

## مدل ریاضی استوار فازی انتخاب سبد پروژه و حل آن با استفاده از الگوریتم تکاملی تفاضلی چندهدفه

مسعود ربیعہ\*، عباس فدایی\*\*

### چکیده

هدف از انتخاب سبد پروژه‌های گازرسانی، انتخاب یک مجموعه پروژه از میان پروژه‌های کاندید است؛ به طوری که معیارهای مهم مدنظر سازمان با لحاظ محدودیت‌ها تا حد امکان مطلوب شود. در این پژوهش چنین انتخابی با یک مشکل اساسی روبه‌رو است. با توجه به ابهام موجود در تعیین برخی پارامترهای پژوهش، آن‌ها در قالب اعداد فازی لحاظ و به منظور افزایش استواری جواب‌ها، از روش استوار فازی استفاده می‌شود. جواب حاصل از روش استوار فازی به نحوی است که در تمام حالت‌های سطح برش آلفای لحاظ شده صدق کرده و استوار است. در این پژوهش یک مدل چندهدفه و چنددوره‌ای صفر- یک استوار فازی برای انتخاب سبد پروژه‌های گازرسانی در شرکت گاز استان کرمان ارائه و برای حل مدل از رویکرد استوار فازی استفاده شد. در ابتدا به منظور نمایش چگونگی عملکرد رویکرد استوار فازی، مدل در حالت تک‌هدفه و برای مسئله‌ای با ابعاد کوچک به کمک نرم‌افزار لینگو حل شد؛ سپس به دلیل NP-Hard بودن مدل مسئله با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی تفاضلی چندهدفه حل شد و سپس برای بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه چندهدفه مقایسه شد. در پایان به منظور کمک در تصمیم‌گیری در رابطه با انتخاب سبد پروژه گازرسانی روستایی از روش تاپسیس برای الویت بندی نقاط پارتو استفاده شد.

کلیدواژه‌ها: سبد پروژه؛ مدل ریاضی؛ الگوریتم تکاملی تفاضلی چندهدفه؛ الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه چندهدفه؛ بهینه‌سازی استوار فازی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۱/۲۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۶/۱۵.

\* استادیار، دانشگاه شهید بهشتی.

\*\* کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی (نویسنده مسئول).

## ۱. مقدمه

امروزه مدیران سازمان‌ها عموماً با این مسئله روبه‌رو هستند که از بین پروژه‌های که به‌صورت بالقوه به آن‌ها پیشنهاد می‌شود، کدام پروژه را انتخاب کنند، پروژه‌ها را بر چه اساسی انتخاب کنند یا چگونه منابع لازم را به آن‌ها تخصیص دهند [۱۴].

امروزه با افزایش متقاضیان استفاده از گاز طبیعی و با توجه به سیاست جایگزینی گاز به‌جای سایر سوخت‌های فسیلی، توسعه و اجرای پروژه‌های گازرسانی رشد زیادی داشته است؛ به‌طوری‌که در حال حاضر تعداد پروژه‌های فعال شرکت‌های گاز (پروژه‌های توسعه‌ای) به هزاران مورد می‌رسد. با توجه به گسترش تعداد پروژه‌های گازرسانی لزوم استفاده از ابزارها و روش‌های علمی مدیریت پروژه بیش‌ازپیش احساس می‌شود؛ به‌عبارت‌دیگر با توجه گسترده‌گی حجم و تعداد پروژه‌ها در شرکت‌های گاز استانی و اینکه مدیریت مناسب پروژه‌های گازرسانی به‌عنوان یک معیار در رتبه‌بندی عملکرد شرکت‌ها موردنظر کارشناسان است؛ بنابراین یکی از مهم‌ترین ابعاد رقابتی در مقایسه عملکرد شرکت‌های گاز استانی مدیریت پروژه است [۹].

مدیریت سید پروژه روشی برای تحقق اهداف استراتژیک سازمان است که این مدیریت توسط انتخاب، اولویت‌بندی، ارزیابی و مدیریت پروژه‌ها، برنامه‌ها و دیگر فعالیت‌های مرتبط اعمال می‌شود [۳۰]. انتخاب سید پروژه<sup>۱</sup> عبارت است از انتخاب مجموعه‌ای مناسب از پروژه‌های پیشنهادی به‌طوری‌که اهداف کوتاه‌مدت و بلندمدت کسب‌وکار تحقق یابند؛ به‌عبارت‌دیگر یک سید پروژه عبارت است از تخصیص منابع محدود میان مجموعه‌ای از پروژه‌ها به‌صورتی که اهداف سازمانی برآورده شود [۱۱].

هدف این مقاله ارائه و حل مدل چندهدفه صفر- یک استوار فازی<sup>۲</sup> برای انتخاب سید پروژه گازرسانی در شرکت گاز است. نوآوری این پژوهش به استواری جواب‌های مدل فازی در قبال برش‌های مختلف آلفا و حل آن به کمک الگوریتم فراابتکاری تکاملی تفاضلی چندهدفه بازمی‌گردد. در واقعیت تصمیم‌گیرنده نمی‌داند چگونه سطح برش آلفای مناسب را در مرحله دیفازی کردن مدل فازی انتخاب کند. روش استوار فازی تا حدودی این مسئله را حل کرده است؛ به‌نحوی که جواب استواری که ارائه می‌کند می‌تواند در تمامی حالت‌های سطوح برش صدق کند.

ساختار مقاله حاضر به این صورت است که در بخش دوم پیشینه انتخاب سید پروژه و مبانی نظری بهینه‌سازی استوار فازی توضیح داده خواهد شد. در بخش سوم روش‌شناسی پژوهش ارائه می‌گردد. در این بخش مدل ریاضی پیشنهادی پژوهش شرح داده می‌شود. در بخش چهارم اعتبارسنجی مدل، الگوریتم حل پیشنهادی پژوهش، تجزیه و تحلیل داده‌های مورد مطالعه و اعتبار

---

1. Project Portfolio Selection  
2. Fuzzy Robust

و عملکرد الگوریتم پیشنهادی پژوهش شرح داده می‌شود. در پایان در بخش پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادها ارائه می‌شود.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

با توجه به پیشینه پژوهش در زمینه انتخاب سید پروژه، بیشتر پژوهش‌ها برای انتخاب سید پروژه از برنامه‌ریزی ریاضی استفاده کرده‌اند. اولین پژوهش با استفاده از روش کمی در زمینه انتخاب سید پروژه توسط شارپ و ویلیام (۱۹۶۷) که از یک برنامه‌ریزی خطی در مسائل انتخاب پروژه استفاده کردند.

در پیشینه انتخاب سید پروژه، اهمیت و تأثیر عدم‌اطمینان به‌طور وسیعی بررسی شده است. بیشتر مدل‌های ارائه‌شده در بحث انتخاب سید پروژه در فضای قطعیت و برخی از آنها در فضای عدم قطعیت از نوع فازی صورت گرفته است. در شرایط قطعیت قاسم‌زاده و ارچر (۲۰۰۰)، قربانی و همکاران (۲۰۰۹)، ربانی و همکاران (۲۰۱۲)، فارس‌جانی و همکاران (۱۳۹۱)، پورکاشمی و همکاران (۱۳۹۲) و سلامی و همکاران (۱۳۹۲) با در نظر گرفتن معیارهای کمی و کیفی گاه متعارض، محدودیت منابع در دوره‌های زمانی مختلف و همچنین اثر متقابل پروژه‌ها یک مدل خطی عدد صحیح چندهدفه<sup>۱</sup> برای انتخاب و زمان‌بندی سید پروژه ارائه کرده‌اند. مهم‌ترین نقطه‌ضعف مدل‌های ریاضی پژوهش‌های ذکر شده، در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل ریاضی است.

در شرایط عدم قطعیت با هارتاچیا و همکاران (۲۰۱۱)، خلیلی دامغانی و همکاران (۲۰۱۲)، توانا و همکاران (۲۰۱۳) و خلیلی دامغانی و همکاران (۲۰۱۳) برای در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در مسئله انتخاب سید پروژه از یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح چندهدفه فازی<sup>۲</sup> استفاده کردند. اگرچه مدل‌های ریاضی فازی به‌طور اثربخشی جنبه‌های امکان‌پذیر یک مسئله بهینه‌سازی را مدنظر قرار می‌دهد؛ اما به زیرمدل‌های (مدل‌های فرعی) پیچیده‌ای تبدیل می‌شود که برای مسائل عملی قابل‌کاربرد و مفید نیست؛ به عبارت دیگر این روش‌ها قادر نیست که عدم‌اطمینان‌ها را به‌طور مستقیم به فرآیند بهینه‌سازی مرتبط سازند [۲۱].

