

# بهینه‌سازی افزونگی و موجودی قطعات یدکی با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان در سیستم‌های چندحالتی

محمدجواد شمسی

دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان، m.j.shamsi66@gmail.com

محمود شهرخی\*

(نویسنده‌ی مسؤل)، دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان shahrokhi292@yahoo.com

چکیده این پژوهش راهکاری جهت مدل‌سازی دسترسی‌پذیری سیستم تغذیه آب بویلرهای بازیاب حرارتی در شرکت مهندسی و ساخت بویلر و تجهیزات مپنا، با هدف تعیین تأمین‌کنندگان قطعات سیستم به نحوی که هزینه کل در مراحل احداث و بهره‌برداری سیستم کمینه گردد، ارائه می‌کند. سیستم تغذیه آب یکی از حساس‌ترین بخش‌های بویلرها است؛ چراکه از کار افتادن آن باعث توقف بویلر شده و پیامدهای جبران‌ناپذیری را به سیستم وارد می‌کند. این سیستم ممکن است در سه وضعیت ظرفیت کامل، نیمه بار و توقف قرار گیرد که هر وضعیت نیز ممکن است، هزینه‌هایی را به سیستم تحمیل کند. برای مدل‌سازی، نخست وضعیت‌های محتمل برای سیستم نوشته و پس از آن به کمک بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان و P&ID پیکربندی سیستم ترسیم می‌شود. سپس نتایج حاصل از مدل‌سازی با روش زنجیره مارکوف در یک مدل بهینه‌سازی ریاضی قرار داده می‌شود. پس از حل مدل استراتژی بهینه در انتخاب تأمین‌کنندگان قطعات مشخص خواهد شد.

واژگان کلیدی: دسترسی‌پذیری، قابلیت اطمینان، قطعات یدکی، افزونگی، زنجیره مارکوف.

زیادی برخوردار بوده و از کار افتادگی این سیستم موجب توقف کامل بویلر خواهد شد. از این رو در جلسه مهندسی ارزش در شرکت مهندسی و ساخت بویلر و تجهیزات مپنا تصمیم بر این شد که پروژه‌ای با هدف تعیین استراتژی انتخاب تأمین‌کنندگان قطعات اصلی و یدکی سیستم تغذیه آب بویلر حرارتی تعریف شود، به گونه‌ای که هزینه‌های مراحل احداث و بهره‌برداری از سیستم FWS کمینه گردد. در این پژوهش هزینه‌های فاز احداث شامل هزینه خرید قطعات اصلی و یدکی است و هزینه‌های فاز بهره‌برداری شامل هزینه نگهداری قطعات یدکی در انبار، هزینه کاهش ظرفیت و هزینه توقف سیستم است. سیستم FWS دو زیرسیستم دارد. در زیرسیستم اول یعنی سیستم تأمین آب صنعتی سه قطعه و در زیرسیستم دوم یعنی سیستم پمپ تغذیه آب دو قطعه وجود دارند. همچنین، تعدادی

## ۱- مقدمه

بهره‌برداری از سیستم‌های پیچیده راهبردی مانند پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌ها و دیگر صنایع تولید پیوسته نیازمند سطح بسیار بالای دسترسی‌پذیری<sup>۱</sup> و قابلیت اطمینان<sup>۲</sup> است. علاوه بر این توقف تولید در این صنایع هزینه‌های زیادی به این صنایع تحمیل نموده، بنابراین انتخاب قطعات و کنترل موجودی قطعات یدکی آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

یکی از بخش‌های اصلی در بویلرهای بازیاب حرارتی (HRSG<sup>۳</sup>)، سیستم تغذیه آب (FWS<sup>۴</sup>) است که به دلیل نقش مهمی که در فراهم نمودن آب مورد نیاز برای مجموعه دارد از اهمیت

\* (Corresponding author) shahrokhi292@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۳

دوره ۱۰/ شماره ۴

صفحات: ۳۵۲-۳۳۹

<sup>1</sup> Availability

<sup>2</sup> Reliability

<sup>3</sup> Heat Recovery Steam Generator

<sup>4</sup> Feed-Water System

دوبانی<sup>۴</sup> و همکاران [۱] برای اولین بار مسئله قابلیت اطمینان-افزونگی را با به کار بردن قطعات ناهمگن (ناهمسان) در زیرسیستم‌ها مدل‌سازی و حل کردند. در این مسئله قابلیت اطمینان قطعات به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شد. ملال<sup>۵</sup> و همکاران [۲] مسئله قابلیت اطمینان-افزونگی را با به کار بردن قطعات ناهمگن در زیرسیستم‌ها مدل‌سازی و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته ( $CS^6$ ) حل کردند. همچنین برای اعتبارسنجی مدل، رویکرد ارائه شده را برای پنج مطالعه موردی به کار بردند. لینس<sup>۷</sup> و همکاران [۳] مسئله بهینه‌سازی افزونگی را با هدف بیشینه کردن دسترس‌پذیری و کمینه کردن هزینه‌ها به صورت هم‌زمان مدل‌سازی کردند. برای حل مدل از الگوریتم ژنتیک ( $GA^8$ ) همراه با شبیه‌سازی رویدادهای گسسته<sup>۹</sup> استفاده کردند. همچنین فرآیندهای خرابی و تعمیر سیستم را نیز به کمک فرآیندهای تکرار مدل کردند. این مدل علاوه بر ارائه پیکربندی بهینه سیستم، تعداد بهینه گروه‌های نگهداری و تعمیرات را نیز مشخص می‌کند. آماری<sup>۱۰</sup> [۴] برای یک سیستم  $K$  از  $N$  که دارای افزونگی آماده به کار از نوع سرد بود، قابلیت اطمینان سیستم با استفاده از مفاهیم فرآیندهای شمارشی<sup>۱۱</sup> ارزیابی کرد. در این مدل طول عمر قطعات از توزیع گاما<sup>۱۲</sup> پیروی می‌کرد و همچنین فرض شده بود که خرابی سوئیچینگ بر سطح قابلیت اطمینان سیستم تأثیرگذار است. مزیت اصلی روش مبتنی بر فرآیندهای شمارشی به کار رفته در این پژوهش این بود که یک مسئله پیچیده شامل چندین انتگرال را به یک مسئله ساده شامل انتگرال‌های تک بعدی تبدیل می‌کند. گارگ<sup>۱۳</sup> و همکاران [۵] به معرفی الگوریتم جستجوی فاخته<sup>۱۴</sup> برای رسیدن به جواب بهینه مسئله بهینه‌سازی قابلیت اطمینان-افزونگی پرداخت. آن‌ها مسئله تخصیص قابلیت اطمینان-افزونگی با انتخاب قابلیت اطمینان قطعات و سطح افزونگی در هر زیرسیستم با رعایت محدودیت‌های هزینه، وزن، حجم و قابلیت اطمینان مدل‌سازی کردند. لی<sup>۱۵</sup> و همکاران [۶] به ارزیابی

قطعه یدکی نیز در انبار نگهداری می‌شوند که در صورت خرابی قطعات فعال در سیستم، جایگزین آن‌ها می‌شوند. همچنین هنگام خرابی قطعات، در صورت عدم وجود قطعه یدکی برای جایگزینی با قطعه از کار افتاده، ممکن است وضعیت سیستم تغییر پیدا کند و در نتیجه ظرفیت سیستم کاهش پیدا کرده و یا سیستم متوقف شود که در این صورت هزینه‌های سنگینی به سیستم تحمیل می‌شود. به این ترتیب، افزایش موجودی قطعات یدکی از یک‌سو موجب افزایش هزینه‌های خرید و نگهداری شده، ولی از سوی دیگر احتمال قرار گرفتن در وضعیت‌های نیمه بار و توقف را کمتر کرده و در نتیجه هزینه تولید از دست رفته کاهش می‌یابد. لذا یکی از اصلی‌ترین مسائل مطرح در واحدهای پشتیبانی در صنایع راهبردی آن است که چگونه با صرف کمترین هزینه خرید و نگهداری قطعات یدکی، بیشترین میزان سطح اطمینان و عملکرد سیستم را تأمین کنند. در این پژوهش راهکاری جهت مدل‌سازی دسترسی‌پذیری سیستم تغذیه آب، با هدف بهینه‌سازی طراحی و موجودی قطعات یدکی ارائه می‌شود. پرسش اصلی این پژوهش هدف چگونگی تعیین استراتژی بهینه در انتخاب تأمین‌کنندگان قطعات اصلی و یدکی به نحوی است که مجموع هزینه کل سیستم در مراحل احداث و بهره‌برداری کمینه گردد.

برای این منظور نخست پیکربندی سیستم با استفاده از بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان ( $RBD^1$ ) و نقشه‌های فرآیند و ابزار دقیق ( $P&ID^2$ ) ترسیم می‌شود. سپس تمام وضعیت‌های محتمل برای سیستم تغذیه آب شناسایی شده و با استفاده از رویکرد زنجیره مارکوف<sup>۳</sup> احتمال قرارگیری در هر وضعیت مدل‌سازی می‌شود. سپس نتایج حاصل در یک مدل بهینه‌سازی ریاضی قرار داده شده و مدل به کمک نرم‌افزار GAMS حل می‌شود. خروجی مدل شامل استراتژی بهینه در خرید قطعات اصلی و یدکی از تأمین‌کنندگان با هدف کمینه کردن هزینه کل است.

## ۲- پیشینه پژوهش

در این بخش، پیشینه پژوهش‌های انجام شده در زمینه قابلیت اطمینان و دسترسی‌پذیری شرح داده شده است.

