تجهیزاتی ندارند. برای یکسان‌سازی 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 نرم‌بر بطور متوسط ۸ متر مربع پلاک سنگ ساختمانی و از هر تن سنگ سخت‌بر 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 می‌شود.

۴-۱-۳- شناسایی و تحلیل قطب‌های مصرف

آخرین بخش زنجیره صنعت سنگ، بازار مصرف است، سنگ تزیینی فرآوری شده به صورت اسلب تحویل مصرف‌کننده نهایی یا فروشنده می‌شود و تغییرات جزیی در ابعاد سنگ انجام می‌گیرد، بنابراین محل مصرف نهایی با محل تحویل کالا ممکن است تفاوت جزیی 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. ضمنا از انتخاب شهرهایی که فاصله کمتر از ۲۰۰ کیلومتر با یکدیگر داشته‌اند اجتناب شده است. بدین‌گونه 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 افزاینده 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. ضمنا محاسبات تبدیل

جدول ۵: برآورد سرانه مصرف در قطب‌های کشور

نام قطب مصرف	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}
	آذربایجان شرقی	تهران	اصفهان	کرمان	خراسان رضوی	هرمزگان	خوزستان	کرمانشاه	فارس	گیلان
برآورد سرانه مصرف (مترمربع بر نفر)	۱٫۱	۱٫۴	۱٫۲	۰٫۹	۱٫۱	۱	۱٫۱	۰٫۹	۱٫۱	۱٫۱

جدول ۶: مشخصات قطب‌های مصرف سنگ تزیینی

نماد قطب	نام قطب مصرف	مرکز قطب	استان‌های تحت پوشش قطب	جمعیت قطب	مصرف کل
D_1	آذربایجان‌شرقی	تبریز	آشرقی، آ.غربی، اردبیل، زنجان	۹٫۰۷	۱۲۴۷٫۰۵
D_2	تهران	تهران	تهران، البرز، قزوین، قم، سمنان	۱۷٫۵۸	۲۹۶۶٫۱۰
D_3	اصفهان	نجف آباد	اصفهان، یزد، چهارمحال و بختیاری، مرکزی	۸٫۲۶	۱۲۳۹٫۴۴
D_4	کرمان	کرمان	کرمان، سیستان و بلوچستان	۵٫۴۷	۶۱۵٫۷۵
D_5	خراسان رضوی	مشهد	خراسان‌رضوی، شمالی و جنوبی، گلستان	۹٫۳۰	۱۲۷۸٫۹۸
D_6	هرمزگان	بندرعباس	هرمزگان و پایانه صادرات	۱٫۵۸	۲۳۷٫۷۷
D_7	خوزستان	اهواز	خوزستان، لرستان	۶٫۲۹	۸۶۴٫۳۲
D_8	کرمانشاه	کرمانشاه	کرمانشاه، کردستان، همدان، ایلام	۵٫۷۵	۶۴۷٫۴۱
D_9	فارس	شیراز	فارس، کهگیلویه و بویراحمد، بوشهر	۶٫۲۹	۸۶۴٫۶۳
D_{10}	گیلان	رشت	گیلان، مازندران	۵٫۵۵	۷۶۳٫۷۹
مجموع				۷۵٫۱۵	۱۰۷۲۵٫۲۴

مقادیر مترمکعب به تن متریک، مشابه بخش فرآوری است.

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 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

