

## بهینه‌سازی ناوگان بارگیری و باربری معادن روباز با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی (مطالعه موردی معدن سونگون)

امیر قهرمانی<sup>۱</sup>، مسعود منجزی<sup>۲\*</sup>، محمد قبادی‌سامانی<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۱۱	در معادن روباز انتخاب بارکننده و باربر، تخصیص و گسیل کامیون‌ها یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین فرآیندهای عملیاتی است که بهینه‌سازی آن صرفه‌جویی قابل توجهی را سبب می‌شود. برای تحلیل این‌گونه مسائل، شبیه‌سازی ابزار قدرتمندی است. یکی از موضوعات اساسی در حوزه مدل‌های شبیه‌سازی ارائه رویکرد بهینه‌سازی هست. روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی عمدتاً تک هدفه هستند. در این تحقیق تلاش شده از این روش‌ها به صورت چند هدفه استفاده شود. اهداف مورد نظر کمینه کردن هزینه عملیاتی و بیشینه نمودن تولید است الگوریتم فرا ابتکاری که به این منظور انتخاب شده، چند هدفه توده ذرات (MOPSO) است. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار ARENA و بخش بهینه‌سازی از MATLAB بهره گرفته شده است. نتایج حاصل از اجرای روش پیشنهادی بر روی مدل ناوگان بارگیری و باربری معدن سونگون نشان می‌دهد که با اجرای سناریوهای به دست آمده تولید فعلی معدن را حداکثر می‌توان ۲/۵ برابر کرده و هزینه عملیاتی واحد تولید را حداکثر تا ۲۳ درصد کاهش داد.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۲۹	
<b>واژگان کلیدی:</b> بهینه‌سازی چند هدفه، شبیه‌سازی، MOPSO، معادن روباز، حمل و نقل.	

### ۱- مقدمه

وسیله اقتصادهای مقیاسی، (به عنوان مثال، با افزایش ظرفیت کامیون و شاول) به دست می‌آید. امروزه به نظر می‌رسد غول پیکری در صنعت معدن به حد خود رسیده و راهکارها برای کاهش هزینه‌های سیستم کامیون - شاول در برنامه‌ریزی حمل و نقل، افزایش بهره‌وری تجهیزات، و استراتژی گسیل مربوط می‌شود [۳]. از مهم‌ترین روش‌هایی که برای شناخت وضع موجود و بهبود عملکرد سیستم‌ها خصوصاً سیستم‌های تولیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد، شبیه‌سازی است. یکی از موضوعات اساسی در این حوزه، ارائه رویکرد بهینه‌سازی است. درباره این موضوع تحقیقات اندکی صورت گرفته است. از این‌رو در این تحقیق سعی شده است تا ساختاری جهت بهینه‌سازی چند هدفه مدل شبیه‌سازی شده حمل و نقل معدن ارائه شود. اهداف در نظر گرفته شده بیشینه‌سازی تولید و کمینه‌سازی

ناوگان حمل و نقل معادن روباز ۵۰ تا ۶۰ درصد کل هزینه‌های معدنکاری را به خود اختصاص می‌دهند. با کاهش عیار مواد معدنی و عمیق‌تر شدن معادن و در نتیجه آن افزایش فاصله حمل، ضرورت کاهش هزینه‌های حمل و نقل بیش از پیش احساس می‌شود [۱]. سیستم کامیون - شاول رایج‌ترین روش بارگیری و حمل مواد معدنی و باطله در معادن روباز هستند. این سیستم‌ها در حال حاضر در مقایسه با سنگ شکنی داخل کاواک، حمل مواد با نوار نقاله و حمل و نقل ریلی به دلیل انعطاف‌پذیری، تحرک بالا و سرمایه‌گذاری‌های زیربنایی کم، مزیت‌هایی را دارند [۲]. عموماً دستگاه‌های کامیون - شاول، پر هزینه‌ترین واحد عملیاتی در فعالیت‌های معدن شناخته شده‌اند. در گذشته صرفه‌جویی در هزینه‌های حمل و نقل به‌طور عمده به

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: monjezi@modares.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس

۲. استاد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس

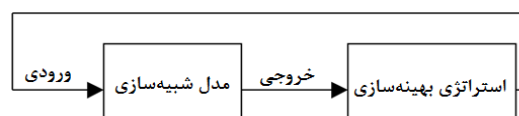
۳. دانشجوی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس

هزینه‌های عملیاتی حمل و نقل است.

با مطالعه پیشینه تحقیق مشاهده می‌شود که مقالات و پژوهش‌هایی در راستای تحلیل عملکرد سیستم حمل و نقل معادن به کمک شبیه‌سازی ارائه شده است، که در اکثر مطالعات انجام شده، با بررسی سناریوهای مختلف سعی در بهبود وضعیت عملکرد سیستم حمل و نقل شده است و یک رویکرد بهینه‌سازی مناسب برای دستیابی به مقادیر بهینه تجهیزات ارائه نشده است.

از سوی دیگر بستر مناسبی برای بهینه‌سازی چند هدفه مدل‌های شبیه‌سازی سیستم‌های معدنی در پیشینه تحقیق به چشم نمی‌خورد. به همین منظور در این پژوهش ضمن ارائه یک ساختار مناسب جهت بهینه‌سازی چند هدفه مدل شبیه‌سازی سیستم کامیون - شاول معدن، چارچوبی استاندارد جهت بهینه‌سازی چند هدفه مدل‌های شبیه‌سازی نیز ایجاد خواهد شد.

در این تحقیق به منظور مطالعه و تحلیل عملکرد سیستم حمل و نقل معادن از ابزار شبیه‌سازی استفاده شده است. از سوی دیگر چون تعداد کامیون تخصیص یافته به هر وسیله بارگیری باید به گونه‌ای باشد که ضمن تضمین میزان تولید، کمترین هزینه را داشته باشد. بایستی ساختاری جهت بهینه‌سازی مدل شبیه‌سازی طراحی شود. بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی، فرآیندی است که بهترین مقادیر متغیرهای مسئله را بر مبنای خروجی‌های یک مدل شبیه‌سازی جستجو می‌کند. فرآیند "بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی" یک فرآیند تکراری است، به طوری که ابتدا یک جمعیت اولیه توسط فرآیند "بهینه‌سازی" ایجاد شده و به عنوان داده‌های ورودی در "شبیه‌سازی" استفاده می‌شود. فرآیند شماتیک "بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی" در شکل (۱) قابل مشاهده است.



شکل ۱: فرآیند بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی

بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی در چندین حوزه کاربردی که ساخت یک مدل ریاضی از سیستم مورد مطالعه

امکان‌پذیر نیست، ارائه شده است [۴].

فیورونی<sup>۱</sup> و همکاران با تلفیق رویکرد بهینه‌سازی و شبیه‌سازی مدلی ارائه نمودند، به طوری که الگوریتم بهینه‌سازی، استراتژی تخصیص کامیون به شاول را برای آغاز مدل شبیه‌سازی فراهم می‌نماید. مدل شبیه‌سازی در نرم‌افزار Arena تهیه شد و از نرم‌افزار Visual Basic برای ارتباط میان نرم‌افزار بهینه‌سازی و شبیه‌سازی استفاده شد. نتایج حاصل از این مدل تلفیقی منجر به کاهش هزینه‌های کلی سیستم شاول- کامیون معدن گردید [۵].

رودریگو<sup>۲</sup> و همکاران چارچوبی را برای بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی تخصیص کامیون تحت محدودیت‌های پویا در معادن روباز ارائه نمودند. هدف بهینه‌سازی پیشینه کردن تولید کلی معدن بود. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار Arena و برای بخش بهینه‌سازی از نرم‌افزار LINGO استفاده شده است. نتیجه این تحقیق نشان داد که علاوه بر پیشینه کردن تولید می‌توان اطلاعاتی را در مورد عملکرد عملیاتی هر کدام از کامیون‌ها و همچنین بهره‌وری کل سیستم به دست آورد [۶]. کاستیلو<sup>۳</sup> و همکاران، یک برنامه کامپیوتری بر اساس زبان‌های برنامه‌نویسی SLAM II و FITPLUS برای شبیه‌سازی حمل و نقل معادن روباز ارائه نمودند [۷]. تمنگ<sup>۴</sup> در رساله خویش از مدل کامپیوتری جهت بهینه کردن گسیل انعطاف‌پذیر کامیون در معادن روباز استفاده کرد. وی با شبیه‌سازی سیستم و استفاده از داده‌های واقعی یک معدن روباز توانست راه حلی جهت کاهش زمان انتظار تجهیزات در سیستم ارائه دهد [۸]. چتین<sup>۵</sup>، در رساله دکترای خویش از شبیه‌سازی جهت مطالعه سیستم شاول - کامیون در معادن روباز استفاده نمود [۸]. بزرگ ابراهیمی طی رساله‌ای به مطالعه تأثیر اندازه تجهیزات بر شرایط اقتصادی معادن روباز پرداخت. وی از روش‌های شبیه‌سازی گسسته پیش آمد و روش‌های ریاضی برای مطالعه در این مورد استفاده نمود [۹]. آمل<sup>۶</sup> و همکارانش از یک شبیه‌سازی هوشمند به صورت متحرک بر اساس زمان واقعی سیستم کنترل، جهت هدایت انعطاف‌پذیر کامیون‌ها در سیستم حمل و نقل یک معدن روباز استفاده نمودند [۱۰]. آزادی و همکارانش از نرم‌افزار Arena در بهینه‌سازی ناوگان حمل و نقل معدن مس سونگون استفاده نمودند

<sup>۵</sup> ÇETIN

<sup>۶</sup> Amel

<sup>۱</sup> Fioroni

<sup>۲</sup> Rodrigo

<sup>۳</sup> Castillo

<sup>۴</sup> Temeng

## ۲- بهینه‌سازی چند هدفه

بهینه‌سازی چند هدفه ریشه در قرن نوزدهم با کار پارتو و ادوورث در زمینه اقتصاد دارد. بسیاری از بخش‌های صنعتی درگیر مسائل پیچیده و بزرگ بهینه‌سازی هستند. مسائل بهینه‌سازی به ندرت تک هدفه بوده و اکثراً چندین هدف برای کنترل کردن وجود دارد. برای مثال، در طراحی یک محصول، باید هزینه‌ها را حداقل، کمیت را حداکثر (برحسب واحد تولید، ماشین و ...) و تأثیرات محیطی را حداقل نمود. پیچیدگی مسائل بهینه‌سازی چند هدفه از نظر اندازه مسئله (تعداد هدف، اندازه فضای جستجو) روزبه‌روز در حال افزایش است و زمان جستجو برای حل این مسائل نیز باید منطقی باشد [۱۸]. هدف از حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه کمک به تصمیم‌گیرنده برای یافتن جواب‌های بهینه‌ای که ملاحظات او را در نظر گرفته، است. یکی از سؤالات اساسی در حل این‌گونه مسائل تعامل بین تصمیم‌گیرنده و الگوریتم‌های حل است. نقش تصمیم‌گیرنده این است که یکسری اطلاعات اضافی برای انتخاب جواب مورد علاقه فراهم کند. روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه به دو دسته اصلی الگوریتم‌های دقیق و الگوریتم‌های تقریبی تقسیم‌بندی می‌شوند. با استفاده از الگوریتم‌های دقیق می‌توان این تضمین را داد که جواب به‌دست‌آمده بهینه کلی است در الگوریتم‌های تقریبی، این تضمین وجود ندارد. هرچه فضای مسئله پیچیده‌تر شود، زمان حل مسئله توسط الگوریتم‌های دقیق بیشتر و امکان دستیابی به جواب بهینه کلی وجود نخواهد داشت. به همین منظور در این مسائل استفاده از الگوریتم‌های تقریبی می‌تواند مناسب باشد. در این الگوریتم‌ها اگرچه رسیدن به جواب بهینه کلی تضمین نمی‌شود، اما این قابلیت را دارند که در زمان کم، جواب خوبی را ارائه نمایند. روش‌های دقیق برای مسائل با اندازه کوچک مناسب می‌باشند [۱۹]. در این پژوهش یکی از روش‌های مبتنی بر غلبگی برای بهینه‌سازی چند هدفه مدل شبیه‌سازی سیستم حمل و نقل معدن استفاده شده است. در ادامه ابتدا مفاهیم اولیه این نوع الگوریتم‌ها تشریح شده و سپس به معرفی الگوریتم MOPSO که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته، پرداخته خواهد شد.