<sup>4</sup> Dobani

<sup>5</sup> Mellal

<sup>6</sup> Cuckoo search

<sup>7</sup> Lins

<sup>8</sup> Genetic Algorithm

<sup>9</sup> Discrete event simulation

<sup>10</sup> Amari

<sup>11</sup> Counting Processes

<sup>12</sup> Gamma Distribution

<sup>13</sup> Garg

<sup>14</sup> Cuckoo Optimization Algorithm

<sup>15</sup> Li

<sup>1</sup> Reliability Block Diagram

<sup>2</sup> Piping and Instrument Diagram

<sup>3</sup> Markov Chain

قابلیت اطمینان یک سیستم چندحالتی با در نظر گرفتن این فرض که کارایی سیستم کل تابعی از میزان خرابی هر یک از قطعات است، پرداختند. این رویکرد دارای چهار مرحله کلی شامل تولید مدل تصمیم‌گیری باینری، محاسبه احتمال قرارگیری سیستم در هر حالت، تولید مدل تصمیم‌گیری چند حالتی و محاسبه قابلیت اطمینان برای سیستم بود. سوچاستها<sup>۱</sup> و همکاران [۷] قابلیت اطمینان یک مبدل جریان برق<sup>۲</sup> را با استفاده از نرخ خرابی<sup>۳</sup> ارزیابی کردند. آن‌ها با استفاده از قطعات با کیفیت و همچنین به کار بردن افزونه در زیرسیستم‌ها، سطح قابلیت اطمینان مبدل جریان برق را افزایش دادند. در واقع در این مسئله مدل‌سازی مسئله با استفاده از روش بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان و زنجیره مارکوف انجام شد. پیروی<sup>۴</sup> و همکاران [۸] به معرفی استراتژی K-Mixed برای انتخاب افزونه در مسئله تخصیص افزونگی پرداختند. این استراتژی برای تمام سیستم‌ها با افزونه کاربرد دارد. سیستم مورد بررسی در این پژوهش دارای قطعات غیرقابل تعمیر بود و همچنین وضعیت قطعات نیز باینری بود. قابلیت اطمینان سیستم برای دو حالت، حالتی که از استراتژی K-Mixed استفاده شده و زمانی که از این استراتژی استفاده نشده بود، محاسبه شد که نتایج نشان داد مقادیر قابلیت اطمینان برای حالتی که از استراتژی K-Mixed استفاده شده است، بیشتر است. برای رسیدن به جواب بهینه نیز از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. باراکات<sup>۵</sup> و همکاران [۹] در پژوهش خود به بهینه‌سازی چند هدفه سیستم‌های هیبریدی متصل به شبکه و توربین‌های بادی پرداختند. در واقع بهینه‌سازی با اهداف بیشینه کردن قابلیت اطمینان، کمینه کردن هزینه‌ها و همچنین کمینه کردن مقدار گازهای گلخانه‌ای در شرایط مختلف آب و هوایی انجام شد. این پژوهش بر روی توربین بادی واقع در استان اسماعیلیه در مصر انجام شد. ما<sup>۶</sup> و همکاران [۱۰] به تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان و بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط برای قطعات خنک‌کننده (کولر) در دو واحد کاری پرداختند. این قطعات به صورت افزونه آماده به کار گرم در سیستم قرار گرفته بودند. شرایط کار هر دو کولر تأثیر قابل توجهی در تغییر دما سیستم مدنظر داشت. بر این اساس یک سیاست نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط بر

اساس اطلاعات به دست آمده از دما ایجاد شد. پیروی و همکاران [۱۱] برای مدل‌سازی مسئله تخصیص افزونگی با استراتژی افزونه ترکیبی یک مدل جدید مارکوفی را ارائه دادند. در واقع با استفاده از مدل مارکوف این پژوهش، مقدار قابلیت اطمینان سیستم به صورت دقیق محاسبه می‌شد. برای حل مدل ریاضی نیز از الگوریتم ژنتیک کمک گرفتند. از مزایای مدل مارکوف ارائه شده در این پژوهش علاوه بر افزایش سطح قابلیت اطمینان سیستم، زمان کوتاه در انجام محاسبات بود. سبحانی و شهرخی [۱۲] با هدف ارائه الگویی برای انتخاب تأمین‌کنندگان در یک سیستم صنعتی به مدل‌سازی مسئله پرداختند. هدف مسئله مورد بررسی در این پژوهش کمینه کردن هم‌زمان هزینه خرید و هزینه‌های نیمه‌بار شدن و توقف سیستم با رعایت محدودیت‌های هزینه و قابلیت اطمینان سیستم بود. وضعیت‌های مختلف برای سیستم، شامل ۱۵ وضعیت بود که توسط زنجیره مارکوف برای سیستم مدنظر ترسیم شد. شریفی، چراغ، ملجعی، زارع‌طلب و شهریاری [۱۳] مسئله تخصیص افزونگی (RAP) را با هدف بیشینه کردن قابلیت اطمینان و کمینه کردن هزینه‌ها برای یک سیستم K از N به صورت هم‌زمان مدل‌سازی کردند. برای حل مدل نیز از دو الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) و الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی شده (NRGA) استفاده کردند. بیشت و سینگ<sup>۷</sup> [۱۴] یک سیستم چند حالتی سری-موازی تعمیر پذیر را مورد مطالعه قرار دادند. در سیستم مورد بررسی هر قطعه در سه وضعیت مختلف قرار می‌گرفت. در این پژوهش برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم از رویکرد IUFG<sup>۸</sup> استفاده شد. رویکرد مورد استفاده در این پژوهش، پیچیدگی محاسبات قابلیت اطمینان را به شدت کاهش می‌داد. همچنین در مدل ارائه شده، احتمال قرار گرفتن هر قطعه در وضعیت‌های مختلف، قابلیت اطمینان سیستم و میانگین زمان بین دو خرابی به کمک زنجیره مارکوف محاسبه شد. با توجه به بررسی‌های انجام شده مشخص گردید در هیچ یک از پژوهش‌های پیشین، یک مدل مجتمع که تمام هزینه‌های فاز احداث (هزینه خرید قطعات اصلی و یدکی) و بهره‌برداری (هزینه‌های نگهداری از قطعات یدکی، هزینه نیمه بار شدن سیستم به دلیل کاهش ظرفیت و توقف سیستم) را در فاز طراحی سیستم صنعتی در نظر بگیرد، توسعه داده نشده است.

<sup>1</sup> Sujatha

<sup>2</sup> Luo converter

<sup>3</sup> Failure rate

<sup>4</sup> Peiravi

<sup>5</sup> Barakat

<sup>6</sup> Ma

<sup>7</sup> Bisht & Singh

<sup>8</sup> Interval universal generating function

نخست، تمام قطعات سیستم تغذیه آب سالم بوده و سیستم با ظرفیت کامل کار می‌کند. با خراب شدن هر تجهیز، در صورت وجود قطعه یدکی در انبار، تجهیز مورد نظر تعویض شده و هزینه نگهداری قطعه یدکی حذف می‌شود و در غیر این صورت، سیستم در وضعیت جدیدی قرار می‌گیرد که ممکن است موجب کاهش ظرفیت سیستم گردد. این روند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که تعداد تجهیزات از کار افتاده سیستم، بیشتر از یک میزان از قبل تعیین شده برسد که پس از آن سیستم متوقف می‌شود. به این ترتیب سیستم تغذیه آب بویلر حرارتی در سه وضعیت ظرفیت کامل، نیمه بار و توقف قرار می‌گیرد و در هر کدام از وضعیت‌های مورد اشاره هزینه مشخصی برای آن دوره، به سیستم تحمیل می‌گردد. برای مدل‌سازی مسئله ابتدا به کمک نقشه‌های P&ID تمام قطعات شناسایی شدند. سپس تمام وضعیت‌های محتمل برای سیستم نوشته شد و به کمک زنجیره مارکوف احتمال قرار گرفتن سیستم در هر وضعیت محاسبه و به کمک RBD، قابلیت اطمینان سیستم محاسبه شد.

### ۳-۱- وضعیت‌های محتمل برای FWS

به‌طور کلی برای سیستمی که دارای I زیرسیستم است، ممکن است وضعیت‌های مختلفی حادث شود که این وضعیت‌ها می‌توانند با توجه به تعداد قطعات اصلی ( $A_I$ )، تعداد قطعات جایگزین شده ( $R_I$ ) و تعداد قطعات سالم ( $S_I'$ ) در انبار برای هر زیرسیستم با فرم کلی زیر نشان داده شوند.

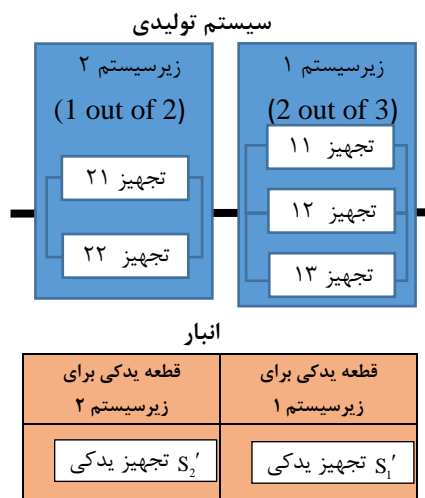
$$(A_1, R_1, S_1' - A_2, R_2, S_2' - \dots - A_I, R_I, S_I')$$

سیستم تغذیه آب در آغاز در وضعیت (۳۰، ۱-۳۰، ۱) قرار دارد، بدین معنا که در ابتدا در زیرسیستم اول ۳ قطعه اصلی سالم قرار دارد و یک قطعه یدکی برای آن در انبار موجود بوده و هنوز هیچ قطعه‌ای از انبار جایگزین قطعات اصلی نشده است و همچنین در زیرسیستم دوم نیز ۲ قطعه اصلی سالم به صورت فعال و یک قطعه یدکی برای آن در انبار موجود بوده و هنوز هیچ قطعه‌ای از انبار جایگزین قطعات اصلی نشده است. این وضعیت به همراه سایر وضعیت‌های محتمل برای سیستم FWS در جدول ۱ نشان داده شده است.

مدل ارائه شده در این پژوهش می‌تواند مبنایی برای طراحی دیگر سیستم‌های صنعتی در فاز طراحی و ساخت باشد.

### ۳- بیان مسئله

سیستم FWS شامل دو زیرسیستم است که به صورت سری قرار گرفته‌اند. زیرسیستم اول، سیستم تأمین آب صنعتی است که دارای ۳ قطعه، سیستم تأمین آب، سیستم کنترل فشار و سیستم کنترل و ابزار دقیق است و زیرسیستم دوم، سیستم پمپ تغذیه آب است. شکل ۱ نمای شماتیک سیستم تغذیه آب را نشان می‌دهد.