جدول ۷: فاصله بین قطب‌های معدنی و قطب‌های فرآوری

فرآوری / معدن		F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}
		آذربایجان شرقی	تهران	اصفهان	کرمان	خراسان رضوی	هرمزگان	مرکزی	لرستان	فارس	یزد
M_1	آذربایجان شرقی	۶۱	۷۲۰	۱۱۳۴	۱۸۳۹	۱۵۷۵	۱۹۰۸	۸۳۱	۶۹۴	۱۳۱۳	۱۲۹۲
M_2	آذربایجان غربی	۱۶۶	۸۳۳	۱۰۸۰	۲۱۲۶	۱۶۸۱	۱۹۶۴	۹۱۱	۱۰۰۷	۱۲۴۷	۱۳۰۷
M_3	اصفهان	۱۱۰۰	۵۲۵	۲۶۵	۴۹۸	۹۸۰	۸۴۰	۴۴۴	۴۹۹	۵۲۰	۸۰
M_4	کرمان	۱۵۴۵	۹۸۷	۶۹۸	۱۸۹	۱۰۹۵	۳۰۸	۱۰۶۳	۱۰۵۴	۳۰۰	۴۰۵
M_5	خراسان رضوی	۱۵۰۴	۹۱۳	۹۱۵	۷۷۸	۳۰۰	۱۶۵۰	۱۰۲۷	۱۴۲۰	۹۰۴	۶۵۵
M_6	خراسان جنوبی	۱۸۹۲	۱۳۷۴	۱۰۹۸	۵۵۰	۶۸۲	۸۷۸	۱۲۶۰	۱۴۶۷	۱۰۷۰	۸۲۱
M_7	مرکزی	۹۴۱	۲۳۸	۲۲۱	۱۰۴۶	۱۰۸۸	۱۱۴۹	۶۰	۲۵۳	۵۳۰	۴۸۷
M_8	لرستان	۷۹۲	۳۶۷	۲۸۵	۱۱۶۲	۱۲۱۴	۱۳۲۴	۱۸۹	۸۵	۶۰۲	۶۱۹
M_9	فارس	۱۴۲۵	۷۸۲	۳۲۹	۶۸۰	۱۳۰۲	۷۴۷	۷۰۱	۱۱۲۰	۷۰	۳۸۱
M_{10}	یزد	۱۲۶۳	۷۰۷	۴۷۱	۴۲۵	۹۸۹	۷۴۵	۶۱۹	۸۲۷	۳۹۰	۱۲۵

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

مصرف / فرآوری		F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}
		آذربایجان شرقی	تهران	اصفهان	کرمان	خراسان رضوی	هرمزگان	مرکزی	لرستان	فارس	یزد
D_1	آذربایجان شرقی	۵۵	۶۹۰	۹۳۵	۱۵۱۵	۱۵۲۰	۱۸۱۰	۷۵۰	۸۰۰	۱۲۹۰	۱۱۴۵
D_2	تهران	۶۳۰	۶۰	۴۷۰	۹۹۰	۸۹۰	۱۳۲۰	۲۸۰	۴۹۰	۷۵۰	۶۳۰
D_3	اصفهان	۹۰۵	۴۰۰	۶۵	۷۰۰	۱۱۶۰	۹۸۰	۲۱۰	۳۸۰	۳۰۰	۳۲۵
D_4	کرمان	۱۵۱۵	۹۳۰	۷۲۵	۷۰	۹۱۰	۴۹۰	۱۰۰۰	۱۰۷۰	۶۶۰	۳۶۵
D_5	خراسان‌رضوی	۱۵۲۰	۸۹۰	۱۱۶۰	۹۱۰	۸۰	۱۴۰۰	۱۱۰۰	۱۳۰۰	۱۲۴۵	۹۲۰
D_6	هرمزگان	۱۸۱۰	۱۲۷۰	۱۰۰۰	۴۹۰	۱۴۰۰	۶۵	۱۳۰۰	۱۳۰۰	۷۰۰	۶۶۰
D_7	خوزستان	۱۱۳۰	۷۸۰	۵۵۰	۱۰۹۰	۱۶۳۰	۱۱۴۰	۶۰۰	۳۴۰	۶۴۰	۸۵۰
D_8	کرمانشاه	۷۲۰	۵۵۰	۶۰۰	۱۲۹۰	۱۴۳۰	۱۶۲۰	۳۴۰	۲۰۰	۹۸۰	۹۳۰
D_9	فارس	۱۳۹۰	۷۹۰	۴۳۰	۵۶۰	۱۳۵۰	۶۰۰	۶۹۰	۸۴۰	۱۰۰	۴۵۰
D_{10}	گیلان	۵۰۰	۳۸۰	۴۸۰	۱۳۱۵	۱۲۲۵	۱۵۵۰	۵۰۰	۶۵۰	۱۰۵۰	۹۵۰

حمل در سطح استان محاسبه شده است.