[۱۱]. کراس و ویلیامسان<sup>۱</sup> مزایای افزایش تعداد شاول‌ها بر روی عملکرد سیستم معدن را به کمک شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دادند. آنها عملکرد سیستم را در دو حالت دیسپاچینگ و غیر دیسپاچینگ مقایسه کردند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که تعداد کامیون‌های مورد نیاز در حالت دیسپاچینگ نسبت به حالت غیر دیسپاچینگ کمتر خواهد بود [۱۲]. بریک و چاترجی با استفاده از نرم‌افزار SIMULA یک مدل شبیه‌سازی برای سیستم شاول - کامیون تهیه کردند که در آن سه استراتژی مختلف تخصیص کامیون به شاول مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که با اتخاذ این استراتژی‌ها میزان تولید و بهره‌وری کامیون‌ها و شاول‌ها حدود ۳ الی ۴ درصد افزایش خواهد یافت [۱۳]. تو و هوکا<sup>۲</sup> مدل شبیه‌سازی با در نظر گرفتن استراتژی‌های مختلف تخصیص کامیون به شاول پیاده‌سازی نمودند؛ شبکه‌های متنوعی از مسیرهای حمل و نقل مورد بررسی قرار گرفت. از نرم‌افزار SLAM جهت طراحی مدل شبیه‌سازی استفاده گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که استراتژی‌های دیسپاچینگ منجر به صرفه‌جویی حداقل یک کامیون در هر شیفت خواهد شد [۱۴]. تان و رامانی<sup>۳</sup> یک مدل شبیه‌سازی در نرم‌افزار SIMAN با اطلاعات یک معدن فرضی تهیه کردند که در آن یک نقطه گسیل برای ارسال کامیون‌ها تعیین شده بود استراتژی‌های دیسپاچینگ بر روی مدل شبیه‌سازی اجرا شد و تأثیر آنها بر روی خروجی سیستم مورد بررسی قرار گرفت [۱۵]. سومیس<sup>۴</sup> و همکاران جهت برنامه‌ریزی تولید سیستم شاول - کامیون الگوریتمی ارائه کردند به طوری که مجموع انحراف مربعات زمان انتظار کامیون‌ها کمینه گردد. جهت آزمایش این الگوریتم، یک مدل شبیه‌سازی تهیه شد نتایج حاصله از شبیه‌سازی نشان داد که تولید سیستم به میزان ۳ درصد افزایش، و زمان انتظار کامیون‌ها ۱۲ درصد کاهش پیدا می‌کند [۱۶]. ستاروند و داوری، حمل و نقل معدن مس سونگون را با هدف مینیمم کردن زمان انتظار کامیون‌ها شبیه‌سازی کردند که این تحقیق منجر به کاهش ۷/۸ درصدی زمان انتظار کامیون‌ها نسبت به حالت تخصیص ثابت شد [۱۷].

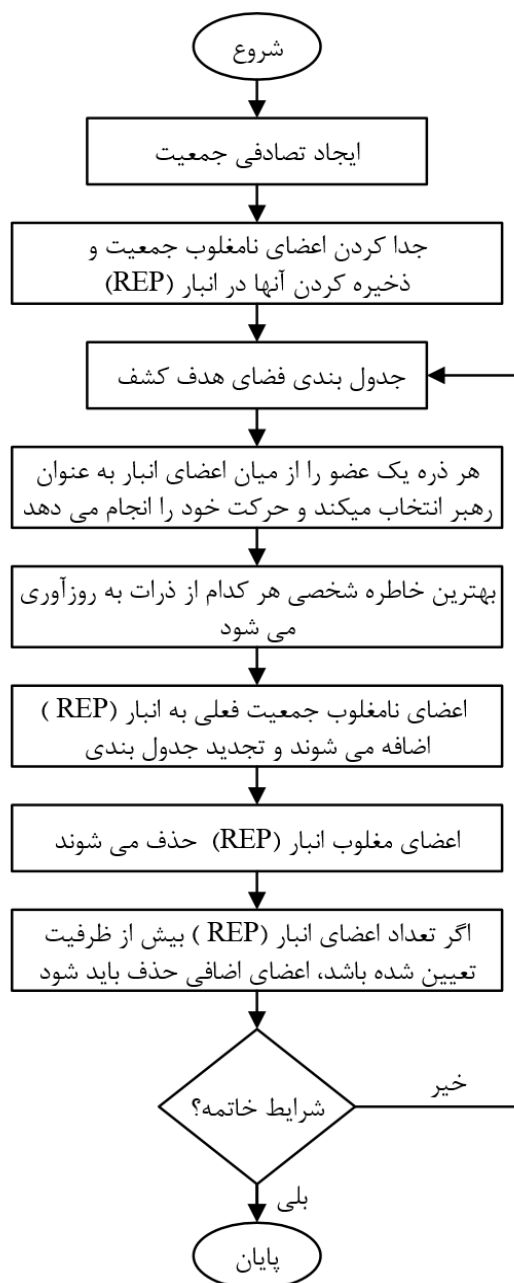
<sup>3</sup> Tan & Ramani

<sup>4</sup> Soumis

<sup>1</sup> Cross & Williamson

<sup>2</sup> Tu & Hucka

دو ویژگی اصلی الگوریتم‌های فرا ابتکاری، تشدید و پراکندگی است. ویژگی تشدید تمرکز بر روی جستجوی همسایگی دارد به طوری که از اطلاعات موجود در دورنمای محلی استفاده می‌کند، در حالی که ویژگی پراکندگی عمدتاً از فن‌های تصادفی استفاده می‌کند تا کلیه فضای جواب را مورد جستجو قرار دهد. از الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای حل مسائل با پیچیدگی محاسباتی بالا و ابعاد بزرگ در حوزه‌های مختلف با موفقیت به کار گرفته شده است [۲۱].



شکل ۳: فلوجارت الگوریتم MOPSO

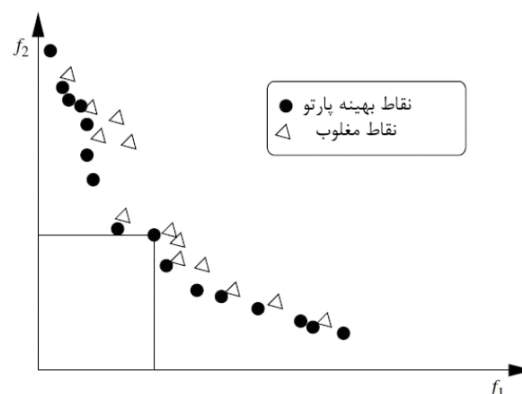
## ۱-۲- مفهوم غلبگی

در تعریف‌های زیر فرض بر این است که توابع هدف از نوع مینیمم هستند.

تعریف ۱: بردار تابع هدف  $u = (u_1, \dots, u_n)$  بر بردار تابع هدف  $v = (v_1, \dots, v_n)$  (با نماد  $u < v$  نمایش داده می‌شود) غلبه می‌کند اگر و تنها اگر هیچ یک از توابع هدف بردار  $v$  از تابع هدف متناظر در بردار  $u$  کوچک‌تر نبوده و حداقل یکی از توابع هدف بردار  $u$  اکیداً کوچک‌تر از تابع هدف متناظر در بردار  $v$  باشد:

$$\forall i \in \{1, \dots, n\} : u_i \leq v_i \ \& \ \exists i \in \{1, \dots, n\} : u_i < v_i \quad (1)$$

تعریف ۲: نقطه  $X^* \in S$ ، نقطه بهینه پارتو<sup>۱</sup> است اگر برای هر  $X \in S$ ، مقدار  $F(X)$  بر مقدار  $F(X^*)$  غلبه پیدا نکند به عبارت دیگر داشته باشیم:  $F(X) \not< F(X^*)$ ، [۲۰]. شکل (۲) مجموعه نقاط بهینه پارتو و نقاط مغلوب را در فضای توابع دو هدفه نمایش می‌دهد. در این مثال هر دو تابع هدف از نوع مینیمم هستند [۲۰].



شکل ۲: نمونه‌ای از مجموعه نقاط پارتو در یک مسئله بهینه‌سازی دو هدفه [۲۰]

عمده الگوریتم‌های چند هدفه مبتنی بر غلبگی، روش‌های ابتکاری هستند. این روش‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند: الگوریتم‌های خاص یک مسئله و الگوریتم‌های فرا ابتکاری که برای دسته زیادی از مسائل قابل کاربرد هستند. در دو دهه اخیر توجه زیادی به الگوریتم‌های مختلف فرا ابتکاری برای حل مسائل چند هدفه شده است الگوریتم‌های NPGA<sup>۲</sup> و MOPSO<sup>۳</sup> نمونه‌هایی از این روش‌ها محسوب می‌شوند [۲۰].

<sup>3</sup> Niched Pareto Genetic Algorithm

<sup>1</sup> Pareto

<sup>2</sup> Multi-Objective Particle Swarm Optimization

جدول ۱: روند بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی

شماره	مراحل
	اجرای نرم‌افزار MATLAB
۱	تعداد تکرارها = P
۲	شماره تکرار (t = 1)
۳	تولید جمعیت اولیه با اندازه N
	اجرای ماکروی VBA
۴	ذخیره اطلاعات جمعیت اولیه در Excel
	اجرای نرم‌افزار Arena
۵	دریافت پارامترهای اولیه شبیه‌سازی و متغیرهای ورودی
۶	شروع شبیه‌سازی برای ارزیابی جمعیت اولیه
۷	ذخیره اطلاعات توابع هدف هر کدام از اعضای جمعیت در Excel
	اجرای نرم‌افزار MATLAB
۸	جدا کردن اعضای نامغلوب جمعیت و ذخیره کردن آن در REP (انبار نامغلوب)
۹	رسم نمودار پارتو جمعیت REP (انبار نامغلوب)
۱۰	موقعیت جدید ذرات را به کمک سرعت آن‌ها پیدا کن
۱۱	انجام عملیات جهش روی جمعیت جدید
۱۲	ذخیره اطلاعات جمعیت به دست آمده در Excel
۱۳	شروع مجدد مدل شبیه‌سازی جهت ارزیابی جمعیت جدید
۱۴	ذخیره اطلاعات توابع هدف در Excel
۱۵	اجرای الگوریتم و ترکیب جمعیت REP (انبار نامغلوب) با جمعیت جدید
۱۶	جدا کردن اعضای نامغلوب جمعیت و ذخیره کردن آن در REP (انبار نامغلوب)
۱۷	رسم نمودار پارتو جمعیت REP (انبار نامغلوب)
۱۸	اگر $t=P$ باشد توقف الگوریتم و رفتن به مرحله ۲۰
۱۹	اگر $t=P$ نباشد، رفتن به مرحله ۱۰ و $t=t+1$
۲۰	چاپ جمعیت نهایی و رسم نمودار پارتو جمعیت REP (انبار نامغلوب)

استفاده به عنوان توابع هدف موردنیاز الگوریتم بهینه‌سازی توضیح داده می‌شود.

### ۳-۱- روند تحقیق

در ادامه ناوگان بارگیری و باربری معدن سونگون به عنوان مطالعه موردی شبیه‌سازی می‌شود. سیستم تخصیص فعلی در معدن، ثابت است. از همین رو سناریویی با سیاست گسیل انعطاف‌پذیر کامیون‌ها (مینیمم صف انتظار برای شاول به همراه مینیمم درجه اشباع در مسیر) تخصیص داده می‌شوند تا اثر آن روی میزان تولید و هزینه سیستم بررسی شود. در مرحله بعد تعداد بهینه کامیون ۳۰ و ۱۰۰

### ۲-۲- الگوریتم MOPSO

این الگوریتم در سال ۲۰۰۲ توسط کوئلو<sup>۱</sup> ارائه شده است. در این پژوهش از نوع بهبود یافته آن که در سال ۲۰۰۴ به چاپ رسیده استفاده شده است. فلوجارت الگوریتم MOPSO در شکل (۳) آورده شده است [۲۲].

### ۳- چارچوب بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی

بایستی چارچوبی برای ارتباط بین نرم‌افزار شبیه‌سازی و الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه تعریف شود. در جدول ۱ چگونگی تعیین ورودی‌های شبیه‌سازی (متغیرهای تصمیم) و همچنین گرفتن خروجی آن و

<sup>1</sup> Coello

مطالعه در معدن مس سونگون شامل سه دستگاه لودر در ایستگاه‌های بارگیری L2، L4 و L7، دو دستگاه شاول در ایستگاه‌های بارگیری L3 و L5، همچنین دو دستگاه بیل مکانیکی در ایستگاه‌های L1 و L6 هست که در جدول ۳ مشخصات آن‌ها را مشاهده می‌کنید. سیستم شامل دو نوع کامیون از نوع ۱۰۰ و ۳۰ تنی می‌باشد. تعداد آن‌ها به ترتیب هشت و بیست دستگاه می‌باشد.

جدول ۲: برنامه‌ریزی استخراج معدن مس سونگون

عنوان	مقادیر
ظرفیت خوراک سالانه کارخانه تغلیظ	۷ میلیون تن سنگ معدن
کنسانتره خشک مس	۱۵۰ هزار تن
رطوبت متوسط کنسانتره	۶٪
عیار متوسط کنسانتره	۳۰٪
مس محتوی در کنسانتره	۴۲۳۰۰ تن
عیار متوسط خوراک	۰/۷٪
شیب جاده‌های ارتباطی	۸ تا ۱۰ درصد
عرض جاده‌های ارتباطی	۳۰ متر

#### ۴-۱- مدل و جانمایی شماتیک

اگر  $i$  نشانگر انواع کامیون‌ها و  $j$  نشانگر انواع بارکننده‌ها باشد. مدل ساده ریاضی مورد مطالعه به شرح زیر است. اهداف:

$$\begin{cases} \text{Max} & F = \sum n_i b_i \\ \text{Min} & G = \sum a_i h_i + \sum a_j h_j \end{cases} \quad (2)$$

محدودیت‌ها:

$$0 \leq x_i \leq m_i \quad \& \quad x_i \neq 1 \quad \text{و} \quad 1 \leq x_j \leq m_j \quad \text{و} \quad F \geq 393000$$

تنی با فن بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی برای بارکننده‌های فعلی معدن، در قالب بهینه پارتو پیدا می‌شود. در مرحله آخر سناریویی شامل پنج نوع کامیون با تعداد و ظرفیت‌های متفاوت و همچنین دو نوع لودر با ظرفیت بیشتر برای اجرای فن بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی ارائه می‌شود. روش پیشنهادی با دو هدف بیشینه کردن تولید و همزمان با آن مینیمم کردن هزینه در جستجوی تعداد بهینه‌ی این ناوگان است.

