

# ارائه‌ی یک مدل چندهدفه‌ی جدید برای مسئله‌ی انتخاب تأمین‌کننده در زنجیره‌ی تأمین، و حل آن با الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر پارتو

مرضیه کریمی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

ابوالفضل کاظمی\* (استادیار)

مهدی عزیزمحمدی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، زمستان ۱۳۹۴ (دوره‌ی ۱ - ۳۱، شماره‌ی ۲/۱، ص. ۷۱-۶۸)

مسئله‌ی تخصیص سفارشات خرید به تأمین‌کنندگان، یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های مدیران خرید در یک زنجیره‌ی تأمین محسوب می‌شود. در این نوشتار با ارائه‌ی مدلی در زنجیره‌ی تأمین علاوه بر کمینه‌کردن کل هزینه‌های خریدار، به کیفیت و تحویل به موقع نیز توجه شده و از رویکرد پارتو برای حل مسئله‌ی انتخاب تأمین‌کننده استفاده می‌شود. علاوه بر این، استراتژی تخفیف تدریجی و همچنین هزینه‌ی کمبود کالا نیز در نظر گرفته شده است. به منظور حل مدل پیشنهادی انتخاب تأمین‌کننده از دو الگوریتم چندهدفه‌ی مبتنی بر رویکرد پارتو به نام‌های الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) و الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NRGA) بهره گرفته‌ایم. در نهایت به منظور اثبات عملکرد مناسب روش‌های حل ارائه شده در مدل پیشنهادی، این روش‌ها روی مسائل آزمایشی تولیدشده با ابعاد مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و پاسخ‌های به دست آمده نیز با استفاده از روش‌های آماری مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

**واژگان کلیدی:** زنجیره‌ی تأمین، انتخاب تأمین‌کننده، تصمیم‌گیری چندهدفه، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب، الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب.

## ۱. مقدمه

مسئله‌ی انتخاب تأمین‌کننده یک مسئله‌ی تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه و تحت تأثیر عوامل متعددی است که اغلب در تقابل با یکدیگرند.<sup>[۱]</sup> در سال ۱۹۶۶، دیکسون ۲۳ معیار را که مدیران خرید در مسائل گوناگون انتخاب تأمین‌کننده مدنظر قرار می‌دهند شناسایی کرد. در نظر گرفتن توابع هدفی مانند کمینه‌کردن هزینه‌ها، بیشینه‌کردن کیفیت و کمینه‌کردن زمان تحویل به صورت هم‌زمان، ماهیت مسئله‌ی انتخاب تأمین‌کننده را به یک مسئله‌ی چندهدفه تبدیل کرده است.<sup>[۲]</sup> افزون بر این، تصمیم‌گیری برای انتخاب تأمین‌کننده -- از آنجا که توابع هدف مختلفی را باید به طور هم‌زمان در نظر گرفت -- بسیار پیچیده است. از طرف دیگر چون غالباً این توابع هدف با یکدیگر در تعارض‌اند باید در فرایند انتخاب تأمین‌کننده، تبادلات میان معیارها را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. روش‌های تصمیم‌گیری با معیار چندگانه (MCDM)،<sup>۱</sup> تصمیم‌گیرندگان را در ارزیابی مجموعه‌ی از گزینه‌ها یاری می‌کند.<sup>[۳]</sup> در این نوشتار به موضوع تخصیص سفارشات به تأمین‌کنندگان پرداخته شده

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۷/۲۹، اصلاحیه ۱۳۹۳/۲/۶، پذیرش ۱۳۹۳/۳/۱۱

marziek@ymail.com  
abkaazemi@qiau.ac.ir  
m.a.zizmohamadi@gmail.com

و چون این موضوع یک مسئله‌ی چندمعیاره است، سه تابع هدف برای آن در نظر گرفته شده است. تابع هدف اول برای کمینه‌کردن هزینه‌ی خریدار -- شامل هزینه‌ی سفارش‌دهی، هزینه‌ی نگه‌داری، هزینه‌ی کمبود موجودی، و هزینه‌ی خرید که به صورت تخفیف افزایشی محاسبه می‌شود -- است. تابع هدف دوم برای بیشینه‌کردن سطح کیفیت محصول، و تابع هدف سوم برای تحویل به موقع در نظر گرفته شده است. این مقاله در شش بخش سازمان‌دهی شده است. بخش دوم به مرور مقالات مرتبط با موضوع اختصاص یافته است. بخش سوم شامل معرفی نمادها و مدل پیشنهادی است. در بخش چهارم، الگوریتم حل مدل پیشنهادی ارائه شده است. تجزیه و تحلیل نتایج در بخش پنجم آمده، و نهایتاً در بخش ششم، نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

## ۲. مروری بر ادبیات موضوع

مسئله‌ی انتخاب تأمین‌کننده مسئله‌ی جدیدی نیست و تحقیقات بسیار زیادی

در باره‌ی مباحث مفهومی و مدل‌سازی این نوع مسائل وجود دارد. اولین تحقیقات مرتبط با مسئله‌ی انتخاب تأمین‌کننده در سال‌های قبل از ۱۹۵۰ و در زمانی که کاربرد برنامه‌ریزی خطی و محاسبات عددی نوپا بود، انجام شد.<sup>[۱]</sup> در سال ۱۹۶۶، دیکسون برای اولین بار اهمیت ۲۳ معیار را برای انتخاب تأمین‌کننده براساس مطالعه روی مدیران خرید مشخص و مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. وی نشان داد که کیفیت، مهم‌ترین معیار است.<sup>[۵]</sup> گابالا اولین کسی بود که برنامه‌ریزی ریاضی را برای تخصیص سفارشات به تأمین‌کنندگان، در یک فعالیت واقعی به کار برد. او از برنامه‌ریزی اعداد صحیح برای کمیته‌کردن کل قیمت در شرایط تخفیف برای اختصاص سفارش به تأمین‌کنندگان استفاده کرد.<sup>[۶]</sup> نارسیم‌ها و استونایف<sup>۲</sup> در سال ۱۹۸۶، مدل برنامه‌ریزی تک‌هدفه‌ی عدد صحیح را برای بهینه‌سازی تخصیص سفارشات به گروهی از تأمین‌کنندگان به کار بردند. هدف از این مدل، کمیته‌کردن هزینه‌های حمل‌ونقل و جریمه با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت تأمین‌کنندگان و رضای تقاضا بود.<sup>[۷]</sup> در سال ۱۹۹۱، مطالعه‌ی ۷۴ مقاله‌یی که معیارهای انتخاب تأمین‌کننده را مورد بحث و بررسی قرار داده بود، نشان داد که «قیمت» مهم‌ترین معیار برای انتخاب تأمین‌کننده است.<sup>[۸]</sup> سارکیس و سمپل<sup>۳</sup> در سال ۱۹۹۹ یک مدل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح را مطرح کردند که مجموع هزینه‌های خرید را با توجه به وجود حجم تخفیف تجاری بهینه می‌کند.<sup>[۹]</sup> دگراو<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۰ مطالعه‌ی را انجام دادند که در آن، علاوه بر مرور مدل‌های مورد استفاده در انتخاب تأمین‌کننده، کاربرد مفهومی هزینه‌ی کل مالکیت را به عنوان پایه و اساسی برای مقایسه‌ی مدل‌های انتخاب تأمین‌کننده پیشنهاد دادند.<sup>[۱۰]</sup> در سال ۲۰۰۲، یک الگوریتم ابتکاری برای حل یک فرمول مختلط عدد صحیح خطی به منظور انتخاب تأمین‌کننده و مسئله‌ی اندازه‌بندی برای یک محصول در صورت وجود تقاضای پویا و عدم وجود محدودیت ظرفیت تأمین‌کننده، ایجاد شد.<sup>[۱۱]</sup> چن و همکاران در سال ۲۰۰۶، یک مدل فازی برای تعیین درجه و رتبه‌ی تأمین‌کننده‌ها براساس مفاهیم تاپسیس<sup>۵</sup> ارائه کردند.<sup>[۱۲]</sup> ژیا و وو در سال ۲۰۰۷، مدلی را براساس روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)،<sup>۶</sup> مجموعه‌های هموار<sup>۷</sup> و تصمیم‌گیری چندمعیاره، با فرض چندمعیاره، با فرض تخفیف در صورت افزایش مقدار خرید، پیشنهاد دادند.<sup>[۱۳]</sup> در سال ۲۰۰۹ نیز یک مدل چندهدفه‌ی فازی جمع‌پذیر وزنی<sup>۸</sup>، با فرض تخفیف در خرید تعداد بیشتر کالا در زنجیره‌ی تأمین، ایجاد شد.<sup>[۹]</sup>

در سال ۲۰۱۰ یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه‌ی فازی برای انتخاب تأمین‌کننده با در نظر گرفتن فاکتورهای عدم قطعیت و ریسک ارائه، و برای حل آن مدل از یک رویکرد احتمالی استفاده شد.<sup>[۱۴]</sup> در سال ۲۰۱۱ محققین یک مدل وزن‌دار با عملگر max-min فازی برای انتخاب تأمین‌کننده توسعه دادند تا ابهامات موجود در داده‌های ورودی و وزن‌های مختلف شاخص‌ها در این مسائل به‌طور مؤثر در نظر گرفته شود.<sup>[۱۵]</sup>

