



Optimum Solution for Supply Chain Management in Thermal Power Plants

Mohammad Pourhabib Yekta Sharami & Rasoul Shafaei

Mohammad Pourhabib Yekta Sharami, Master Student, Department of Industrial Engineering, K. N. Toosi University of Technology

Rasoul Shafaei, Associate Professor, Department of Industrial Engineering, K. N. Toosi University of Technology

Keywords

Supply chain management, Overhauls, Spare parts logistics, Gas power plant, Robust optimization.

ABSTRACT

Nowadays supply chain management plays an important role in minimizing total cost while intending to deliver the products on time. Due to the competitive market condition and uncertainty in demands, researchers have widely studied this problem in various industries in both deterministic and uncertain environment. Among these industries power generation industry is considered as one of the important one as it has a significant impact on other industries. In this research a supply chain management problem for a power plant with four gas turbines has been studied. For this purpose, an integer nonlinear programming model is developed. The model was then converted into a linear model using a heuristic method. In addition, due to the uncertainty on demand, a robust optimization model is developed. The data required was collected from a real world environment. The results of the problem solved using GAMS reveal that the proposed model outperforms the other methods being used in the power plants.

© 2017 IUST Publication, IJIEPM Vol. 28, No. 3, All Rights Reserved



حل بهینه مسئله مدیریت زنجیره تأمین در نیروگاه‌های حرارتی

محمد پورحبیب یکتا شرمی و رسول شفائی*

چکیده:

امروزه مدیریت کارای زنجیره تأمین در صنایع مختلف از اهمیت بالایی در تولید به موقع و کاهش هزینه‌ها برخوردار بوده و با توجه به رقابتی شدن بازارها، مدیریت زنجیره تأمین، مخصوصاً در شرایط عدم قطعیت، بیش از پیش مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در بین صنایع مختلف در ایران، صنایع نیروگاهی از صنایع مهمی است که نقش ویژه‌ای در توسعه اقتصادی دارد. لذا در این حوزه مدیریت کارای زنجیره تأمین با هدف تأمین به موقع قطعات و کاهش هزینه‌ها ضروری می‌باشد. در این مقاله مدیریت زنجیره تأمین قطعات یدکی نیروگاه‌های گازی در ایران مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، مسئله مربوط به یک نیروگاه با چهار واحد گازی در نظر گرفته شده و یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی با در نظر گرفتن هزینه خرید و نگهداری قطعات و هزینه خواب سرمایه در یک افق زمانی پانزده ساله پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی با استفاده از یک روش ابتکاری به یک مدل خطی تبدیل شده است. همچنین با توجه به عدم قطعیت در تقاضا، مسئله با استفاده از روش بهینه‌سازی استوار مدل‌سازی و حل شده است. برای این منظور داده‌های مسئله از محیط واقعی جمع‌آوری گردیده و مدل مبتنی بر داده‌های مذکور با استفاده از GAMS حل شده است. نتایج بررسی انجام شده بیانگر کارایی بهتر روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های معمول در نیروگاه‌های ایران می‌باشد.

کلمات کلیدی

مدیریت زنجیره تأمین،
تعمیرات اساسی،
لجستیک قطعات یدکی،
نیروگاه گازی،
بهینه‌سازی استوار.

۱. مقدمه

مدیریت زنجیره تأمین از ابزارهای مهم و اساسی برای رقابت کارا با سایر رقبای در دنیای تجاری امروز می‌باشد، به طوری که تمامی شرکت‌های پیشرو مخصوصاً در صنایع تولیدی توجه و سرمایه‌گذاری ویژه‌ای در این بخش داشته‌اند. زنجیره تأمین مستقیم را می‌توان مدیریت جریان منابع بین نقطه مبدأ و نقطه مقصد به منظور برآورده نمودن برخی شرایط برای مثال مشتریان و یا شرکت‌های بزرگ در نظر گرفت. زنجیره تأمین می‌تواند شامل اقلام فیزیکی از جمله قطعات، مواد، تجهیزات و همچنین موارد غیر فیزیکی مانند اطلاعات باشد [1]. زنجیره تأمین را می‌توان در مسیر معکوس نیز در نظر گرفت.

تاریخ وصول: ۹۴/۰۴/۲۴

تاریخ تصویب: ۹۵/۱۰/۲۸

محمد پورحبیب یکتا شرمی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی mpourhabib@mail.kntu.ac.ir

*نویسنده مسئول مقاله: رسول شفائی، دانشیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی shafaei@kntu.ac.ir

لجستیک معکوس فرایند برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل کارای هزینه‌های مختلف از جمله جریان مواد خام، موجودی در حال ساخت، کالاهای تمام‌شده و جریان اطلاعات از نقطه مصرف به نقطه مبدأ به منظور بازپس‌گیری و یا خلق ارزش و یا دفع مناسب است [2]. همچنین اگر زنجیره تأمین مستقیم و معکوس به طور هم‌زمان در طراحی و برنامه‌ریزی در نظر گرفته شود، به آن زنجیره تأمین یکپارچه گفته می‌شود. تأمین کارای انرژی الکتریکی یکی از ارکان مهم توسعه و پیشرفت در هر کشوری می‌باشد و حجم سرمایه‌گذاری‌های صورت گرفته و سطح تکنولوژی و دانش فنی به کار گرفته‌شده در این بخش، نشان‌دهنده اهمیت صنایع نیروگاهی در ایران است. مدیریت زنجیره تأمین در حوزه‌ی قطعات یدکی در نیروگاه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. چراکه ضعف در مدیریت تأمین قطعات ممکن است به ازکارافتادن نیروگاه‌ها، بازدهی پایین و هزینه‌های بسیار بالایی در بخش نگهداری این واحدها منجر شود. از این رو وجود یک زنجیره تأمین کارآمد در جهت تأمین به موقع قطعات به منظور تعویض و یا تعمیر و نوسازی و همچنین کاهش هزینه‌های مختلف ضروری و بسیار سودمند است. بررسی‌های انجام‌شده در