لازم به ذکر است که چون: ۱. فضای جستجو با این تعداد ناوگان خیلی بالا می‌رود ۲. بهینه‌سازی چند هدفه بوده و فضای چند بعدی ترتیب‌پذیر نیست. بایستی از یک الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه استفاده شود تا اولاً این فضای بزرگ جستجو را به نحو قابل قبولی جستجو کند و همچنین به نوعی این فضای چند بعدی را در راستای نیل به اهداف ترتیب‌پذیر کند. الگوریتمی که به این منظور مورد استفاده قرار گرفته، الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه توده ذرات (MOPSO) است این الگوریتم فضا را با الگوریتم پایه خود یعنی توده ذرات و ترتیب‌پذیر کردن آن را با روش پارتو که مبتنی بر نامغلوب شدن است انجام می‌دهد.

#### ۴- شبیه‌سازی ناوگان مورد مطالعه (معدن مس سونگون)

معدن مس سونگون در استان آذربایجان شرقی، در مختصات ۴۶ درجه و ۴۳ دقیقه طول و ۳۸ درجه و ۴۳ دقیقه عرض جغرافیایی، در همسایگی کشورهای جمهوری‌های آذربایجان و ارمنستان قرار دارد. برنامه‌ریزی استخراج معدن مس سونگون به صورت جدول ۲ است. بارکننده‌های موجود در سیستم بارگیری و باربری مورد

جدول ۳: مشخصات بارکننده‌های فعلی در معدن و کامیون‌های تخصیص داده شده

نوع بارکننده	حجم جام (مترمکعب)	تعداد	ایستگاه بارگیری	کامیون تخصیص داده شده
کج بیل کوماتسو pc800	۴	۱	L1	۲ دستگاه ۱۰۰ تنی
لودر نیوهلند ۲۷۰	۴	۲	L4 و L2	۵ و ۶ دستگاه ۳۰ تنی
شاول ترکس	۵	۱	L3	۳ دستگاه ۱۰۰ تنی
شاول لیبر ۹۸۴	۴/۳	۱	L5	۳ دستگاه ۱۰۰ تنی
کج بیل کوماتسو pc800-8	۵/۱	۱	L6	۶ دستگاه ۳۰ تنی
لودر کاترپیلار 988B	۴/۵	۱	L7	۳ دستگاه ۳۰ تنی

### ۴-۳- تعیین تعداد ثبت زمانی

تعداد مشاهدات لازم با استفاده از معادله (۳) به دست می- آید [۲۳].

$$N = \left[ \frac{\frac{K}{S} \times \sqrt{n \times \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}}{\sum x_i} \right]^2 \quad (3)$$

که در آن:

S: نشان دهنده درصد خطا (±۵%)

K: معادل ۲ می‌باشد و معرف ±۲ انحراف معیار از میانگین در ۹۵% فضای زیر منحنی نرمال می‌باشد.

x: مقدار مشاهده شده

n: تعداد نمونه

K/S: نشان دهنده درجه اطمینان و دقت مورد نظر می‌باشد.

جدول ۴: داده‌های مربوط به زمان سفر (دقیقه) کامیون ۱۰۰

تنی از تقاطع تا ایستگاه بارگیری L1

۱/۹۷	۱/۴۸	۱/۵۵	۲/۴۶	۲/۲۰
۲/۳۱	۲/۲۵	۱/۴۶	۲/۴۰	۱/۴۷
۲/۰۹	۲/۳۱	۱/۸۲	۱/۴۵	۲/۴۸
۱/۷۵	۱/۴۳	۲/۴۲	۲/۲۸	۱/۹
۱/۳۸	۲/۲۰	۲/۴۶	۲/۴۵	۱/۴۰
۱/۳۸	۲/۰۴	۱/۸۴	۱/۹۳	۲/۳۹
۱/۹۴	۱/۶۰	۲/۳۳	۱/۷۴	۱/۹۴
۲/۳۰	۲/۳۲	۱/۶۰	۱/۵۸	۲/۰۲

به عنوان مثال تعداد ثبت‌های اولیه زمان سفر کامیون ۱۰۰ تنی از تقاطع تا ایستگاه بارگیری L1 برحسب دقیقه مطابق جدول ۴ است. طبق این جدول تعداد ۴۵ مورد داده ثبت شده است به منظور اطمینان از کافی بودن تعداد داده‌های ثبت شده از فرمول (۳)، N به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S = 5\% \quad , \quad K = \pm 2 \quad , \quad n = 45$$

با جایگذاری اعداد در فرمول (۳) عدد ۶۳ برای N به دست می‌آید. به عبارت دیگر بایستی برای زمان سفر کامیون ۱۰۰ تنی از تقاطع تا ایستگاه بارگیری L1، حداقل بایستی ۶۳ داده ثبت شود تا اطمینان به دست آید که تعداد آن‌ها برای تعیین توزیع احتمالی کافی است. مرحله فوق برای تمامی فعالیت‌ها که داده‌های زمانی آنها مورد نیاز است انجام شده است.

که در رابطه‌های بالا:

F: تولید کل معدن

G: هزینه عملیاتی کل

X: نشانگر تعداد دستگاه

n: تعداد دفعات بارگیری شده

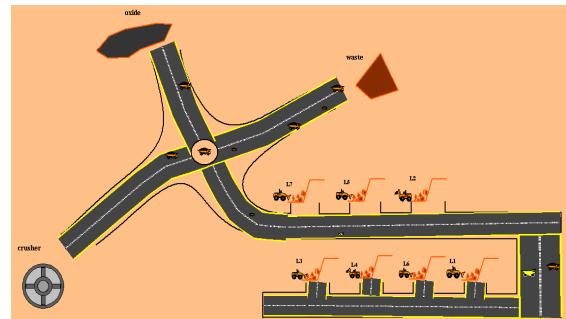
a: هزینه عملیاتی ساعتی

b: ظرفیت به تن

h: کارکرد کل دستگاه به ساعت

m: حداکثر تعداد دستگاه

لازم به ذکر است که انواع باربرها در این پژوهش، ۳۰، ۶۰، ۷۰، ۱۰۰ و ۱۶۰ تنی می‌باشند. مدل مفهومی سیستم مورد مطالعه در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود سیستم دارای هفت ایستگاه بارگیری L1، L2، ... و L7 به همراه یک ایستگاه سنگ‌شکنی، یک دامپ باطله و یک دامپ اکسید است.



شکل ۴: مدل مفهومی و جانمایی شماتیک سیستم حمل و نقل معدن سونگون

### ۴-۲- جمع‌آوری داده‌ها و تجزیه و تحلیل آن‌ها

از مهم‌ترین مراحل مربوط به شبیه‌سازی جمع‌آوری داده-های مربوط به سیستم است. اساسی‌ترین این داده‌ها زمان انجام فعالیت‌ها است. پس با دقت باید به زمان‌سنجی فعالیت‌های موجود در سیستم پرداخت. از داده‌های دیگر وزن مخصوص مواد حمل شده می‌باشد که برای باطله ۲/۳، ماده معدنی و اکسید ۲/۵ تن بر مترمکعب است. زمان مفید کاری در ۲۴ ساعت نیز جزء اطلاعات ضروری هست. در معدن مس سونگون، در هر شبانه روز سه شیفت کاری وجود دارد، ۲ ساعت از شیفت میانی به علت صرف نهار و انجام عملیات انفجار روزانه، استخراج صورت نمی‌گیرد. علاوه بر آن، بخاطر تعمیرات و تحویل شیفت به شیفت بعدی عملیات استخراج متوقف می‌شود. از این رو، زمان مفید کاری در طول شبانه روز ۹۹۰ دقیقه می‌باشد.

نرم‌افزار پشتیبانی می‌شود به همراه پارامترهایشان در جدول ۵ قابل مشاهده است [۲۴]. در ادامه، جزئیات یک مورد توزیع مناسب برازش شده برای داده‌های ورودی شبیه‌سازی شرح داده می‌شود. توزیع مناسب آن توزیع برازش شده‌ای است که در بین توزیع‌های دیگر داری کمترین مربع خطا باشد.

روند بالا برای همه مسیرها و کامیون‌های ۳۰ و ۱۰۰ تنی و زمان بارگیری آن‌ها بررسی شده است. در جدول ۶ توزیع‌های برازش شده برای کامیون ۳۰ تنی آورده شده است.

#### ۴-۵- صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی

یکی از گام‌های اساسی پس از ایجاد مدل شبیه‌سازی، بررسی صحت‌سنجی مدل است. در این بخش باید کنترل شود که آیا ساختار مدل شبیه‌سازی بر اساس مدل مفهومی و فرضیات آن تهیه شده است یا خیر. روش‌های مختلفی برای بررسی صحت‌سنجی مدل وجود دارد که در این پژوهش مراحل زیر به منظور صحت‌سنجی مدل انجام گردید:

جدول ۵: توزیع‌های پشتیبانی شده توسط نرم‌افزار ARENA

توزیع	در آرنا	پارامترها
میانگین	EXPO	Exponential
میانگین و انحراف معیار	NORM	Normal
کمینه، مد، بیشینه	TRIA	Triangular
کمینه، بیشینه	UNIF	Uniform
اکسپو میانگین و S	ERLA	Erlang
بتا و آلفا	BETA	Beta
بتا و آلفا	GAMM	Gamma
G, D, L, X	JOHN	Johnson
لگاریتم میانگین و انحراف معیار	LOGN	Log-normal
میانگین	POIS	Poisson
بتا و آلفا	WEIB	Weibull
P1, V1, ...	CONT	Continuous
P1, V1, ...	DISC	Discrete

#### ۴-۴- نتایج تجزیه و تحلیل داده‌های ورودی شبیه‌سازی

تجزیه و تحلیل‌ها داده‌ها به کمک نرم‌افزار Arena's Input Analyzer انجام شده است. توزیع‌هایی که توسط این

جدول ۶: توزیع‌های برازش شده برای کامیون‌های ۳۰ تنی

فعالیت (مدت زمان)	توزیع‌های برازش شده (دقیقه)
بارگیری به وسیله لودر L2	$BETA (1/58, 1/72) * 3/1+55/4$
رفت از لودر L2 تا تقاطع	$ERLA (0/512, 3) + 4$
رفت از تقاطع تا سنگ‌شکن	$BETA (1/26, 1/48) * 5 + 4/94$
برگشت از سنگ‌شکن تا تقاطع	$BETA (1/74, 1/14) * 2/3+23/67$
برگشت از تقاطع تا لودر L2	$NORM (3/93, 0/393)$
بارگیری به وسیله لودر L4	$BETA (1/47, 1/5) * 3/4 + 0/72$
رفت از لودر L4 تا تقاطع	$ERLA (0/182, 5) + 3/17$
رفت از تقاطع تا دامپ باطله	$BETA (0/837 + 1/15) * 2+3/75$
برگشت از دامپ باطله تا تقاطع	$BETA (2/58, 2/4) * 1/55 + 3/31$
برگشت از تقاطع تا لودر L4	$BETA (1/92, 2/1) * 2 + 2/92$
بارگیری به وسیله لودر L6	$BETA (2/2+52/06) * 0/1+999/29$
رفت از لودر L6 تا تقاطع	$NORM (4/2, 0/629)$
رفت از تقاطع تا دامپ باطله	$BETA (0/837, 1/15) * 2+3/75$
برگشت از دامپ باطله تا تقاطع	$BETA (2/58, 2/4) * 1/55 + 3/31$
برگشت از تقاطع تا لودر L6	$BETA (1/65, 1/79) * 2/2+05/32$
بارگیری لودر L7	$BETA (1/39, 1/43) * 2/78 + 0/6$
رفت از لودر L7 تا تقاطع	$BETA (2/85, 3/01) * 1/2+66/01$
تخلیه در سنگ‌شکن	$LOGN (1/14, 0/575) + 1$
تخلیه در دامپ باطله	$UNIF (0/999, 1/55)$



میزان تولید هفتگی به عنوان معیار جهت مقایسه با سیستم واقعی و اعتبارسنجی خروجی‌های شبیه‌سازی انتخاب شده است. با توجه به اینکه تولید هفتگی در معدن تقریباً بین ۳۹۰۰۰ و ۳۹۵۰۰۰ تن است و تولید معدن با اجرای شبیه‌سازی ۳۹۳۱۲۴ تن به دست آمده است. پس خروجی‌های شبیه‌سازی در بازه خروجی‌های سیستم واقعی قرار دارد. لذا مدل شبیه‌سازی معتبر است.