در سال ۲۰۱۲، روش جامعی براساس نظریه‌ی مطلوبیت چندمعیاره‌ی فازی و برنامه‌ریزی چندهدفه برای رتبه‌بندی و انتخاب بهترین تأمین‌کننده ارائه دادند. تابع هدف مدل به‌طور هم‌زمان مقدار خرید را بیشینه و کل هزینه خرید را کمینه می‌سازد.<sup>[۱۶]</sup>

اریکان در سال ۲۰۱۳، مسئله‌ی انتخاب تأمین‌کننده‌ی چندمنبعی را به صورت یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی خطی چندهدفه در نظر گرفت. برای حل مسئله، یک مدل ریاضی فازی و یک روش حل جدید به منظور تحقق خواسته‌های تصمیم‌گیرندگان برای اهداف فازی ارائه شده است.<sup>[۱۷]</sup>

با در نظر گرفتن این تحقیقات، در نوشتار حاضر به ارائه‌ی مدل جدیدی در حوزه‌ی انتخاب تأمین‌کننده پرداخته‌ایم. از خصوصیات این مدل، در نظر گرفتن یک

خریدار و چند تأمین‌کننده است. در این مسئله، مشتری نهایی مقدار مشخصی از نیاز خود را به‌عنوان تقاضا مطرح می‌کند. زنجیره‌ی خریدار و تأمین‌کنندگان قصد دارد با در نظر گرفتن سه هدف هزینه، کیفیت و تحویل به‌موقع تقاضای مشتری را برآورده کند. در واقع با توجه به محدودیت‌های مسئله، تصمیم‌گیری می‌شود که برای تأمین تقاضای مشتری از چه تأمین‌کنندگانی و چه مقدار خریداری شود تا تعداد محصولات تحویلی سالم (مبین هدف کیفیت) به مشتری نهایی با حجم تأخیرات محصول نهایی (مبین هدف تحویل به‌موقع) و هزینه (مبین هدف هزینه) در توازن بهینه باشد.

قابل ذکر است که در ادبیات مسائل انتخاب تأمین‌کننده، عمده کارهای مطالعه شده دارای مدلی خطی به‌خصوص مدل‌های مختلط خطی - عدد صحیح هستند و در تعداد محدودی از کارها مدل به‌صورت غیرخطی در نظر گرفته شده است. همچنین اکثر مقالات یا به‌صورت تک‌هدفه است یا از رویکرد یک پارچه‌سازی برای حل مدل چندهدفه استفاده کرده‌اند. لذا ما در این تحقیق با ارائه‌ی مدلی در زنجیره‌ی تأمین که علاوه بر کمیته‌کردن کل هزینه‌های خریدار، هدف کیفیت و تحویل به‌موقع را نیز در نظر می‌گیرد، از رویکرد پارتو<sup>۹</sup> برای حل مسئله‌ی انتخاب تأمین‌کننده استفاده می‌کنیم و در ادامه به بررسی مفاهیم آن خواهیم پرداخت.

### ۳. تعریف مسئله

پس از ارائه‌ی مقدمه و پیشینه‌ی تحقیق، در این بخش ابتدا مسئله‌ی پیشنهادی انتخاب تأمین‌کننده تشریح، و سپس فرضیات، پارامترها و متغیرهای تصمیم تعریف می‌شوند. در ادامه نیز مدل سه‌هدفه‌ی انتخاب تأمین‌کننده در زنجیره‌ی تأمین ارائه می‌شود.

مدلی که در اینجا مد نظر است یک مدل سه‌هدفه برای انتخاب تأمین‌کننده است. تابع هدف اول به منظور کمیته‌سازی هزینه‌های سالیانه‌ی خریدار (BAC)<sup>۱۰</sup> شامل چهار بخش هزینه‌ی سالیانه‌ی سفارش‌دهی خریدار (BAOC)<sup>۱۱</sup>، هزینه‌ی سالیانه‌ی نگه‌داری موجودی خریدار (BAIHC)<sup>۱۲</sup>، هزینه‌ی سالیانه‌ی کمبود خریدار (BAISC)<sup>۱۳</sup>، و نهایتاً هزینه‌ی خرید سالیانه‌ی خریدار (BAPC)<sup>۱۴</sup> که به‌صورت تخفیف افزایشی است - محاسبه می‌شود. تابع هدف دوم به منظور کمیته‌سازی تعداد محصولات معیوب در نظر گرفته شده و بدین مفهوم است که خریدار مایل است با توجه به سطح کیفیت تأمین‌کنندگانش، کیفیت محصولات خریداری شده‌اش را تا جایی که ممکن است بهبود بخشد تا موجب افزایش رضایت مشتریانش شود. تابع هدف سوم برای نمایش هدف تحویل به‌موقع به‌صورت کمیته‌کردن تعداد کالاهای دریافتی با تأخیر از تأمین‌کنندگان تعریف شده است.

### ۱.۳. فرضیات

در این بخش، مفروضات مدل پیشنهادی عبارت است از:

- مسئله برای حالت تک‌محصولی در نظر گرفته می‌شود.
- مسئله با وجود استراتژی تخفیف مدل‌سازی خواهد شد.
- تعداد سطوح قیمت تأمین‌کنندگان یکسان فرض می‌شود.
- همه متغیرها و عوامل مسئله قطعی‌اند.
- در تأمین قطعات، تعداد تأمین‌کنندگان مهم نیست.
- تقاضای سالانه‌ی مشتری نهایی ثابت است.

$$\text{Min } Z_r = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m D(x_{ij} + y_{ij}) \alpha_i \quad (3)$$

s. t.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_{ij} = 1 \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m z_{ij} \leq 1, \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$L_{ij} z_{ij} \leq D(x_{ij} + y_{ij}) \leq U_{ij} z_{ij}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m \quad (6)$$

$$x_{ij} \leq z_{ij}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m \quad (7)$$

$$y_{ij} \leq z_{ij}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m \quad (8)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq 1, \quad 0 \leq y_{ij} \leq 1, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m \quad (9)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m \quad (10)$$

تابع هدف ۱ به منظور کمیته‌سازی هزینه‌ی کل سالیانه‌ی خریدار مد نظر قرار گرفته، و تابع هدف ۲ نشان‌دهنده‌ی هدف کیفیت است و به صورت کمیته‌کردن حجم سالانه‌ی محصول دریافتی معیوب از تأمین‌کنندگان تعریف شده است. تابع هدف ۳ برای نمایش هدف تحویل به موقع به صورت کمیته‌کردن تعداد کالاها‌ی دریافتی سالانه با تأخیر از تأمین‌کنندگان تعریف شده است. محدودیت ۴ اطمینان می‌دهد که مجموع سفارشات از تأمین‌کنندگان برابر با تقاضای محصول در واحد زمان است. محدودیت ۵ نشان می‌دهد که اگر تأمین‌کننده‌ی برای تأمین تقاضا انتخاب شود، از لیست سطوح قیمت تأمین‌کننده فقط یک سطح قیمت انتخاب می‌شود. محدودیت ۶ مربوط به حدود بالا و پایین مقادیر تخفیف است. محدودیت ۷ نشان می‌دهد که اگر تأمین‌کننده‌ی برای تأمین تقاضا انتخاب نشود، میزان مشارکت تأمین‌کننده‌ی مورد نظر در تأمین کالاها صفر خواهد بود؛ به عبارت دیگر اگر تأمین‌کننده توسط خریدار انتخاب نشود کسر تأمین تقاضای محصول که به این تأمین‌کننده واگذار می‌شود صفر خواهد بود. محدودیت ۸ نیز نشان می‌دهد که اگر تأمین‌کننده توسط خریدار انتخاب نشود، کسر کمبود تقاضا توسط تأمین‌کننده‌ی مورد نظر نیز صفر خواهد بود. محدودیت ۹ دامنه‌ی متغیرها را بین صفر و ۱ نشان می‌دهد و در آخر ماهیت دودویی تصمیم انتخاب تأمین‌کننده در محدودیت ۱۰ در نظر گرفته شده است.

پس از ارائه‌ی مدل پیشنهادی، روش‌های مورد استفاده برای حل مدل از جمله مباحث مهم در ادبیات مسائل بهینه‌سازی است. از آنجا که این نوع مسائل از رده‌ی مسائل NP-Hard هستند و ضمن این که به دلیل پیچیده بودن مدل، زمان محاسباتی روش‌های حل دقیق به شدت بالاست، غالباً قادر به حل این نوع مسائل نیستند.<sup>[۱۸]</sup> از جمله عواملی که باعث پیچیدگی مدل شده، تعداد زیاد محدودیت‌ها و متغیرهای تصمیم و همچنین صفر و ۱ بودن بعضی از متغیرها است. همچنین چندهدفه بودن مدل و تضاد بین جنس اهداف بر پیچیدگی مسئله افزوده است. بدین منظور، از الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه به عنوان یکی از پرکاربردترین ابزارهای حل این مدل‌ها، برای حل این نوع مسائل بهره جسته‌ایم.