در شرایط عدم قطعیت، لوویز و همکاران (۲۰۰۷، ۲۰۰۸)، فریگر و وارنر (۲۰۱۳)، قحطرانی و نجفی (۲۰۱۳) و حسن‌زاده و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از مفهوم بهینه‌سازی استوار، عدم قطعیت و نبود اطلاعات قطعی را در مدل خطی عدد صحیح چندهدفه استوار<sup>۳</sup> برای تعیین سید پروژه مدل‌سازی کردند.

1. Multi Objective Integer Linear Programming  
2. Fuzzy Multi Objective Integer Linear Programming  
3. Robust Multi Objective Integer Linear Programming

با توجه به پیشینه پژوهش در زمینه سبده پروژه تاکنون، مدل ریاضی استوار فازی ارائه نشده است؛ اما در سایر زمینه‌های در حوزه ترکیب مباحث استوار و فازی تعداد اندکی مقاله ارائه شده که در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱. پژوهش‌های حوزه بهینه‌سازی استوار فازی

ردیف	نویسندگان	سال	عنوان مقاله	روش	نام منبع
۱	اینوگوچی و ساکاو	۱۹۹۸	بهینه‌سازی استوار نرم در یک مسئله برنامه‌ریزی خطی فازی	یک برنامه‌ریزی عدد صحیح استوار فازی	International Journal of Approximate Reasoning
۲	نای و همکاران	۲۰۰۷	یک روش برنامه‌ریزی ترکیبی استوار فازی پارامتری - بازه‌ای <sup>۱</sup>	یک برنامه‌ریزی خطی استوار فازی با داده‌های بازه‌ای	journal of Environmental Management
۳	هاسویکه و ایشی	۲۰۰۸	مسائل انتخاب پرتفولیوی استوار شامل فاکتورهای نامطمئن	مدل استوار فازی: روش مدل استوار بن‌تال و نیمروفسکی ترکیبی با مفهوم برنامه‌ریزی آرمانی فازی	International Journal of Applied Mathematics
۲	لی و همکاران	۲۰۰۸	یک روش برنامه‌ریزی عدد صحیح استوار فازی دو مرحله‌ای برای برنامه‌ریزی ظرفیت سیستم مدیریت محیطی	روش برنامه‌ریزی عدد صحیح استوار فازی دومرحله‌ای و برنامه‌ریزی احتمالی دومرحله‌ای	European Journal of Operational Research
۳	ژانگ و همکاران	۲۰۱۰	یک روش برنامه‌ریزی چندهدفه تصادفی (احتمالی) استوار- فازی	یک روش برنامه‌ریزی چندهدفه احتمالی استوار - فازی	Applied Mathematical Modelling

با توجه به پیشینه پژوهش، حل مدل ریاضی چندهدفه در زمینه انتخاب سبده پروژه را می‌توان به دو دسته اصلی طبقه‌بندی کرد. در دسته اول اطلاعاتی در مورد ترجیحات نسبی اهداف موجود است. در این حالت معمولاً فضای چندبعدی هدف به یک فضای تک‌بعدی کاهش داده می‌شود. در دسته دوم بر خلاف دسته اول، فرض بر این است که از قبل اطلاعاتی در مورد ترجیحات نسبی اهداف وجود ندارد. برای چنین مسائلی عموماً از یک رویه دومرحله‌ای استفاده می‌شود که در مرحله اول آن فضای جواب شامل تمامی سبدهای کارا (بهینه پارتو) با

استفاده از رویکردهای فراابتکاری شناسایی می‌شود و این فضای به دست آمده به صورت تعاملی مورد کنکاش قرار می‌گیرد.

با توجه به پیشینه پژوهش ارائه شده، نوآوری این پژوهش به دو بحث زیر بازمی‌گردد:

۱. استفاده از مدل چندهدفه استوار فازی برای در نظر گرفتن عدم اطمینان در پارامترهای مدل؛
۲. حل مدل استوار با الگوریتم‌های فراابتکاری با توجه به نبود اطلاعات در مورد ترجیحات نسبی اهداف توسط تصمیم‌گیرنده در «مورد مطالعه» پژوهش.

**بهبینه‌سازی استوار فازی.** برنامه‌ریزی خطی استوار فازی شامل بهینه‌سازی یک تابع هدف قطعی با توجه فضای تصمیم فازی محدود شده توسط محدودیت‌های با ضرایب و ظرفیت‌های فازی است [۳، ۱۶، ۲۱]. یک مسئله برنامه‌ریزی خطی استوار فازی در شکل عمومی می‌تواند به صورت مدل ۱ تعریف شود [۲۱]:

$$\text{Min } f = CX \quad (1a)$$

$$\text{St: } \tilde{A}X \leq \tilde{B}, \quad (1b)$$

$$X \geq 0, \quad (1c)$$

که  $A \in \{\mathcal{R}\}^{m \times n}$ ،  $B \in \{\mathcal{R}\}^{m \times 1}$ ،  $C \in \{\mathcal{R}\}^{1 \times n}$ ،  $X \in \{\mathcal{R}\}^{n \times 1}$  نشان دهنده مجموعه‌ای از متغیرها، پارامترهای فازی و  $\mathcal{R}$  نشان دهنده مجموعه اعداد قطعی و  $\leq$  به معنای نامعادله فازی است. محدودیت فازی ۱b را می‌توان به شکل زیر نشان داد:

$$\tilde{A}_1 x_1 \oplus \tilde{A}_2 x_2 \oplus \dots \oplus \tilde{A}_n x_n \leq \tilde{B}, \quad (2)$$

به طوری که  $A_j (j=1,2,\dots,n)$  و  $B$  زیرمجموعه‌های فازی (ضرایب فنی و اعداد سمت راست مدل ۱) و نماد  $\oplus$  نشان دهنده جمع بین زیرمجموعه‌های فازی است. فازی بودن فضای تصمیم به دلیل عدم اطمینان در ضرایب  $A_j$  و  $B$  است. با فرض اینکه  $\tilde{U}_j$  و  $\tilde{V}$  متغیرهای پایه تحمیل شده از سوی زیرمجموعه‌های  $A_j$  و  $B$  باشند، در نتیجه:

$$\mu_{A_j} : \tilde{U}_j \rightarrow [0,1], \quad (3a)$$

$$\mu_B : \tilde{V} \rightarrow [0,1] \quad (3b)$$

به‌طوری‌که  $\mu_{A_j}$  نشان‌دهنده امکان مصرف یک مقدار معین منابع توسط فعالیت  $j$  و  $\mu_B$  نشان‌دهنده امکان در دسترس بودن منبع  $B$  است. برای زیرمجموعه فازی  $N$ ،  $\mu_N$  می‌تواند در قالب اعداد فازی L-R به صورت زیر نشان داده شود:

$$\mu_N(x) = \begin{cases} F_L\left(\frac{u-x}{\beta}\right) & \text{if } -\infty < x < u, \quad \beta > 0, \\ 1 & \text{if } x = u, \\ F_R\left(\frac{x-u}{\delta}\right) & \text{if } -u < x < +\infty, \quad \delta > 0, \end{cases} \quad (4)$$

$u$  مقدار میانگین  $N$  است.  $\beta$  و  $\delta$  گسترش‌های  $^2$  راست و چپ هستند.  $F_L$  و  $F_R$  نیز توابع عضویت چپ و راست عدد فازی را نمایندگی  $^3$  می‌کنند. برای حالت خطی، زیرمجموعه  $N$  می‌تواند در فرم عمومی به شکل زیر تعریف شود:

$$\mu_N(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < \underline{a} \text{ or } x > \bar{a}, \\ 1 & \text{if } x = u, \\ 1 - \frac{2|\mu-x|}{\bar{a}-\underline{a}} & \text{if } \underline{a} \leq x \leq \bar{a} \end{cases} \quad (5)$$