یک مدل ریاضی به منظور تحلیل راهبرد مشترک‌سازی مولفه‌ها و انتخاب بهترین ترکیب مولفه‌های قابل اشتراک در محصولات ارائه نموده‌اند که با بهره‌گیری از زنجیره تأمین مبتنی بر سکو و صرفه‌جویی ناشی از استفاده منابع مشترک در عملکرد زنجیره تأمین بهبود ایجاد می‌نماید. در حوزه زنجیره تأمین قطعات یدکی نیز پژوهش‌های بسیاری صورت گرفته است. یانگ کانگ و همکاران [10] یک سیستم عمومی زنجیره تأمین جهت مدیریت قطعات یدکی ارائه نمودند که شامل طراحی شبکه لجستیک، انتخاب فروشندگان و انتخاب روش‌های حمل‌ونقل می‌باشد. فرازون و همکاران [11] با ارائه مقاله‌ای نحوه به‌کارگیری سیستم‌های نگهداری هوشمند جهت پیش‌بینی تقاضا برای قطعات یدکی و هماهنگی با برنامه‌ریزی عملیات را در راستای طراحی زنجیره تأمین قطعات یدکی موردبررسی قرار دادند. کاظمی و نورالفتح [12] مسئله هماهنگی لجستیک قطعات یدکی و برنامه‌ریزی عملیات برای شرکت‌های نگهداری و تعمیرات طرف سوم را موردبررسی قرار دادند. در این مقاله یک مدل ریاضی جهت کمینه نمودن هزینه‌هایی از جمله هزینه موجودی و جریمه تحویل پس از موعد در دو حالت قطعی و عدم قطعیت ارائه شده است. وانگ [13] مدلی به‌منظور بهینه‌سازی حجم سفارش، فاصله سفارش و فاصله بازرسی به‌طور هم‌زمان ارائه داد و فرایند نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه را بر مبنای بازرسی و با واسطی تحت عنوان زمان تأخیر در مدل خود در نظر گرفت. گودوی و همکاران [14] مدلی جهت ایجاد هماهنگی بین سرویس‌دهندگان بیرونی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات و مشتری و نیز افزایش ارزش در زنجیره تأمین قطعات یدکی ارائه نمودند و همچنین یک چارچوب تصمیم‌گیری بین دو سناریو نگهداری قطعات توسط مشتری و یا شرکت‌های طرف سوم در جهت ایجاد ارزش‌های مشترک و انگیزه در پژوهش خود ارائه نمودند. جین و تیان [15] رویکردی برای مدیریت قابلیت اطمینان و لجستیک قطعات در شرایط متغیر بودن نرخ تقاضا با میانگین و واریانس متغیر در طول زمان و در چارچوب قراردادهای مبتنی بر عملکرد باهدف کمینه نمودن هزینه‌ها ارائه نمودند. تیموری و فراهانی [16] مدلی جهت تحلیل تقاضای قطعات یدکی و پیش‌بینی آن با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان قطعات، عوامل محیطی موثر بر شکست و برهم‌کنش شکست قطعات ارائه دادند و از داده‌های شرکت ایساکو به عنوان مطالعه موردی پژوهش خود بهره گرفتند. جمع‌بندی مقالات مرور شده در این بخش در جدول ۱ قابل مشاهده است. با توجه به مطالبی که در این بخش گفته شد، عدم وجود یک مدل زنجیره تأمین کارآمد باهدف تأمین به‌موقع قطعات یدکی در نیروگاه‌ها باهدف کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی در نیروگاه‌ها را می‌توان به‌عنوان یک خلأ تحقیقاتی در نظر گرفت.

این تحقیق نشان می‌دهد که حدود ۸۰٪ برق تولیدی در ایران به کمک نیروگاه‌های گازی سیکل ترکیبی بوده و نقش واحدهای ۷۹۴.۲ در این سهم قابل‌توجه می‌باشد. در این مقاله یک زنجیره تأمین یکپارچه جهت مدیریت کارای قطعات اصلی مورد استفاده در توربین‌های به‌کاررفته در نیروگاه‌های گازی، شامل خرید قطعات جدید و تعمیر و نوسازی قطعات فعلی در جهت کمینه نمودن هزینه‌های خرید و سفارش، نگهداری و خواب سرمایه ارائه و حل شده است. در ادامه مقاله به‌مرور مختصری از پژوهش‌های صورت گرفته در این حوزه پرداخته و خلأ تحقیقاتی بیان خواهد شد. در محث زنجیره تأمین با محوریت زنجیره تأمین نیروگاه‌ها و قطعات، پژوهش‌های متعددی صورت گرفته است. بسیاری از این پژوهش‌ها در حوزه انرژی‌های نو از جمله بيو انرژی می‌باشد که می‌توان آن‌ها زیرمجموعه زنجیره تأمین سبز در نظر گرفت. ژانگ و عثمانی [3] پژوهشی در زمینه طراحی و تخصیص بهینه منابع زیست‌توده و باد برای زنجیره تأمین تولید برق تحت عدم قطعیت انجام داده‌اند و یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی در جهت ایجاد توازن در تقاضا از طریق هریک از منابع انجام داده‌اند. تراچت و همکاران [4] به برنامه‌ریزی قطعات یدکی در توربین‌های بادی دور از ساحل پرداخته و با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود و راه‌کارهای مقابله با آن مدل خود را برای یک قطعه اصلی مانند گیربکس ارائه نموده‌اند. از نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به در نظر گرفتن محدودیت امکان‌پذیر یا عدم امکان‌پذیر بودن شرایط انجام تعمیرات اشاره کرد. مبینی و همکاران [5] یک شبکه لجستیک به‌منظور مدیریت زیست‌توده‌ها در یک نیروگاه بالقوه ارائه نمودند که در آن یک مدل شبیه‌سازی بر اساس ساختار یکپارچه زیست‌توده‌ها جهت ارزیابی هزینه‌ها، میزان گازهای آلاینده آزاد شده و رطوبت مواد اولیه، به کار گرفته شده است. آنگل و همکاران [6] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی برای تولید انرژی پاک به کمک ترکیبی از زیست‌توده‌ها و سوخت‌های فسیلی ارائه نمودند که مدل‌سازی مسئله با توجه به داده‌های ورودی نظیر مکان و ظرفیت نیروگاه‌ها، میزان تقاضای نیروی برق، جریان مواد خام و غیره صورت گرفته است. مظاهری، کرباسیان و همکاران [7] یک مدل زنجیره تأمین یکپارچه تصادفی دو مرحله‌ای تحت سناریوهای مختلف و چندین تأمین‌کننده و تولیدکننده با هدف حداکثر نمودن ارضای تقاضا با امکان کنترل ریسک مالی و کمینه نمودن کمبودها ارائه دادند و از مقیاس شش سیگما به منظور حداقل سازی عیوب مواد و قطعات استفاده نموده و با داده‌های تصادفی با استفاده از نرم افزار لینگو حل نمودند. امتحانی و رفیعی [8] یک مدل چندمحصولی را در یک زنجیره تأمین سه سطحی با هدف انتخاب تأمین‌کننده و تعیین مقدار سفارش به هر کدام و یکپارچه‌سازی تصمیمات موجودی در زنجیره تأمین ارائه داده و با الگوریتم ژنتیک به حل آن پرداخته‌اند. شفیعا، آریانزاد و فتح‌اله [9]

جدول ۱. جمع بندی مقالات مرور شده

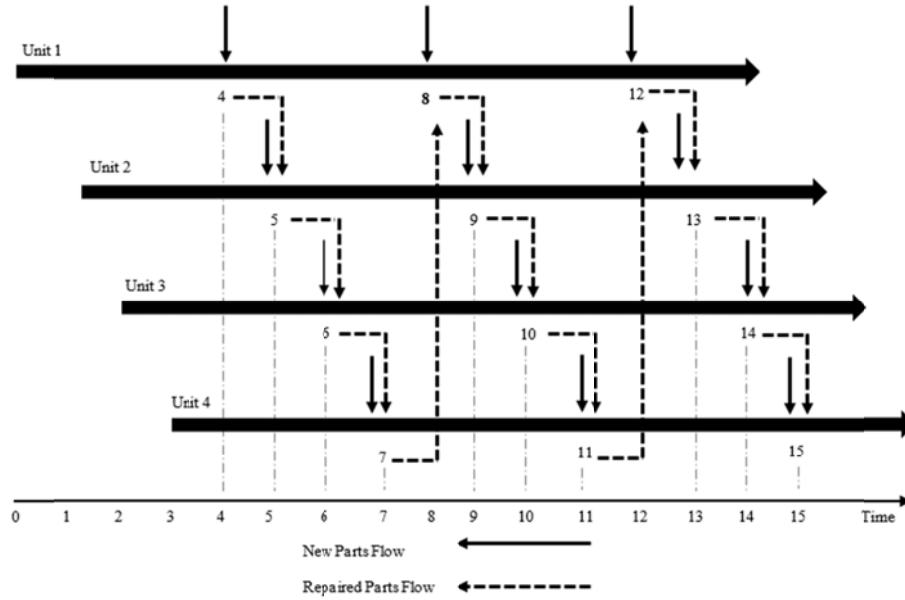
موضوع	مراجع
زنجیره تأمین نیروگاه‌ها	۳، ۴، ۵، ۶
زنجیره تأمین در صنایع	۷، ۸، ۹
مدل‌سازی جریان قطعات یدکی	۱۰ الی ۱۶