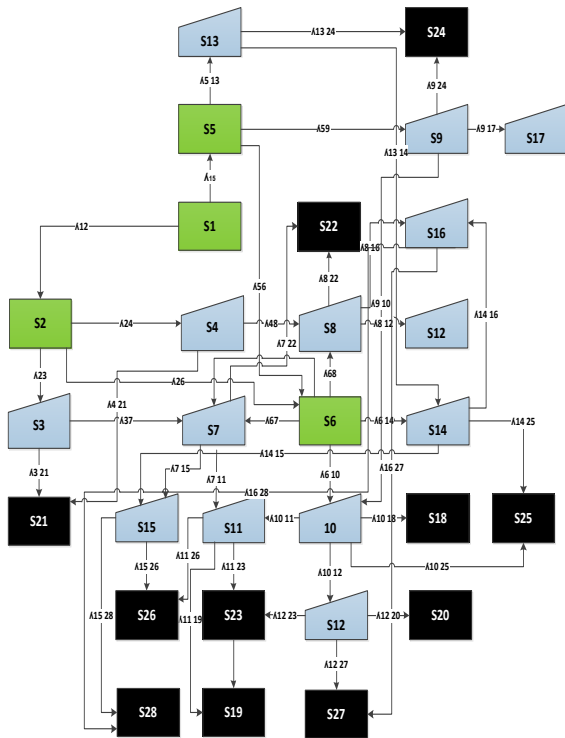


شکل ۱: نمای شماتیک سیستم تغذیه آب

از آنجا که در این پژوهش فرض شده است که کیفیت (نرخ خرابی) قطعات اصلی یکسان و کیفیت قطعات یدکی موجود در انبار با کیفیت قطعات اصلی سیستم تغذیه آب متفاوت است، شرایط مفروض انطباق بیشتری با واقعیت داشته و مدل پژوهش به دنیای واقعی نزدیک‌تر است. امکان خرید قطعات برای سیستم تأمین آب و سیستم پمپ تغذیه آب با کیفیت‌های متفاوت وجود دارد که طبیعتاً متناسب با آن قیمت خرید قطعات نیز تغییر می‌کند. همچنین هزینه نگهداری موجودی قطعات یدکی نیز ممکن است برای قطعاتی که از تأمین‌کنندگان مختلف تهیه می‌شوند، متفاوت باشد. این امر می‌تواند ناشی از تفاوت در ارزش و هزینه‌های بیمه، مقاومت متفاوت قطعات در مقابل شرایط نگهداری، شرایط مرجوع شدن متفاوت قطعات متروکه، ابعاد متفاوت قطعات و موارد دیگر باشد.

نشریه مهندسی و مدیریت کیفیت

وضعیت‌های  $S_1$  و  $S_2$  سیستم با تمام ظرفیت کار می‌کند. اما در وضعیت  $S_3$  سیستم در وضعیت نیمه بار قرار گرفته است. شکل ۳ زنجیره مارکوف مربوط به سیستم FWS را نشان می‌دهد. در این شکل، وضعیت‌های ظرفیت کامل، نیمه بار و توقف کامل، به ترتیب با استفاده از اشکال مستطیل سبز رنگ، دوزنقه آبی رنگ و مستطیل سیاه رنگ نشان داده شده‌اند. در وضعیت  $S_1$  تمام قطعات سالم هستند و با خرابی هر یک از قطعات، سیستم در وضعیت جدیدی قرار می‌گیرد.



شکل ۳: زنجیره مارکوف سیستم تغذیه آب

### ۳-۳- مفروضات مسئله

مفروضات زیر در مسئله این پژوهش مد نظر قرار می‌گیرند.

۱. سیستم تغذیه آب دارای ۲ زیرسیستم تأمین آب صنعتی و پمپ تغذیه آب می‌باشد که در آغاز همه‌ی قطعات آن‌ها سالم هستند.
۲. سیستم تأمین آب به صورت ۲ از ۳ است (یعنی برای کارکرد درست سیستم باید حداقل ۲ قطعه از ۳ قطعه سالم کار کنند). همچنین سیستم پمپ تغذیه آب صورت ۱ از ۲ است.
۳. نرخ خرابی قطعات در تمام طول دوره مورد بررسی ثابت بوده و مستقل از کارکرد یا خرابی بقیه اجزا می‌باشد.

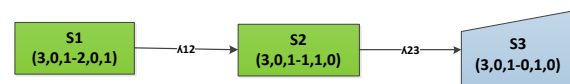
جلد ۱۰- شماره ۴- زمستان ۱۳۹۹

جدول ۱: وضعیت‌های محتمل برای سیستم تغذیه آب

ردیف	وضعیت	نحوه نمایش	ردیف	وضعیت	نحوه نمایش
۱	$S_1$	(۳,۰,۱)-(۲,۰,۱)	۱۵	$S_{15}$	(۲,۰,۰)-(۰,۱,۰)
۲	$S_2$	(۳,۰,۱)-(۱,۱,۰)	۱۶	$S_{16}$	(۲,۰,۰)-(۱,۰,۰)
۳	$S_3$	(۳,۰,۱)-(۰,۱,۰)	۱۷	$S_{17}$	(۰,۱,۰)-(۲,۰,۱)
۴	$S_4$	(۳,۰,۱)-(۰,۰,۱)	۱۸	$S_{18}$	(۰,۱,۰)-(۱,۱,۰)
۵	$S_5$	(۲,۱,۰)-(۲,۰,۱)	۱۹	$S_{19}$	(۰,۱,۰)-(۰,۱,۰)
۶	$S_6$	(۲,۱,۰)-(۱,۱,۰)	۲۰	$S_{20}$	(۰,۱,۰)-(۱,۰,۰)
۷	$S_7$	(۲,۱,۰)-(۰,۱,۰)	۲۱	$S_{21}$	(۳,۰,۱)-(۰,۰,۰)
۸	$S_8$	(۲,۱,۰)-(۱,۰,۰)	۲۲	$S_{22}$	(۲,۱,۰)-(۰,۰,۰)
۹	$S_9$	(۱,۱,۰)-(۲,۰,۱)	۲۳	$S_{23}$	(۱,۱,۰)-(۰,۰,۰)
۱۰	$S_{10}$	(۱,۱,۰)-(۱,۱,۰)	۲۴	$S_{24}$	(۱,۰,۰)-(۲,۰,۱)
۱۱	$S_{11}$	(۱,۱,۰)-(۰,۱,۰)	۲۵	$S_{25}$	(۱,۰,۰)-(۱,۱,۰)
۱۲	$S_{12}$	(۱,۱,۰)-(۱,۰,۰)	۲۶	$S_{26}$	(۱,۰,۰)-(۰,۱,۰)
۱۳	$S_{13}$	(۲,۰,۰)-(۲,۰,۱)	۲۷	$S_{27}$	(۱,۰,۰)-(۱,۰,۰)
۱۴	$S_{14}$	(۲,۰,۰)-(۱,۱,۰)	۲۸	$S_{28}$	(۲,۰,۰)-(۰,۰,۰)

### ۲-۳- زنجیره مارکوف FWS

پس از آشنایی با پیکربندی سیستم تغذیه آب و همچنین وضعیت‌های محتمل برای سیستم تغذیه آب، احتمال قرار گیری سیستم تغذیه آب در ۲۸ وضعیت مختلف با استفاده از زنجیره مارکوف محاسبه خواهد شد. برای نمونه سه وضعیت  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  از زنجیره مارکوف در شکل ۲ ترسیم شده است.



شکل ۲: سه وضعیت نمونه از زنجیره مارکوف مسئله

همانطور که گفته شد، در ابتدا تمام قطعات در هر دو زیرسیستم سالم بوده و سیستم در وضعیت  $S_1$  قرار دارد. با گذشت زمان، یکی از دو قطعه در زیرسیستم دوم از کار افتاده و قطعه یدکی، جایگزین قطعه از کار افتاده می‌شود و سیستم در وضعیت  $S_2$  قرار می‌گیرد. با از کار افتادن قطعه‌ی بعدی در زیرسیستم دوم، سیستم در وضعیت  $S_3$  قرار می‌گیرد، یعنی وضعیتی که سه قطعه در زیرسیستم اول سالم هستند اما دو قطعه اصلی در زیرسیستم دوم از کار افتاده‌اند و تنها قطعه یدکی در این زیرسیستم فعال است. همانطور که در شکل ۲ مشخص است، در

نشریه مهندسی و مدیریت کیفیت

تعداد زیرسیستم‌ها	$I$
هزینه خرید قطعه یدکی $m$ از تأمین‌کننده $j$ ام	$C_{nj}^a$
هزینه خرید قطعه اصلی $m$ ام از تأمین‌کننده $j$ ام	$C_{mj}^b$
نرخ خرابی قطعه یدکی $m$ ام تأمین‌کننده $j$ ام	$\lambda_{nj}^a$
نرخ خرابی قطعه اصلی $m$ ام تأمین‌کننده $j$ ام	$\lambda_{mj}^b$
هزینه نگهداری قطعه یدکی تأمین‌کننده $j$ ام	$C_{Hnj}$
هزینه هر ساعت کاهش ظرفیت	$C_S$
هزینه هر ساعت توقف سیستم	$C_F$
حداقل نرخ جذب بازگشت سرمایه $MARR$	$r$
بودجه در دسترس برای خرید قطعات اصلی و یدکی سیستم	$B_{1T}$
حداکثر هزینه نگهداری قطعات یدکی در انبار	$B_{2T}$
حداکثر هزینه کاهش ظرفیت سیستم	$B_{3T}$
حداکثر هزینه توقف سیستم	$B_{4T}$
تعداد قطعات اصلی فعال زیرسیستم $i$ ام	$A_i$
تعداد قطعات تعویض شده سالم موجود در زیرسیستم $i$ ام	$R_i$
تعداد قطعات موجود در انبار برای زیرسیستم $i$ ام در وضعیت $k$ ام	$S_i^k$

#### متغیرهای تصمیم

متغیر باینری با مقادیر ۰، ۱، اگر قطعه یدکی $m$ ام از تأمین‌کننده $j$ ام خریداری شود و صفر در غیر این صورت	$y_{nj}^a$
متغیر باینری با مقادیر ۰، ۱، اگر قطعه اصلی $m$ ام از تأمین‌کننده $j$ ام خریداری شود و صفر در غیر این صورت	$y_{mj}^b$
هزینه خرید قطعات یدکی	$G_1$
هزینه خرید قطعات اصلی	$G_2$
مجموع هزینه‌ی خرید قطعات اصلی و یدکی	$B_1$
مجموع هزینه‌ی نگهداری قطعات یدکی	$B_2$
مجموع هزینه‌ی کاهش ظرفیت سیستم	$B_3$
مجموع هزینه‌ی توقف کامل سیستم	$B_4$
احتمال کارکرد سیستم با تمام توان	$P_{00}$
احتمال کاهش ظرفیت در زیرسیستم اول	$P_{10}$
احتمال کاهش ظرفیت در زیرسیستم دوم	$P_{01}$
احتمال کاهش ظرفیت در زیرسیستم اول و دوم به صورت هم‌زمان	$P_{11}$
احتمال توقف سیستم	$P_F$

۴. خرابی قطعات از توزیع نمایی پیروی می‌کند. (اردکان، سیما، همدانی و کویت [۱۵])

۵. سیستم مورد بررسی تعمیرناپذیر است. (والیان و والیان [۱۶])

۶. کیفیت (نرخ خرابی) قطعات نصب شده در سیستم مشابه بوده ولی ممکن است متفاوت با قطعات موجود در انبار باشد.