به‌طوری‌که  $[\underline{a}, \bar{a}]$  بازه‌ای است که توسط زیرمجموعه فازی  $N$  تعیین می‌شود. برای بیان دقیق محدودیت‌های فازی روی متغیرهای پایه‌ای  $^4$  نظیر  $\bar{V}$ ،  $\bar{J}$ ، محدودیت‌های فازی رابطه  $^2$  می‌تواند به شکل محدودیت‌های عطفی فازی زیر نشان داده شوند:

$$A_1x_1 \oplus A_2x_2 \oplus \dots \oplus A_nx_n \subseteq B \quad (6)$$

ناحیه رخداد ممکن برای طرف چپ هر محدودیت باید در بردارنده ناحیه رضایت‌بخش یا تلورانسی باشد که توسط طرف راست محدودیت تعیین و تعریف می‌شود. بر طبق مفهوم سطح برش آلفا ( $\alpha$ -cut) و قضیه نمایندگی  $^5$ ، محدودیت  $^2$  را می‌توان به شکل زیر نشان داد:

- 
1. Mean
  2. Spreads
  3. Shape functions
  4. Base variables
  5. Representation theorem

$$(\tilde{A}_1)_{\alpha} x_1 \oplus (\tilde{A}_2)_{\alpha} x_2 \oplus \dots \oplus (\tilde{A}_n)_{\alpha} x_n \subseteq \tilde{B}_{\alpha}, \quad \alpha \in [0,1] \quad (7a)$$

Where :

$$(\tilde{A}_j)_{\alpha} = \{a_j \in \tilde{U}_j \mid \mu_{A_j}(a_j) \geq \alpha\} \quad (7b)$$

$$\tilde{B}_{\alpha} = \{b \in \tilde{V} \mid \mu_B(b) \geq \alpha\} \quad (7c)$$

با فرض اینکه زیرمجموعه‌های فازی در رابطه ۶ متناهی<sup>۱</sup> باشند و ویژگی‌های زیر وجود داشته باشد:

$$\{\mu_{A_j}(a_j) \mid a_j \in \tilde{U}_j\} = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k\}, \quad 0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \dots \leq \alpha_k \leq 1 \quad (8)$$

برای هر  $\alpha_s$  ( $s=1,2,\dots,k$ ) محدودیت‌ها در رابطه ۷a به صورت زیر درمی‌آید:

$$(\tilde{A}_1)_{\alpha_s} x_1 + (\tilde{A}_2)_{\alpha_s} x_2 + \dots + (\tilde{A}_n)_{\alpha_s} x_n \subseteq \tilde{B}_{\alpha_s}, \quad \alpha_s \in [0,1] \quad (9)$$

به طوری که  $(\tilde{A}_j)_{\alpha_s}$  ( $j=1,2,\dots,n; s=1,2,\dots,k$ ) و  $\tilde{B}_{\alpha_s}$  مجموعه‌های فازی محدب<sup>۲</sup> و ناتهی<sup>۳</sup> را شکل می‌دهند؛ بنابراین محدودیت‌ها در رابطه ۹ می‌توانند با  $k$  محدودیت قطعی<sup>۱۰</sup> و ۱۱ زیر جایگزین شوند؛ به نحوی که  $k$  نشان‌دهنده تعداد سطوح برش آلفا است.

$$\bar{a}_1^s x_1 + \bar{a}_2^s x_2 + \dots + \bar{a}_n^s x_n \leq \bar{b}^s, \quad s = 1,2,\dots,k, \quad h_1 \quad (10)$$

$$\underline{a}_1^s x_1 + \underline{a}_2^s x_2 + \dots + \underline{a}_n^s x_n \geq \underline{b}^s, \quad s = 1,2,\dots,k, \quad h_2 \quad (11)$$

به طوری که:

$$\bar{a}_1^s = \sup(a_j^s), \quad a_j^s \in (\tilde{A}_j)_{\alpha_s}, \quad i_1 \quad (12a)$$

$$\underline{a}_j^s = \inf(a_j^s), \quad a_j^s \in (\tilde{A}_j)_{\alpha_s}, \quad i_2 \quad (12b)$$

$$\bar{b}^s = \sup(b^s), \quad b^s \in \tilde{B}_{\alpha_s}, \quad i_3 \quad (12c)$$

$$\underline{b}^s = \inf(b^s), \quad b^s \in \tilde{B}_{\alpha_s}, \quad i_4 \quad (12d)$$

---

1. Finite  
2. Convex  
3. Non-Empty

به‌طور کلی  $sup(t)$  نشان‌دهنده حد بالا در مجموعه  $t$ ،  $inf(t)$  نشان‌دهنده حد پایین در مجموعه  $t$  است؛ بنابراین برای برنامه خطی استوار فازی با  $m$  محدودیت فازی، می‌تواند توسط محدودیت‌های فازی زیر محدود شود.

$$A_{i1} x_1 \oplus A_{i2} x_2 \oplus \dots \oplus A_{in} x_n \subseteq B_i, i = 1, 2, \dots, m. \quad (13)$$

با نمایش محدودیت بالا در فضای مجموعه‌های سطح برش آلفا، محدودیت فازی بالا تبدیل می‌شود به:

$$(A_{i1})_{\alpha} x_1 \oplus (A_{i2})_{\alpha} x_2 \oplus \dots \oplus (A_{in})_{\alpha} x_n \subseteq B_{i\alpha}, i = 1, 2, \dots, m; \alpha \in [0, 1] \quad (14)$$

به‌طوری‌که:

$$\{\mu_{A_{ij}}(a_{ij}) | a_{ij} \in \tilde{U}_{ij}\} = \{\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{ik}\}, \quad (15)$$

$$0 \leq \alpha_{i1} \leq \alpha_{i2} \leq \dots \leq \alpha_{ik} \leq 1, i = 1, 2, \dots, m. \quad (16)$$

اگر  $m$  محدودیت از نوع رابطه  $b$  وجود داشته باشد در مدل استوار فازی به  $2km$  تا محدودیت قطعی تبدیل خواهد شد. به‌عبارت‌دیگر، با تبدیل هر محدودیت فازی به  $2k$  محدودیت قطعی معادل، مدل فازی به مدل قطعی شده استوار تبدیل می‌شود که به روش‌های قطعی قابل‌حل و به‌دلیل استواری قابل‌اتکا است [۳، ۲۱].

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

**تعریف و مدل‌سازی مسئله:** با توجه به وجود تعداد زیاد پروژه گازرسانی در شرکت گاز و همچنین محدود بودن منابع، هدف پژوهش حاضر این است که از میان پروژه‌های گازرسانی پیشنهادی در شرکت گاز یک سبد انتخاب شود؛ به‌طوری‌که اهداف شرکت گاز استان کرمان برآورده شود. قبل از ارائه مدل ریاضی، نمادهای استفاده‌شده در جدول ۲ ارائه می‌شود.