هدف اصلی این مقاله ارائه مدلی جهت مدیریت کارای قطعات یدکی اصلی در توربین‌های گازی مورد استفاده در نیروگاه‌های گازی و حل آن می‌باشد. ساختار این مقاله در ادامه به شکل زیر خواهد بود. در بخش دوم مسئله مورد نظر تعریف شده و بخش سوم مدل‌سازی ریاضی مسئله انجام می‌شود. بخش چهارم شامل خطی‌سازی مدل پیشنهادی و افزودن عدم قطعیت به آن است و در بخش پنجم داده‌های جمع‌آوری شده از صنایع نیروگاهی برای حل مسئله تشریح می‌شود. در بخش ششم نتایج حاصل از حل مسئله ارائه می‌شود و در بخش هفتم جمع‌بندی تحقیق و پیشنهاد برای تحقیقات آتی ارائه خواهد شد.

۲. تعریف مسئله

همان‌طور که پیش‌از این گفته شد در این پژوهش یک مدل زنجیره تأمین برای قطعات اصلی مورد استفاده در توربین‌های نیروگاه گازی ارائه شده است. اصلی‌ترین قطعات به‌کاررفته در این توربین‌ها قطعات داغ آن بوده و از بین آن‌ها، پره‌های توربین از ارزش و اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. توربین‌های گازی عمدتاً دارای دو نوع پره می‌باشند، پره‌های ثابت یا نازل و پره‌های متحرک که هرکدام کارکرد خاصی داخل توربین‌ها دارند. بر روی توربین‌های گازی نوع ۷۹۴.۲ زمینس که از آن بالغ بر ۱۶۰ واحد نصب و در حال بهره‌برداری می‌باشد از هرکدام از پره‌های ثابت و متحرک چهار ردیف قرار دارد. در این مقاله پره‌های ثابت ردیف اول تا چهارم را به ترتیب با حروف v1، v2، v3 و v4 و پره‌های متحرک را با حروف b1، b2، b3 و b4 نشان می‌دهیم. سهم ارزشی این قطعات از کل قطعات مورد نیاز جهت تعمیرات توربین‌ها نزدیک به ۸۰٪ است. هرکدام از این پره‌ها می‌توانند عمر متفاوت و نرخ خرابی یا اسقاط متفاوتی داشته باشند. همچنین هر نیروگاه با توجه به سیاست‌ها، نوع توربین‌ها و سایر عوامل می‌تواند تعمیرات اساسی را در فاصله‌های زمانی مشخصی باهدف جایگزینی و یا تعمیر قطعات انجام دهد. هدف این پژوهش ارائه مدلی جهت مدیریت زنجیره تأمین باهدف تأمین به‌موقع این قطعات در تعمیرات اساسی و در راستای کمینه کردن هزینه‌هایی چون هزینه سفارش و خرید، هزینه نگهداری و هزینه خواب سرمایه می‌باشد. در ادامه به بیان

برخی مفروضات مسئله پرداخته می‌شود. در این پژوهش یک نیروگاه چهار واحدی گازی در نظر گرفته شده است که بر اساس خطومشی مدیریت، تعمیرات اساسی هر واحد هر چهار سال یک‌بار باید صورت پذیرد. در تعمیرات اساسی روی هر یک از واحدها، پس از باز شدن توربین، تعدادی از پره‌ها با توجه به نرخ بازسازی‌شان قابل تعمیر بوده و امکان بازسازی آن‌ها و ارجاع آن‌ها به انبار جهت استفاده‌های آتی وجود دارد. البته این تعمیرات زمان‌بر بوده و در این تحقیق مدت‌زمان لازم برای بازسازی آن‌ها یک سال در نظر گرفته شده است. بنابراین هنگامی که یک توربین باز شود، قطعاتی که قابل تعمیر باشند پس از یک سال قابل بهره‌برداری در واحد بعدی می‌باشند. همچنین بخش دیگری از پره‌ها می‌بایست خریداری شوند که برای خرید پره‌های جدید نیز مدت‌زمان تحویل یک‌ساله ملحوظ شده است. این زمان شامل مدت‌زمان استاندارد از زمان ثبت سفارش تا تحویل قطعات می‌باشد. از تجمیع قطعات تعمیر شده و قطعات جدید، قطعات مورد نیاز برای تعمیرات توربین‌ها در دسترس خواهد بود. در شکل ۱ جریان قطعات بر اساس توضیحات فوق قابل مشاهده است. در این شکل رویکرد تعمیرات واحدها براساس مصاحبه با نخبگان و مدیران صنایع نیروگاهی در ایران، نشان داده شده است. اعداد درج‌شده روی محورهای زمان انجام تعمیرات اساسی در هر واحد را به سال نشان می‌دهد. فرض بر این است که تعمیرات اساسی در هیچ دو واحدی در یک سال انجام نمی‌شود و برنامه‌ریزی به‌گونه‌ای صورت می‌گیرد که در هر سال حداکثر یک واحد مورد تعمیرات اساسی واقع شود. به‌عنوان مثال، واحد ۱ در سال‌های ۰۴، ۸ و ۱۲ باز شده و تعمیرات اساسی روی آن صورت گیرد. همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است یک افق زمانی پانزده‌ساله به‌منظور انجام سه بار تعمیرات اساسی بر روی هرکدام از چهار واحد در نظر گرفته شده است. این برنامه‌ریزی ملاک تعمیرات اساسی واحدهای ۷۹۴.۲ در ایران می‌باشد [17]. قیمت قطعات متغیر و با نرخ ثابتی در هر سال که تابعی از نرخ تورم بوده افزایش می‌یابد. به‌علاوه در این تحقیق، تخفیف برای خرید قطعات در اندازه‌های بیشتر در نظر گرفته شده است. هزینه‌هایی که در این مدل مورد توجه قرار گرفته‌اند عبارت‌اند از هزینه سفارش و خرید، هزینه نگهداری و هزینه خواب سرمایه. تقاضای اسمی برای هر قطعه در هر سال با توجه به زمان‌بندی تعمیرات در واحدها معین بوده و حجم قطعات قابل تعمیر با توجه به نرخ بازسازی‌شان قابل محاسبه می‌باشد. در ادامه مدل پیشنهادی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



شکل ۱. زمان‌بندی تعمیرات اساسی در واحدهای مختلف گازی و جریان

- \hat{d}_{ijt} : حداکثر انحراف تقاضا از مقدار اسمی خود متغیرها:
- Q_{it} : حجم سفارش قطعه نوع i در سال t
- Q_{kit} : حجم سفارش قطعه نوع i در سال t از بازه تخفیف k ام
- I_{it} : موجودی قطعه i در انتهای سال t ام
- S_{it} : خواب سرمایه قطعه i در سال t ام
- λ_{kit} : متغیر ۰ و ۱ جهت تعیین بازه تخفیف قطعه i در بازه تخفیف k در هر سال (خرید/عدم خرید قطعه i در سال t از بازه قیمت k)
- z_{it} : متغیر کمکی مثبت قطعه i در هر سال جهت اعمال استواری در مدل
- μ_{ijt} : متغیر کمکی مثبت قطعه i در هر سال جهت اعمال استواری مدل برای اعمال استواری مدل با توجه به موارد تشریح شده فوق‌الذکر، مدل ریاضی پیشنهادی برای حل مسئله به شرح زیر ارائه می‌شود:

۳. مدل‌سازی ریاضی مسئله در شرایط قطعی

در این بخش برای مسئله تعریف‌شده یک مدل ریاضی ارائه می‌شود. مدل پیشنهادی یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی با تابع هدف حداقل سازی هزینه‌ها می‌باشد. در ادامه اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل معرفی می‌شوند.