#### ۴. روش حل

امروزه بسیاری از مسائل کاربردی در جهان واقعی را مسائل بهینه‌سازی ترکیباتی چندهدفه تشکیل می‌دهند که در آن اهداف در تضاد با یکدیگرند و بهبود در یک

• سفارشات به صورت ترتیبی دریافت می‌شود. بدین معنا که همواره بعد از دریافت سفارش و مصرف کامل آن، سفارش بعدی دریافت می‌شود.

#### ۲.۳. نمادها و پارامترها

$i$ : شاخص تعداد تأمین‌کنندگان ( $i = 1, \dots, n$ )؛

$j$ : شاخص تعداد سطوح قیمت ( $j = 1, \dots, m$ )؛

$D$ : تقاضای سالانه‌ی محصول نهایی؛

$n$ : تعداد تأمین‌کنندگان؛

$m$ : تعداد سطوح قیمت تأمین‌کننده‌ها؛

$T$ : زمان سیکل خریدار؛

$A_i$ : هزینه‌ی ثابت سفارش‌دهی به تأمین‌کننده‌ی  $i$ ام؛

$l_i$ : درصد کالاها‌ی معیوب برای تأمین‌کننده‌ی  $i$ ام؛

$\alpha_i$ : درصد تحویل سفارشات با تأخیر از تأمین‌کننده‌ی  $i$ ام؛

$p_{ij}$ : سطح قیمت پیشنهادی توسط تأمین‌کننده‌ی  $i$ ام در سطح قیمت  $j$ ؛

$L_{ij}$ : کم‌ترین میزان خریداری شده توسط تأمین‌کننده‌ی  $i$ ام در سطح قیمت  $j$ ؛

$U_{ij}$ : بیشترین میزان خریداری شده توسط تأمین‌کننده‌ی  $i$ ام در سطح قیمت  $j$ ؛

$h$ : هزینه‌ی نگه‌داری در واحد زمان برای خریدار؛

$\pi$ : هزینه‌ی کمبود در واحد زمان برای خریدار.

#### ۳.۳. متغیرهای تصمیم

$Q$ : مجموع مقدار سفارش به تأمین‌کنندگان در هر دوره؛

$Q_i$ : تقاضای برآورده شده توسط تأمین‌کننده‌ی  $i$ ام در هر دوره ( $Q = DT$ ) و

$$\left(\sum_{i=1}^n Q_i = Q\right)$$

$b$ : مقدار کمبود (سفارش معوقه‌ی) کل؛

$b_i$ : مقدار سفارش معوقه‌ی که توسط تأمین‌کننده‌ی  $i$ ام تأمین می‌شود؛

$x_{ij}$ : درصدی از تقاضا که توسط تأمین‌کننده‌ی  $i$ ام در سطح قیمت  $j$  برآورده می‌شود؛

$y_{ij}$ : درصدی از تقاضا که به عنوان سفارش معوقه توسط تأمین‌کننده‌ی  $i$ ام در سطح قیمت  $j$  تأمین می‌شود؛

$z_{ij}$ : متغیر صفر و ۱ که در صورت انتخاب تأمین‌کننده‌ی  $i$ ام در سطح قیمت  $j$  مقدار ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.

بر اساس تعاریف انجام شده، مدل پیشنهادی مطابق توابع و محدودیت‌های

مشروحه در ادامه ارائه می‌شود.

#### ۴.۳. توابع هدف و محدودیت‌ها

$$\text{Min } Z_1 = \frac{D}{Q} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_i z_{ij} + \frac{Q}{T} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (h x_{ij} + \pi y_{ij}) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{j-1} (p_{ij}(D(x_{ij} + y_{ij}) - L_{ij}) + p_{ik}(U_{ik} - L_{ik})) z_{ij} \quad (1)$$

$$\text{Min } Z_r = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m D(x_{ij} + y_{ij}) l_i \quad (2)$$

هدف باعث بهتر شدن هدف دیگر نمی‌شود. اکثر مطالعات در زمینه‌ی مسائل انتخاب تأمین‌کننده در زنجیره‌ی تأمین به صورت تک‌معیاره یا تک‌هدفه بررسی شده است در حالی که یک هدف یا معیار در مسائل کاربردی واقعی و عملی کافی نیست. در مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه، با بهینه‌ساختن تابع هدف الگوریتم به پایان می‌رسد اما در مسائل چندهدفه‌ی بهینه‌سازی همزمان چند تابع هدف کاری دشوار و زمان‌براست و در اغلب این‌گونه مسائل تعدادی جواب قابل قبول براساس معیارهای نامغلوبی به دست می‌آید. در این نوشتار به منظور حل مدل پیشنهادی دو الگوریتم چندهدفه‌ی مبتنی بر پارتو به نام‌های «الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب‌ها<sup>۱۵</sup>» و «الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب‌ها<sup>۱۶</sup>» ارائه می‌شود و طی آن نتایج حاصل از این دو الگوریتم با یکدیگر مقایسه می‌شود.

### ۱.۱.۴ الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب‌ها (NSGA-II)

این الگوریتم یکی از کارآمدترین و مشهورترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه است که در سال ۲۰۰۱ ارائه شد.<sup>[۱۹]</sup> چنان‌که اشاره کردیم، الگوریتم‌های بهینه‌سازی تک‌هدفه، حل بهینه را با توجه به یک هدف می‌بایند و این در حالی است که در مسائل چندهدفه حل بهینه‌ی مجزایی را نمی‌توان یافت. پس طبیعی است که با مجموعه‌ی از حل‌ها به نام حل‌های مغلوب نشده‌ی مؤثر سروکار داشته باشیم. از بین این مجموعه حل‌های متناهی حل مناسب جواب‌هایی خواهد بود که در مقایسه با همه‌ی اهداف عملکرد قابل قبولی داشته باشد. برای انجام مقایسات مناسب در بهینه‌سازی چندهدفه از مفهوم غلبه استفاده می‌کنیم. با این فرض که  $F$  کل فضای موجه مسئله باشد و  $x_1, x_2 \in F$  دو جواب از این مسئله باشد، می‌گوییم  $x_1$  بر  $x_2$  غالب است (با  $x_2$  مغلوب  $x_1$  است) اگر و فقط  $x_1$  نسبت به  $x_2$  در هیچ‌کدام از اهداف بدتر نباشد ( $f_i(x_1) \leq f_i(x_2) \forall i \in \{1, 2, \dots, m\}$ ) و  $x_1$  نسبت به  $x_2$  دست‌کم در یکی از اهداف اکیداً بهتر باشد ( $f_i(x_1) < f_i(x_2)$ ).<sup>[۲۰]</sup> با توجه به این تعریف، دو اپراتور به منظور رتبه‌بندی جواب‌ها به الگوریتم ژنتیک اضافه شده و در ادبیات به الگوریتم NSGA-II شهرت یافته است. آن دو اپراتور عبارت‌اند از: مرتب‌سازی سریع نامغلوب‌ها<sup>۱۷</sup> و فاصله‌ی ازدحامی<sup>۱۸</sup>. در ادامه، گام‌های پیاده‌سازی الگوریتم NSGA-II تشریح می‌شود.

#### ۱.۱.۴.۱ مقداردهی اولیه

اطلاعات اولیه برای شروع کار الگوریتم NSGA-II پیشنهادی عبارت است از: اندازه جمعیت اولیه (nPop)، احتمال عملگر تقاطع (Pc)، احتمال عملگر جهش (Pm) و تعداد تکرار الگوریتم (nIt). لازم به ذکر است که مقادیر تنظیم شده‌ی این پارامترها را با استفاده از روش تاگوچی به دست می‌آوریم.

#### ۲.۱.۴ ساختار کروموزوم

در این قسمت به منظور طراحی کروموزوم، از متغیرهای ساختاری استفاده کرده‌ایم. برای این منظور هر یک از ساختارهای موجود در جواب‌های ایجادشده، مبین یکی از ویژگی‌های جواب نیز هست. ساختار مربوط به متغیرهای مسئله در شکل ۱ ارائه شده است.

به عنوان مثال، در مورد ساختار جواب مربوط به  $Z_{ij}$ ، چنانچه اقدام به خرید از تأمین‌کننده‌ی  $i$ ام در سطح قیمت  $z$  کنیم، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار

$$Z_{ij} : [i * j] \text{ double}; X_{ij} : [i * j] \text{ double}; Y_{ij} : [i * j] \text{ double}$$

شکل ۱. ساختار جواب‌های مسئله.