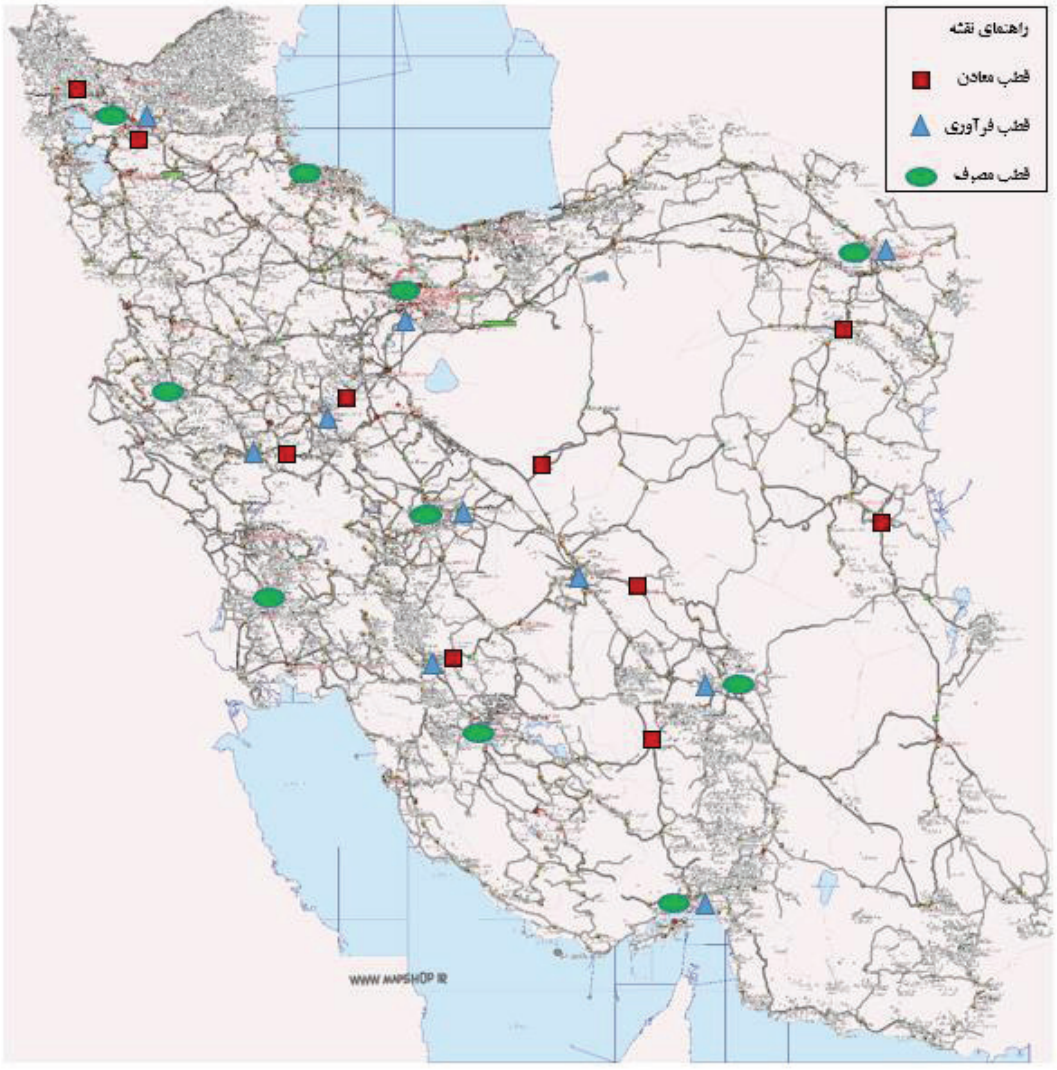
- به دلیل گرانتر بودن حمل هر تن سنگ بریده شده نسبت هر تن کوپ، در محاسبات نهایی، افزایش هزینه حمل به صورت یک ضریب بالاسری در جدول فواصل قطب فرآوری به مصرف اعمال می‌شود.