اندیس‌ها:

- k : شماره بازه‌های تخفیف ($k = 1, 2, 3$)
- j : شماره واحدهای نیروگاه ($j = 1, 2, \dots, 4$)
- i : نوع قطعه ($i = 1, 2, \dots, 8$)
- t : زمان با واحد سال ($t = 1, 2, \dots, 15$)

پارامترها:

- P_{kit} : قیمت قطعه i در بازه تخفیف k ام در هر سال
- h_i : هزینه نگهداری قطعه i ام در هر سال
- d_{ijt} : تقاضای قطعه i در سال t و در واحد j ام
- Y_{ijt} : حجم (تعداد) قطعات تعمیر شده از نوع i در سال t از واحد j ام
- q_{ki} : نقطه تخفیف k ام برای قطعه i بر مبنای تعداد سفارش قطعه i
- β : نرخ خواب سرمایه
- Lb : حداقل تعداد مجاز برای سفارش پره‌ها (بر اساس محدودیت از جانب تأمین‌کننده)
- A : هزینه سفارش دهی
- B_t : محدودیت بودجه در سال t
- Γ_{it} : بودجه عدم قطعیت قطعه i در هر سال

استفاده شده است. محدودیت شماره ۵ به‌منظور محاسبه خواب سرمایه است. تابع خواب سرمایه قطعه i ام را در سال t محاسبه می‌کند. در محاسبه خواب سرمایه، قطعاتی که خریداری شده ولی استفاده نشده‌اند باید در نظر گرفته شوند. از این رو برای محاسبه خواب سرمایه قطعه i در سال دلخواه t می‌بایست مجموع تقاضای قطعه i از ابتدا تا سال t را از مجموع قطعات خریداری شده قطعه i از ابتدا تا سال t کسر کرد. البته باید به قطعات تعمیر شده از سال‌های قبل که بخش مهمی از تقاضا را تأمین می‌کنند توجه نمود. بنابراین خواب سرمایه قطعه i در سال t به‌صورت رابطه ۵ محاسبه می‌شود. در واقع عبارت I_{it} جایگزین $(Q_{it} - (\sum_{j=2}^t d_{ijt} - \sum_{j=2}^t y_{ijt}))$ را می‌توان با I_{it} جایگزین نمود. همچنین به این دلیل که سفارشات از سال یک شروع می‌شوند و مدت‌زمان تحویل یک‌ساله است، محاسبه تابع خواب سرمایه از سال دوم ($t \geq 2$) آغاز می‌شود. در محاسبه خواب سرمایه از قیمت‌های پایه (بدون تخفیف، $k = 1$) استفاده شده است. محدودیت ۶، محدودیت مربوط به سقف بودجه سالانه است و نهایتاً محدودیت شماره ۷ تضمین می‌کند که تعداد سفارشات از یک تعداد مشخص حداقلی که از جانب تأمین کننده قطعات تحویل می‌شود (Lb)، کمتر نباشند. مدل پیشنهادی در این بخش، یک مدل غیرخطی است که علاوه طولانی بودن زمان حل، در نظر گرفتن شرایط غیرقطعی را دشوار می‌کند.

۴. خطی سازی مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن

شرایط غیر قطعی

همانطور که گفته شد، مدل ارائه شده در بخش قبل یک مدل غیرخطی است و در این بخش بنا به دلایلی که ذکر شد، مدل پیشنهادی به یک مدل خطی تبدیل خواهد شد. همچنین در این بخش عدم قطعیت در تقاضا به کمک برنامه‌ریزی استوار و رویکرد برتسیماس و سیم به مدل اضافه خواهد شد. برای خطی سازی مدل پیشنهادی با اضافه نمودن اندیس k به متغیر اندازه سفارش، آن را به صورت Q_{kit} در نظر می‌گیریم. با این تغییر، محدودیت شماره ۳ برای هر نقطه تخفیف (k) به‌طور جداگانه نوشته می‌شود و به این ترتیب متغیرهای Q_{kit} و λ_{kit} به‌طور هم‌زمان مقدار خواهند گرفت. با این تغییر امکان حذف حاصل ضرب دو متغیر Q_{it} و λ_{kit} در تابع هدف وجود دارد و لذا مدل پیشنهادی یک مدل خطی خواهد بود. همچنین محدودیت‌های شماره ۲، ۶ و ۷ نیز می‌بایست متناسب با تغییر در تعریف متغیر حجم سفارش، به‌روز شوند و محدودیت شماره ۵ را با توجه به توضیحات فوق به جهت سهولت با استفاده از متغیر I_{it} بازنویسی شود. مدل خطی شده بر اساس تغییرات فوق به شکل زیر قابل بازنویسی است.

$$\min \sum_k \sum_i \sum_t (A \times \lambda_{kit} + Q_{it} P_{kit} \lambda_{kit}) + \sum_i \sum_t h_i I_{it} + \sum_i \sum_t S_{it} \quad (1)$$

$$s.t \quad \sum_j d_{ijt} \leq Q_{i(t-1)} + I_{i(t-1)} + \sum_j y_{ij(t-1)} - I_{it} \quad \forall i, t \quad (2)$$

$$\sum_k q_{(k-1)i} \lambda_{kit} \leq Q_{it} \leq \sum_k q_{ki} \lambda_{kit} \quad \forall i, t \quad (3)$$

$$\sum_k \lambda_{kit} \leq 1 \quad \forall i, t \quad (4)$$

$$S_{it} = \beta \times P_{it} \times \sum_{j=2}^t (Q_{it} - (\sum_j d_{ijt} - \sum_j y_{ijt})) \quad \forall i, t \quad (5)$$

$$\sum_i \sum_k (A \times \lambda_{kit} + Q_{it} P_{kit} \lambda_{kit}) \leq B_t \quad \forall t \quad (6)$$

$$Q_{it} \geq Lb \times \sum_k \lambda_{kit} \quad \forall i, t \quad (7)$$

Q_{it} : Integer variable

I_{it} : integer variable

$\lambda_{kit} = 0, 1$

در مدل فوق‌الذکر تابع هدف شامل هزینه‌های سفارش و خرید قطعات نو، هزینه نگهداری قطعات و هزینه خواب سرمایه است. منظور از قطعات همان پره‌های ثابت و متحرک می‌باشد. از آنجایی که قیمت خرید قطعات بالاست، در نظر گرفتن هزینه خواب سرمایه جهت ایجاد توازن با رشد سالانه قیمت‌ها ضروری است. مدل پیشنهادی به دنبال تعیین زمان و حجم سفارشات است به‌گونه‌ای که هم نیاز به قطعات جدید تأمین گردد و هم هزینه کل حداقل شود. در این مدل فرض شده است که سفارشات از سال ۱ شروع می‌شوند و موجودی و همچنین سفارشات در سال صفر (سال فعلی) برابر صفر می‌باشند. محدودیت شماره ۲ با توجه به مدت‌زمان تحویل یک‌ساله برای خرید قطعات جدید و نیز تعمیر قطعات استفاده شده، رابطه بین تقاضا، موجودی و سفارشات را نشان می‌دهد و تضمین می‌کند که خرید قطعات جدید متناسب با حجم تقاضا و قطعات تعمیر شده باشد. محدودیت‌های شماره ۳ و ۴ محدودیت‌های مربوط به تخفیف می‌باشند. در این دو محدودیت k تعداد بازه‌های تخفیف است که در این مدل برابر ۳ در نظر گرفته شده و متناسب با آن نقاط تخفیف q_{ki} تعریف می‌شوند. این دو محدودیت تضمین می‌کند که خرید قطعات نو با توجه به تعداد سفارش از یکی از بازه‌ها و باقیمت مربوط به همان بازه باشد. همچنین پارامتر λ_{kit} که تعیین کننده سفارش یا عدم سفارش قطعه i در بازه تخفیف k در سال t ام است، مطابق محدودیت شماره ۴ به ازای حداکثر یک k برای قطعه i در هر سال مقدار می‌گیرد و سفارش قطعه i در هر سال نیز (Q_{it}) در محدودیت شماره ۳ و تابع هدف حداکثر از یک بازه تخفیف خواهد بود. لذا از λ_{kit} در تابع هدف برای افزودن هزینه سفارش دهی به مدل نیز