جدول ۲. نمادهای استفاده شده در مدل ریاضی پژوهش

مفروضات مدل: تبعیت پارامترهای نامطمئن فازی از تابع عضویت مثلثی، یک مرحله‌ای بودن اجرای پروژه‌ها، نبود روابط درونی میان پروژه‌ها، دوره زمانی یک‌ساله، ثابت در نظر گرفتن نرخ بهره و نرخ رشد جمعیت، انجام پروژه‌ها در دوره زمانی در نظر گرفته شده، تخصیص بودجه در ابتدای سال، در نظر گرفتن رابطه پیش‌نیازی میان پروژه‌ها		
<b>اندیس‌های مدل</b>		
$k = 1, 2, \dots, K$	تعداد اهداف	$k$
$j = 1, 2, \dots, n$	تعداد پروژه‌های کاندید مورد نظر	$j$
$i = 1, 2, \dots, m$	نوع لوله استفاده شده گازرسانی	$i$
$r = 1, 2, \dots, R$	نوع ایستگاه تقلیل فشار	$r$
$t = 1, 2, \dots, T$	تعداد دوره‌های زمانی	$t$
$l = 1, 2, \dots, L$	نوع انشعاب	$l$
<b>پارامترهای مدل</b>		
	هزینه هر متر لوله نوع $i$ در دوره زمانی $t$ (ریال)	$C_{it}$
	هزینه هر ایستگاه تقلیل فشار نوع $r$ در دوره زمانی $t$ (ریال)	$C_{rt}$
	هزینه هر انشعاب نوع $l$ در دوره زمانی $t$ (ریال)	$C_{lt}$
	مقدار لوله مورد نیاز $i$ در پروژه $j$ (متر)	$L_{ij}$
	تعداد ایستگاه تقلیل فشار نوع $r$ در پروژه $j$	$R_{rj}$
	تعداد انشعاب نوع $l$ در پروژه $j$	$D_{lj}$
	تعداد خانوار پوشش‌دهنده پروژه $j$ در دوره زمانی $t$	$F_{jt}$
	مطلوبیت پروژه $j$ در دوره زمانی $t$	$U_{jt}$
	طول زمان انجام پروژه $j$ در دوره زمانی $t$ (سال)	$d_{jt}$
	بودجه در دوره زمانی $t$ (ریال)	$B_t$
	سطح برش آلفا برای دیفازی کردن اعداد فازی	$\alpha$
	مقدار حد بالا و پایین هزینه نامطمئن پروژه $j$ در دوره زمانی $t$	$\bar{C}_{jt}, \underline{C}_{jt}$
	مقدار حد بالا و پایین بودجه نامطمئن در دوره زمانی $t$	$\bar{B}_{jt}, \underline{B}_{jt}$
<b>پارامتر نامطمئن از نوع فازی</b>		
	مقدار هزینه نامطمئن پروژه $j$ در دوره زمانی $t$	$\tilde{C}_{jt}$
	مقدار بودجه نامطمئن در دوره زمانی $t$	$\tilde{B}_t$
<b>متغیر تصمیم</b>		
	انتخاب پروژه $j$ در زمان $t$	$x_{jt} = 1$
	عدم انتخاب پروژه $j$ در زمان $t$	$x_{jt} = 0$

مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح فازی انتخاب سبب پروژه:

$$\text{Max } Z_1 = \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T X_{jt} \times F_{jt} \quad (17a)$$

$$\text{Max } Z_2 = \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T X_{jt} \times U_{jt} \quad (17b)$$

$$\text{Min } Z_3 = \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T X_{jt} \times d_{jt} \quad (17c)$$

s.t

$$\sum_{t=1}^T X_{jt} \leq 1 \quad \forall j \quad (17d)$$

$$\sum_{t=1}^T X_{jt} = 1 \quad \forall j \in (A_e) \quad (17e)$$

$$\sum_{t=1}^T (t + d_{jt}) \times X_{jt} \leq T + 1 \quad \forall j \quad (17f)$$

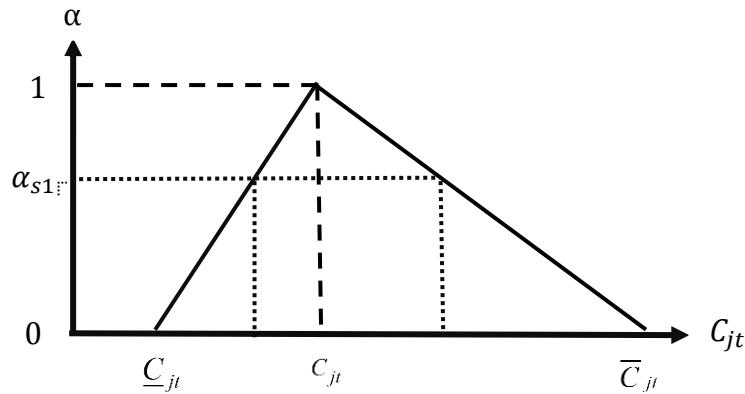
$$\sum_{j=1}^n X_{jt} \times \left( \sum_{i=1}^m L_{ij} \tilde{C}_{it} + \sum_{r=1}^R R_{rj} \tilde{C}_{rt} + \sum_{l=1}^L D_{lj} \tilde{C}_{lt} \right) \leq \tilde{B}_t \quad \forall t, i, r, l \quad (17g)$$

$$\sum_{t=1}^t X_{jt'} - X_{pt} \geq 0 \quad \forall j, p \in (p(j, p)) \quad (17h)$$

$$X_{jt}, X_{jt'}, X_{pt} \in [0, 1] \quad (17i)$$

(17a) هدف اول حداکثر کردن تعداد خانوار پوشش‌دهنده توسط اجرا پروژه‌های گازرسانی.  
 (17b) هدف دوم حداکثر کردن مطلوبیت اجرا پروژه‌های گازرسانی که در این هدف، مطلوبیت میزان مصرف گاز، نزدیک بودن به مناطق صنعتی و مناطق کوهستانی پروژه‌ها است. (17c)  
 هدف سوم حداقل کردن زمان اجرای پروژه‌ها است. (17d) این محدودیت تضمین می‌کند که در طول افق برنامه‌ریزی، هر یک از پروژه‌های انتخابی تنها یک‌بار اجرا شوند. (17e) سازمان ملزم به اجرای تعداد مشخصی از پروژه‌ها است که باید در سبب پروژه‌ها انتخاب شوند. (17f) این محدودیت این اطمینان را ایجاد می‌کند که تمامی پروژه‌های موجود در سبب انتخابی حتماً تا قبل از به پایان رسیدن افق زمانی برنامه‌ریزی شده به پایان برسند. (17g) محدودیت بودجه و (17h) در دنیای واقعی در برخی شرایط، اجرای برخی پروژه‌ها پیش‌نیاز اجرای پروژه‌های دیگر است، در این شرایط ضروری است که قبل از انتخاب یک پروژه خاص تمامی پروژه‌های پیش‌نیاز نیز انتخاب شوند و در آخر (17i) محدودیت‌های علامتی مدل ریاضی هستند. با توجه به اینکه هزینه

اجرای پروژه‌های گازرسانی  $C_{jt}$  و بودجه نامطمئن است. با توجه به مدل فازی در رابطه (19g) پارامترهای نامطمئن هزینه هر پروژه  $(\bar{C}_{jt})$  و بودجه هر دوره  $(\tilde{B}_i)$  در قالب اعداد فازی مثلثی لحاظ شده و پس از دیفازی شدن به کمک سطح برش  $\alpha$  به یک بازه قطعی یعنی  $[\underline{C}_{jt}, \bar{C}_{jt}]$  و  $[\underline{B}_t, \bar{B}_t]$  تبدیل می‌شود. به عنوان مثال در شکل ۱ به ازای  $\alpha=0$  پارامتر  $C_{jt}$  به حد بالا  $\bar{C}_{jt}$  و حد پایین  $\underline{C}_{jt}$  تبدیل شده است.



شکل ۱. تابع عضویت مثلثی مجموعه های فازی به ازای هر برش آلفا

مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح استوار فازی انتخاب سبد پروژه:

$$Max Z_1 = \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T X_{jt} \times F_{jt} \tag{۱۸a}$$

$$Max Z_2 = \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T X_{jt} \times U_{jt} \tag{۱۸b}$$

$$Min Z_3 = \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T X_{jt} \times d_{jt} \tag{۱۸c}$$

s.t

$$\sum_{t=1}^T X_{jt} \leq 1 \quad \forall j \tag{۱۸d}$$

$$\sum_{t=1}^T X_{jt} = 1 \quad \forall j \in (A_e) \tag{۱۸e}$$

$$\sum_{t=1}^T (t + d_{jt}) \times X_{jt} \leq T + 1 \quad \forall j \tag{۱۸f}$$

$$\sum_{j=1}^n X_{jt} \times \left( \sum_{i=1}^m L_{ij} \bar{C}_{it}^s + \sum_{s=1}^R R_{rj} \bar{C}_{it}^s + \sum_{l=1}^L D_{lj} \bar{C}_{it}^s \right) \alpha \leq \bar{B}_t^s \quad \forall t, i, s, l \quad (18g)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{jt} \times \left( \sum_{i=1}^m L_{ij} C_{it}^s + \sum_{r=1}^R S_{rj} C_{it}^s + \sum_{l=1}^L D_{lj} C_{it}^s \right) \alpha \geq \underline{B}_t^s \quad \forall t, i, s, l \quad (18h)$$

$$\sum_{t'=1}^t X_{jt'} - X_{pt} \geq 0 \quad \forall j, p \in (p(j, p)) \quad (18i)$$

$$X_{jt}, X_{jt'}, X_{pt} \in [0, 1], 0 \leq \alpha_s \leq 1 \quad (18k)$$

رابطه (۱۷g) در مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح فازی انتخاب سید پروژه با توجه به تابع عضویت مثلثی و به ازای هر سطح برش  $\alpha$  (طبق رابطه‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳) به شکل رابطه‌های (۱۸g) و (۱۸h) تبدیل می‌شود.

#### ۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

نمایش عملکرد روش استوار فازی در قالب یک مسئله کوچک تک هدفه. در این بخش به منظور بررسی عملکرد روش استوار فازی، هدف اول مدل چندهدفه لحاظ شده (هدف حداکثر کردن خانوار) و مسئله در سایز کوچک با استفاده از نرم‌افزار لینگو ۱۱ حل می‌شود. در جدول زیر سایز مثال کوچک مشخص شده است.

جدول ۳. تعیین پارامترهای مثال کوچک جهت اعتبارسنجی

مقادیر	اندیس‌های مدل	مقادیر	اندیس‌های مدل
۲	$\bar{t}$ : نوع لوله	۶	$j$ : تعداد پروژه
۲	$s$ : نوع ایستگاه تقلیل فشار	۵	$t$ : تعداد دوره زمانی
۱	$l$ : نوع انشعاب	۳	$k$ : اهداف
۳۵	تعداد پارامترهای نامطمئن	۳۵	تعداد پارامترهای نامطمئن فازی
		۵	تعداد برش آلفا ( $\alpha$ )

در جدول ۴ مقدار تابع هدف به ازای هر برش آلفا ( $\alpha$ ) جواب نرم‌افزار لینگو آورده شده است.

جدول ۴. نتایج اعتبارسنجی مدل با استفاده از نرم‌افزار لینگو

برش آلفا ( $\alpha$ )	تابع هدف	جواب پایه
$\alpha = 0$	۲۱۵۶۲	$x_{12} = 1, x_{21} = 1, x_{32} = 1, x_{45} = 1, x_{53} = 1, x_{64} = 1$
$\alpha = 0.25$	۲۱۲۷۶	$x_{21} = 1, x_{34} = 1, x_{45} = 1, x_{53} = 1, x_{64} = 1$
$\alpha = 0.5$	۲۱۲۷۶	$x_{21} = 1, x_{34} = 1, x_{45} = 1, x_{53} = 1, x_{64} = 1$
$\alpha = 0.75$	۲۰۱۹۷	$x_{21} = 1, x_{34} = 1, x_{45} = 1, x_{52} = 1, x_{63} = 1$
$\alpha = 1$	-	نیود منطقه موجه
$\alpha = 0; 0.25$	۲۱۲۷۶	$x_{21} = 1, x_{34} = 1, x_{45} = 1, x_{53} = 1, x_{64} = 1$
$\alpha = 0; 0.5$	۲۱۲۷۶	$x_{21} = 1, x_{34} = 1, x_{45} = 1, x_{53} = 1, x_{64} = 1$
$\alpha = 0; 0.75$	۲۰۱۹۶	$x_{21} = 1, x_{34} = 1, x_{45} = 1, x_{52} = 1, x_{63} = 1$
$\alpha = 0; 0.25; 0.5; 0.75$	۲۰۱۹۶	$x_{21} = 1, x_{34} = 1, x_{45} = 1, x_{52} = 1, x_{63} = 1$
$\alpha = 0; 0.25; 0.5; 0.75; 1$	-	نیود منطقه موجه

**الگوریتم پیشنهادی پژوهش.** از نظر حل مدل، مدل پیشنهادی یک مدل NP-hard ([۱۷]، [۱۸]، [۳۱]) است و حل چنین مسائلی با استفاده از الگوریتم‌های دقیق بسیار سخت و در مواردی غیرممکن است؛ همچنین با افزایش متغیر و ابعاد، مسئله پیچیده خواهد شد و حل آن با روش‌های مرسوم سخت خواهد بود؛ علاوه بر این در مرحله استوارسازی هر محدودیت فازی به دو محدودیت قطعی تبدیل شده و این بر پیچیدگی مسئله می‌افزاید. همین امر باعث افزایش تمایل به استفاده از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری شده است؛ بنابراین برای رفع این مشکل از الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مدل استفاده شد.

**نحوه نمایش جواب.** کروموزوم مسئله یک بردار سطری است که اعداد درون هر خانه زمان شروع هر پروژه را نشان می‌دهد. اگر عدد درون هر خانه خالی باشد، یعنی آن پروژه انتخاب نشده است.

۲	-	۴	۳	۲	۱	-
---	---	---	---	---	---	---

شکل ۲. نحوه نمایش جواب‌ها در الگوریتم پیشنهادی

**الگوریتم تکاملی تفاضلی (DE).** اولین بار استورن و پرایس (۱۹۹۵) الگوریتم تکاملی تفاضلی را معرفی کردند [۲۷]. این الگوریتم همانند سایر الگوریتم‌های تکاملی با جمعیتی از افراد سروکار

دارد که این افراد در فضای ژنتیک همان کروموزوم‌ها و در فضای حل مسئله مقادیر برداری جواب هستند. این الگوریتم جز آن دسته از الگوریتم‌هایی است که با متغیرهای حقیقی<sup>۱</sup> کار می‌کند که یکی از نقاط قوت این الگوریتم به‌شمار می‌رود. اجزا و مراحل الگوریتم تکاملی تفاضلی عبارت‌اند از:

۱. ایجاد جمعیت اولیه<sup>۲</sup>؛

۲. جهش<sup>۳</sup>؛

۳. جابجایی<sup>۴</sup>؛

۴. انتخاب بردار والد؛

۵. شرط توقف الگوریتم.

**ایجاد جمعیت اولیه.** نقطه آغازین الگوریتم، ایجاد اولین جمعیت از افراد است. در این پژوهش هیچ اطلاعاتی از مسئله در دست نیست، جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی با توزیع یکنواخت به‌گونه‌ای تولید می‌شود که متغیرها در داخل محدوده مرزی<sup>۵</sup> قرار داشته باشند [۲۸].

**عملگر جهش.** عملگر جهش در الگوریتم تکاملی تفاضلی برخلاف سایر الگوریتم‌های تکاملی، نقش نسبتاً مهم‌تری نسبت به سایر عملگرها ایفا می‌کند، عملگر جهش نقش ایجاد تنوع<sup>۶</sup> در جمعیت را بر عهده دارد که موجب بهبود عملکرد الگوریتم تکاملی تفاضلی در رسیدن به جواب بهینه خواهد شد. الگوریتم تکاملی تفاضلی نام خود را از عملگر جهش تفاضلی خویش گرفته است. وقتی جمعیت اولیه تولید شد، الگوریتم تکاملی تفاضلی نسل اول را جهش داده و جمعیتی با  $NP$  عضو (به تعداد جمعیت نسل اولیه) تولید می‌کند؛ در واقع جهش تفاضلی نسبتی از تفاضل دو بردار جواب (بردار اول و دوم) را به یک بردار پایه (بردار سوم) اضافه می‌کند. رابطه زیر نحوه جهش را در الگوریتم نشان می‌دهد:

$$V_{i,g} = x_{r0,g} + F \cdot (x_{r1,g} - x_{r2,g}) \quad (19)$$

فاکتور جهش در الگوریتم تکاملی تفاضلی که همان  $F$  است، عددی بزرگ‌تر از صفر و نزدیک به یک است که نسبت سهم بردار تفاضلی در تولید نسل جدید را کنترل می‌کند. بردار پایه  $x_{r0}$  می‌تواند از روش‌های مختلفی مانند روش تصادفی، بهترین جواب نسل و غیره انتخاب

---

1. Real variables  
2. Initialization  
3. Mutation  
4. Crossover  
5. Boundaries  
6. Diversity

شود. بردارهای اول و دوم تفاضلی نیز تصادفی از بین بردارهای نسل انتخاب می‌شوند. استورن و پرایس (۱۹۹۶) ۱۰ استراتژی مختلف برای عملیات جهش پیشنهاد کرده‌اند. صورت کلی نوشتار استراتژی‌های مختلف الگوریتم تکاملی تفاضلی به صورت  $DE/x/y/z$  است که نمادهای آن عبارت‌اند از:

$x$  - روش انتخاب بردار والد (کروموزوم والد) است، به عنوان مثال در  $DE/rand/y/z$  بردار والد به صورت تصادفی از میان جمعیت انتخاب می‌شود و یا در  $DE/best/y/z$  از بهترین فرد در جمعیت به عنوان بردار هدف (اولین بردار یا بردار اصلی در رابطه جهش) استفاده می‌شود؛  
 $y$  - تعداد بردارهای تفاضلی [برداری که از تفاضل دو بردار والد تصادفی در هر یک از استراتژی‌ها به دست می‌آید] است که برای آشفته کردن بردار والد به کار می‌رود. مثلاً در استراتژی  $DE/rand/1/bin$  که در جدول ۲ استراتژی شماره ۸ است، تعداد بردارهای تفاضلی یک است  $(x_{r1,g} - x_{r2,g})$ ؛

$Z$  - نشان دهنده مکانیزم جابه‌جایی در الگوریتم تکاملی تفاضلی این عملگر برای ایجاد جمعیت فرزند به کار می‌رود، است. به عنوان مثال  $DE/x/y/bin$  با یک سری آزمایش‌های برنولی فرآیند جابه‌جایی را کنترل می‌کند و در صورتی که از جابه‌جایی نمایی استفاده شود تا زمانی که تعداد متغیرها در داخل محدوده پارامتر جابه‌جایی باشد. این عملگر بر روی تمامی متغیرها در یک حلقه اعمال می‌شود [۲۷].

تمامی این استراتژی‌ها بر پایه تفاضل در بردارهای جمعیت به منظور ایجاد جهش در بردارهای والد پایه‌گذاری شده است. جدول ۵ این ۱۰ استراتژی و روابطی که بر طبق آن عملیات جهش صورت می‌گیرد را نشان می‌دهد [۱۳]. تفاوت بین این استراتژی‌ها در تعداد بردارهای تفاضلی، مکانیزم جابه‌جایی و نیز تعداد بردارهای والد است.

جدول ۵. استراتژی‌های مختلف برای جهش در DE

استراتژی	فرمول
Strategy 1: DE/best/1/exp	$v = x_{best}^{(G)} + F.(x_{r2}^{(G)} - x_{r3}^{(G)})$
Strategy 2: DE/rand/1/exp	$v = x_{r1}^{(G)} + F.(x_{r2}^{(G)} - x_{r3}^{(G)})$
Strategy 3: DE/rand-to-best/1/exp	$v = x_i^{(G)} + \lambda.(x_{best}^{(G)} - x_i^{(G)}) + F.(x_{r1}^{(G)} - x_{r2}^{(G)})$
Strategy 4: DE/best/2/exp	$v = x_{best}^{(G)} + F.(x_{r1}^{(G)} + x_{r2}^{(G)} - x_{r3}^{(G)} - x_{r4}^{(G)})$
Strategy 5: DE/rand/2/exp	$v = x_i^{(G)} + F.(x_{r1}^{(G)} + x_{r2}^{(G)} - x_{r3}^{(G)} - x_{r4}^{(G)})$
Strategy 6: DE/best/1/bin	$v = x_{best}^{(G)} + F.(x_{r2}^{(G)} - x_{r3}^{(G)})$
Strategy 7: DE/best/1/exp	$v = x_{best}^{(G)} + F.(x_{r2}^{(G)} - x_{r3}^{(G)})$
Strategy 8: DE/rand/1/bin	$v = x_{r1}^{(G)} + F.(x_{r2}^{(G)} - x_{r3}^{(G)})$
Strategy 9: DE/best/2/bin	$v = x_{best}^{(G)} + F.(x_{r1}^{(G)} + x_{r2}^{(G)} - x_{r3}^{(G)} - x_{r4}^{(G)})$

**عملگر جابه‌جایی.** عملیات جابه‌جایی در الگوریتم تکاملی تفاضلی به منظور ایجاد جمعیت فرزند از جمعیت آزمایشی به کار می‌رود. دو نوع جابه‌جایی در این الگوریتم با نام‌های «جابه‌جایی بینم» و «جابه‌جایی نمایی» انجام می‌شود [۲۷].

**فرآیند انتخاب.** فرآیند انتخاب در DE با سایر الگوریتم‌های تکاملی متفاوت است. در سایر الگوریتم‌های تکاملی افراد بازمانده برای نسل بعد به صورت احتمالی انتخاب می‌شوند؛ در صورتی که در الگوریتم تکاملی تفاضلی این انتخاب به صورت انتخاب قطعی<sup>۱</sup> بین برادر والد و برادر فرزند با در نظر گرفتن برآزش آن دو صورت می‌گیرد [۶]. نکته مهم در فرآیند انتخاب الگوریتم تفاضلی تکاملی این است که با تمامی بردارهای موجود در جمعیت فعلی مقایسه نمی‌شود؛ بلکه تنها با یک بردار متناظر خود مقایسه می‌شود. در صورت برابر بودن توابع برآزش، به دلیل حفظ تنوع در جمعیت، برادر فرزند به نسل بعد انتقال داده می‌شود [۱۳].

**شرایط توقف.** در این پژوهش شرط توقف هنگامی حاصل می‌شود که الگوریتم به حداکثر تعداد تکرارها رسیده باشد.

1. Dead selection



ساختار پیشنهادی الگوریتم تکاملی تفاضلی چندهدفه. شکل ۳ الگوریتم تکاملی تفاضلی چندهدفه پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این الگوریتم پیشنهادی در قسمت فرآیند انتخاب اگر بردار فرزند، بردار والد را مغلوب کرد؛ در این صورت بردار فرزند به نسل بعد راه پیدا می‌کند؛ در غیر این صورت بردار والد به نسل بعد منتقل می‌شود و در نهایت پس از پایان الگوریتم جواب‌های غیرمغلوب از نسل آخر استخراج می‌شوند [۱، ۲۳].

```

1- Initialize the values of k, NP, CR, f.
2- Generate NP random solutions.
3- Evaluate function values at these NP solutions.
For (i = 0; i < NP; i++) Objective_function();
4- For (i = 0; i < NP; i++) //Iteration loop starts here.
{
    Select randomly three distinct individuals  $X_{r1}$ ,  $X_{r2}$  and  $X_{r3}$ , and also different from
    target individual  $X_i$ .
    Select non-dominated best of these three as base vector ( $X_{rb}$ ) for mutation process.
    Generate a donor individual  $V_i$  using mutation equation
    Generate a trial individual  $U_i$  using crossover between  $V_i$  and  $X_i$  by equation 21.
    Evaluate function value at this  $U_i$ .
    Objective_function();
    Non-dominated checking of trial individual  $U_i$  with target individual  $X_i$ .
    If ( $U_i$  dominate  $X_i$ )
        Replace  $X_i$  by  $U_i$  in current population.
    } // Iteration loop ends here

```

شکل ۳. شبه کد الگوریتم پیشنهادی تکاملی تفاضلی چندهدفه [۱]

### تحلیل داده‌های مورد مطالعه

این پژوهش از منابع و اطلاعات کتابخانه‌ای و سازمانی در شرکت گاز استان کرمان (نقشه‌های اتوکید و نقشه‌های طراحی شده روستایی) برای انتخاب سبب پروژه روستایی در شرکت گاز استفاده کرده است.

کلیه نتایج با استفاده از نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup> در یک سیستم نوت‌بوک با پردازنده اینتل دو هسته با پردازش ۲ گیگاهرتز و حافظه (رم) ۲ گیگابایت و سیستم‌عامل (ویندوز) مایکروسافت ۷ انجام شده است. نتایج نهایی تنظیم پارامترها به صورت تجربی در مسائل به شرح جدول ۶ است.