۷. حداقل نرخ بهره جذب ( $MARR$ ) ثابت و شناخته شده است.

۸. سیستم دارای طول عمر بی‌نهایت است.

۹. کیفیت قطعات خریداری شده با توجه به تأمین‌کننده آن مشخص می‌شود.

۱۰. قطعات یدکی برای دو زیرسیستم متفاوت می‌باشند.

۱۱. برای هر ساعت توقف کامل و یا نیمه بار شدن سیستم هزینه‌های ثابتی به سیستم تحمیل می‌شود. (سبحانی و شهرخی [۱۲])

۱۲. در صورت خرابی قطعه در هر مقطع زمانی در یک دوره، هزینه نیمه بار شدن یا توقف ناشی از این خرابی برای تمام طول آن دوره اعمال می‌گردد.

۱۳. در صورت خرابی هر تجهیز، از قطعات موجود در انبار استفاده می‌شود تا جایی که این قطعات تمام شوند، از آن پس با خرابی هر قطعه، سیستم در وضعیت جدیدی قرار می‌گیرد که هزینه مشخصی به سیستم تحمیل می‌شود. در صورتی که تعداد تجهیزات از کار افتاده ( $N-k$ ) تجاوز کند سیستم متوقف می‌شود.

#### ۳-۴- علائم و نمادهای ریاضی مسئله

قبل از ارائه مدل ریاضی مسئله، نخست علائم و نمادهای مورد استفاده در مدل معرفی می‌شوند.

#### اندیس‌ها

شمارنده زیرسیستم	$i = 1, 2$
شمارنده تأمین‌کننده قطعات	$j = 1, 2, \dots, 10$
شمارنده قطعات اصلی	$m = 1, 2, 3, 4, 5$
شمارنده قطعات یدکی	$n = 1, 2$
حالت سیستم	$k = 1, 2, \dots, K$

#### پارامترها

تعداد کل قطعات اولیه روی زیرسیستم $i$ ام	$N_i$
تعداد قطعات موردنیاز برای فعال بودن زیرسیستم $i$ ام	$K_i$

$$P_1 = 1 - (\lambda_{12} + \lambda_{15}) \quad (19)$$

$$(P_1 \times \lambda_{12}) = P_2 \times (\lambda_{23} + \lambda_{24} + \lambda_{26}) \quad (20)$$

$$(P_2 \times \lambda_{23}) = P_3 \times (\lambda_{37} + \lambda_{321}) \quad (21)$$

$$(P_2 \times \lambda_{24}) = P_4 \times (\lambda_{48} + \lambda_{421}) \quad (22)$$

$$(P_1 \times \lambda_{15}) = P_5 \times (\lambda_{56} + \lambda_{59} + \lambda_{513}) \quad (23)$$

$$(P_2 \times \lambda_{26}) + (P_5 \times \lambda_{56}) = P_6 \times (\lambda_{67} + \lambda_{68} + \lambda_{610} + \lambda_{614}) \quad (24)$$

$$(P_3 \times \lambda_{37}) + (P_6 \times \lambda_{67}) = P_7 \times (\lambda_{711} + \lambda_{715} + \lambda_{722}) \quad (25)$$

$$(P_4 \times \lambda_{48}) + (P_6 \times \lambda_{68}) = P_8 \times (\lambda_{812} + \lambda_{816} + \lambda_{822}) \quad (26)$$

$$(P_5 \times \lambda_{59}) = P_9 \times (\lambda_{910} + \lambda_{917} + \lambda_{924}) \quad (27)$$

$$(P_6 \times \lambda_{610}) + (P_9 \times \lambda_{910}) = P_{10} (\lambda_{1011} + \lambda_{1012} + \lambda_{1018} + \lambda_{1025}) \quad (28)$$

$$(P_7 \times \lambda_{711}) + (P_{10} \times \lambda_{1011}) = P_{11} (\lambda_{1119} + \lambda_{1123} + \lambda_{1126}) \quad (29)$$

$$(P_8 \times \lambda_{812}) + (P_{10} \times \lambda_{1012}) = P_{12} (\lambda_{1220} + \lambda_{1223} + \lambda_{1227}) \quad (30)$$

$$(P_5 \times \lambda_{513}) = P_{13} (\lambda_{1314} + \lambda_{1324}) \quad (31)$$

$$(P_6 \times \lambda_{614}) + (P_{13} \times \lambda_{1314}) = P_{14} (\lambda_{1415} + \lambda_{1416} + \lambda_{1425} + \lambda_{1425}) \quad (32)$$

$$(P_7 \times \lambda_{715}) + (P_{14} \times \lambda_{1415}) = P_{15} (\lambda_{1526} + \lambda_{1528}) \quad (33)$$

$$(P_8 \times \lambda_{816}) + (P_{14} \times \lambda_{1416}) = P_{16} (P_{1627} + P_{1628}) \quad (34)$$

$$P_{17} = (P_9 \times \lambda_{917}) \quad (35)$$

$$P_{18} = (P_{10} \times \lambda_{1018}) \quad (36)$$

$$P_{19} = (P_{11} \times \lambda_{1119}) \quad (37)$$

$$P_{20} = (P_{12} \times \lambda) \quad (38)$$

$$P_{21} = (P_3 \times \lambda_{321}) + (P_4 \times \lambda_{421}) \quad (39)$$

$$P_{22} = (P_7 \times \lambda_{722}) + (P_8 \times \lambda_{822}) \quad (40)$$

$$P_{23} = (P_{11} \times \lambda_{1123}) + (P_{12} \times \lambda_{1223}) \quad (41)$$

$$P_{24} = (P_9 \times \lambda_{924}) + (P_{13} \times \lambda_{1324}) \quad (42)$$

$$P_{25} = (P_{10} \times \lambda_{1025}) + (P_{14} \times \lambda_{1425}) \quad (43)$$

$$P_{26} = (P_{11} \times \lambda_{1126}) + (P_{15} \times \lambda_{1526}) \quad (44)$$

$$P_{27} = (P_{12} \times \lambda_{1227}) + (P_{16} \times \lambda_{1627}) \quad (45)$$

$$P_{28} = (P_{15} \times \lambda_{1528}) + (P_{16} \times \lambda_{1628}) \quad (46)$$

$\lambda_n^a$  نرخ خرابی قطعه یدکی nام

$\lambda_m^b$  نرخ خرابی قطعه اصلی mام

$\lambda_{k_1 k_2}$  نرخ انتقال از وضعیت  $k_1$  به وضعیت  $k_2$

$\lambda_\alpha$  نرخ خرابی قطعات اصلی

$S_K$  وضعیت سیستم در حالت Kام

$P_K$  احتمال قرار گرفتن سیستم در حالت Kام

#### ۴- مدل ریاضی مسئله

در این بخش با توجه به مفروضات عنوان شده، مدل ریاضی مسئله با هدف کمینه کردن هزینه‌های احداث و بهره‌برداری در فاز طراحی سیستم تغذیه آب ارائه شده است.

$$\text{Min } Z = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 \quad (1)$$

Subjected to:

$$G_1 = \sum_{j=1}^{10} (y_{nj}^a c_{nj}^a) \quad \forall n \quad (2)$$

$$G_2 = \sum_{j=1}^{10} (y_{mj}^b c_{mj}^b) \quad \forall m \quad (3)$$

$$B_1 = G_1 + G_2 \quad (4)$$

$$B_2 = \sum_{k=1}^{28} S_K \left( \sum_{j=1}^{10} (S_1^k (y_{1j} c_{H1j}) + S_2^k (y_{2j} c_{H2j})) \right) \quad (5)$$

$$B_3 = 8760 * C_S * (1/r) * (P_{10} + P_{01} + P_{11}) \quad (6)$$

$$B_4 = 8760 * C_F * (1/r) * P_F \quad (7)$$

$$P_{00} = S_1 + S_2 + S_5 + S_6 \quad (8)$$

$$P_{10} = S_9 + S_{10} + S_{13} + S_{14} \quad (9)$$

$$P_{01} = S_3 + S_4 + S_7 + S_8 \quad (10)$$

$$P_{11} = S_{11} + S_{12} + S_{15} + S_{16} \quad (11)$$

$$P_F = S_{17} + S_{18} + S_{19} + S_{20} + S_{21} + S_{22} + S_{23} + S_{24} + S_{25} + S_{26} + S_{27} + S_{28} \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^{10} y_{nj}^a = 1 \quad \forall n \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^{10} \left( \prod_{m=1}^5 y_{mj}^b \right) = 1 \quad (14)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\}, y_{mj} \in \{0,1\} \quad (15)$$

$$\lambda_n^a = \sum_{j=1}^{10} y_{nj}^a \lambda_{nj}^a \quad \forall n \quad (16)$$

$$\lambda_m^b = \sum_{j=1}^{10} y_{mj}^b \lambda_{mj}^b \quad \forall m \quad (17)$$

$$\lambda_\alpha = \lambda_m^b \quad (18)$$

$$\lambda_{12\ 23} = (\lambda_\alpha) \quad (81)$$

$$\lambda_{12\ 27} = (\lambda_1^a) \quad (82)$$

$$\lambda_{13\ 14} = 2(\lambda_\alpha) \quad (83)$$

$$\lambda_{13\ 24} = 2(\lambda_\alpha) \quad (84)$$

$$\lambda_{14\ 15} = (\lambda_\alpha) \quad (85)$$

$$\lambda_{14\ 16} = (\lambda_2^a) \quad (86)$$

$$\lambda_{14\ 25} = 2(\lambda_\alpha) \quad (87)$$

$$\lambda_{15\ 26} = 2(\lambda_\alpha) \quad (88)$$

$$\lambda_{15\ 28} = (\lambda_2^a) \quad (89)$$

$$\lambda_{16\ 27} = 2(\lambda_\alpha) \quad (90)$$

$$\lambda_{16\ 28} = (\lambda_\alpha) \quad (91)$$

$$B_1 \leq B_{1T} \quad (92)$$

$$B_2 \leq B_{2T} \quad (93)$$

$$B_3 \leq B_{3T} \quad (94)$$

$$B_4 \leq B_{4T} \quad (95)$$

$$S_k \geq 0, P_{mn} \geq 0, P_{00} \geq 0, P_{10} \geq 0, P_{01} \geq 0, P_{11} \geq 0, P_F \geq 0 \quad (96)$$

هدف مدل فوق در رابطه (۱) عبارت است از کمینه کردن کل هزینه‌های سیستم؛ شامل هزینه‌ی خرید قطعات اصلی و یدکی، هزینه نگهداری کل، مجموع هزینه‌ی انتظاری کاهش ظرفیت و هزینه‌ی توقف کامل سیستم است. روابط (۲) تا (۸۸) در مدل فوق مربوط به محدودیت‌های مدل می‌باشند که در ادامه توضیح داده می‌شوند.