$$\text{Min} \sum_j c_j x_j \quad (17)$$

$$\text{s.t.} \sum_j \tilde{a}_{ij} x_j + z_i \Gamma_i + \sum_{j \in J_i} \mu_{ij} \leq b_i \quad \forall i \quad (18)$$

$$z_i + \mu_{ij} \geq \hat{a}_{ij} x_{ij} \quad \forall i, j \quad (19)$$

$$z_i, \mu_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (20)$$

در این روابط z_i و μ_{ij} متغیرهای کمکی دوگان هستند و پارامتر Γ_i که بوجه عدم قطعیت نامیده می‌شود، سطح محافظه‌کاری را نشان می‌دهد که با توجه به میزان اهمیت محدودیت و نیز ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرنده انتخاب می‌شود. در نهایت با اعمال این تغییرات، مدل پیشنهادی به شکل زیر تغییر خواهد بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود این مدل یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی است و حل آن به روش دقیق و با سرعت بالا امکان‌پذیر می‌باشد. همچنین بر طبق مدل فوق و بر اساس محدودیت شماره ۱۶، پارامتر بوجه عدم قطعیت به ازای t و i ها تعریف شده و این بدین معنی است که مقدار این پارامتر به ازای تعداد واحدها یعنی اندیس j قابل تغییر است. بنابراین می‌تواند مقادیر حداقل صفر و حداکثر چهار را اتخاذ کند که این به ترتیب یعنی هیچ واحدی و یا حداکثر هر چهار واحد در نظر گرفته شده در مسئله به اندازه \hat{d}_{ijt} از تقاضای اسمی خود انحراف داشته باشند. لحاظ نمودن یک مقدار میانی در این بازه می‌تواند منجر به برقراری تعادل بین بهینگی و شدنی بودن مسئله شود. همچنین اگر بوجه عدم قطعیت برابر صفر باشد، تمامی واحدها تقاضایی برابر مقدار اسمی خود خواهند داشت و مدل در واقع در شرایط قطعیت است.

$$\text{min} \sum_k \sum_i \sum_t (A \times \lambda_{kit} + Q_{kit} P_{kit}) + \sum_i \sum_t h_i I_{it} + \sum_i \sum_t S_{it} \quad (21)$$

$$\text{s.t} \sum_j d_{ijt} + z_i \Gamma_i + \sum_j \mu_{ijt} \leq \sum_k Q_{kit(t-1)} + I_{i(t-1)} + \sum_j Y_{ij(t-1)} - I_{it} \quad \forall i, t \quad (22)$$

$$z_i + \mu_{ij} \geq \hat{d}_{ijt} \quad \forall i, j, t \quad (23)$$

$$q_{(k-1)i} \lambda_{kit} \leq Q_{kit} \leq q_{ki} \lambda_{kit} \quad \forall k, i, t \quad (24)$$

$$\sum_k \lambda_{kit} \leq 1 \quad \forall i, t \quad (25)$$

$$S_{it} = \beta \times P_{it} \times I_{it} \quad \forall i, \forall t \geq 2 \quad (26)$$

$$\sum_i \sum_k (A \times \lambda_{kit} + Q_{kit} P_{kit}) \leq B_t \quad \forall t \quad (27)$$

$$Q_{kit} \geq Lb \times \lambda_{kit} \quad \forall k, i, t \quad (28)$$

Q_{kit} : Integer variable

I_{it} : Integer variable

$$\mu_{ij}, z_i \geq 0$$

$$\lambda_{kit} = 0, 1$$

$$\text{min} \sum_k \sum_i \sum_t (A \times \lambda_{kit} + Q_{kit} P_{kit}) + \sum_i \sum_t h_i I_{it} + \sum_i \sum_t S_{it} \quad (8)$$

$$\text{s.t} \sum_j d_{ijt} \leq \sum_k Q_{kit(t-1)} + I_{i(t-1)} + \sum_j Y_{ij(t-1)} - I_{it} \quad \forall i, t \quad (9)$$

$$q_{(k-1)i} \lambda_{kit} \leq Q_{kit} \leq q_{ki} \lambda_{kit} \quad \forall k, i, t \quad (10)$$

$$\sum_k \lambda_{kit} \leq 1 \quad \forall i, t \quad (11)$$

$$S_{it} = \beta \times P_{it} \times I_{it} \quad \forall i, \forall t \geq 2 \quad (12)$$

$$\sum_i \sum_k (A \times \lambda_{kit} + Q_{kit} P_{kit}) \leq B_t \quad \forall t \quad (13)$$

$$Q_{kit} \geq Lb \times \lambda_{kit} \quad \forall k, i, t \quad (14)$$

Q_{kit} : Integer variable

I_{it} : Integer variable

$$\lambda_{kit} = 0, 1$$

بررسی‌ها در این پژوهش نشان می‌دهد که پارامتر تقاضا از جمله پارامترهای مهم بوده که مقادیر آن ممکن است از مقادیر اسمی فراتر رود. از این رو در نظر گرفتن این پارامتر در شرایط غیر قطعی می‌تواند مدل پیشنهادی را به واقعیت مسئله نزدیک‌تر کند. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا، همان‌طور که گفته شد از برنامه‌ریزی استوار و رویکرد برتسیماس و سیم استفاده خواهد شد. روش بهینه‌سازی استوار به دنبال جواب‌های بهینه یا نزدیک به بهینه‌ای است که با احتمال بالایی موجه باشند. رویکرد برتسیماس و سیم یکی از چهار رویکرد اصلی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در برنامه‌ریزی استوار است. در این قسمت اشاره مختصری به این رویکرد خواهیم نمود. برای این منظور مدل برنامه‌ریزی خطی زیر را در نظر می‌گیریم:

$$\text{Min} \sum_j c_j x_j \quad (16)$$

$$\text{s.t} \quad Ax \leq b$$

در این مدل فرض می‌کنیم که فقط ضرایب سمت راست در محدودیت‌ها یعنی ماتریس A دارای مقادیر غیرقطعی است و درایه‌های این ماتریس یعنی a_{ij} ها در بازه $[\tilde{a}_{ij} - \hat{a}_{ij}, \tilde{a}_{ij} + \hat{a}_{ij}]$ نوسان می‌کنند که \tilde{a}_{ij} و \hat{a}_{ij} به ترتیب مقادیر اسمی و حداکثر انحراف پارامتر a_{ij} می‌باشند. مدل استوار پیشنهادی برتسیماس و سیم به شکل زیر است [18]:

۵. داده‌های مسئله

دست پره به فضایی معادل یک و نیم مترمربع نیاز دارد و یک سوله با اجاره‌ای معادل ۳۳۰۰۰ یورو در سال برای نگهداری این قطعات لازم است، محاسبه شده است. هزینه نگهداری هر قطعه در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین در این جدول نقاط تخفیف مربوط به بازه‌های تخفیف ارائه شده است. به‌عنوان مثال برای خرید قطعه b_1 ، از ۰ تا ۸۹ پره، خرید با قیمت پایه ($k=1$)، از ۹۰ تا ۱۸۰ پره با خرید با ۱۰٪ تخفیف ($k=2$) و از ۱۸۰ پره به بالا خرید با ۲۰٪ تخفیف ($k=3$) نسبت به قیمت پایه توسط تأمین‌کننده ارائه می‌شوند. پارامتر تقاضا با توجه به جدول ۲ و شکل ۱ قابل محاسبه می‌باشد.