صفر به ماتریس مربوطه تخصیص می‌یابد. لازم به ذکر است که از هر تأمین‌کننده، حداکثر در یک سطح قیمت امکان خرید وجود دارد. جواب به صورت رشته‌ی تشکیل می‌شود که در فرایند حل به صورت یک ماتریس تغییر شکل می‌دهد. نمونه ساختار تشریح شده به منظور مثالی با ۴ تأمین‌کننده -- که در آن، تأمین‌کننده‌ی ۱ دارای یک سطح قیمت، تأمین‌کننده‌ی ۲ دارای چهار سطح قیمت، تأمین‌کننده‌ی ۳ دارای شش سطح قیمت، و تأمین‌کننده‌ی ۴ دارای پنج سطح قیمت است -- در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای ایجاد مقادیر مربوط به  $X_{ij}$  و  $Y_{ij}$  نیز به همین صورت اقدام شده است با این تفاوت که اعداد به صورت تصادفی در بازه بین صفر و ۱ ایجاد می‌شوند و ماتریس‌های حاصل در ماتریس  $Z_{ij}$  ضرب و نتیجه به عنوان مقادیر اصلی وارد الگوریتم می‌شود. بدین ترتیب اگر سطح قیمتی تأمین‌کننده‌ی در ماتریس  $Z_{ij}$  انتخاب نشده باشد، مقادیر متناظر آن نیز در ماتریس‌های  $X_{ij}$  و  $Y_{ij}$  برابر صفر خواهد بود. سپس جواب ایجاد شده در داخل محدودیت‌ها بررسی می‌شود و در صورت صادق بودن آن در تمامی محدودیت‌ها، به عنوان یک جواب اولیه انتخاب می‌شود و در صورت عدم صادق بودن، تغییراتی به صورت تصادفی در آن انجام می‌شود تا پس از موجه شدن به عنوان پاسخ اولیه مد نظر قرار گیرد. بدین ترتیب تمامی جواب‌های ایجاد شده در تکرارها موجه است و نیازی به استفاده از تابع پنازتی نیست.

#### ۳.۱.۴ مرتب‌سازی سریع نامغلوب‌ها و فاصله‌ی ازدحامی

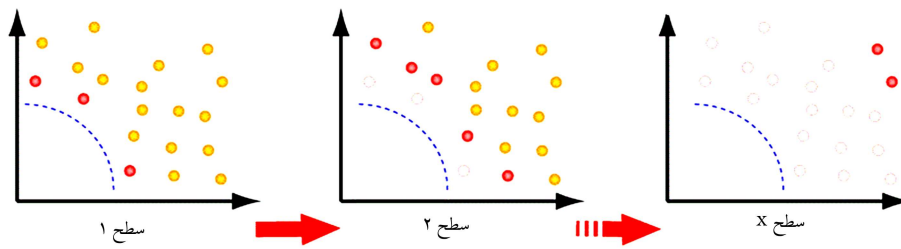
در مرتب‌سازی سریع نامغلوب‌ها، رتبه‌بندی جمعیت براساس نامغلوب‌ها با استفاده از مفهوم غلبه صورت می‌گیرد. به طور کلی برای مرتب‌کردن جمعیتی با اندازه‌ی  $n$  براساس سطوح نامغلوب‌ها، هر جواب با تمام جواب‌های دیگر موجود در جمعیت مقایسه می‌شود تا مغلوب بودن یا نبودن جواب مشخص شود. در نهایت مجموعه‌ی از جواب‌ها وجود دارد که هیچ‌کدام غالب و مغلوب همدیگر نمی‌شوند؛ لذا این جواب‌ها اولین مرز از مرزهای نامغلوب را تشکیل می‌دهند. برای تعیین جواب‌های موجود در مرزهای بعدی، جواب‌های موجود در مرز اول به طور موقت نادیده گرفته شده و فرایند فوق دوباره تکرار می‌شود. این فرایند تا زمانی که تمام جواب‌ها درون مرزهای نامغلوب قرار گیرند ادامه می‌یابد.<sup>[۲۱]</sup> نحوه‌ی مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب در شکل ۳ نشان داده شده است.

برای تخمین تراکم جواب اطراف یک جواب خاص در جمعیت، متوسط فاصله‌ی این جواب از هر دو جواب مجاور براساس مقادیر اهداف محاسبه می‌شود و مقدار آن را «فاصله‌ی ازدحام» می‌نامند. به منظور محاسبه‌ی فاصله ازدحام یک جواب خاص موجود در یک مرز، بزرگ‌ترین مستطیلی که آن جواب خاص درون مستطیل و دو جواب مجاور در دو سمت آن جواب، راس‌های آن مستطیل باشند را در نظر می‌گیریم و مجموع یک طول و یک عرض آن را به عنوان فاصله‌ی ازدحامی برای آن جواب خاص به دست می‌آوریم. در شکل ۴ نحوه‌ی نمایش محاسبات مربوط به

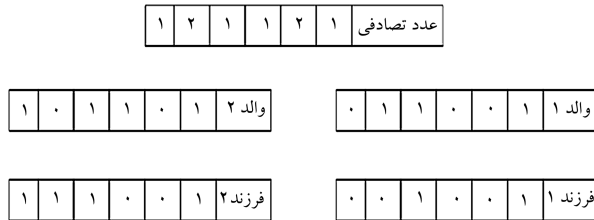
۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

$Z_{11}=1$	$Z_{12}=0$	۰	۰	۰	۰
$Z_{21}=0$	$Z_{22}=1$	$Z_{23}=0$	$Z_{24}=0$	۰	۰
$Z_{31}=0$	$Z_{32}=0$	$Z_{33}=1$	$Z_{34}=0$	$Z_{35}=0$	$Z_{36}=0$
$Z_{41}=0$	$Z_{42}=0$	$Z_{43}=0$	$Z_{44}=0$	$Z_{45}=1$	۰

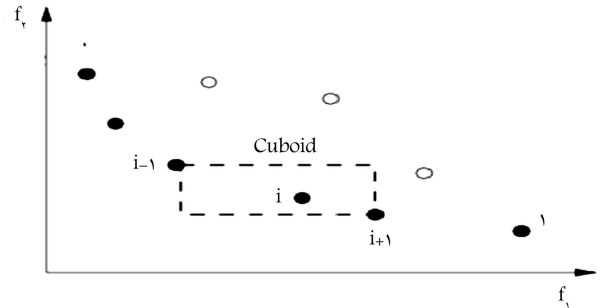
شکل ۲. ساختار مربوط به نحوه‌ی خرید از تأمین‌کنندگان در سطوح قیمتی آن‌ها.



شکل ۳. نحوه‌ی مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب یک جمعیت.



شکل ۵. نحوه‌ی اجرای عملگر تقاطع یک‌نواخت برای یک نمونه جواب.



شکل ۴. محاسبه فاصله ازدحام.

پراکنده شده‌اند استفاده می‌شود. در شرایطی که ژن‌ها با خصوصیات مناسب در طول رشته پراکنده شده باشند، استفاده از تقاطع یک‌نواخت می‌تواند مفیدتر از سایر روش‌های تقاطع باشد. عملگر تقاطع یک‌نواخت، به صورت تصادفی بعضی از بیت‌ها را در طول رشته‌های والدین به منظور تولید فرزندان جابه‌جا می‌کند. [۲۲] در شکل ۵ نحوه‌ی اجرای عملگر تقاطع یک‌نواخت مورد استفاده، برای یک نمونه جواب نشان داده شده است.

#### ۴.۱.۷. عملگر جهش

عملگر جهش مورد استفاده در این مدل از نوع گوسی است. بدین صورت که ابتدا یک نرخ جهش در نظر می‌گیریم که این نرخ در اثر اعمال تعداد ژن‌های یک کروموزوم نشانگر تعداد ژن‌هایی است که باید در هر کروموزوم تغییر کند. حال با استفاده از رابطه‌ی ۱۱ مقادیر ژن‌های انتخابی را به صورت تصادفی و با استفاده از توزیع نرمال تغییر خواهیم داد.

$$X_{new} = X + \sigma N(0, 1) \quad (11)$$

#### ۴.۱.۸. ارزیابی فرزندان و ترکیب کردن با والدین

در این بخش مجموعه فرزندان که از طریق عملگرهای تقاطع و جهش به وجود آمده‌اند را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم و به هر یک از فرزندان یک میزان برازندگی اختصاص می‌یابد. در این بخش از الگوریتم جمعیت فرزندان و والدین را با هم ترکیب کرده و جمعیتی معادل ۲ برابر جمعیت اولیه ایجاد می‌کنیم. [۲۰] بعد از انجام عمل ترکیب، حال مرتب‌سازی سریع نامغلوب‌ها و فاصله‌ی ازدحامی مطرح شده را اجرا می‌کنیم؛ بدین صورت که ابتدا اعضای جمعیت هر مرز را براساس فاصله‌ی ازدحامی و سپس براساس نامغلوب‌ها رتبه‌بندی می‌کنیم. این عمل باعث می‌شود جمعیت براساس مرز نامغلوب و فاصله‌ی ازدحامی رتبه‌بندی شود. [۲۱]

#### ۴.۱.۹. معیار توقف

«بررسی شرایط توقف» آخرین گام در الگوریتم‌های ژنتیک است. در این راستا شیوه‌ی استاندارد برای شرایط توقف الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه وجود ندارد. در نتیجه الگوریتم زمانی متوقف می‌شود که به بیشینه مقدار از پیش تعریف شده برسد.