محدودیت‌های (۲)، (۳) و (۴) بیانگر هزینه خرید قطعات یدکی، هزینه خرید قطعات اصلی و مجموع هزینه‌های خرید کل قطعات از تأمین‌کنندگان می‌باشد. محدودیت (۵) بیانگر کل هزینه‌ی نگهداری قطعات یدکی است؛ تعداد قطعات یدکی داخل انبار برای هر زیرسیستم یک قطعه می‌باشد. محدودیت (۶) بیانگر کل هزینه ناشی از کاهش ظرفیت است که ناشی از کمبود قطعه در زیرسیستم اول و دوم می‌باشد. محدودیت (۷) کل هزینه ناشی از توقف سیستم را محاسبه می‌کند. محدودیت (۸) مجموع احتمالات وضعیت‌هایی است که سیستم با تمام توان کار می‌کند. محدودیت (۹) مجموع احتمالات وضعیت‌هایی است که زیرسیستم اول در حالت نیمه‌بار کار می‌کند. محدودیت (۱۰) مجموع احتمالات وضعیت‌هایی است که زیرسیستم دوم در حالت نیمه‌بار کار می‌کند. محدودیت (۱۱) احتمال هم‌زمان کارکرد زیرسیستم اول و زیرسیستم دوم در حالت نیمه‌بار را محاسبه می‌کند. محدودیت (۱۲) احتمال توقف سیستم را

$$\sum_{k=1}^{28} P_k = 1 \quad (47)$$

$$\lambda_{12} = 2(\lambda_\alpha) \quad (48)$$

$$\lambda_{15} = 3(\lambda_\alpha) \quad (49)$$

$$\lambda_{23} = (\lambda_\alpha) \quad (50)$$

$$\lambda_{24} = (\lambda_2^a) \quad (51)$$

$$\lambda_{26} = 3(\lambda_\alpha) \quad (52)$$

$$\lambda_{37} = 3(\lambda_\alpha) \quad (53)$$

$$\lambda_{3\ 21} = (\lambda_2^a) \quad (54)$$

$$\lambda_{48} = 3(\lambda_\alpha) \quad (55)$$

$$\lambda_{4\ 21} = (\lambda_\alpha) \quad (56)$$

$$\lambda_{56} = 2(\lambda_\alpha) \quad (57)$$

$$\lambda_{59} = 2(\lambda_\alpha) \quad (58)$$

$$\lambda_{5\ 13} = (\lambda_1^a) \quad (59)$$

$$\lambda_{67} = (\lambda_\alpha) \quad (60)$$

$$\lambda_{68} = (\lambda_1^a) \quad (61)$$

$$\lambda_{6\ 10} = 2(\lambda_\alpha) \quad (62)$$

$$\lambda_{6\ 14} = (\lambda_1^a) \quad (63)$$

$$\lambda_{7\ 11} = 2(\lambda_\alpha) \quad (64)$$

$$\lambda_{7\ 15} = (\lambda_1^a) \quad (65)$$

$$\lambda_{7\ 22} = (\lambda_2^a) \quad (66)$$

$$\lambda_{8\ 12} = 2(\lambda_\alpha) \quad (67)$$

$$\lambda_{8\ 16} = (\lambda_1^a) \quad (68)$$

$$\lambda_{8\ 22} = (\lambda_\alpha) \quad (69)$$

$$\lambda_{9\ 10} = 2(\lambda_\alpha) \quad (70)$$

$$\lambda_{9\ 17} = (\lambda_\alpha) \quad (71)$$

$$\lambda_{9\ 25} = (\lambda_1^a) \quad (72)$$

$$\lambda_{10\ 11} = (\lambda_\alpha) \quad (73)$$

$$\lambda_{10\ 12} = (\lambda_2^a) \quad (74)$$

$$\lambda_{10\ 18} = (\lambda_\alpha) \quad (75)$$

$$\lambda_{10\ 26} = (\lambda_1^a) \quad (76)$$

$$\lambda_{11\ 19} = (\lambda_\alpha) \quad (77)$$

$$\lambda_{11\ 23} = (\lambda_2^a) \quad (78)$$

$$\lambda_{11\ 26} = (\lambda_1^a) \quad (79)$$

$$\lambda_{12\ 20} = (\lambda_\alpha) \quad (80)$$



مقادیر مفروض هزینه خرید قطعات اصلی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: هزینه خرید قطعات اصلی از هر یک از تأمین کنندگان ( $C_{mj}^b$ )

قطعه	تأمین کننده									
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۱	۷۰	۷۰	۹۰	۷۵	۶۰	۸۰	۴۰	۹۰	۶۰	۶۰
۲	۷۰	۷۰	۹۰	۷۵	۶۰	۸۰	۴۰	۹۰	۶۰	۶۰
۳	۷۰	۷۰	۹۰	۷۵	۶۰	۸۰	۴۰	۹۰	۶۰	۶۰
۴	۷۰	۷۰	۹۰	۷۵	۶۰	۸۰	۴۰	۹۰	۶۰	۶۰
۵	۷۰	۷۰	۹۰	۷۵	۶۰	۸۰	۴۰	۹۰	۶۰	۶۰

مقادیر مفروض هزینه خرید قطعات یدکی در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: هزینه خرید هر یک از قطعات یدکی از تأمین کنندگان ( $C_{nj}^a$ )

قطعه	تأمین کننده									
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۱	۹۰	۷۰	۶۵	۵۰	۵۵	۶۵	۷۰	۶۵	۵۰	۶۰
۲	۷۰	۵۰	۶۰	۵۵	۶۵	۶۵	۸۰	۹۰	۸۵	۷۰

مقادیر مفروض هزینه نگهداری قطعات یدکی در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: هزینه نگهداری قطعات یدکی ارائه شده توسط هر یک از تأمین کنندگان ( $C_{Hnj}$ ) در یک دوره زمانی

قطعه	تأمین کننده									
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۱	۱۵	۲۵	۳۵	۴۵	۲۵	۳۵	۴۵	۱۵	۳۰	۴۰
۲	۲۰	۳۵	۵۰	۳۰	۲۰	۲۵	۳۵	۵۰	۴۵	۳۵

جدول ۶ و ۷ مقادیر مفروض نرخ خرابی قطعات اصلی و یدکی را برای نمونه موردی در نظر گرفته شده نشان می‌دهد.

جدول ۶: نرخ خرابی قطعات اصلی از تأمین کنندگان ( $\lambda_{mj}^b$ )

قطعه	تأمین کننده									
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۱	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۳	۰/۲۵	۰/۳	۰/۲۵	۰/۳	۰/۳۵	۰/۱۵	۰/۲۵
۲	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۳	۰/۲۵	۰/۳	۰/۲۵	۰/۳	۰/۳۵	۰/۱۵	۰/۲۵
۳	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۳	۰/۲۵	۰/۳	۰/۲۵	۰/۳	۰/۳۵	۰/۱۵	۰/۲۵
۴	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۳	۰/۲۵	۰/۳	۰/۲۵	۰/۳	۰/۳۵	۰/۱۵	۰/۲۵
۵	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۳	۰/۲۵	۰/۳	۰/۲۵	۰/۳	۰/۳۵	۰/۱۵	۰/۲۵

محاسبه می‌کند. محدودیت (۱۳) تضمین می‌کند که هر قطعه یدکی تنها از یک تأمین کننده خریداری شود. محدودیت (۱۴) تضمین می‌کند که همه قطعات اصلی تنها از یک تأمین کننده خریداری شوند. محدودیت (۱۵) بیانگر این موضوع است که قطعه یا از تأمین کننده خریداری می‌شود که در این صورت مقدار یک می‌گیرد و یا خریداری نمی‌شود که مقدار صفر می‌گیرد. محدودیت‌های (۱۶) و (۱۷) بیانگر این است که نرخ خرابی قطعات یدکی و اصلی برابر با نرخ خرابی قطعات خریداری شده از تأمین کننده است. محدودیت (۱۸) بیانگر این است که نرخ خرابی قطعات اصلی به دلیل مشابه بودن با یکدیگر برابر است. محدودیت‌های (۱۹) تا (۴۶) معادلات مربوط به زنجیره مارکوف می‌باشند که با استفاده از این معادلات احتمال قرار گرفتن سیستم در هر وضعیت به دست می‌آید. محدودیت (۴۷) نشان می‌دهد مجموع احتمالات قرار گرفتن سیستم در همه‌ی وضعیت‌ها باید برابر یک باشد. محدودیت‌های (۴۸) تا (۹۱) معادلات مربوط به احتمال انتقال وضعیت سیستم به وضعیت‌های دیگر را نشان می‌دهد. محدودیت (۹۲) حداکثر بودجه در دسترس برای خرید قطعات سیستم را نشان می‌دهد. محدودیت (۹۳) حداکثر هزینه نگهداری قطعات یدکی در انبار را نشان می‌دهد. محدودیت (۹۴) حداکثر هزینه کاهش ظرفیت تحمیل شده به سیستم را نشان می‌دهد. محدودیت (۹۵) حداکثر هزینه توقف سیستم را نشان می‌دهد. محدودیت (۹۶) نشان می‌دهد که مقادیر متغیرهای  $P_F, P_{11}, P_{10}, P_{01}, P_{00}, P_{mn}$  همواره نامنفی هستند.