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

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

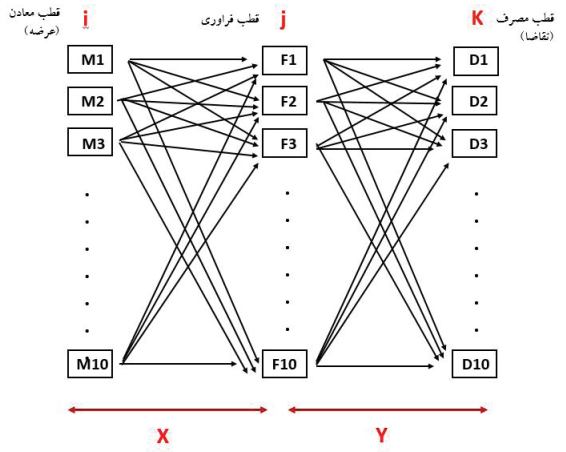
برای پیاده‌سازی مدل برنامه‌ریزی حمل و نقل مواد و محصولات در زنجیره صنعت سنگ، سه حوزه مجزای معادن، کارخانجات فرآوری و بازار مصرف نهایی تشکیل و هر حوزه بر اساس موقعیت مکانی و ظرفیت به ده قطب اصلی تقسیم شد. برای تحلیل مساله از مدل برنامه‌ریزی خطی استفاده شد و پس از تشکیل ماتریس فواصل حمل و نقل جاده‌ای بین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

تابع هدف خطی مینیمم‌سازی توام تناژ حمل مواد اولیه از قطب‌های معدنی به قطب‌های فرآوری و نیز مینیمم انتقال 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



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

ظرفیتی کارخانجات و معادن تعریف می‌شود. برای این مدل مطابق شکل ۵، قطب‌های معادن 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 معادن 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:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} X_{ij} \times C_{ij} + \sum_{j=1}^{M} \sum_{k=1}^{T} Y_{jk} \times E_{ij} \quad X_{ij}, Y_{jk} \geq 0 \qquad (۱)$$

که در آن:

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

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

جداول فواصل حمل بین قطب‌ها شامل C_{ij} و E_{jk} 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.

$$\sum_{j=1}^{M} X_{ij} \leq Cap_i \quad i = 1,2,\dots,N \quad j = 1,2,\dots,M \qquad (۲)$$

محدودیت دوم: میزان تناژ انتقال‌یافته 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.

$$\sum_{i=1}^{N} X_{ij} \leq V_j \quad j = 1,2,\dots,M \qquad (۳)$$

محدودیت سوم: میزان تناژ انتقال‌یافته 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.

$$\sum_{j=1}^{M} Y_{jk} \geq D_k \quad k = 1,2,\dots,T \qquad (۴)$$

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.

$$\sum_{i=1}^{N} X_{ij} \geq \sum_{k=1}^{T} Y_{jk} \qquad (۵)$$

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[۲] و لیندو[۳]، 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 ۱۰×۱۰ شامل(C_{ij} و E_{jk}) 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 هر تن کوپ، 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 خراسان‌جنوبی 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

تناژ انتقال سنگ خام از معدن به کارخانجات (هزار تن)		نسبت بهره‌برداری از ظرفیت تولید قطب معدنی (درصد)	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}
			آذر- شرقی	تهران	اصفهان	کرمان	خ- رضوی	هرمزگان	مرکزی	لرستان	فارس	یزد
M_1	آ- شرقی	۱۰۰	۳۳۷									
M_2	آ- غربی	۲۰٫۶	۱۸۴									
M_3	اصفهان	۱۰۰			۴۱۶۱					۱۷		۳۱۷
M_4	کرمان	۱۰۰				۱۸۱		۴۵				
M_5	خ-	۱۰۰					۴۰۳					
M_6	خ-	۲۳٫۸					۹۴					
M_7	مرکزی	۱۰۰		۱۶۵۷					۶۶۱	۴۳۵		
M_8	لرستان	۱۰۰								۱۰۶۴		
M_9	فارس	۴۱٫۶									۴۲۹	
M_{10}	یزد	۷۰				۳۶						۷۰۶

خود را دارند. استان خراسان‌جنوبی 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، کاملا 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 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 آذربایجان‌غربی و خراسان‌جنوبی شرایط