فاصله‌ی ازدحامی ( $i$  distance) برای عضو دلخواه  $i$  از یک مرز غیر مغلوب ارائه شده است. [۲۰]

جوابی با مقدار فاصله‌ی ازدحامی کم‌تر بیان‌کننده‌ی تراکم بیشتر در اطراف آن جواب است. بنابراین مطلوب است برای مرحله‌ی بعد جواب‌هایی انتخاب شود که در ناحیه‌ی با تراکم کم‌تر یا به عبارتی دارای فاصله‌ی ازدحامی بیشتر است، زیرا با این کار تنوع و پراکندگی در جواب‌های به دست آمده بیشتر می‌شود. [۲۰، ۲۱]

#### ۴.۱.۴. والدین

در این بخش از والدینی نگه‌داری می‌شود که عمل مرتب‌سازی نامغلوب و فاصله‌ی ازدحامی روی آن‌ها انجام شده، و در مرحله‌ی بعد با توجه به استراتژی انتخاب مربوطه، عمل تقاطع و جهش روی آن‌ها صورت می‌گیرد.

#### ۴.۱.۵. استراتژی انتخاب

انتخاب جمعیت والد برای به‌کارگیری عملگرهای تقاطع و جهش بر روی آن‌ها با استفاده از عملگر مسابقه‌ی ازدحام  $1^9$  صورت می‌گیرد. این عملگر دو جواب  $i$  را مقایسه کرده و پیروز مسابقه را مشخص می‌کند که در این راستا جواب  $i$  از جمعیت دو ویژگی دارد: ۱. دارای یک رتبه یا درجه‌ی نامغلوبی ( $r_i$ ) است؛ ۲. دارای یک فاصله‌ی ازدحامی محلی ( $d_i$ ) است. بر این اساس، عملگر مسابقه‌ی ازدحام چنین تعریف می‌شود: جواب  $i$  در مسابقه با جواب  $j$  پیروز می‌شود اگر و فقط اگر یکی از دو شرط: الف) جواب  $i$  رتبه‌ی بهتری داشته باشد ( $r_i \leq r_j$ ) که این اطمینان را به وجود می‌آورد که جواب پیروز از درجه‌ی نامغلوب بودن بهتری نسبت به حریف خود برخوردار است؛ ب) در صورت هم‌رتبه بودن جواب‌های  $i$  و جواب‌های  $j$ ، اگر جواب  $i$  از فاصله‌ی ازدحامی بیشتری نسبت به جواب  $j$  برخوردار باشد ( $r_i = r_j$ ) و  $d_i > d_j$ ، این اطمینان را به وجود می‌آورد که جواب پیروز از فاصله‌ی ازدحامی کم‌تری ( $d_i$  بزرگ‌تر) نسبت به حریف برخوردار است. [۲۰]

#### ۴.۱.۶. عملگر تقاطع $2^0$

این عملگر به منظور تولید فرزند جدید در هر تکرار از الگوریتم پیاده‌سازی شده است. از عملگر تقاطع برای انتقال خصوصیات مناسب بعضی از ژن‌ها که در طول کروموزوم

## ۲.۴. الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب‌ها (NRGA)

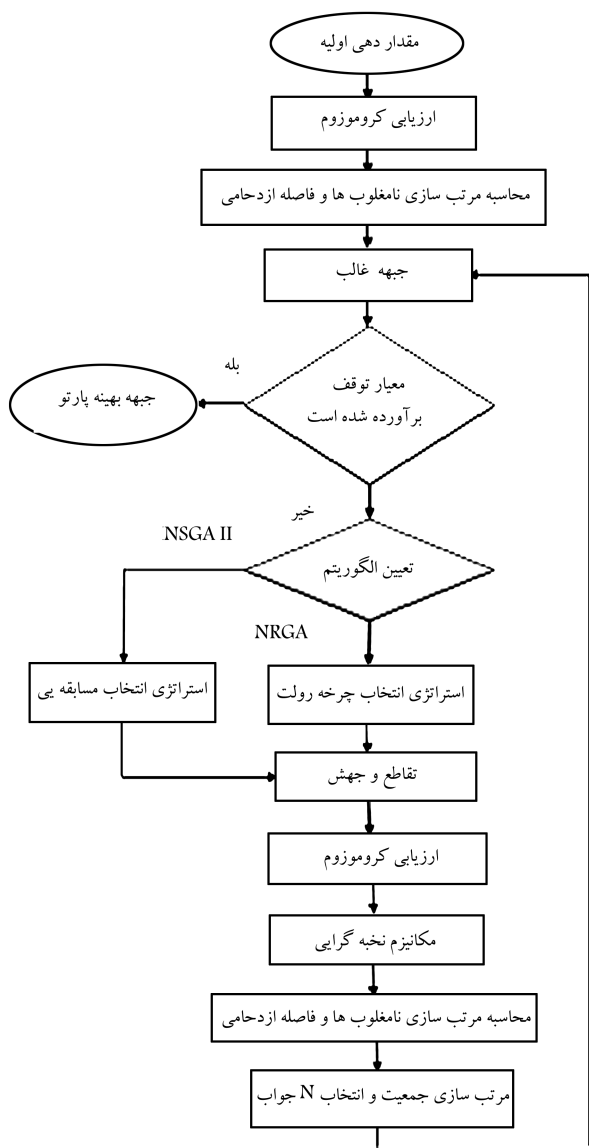
در سال ۲۰۰۸ یک الگوریتم تکاملی چندهدفه‌ی جدید مبتنی بر جمعیت با نام «الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب‌ها» برای بهینه‌سازی غیرمحدب، غیرخطی و گسسته به‌طور موفقیت‌آمیزی توسعه داده شد.<sup>[۱۳]</sup> براساس رویکردهای موجود در مسائل قبلی، رویکرد جدیدی با ترکیب الگوریتم انتخاب چرخه‌رولت مبتنی بر رتبه‌بندی (RRWS)<sup>۲۱</sup> و الگوریتم رتبه‌بندی جمعیت براساس پارتو با عنوان «الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب‌ها (NRGA)» توسعه یافت. تفاوت الگوریتم NRGA با INSGA-I در دو بخش استراتژی انتخاب و بخش مرتب‌کردن جمعیت و انتخاب برای نسل بعد است. در استراتژی انتخاب از عملگر چرخه‌رولت مبتنی بر رتبه‌بندی به‌جای استفاده از عملگر مسابقه‌یی ازدحام استفاده می‌کنیم.<sup>[۲۱]</sup> این عملگر به‌گونه‌یی طراحی می‌شود که اعضای بهتر (با برآزش بهتر)، احتمال انتخاب بیشتری برای تولید مثل و تشکیل نسل بعدی پیدا می‌کنند. در اینجا هر عضو جمعیت دارای دو مشخصه‌ی رتبه‌ی مرز غیر مغلوبی که در آن قرار دارد، و نیز رتبه‌ی خودش درون مرز براساس فاصله‌ی ازدحامی است. بنابراین برای انتخاب یک جواب، ابتدا باید یک مرز غیرمغلوب انتخاب شود و سپس درون آن مرز یک جواب انتخاب شود.<sup>[۱۳]</sup> در شکل ۶ روند پیاده‌سازی هر دو الگوریتم INSGA-I و NRGA را نشان داده‌ایم.

## ۵. تجزیه و تحلیل نتایج

به‌منظور حل مدل پیشنهادی، دو الگوریتم فراابتکاری حل مسائل چندهدفه بر مبنای رویکرد پارتو، شامل الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) و الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NRGA) ارائه شده است. در این بخش نتایج به دست آمده از پیاده‌سازی روش‌های حل پیشنهادی بر روی مسائل آزمایشی تولید شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. ابتدا پارامترهای الگوریتم‌های مورد استفاده در این نوشتار پس از اجزای متوالی روی مقادیر مطابق جدول ۱ دسته‌بندی شده و سپس توسط روش تاگوچی تنظیم شده‌اند (شکل ۷). سپس آزمایشات بر روی ۱۳ مسئله‌ی آزمایشی تولید شده در سه دسته‌ی سایز کوچک، متوسط و بزرگ اجرا شده است به‌گونه‌یی که تعداد تأمین‌کننده در سایز کوچک برابر ۳ یا ۴ عدد، و تعداد سطوح قیمت بین ۲ الی ۴ سطح است؛ تعداد تأمین‌کننده در سایز متوسط برابر ۵ الی ۷ عدد و تعداد سطوح قیمت بین ۲ الی ۷ سطح قیمت است؛ و تعداد تأمین‌کننده در مسائل با سایز بزرگ برابر ۸ یا ۹ عدد و تعداد سطوح قیمت بین ۲ الی ۸ سطح قیمت است. همچنین نرم‌افزار Lingo قادر به حل مسائل با سایز بزرگ نیست. تمامی الگوریتم‌های پیشنهادی با نرم‌افزار MATLAB (Version ۷.۸.۰, R۲۰۰۹a) برنامه‌نویسی شده و روی یک نوت‌بوک با ۴ گیگابایت حافظه و پردازنده‌ی Intel® Core™ ۲ Duo اجرا شده است.