#### ۴-۷- تحلیل نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج حاصل از اجرای شبیه‌سازی و تحلیل‌های مربوطه ارائه شده است. اجرای مدل شبیه‌سازی سیستم فعلی معدن به مدت زمان ۷ روز، ۱۵ تکرار و اعمال ۱۴ ساعت زمان گرم شدن سیستم نتایج آن در جدول ۷ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میانگین بهره‌وری از زمان برنامه‌ریزی شده بارکننده‌ها ۶۳/۴ درصد است. از بین آنها بارکننده ششم دارای کمترین و بارکننده پنجم دارای بیشترین بهره‌وری است. برای حل این مشکل ابتدا اقدام به گسیل انعطاف‌پذیر کامیون‌ها با کمترین زمان انتظار برای بارگیری می‌شود. نتایج آن در جدول ۸ قابل مشاهده است.

با بررسی جدول ۸ مربوط به گسیل انعطاف‌پذیر ناوگان فعلی معدن و مقایسه آن با نتایج به دست آمده از تخصیص ثابت نتیجه‌گیری می‌شود که میانگین بهره‌وری از زمان برنامه‌ریزی شده ۱۲ و تولید هفتگی ۸ درصد افزایش داشته است. در ضمن میانگین طول صف تقریباً ثابت مانده است. از آنجایی که هزینه یکی از اهداف است و بایستی کمینه شود به اطلاعات هزینه‌ای تجهیزات نیاز است. در ادامه بهینه‌سازی چندین نوع لودر و کامیون متفاوت که هزینه عملیاتی آن‌ها در دسترس نیست به سیستم اضافه می‌شود از همین رو هزینه عملیاتی بارکننده‌ها و باربرها با استفاده از رابطه‌های (۴)، (۵)، (۶) و (۷) که توسط صیادی و لشگری در سال ۲۰۰۷ ارائه شده است [۲۶] محاسبه می‌شوند تا بتوان مقایسه واقع‌بینانه‌ای بین هزینه عملیاتی کل سیستم فعلی معدن با سناریوهای ارائه شده انجام شود. از آنجا که این رابطه‌ها هزینه کل عملیاتی را برحسب دلار بر ساعت سال ۲۰۰۷ ارائه می‌دهند. لذا بایستی با استفاده از شاخص قیمت‌ها که توسط شرکت اینفوما این ارائه شده است هزینه‌ها را از سال ۲۰۰۷ به ۲۰۱۳ به روز رسانی کرد. رابطه (۴) برای محاسبه هزینه کل عملیاتی ساعتی شاول

- بررسی دقیق‌تر مدل توسط سایر کارشناسان متخصص
- کنترل کردن خروجی‌های مدل به ازای ورودی‌های مختلف
- تهیه پویانمایی مدل جهت درک و رفع اشتباهات هر سه مرحله فوق با موفقیت انجام شده است و مدل شبیه‌سازی از صحت کافی برخوردار است.

#### ۴-۶- اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی

اعتبارسنجی بررسی این موضوع است که آیا مدل مفهومی و مدل مشخص ایجاد شده به طور دقیق نشان دهنده سیستم مورد مطالعه است یا خیر. از آنجایی که شبیه‌سازی، تخمینی از دنیای واقع محسوب می‌شود، لذا باید مدنظر قرار داد که امکان اعتبارسنجی ۱۰۰ درصد مدل با سیستم واقعی وجود ندارد. در این پژوهش از روش سه مرحله‌ای که توسط ناپلور و فینگر ارائه گردیده، استفاده شده است [۲۵].

مرحله ۱: توسعه مدل با اعتبار ظاهری بالا

هدف ایجاد مدلی است که بیشترین اعتبار ظاهری را داشته باشد به طوری که از دیدگاه افراد حاضر در سیستم مدل منطقی به نظر برسد. در این بخش نیز از تحلیل حساسیت به منظور کنترل کردن اعتبار ظاهری مدل استفاده گردید؛ بدین صورت که تعداد نهادها (کامیون‌ها) تغییر داده شد و تأثیر آنها بر روی وضعیت صف‌ها و میزان بهره‌وری تجهیزات بررسی شد. واضح است که با افزایش تعداد کامیون‌ها، میزان بهره‌وری تجهیزات باید افزایش یابد.

مرحله ۲: بررسی تجربی فرضیات مدل

در این مرحله دو دسته اصلی از فرضیات مدل مورد بررسی قرار گرفت:

- فرضیات مربوط به ساختار مدل

- فرضیات مربوط به اطلاعات مدل

فرضیات فوق با همکاری کارشناسان متخصص معدن، به صورت تجربی و شهودی مورد بررسی قرار گرفت.

مرحله ۳: بررسی خروجی‌های شبیه‌سازی

مؤثرترین بررسی برای اعتبارسنجی مدل، آزمودن این نکته است که خروجی‌های شبیه‌سازی باید حتی‌الامکان تفاوت معنی‌داری با خروجی‌های واقعی فرآیند نداشته باشد. به همین منظور از روش آزمون فرض جهت اعتبارسنجی خروجی‌های مدل استفاده شده است. در این پژوهش،

هیدرولیکی است.

$$y = 16/71x^{1/043} \quad (۴)$$

رابطه (۵) برای محاسبه هزینه کل عملیاتی ساعتی لودر چرخ لاستیکی است.

$$y = 10/32x^{1/028} \quad (۵)$$

رابطه (۶) برای محاسبه هزینه کل عملیاتی ساعتی کامیون‌ها است.

$$y = 2/053x^{0/951} \quad (۶)$$

رابطه (۷) برای محاسبه هزینه کل عملیاتی ساعتی کج‌بیل‌ها است.

$$y = 15/98x^{0/86} \quad (۷)$$

که در رابطه‌های بالا  $x$  نشانگر ساعت کارکرد می‌باشد. جدول ۹ هزینه عملیاتی ساعتی تجهیزاتی که در سیستم فعلی معدن و همچنین سناریوهای ارائه شده مورد استفاده قرار گرفته، آورده شده است و همچنین در جدول ۱۰ هزینه

کل عملیاتی کامیون‌ها آورده شده است.

در اجرای سناریوها این نکته نیز باید بررسی شود که بارکننده‌ها و باربرها از لحاظ ارتفاع بارگیری با هم تناسب دارند یا نه. این مسئله با توجه به حداکثر ارتفاع قابل بارگیری تجهیزات قابل بررسی است. این اطلاعات در کاتالوگ منتشر شده توسط شرکت تولید کننده تجهیزات موجود است. در ادامه داده‌های زمانی (مدت زمان بارگیری انواع کامیون‌ها توسط لودرها و همچنین زمان رفت و برگشت آن‌ها در مسیرهای مختلف) مربوط به تجهیزات جدیدی که به سیستم اضافه می‌شوند محاسبه خواهد شد. برای نمونه، زمان‌های مورد نیاز برای کامیون ۱۴۴ تنی و لودر ۷٫۵ مترمکعبی ۷۰۰WA کوماتسو به‌طور کامل مطابق جدول‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ شرح داده شده است. مراحلی که در زیر آمده، برای همه تجهیزات مرحله به مرحله انجام گرفته است.

جدول ۷: نتایج شبیه‌سازی سیستم فعلی معدن (گسیل ثابت)

بارکننده	بهره‌وری از زمان برنامه‌ریزی شده (%)	تولید هفتگی (تن)	میانگین طول صف (دقیقه)
L1	۶۰	۷۸۲۶۰	۰
L2	۸۲	۳۱۸۶۰	۱/۲
L3	۶۲	۸۴۳۵۷	۱
L4	۷۸	۳۰۴۲۹	۲/۵
L5	۸۷	۱۱۴۵۶۹	۱
L6	۳۲	۳۰۴۲۹	۰
L7	۴۳	۲۳۲۲۰	۰
کل سیستم	۶۳/۴	۳۹۳۱۲۴	۰/۸

جدول ۸: نتایج شبیه‌سازی سیستم فعلی معدن (گسیل انعطاف‌پذیر)

بارکننده	بهره‌وری از زمان برنامه‌ریزی شده (%)	تولید هفتگی (تن)	میانگین طول صف (دقیقه)
L1	۸۱/۱	۱۰۵۵۸۸	۰/۹
L2	۹۸/۶	۳۷۶۷۸	۲
L3	۹۴/۴	۶۶۷۹۴	۰/۱۵
L4	۹۶/۸	۳۷۲۲۳	۱/۸
L5	۶۲/۱	۸۱۰۶۷	۰/۳
L6	۵۵/۹	۵۲۷۱۳	۰/۳۳
L7	۸۳/۵	۴۳۷۸۳	۱/۵
کل سیستم	۷۵/۳	۴۲۴۸۴۶	۱

جدول ۹: هزینه کل عملیاتی ساعتی بارکننده‌ها

بارکننده‌ها	ظرفیت (مترمکعب)	هزینه عملیاتی ساعتی سال ۲۰۰۷ (دلار بر ساعت)	شاخص تبدیل هزینه از سال ۲۰۰۷ به ۲۰۱۳	هزینه عملیاتی ساعتی سال ۲۰۱۳ (دلار بر ساعت)
کج‌بیل کوماتسو pc800 (L1)	۴	۵۴/۹	۱/۲۹	۷۰/۸
لودر نیوهلند ۲۷۰ (L2 و L4)	۴	۶۴/۹	۱/۲۹	۸۳/۷
شاول ترکس (L3)	۵	۸۹/۵	۱/۲۹	۱۱۵/۵
شاول لیپهر ۹۸۴ (L5)	۴/۳	۷۴/۶	۱/۲۹	۹۶/۳
کج‌بیل کوماتسو pc800-8 (L6)	۵/۱	۶۴/۹	۱/۲۹	۸۳/۷
لودر کاتریپلار 988B (L7)	۴/۵	۴۷/۴	۱/۲۹	۶۱/۱
لودر کوماتسو WA600	۶/۵	۷۰/۷	۱/۲۹	۹۱/۲
لودر کوماتسو WA700	۷/۵	۸۱/۹	۱/۲۹	۱۰۵/۷

جدول ۱۰: هزینه کل عملیاتی ساعتی باربرها

تجهیزات (کامیون‌ها)	ظرفیت (مترمکعب)	بیشینه ظرفیت باربری (تن)	هزینه عملیاتی ساعتی سال ۲۰۰۷ (دلار بر ساعت)	شاخص تبدیل هزینه از سال ۲۰۰۷ به ۲۰۱۳	هزینه عملیاتی ساعتی سال ۲۰۱۳ (دلار بر ساعت)
کوماتسو HD255-5	۱۷/۷	۲۵	۳۱/۶	۱/۲۹	۴۰/۷
کوماتسو HD325	۲۴	۳۶	۴۲/۲	۱/۲۹	۵۴/۴
کوماتسو HD465	۳۴/۲	۵۵	۵۹/۱	۱/۲۹	۷۶/۲
کوماتسو HD605	۴۰	۶۰	۶۸/۶	۱/۲۹	۸۸/۴
کوماتسو HD785	۶۰	۹۱	۱۰۰/۸	۱/۲۹	۱۳۰/۱
کوماتسو HD1500	۷۸	۱۴۴	۱۲۹/۴	۱/۲۹	۱۶۶/۹

جدول ۱۱: زمان بارگیری کامیون ۱۴۴ تنی بوسیله بارکننده WA700

نوع ماده	ماده معدنی	باطله و اکسید
زمان سیکل جام (ثانیه)	۳۱	۳۱
حجم باکت (مترمکعب)	۷,۵	۷,۵
وزن مخصوص ماده حمل شده (تن بر مترمکعب)	۲,۳	۲,۵
ضریب پرشوندگی	۰,۸	۰,۸
زمان جایگیری کامیون (ثانیه)	۳۰	۳۰
تعداد جام‌های موردنیاز جهت پر شدن باکت کامیون*	۱۱	۱۰
زمان بارگیری (ثانیه)	۳۷۱	۳۴۰

\*  $\text{بیشینه باربری کامیون} = \frac{\text{تعداد جام موردنیاز}}{\text{حجم باکت} \times \text{وزن مخصوص خردشده}} \times \text{فاکتور پرشوندگی}$

جدول ۱۲: متوسط زمان رفت (با بار) کامیون ۱۴۴ تنی در مسیرهای مختلف

مسیر رفت	فاصله (متر)	شیب (%)	مقاومت غلتشی (%)	حداکثر سرعت (km/h)	ضریب سرعت	سرعت متوسط (km/h)	متوسط زمان رفت (min)
لودر L1 تا تقاطع	۶۳۰	۹	۳	۱۰	۰/۷۵	۷/۵	۵/۰۴
لودر L2 تا تقاطع	۵۵۰	۹	۳	۱۰	۰/۷۵	۷/۵	۴/۴
لودر L3 تا تقاطع	۹۴۰	۹	۳	۱۰	۰/۸	۸	۷/۰۵
لودر L4 تا تقاطع	۸۰۰	۹	۳	۱۰	۰/۸	۸	۶