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

تناژ انتقال بلوک فرآوری شده از کارخانجات به بازار مصرف (هزار تن)		D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}
		آ- شرقی	تهران	اصفهان	کرمان	خ-رضوی	بندر عباس	خوزستان	کرمانشاه	فارس	گیلان
F_1	آ- شرقی	۵۲۱									
F_2	تهران		۱۶۵۷								
F_3	اصفهان	۷۲۲	۶۴۸	۱۲۳۹		۳۵۲				۴۳۵	۷۶۴
F_4	کرمان				۲۱۷						
F_5	خ- رضوی					۴۹۷					
F_6	هرمزگان						۴۵				
F_7	مرکزی		۶۶۱								
F_8	لرستان	۴						۸۶۴	۶۴۷		
F_9	فارس									۴۲۹	
F_{10}	یزد				۳۹۹	۴۳۱	۱۹۳				

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 (بافق)، 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 جزیی در برخی قطب‌ها از جمله اصفهان و مرکزی بهبود می‌یابد.

– در سناریوی سوم، تاثیر افزایش ۲۰ درصدی توام تقاضا 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 خراسان‌جنوبی و کرمان کامل و نسبت بهره‌برداری ظرفیت فرآوری در همه قطب‌ها تقریبا 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

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

	سناریوی ۱	سناریوی ۲	سناریوی ۳
تولید سنگ تزیینی معادن (هزار تن)	۱۲٫۶۵۳	۱۵٫۱۸۴	۱۳٫۰۲۲
تناژ حمل شده برای فرآوری	۱۰٫۷۲۵	۱۰٫۷۲۵	۱۲٫۸۷۰
نسبت تناژ حمل شده به تولیدی (درصد)	۸۴٫۸	۷۰٫۶	۹۸٫۸

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

نسبت بهره‌برداری قطب معدنی (درصد)		سناریوی ۱	سناریوی ۲	سناریوی ۳
M_1	آذربایجان	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
M_2	آذربایجان‌غربی	۲۰٫۶	۱۰٫۹	۱۰۰
M_3	اصفهان	۱۰۰	۸۲٫۳	۱۰۰
M_4	کرمان	۱۰۰	۹۶٫۴	۸۸٫۴
M_5	خراسان‌رضوی	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
M_6	خراسان‌جنوبی	۲۳٫۸	۲٫۹	۷۹٫۱
M_7	مرکزی	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
M_8	لرستان	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
M_9	فارس	۴۱٫۶	۳۴٫۷	۱۰۰
M_{10}	یزد	۷۰	۰	۱۰۰

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

نسبت بهره‌برداری قطب فرآوری (درصد)		سناریوی ۱	سناریوی ۲	سناریوی ۳
F_1	آذربایجان	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
F_2	تهران	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
F_3	اصفهان	۱۰۰	۹۴٫۸	۹۸٫۸
F_4	کرمان	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
F_5	خراسان	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
F_6	بندر عباس	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
F_7	مرکزی	۸۷٫۶	۱۰۰	۱۰۰
F_8	لرستان	۱۰۰	۱۰۰	۹۰٫۵
F_9	فارس	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
F_{10}	یزد	۹۸	۱۰۰	۱۰۰

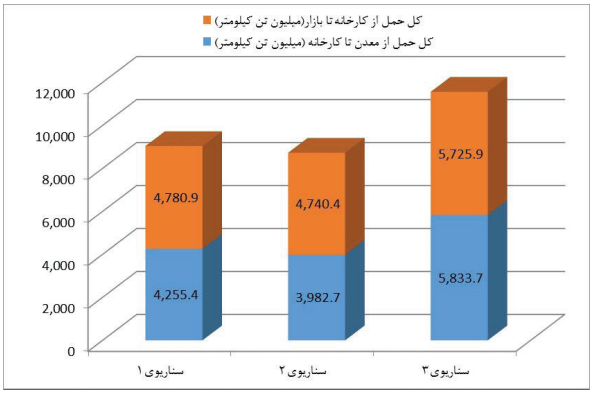
کارخانه تا مرکز قطب مصرف به تفکیک هر سناریو طبق جدول ۱۴ و شکل‌های ۶ و ۷ نتایج زیر به دست می‌آید:

- 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 طوری‌که 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.