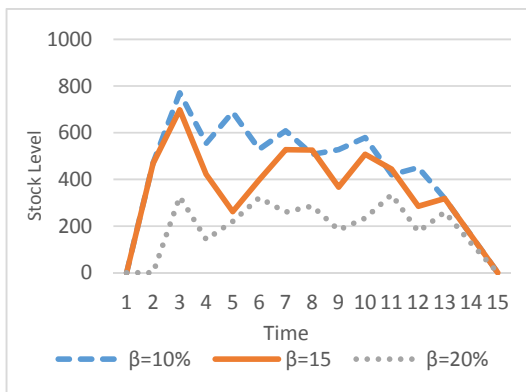
هرسالی که واحدی باز می‌شود یک دست از هر کدام از پره‌ها برای جایگزینی در توربین مورد نیاز می‌باشد. به‌عنوان مثال برای واحد یک، زمان انجام اولین تعمیرات اساسی سال چهارم بوده و برای انجام تعمیرات اساسی این واحد نیاز به یک دست از هر کدام از پره‌ها می‌باشد. به‌این ترتیب d_{i14} مقادیری مانند سطر دوم جدول ۲ خواهد داشت. به‌طور کلی تقاضا از دو منبع قطعات تعمیر شده و قطعات جدید خریداری شده قابل تأمین می‌باشد. باتوجه به توضیحات ارائه شده در ابتدای همین بخش، پارامتر حجم قطعات تعمیر شده (y_{ij}) با توجه به نرخ بازسازی و تعداد پره‌ها در هر دست قابل محاسبه است. با توجه به مدل ارائه شده تعریف پارامترهای q_{0i} و q_{3i} ضروری است که به ازای تمامی i ها به ترتیب برابر صفر و بینهایت است. β نرخ خواب سرمایه برابر ۱۵٪ و حداقل تعداد مجاز برای سفارش $Lb=10$ و همچنین هزینه سفارش دهی ۵۰ هزار یورو در نظر گرفته شده است. محدودیت بودجه در سال اول برابر ۴۰۰۰ هزار یورو در نظر گرفته شده و هر سال با نرخ ۱۰٪ افزایش می‌یابد. همچنین حداکثر مقدار انحراف تقاضا برابر ۱۰٪ از مقدار اسمی برای تمام واحدها در نظر گرفته شده است. به‌عنوان مثال تقاضای اسمی برای قطعه b_1 برابر ۸۹ واحد است و واحدها می‌توانند به اندازه ۱۰٪ این تعداد در هر سال از تقاضای اسمی خود انحراف داشته باشند. بودجه عدم قطعیت برای سهولت بیشتر به ازای تمامی i و t ها برابر مقدار $\Gamma =$ در نظر گرفته شده است و این بدان معنی است که در هر سال یکی از واحدها برای تمامی قطعات به اندازه ۱۰٪ تقاضای اسمی انحراف خواهد داشت.

در این بخش داده‌های مسئله مورد بررسی قرار خواهد گرفت. داده‌های این مسئله طی مصاحبه با خبرگان صنایع نیروگاهی در نیروگاه‌های گازی با توربین‌های ۷۹۴.۲ در ایران استخراج شده است. دلیل انتخاب این واحدها این است که از این نوع بیش از ۱۶۰ واحد با ظرفیت اسمی هر کدام ۱۵۹ مگاوات نصب بوده که سهم قابل توجهی از ظرفیت تولید برق در ایران را تشکیل می‌دهد. از بین قطعات مختلف در طی انجام تعمیرات اساسی، قطعات داغ مخصوصاً پره‌های ثابت و متحرک از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند و از این رو در این مقاله مدل زنجیره تأمین برای این قطعات در نظر گرفته شده است. نرخ استهلاک قطعات $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}, b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{15}, b_{16}, b_{17}, b_{18}, b_{19}, b_{20}$ و b_{21} در هر بار تعمیرات اساسی چهارساله ۳۰٪ در نظر گرفته شده است. بنابراین ۷۰٪ قطعات پس از باز شدن توربین‌ها در فاصله زمانی یک سال قابل تعمیر می‌باشند. به همین ترتیب نرخ استهلاک قطعات $b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}, b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{15}, b_{16}, b_{17}, b_{18}, b_{19}, b_{20}$ و b_{21} معادل ۱۰٪ و نرخ بازسازی‌شان معادل ۹۰٪ می‌باشد. به‌عنوان مثال در یک توربین، یک دست از پره‌های فوق نصب شده و یک دست پره b_1 شامل ۸۹ عدد پره می‌باشد. لذا با باز شدن یک توربین معادل $89 \times 0/3$ یعنی ۲۷ عدد پره اسقاط شده و $89 \times 0/7$ یعنی ۶۲ عدد پره قابل بازسازی و ارسال به انبار جهت استفاده آتی در سایر توربین‌ها می‌باشد. در جدول ۲ تعداد هر کدام از پره‌ها در یک دست به همراه قیمت پایه ملحوظ شده برای هر دست در سال اول ارائه شده است. قیمت‌های مربوط به قطعات در جدول ۲ قیمت‌های پایه و بدون تخفیف ($k=1$) و در سال اول بوده که معادل P_{i1} می‌باشند. با در نظر گرفتن سه بازه قیمت شامل، قیمت پایه ($k=1$) و قیمت‌های با تخفیف با مقادیر ۱۰ درصد تخفیف ($k=2$) و ۲۰ درصد تخفیف ($k=3$)، قیمت‌های با تخفیف یعنی P_{2i1} و P_{3i1} قابل محاسبه می‌باشند. به‌علاوه همان‌طور که قبلاً گفته شد این قیمت‌ها مربوط به سال اول بوده و رشد قیمت قطعات در هر سال با نرخ ثابت ۲۱ درصدی شامل نرخ تورم و افزایش احتمالی نرخ متغیر ارز، در نظر گرفته شده است. به‌این ترتیب، قیمت‌ها در سال‌های بعدی با توجه به این نرخ، محاسبه می‌شوند. لازم به توضیح است که قیمت هر پره از تقسیم قیمت یک دست پره به تعداد پره‌های موجود در یک دست قابل محاسبه می‌باشد. هزینه نگهداری هر قطعه با فرض این که هر