ادامه جدول ۱۲

مسیر رفت	فاصله (متر)	شیب (%)	مقاومت غلتشی (%)	حداکثر سرعت (km/h)	ضریب سرعت	سرعت متوسط (km/h)	متوسط زمان رفت (min)
لودر L5 تا تقاطع	۴۹۰	۹	۳	۱۰	۰/۷	۷	۴/۲
لودر L6 تا تقاطع	۷۲۰	۹	۳	۱۰	۰/۷	۷	۶/۱۷
لودر L7 تا تقاطع	۴۵۰	۹	۳	۱۰	۰/۷	۷	۸/۶۳
تقاطع تا دامپ باطله	۷۵۰	۹	۳	۱۰	۰/۷۵	۷/۵	۶
تقاطع تا دامپ اکسید	۱۰۶۰	۹	۳	۱۰	۰/۸	۸	۷/۹۵
تقاطع تا سنگ‌شکن	۷۰۰	۹	۳	۱۰	۰/۷۵	۷/۵	۵/۶

جدول ۱۳: اطلاعات زمانی برگشت کامیون ۱۴۴ تنی در مسیرهای مختلف

مسیر برگشت	فاصله (متر)	شیب (%)	مقاومت غلتشی (%)	حداکثر سرعت (km/h)	ضریب سرعت	سرعت متوسط	متوسط زمان برگشت (min)
تقاطع تا لودر ۱	۶۳۰	۹	۳	۱۹	۰/۸	۱۵/۲	۲/۴۹
تقاطع تا لودر ۲	۵۵۰	۹	۳	۱۹	۰/۸	۱۵/۲	۲/۱۷
تقاطع تا لودر ۳	۹۴۰	۹	۳	۱۹	۰/۷۵	۱۴/۲۵	۳/۹۶
تقاطع تا لودر ۴	۸۰۰	۹	۳	۱۹	۰/۷۵	۱۴/۲۵	۳/۳۷
تقاطع تا لودر ۵	۴۹۰	۹	۳	۱۹	۰/۸	۱۵/۲	۱/۹۳
تقاطع تا لودر ۶	۷۲۰	۹	۳	۱۹	۰/۸	۱۵/۲	۲/۸۴
تقاطع تا لودر ۷	۴۵۰	۹	۳	۱۹	۰/۸	۱۵/۲	۱/۷۸
دامپ باطله تا تقاطع	۷۵۰	۹	۳	۱۹	۰/۸	۱۵/۲	۲/۹۶
دامپ اکسید تا تقاطع	۱۰۶۰	۹	۳	۱۹	۰/۸	۱۵/۲	۴/۱۸
سنگ‌شکن تا تقاطع	۷۰۰	۹	۳	۱۹	۰/۷۵	۱۴/۲۵	۲/۹۵

جدول ۱۴: متغیرهای تصمیم در سناریوی بارکننده‌ها ثابت

تجهیزات	متغیر تصمیم	مقدار کمینه	مقدار بیشینه
کامیون ۳۰ تنی	X1	۲	۵۰
کامیون ۱۰۰ تنی	X2	۲	۵۰

در زیر تنظیمات مربوط به الگوریتم MOPSO آورده شده است:

تعداد جمعیت اولیه : ۲۵

تعداد تکرار الگوریتم : ۶

اندازه انبار جواب‌های نامغلوب: ۲۰

لازم به یادآوری است که تعداد تکرار هر شبیه‌سازی ۱۵ تعیین شده است.

با توجه به تنظیمات الگوریتم MOPSO و برنامه شبیه‌سازی ARENA، عملیات بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی شروع می‌شود. همان‌طور که گفته شده است ارزیابی جبهه‌های پارتو از نظر اینکه جبهه‌ی پارتو به دست آمده می‌تواند معرف جواب‌های بهینه باشد یا نه، با دو فاکتور قابل بررسی است. اول اینکه جبهه‌ی به دست آمده بایستی نظم خاصی داشته باشد. دوم اینکه جبهه‌ی پارتو به

## ۵- بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی حمل و نقل معدن مس سونگون

در بخش‌های قبلی مراحل شبیه‌سازی و الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه توده ذرات به‌طور کامل شرح داده شد. همچنین طریقه ارتباط بین نرم‌افزار شبیه‌سازی و بهینه‌سازی نیز بیان شد. همه داده‌های زمانی و اقتصادی مربوط به تجهیزات محاسبه شده است. در ادامه سناریوها و نتایج بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی بیان شده است.

### ۵-۱- تعیین تعداد بهینه کامیون ۳۰ و ۱۰۰ تنی (بارکننده‌ها ثابت)

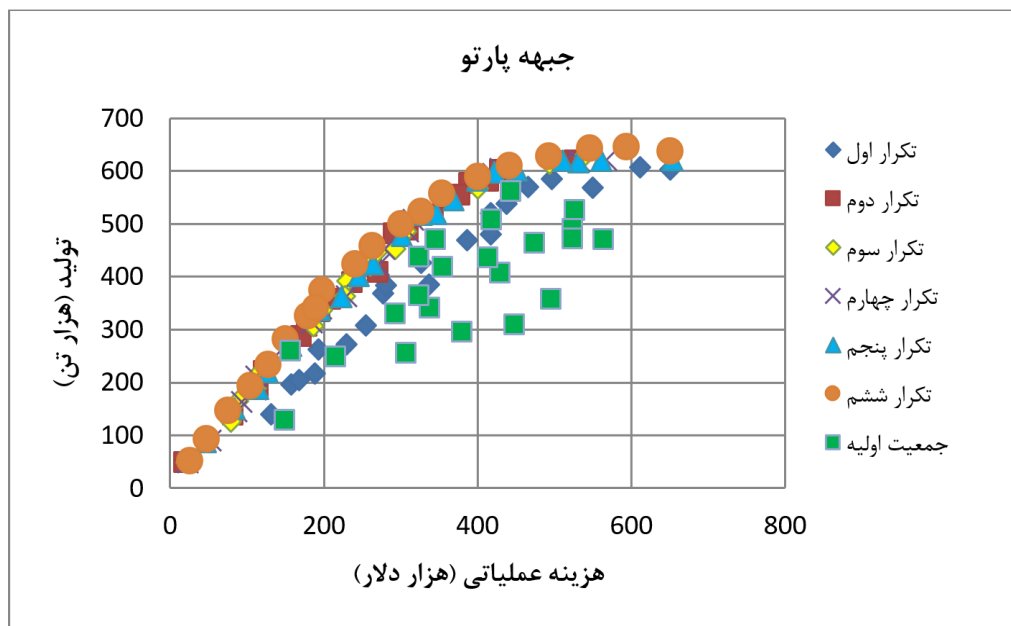
در این بخش با ثابت نگه داشتن نوع و تعداد بارکننده‌ها، تلاش صورت گرفته تا با راهکار بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی تعداد بهینه کامیون‌های ۳۰ و ۱۰۰ تنی با اهداف تولید بیشینه و هزینه کمینه به دست آورده شود. متغیرهای تصمیم تعداد هر نوع کامیون است. تعداد کامیون ۳۰ تنی با X1 و کامیون ۱۰۰ تنی با X2 نشان داده شده است. در جدول ۱۴ توضیحات بیشتر در مورد متغیرهای تصمیم بیان شده است.

جدول ۱۵ قابل مشاهده است. در این جدول متغیرهای تصمیم که همان تعداد کامیون‌های ۳۰ و ۱۰۰ تنی می‌باشند به همراه تناژ تولیدی و هزینه عملیاتی کل در یک هفته آمده است. این ۲۰ سناریو به دست آمده نسبت به هم از لحاظ بهینگی ارجحیتی ندارند. تصمیم گیرنده بایستی بر مبنای یکسری محدودیت‌ها یک یا چندین سناریو که مناسب است را انتخاب کند.

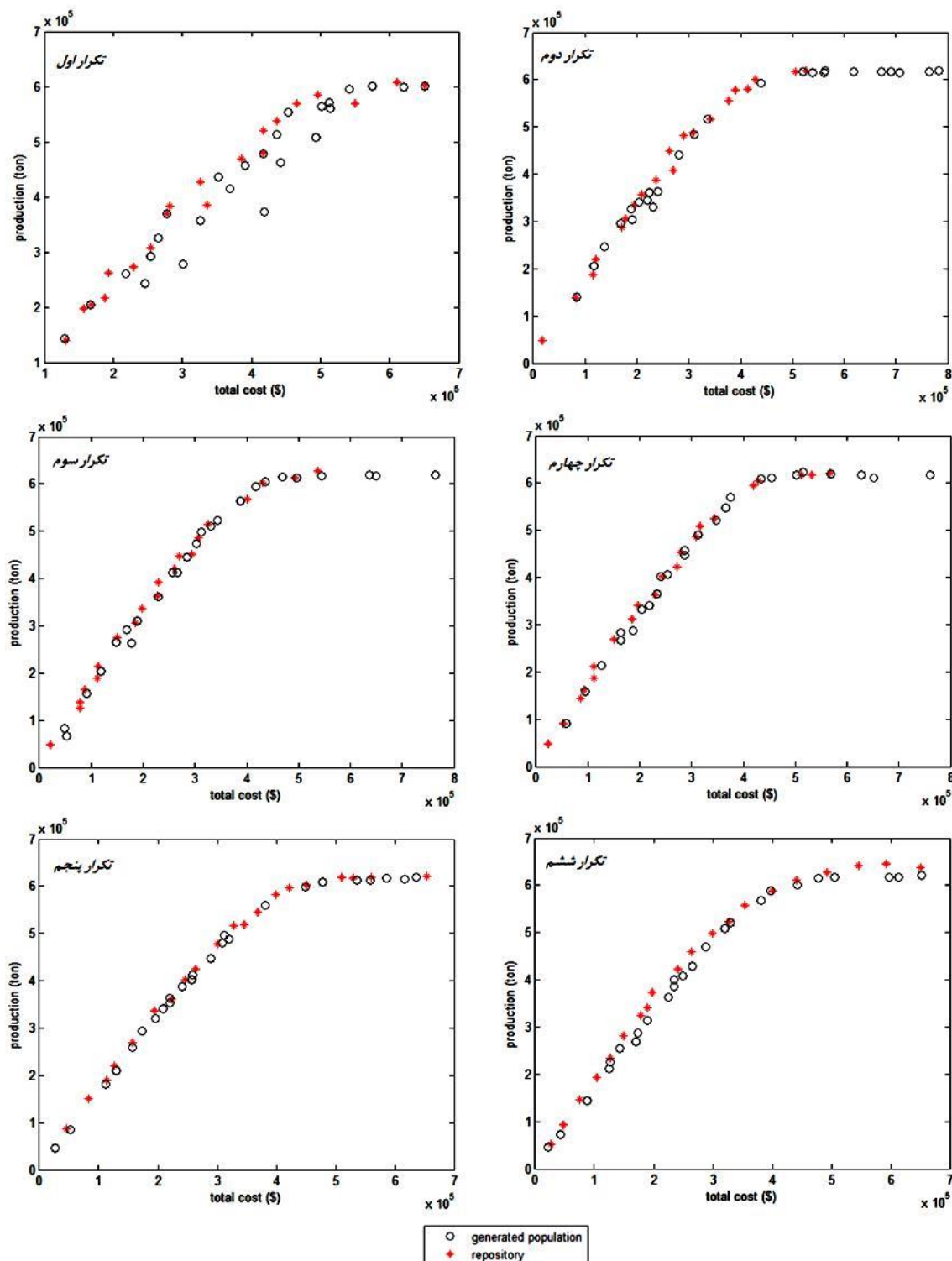
اولین محدودیتی که بایستی اعمال شود تولید واقعی هفتگی است. به این صورت که تولید سناریوهای به دست آمده نبایستی از ۳۹۳۰۰۰ تن کمتر باشد. لازم به یادآوری است که هزینه عملیاتی بر تن در سیستم فعلی ۰/۶۶ دلار بر تن است. با اعمال این محدودیت سناریوهای باقیمانده در جدول ۱۶ آورده شده است همچنین در این جدول برای مقایسه بین گزینه‌ها هزینه دلار بر تن تولیدی نیز محاسبه شده است.

در جدول ۱۶ شش سناریوی اول از میان ۲۰ مورد که در داخل انبار نهایی جواب‌ها (جبهه پارتو) بوده‌اند استخراج شده و همچنین جزئیات مربوط به این شش سناریو در این جدول ذکر شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این‌ها از لحاظ بهینگی ارجحیت خاصی نسبت به هم ندارند. برای مثال یکی از گزینه‌ها در تولید نسبت به جواب دیگری بیشتر در حالی که هزینه عملیاتی کل کمتری نسبت به آن دارد.