## ۵- تجزیه و تحلیل عددی

برای درک بهتر مدل ریاضی و روش پیشنهادی، مسئله برای یک نمونه موردی و با استفاده از نرم‌افزار GAMS حل شده است. پارامترهای ورودی و مقادیر ثابت مسئله در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: مقادیر پارامترهای مسئله در مطالعه موردی

$K_1 = 2$	$K_2 = 1$	$N_1 = 3$	$N_2 = 2$
$B_{1T} = 580$	$B_{3T} = 750$	$C_S = 0.01$	$r = 0.1$
$B_{2T} = 40$	$B_{4T} = 700$	$C_F = 0.02$	

## ۶- بحث

از آنجا که مدل ریاضی برای سیستم پیشنهادی توسعه داده شده است، استفاده از این مدل برای سایر سیستم‌های صنعتی مستلزم ترسیم مجدد بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان سیستم و تدوین مجدد معادلات زنجیره مارکوف بر اساس آن است. با وجود این، گام‌های رویکرد پیشنهادی در حالت کلی برای همه انواع سیستم‌ها استفاده می‌شود.

## ۶-۱- تحلیل حساسیت

در این قسمت واکنش و رفتار پاسخ بهینه مسئله نسبت به پارامترهای مسئله مورد بحث قرار می‌گیرد.

## ۶-۱-۱- تحلیل حساسیت نسبت به قیمت خرید

## قطعات

یکی از موارد مهم در طراحی و احداث سیستم‌های صنعتی قیمت خرید قطعات است. در این مرحله، نخست هزینه خرید قطعات به میزان (درصد) مشخص شده تغییر یافته و سپس نتایج حل مجدد مسئله در جدول ۹ نشان داده شده است.

جدول ۹: تحلیل حساسیت پاسخ بهینه مسئله نسبت به قیمت خرید قطعات

درصد تغییر	هزینه خرید	هزینه نگهداری	هزینه کاهش ظرفیت	هزینه توقف	هزینه کل	درصد تغییر هزینه کل
-۳۰٪	۳۲۲	۳۹/۵۴۴	۷۲۸/۱۹۸	۴۹۷/۸۶۸	۱۵۸۷/۶۰۹	-۰/۰۸۰
-۲۰٪	۳۶۸	۳۹/۵۴۴	۷۲۸/۱۹۸	۴۹۷/۸۶۸	۱۶۳۳/۶۰۹	-۰/۰۵۳
-۱۰٪	۴۲۷/۵۰۰	۳۶/۶۹۸	۷۶۸/۹۲۳	۴۵۳/۷۲۸	۱۶۸۶/۸۴۹	-۰/۰۲۲
۰٪	۴۶۰	۳۹/۵۴۴	۷۲۸/۱۹۸	۴۹۷/۸۶۸	۱۷۲۵/۶۰۹	۰
+۱۰٪	۵۰۶	۳۹/۵۴۴	۷۲۸/۱۹۸	۴۹۷/۸۶۸	۱۷۷۱/۶۰۹	+۰/۰۲۷
+۲۰٪	۵۷۰	۳۶/۶۹۸	۷۶۸/۹۲۳	۴۵۳/۷۲۸	۱۸۲۹/۳۴۹	+۰/۰۶۰
+۳۰٪	۵۹۸	۳۹/۵۴۴	۷۲۸/۱۹۸	۴۹۷/۸۶۸	۱۸۶۳/۶۰۹	+۰/۰۸۰

جدول ۷: نرخ خرابی قطعات یدکی از تأمین‌کنندگان ( $\lambda_{nj}^a$ )

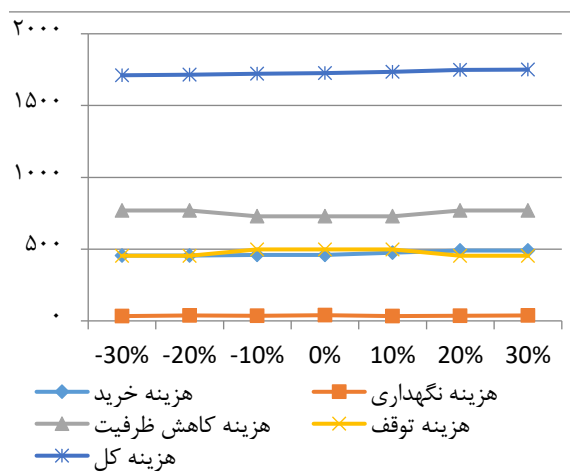
قطعه	تأمین‌کننده									
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۱	۰/۱۵	۰/۱	۰/۲	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۲۵	۰/۳	۰/۴	۰/۲۵
۲	۰/۲	۰/۲۵	۰/۳	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۳

مدل پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار GAMS حل شد. با توجه به اینکه مدل ارائه شده در این پژوهش از نوع برنامه‌ریزی ریاضی باینری غیرخطی می‌باشد پس از آزمون موتورهای حل مختلف نتایج بدست آمده نتایج بدست آمده توسط موتور حل Baron با دقت بیشتری و در زمان کمتری حاصل شد. این مدل حل از روش شاخه و کران که یکی از کاراترین روش‌های حل مسائل عدد صحیح است، استفاده می‌کند. پس از حل مسئله، مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم محاسبه و در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۸: نتایج بهینه مثال عددی با استفاده از نرم‌افزار GAMS

تخصیص قطعات یدکی به تأمین‌کنندگان	تخصیص قطعات اصلی به تأمین‌کنندگان	Z=۱۹۲۷/۷۲۵	
		B <sub>1</sub> = ۵۸۰	
قطعه		B <sub>2</sub> = ۳۶/۳۳	
تأمین‌کننده	تأمین‌کننده	۱	۲
		۵	۴
تأمین‌کننده		B <sub>3</sub> = ۷۱۵/۹۸۳	
تأمین‌کننده		B <sub>4</sub> = ۵۹۵/۴۱	

در جدول (۸) مقادیر بهینه مسئله مورد نظر محاسبه شده است. همان‌طور که گفته شد هدف مسئله انتخاب تأمین‌کنندگان قطعات اصلی و یدکی است به طوری که هزینه کل کمینه گردد. هزینه‌ها شامل هزینه خرید، هزینه نگهداری، هزینه کاهش ظرفیت و هزینه توقف سیستم است. با حل مدل ریاضی توسط برنامه GAMS مشخص شد که قطعات اصلی سیستم باید از تأمین‌کننده اول خریداری شوند. همچنین باید قطعه یدکی برای زیرسیستم اول از تأمین‌کننده پنجم و قطعه یدکی برای زیرسیستم دوم نیز از تأمین‌کننده چهارم خریداری شود تا هزینه‌های کل سیستم کمینه گردد. در این مطالعه موردی مقادیر هزینه‌های سیستم به این صورت است. هزینه خرید ۵۸۰، هزینه نگهداری ۳۶۰/۳۳، هزینه کاهش ظرفیت ۷۱۵/۹۸۳، هزینه توقف سیستم ۵۹۵/۴۱۲ و هزینه کل برابر با ۱۹۲۷/۷۲۵ است. همان‌طور که مشخص است بیشترین هزینه، هزینه کاهش ظرفیت است که نشان‌دهنده این موضوع است که سیستم مورد بررسی بیشتر در وضعیت‌های نیمه‌بار قرار می‌گیرد.



شکل ۵: اثر تغییر هزینه نگهداری بر هزینه کل

با تغییر هزینه نگهداری از قطعات یدکی به صورت خطی، هزینه کل سیستم نیز به صورت خطی افزایش می‌یابد. اما به دلیل اینکه مقادیر هزینه نگهداری نسبت به هزینه‌های دیگر سیستم بسیار کمتر است، از این رو همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است، این تغییر در هزینه‌ها محسوس نیست.

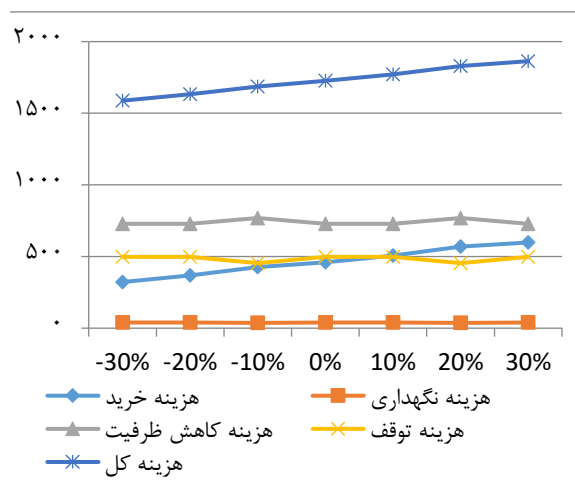
### ۳-۱-۶- تحلیل حساسیت نسبت به هزینه هر ساعت کاهش ظرفیت سیستم

در این مرحله هزینه هر ساعت کاهش ظرفیت سیستم به میزان (درصد) مشخص شده تغییر یافته و سپس نتایج حل مجدد مسئله در جدول ۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۱۱: تحلیل حساسیت پاسخ بهینه مسئله نسبت به هزینه هر

ساعت کاهش ظرفیت

درصد تغییر	هزینه کل	هزینه توقف	هزینه کاهش ظرفیت	هزینه نگهداری	هزینه خرید	درصد تغییر
-۳۰٪	۱۵۰۳/۶۷۲	۴۵۳/۷۲۸	۵۳۸/۲۴۶	۳۶/۶۹۸	۴۷۵	-۳۰٪
-۲۰٪	۱۵۷۸/۸۵۴	۴۵۳/۷۲۸	۶۱۵/۱۲۹	۳۹/۹۸۷	۴۷۰	-۲۰٪
-۱۰٪	۱۶۵۵/۷۴۶	۴۵۳/۷۲۸	۶۹۲/۰۳۱	۳۹/۹۸۷	۴۷۰	-۱۰٪
۰٪	۱۷۲۵/۶۰۹	۴۹۷/۸۶۸	۷۲۸/۱۹۸	۳۹/۵۴۴	۴۶۰	۰٪
+۱۰٪	۱۷۹۸/۴۲۶	۴۹۷/۸۶۸	۸۰۱/۰۱۸	۳۹/۵۴۴	۴۶۰	+۱۰٪
+۲۰٪	۱۸۸۷/۲۳۵	۵۲۶/۲۳۱	۸۵۶/۰۶۲	۳۴/۹۴۱	۴۷۰	+۲۰٪
+۳۰٪	۱۹۴۴/۰۶۹	۴۹۷/۸۶۸	۹۴۶/۶۵۷	۳۹/۵۴۴	۴۶۰	+۳۰٪



شکل ۴: اثر تغییر هزینه خرید بر هزینه کل

شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش خطی هزینه خرید، هزینه کل نیز به صورت خطی افزایش می‌یابد. همچنین تغییر در قیمت خرید قطعات بر هزینه‌های دیگر نیز تأثیرگذار بوده و این امر نشان از اهمیت بالای هزینه خرید در این مطالعه موردی دارد؛ چرا که با تغییر قیمت خرید قطعات، مدل برای رسیدن به کم‌ترین هزینه کل، استراتژی خرید قطعات از تأمین‌کنندگان را تغییر می‌دهد.