جدول ۲. داده‌های مسئله

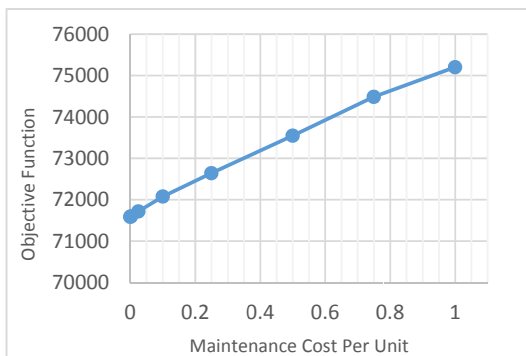
نام قطعه (i)	b1	b2	b3	b4	v1	v2	v3	v4
تعداد در هر دست	۸۹	۸۹	۶۳	۴۴	۴۸	۴۶	۵۵	۵۱
قیمت پایه هر دست در سال اول به هزار یورو (P_{i1})	۴۰۰	۴۲۰	۴۴۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۵۰	۵۸۰	۶۰۰

هزینه نگهداری هر واحد به یورو (h_i)	۰,۲۸	۰,۲۸	۰,۳۹	۰,۵۶	۰,۵۲	۰,۵۴	۰,۴۵	۰,۴۸
نقطه تخفیف اول (q_{1i})	۹۰	۹۰	۶۴	۴۵	۴۹	۴۷	۵۶	۵۲
نقطه تخفیف دوم (q_{2i})	۱۸۰	۱۸۰	۱۲۸	۹۰	۹۸	۹۴	۱۱۲	۱۰۴



شکل ۴. تغییرات سطح موجودی در سال‌های مختلف نسبت نرخ خواب سرمایه

مطابق شکل ۴ در نرخ‌های کوچک خواب سرمایه، حجم موجودی در سال‌های ابتدایی بیشتر است، زیرا هزینه خواب سرمایه پایین می‌باشد. با افزایش نرخ خواب سرمایه سفارشات به عقب رانده می‌شوند و سطح موجودی پایین‌تر می‌آید تا از بزرگ شدن مقدار تابع هدف به واسطه افزایش هزینه خواب سرمایه، جلوگیری شود. در شکل ۵ تغییرات تابع هدف نسبت به هزینه نگهداری نشان داده شده است.

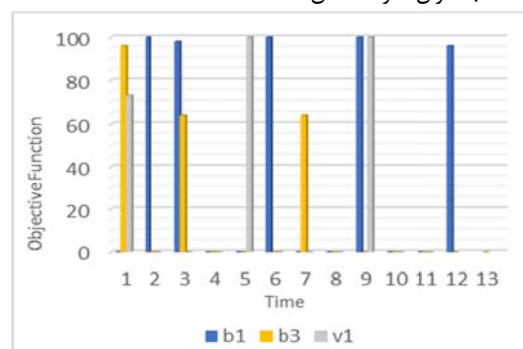


شکل ۵. تغییرات تابع هدف نسبت به هزینه نگهداری واحد

در شکل ۵ با توجه به کوچک بودن هزینه نگهداری نسبت به هزینه خرید و خواب سرمایه فرض شده است که هزینه نگهداری برای تمام قطعات یکسان است. چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش هزینه نگهداری تابع هدف به شکل خطی افزایش می‌یابد. در شکل

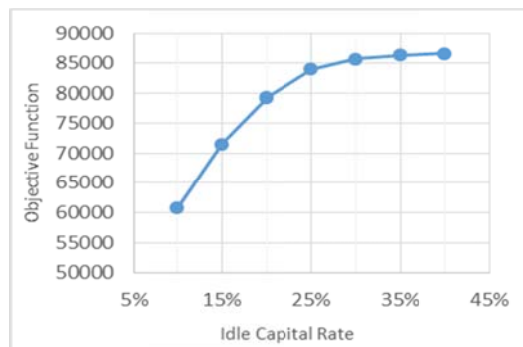
۶. نتایج

با استفاده از داده‌های تشریح شده در بخش قبل، مدل پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار GAMS 23.5.1 حل شده است. در ادامه به بررسی نتایج بدست آمده از حل مدل پیشنهادی پرداخته می‌شود. در شکل ۲ مقادیر سفارش قطعات b_1 ، b_3 و v_1 در سال‌های مختلف، به‌عنوان نمونه نشان داده شده است.



شکل ۲. مقادیر سفارش قطعات در سال‌های مختلف

مطابق شکل ۲، سفارش قطعات مختلف در سال‌های مختلف یکسان نبوده و در برخی سال‌ها زیاد و در برخی سال‌ها کمتر است. همچنین در برخی سال‌ها سفارشی صادر نشده است. در شکل ۳ تغییرات تابع هدف نسبت به پارامتر خواب سرمایه نشان داده شده است.



شکل ۳. تغییرات تابع هدف نسبت به پارامتر نرخ خواب سرمایه

در شکل ۳ مطابق انتظار با افزایش نرخ خواب سرمایه، مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد. در شکل ۴ اثر نرخ خواب سرمایه بر سطح موجودی قابل مشاهده است.

نتایج فوق نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به سیاست‌های معمول در نیروگاه‌های مورد بررسی دارد. سیاست معمول در این نیروگاه‌ها سفارش قطعات مورد نیاز دقیقاً یک سال قبل از نیاز می‌باشد. مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که این سیاست بهینه نیست. چراکه مطابق شکل ۲، در جواب بهینه حجم سفارش‌ها در سال‌های مختلف متفاوت است که دلیل آن قیمت‌های رو به رشد قطعات در سال‌های مختلف، نقاط تخفیف و موازنه بین هزینه‌های نگهداری، سفارش و خرید و همچنین خواب سرمایه است. مقدار تابع هدف در مدل قطعی پیشنهادی (تقاضا برابر مقدار اسمی و بودجه عدم قطعیت برابر صفر) با نرخ خواب سرمایه ۱۵٪ برابر ۴۸۰۹۶ هزار یورو می‌باشد. با شرایط یکسان، این مقدار در روش معمول در نیروگاه‌ها برابر ۵۹۵۵۷ هزار یورو می‌باشد. همچنین در مدل غیرقطعی با بودجه عدم قطعیت یک، جواب مدل استوار پیشنهادی برابر ۷۱۵۱۸ هزار دلار می‌باشد که با در نظر گرفتن شرایط یکسان و انحراف ده درصدی تقاضا برای انواع قطعات برای یک واحد در سال، این مقدار در روش متداول نیروگاه‌ها برابر ۸۶۳۵۹ هزار دلار می‌باشد. مقایسه این اعداد کارایی مدل پیشنهادی را به خوبی نشان می‌دهد.

۷. جمع بندی و نتیجه‌گیری

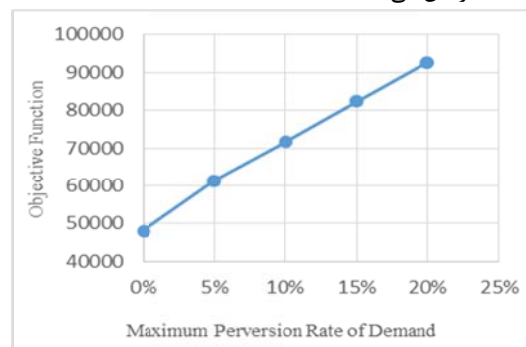
در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی به منظور مدیریت زنجیره تأمین قطعات اصلی توربین‌های گازی، یعنی انواع قطعات مورد استفاده در این توربین‌ها که در نیروگاه‌های تولید برق به کار می‌روند، ارائه شده است. تابع هدف مدل کمینه کردن هزینه‌های خرید و سفارش، هزینه نگهداری و همچنین هزینه خواب سرمایه است. در این مدل تخفیف به ازای خرید در اندازه‌های بزرگ‌تر لحاظ شده و همچنین جریان برگشتی قطعات تعمیر شده که مجدداً قابل استفاده می‌باشند، در نظر گرفته شده است. سپس این مدل غیرخطی با یک روش ابتکاری به یک مدل خطی تبدیل شده و عدم قطعیت در تقاضا به کمک برنامه‌ریزی استوار و رویکرد برتسیماس و سیم به مدل اضافه شده است. به منظور کاربرد مدل، یک نیروگاه چهار واحدی گازی در نظر گرفته و مدل پیشنهادی بر اساس فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات اساسی با فاصله زمانی چهارساله در هر واحد و با داده‌های عملی و به کمک نرم‌افزار GAMS حل شده و مورد ارزیابی و تحلیل حساسیت قرار گرفت. نتایج محاسباتی نشان داد که مدل پیشنهادی منجر به کاهش هزینه‌ها نسبت به خط‌مشی معمول در نیروگاه‌ها شده است، چراکه در مدل پیشنهادی امکان خرید قطعات در اندازه‌های مختلف و در سال‌های مختلف وجود دارد و خرید قطعات در طول افق زمانی مسئله به گونه‌ای صورت می‌گیرد که علاوه بر تأمین به موقع قطعات هزینه کل حداقل شود. مقایسه مقدار تابع هدف مدل پیشنهادی با مقدار حاصل از روش معمول در