دست آمده بایستی از لحاظ پراکندگی (به این معنی که در مناطق مختلف جبهه نمونه‌ای از جواب‌ها باشد) مناسب باشد. در نمودار (۱)، نتیجه شش تکرار بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی آورده شده است. این نتایج به صورت جبهه‌های پارتو می‌باشند. در این نمودارها، دایره‌ها معرف جمعیت تولید شده در هر تکرار و نقاط ستاره معرف جواب‌های نامغلوب است. روش کار به این صورت است که ابتدا الگوریتم بهینه‌سازی یک جمعیت اولیه‌ای به صورت تصادفی در بازه کمینه و بیشینه متغیرهای تصمیم ایجاد می‌کند. رفته‌رفته الگوریتم با استفاده از اهدافی که از شبیه‌سازی به دست می‌آید (تولید و هزینه عملیاتی کل) به دنبال جواب‌های بهتر (همان جبهه پارتو بهینه) می‌گردد. با بررسی جبهه‌های پارتو در تکرارهای اول تا ششم، مشاهده می‌شود الگوریتم MOPSO سریع‌تر به همگرایی رسیده و به تناسب آن جبهه پارتو سریع‌تر به یک نظم و پراکندگی در جواب‌ها رسیده است. و این به خاطر زیاد بزرگ نبودن فضای جستجو است. جبهه‌های پارتو در هر مرحله در شکل (۵) قابل مشاهده است. برای درک روند بهتر شدن جواب‌های پارتو با سپری شدن تکرارها، جبهه‌های پارتو در تکرارهای مختلف به همراه جمعیت اولیه در نمودار (۱) آورده شده است. همان‌طور که در نمودار دیده می‌شود جبهه پارتو رفته‌رفته بهتر شده است. جزئیات جواب‌های به دست آمده از جبهه پارتو نهایی در



نمودار ۱: جبهه‌های پارتو به همراه جمعیت اولیه



شکل ۵: جبهه‌های پارتو به دست آمده از اجرای الگوریتم

به اینکه در بخش دوم بهینه‌سازی از تنوع در اندازه کامیون‌ها و افزایش تعداد آن‌ها استفاده می‌شود. یقیناً تعدادی از بارکننده‌ها جوابگوی این ناوگان بزرگ نخواهند بود از این رو زمان انتظار کامیون‌ها برای بارگیری توسط بارکننده‌ها بررسی شده است تا بارکننده‌هایی که کامیون‌ها

با روش پیشنهادی بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی که در نهایت به جدول ۱۶ انجامید. به طور متوسط تولید معدن ۱۲/۳۷ درصد افزایش داشته است. همچنین سناریو ۱۴ با هزینه عملیاتی (دلار بر تن تولیدی) برابری با سیستم فعلی معدن ۳۸/۶ درصد افزایش تولید را نشان می‌دهد. با توجه

تحرک بالا نیاز است امکان استفاده از این نوع بارکننده‌ها ممکن نیست.

جدول ۱۵: جزئیات جواب‌های بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی

شماره سناریو	X1	X2	تولید (تن)	زینه عملیاتی کل (دلار)
۱	۲	۲	۴۹۱۹۷	۲۳۱۷۲
۲	۵	۲	۸۳۴۷۹	۴۷۶۰۹
۳	۶	۲	۹۳۱۴۶	۵۳۷۶۴
۴	۱۱	۲	۱۴۲۸۳۹	۸۵۰۳۸
۵	۱۲	۲	۱۸۲۰۴۹	۱۰۹۲۹۰
۶	۱۰	۳	۱۸۷۷۳۱	۱۱۴۷۶۲
۷	۱۴	۴	۲۶۱۲۵۳	۱۵۷۴۴۲
۸	۳۵	۲	۳۶۲۴۵۲	۲۲۸۳۲۶
۹	۱۵	۹	۴۰۴۴۳۱	۲۵۱۷۸۶
۱۰	۲۱	۷	۴۱۰۳۵۳	۲۵۲۴۴۵
۱۱	۲۸	۵	۴۲۲۹۰۰	۲۵۸۷۸۸
۱۲	۲۹	۹	۵۲۰۱۰۷	۳۳۳۰۸۹
۱۳	۲	۱۹	۵۳۰۲۶۹	۳۴۸۸۳۰
۱۴	۲۵	۱۲	۵۴۴۸۶۴	۳۶۰۵۶۸
۱۵	۳۵	۱۱	۵۸۷۵۰۵	۳۹۹۶۲۸
۱۶	۲۷	۱۵	۵۹۲۸۴۹	۴۲۰۴۲۱
۱۷	۳۴	۱۳	۵۹۹۸۳۲	۴۲۶۱۷۷
۱۸	۱۷	۲۴	۶۱۵۳۳۵	۵۰۸۷۲۱
۱۹	۴۵	۱۶	۶۱۸۷۱۱	۵۲۹۳۹۱
۲۰	۳۳	۲۸	۶۱۹۰۴۷	۶۵۱۳۸۰

برای بارگیری توسط آنها بایستی در صف‌های طولانی منتظر بمانند شناسایی شوند و با بارکننده‌های مناسب‌تری جایگزین گردند. نتایج بررسی مدت زمان انتظار کامیون‌ها در جدول ۱۷ قابل مشاهده است. این نتایج از خروجی‌های شبیه‌سازی است.

با بررسی مدت زمان انتظار کامیون‌ها برای بارگیری، مشاهده می‌شود مدت زمان انتظار در صف بارگیری برای لودر ۲، لودر ۴ و لودر ۷ دارای بیشترین مقدار است. و این ناشی از توان کم بارکننده‌ها و متناسب نبودن آن‌ها با کامیون‌های بزرگ‌تر است. برای همین منظور در سناریو بعدی به جای لودر ۲ و ۴ از شاول ۷،۵ مترمکعبی و به جای لودر ۷ از بیل مکانیکی ۶،۵ مترمکعبی استفاده خواهد شد. دلیل اینکه به جای دو لودر اولی از بارکننده با حجم جام بیشتر استفاده می‌شود آن است که مدت زمان انتظار برای این دو خیلی بیشتر از بارکننده سومی است.

همان‌طور که گفته شد در بخش بعدی از تنوع کامیونی هم استفاده می‌شود. به این معنی که کامیون‌های مورد استفاده تنها ۳۰ و ۱۰۰ تنی نیستند. در کنار این کامیون‌ها ۶۰، ۷۵ و ۱۴۴ تنی نیز استفاده خواهد شد. دلیل عدم استفاده از کامیون‌های با حجم خیلی بزرگ این است که بارکننده‌ها توان بار کردن آنها را نداشته و افزایش حجم جام بارکننده‌ها به دلیل وجود رگه‌های مواد معدنی در بین باطله‌ها و پراکندگی مواد معدنی و چون با این شرایط به بارکننده با

جدول ۱۶: سناریوهایی که تولید آن‌ها از تولید فعلی معدن بیشتر است

شماره	شماره سناریو انتخاب شده	هزینه (دلار بر تن)	درصد افزایش تولید نسبت به وضعیت فعلی معدن
۱	۹	۰/۶۲	۲/۹
۲	۱۰	۰/۶۲	۴/۴
۳	۱۱	۰/۶۱	۷/۶
۴	۱۲	۰/۶۴	۳۲/۳
۵	۱۳	۰/۶۶	۳۴/۹
۶	۱۴	۰/۶۶	۳۸/۶
۷	۱۵	۰/۶۸	۴۹/۵
۸	۱۶	۰/۷۱	۵۰/۹
۹	۱۷	۰/۷۱	۵۲/۶
۱۰	۱۸	۰/۸۳	۵۶/۶
۱۱	۱۹	۰/۸۶	۵۷/۴
۱۲	۲۰	۱/۰۵	۵۷/۵

جدول ۱۷: مدت زمان انتظار کامیون‌ها برای بارگیری توسط هر کدام از بارکننده‌ها بر حسب دقیقه

شماره	لودر ۱	لودر ۲	لودر ۳	لودر ۴	لودر ۵	لودر ۶	لودر ۷
۱	۴	۱۶	۲	۱۴	۳	۳	۹
۲	۵	۱۶	۳	۱۵	۳	۳	۱۰
۳	۴	۱۷	۲	۱۴	۲	۳	۸
۴	۲	۷	۱	۶	۱	۱	۲
۵	۲	۱۱	۱	۹	۱	۱	۴
۶	۲	۸	۱	۶	۱	۱	۲
۷	۳	۱۴	۱	۱۱	۲	۲	۷
۸	۵	۱۷	۳	۱۴	۴	۳	۱۰
۹	۵	۱۶	۳	۱۵	۴	۳	۱۱
۱۰	۲	۹	۱	۷	۱	۱	۳
۱۱	۱	۹	۱	۸	۱	۱	۲
۱۲	۲	۱۱	۱	۹	۱	۱	۵
میانگین	۳/۱	۱۲/۶	۱/۷	۱۰/۷	۲	۱/۹	۶/۱

اما در هر تکرار با مشاهده جبهه پارتو، هر کدام از آنها که دو فاکتور تنوع و نظم را داشته باشند به عنوان جبهه پارتو نهایی انتخاب شده و برنامه متوقف می‌شود.

اندازه انبار جواب‌های بهتر: ۳۰

لازم به یادآوری است که تعداد تکرار هر شبیه‌سازی طبق بررسی‌های انجام گرفته ۱۵ تعیین شده است. پس از اجرای روش پیشنهادی جبهه‌های پارتو به دست آمده از اجرای برنامه را در شکل‌های (۶) و (۷) مشاهده می‌کنید.

جدول ۱۸: متغیرهای تصمیم در مرحله دوم بهینه‌سازی

مقدار	مقدار	متغیر	باربرها
بیشینه	کمینه	تصمیم	
۴۰	۲	X1	کامیون ۳۰ تنی
۴۰	۲	X2	کامیون ۶۰ تنی
۴۰	۲	X3	کامیون ۷۰ تنی
۴۰	۲	X4	کامیون ۱۰۰ تنی
۴۰	۲	X5	کامیون ۱۶۰ تنی

در شکل (۶) شش مورد از نمودار جبهه پارتو که از اجرای شبیه‌سازی مبتنی بر بهینه‌سازی به دست آمده، مشاهده می‌شود. در این نمودارها محور افقی نمایانگر هزینه عملیاتی کل به دلار و محور عمودی، تولید کل به تن متریک در یک هفته است. دایره‌های توخالی نشانگر جمعیتی هستند که در هر تکرار به دنبال جواب‌های بهینه هستند و ستاره‌ها

## ۵-۲- بخش دوم بهینه‌سازی

در این بخش بعد از شناسایی گلوگاه‌های سیستم حمل و نقل معدن به منظور بهینه‌سازی آن از تنوع در کامیون‌ها و همچنین جایگزین کردن سه دستگاه بارکننده بزرگ‌تر با بارکننده‌هایی که توان تولیدشان کم بود، استفاده شده است. متغیرهای تصمیم مسئله به همراه حد کمینه و بیشینه در جدول ۱۸ قابل مشاهده است. چون کاربرد یک دستگاه از هر نوع کامیون در سیستم منطقی نیست بنابراین حد کمینه برای کامیون‌ها ۲ دستگاه در نظر گرفته شده است. الگوریتم طوری طراحی شده است که به جای هر کدام از اعداد صفر و یک به ترتیب صفر و دو قرار گیرد. به عبارت دیگر از یک نوع کامیون حداقل ۲ تا در سیستم وجود داشته باشد یا اصلاً وجود نداشته نباشد. در ضمن توجه شود که در جدول مذکور برای نامگذاری کامیون‌ها از تن کوچک استفاده شده است.

در زیر تنظیمات مربوط به الگوریتم MOPSO آورده شده است:

تعداد جمعیت اولیه: ۴۰

یعنی ۴۰ ذره در فضای جستجوی ۷۶۸۰۰۰۰۰ با دو هدف بیشینه تولید و هزینه کمینه، دنبال‌گزینه‌های بهینه برای مقادیر متغیرهای تصمیم هستند.