1. Matlab

جدول ۶. نتایج تنظیم پارامترها الگوریتم تکاملی تفاضلی چندهدفه

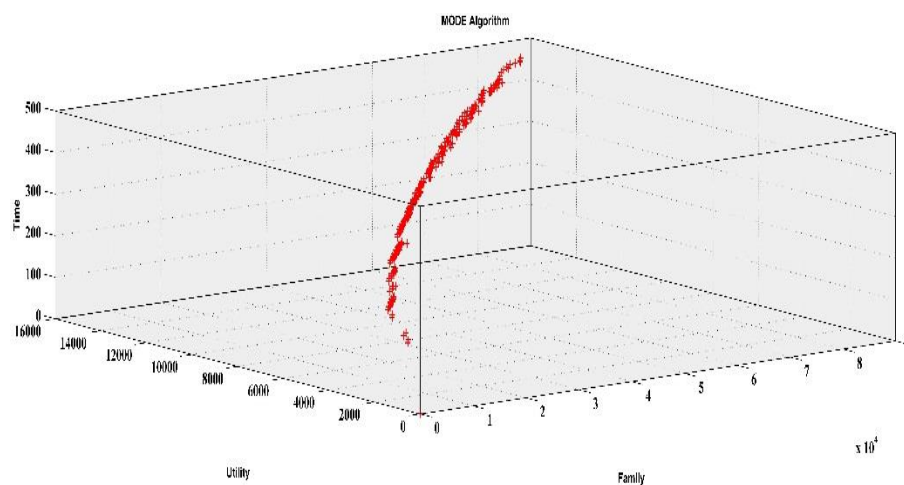
تعداد تکرار الگوریتم	جمعیت اولیه	فاکتور ترکیب	فاکتور جهش
۱۰۰	۳۰	۰/۷	۰/۳

سبد پروژه‌های گازرسانی روستایی. در این پژوهش، ایجاد یک سبدی بهینه و کارا از پروژه گازرسانی روستایی در شرکت گاز استان کرمان مدنظر است. وسعت مدل مثال واقعی این پژوهش به صورت جدول ۷ است.

جدول ۷. تعیین پارامترهای مسئله‌ی پروژه‌های روستایی (مسئله ساینز بزرگ)

مقادیر	اندیس‌های مدل	مقادیر	اندیس‌های مدل
۲	$l$ : نوع لوله	۲۳	$z$ : تعداد پروژه
۲	$S$ : نوع ایستگاه تقلیل فشار	۵	$t$ : تعداد دوره زمانی
۱	$l$ : نوع انشعاب	۳	$k$ : اهداف
۱۲۰	تعداد پارامترهای نامطمئن	۱۲۰	تعداد پارامترهای نامطمئن فازی
		۴	تعداد برش $\alpha$

مدل ریاضی پیشنهادی پژوهش به ازای چهار برش  $\alpha$  (۰؛ ۰/۲۵؛ ۰/۵؛ ۰/۷۵) حل شد. در این قسمت، پارامترهای ورودی نامطمئن به شکل عدد فازی نامتقارن در نظر گرفته شد. طی ۱۰۰ تکرار، ۲۶۲ جواب پارتو در جبهه پارتو به دست آمد که در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۴. جبهه پارتو الگوریتم تکاملی تفاضلی چندهدفه در مسئله پروژه‌های روستایی

انتخاب بهترین جواب پارتو (بهترین سبد پروژه‌های روستایی) با استفاده از روش تاپسیس<sup>۱</sup>. تسو (۲۰۰۸) در پژوهشی با عنوان «یک مدل برنامه‌ریزی موجودی کالا چندهدفه و حل آن با الگوریتم بهینه ذرات و تاپسیس» جواب‌های پارتو را با استفاده از روش تاپسیس الویت‌بندی کرد. با توجه به اینکه تعداد زیادی جواب‌های پارتو در جبهه پارتو وجود دارد و به منظور کمک به تصمیم‌گیری در انتخاب سبد پروژه روستایی، جواب‌های پارتو از روش تاپسیس الویت‌بندی می‌شوند. کدنویسی این روش در محیط «متلب» انجام شد. معیارهای در نظر گرفته شده برای ارزیابی جواب‌های پارتو عبارت‌اند از: تابع هدف اول، تابع هدف دوم، تابع هدف سوم، تعداد پروژه‌های انتخابی در افق زمانی و تعداد پروژه در هر دوره زمانی که با توجه به اینکه پنج دوره زمانی وجود دارد، در کل ۹ معیار در نظر گرفته شده است. نتایج به دو صورت، وقتی تمام معیارها بی‌وزن بوده و در صورتی که دارای وزن باشند، ارائه شده است. وزن معیارها از نظر ۱۰ نفر از خبرگان با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی به صورت زیر در نظر گرفته شده است. اعداد جدول ۸ خروجی نرم‌افزار Expert Choice را نشان می‌دهد.

جدول ۸. وزن معیارهای در نظر گرفته شده روش AHP

معیار	هدف ۱	هدف ۲	پروژه‌های انتخابی	دوره ۱	دوره ۲	دوره ۳	دوره ۴
وزن	۰/۴۷۶	۰/۲۲۴	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵

در حالت وزن دار با توجه به ۲۶۲ جواب پارتو یافت شده جواب پارتو ۱۸۶ به عنوان بهترین جواب با ضریب مطلوبیت ۰/۶۹ و بعد از آن جواب‌های ۱۸۸ و ۱۹۲ با ضریب مطلوبیت ۰/۵۸ و ۰/۵۷ انتخاب شده‌اند. جواب پارتو ۱۸۶ به صورت جدول ۹ است.

جدول ۹. بهترین پارتو در حالت وزن دار پروژه‌های روستایی

شماره پروژه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
زمان شروع	۲	-	۳	۳	۴	۲	-	-	۲	۲	۵
شماره پروژه	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲
زمان شروع	۵	۲	-	۱	۱	۳	۴	۱	۵	۳	۴

در حالت بی‌وزنی با توجه به ۲۶۲ جواب پارتو یافت شده، جواب پارتو ۱۳۹ به عنوان بهترین جواب با ضریب مطلوبی ۰/۶۲ و بعد از آن جواب‌های ۲۲۲ و ۱۲۱ با ضریب مطلوبیت ۰/۶۱ و ۰/۵۵ انتخاب شده‌اند. جواب پارتو ۱۳۹ به صورت جدول ۱۰ است.

جدول ۱۰. بهترین پارتو در حالت بی‌وزنی پروژه‌های روستایی

شماره پروژه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
زمان شروع	۲	-	۳	۲	۴	۳	۵	۴	۲	۱	۵
شماره پروژه	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲
زمان شروع	۱	۴	-	۲	۵	۲	۴	۵	-	۳	۴

**بررسی اعتبار و عملکرد روش حل.** برای ارزیابی اعتبار و عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه پیشنهادی، مسئله پژوهش با الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی ممنوعه چندهدفه نیز حل<sup>۱</sup> شد. در ابتدا صحت و اعتبار الگوریتم پیشنهادی پژوهش بر اساس معیارهای در نظر گرفته‌شده بررسی شد و سپس بر اساس معیارهای دو الگوریتم از نظر عملکرد با هم مقایسه شدند. معیارهای در نظر گرفته‌شده عبارت‌اند از: تعداد جواب پارتو<sup>۲</sup>، معیار فاصله از جواب ایده‌آل<sup>۳</sup>، معیار تنوع<sup>۴</sup> و معیار زمان<sup>۵</sup>.

**تعداد جواب پارتو.** مقدار معیار تعداد جواب پارتو نشان‌دهنده تعداد جواب‌های بهینه پارتو هستند که در هر الگوریتم می‌توان یافت. هر چه این معیار بیشتر باشد، کارایی الگوریتم بیشتر خواهد بود [۳۴].

**معیار فاصله از جواب ایده‌آل.** این معیار به منظور محاسبه میانگین فاصله جواب‌های پارتو از مبدأ مختصات استفاده می‌شود. در رابطه ۲۰ مشخص است که هر چه این معیار کمتر باشد، کارایی الگوریتم بیشتر خواهد بود [۳۴].