۶ تغییرات تابع هدف نسبت به پارامتر بودجه عدم قطعیت (Γ) نشان داده شده است. در شکل ۶ با افزایش پارامتر بودجه عدم قطعیت مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش این پارامتر



شکل ۶. تغییرات تابع هدف نسبت به پارامتر بودجه عدم قطعیت

درواقع تعداد واحدهایی که از تقاضای اسمی انحراف دارند افزایش می‌یابد و در نتیجه حجم سفارش و خرید افزایش می‌یابد و به دنبال آن سطح موجودی و هزینه خواب سرمایه نیز افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش نسبتاً زیاد تابع هدف به ازای انحراف ۱۰٪ در تقاضا را می‌توان این‌گونه بیان نمود که در مدل قطعی حجم بزرگی از تقاضا توسط قطعات تعمیر شده تأمین می‌شود و برای برخی قطعات ۳۰٪ و برای سایر قطعات ۱۰٪ تقاضا می‌بایست از طریق خرید قطعات نو تأمین می‌شود. بنابراین با افزایش ده درصدی تقاضا، اثر قابل توجهی بر حجم قطعات خریداری شده خواهد داشت. لازم به یادآوری است هنگامی که بودجه عدم قطعیت برابر صفر باشد، تقاضای تمامی واحدها برابر مقدار اسمی بوده و مدل در حالت قطعیت می‌باشد و مقدار تابع هدف در این حالت برابر مقدار مدل قطعی است. در شکل ۷ میزان تغییرات تابع هدف در مقابل نرخ انحراف تقاضا از مقدار اسمی و با بودجه عدم قطعیت برابر ۱، نشان داده شده است. در شکل ۷ با افزایش نرخ حداکثر انحراف تقاضا از مقدار نامی، تابع هدف به دلیل افزایش حجم سفارش و خرید و به دنبال آن افزایش موجودی و هزینه خواب سرمایه، افزایش می‌یابد.



شکل ۷. تغییرات تابع هدف نسبت به نرخ حداکثر انحراف تقاضا از مقدار اسمی

Industrial Engineering & Production Management, Volume 25, Number 2, pp. 185-204.

نیروگاه‌ها، کارایی مدل پیشنهادی را به‌خوبی نشان می‌دهد. به‌عنوان پیشنهادات آتی برای توسعه مدل می‌توان به در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت برای سایر پارامترهای مسئله و استفاده از رویکردهای احتمالی و برنامه‌ریزی استوار اشاره نمود.

مراجع

- [8] F. Emtehani, & F. M. Raffei (2016). "Integrating vendor selection problem and distribution-inventory decisions in a three level supply chain with stochastic demand" *International Journal of Industrial Engineering & Production Management*, Volume 27, Number 1, pp. 13-23.
- [9] M.A. Shafia, M.G. Ariyanezhad & M. Fathollah (2009). "Analysis of Time Savings Gained by component Commonality in Supply Chains" *International Journal of Industrial Engineering & Production Management*, Volume 20, Number 1, pp. 45-54.
- [10] Wu, M.-C., Hsu, Y.-K. & Huang, L.-C. (2011). "An integrated approach to the design and operation for spare parts logistic systems" *Expert Systems with Applications*, Volume 38, pp. 2990-2997.
- [11] Frazzon, E. M., Albrecht, A., Pereira, C. E. & Hellingrath, B. (2014). "Spare parts supply chains' operational planning using technical condition information from intelligent maintenance systems" *Annual Reviews in Control*, Volume 38, pp. 147-154.
- [12] Kazemi Zanjani, M. & Nourelfath, M. (2014). "Integrated spare parts logistics and operations planning for maintenance service providers" *Int. J. Production Economics*, Volume 158, pp. 44-53.
- [13] Wang, W. (2011). "A joint spare part and maintenance inspection optimisation model using the Delay-Time concept" *Reliability Engineering and System Safety*, Volume 96, pp. 1535-1541.
- [14] Godoy, D. R., Pascual, R. & Knights, P. (2014). "A decision-making framework to integrate maintenance contract conditions with critical spares management" *Reliability Engineering and System Safety*, Volume 131, pp. 102-108.
- [15] Jin, T. & Tian, Y. (2012). "Optimizing reliability and service parts logistics for a
- [1] Meade, L., sarkis, J. & presley, A. (2007). "The theory and practice of Reverse Logistics." *International Journal of Logistics Systems and Management*, 3(1), pp. 56-64.
- [2] Tibben-Lembke, R. & Rogers, D. (1999). *Going backwards: reverse logistics trends and practice*. 1th.Ed. Chapter 1. University of Nevada, Reno, Center for Logistics Management: Reverse Logistics Executive Council.
- [3] Osmani, A. & zhang, j. (2014). "Optimal grid design and logistic planning for wind and biomass based renewable electricity supply chains under uncertainties" *Energy*, pp. 1-15.
- [4] Tracht, K., Westerholt, J. & Schuh, P. (2013). "Spare Parts Planning for Offshore Wind Turbines subject to Restrictive Maintenance Conditions" 6th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013. Published by Elsevier B., pp. 563-568.
- [5] Mobini, M., Sowlati, T. & Sokhansanj, S. (2011). "Forest biomass supply logistics for a power plant using the discrete-event simulation approach" *Applied Energy*, Volume 88, pp. 1241-1250.
- [6] Akgul, O., Mac Dowell, N., Papageorgiou, L. & Shah, N. (2014). "A mixed integer nonlinear programming (MINLP) supply chain optimization framework for carbon negative electricity generation using biomass to energy with CCS (BECCS) in the UK" *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Volume 28, pp. 189-202.
- [7] A. Mazaheri, M. Karbasian, S.M. Sajadi, H. Shiroyezad & S. Abedi (2014). "Proposing a Model for Optimization of Integrated Supply Chain: Using Multi-Objective Stochastic Programming" *International Journal of*

time-varying installed base ” *European Journal of Operational Research*, Volume 218, pp. 152-162.

- [16] E. Teimoury & M. M. Farahani (2009). “A Model for Spare parts' Demand Forecasting Based on Reliability, Operational Environment and Failure Interaction of Parts ” *International Journal of Industrial Engineering & Production Management*, Volume 20, Number 1, pp. 55-64.
- [17] Interviews with power plant managers of Tehran Province.
- [18] D. Bertsimas, & M. Sim, 2004. “The price of robustness ” *Operations Research*, Volume 52, pp. 35-53.