## ۱.۵. روش تاگوچی

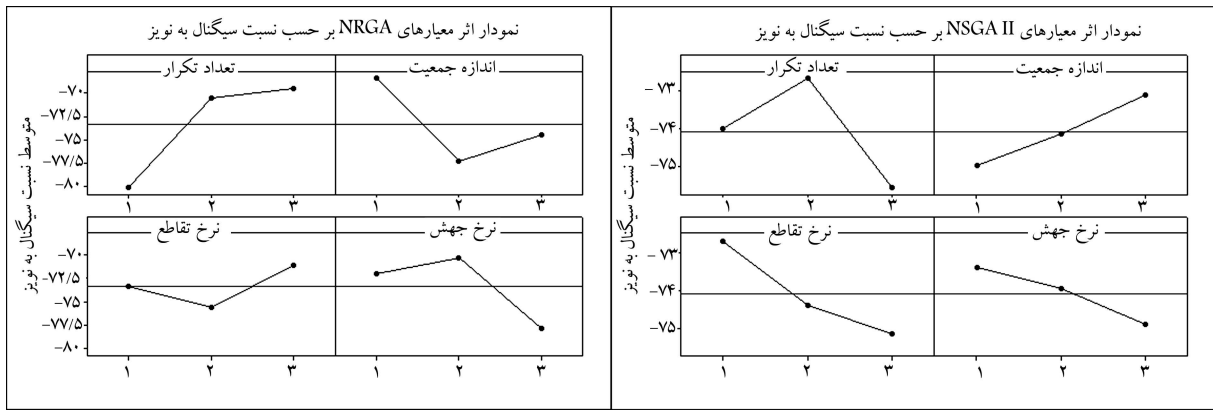
از آنجا که خروجی مسائل به‌شدت به پارامترهای الگوریتم‌های پیشنهادی وابسته‌اند، از روش تاگوچی به‌منظور تنظیم پارامترهای آن‌ها استفاده می‌کنیم. مزیت روش تاگوچی نسبت به دیگر روش‌های طراحی آزمایشات علاوه بر کاهش هزینه، به‌دست آوردن سطوح بهینه‌ی پارامترها در زمان کم‌تر است.<sup>[۲۴]</sup> یکی از مهم‌ترین گام‌های



شکل ۶. فلوچارت الگوریتم‌های NSGA-II و NRGA.

جدول ۱. سطوح و دامنه‌ی ارائه شده برای پارامترهای الگوریتم‌های پیشنهادی.

الگوریتم‌های پیشنهادی	پارامترهای الگوریتم		دامنه‌ی پارامترها		پایین	متوسط	بالا
	(۱)	(۲)	(۱)	(۲)			
NSGA-II	اندازه‌ی جمعیت	۵۰ - ۱۰۰	۵۰	۷۵	۱۰۰	۰٫۹	۰٫۵
	تعداد تکرار	۵۰ - ۱۰۰	۵۰	۷۵	۱۰۰		
	نرخ تقاطع	۰٫۷ - ۰٫۹	۰٫۷	۰٫۸	۰٫۹		
NRGA	نرخ جهش	۰٫۴ - ۰٫۵	۰٫۴	۰٫۴۵	۰٫۵	۰٫۹	۰٫۵
	اندازه‌ی جمعیت	۵۰ - ۱۰۰	۵۰	۷۵	۱۰۰		
	تعداد تکرار	۵۰ - ۱۰۰	۵۰	۷۵	۱۰۰		



شکل ۷. نمودارهای S/N پارامترهای الگوریتم‌های پیشنهادی.

### ۲.۲.۵. فاصله‌گذاری<sup>۲۷</sup>

این معیار که توسط اسکات در سال ۱۹۹۵ ارائه شد، میزان فاصله‌ی نسبی جواب‌های متوالی را با استفاده از رابطه‌ی ۱۴ محاسبه می‌کند.<sup>[۲۷]</sup>

$$S = \sqrt{\frac{1}{|n-1|} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad (14)$$

که در آن:

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{|n|}, \quad d_i = \min_{k \in n \wedge k \neq i} \sum_{m=1}^r |f_m^i - f_m^k|$$

فاصله‌ی اندازه‌گیری شده برابر است با کم‌ترین مقدار مجموع قدر مطلق تفاضل در مقادیر توابع هدف بین  $i$  امین جواب و جواب‌های واقع در مجموعه‌ی نامغلوب نهایی. قابل ذکر است که این معیار فاصله با معیار کم‌ترین فاصله‌ی اقلیدسی بین جواب‌ها متفاوت است.<sup>[۲۸]</sup>

### ۳.۲.۵. تعداد جواب‌های پارتو (NOS)<sup>۲۸</sup>

معیار NOS نشان‌دهنده‌ی تعداد جواب‌های بهینه‌ی پارتو است که در هر الگوریتم می‌توان یافت.

### ۴.۲.۵. فاصله از جواب ایده‌آل<sup>۲۹</sup>

از آنجا که یکی از اهداف مباحث چندهدفه‌ی مبتنی بر رویکرد پارتو، سطح‌های هرچه نزدیک‌تر به مبدأ مختصات است لذا این معیار فاصله‌ی سطح‌ها را از بهترین مقدار جمعیت محاسبه می‌کند.<sup>[۲۸]</sup>

بعد از تعریف معیارهای استاندارد مقایسه‌ی الگوریتم‌های چندهدفه‌ی مبتنی بر پارتو، در جدول ۲ معیارهای اندازه‌گیری مسائل آزمایشی تولیدشده محاسبه شده است. در شکل ۸ عملکرد الگوریتم‌های ارائه شده براساس معیارهای چهارگانه به صورت گرافیکی ترسیم شده است و سپس براساس خروجی‌ها، الگوریتم‌ها را به صورت آماری و به کمک تحلیل واریانس بررسی کرده‌ایم.

چنان که در ردیف انتهایی جدول محاسباتی ۳ درج شده، مجموع مقادیر معیارهای MID و NOS در الگوریتم NSGA-II، و معیارهای تنوع و فاصله در الگوریتم NPGA از مطلوبیت بالاتری برخوردارند. به منظور بررسی و مقایسه‌ی دقیق‌تر از تحلیل‌های آماری استفاده کرده‌ایم. چنان که اشاره شد در این حیطه از تحلیل واریانس و آزمون  $t$  بهره جست‌ه‌ایم که نتایج آن در جدول ۳ و نیز در شکل ۹ نشان داده شده است.

این روش انتخاب یک آرایه‌ی متعادل<sup>۲۲</sup> است که اثرات عوامل در میانگین پاسخ و تغییرات را تخمین می‌زند. در این تحقیق، آزمایش‌های سه‌سطحی مناسب‌ترین طرح تشخیص داده شده، و با توجه به آرایه‌های متعادل استاندارد تاگوچی، آرایه‌ی  $L_9$  به عنوان طرح مناسب آزمایشی برای تنظیم پارامتر الگوریتم‌های پیشنهادی انتخاب شده است. تاگوچی به منظور تنظیم پارامترهای بهینه، یک اندازه‌ی آماری عملکرد تحت عنوان نسبت سیگنال به نویز S/N<sup>۲۳</sup> را در نظر می‌گیرد که در برگیرنده‌ی میانگین و تغییرات است؛ این نسبت در هر سطحی بیشتر باشد مطلوب‌تر است.<sup>[۲۵]</sup> متغیر پاسخ در نظر گرفته شده، نسبت دو شاخص استاندارد فاصله‌ی ایده‌آل میانه (MID)<sup>۲۴</sup> به «تنوع<sup>۲۵</sup>» برای الگوریتم‌های چندهدفه است. از آنجا که این متغیر پاسخ از نوع «هرچه کم‌تر بهتر» است، نسبت S/N متناظر آن به صورت رابطه‌ی ۱۲ در نظر گرفته می‌شود. الگوریتم‌های فرابتکاری پیشنهادی برای هر آزمایش تاگوچی اجرا می‌شوند و سپس نسبت‌های S/N توسط نرم‌افزار ۱۶ Minitab محاسبه می‌شوند.

$$S/N \text{ Ratio} = -10 \log \left( \frac{\sum (y^2)}{n} \right) \quad (12)$$

### ۲.۵. معیارهای اندازه‌گیری برای مقایسه‌ی نتایج

به طور کلی برخلاف بهینه‌سازی تک‌هدفه، دو معیار اصلی شامل حفظ تنوع در بین جواب‌های پارتو و همگرایی به مجموعه جواب‌های پارتو را برای بهینه‌سازی چندهدفه می‌توان در نظر گرفت.<sup>[۱۹]</sup> در این بخش چهار معیار مقایسه برای ارزیابی الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه ارائه می‌شود.