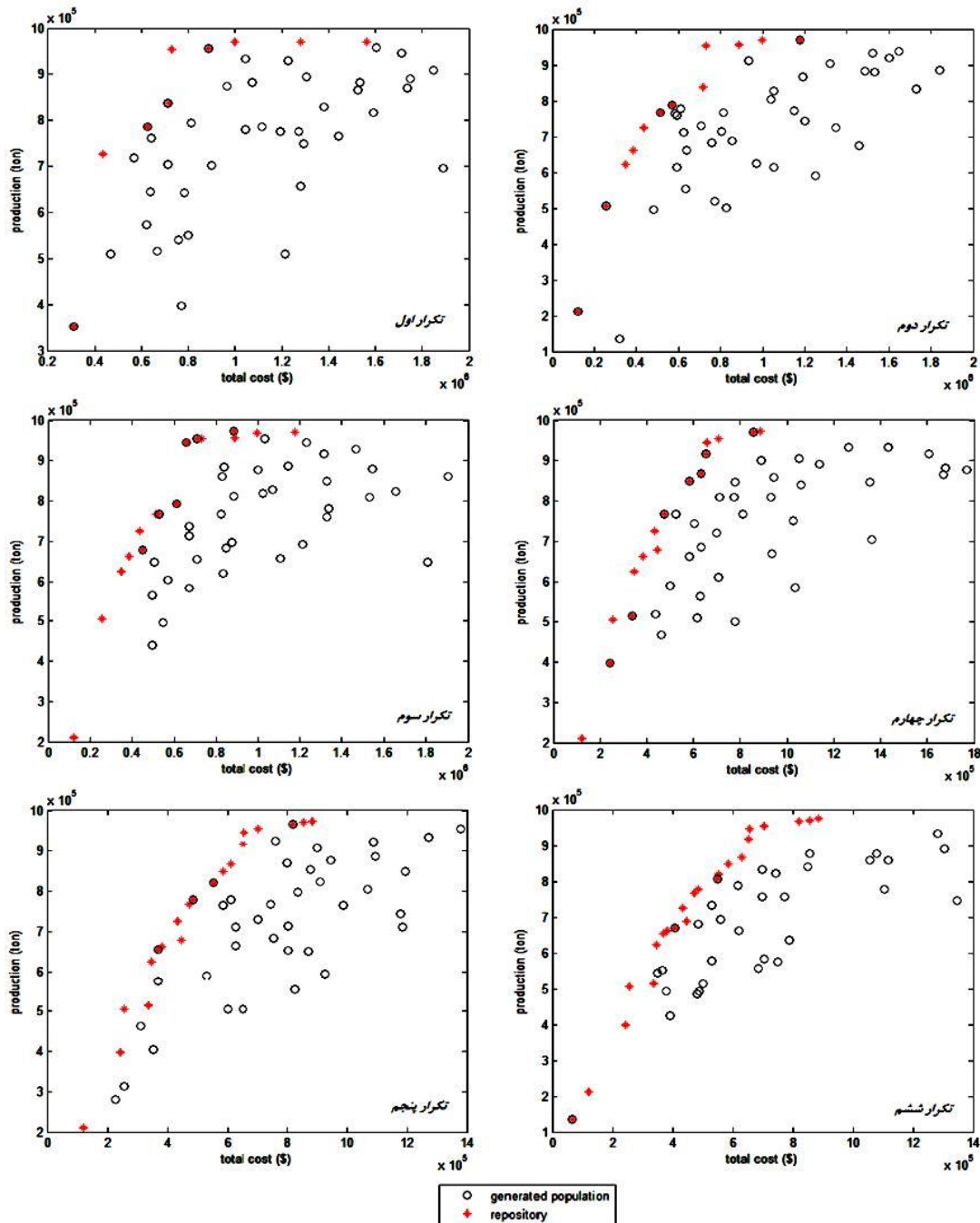
تعداد تکرار الگوریتم: ۲۰

تعداد تکرار الگوریتم MOPSO، ۲۰ در نظر گرفته می‌شود

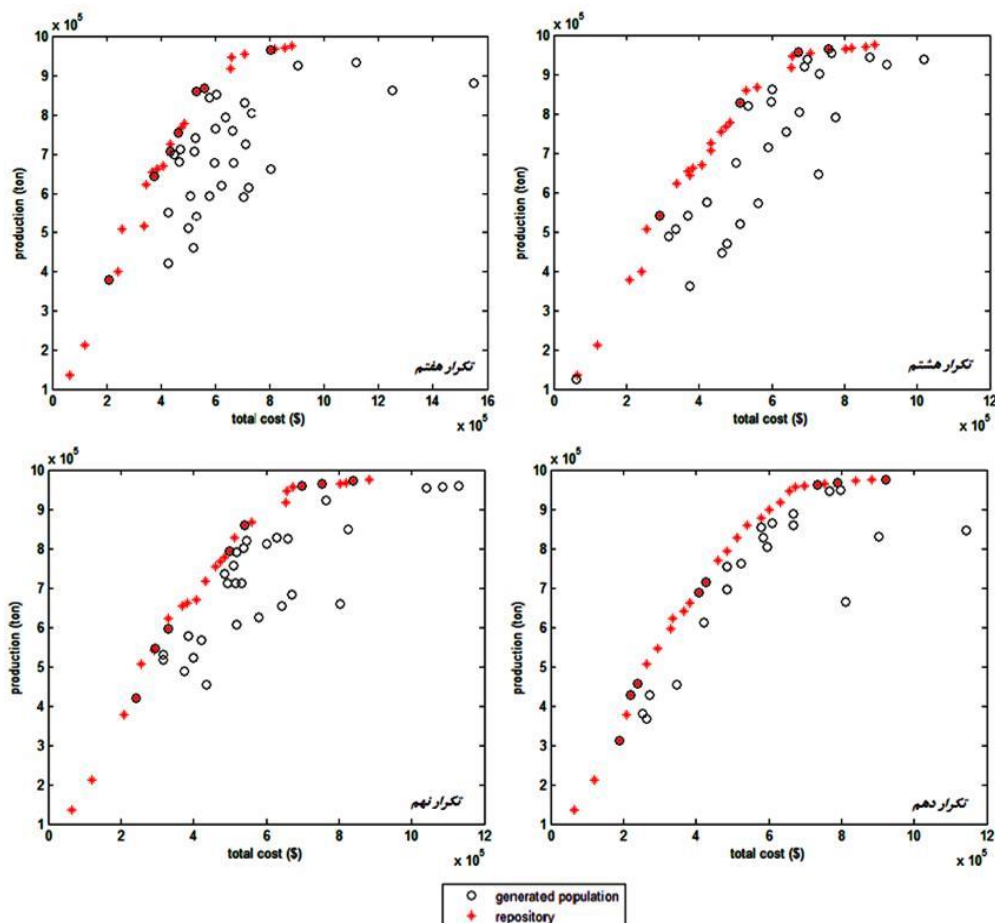


دست آمده بایستی یک شکل منظم و روندی داشته باشد و تنوع یعنی در همه جای این جبهه جوابی وجود داشته باشد. هر موقع که جبهه پارتو، این دو فاکتور را داشته باشد، شرط خاتمه روند شبیه‌سازی مبتنی بر بهینه‌سازی محقق می‌شود و اعضای جبهه پارتو نهایی به دست آمده، مجموعه جواب‌های بهینه مورد نظر است. چون تا تکرار ششم این فاکتورها برآورده نشده‌اند، برنامه ادامه پیدا می‌کند و تکرارهای هفتم تا دهم در شکل (۷) قابل مشاهده است.

معرف جواب‌هایی هستند که مغلوب نشده و به انبار جواب‌های نامغلوب (REP) راه پیدا کرده‌اند. این اعضا جبهه پارتو را تشکیل می‌دهند. مشاهده می‌شود که در تکرار اول تعداد کمی از ذره‌ها نامغلوب شده‌اند ولی با گذشت تکرارها بر تعداد اعضای انبار نامغلوب افزوده می‌شود. همان‌طور که گفته شده، وجود نظم و تنوع در جبهه پارتو از مهم‌ترین ملاک‌ها برای تشخیص اینکه جبهه پارتو به دست آمده قابل قبول است یا نه، است. نظم به این معنا که جبهه پارتو به



شکل ۶: جبهه‌های پارتو به دست آمده از بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی برای شش تکرار اول



شکل ۷: جبهه‌های پارتو به دست آمده از بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی برای تکرارهای هفتم تا دهم

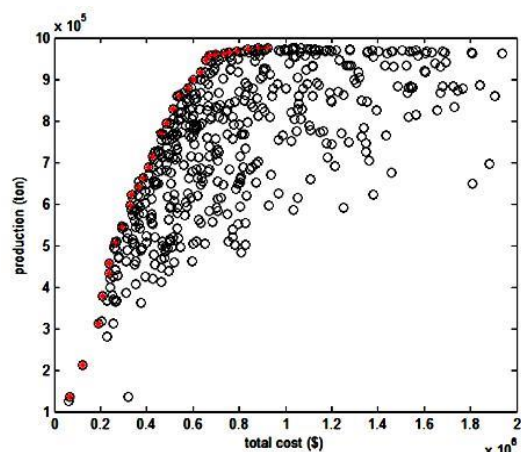
در شکل (۸) جبهه پارتو به دست آمده به همراه همگی اعضای جمعیت‌هایی که در جستجوی جواب‌های بهینه بوده‌اند، نشان داده شده است. این اعضا توسط اعضای جبهه پارتو نهایی که با دایره‌های توپر نشان داده شده است مغلوب شده‌اند.

در جدول ۱۹، اعضای جبهه پارتو نهایی با جزئیات آورده شده است. این جزئیات برای هر عضو از جبهه پارتو عبارت‌اند از:

- تولید کل یک هفته به تن
- هزینه عملیاتی کل در یک هفته به دلار
- تعداد متغیرها (کامیون‌های مختلف) برای هر عضو

طبق نتایج به دست آمده، از سناریو ۵ تا ۱۹ هزینه عملیاتی واحد تولید از سیستم فعلی معدن (۰/۶۶) کمتر است این در حالی است که در بین این سناریوها مینیمم ۱۰ و ماکزیمم ۱۲۳ درصد افزایش تولید وجود دارد.

بیشترین کاهش هزینه واحد تولید مربوط به سناریوهای ۶ و ۷ با ۲۳ درصد کاهش است. بیشترین تعداد کامیون در



شکل ۸: جبهه پارتو نهایی به همراه همگی اعضای جمعیت تولید شده در طول اجرای الگوریتم

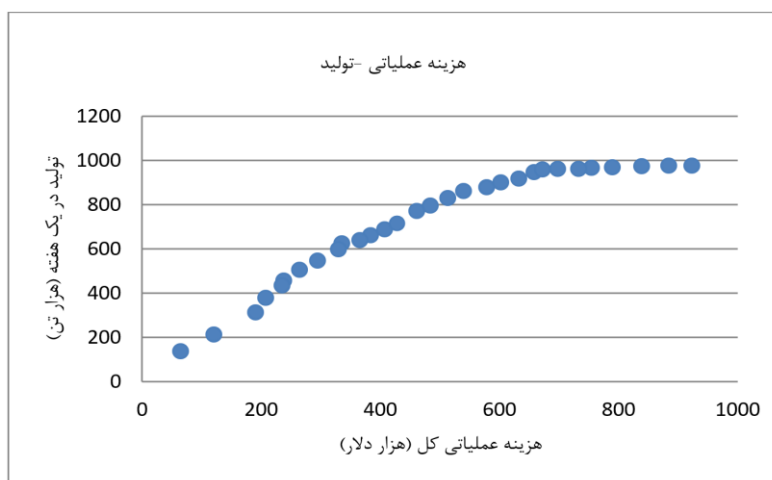
در شکل (۷) ادامه تکرارهای الگوریتم را مشاهده می‌کنید. از تکرار هشتم به بعد جبهه پارتو به حالت ایده‌آل که همان نظم و تنوع مناسب است نزدیک‌تر می‌شود. سرانجام در تکرار دهم، جبهه پارتو مناسب از نظر فاکتورهای ذکر شده به دست می‌آید و برنامه متوقف می‌شود. این جبهه شامل جواب‌های بهینه است.

به نقطه‌ای می‌رسد که بعد از آن با ثابت ماندن تقریبی تولید، هزینه عملیاتی کل در حال افزایش است. پس برای انتخاب یک گزینه از بین سناریوها آن جوابی انتخاب می‌شود که دارای بیشینه تولید و کمترین هزینه است. از بین سناریوها ۸ سناریو آخری (۲۳ تا ۳۰) تقریباً دارای تولید یکسان هستند که در بین تمامی جواب‌ها بیشینه هستند. سناریو بیست و سوم کمترین هزینه عملیاتی کل را نسبت به ۷ سناریو دیگر دارد پس گزینه انتخابی همان سناریو ۲۳ است.

بین گزینه‌های جبهه پارتو نهایی، به ترتیب مربوط به ۱۰۰ و ۱۶۰ تنی است و این نشانگر آن است که تعداد کامیون‌های با ظرفیت بالا در معدن بایستی افزایش پیدا کند. این افزایش به طور متوسط بایستی حداکثر شامل ۲۹ دستگاه کامیون ۱۰۰ تنی و ۱۷ دستگاه کامیون ۱۶۰ تنی باشد. برای انتخاب چند گزینه بهتر از بین این جواب‌ها نمودار هزینه - تولید بار دیگر رسم می‌شود. همان‌طور که در نمودار (۲) مشاهده می‌شود با افزایش هزینه عملیاتی، تولید تقریباً به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. در نهایت