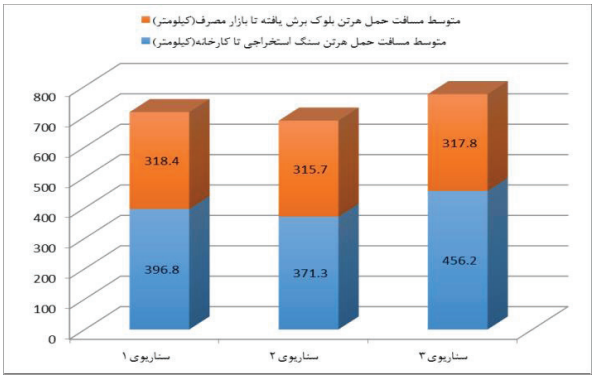
- پیاده‌سازی سناریوی سوم، اگرچه موجب بهبود نسبت بهره‌برداری از ظرفیت قطب‌های معدن می‌شود، اما با افزایش ۲۸ درصدی مسافت کلی حمل سنگ خام از معدن به کارخانه و افزایش ۸٫۲ درصدی مسافت مورد نیاز انتقال هر تن محصول نهایی تولید (ستون آخر جدول ۱۴ و شکل ۷) ممکن است موجب افزایش هزینه انتقال مواد اولیه و واسطه و کاهش رقابت‌پذیری محصول نهایی شود.

۶- بحث

با توجه به ثابت بودن موقعیت معادن سنگ تزیینی 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



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



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

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

	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 هرتن سنگ استخراجی تا کارخانه (کیلومتر)	متوسط مسافت حمل هرتن بلوک برش یافته تا بازار مصرف (کیلومتر)	متوسط مسافت حمل از معدن تا بازار (کیلومتر)
سناریوی پایه۱	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 آذربایجان‌غربی و خراسان‌جنوبی 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 جزیی 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 آذربایجان‌غربی و خراسان‌جنوبی 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 هرتن 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 تقریبا 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

حمل هر تن محصول در طول زنجیره، موجب افزایش هزینه تمام شده تولید و کاهش رقابت‌پذیری محصول نهایی می‌شود. سایر مولفه ها 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 سنگ 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؛ **"ارائه 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 Iranian3. 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 sektoriaus 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 داده ها.

[۸] وزارت صنعت، معدن و تجارت؛ ۱۳۹۲؛ **"عملکرد ۸ ساله بخش صنعت معدن و تجارت(۱۳۸۴-۱۳۹۱)"**. دفتر آمار و فرآوری داده‌ها.

[۹] آقاجانی، ح.؛ ۱۳۷۵؛ **"کاربرد برنامه ریزی خطی-مدل حمل و نقل-در بهینه سازی سیستم حمل ونقل"**. فصلنامه دانش مدیریت، شماره ۳۱ و ۳۲، ص ۱۱۹-۱۱۴.

[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 بهینه سازی ترکیبی"**. فصلنامه دانش مدیریت، دوره ۵۷، ص ۱۱۶-۱۰۹.

[۱۲] اورعی،ک.؛ احمدی، م.؛ عاصی، ب.؛ ۱۳۸۵؛ **"مدل برنامه ریزی آرمانی فازی به منظور بهینه سازی کارآیی سیستم حمل معادن روباز"**. فصلنامه امیرکبیر، دوره ۱۷، شماره ۶۴، ص۶۹-۶۱.

[۱۳] ماکویی، ا.؛ تیموری، ا.؛ سرکیسیان، آ.؛ ۱۳۸۹؛ **"توسعه مدل ریاضی برنامه ریزی حمل و نقل در معادن روباز با هدف بهبود بهره وری"**. نشریه بین المللی 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 چهرقانی، س.؛ خدایاری،ع. ا.؛ حسینی، م.؛ ۱۳۸۶؛ **"بهینه سازی 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، ص۱۱۰-۹۹.

[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 بهینه حمل و نقل فرآورده های سوختی (بنزین) از پالایشگاه ها و مبادی ورودی کشور به انبارهای شرکت نفت"**. فصلنامه دانش مدیریت، دوره ۴۴، ص ۱۴۰-۱۲۵.

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

[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] فارسی‌مقدم، 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 درنظر گرفتن نفتکش های 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.

---

[۱] Gams software

[۲] Lingo

[۳] Lindo