### ۱.۲.۵. بیشترین گسترش<sup>۲۶</sup>

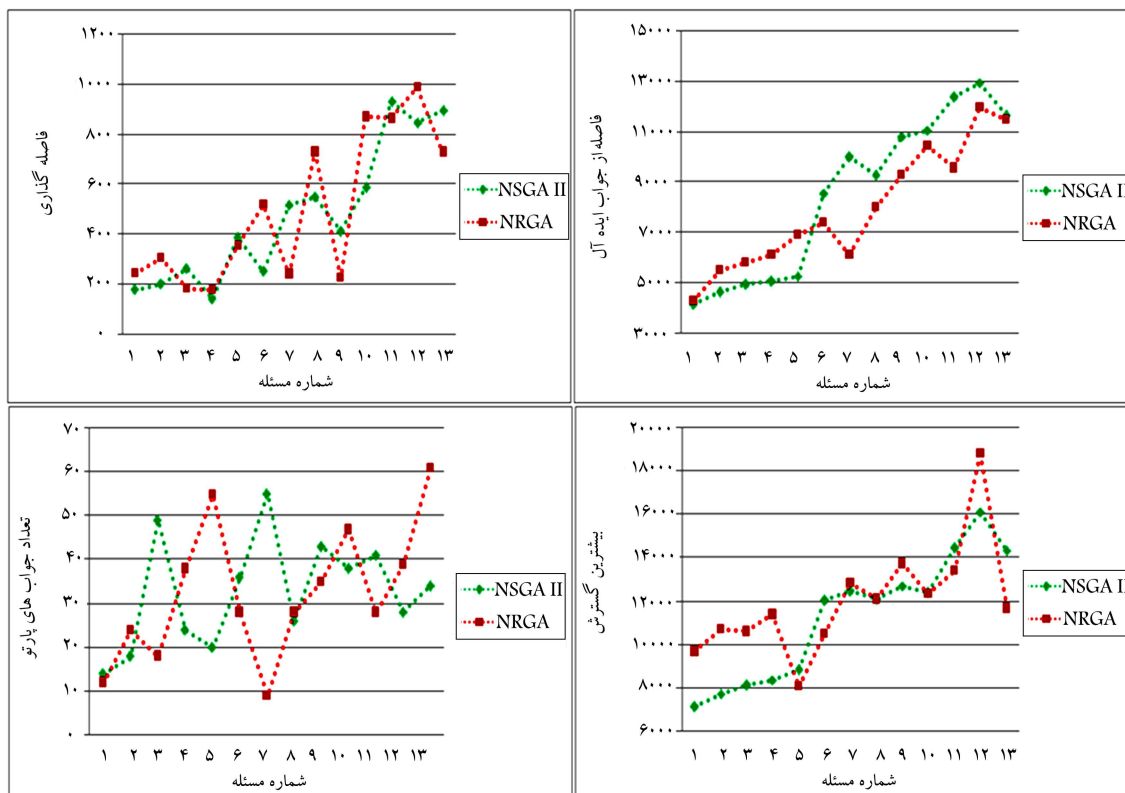
این معیار که توسط زیتلر در سال ۱۹۹۹ ارائه شده، طول قطر مکعب فضایی را که توسط مقادیر انتهایی اهداف برای مجموعه جواب‌های نامغلوب به کار می‌رود، اندازه‌گیری می‌کند.<sup>[۲۶]</sup> رابطه‌ی ۱۳ نشان‌گر رویه‌ی محاسباتی این شاخص است.

$$D = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left( \max_i f_i^j - \min_i f_i^j \right)^2} \quad (13)$$

در مدل دوهدفه‌ی ما، این معیار برابر است با فاصله‌ی اقلیدسی بین دو جواب مرزی در فضای هدف؛ هرچه این معیار بزرگ‌تر باشد، بهتر است.

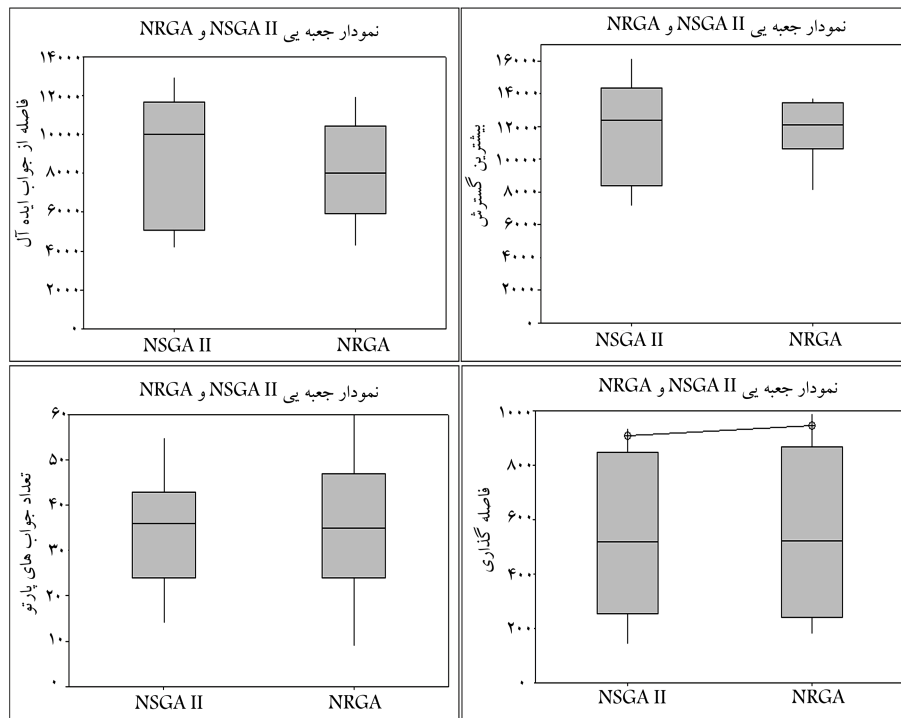
جدول ۲. نتایج محاسباتی معیارهای اندازه‌گیری مقایسه الگوریتم‌های NSGA-II و NPGA.

شماره‌ی مسئله	شاخص‌های اندازه‌گیری چند هدفه							
	NPGA				NSGA-II			
	NOS	Spacing	Diversity	MID	NOS	Spacing	Diversity	MID
۱	۱۲	۲۴۳,۴۱۶	۹۶۹۲,۱۴۹	۴۲۹۰,۵۸۹	۱۴	۱۷۹,۰۰۴	۷۱۲۷,۴۲۲	۴۱۵۵,۲۱۸
۲	۲۴	۳۰۴,۸۸۴	۱۰۷۰۶,۳۶	۵۵۲۰,۲۹	۱۸	۲۰۱,۱۹	۷۷۲۴,۹۱۱	۴۶۴۲,۷۸۴
۳	۱۸	۱۸۴,۹۴۶	۱۰۶۱۱,۹۵	۵۸۲۰,۸۲۲	۴۹	۲۶۳,۵۷۲	۸۱۰۴,۴۲۲	۴۹۶۱,۷۵۲
۴	۳۸	۱۷۸,۶۶۸	۱۱۳۹۳	۶۱۳۹,۱۳۳	۲۴	۱۴۱,۱۰۴	۸۳۸۶,۹۲۶	۵۰۸۳,۹۳۷
۵	۵۵	۳۵۶,۲۸۷	۸۰۸۵,۷۱۷	۶۹۲۸,۵۹۹	۲۰	۳۸۸,۹	۸۸۲۵,۸۴۶	۵۲۸۸,۲۰۵
۶	۲۸	۵۲۱,۲۹۵	۱۰۵۱۵,۴۸	۷۴۰۳,۲۶۹	۳۶	۲۵۲,۸۵۷	۱۲۰۳۸	۸۵۸۲,۸۶۱
۷	۹	۲۴۲,۱۶۳	۱۲۸۲۴,۷	۶۱۳۶,۷۸۸	۵۵	۵۱۷,۹۳۱	۱۲۴۵۷,۷۱	۹۹۹۲,۱۴۲
۸	۲۸	۷۳۲,۲۲۷	۱۲۱۰۸,۰۹	۸۰۲۰,۶۳۲	۲۶	۵۵۱,۰۴۱	۱۲۱۲۲,۲۳	۹۲۹۳,۶۳۳
۹	۳۵	۲۲۸,۱۳۴	۱۳۷۳۴,۵۴	۹۲۸۶,۵۱۴	۴۳	۴۱۲,۷۰۱	۱۲۷۱۵,۵۷	۱۰۸۲۶,۶
۱۰	۴۷	۸۷۱,۹۸۸	۱۲۳۶۲,۱۴	۱۰۴۴۴,۴۴	۴۸	۵۸۹,۰۴۹	۱۲۴۰۴,۰۶	۱۱۰۸۲,۰۴
۱۱	۲۸	۸۶۶,۵۷۲	۱۳۴۳۰,۵	۹۵۷۱,۵۹۶	۴۱	۹۳۳,۹۲۷	۱۴۴۷۴,۴	۱۲۳۹۳,۲۸
۱۲	۳۹	۹۹۰,۶۷۳	۱۸۸۴۲,۷۴	۱۱۹۷۹,۷۳	۲۸	۸۴۸,۴۷۲	۱۶۱۳۸,۰۶	۱۲۹۷۳,۰۸
۱۳	۶۱	۷۳۱,۰۷۲	۱۱۶۷۷,۳	۱۱۶۹۴,۹۴	۳۴	۸۹۸,۱۰۹	۱۴۳۴۵,۳۶	۱۱۶۶۴,۳۷
مجموع	۴۲۲	۶۴۵۲,۳۳	۱۵۵۹۸۴,۷	۱۰۳۰۳۷,۳	۴۲۶	۶۱۷۷,۸۶	۱۴۶۸۶۴,۹	۱۱۰۹۳۹,۹



شکل ۸. نمودار گرافیکی مقایسه الگوریتم‌های NSGA-II و NPGA براساس معیارهای استاندارد.