جدول ۱۹: اعضای جبهه پارتو نهایی با جزئیات

شماره سناریو	X1	X2	X3	X4	X5	تولید (تن)	هزینه عملیاتی کل (دلار)	هزینه عملیاتی (دلار بر تن)	افزایش تولید نسبت به وضعیت فعلی (%)
۱	۰	۰	۵	۰	۰	۱۳۵۶۱۵	۶۵۳۰۶	۰/۴۸	-۶۵/۵
۲	۰	۰	۸	۰	۰	۲۱۰۹۲۹	۱۲۰۶۴۴	۰/۵۷	-۴۶/۳
۳	۲۸	۰	۰	۰	۰	۳۱۱۹۸۲	۱۹۰۷۳۵	۰/۶۱	-۲۰/۶
۴	۰	۲	۰	۰	۹	۳۷۸۱۴۵	۲۰۸۱۶۳	۰/۵۵	-۳/۸
۵	۰	۳	۰	۸	۲	۴۳۳۸۷۱	۲۳۵۰۸۸	۰/۵۴	۱۰/۴
۶	۰	۱۱	۳	۳	۰	۴۵۶۴۵۲	۲۳۸۵۹۶	۰/۵۲	۱۶/۱
۷	۴	۰	۲	۱۲	۰	۵۰۵۴۳۹	۲۶۵۱۰۴	۰/۵۲	۲۸/۶
۸	۸	۰	۰	۱۳	۰	۵۴۵۱۶۱	۲۹۴۷۳۷	۰/۵۴	۳۸/۷
۹	۲	۰	۲	۱۵	۰	۵۹۶۷۷۴	۳۲۹۸۲۵	۰/۵۵	۵۱/۹
۱۰	۰	۰	۲	۱۳	۳	۶۲۳۶۳۸	۳۳۵۳۶۵	۰/۵۴	۵۸/۷
۱۱	۲	۰	۲	۹	۷	۶۳۹۵۴۹	۳۶۵۵۱۰	۰/۵۷	۶۲/۷
۱۲	۲	۰	۲	۱۳	۴	۶۶۰۸۷۷	۳۸۳۴۶۴	۰/۵۸	۶۸/۲
۱۳	۲	۲	۰	۹	۹	۶۸۷۰۹۷	۴۰۷۵۶۱	۰/۵۹	۷۴/۸
۱۴	۹	۰	۰	۱۴	۴	۷۱۴۵۱۶	۴۲۸۰۷۰	۰/۶۰	۸۱/۸
۱۵	۰	۲	۲	۲۱	۰	۷۷۱۰۳۲	۴۶۱۵۷۹	۰/۶۰	۹۶/۲
۱۶	۳	۰	۰	۱۴	۸	۷۹۳۵۴۸	۴۸۴۲۱۱	۰/۶۱	۱۰۱/۹
۱۷	۲	۲	۷	۱۰	۹	۸۲۷۴۸۷	۵۱۳۹۴۸	۰/۶۲	۱۱۰/۶
۱۸	۰	۶	۲	۱۷	۶	۸۵۹۶۷۷	۵۴۰۳۵۱	۰/۶۳	۱۱۸/۷
۱۹	۲	۰	۵	۱۸	۵	۸۷۸۳۰۷	۵۷۹۱۸۴	۰/۶۶	۱۲۳/۵
۲۰	۰	۳	۰	۱۷	۹	۸۹۸۸۲۳	۶۰۲۴۵۶	۰/۶۷	۱۲۸/۷
۲۱	۳	۰	۰	۱۰	۱۷	۹۱۶۱۲۹	۶۳۲۶۳۲	۰/۶۹	۱۳۳/۱
۲۲	۲	۰	۲	۱۴	۱۵	۹۴۵۱۶۱	۶۵۷۸۹۵	۰/۷۰	۱۴۰/۵
۲۳	۲	۰	۲	۲۹	۵	۹۵۷۷۹۹	۶۷۲۷۱۶	۰/۷۰	۱۴۳/۷
۲۴	۰	۲	۰	۱۹	۱۳	۹۵۹۶۷۷	۶۹۸۲۴۶	۰/۷۳	۱۴۴/۲
۲۵	۰	۲	۲	۱۸	۱۴	۹۶۱۲۹۰	۷۳۳۳۳۳	۰/۷۶	۱۴۴/۶
۲۶	۳	۲	۴	۱۹	۱۲	۹۶۴۵۱۶	۷۵۴۳۸۶	۰/۷۸	۱۴۵/۴
۲۷	۰	۹	۰	۱۸	۱۵	۹۶۷۷۴۲	۷۸۹۴۷۴	۰/۸۲	۱۴۶/۲
۲۸	۳	۵	۰	۱۴	۲۰	۹۷۲۵۸۱	۸۳۸۵۹۶	۰/۸۶	۱۴۷/۵
۲۹	۰	۰	۸	۲۱	۱۵	۹۷۴۱۹۴	۸۸۴۲۱۱	۰/۹۱	۱۴۷/۹
۳۰	۰	۳	۵	۲۱	۱۷	۹۷۵۸۰۶	۹۲۲۸۰۷	۰/۹۵	۱۴۸/۳



نمودار ۲: هزینه عملیاتی کل به تولید در یک هفته معدن برای اعضای جبهه پارتو نهایی

تنی نیز استفاده می‌شود.

۴- در بخش دوم بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی از سناریو پنج تا نوزده هزینه عملیاتی واحد تولید از سیستم فعلی معدن (که ۰/۶۶ دلار بر تن است) کمتر می‌باشد این در حالی است که در بین این سناریوها مینیمم ۱۰ و ماکزیمم ۱۲۳ درصد افزایش تولید نسبت به وضعیت فعلی وجود دارد. بیشترین کاهش هزینه عملیاتی واحد تولید مربوط به سناریوهای ۶ و ۷ با ۲۳ درصد کاهش و بیشترین تولید مربوط به سناریو ۱۹ با ۱۲۳ درصد افزایش تولید است.

۵- در نتیجه روش پیشنهادی بخش دوم بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی و با توجه به نمودار (۲)، مشاهده می‌شود که از سناریو بیست و سه به بعد با افزایش هزینه عملیاتی واحد تولید، تناژ تولیدی تقریباً ثابت می‌ماند. از میان هشت سناریو آخر سناریو بیست و سوم با افزایش تولید ۱۴۳ درصدی نسبت به وضعیت فعلی و دارا بودن کمترین هزینه نسبت به هفت سناریوی دیگر به عنوان گزینه بهتر انتخاب می‌شود. این سناریو شامل ۲، ۰، ۲، ۲۹ و ۵ دستگاه به ترتیب ۳۰، ۶۰، ۷۰، ۱۰۰ و ۱۶۰ تنی می‌باشد.

۶- از میان دو سناریوی نوزده (هزینه عملیاتی واحد تولید کمتر و افزایش ۱۲۳/۵ درصدی تناژ تولیدی نسبت به سیستم فعلی) و بیست و سه (هزینه عملیاتی واحد تولید بیشتر و افزایش ۱۴۳/۷ درصدی تناژ تولیدی نسبت به سیستم فعلی) سناریو بیست و سه انتخاب می‌شود. چون این سناریو با افزایش ۲۰،۲ درصدی تناژ تولید نسبت به سناریو نوزده، تنها ۶ درصد هزینه عملیاتی واحد تولید بیشتر از آن دارد.

۷- کامیون‌های ۱۰۰ و ۱۶۰ تنی بیشترین فراوانی را در

## ۶- نتیجه‌گیری

۱- با اجرای مدل شبیه‌سازی سیستم فعلی معدن در نرم‌افزار Arena، میانگین بهره‌وری از زمان برنامه‌ریزی شده بارکننده‌ها ۶۳/۴ درصد به دست آمد. از بین آن‌ها بارکننده ششم دارای کمترین و بارکننده پنجم دارای بیشترین بهره‌وری است. برای افزایش بهره‌وری اقدام به گسیل انعطاف‌پذیر کامیون‌ها با کمترین زمان انتظار برای بارگیری شد. در نتیجه تولید هفتگی معدن از ۳۹۳۰۰۰ تن به ۴۲۴۸۴۶ تن و بهره‌وری از زمان برنامه‌ریزی شده بارکننده‌ها به ۷۵/۳ درصد افزایش پیدا کرد.

۲- در بخش اول بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی با ثابت نگه داشتن نوع و تعداد بارکننده‌ها، تلاش صورت گرفت تا تعداد بهینه کامیون‌های ۳۰ و ۱۰۰ تنی با اهداف تولید بیشینه و هزینه کمینه به دست آورده شود. سناریوهای به دست آمده نشان دهنده افزایش تولید هفتگی معدن حداکثر تا ۵۷ درصد نسبت به وضعیت فعلی است. سناریویی با هزینه عملیاتی (دلار بر تن تولیدی) برابر با سیستم فعلی ۳۸/۶ درصد افزایش تولید را نشان می‌دهد که شامل ۲۵ و ۱۲ دستگاه به ترتیب ۳۰ و ۱۰۰ تنی است.

۳- در بخش اول بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی با بررسی زمان انتظار کامیون‌ها برای بارگیری مشخص شد که کامیون‌ها در ایستگاه‌های بارگیری ۲، ۴ و ۷ بایستی در صف‌های طولانی منتظر بمانند. از این‌رو در بخش دوم از شاول و لودر با ظرفیت بیشتر به جای آنها استفاده شد. همزمان با این شرایط از تنوع کامیونی هم استفاده شده است. به این معنی که کامیون‌های مورد استفاده تنها ۳۰ و ۱۰۰ تنی نیستند. در کنار این کامیون‌ها ۶۰، ۷۵ و ۱۴۴

سناریوهای به دست آمده از جبهه پارتو بهینه دارا می باشند. به عبارت دیگر استفاده از این نوع کامیون ها در معدن مورد مطالعه توصیه می شود.

#### ۷- پیشنهادها

۱- استفاده از الگوریتم های بهینه سازی چند هدفه دیگر مانند MOEA2، SPEA2 و ... همچنین مقایسه آن با نتایج این پژوهش به منظور افزایش کارایی روش پیشنهادی.

۲- به کارگیری روش پیشنهادی در بخش های دیگر معدن مانند برنامه ریزی تولید و ... می تواند مفید باشد.

#### ۸- مراجع

- [1] V.A. Temeng, a computerized model for truck dispatching in open pit mines, Michigan Technological University, 1997.
- [2] M.X. He, et al, "The genetic algorithm for truck dispatching problems in surface mine", Information Technology Journal, Vol. 9, No. 4, July 2010, pp. 710-714.
- [3] S. Nel, M.S. Kizil, and P. Knights, "Improving truck-shovel matching", 35th APCOM Symposium, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2011, pp. 381-391.
- [4] A. Syberfeldt, et al, "Multi-objective evolutionary simulation-optimisation of a real-world manufacturing problem", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 25, No. 6, June 2009, pp.926-931.
- [5] M.M. Fioroni, et al, "Concurrent simulation and optimization models for mining planning", Simulation Conference, Miami, USA, 2008.
- [6] M. Rodrigo, et al, "Availability-based simulation and optimization modeling framework for open-pit mine truck allocation under dynamic constraints", International Journal of Mining Science and Technology, Vol. 23, No. 1, January 2013, pp. 113-119.
- [7] D. Castillo, and J.K. Cochran, "A microcomputer approach for simulating truck haulage systems in open pit mining", Computers in Industry, Vol. 8, No. 1, January 1987, pp. 37-47.
- [8] N. ÇETIN, Open-pit truck/shovel haulage system simulation, a thesis of the graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University, Turkey, 2004.
- [9] E. Bozorgebrahimi, "he evaluation of haulage truck size effects on open pit mining, UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA, 2004.
- [10] A. Jaoua, M. Gamache, and D. Riopel, "Specification of an intelligent simulation-based real time control architecture: Application to truck control system", Computers in Industry, Vol. 63, No. 9, 2012, pp.882-894.
- [۱۱] ن. آزادی، م. منجری و م. عطایی پور، "بهبود اندازه ناوگان حمل و نقل معدن مس سونگون با استفاده از روش شبیه سازی"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۲، شماره ۳۹، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۹۹-۱۱۰.
- [12] B.K Cross, and G.B. Williamson, "Digital simulation of an open-pit truck haulage system", 8th APCOM, AIME, New York, 1969, pp. 385-400.
- [13] R. Brake, and P.K. Chatterjee, "Evaluation of truck dispatching and simulation methods in large-scale open-pit operations", Infrared Physics, Proceedings of the 16th APCOM, SME, New York, 1979, pp. 375-383.
- [14] J.H. Tu, and V.J. Hucka, "ANALYSIS OF OPEN-PIT TRUCK HAULAGE SYSTEM BY USE OF a COMPUTER-MODEL", CIM bulletin, Vol. 78, No. 879, 1985, pp.53-59.
- [15] S. Tan, and R. Ramani, "Optimization models for scheduling ore and waste production in open pit mines", Proceedings of the 23rd International Symposium on Applications of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, 1992.
- [16] F. Soumis, J. Ethier, and J. Elbrond, "Truck dispatching in an open pit mine", International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, Vol. 3, No. 2, 1989, pp.115-119.
- [۱۷] ص. داوری، "آنالیز کارایی سیستم حمل و نقل در معدن سونگون با استفاده از شبیه سازی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه

صنعتی سهند تبریز، ۱۳۹۱.

- [18] El-Gh. Talbi, et al, "Multi-objective optimization using metaheuristics: non-standard algorithms", *International Transactions in Operational Research*, Vol. 19, Nos 1–2, 2012, pp.283–305.
- [19] N. Nedjah, L.S. Coelho, and L.M. Mourelle, *Multi-Objective Swarm Intelligent System*, Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [20] El-Gh. Talbi, *Metaheuristics: from design to implementation*, Vol. 74, John Wiley & Sons, 2009.
- [۲۱] ع.ا. حسنی، "الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی برای حل یک مدل دو هدفه استوار جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر دومرحله‌ای با خط مونتاژ اختصاصی تحت عدم قطعیت"، نشریه مدلسازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۵۰، پاییز ۱۳۹۶، صفحه ۴۷–۲۵.
- [22] C.A.C Coello, G.T. Pulido, and M.S. Lechuga, "Handling multiple objectives with particle swarm optimization", *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, Vol. 8, No. 3, 2004, pp.256–27.
- [۲۳] ن. مرعشی، "سیستم‌های زمان سنجی"، بصیر، چاپ اول، ۱۳۷۶.
- [24] T. Altiok, and B. Melamed, *Simulation modeling and analysis with Arena*, Academic press, 2010.
- [25] J. Banks, J.S. Carson, B.L. Nelson, and, D.M. Nicol, "Discrete event system simulation", 5th Edition, Prentice hall, 2010.
- [۲۶] ع. لشگری، "تخمین هزینه‌های ماشین‌آلات و تجهیزات عملیات تولیدی در معادن روباز"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۹.