### ۲-۱-۶- تحلیل حساسیت نسبت به هزینه نگهداری قطعات یدکی

در این مرحله هزینه نگهداری قطعات به میزان (درصد) مشخص شده تغییر یافته و سپس نتایج حل مجدد مسئله در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

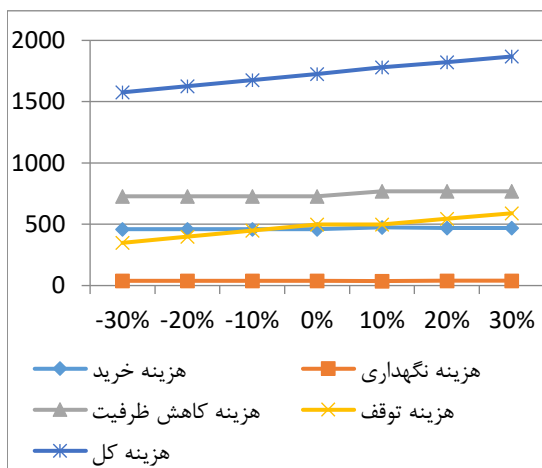
جدول ۱۰: تحلیل حساسیت پاسخ بهینه مسئله نسبت به هزینه نگهداری قطعات

درصد تغییر	هزینه کل	هزینه توقف	هزینه کاهش ظرفیت	هزینه نگهداری	هزینه خرید	درصد تغییر
-۳۰٪	۱۷۱۱/۰۰۹	۴۵۳/۷۲۸	۷۶۸/۹۲۳	۳۳/۳۵۸	۴۵۵	-۳۰٪
-۲۰٪	۱۷۱۵/۷۷۵	۴۵۳/۷۲۸	۷۶۸/۹۲۳	۳۸/۱۲۴	۴۵۵	-۲۰٪
-۱۰٪	۱۷۲۱/۶۵۵	۴۹۷/۸۶۸	۷۲۸/۱۹۸	۳۵/۵۸۹	۴۶۰	-۱۰٪
۰٪	۱۷۲۵/۶۰۹	۴۹۷/۸۶۸	۷۲۸/۱۹۸	۳۹/۵۴۴	۴۶۰	۰٪
+۱۰٪	۱۷۳۵/۵۷۵	۴۹۷/۸۶۸	۷۲۸/۱۹۸	۳۴/۵۰۹	۴۷۵	+۱۰٪
+۲۰٪	۱۷۴۷/۴۸۸	۴۵۳/۷۲۸	۷۶۸/۹۲۳	۳۴/۸۳۷	۴۹۰	+۲۰٪
+۳۰٪	۱۷۵۰/۳۹۱	۴۵۳/۷۲۸	۷۶۸/۹۲۳	۳۷/۷۴۰	۴۹۰	+۳۰٪

جدول ۱۲: تحلیل حساسیت پاسخ بهینه مسئله نسبت به هزینه هر ساعت توقف سیستم

درصد تغییر هزینه کل	هزینه کل	هزینه توقف	هزینه کاهش ظرفیت	هزینه نگهداری	هزینه خرید	درصد تغییر
-۰/۰۸۷	۱۵۷۶/۲۴۹	۳۴۸/۵۰۸	۷۲۸/۱۹۸	۳۹/۵۴۴	۴۶۰	-۳۰٪
-۰/۰۵۸	۱۶۲۶/۰۳۶	۳۹۸/۲۹۴	۷۲۸/۱۹۸	۳۹/۵۴۴	۴۶۰	-۲۰٪
-۰/۰۲۹	۱۶۷۵/۸۲۳	۴۴۸/۰۸۱	۷۲۸/۱۹۸	۳۹/۵۴۴	۴۶۰	-۱۰٪
۰	۱۷۲۵/۶۰۹	۴۹۷/۸۶۸	۷۲۸/۱۹۸	۳۹/۵۴۴	۴۶۰	-۰٪
۰/۰۳۱	۱۷۷۹/۷۲۲	۴۹۹/۱۰۰	۷۶۸/۹۲۳	۳۶/۶۹۸	۴۷۵	+۱۰٪
۰/۰۵۷	۱۸۲۳/۳۸۴	۵۴۴/۴۷۳	۷۶۸/۹۲۳	۳۹/۹۸۷	۴۷۰	+۲۰٪
۰/۰۸۳	۱۸۶۸/۷۵۷	۵۸۹/۸۴۶	۷۶۸/۹۲۳	۳۹/۹۸۷	۴۷۰	+۳۰٪

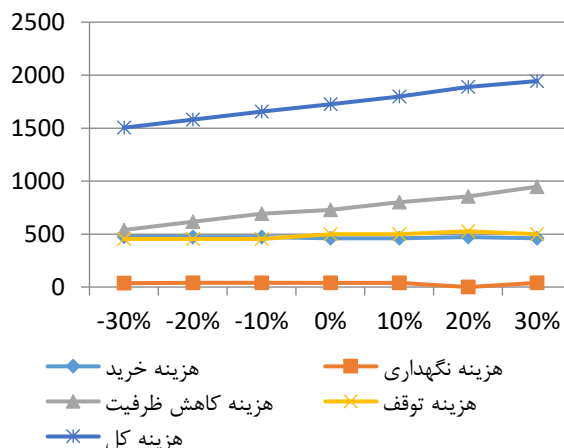
همان‌طور که از شکل ۷ مشخص است، هزینه هر ساعت توقف سیستم به میزان (درصد) مشخص شده نیز باعث تغییر در هزینه کل می‌شود. همچنین این تغییر در هزینه‌های دیگر مسئله نیز تأثیرگذار است.



شکل ۷: اثر تغییر هزینه توقف سیستم بر هزینه کل

#### ۶-۱-۵- اثر تغییر پاسخ بهینه نسبت به تغییر پارامترهای مسئله

اثر تغییر پاسخ بهینه نسبت به تغییر پارامترهای مسئله در جدول ۱۳ نشان داده شده است. همچنین اثر تغییر نسبی پارامترهای فوق بر روی پاسخ بهینه به صورت نمودار عنکبوتی در شکل ۸ نیز نمایش داده شده‌اند. محور افقی در این شکل، درصد تغییر پارامتر موردنظر و محور عمودی میزان هزینه کل سیستم را در حالت بهینه نشان می‌دهد.



شکل ۶: اثر تغییر هزینه کاهش ظرفیت بر هزینه کل

همان‌طور که از شکل ۶ مشخص است، تغییر در هزینه هر ساعت کاهش ظرفیت سیستم به میزان (درصد) مشخص شده بر هزینه‌های دیگر مسئله تأثیرگذار بوده و باعث می‌شود هزینه کل نیز به صورت خطی تغییر کند.

#### ۶-۱-۴- تحلیل حساسیت نسبت به هزینه هر ساعت توقف سیستم

در این مرحله هزینه هر ساعت توقف سیستم به میزان (درصد) مشخص شده تغییر یافته و سپس نتایج حل مجدد مسئله در جدول ۱۲ نشان داده شده است.

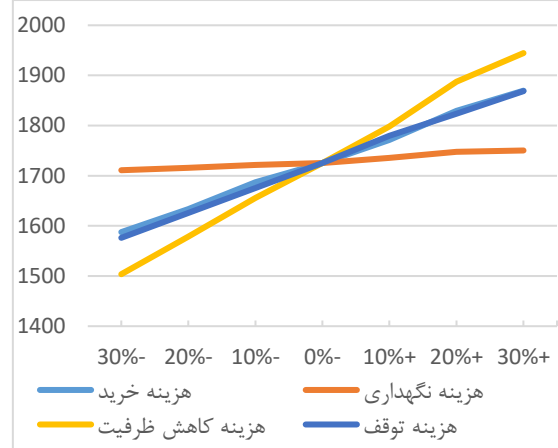
جدول ۱۳: خلاصه تحلیل حساسیت پاسخ بهینه مسئله نسبت به پارامترهای مسئله

مقدار بهینه تابع هدف (با در نظر گرفتن میزان درصد تغییر هزینه‌ها)								درصد تغییر
هزینه توقف		هزینه کاهش ظرفیت		هزینه نگهداری		هزینه خرید		
درصد تغییر	مقدار	درصد تغییر	مقدار	درصد تغییر	مقدار	درصد تغییر	مقدار	
-۰/۰۸۷	۱۵۷۶/۲۴۹	-۰/۰۱۲۹	۱۵۰۳/۶۷۲	-۰/۰۰۸	۱۷۱۱/۰۰۹	-۰/۰۸۰	۱۵۸۷/۶۰۹	-۳۰٪
-۰/۰۵۸	۱۶۲۶/۰۳۶	-۰/۰۸۵	۱۵۷۸/۸۵۴	-۰/۰۰۶	۱۷۱۵/۷۷۵	-۰/۰۵۳	۱۶۳۳/۶۰۹	-۲۰٪
-۰/۰۲۹	۱۶۷۵/۸۲۳	-۰/۰۴۰	۱۶۵۵/۷۴۶	-۰/۰۰۲	۱۷۲۱/۶۵۵	-۰/۰۲۲	۱۶۸۶/۸۴۹	-۱۰٪
۰	۱۷۲۵/۶۰۹	۰	۱۷۲۵/۶۰۹	۰	۱۷۲۵/۶۰۹	۰	۱۷۲۵/۶۰۹	۰٪
۰/۰۳۱	۱۷۷۹/۷۲۲	۰/۰۴۲	۱۷۹۸/۴۲۶	۰/۰۰۶	۱۷۳۵/۵۷۵	۰/۰۲۷	۱۷۷۱/۶۰۹	+۱۰٪
۰/۰۵۷	۱۸۲۳/۳۸۴	۰/۰۹۴	۱۸۸۷/۲۳۵	۰/۰۱۳	۱۷۴۷/۴۸۸	۰/۰۶۰	۱۸۲۹/۳۴۹	+۲۰٪
۰/۰۸۳	۱۸۶۸/۷۵۷	۰/۱۲۷	۱۹۴۴/۰۶۹	۰/۰۱۴	۱۷۵۰/۳۹۱	۰/۰۸۰	۱۸۶۳/۶۰۹	+۳۰٪

#### ۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش با انتخاب تأمین‌کنندگان برای قطعات اصلی و یدکی سیستم تغذیه آب بویلر بازیاب حرارتی، مسائل زنجیره‌تأمین در دوره طراحی و بهره‌برداری ترکیب شده‌اند. از آنجایی که قابلیت اطمینان و یا به عبارتی نرخ خرابی قطعات نقش تعیین‌کننده‌ای در هزینه‌های این سیستم دارد، در این پژوهش مدل پیشنهادی برای انتخاب تأمین‌کنندگان بر اساس محاسبه قابلیت اطمینان کل سیستم توسعه یافته است. در این مدل، انتخاب تأمین‌کنندگان با در نظر گرفتن هزینه خرید قطعات اصلی و یدکی، هزینه نگهداری قطعات یدکی در انبار، هزینه کاهش ظرفیت و هزینه توقف ناشی از خرابی قطعات انجام شده و برای یک مطالعه موردی اجرا شده است. هدف این پژوهش مدل‌سازی مسئله بهینه‌سازی کیفیت قطعات به کار رفته در یک سیستم صنعتی، در فاز طراحی و تعیین کیفیت قطعات یدکی، در فاز بهره‌برداری آن است. یک مطالعه موردی برای سیستم تغذیه آب بویلر حرارتی با رویکرد پیشنهادی ارائه داده شد و پس از به دست آوردن نتایج تحلیل زنجیره مارکوف، نتایج آن در یک مدل ریاضی قرار داده شده و توسط نرم‌افزار GAMS حل شد. سپس حساسیت تأثیر تغییرات پارامترهای مهم مسئله بر روی پاسخ بهینه، در سیستم مورد بحث، نشان داده شده و دلایل آن تحلیل شد.

ثبات نرخ خرابی قطعات در طی زمان ممکن است از دیدگاه‌های متفاوتی مورد نظر قرار گیرد. از یک سو در آغاز دوره نصب قطعات نرخ خرابی کاهشی است و از سوی دیگر پس از استهلاک قطعات و در دوره پیری آن‌ها، این نرخ افزایشی است. به این ترتیب مدل ارائه شده تنها با این فرض اعتبار دارد که مطالعه قطعات برای دوران بلوغ آن‌ها (حداصل این دو دوره) انجام گیرد. اگر چه که این فرض در بسیاری از پژوهش‌ها مورد



شکل ۸: نمودار عنکبوتی پاسخ بهینه مسئله نسبت به پارامترهای مسئله

نتایج نشان می‌دهد که افزایش پارامترهای هزینه‌ای، اثرات مستقیم ولی متفاوتی بر روی مقدار بهینه تابع هدف (هزینه کل) دارد. همچنین هزینه کاهش ظرفیت (حالت نیمه بار) بیشترین سهم و هزینه توقف و هزینه خرید تقریباً تأثیر یکسانی بر سیستم داشته ولی هزینه نگهداری قطعات در انبار تقریباً ثابت بوده و تغییر آن تأثیر چندانی بر هزینه کل ندارد. این امر نشان‌دهنده آن است که یا هزینه رخداد حالت نیمه بار برای سیستم زیاد بوده و یا احتمال نسبی رخداد آن زیاد است. به این دلیل توصیه می‌شود که در صورت امکان سیستم به گونه‌ای باز طراحی شود که این احتمال کاهش یابد. اینکار می‌تواند با تغییر مکانیزم‌ها و یا افزودن قطعات افزونه برای نقاط کلیدی سیستم انجام گیرد. انتخاب بهترین گزینه برای افزودن می‌تواند به عنوان پژوهش جداگانه‌ای در آینده مطرح شود.

- allocation problem with heterogeneous components. *Reliability Engineering & System Safety*, 191, 106563.
- [2] Mellal, M. A., Al-Dahidi, S., & Williams, E. J. (2020). System reliability optimization with heterogeneous components using hosted cuckoo optimization algorithm. *Reliability Engineering & System Safety*, 203, 107110.
- [3] Lins, I. D., & Droguett, E. L. (2011). Redundancy allocation problems considering systems with imperfect repairs using multi-objective genetic algorithms and discrete event simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(1), 362-381.
- [4] Amari, S. V. (2012, January). Reliability of k-out-of-n standby systems with gamma distributions. In *2012 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium* (pp. 1-6). IEEE.
- [5] Garg, H. (2015). An approach for solving constrained reliability-redundancy allocation problems using cuckoo search algorithm. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(1), 14-25.
- [6] Li, Y. Y., Chen, Y., Yuan, Z. H., Tang, N., & Kang, R. (2017). Reliability analysis of multi-state systems subject to failure mechanism dependence based on a combination method. *Reliability Engineering & System Safety*, 166, 109-123.
- [7] Sujatha, M., & Parvathy, A. K. (2020). Investigation of Reliability of DC-DC Converters Using Reliability Block Diagram and Markov Chain Analysis. In *Reliability, Safety and Hazard Assessment for Risk-Based Technologies* (pp. 851-863). Springer, Singapore
- [8] Peiravi, A., Karbasian, M., Ardakan, M. A., & Coit, D. W. (2019). Reliability optimization of series-parallel systems with K-mixed redundancy strategy. *Reliability Engineering & System Safety*, 183, 17-28.
- [9] Barakat, S., Ibrahim, H., & Elbaset, A. A. (2020). Multi-objective optimization of grid-connected PV-wind hybrid system considering reliability, cost, and environmental aspects. *Sustainable Cities and Society*, 60, 102178.
- [10] Ma, X., Liu, B., Yang, L., Peng, R., & Zhang, X. (2020). Reliability analysis and condition-based maintenance optimization for a warm standby cooling system.

استفاده قرار می‌گیرد، ولی این فرض در حالت جایگزینی قطعات جدید موجود در انبار با قطعات خراب شده ممکن است درست نباشد زیرا قطعات جدید در دوران طفولیت قرار می‌گیرند و استفاده از توزیع‌های دیگری بجز توزیع نمایی (همچون توزیع وایبول) را ضروری می‌سازد. ولی از آنجا که استفاده از اینگونه توزیع‌ها به شدت بر پیچیدگی مسئله افزوده و علاوه بر این بهره‌گیری از مدل زنجیره مارکوف را ناممکن می‌کند، در این حالت برای بهبود مدل و نزدیک شدن آن به شرایط واقعی استفاده از شبیه‌سازی عددی توصیه می‌گردد. همچنین در صورتی که قطعات قبل از نصب تحت فرآیند آب‌بندی (burning in) قرار گیرد، استفاده از توزیع نمایی برای زمان خرابی قطعات توجیح‌پذیر خواهد بود

برای تحقیقات آتی می‌توان، علاوه بر استفاده از قطعات یدکی در انبار از قطعات تعمیرپذیر نیز استفاده کرد. تعمیرپذیر بودن قطعات به شدت بر پیچیدگی مدل مسئله تأثیر می‌گذارد. دلیل این امر آن است که باید مفروضات جدیدی از جمله تعیین نحوه انتخاب بین قطعه اصلی تعمیر شده و قطعه سالم و یا تعمیر شده موجود در انبار جهت جایگزینی با قطعه خراب تعریف شود. علاوه بر این، تعداد وضعیت‌های سیستم در زنجیره مارکوف افزایش قابل توجهی می‌یابد و حل مدل را نیز با چالش‌های مواجه خواهد کرد. یکی دیگر از جنبه‌ها برای تحقیقات آتی، اضافه کردن محدودیت‌های برای زمان دریافت قطعات خریداری شده از تأمین‌کنندگان و همچنین در نظر گرفتن زمانی برای نصب هر یک از قطعات در سیستم است. همچنین در نظر گرفتن عدم قطعیت برای نرخ خرابی، نرخ تعمیر و تمامی هزینه‌ها، یکی دیگر از زمینه‌ها برای پژوهش‌های آتی است که در این صورت می‌توان از اعداد فازی برای مدل‌سازی مسئله استفاده کرد. این موارد، مدل را به شرایط واقعی و عملیاتی بسیار نزدیک‌تر خواهند کرد.

با وجود آنکه فرض عمر نامحدود برای سیستم واقعی نیست ولی از آنجا که سیستم مورد نظر بخشی از نیروگاه برق است که به طور معمول ده‌ها سال مورد استفاده قرار می‌گیرد، این فرض چندان دور از واقعیت نبوده و در مقابل استفاده از روابط اقتصاد مهندسی را در مدل تسهیل می‌کند.

## ۸- منابع

- [1] Dobani, E. R., Ardakan, M. A., Davari-Ardakani, H., & Juybari, M. N. (2019). RRAP-CM: A new reliability-redundancy

- Multi-State System Implementing Interval Valued Universal Generating Function. *Journal of Reliability and Statistical Studies*, 81-120.
- [15] Abouei Ardakan, M., Sima, M., Zeinal Hamadani, A., & Coit, D. W. (2016). A novel strategy for redundant components in reliability--redundancy allocation problems. *IIE Transactions*, 48(11), 1043-1057
- [16] Valian, E., & Valian, E. (2013). A cuckoo search algorithm by Lévy flights for solving reliability redundancy allocation problems. *Engineering Optimization*, 45(11), 1273-1286.
- Reliability Engineering & System Safety*, 193, 106588.
- [11] Ardakan, M. A., & Zio, E. (2020). A new Markov-based model for reliability optimization problems with mixed redundancy strategy. *Reliability Engineering & System*, 201, 106987.
- [12] Sobhani, Z., & Shahrokhi, M. (2019). Availability Optimization of a Multi-State Industrial System with the Markov Chain Approach. *Industrial Management Journal*, 11(3), 380-404. (in Persian)
- [13] Sharifi, M., Cheragh, G., Dashti Maljaji, K., Zaretalab, A., Shahriari, M. (2020). Reliability and Cost Optimization of a System with k-out-of-n Configuration and Choice of Decreasing the Components Failure Rates. *Scientia Iranica*.
- [14] Bisht, S., & Singh, S. B. (2021). Reliability Evaluation of Repairable Parallel-Series