شکل ۹. نمودار جعبه‌یی مقایسه‌ی فاصله‌ی اطمینان براساس معیارهای استاندارد الگوریتم‌های چندهدفه.

احتمال کمبود موجودی برای خریدار این امکان را برای خریدار به وجود می‌آورد که در صورت رسیدن تقاضا و خالی بودن سیستم از موجودی، تأمین تقاضاهای دریافتی تا زمان رسیدن کالای خریداری شده به تأخیر افتد. همچنین با توجه به این نکته که دردنیای واقعی، معمولاً مقداری تخفیف در پرداخت‌ها از طرف تأمین‌کنندگان و به منظور جلب توجه خریداران در نظر گرفته می‌شود و نیز با توجه به NP-Hard بودن مسئله، به منظور حل مدل پیشنهادی از الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه‌ی مبتنی بر پارتو بهره‌جسته‌ایم. هر یک از دو الگوریتم فراابتکاری در دو شاخص وضعیت بهتری نسبت به دیگری داشتند؛ به همین دلیل با استفاده از تحلیل‌های آماری و آزمون‌های t و تحلیل واریانس به بررسی دقیق‌تر نتایج حاصله پرداختیم. نتایج به دست آمده از تحلیل‌های آماری بر نتایج پیشین صحه گذاشتند؛ اما از آنجا که در این نوع مسائل فاصله از جواب ایده‌آل بیشتر مد نظر تصمیم‌گیرندگان است، استفاده از الگوریتم NSGA-II پیشنهاد می‌شود.

جدول ۳. نتایج تحلیل واریانس مقایسه‌ی معیارها.

شاخص	P-Value	نتایج آزمون
MID	۰٫۸۵۵	عدم رد فرض صفر
Diversity	۰٫۹۰۲	عدم رد فرض صفر
Sapcing	۰٫۹۲۹	عدم رد فرض صفر
NOS	۰٫۹۸۶	عدم رد فرض صفر

## ۶. نتیجه‌گیری

مدل ارائه شده در این تحقیق می‌تواند به تصمیم‌گیرنده در انتخاب تأمین‌کننده‌ی مناسب کمک کند، چرا که این تحقیق با ارائه‌ی مدل چندهدفه و با در نظر گرفتن

## پانویس‌ها

- multiple criteria decision making
- Narasimhan and Stoynof
- Sarkis and Semple
- Degraeve
- Topsis
- analytic hierarchy process
- rough sets
- weighted additive
- Pareto

- buyer annual cost
- buyer annual ordering cost
- buyer annual inventory holding cost
- buyer annual inventory shortage cost
- buyer annual purchasing cost
- non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II)
- non-dominated ranking genetic algorithm (NRGA)
- fast non-dominated sort (FNDS)
- crowding distance (CD)
- crowded tournament selection operator
- uniform crossover
- ranked based roulette wheel selection (RRWS)

22. orthogonal array (OA)
23. signal to noise (S/N)
24. mean ideal distance (MID)
25. diversity
26. maximum spread or diversity
27. spacing
28. number of pareto solution (NOS)
29. mean ideal distance (MID)

### منابع (References)

1. Amid, A., Ghodsypour S.H. and O'Brein, C. "Fuzzy multi-objective linear model for supplier selection in a supply chain", *International Journal of Production Economics*, **104**(2), pp. 394-407 (2006).
2. Shaligram, P. "A two objective model for decision making in a supply chain", *International Journal of Production Economics*, **111**(2), pp. 378-388 (2008).
3. Dulmin, R. and Mininno, V. "Supplier selection using a multi-criteria decision aid method", *Journal of Purchasing and Supply Management*, **9**(4), pp. 177-187 (2003).
4. Assaoui, N., Haouari, M. and Hassini, E. "Supplier selection and order lot sizing modeling: A review", *Computers & Operations Research*, **34**(12), pp. 3516-3540 (2007).
5. Dickson, G.W. "An analysis of vendor selection systems and decisions", *Journal of Purchasing*, **2**, pp. 5-17 (1966).
6. Gaballa, A.A. "Minimum cost allocation of tenders", *Operational Research Quarterly*, **25**(3), pp. 389-398 (1974).
7. Gheidar Kheljani, J., Ghodsypour, S.H. and O'Brein, C. "Optimizing whole supply chain benefit versus buyer's benefit through supplier selection", *International Journal of Production Economics*, **121**(2), pp. 482-493 (2009).
8. Weber, C.A., Current, J.R. and Benton, W.C. "Vendor selection criteria and methods", *European Journal of Operation Research*, **50**(1), pp. 2-18 (1991).
9. Amid, A., Ghodsypour, S.H. and O'Brien, C. "A weighted additive fuzzy multi objective model for the supplier selection problem under price breaks in a supply chain", *International Journal of Production Economics*, **121**(2), pp. 323-332 (2009).
10. Amid, A. and Ghodsypour, S.H. "An additive weighted fuzzy programming for supplier selection problem in a supply chain", *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, **19**(4), pp. 1-8 (2008).
11. Tempelmeier, H. "A simple heuristic for dynamic order sizing and supplier selection with time varying data", *Production and Operations Management*, **11**(4), pp. 499-515 (2002).
12. Chen, C.T., Lin, C.T. and Huang, S.F. "A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management", *International Journal of Production Economics*, **102**(2), pp. 289-301 (2006).
13. Xia, W. and Wu, Z. "Supplier selection with multiple criteria in volume discount environment", *OMEGA-International Journal of Management Science*, **35**(5), pp. 494-504 (2007).
14. Wu, D.D., Zhang, Y., Wu, D. and Olson, D.L. "Fuzzy multi-objective programming for supplier selection and a possibility approach", *European Journal of Operational Research*, **200**(3), pp. 774-787 (2010).
15. Amid, A., Ghodsypour, S.H. and O'Brein, C. "A weighted max-min model for fuzzy multi-objective supplier selection in a supply chain", *International Journal of Production Economics*, **131**(1), pp. 139-145 (2011).
16. Kannan, D., Khodaverdi, R., Olfat, L., Jafarian, A. and Diabat, A. "Integrated fuzzy multi criteria decision making method and multi- objective programming approach for supplier selection and order allocation in a green supply chain", *Journal of Cleaner Production*, **47**, pp. 355-367 (2013).
17. Arikan, F. "A fuzzy solution approach for multi objective supplier selection", *Expert Systems with Applications*, **40**(3), pp. 947-952 (2013).
18. Burke, G.J., Carrillo, J. and Vakharia, A.J. "Heuristics for sourcing from multiple suppliers with alternative quantity discounts", *European Journal of Operational Research*, **186**(1), pp. 317-329 (2008).
19. Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A. and Meyarivan, T. "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II", In: *Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI (PPSN-VI) Conference*, pp. 849-858 (2001).
20. Deb, K., *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, Chichester, UK: Wiley (2000).
21. Rahmati, S.H.A., Zandieh, M. and Yazdani, M. "Developing two multi-objective evolutionary algorithms for the multi-objective flexible job shop scheduling problem", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, DOI 10.1007/s00170-012-4051-1 (2012).
22. Bate, S.T. and Jones, B. "A review of uniform crossover designs", *Journal of Statistical Planning and Inference*, **138**, pp. 336-351 (2007).
23. Al Jadaan, O., Rao, C.R. and Rajamani, L. "Non-dominated ranked genetic algorithm for solving Multi-Objective optimization problems: NRG", *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, **2**, pp. 60-67 (2008).
24. Fraley, S., Oom, M., Terrien, B. and Date, J.Z. "Design of experiments via Taguchi methods: Orthogonal Arrays". The Michigan Chemical Process Dynamic and Controls Open Text Book, USA (2006).

25. Taguchi, G., "Introduction to quality engineering", White Plains: Asian Productivity Organization/ UNIPUB (1986).
26. Zitler, E. "Evolutionary algorithms for multi-objective optimization: Method and applications", P.h.D Thesis, dissertation ETHNO. 13398, Swaziland Federal Institute of Technology Zorikh, Switzerland (1999).
27. Schott, J.R. "Fault tolerant design using single and multicriteria genetic algorithms optimization", Master's thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA (1995).
28. Zitler, E. and Thiele, L. "Multiobjective optimization using evolutionary algorithms a comparative case study", In A.E. Eiben, T. Back, M. Schoenauer and H.P. Schwefel (Eds.), *Fifth International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN-V)*, Berlin, Germany, pp. 292-301 (1998).