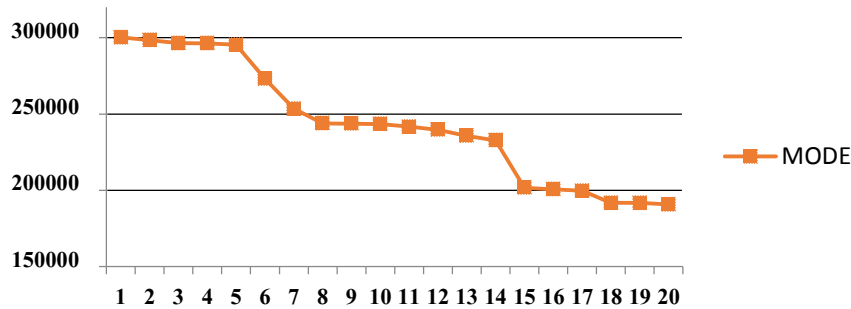
$$MID = \frac{1}{NOS} \sum_{i=1}^{NOS} c_i \text{ where } c_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m f_{ji}^2} \quad (20)$$

**معیار تنوع.** این معیار، که توسط زیتلر (۱۹۹۵) ارائه شده است، طول قطر مکعب فضایی که توسط مقادیر انتهایی اهداف برای مجموعه جواب‌های نامغلوب به کار می‌رود را اندازه‌گیری می‌کند. رابطه ۲۱ رویه محاسباتی این شاخص را نشان می‌دهد [۳۳]. این معیار هر چه بیشتر بهتر است.

1. Multi Objective Tabu Search
2. Number Of Pareto Metric
3. Mean Ideal Distance
4. Diversity
5. Time

$$D = \sqrt{\sum_{j=1}^m (\max_i f_i^j - \min_i f_i^j)^2} \quad (21)$$

**معیار زمان.** زمان اجرای الگوریتم نیز به عنوان معیار ارزیابی کیفیت در نظر گرفته می شود. بررسی صحت و اعتبار الگوریتم نیز با توجه به بهبود این معیارها در حین اجرای الگوریتم صورت گرفت. روند بهبود برای معیار فاصله از جواب ایده آل در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵. روند بهبود معیار فاصله از جواب ایده آل (MODE) الگوریتم های تفاضلی چندهدفه

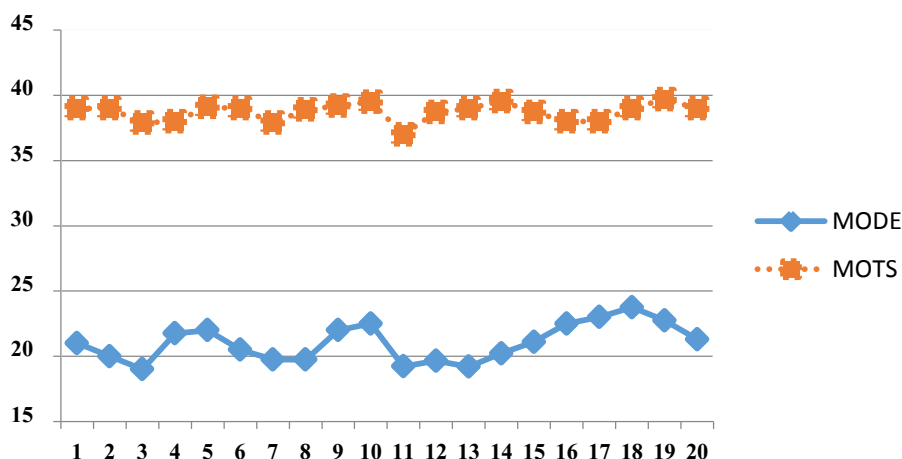
برای مقایسه عملکرد الگوریتم ها هر کدام از الگوریتم ها ۲۰ مرتبه اجرا شد. برای آزمون نرمال بودن داده ها از آزمون کولموگروف - اسمیرنوف (K-S) که اگر مقدار P-Value بزرگ تر از ۰/۰۵ باشد، داده ها نرمال است و برای مقایسه دو الگوریتم از آزمون فرض برابری میانگین دو جامعه دوطرفه (آزمون t دوطرفه مستقل) استفاده شد؛ به طوری که فرض صفر برابری میانگین های معیار ارزیابی در دو الگوریتم با سطح اطمینان ۹۵٪ در نظر گرفته شد. اگر P-Value به دست آمده کوچک تر از ۰/۰۵ باشد، فرض صفر رد شده و می توان نتیجه گرفت، بین معیارهای ارزیابی عملکرد دو الگوریتم، تفاوت معنادار وجود دارد و برعکس.

$$\begin{cases} H_0 : \mu^{metric}_{MODE} = \mu^{metric}_{MOTS} \\ H_1 : \mu^{metric}_{MODE} \neq \mu^{metric}_{MOTS} \end{cases} \quad (24)$$

جدول ۱۱. بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی پژوهش

شاخص	الگوریتم	P-Value (آزمون K-S)	نرمال	مقدار t	P-Value (آزمون t)	تفاوت معنی‌دار	الگوریتم برتر
تعداد پارتو	MODE	۰/۰۸۶	بلی	۱/۷۸	*	بلی	MODE
	MOTS	۰/۰۷۷۵					
فاصله از جواب ایدال	MODE	۰/۱۵۰>	بلی	۳/۵۶	*	بلی	MODE
	MOTS	۰/۱۵۰>					
تنوع	MODE	۰/۱۵۰>	بلی	۷/۸	*	بلی	MODE
	MOTS	۰/۱۵۰>					
زمان	MODE	۰/۱۵۰>	بلی	-۶/۸	*	بلی	MODE
	MOTS	۰/۱۵۰>					

همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به جدول ۱۱، مقدار P-Value در آزمون فرض برابری میانگین دو جامعه دوطرفه کوچک‌تر از ۰/۰۵ است؛ در نتیجه دو الگوریتم بر اساس معیارهای مقایسه در عملکرد تفاوت معناداری دارند. در هر یک از معیارها، الگوریتم تفاضلی چندهدفه نسبت به الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه چندهدفه، عملکرد بهتری دارد. برای مثال معیار زمان هرچه کمتر باشد، بهتر است که شکل ۶ نشان می‌دهد الگوریتم تفاضلی چندهدفه از نظر زمان عملکرد بهتری داشته است.



شکل ۶. مقایسه معیار زمان اجرا (ثانیه) الگوریتم‌های MODE و MOTS

## ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش مسئله انتخاب سید پروژه گازرسانی روستایی در شرکت گاز استان کرمان بررسی شد. ابتدا شاخص‌های تأثیرگذار بر روی پروژه‌های گازرسانی با استفاده از پیشینه پژوهش و مصاحبه با خبرگان، استخراج و سپس مدل ریاضی فازی چندهدفه پژوهش با توجه به معیارهای متضاد در انتخاب پروژه و همچنین عدم اطمینان فازی موجود در پروژه‌های گازرسانی، ارائه شد. در این مدل سه هدف متضاد: تعداد خانوار، زمان انجام پروژه و مطلوبیت پروژه، لحاظ و پارامتر هزینه به‌عنوان پارامتر نامطمئن فازی در نظر گرفته شد. به‌منظور حل مدل از رویکرد استوار فازی استفاده شد که در این رویکرد می‌توان از تمام سطوح برش آلفای مدنظر تصمیم‌گیرنده استفاده کرد. ابتدا برای نمایش عملکرد روش استوار فازی، مدل پژوهش در قالب یک مسئله کوچک تک هدفه توسط نرم‌افزار لینگو حل شد؛ سپس برای حل مدل از الگوریتم تکاملی تفاضلی چندهدفه استفاده شد. در پایان برای تسهیل در تصمیم‌گیری در زمینه انتخاب سید روش تاپسیس به‌منظور انتخاب پارتو از میان جبهه پارتو به‌کار رفت که با توجه به ترجیحات تصمیم‌گیرنده سید مناسب مشخص شد. با توجه به نتایج در حالت وزن‌دار، پارتو ۱۸۶ به‌عنوان مناسب‌ترین پارتو و در حالت بی‌وزنی پارتو ۱۳۹ به‌عنوان پارتو مناسب انتخاب شد. اعتبار و عملکرد الگوریتم پیشنهادی پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی ممنوعه چندهدفه به‌عنوان الگوریتم رقیب مسئله پژوهش دوباره حل و با الگوریتم پیشنهادی پژوهش مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی از نظر معیارهای در نظر گرفته‌شده بهتر عمل کرده است و همچنین الگوریتم پیشنهادی دارای صحت و اعتبار لازم است.

توصیه می‌شود در پژوهش‌های آتی از سایر الگوریتم‌های فراابتکاری مانند جست‌وجوی ممنوعه چندهدفه دیفرانسیله و الگوریتم کرم‌های شب‌تاب چندهدفه که قابلیت کاربرد برای حل چنین مسئله‌ای را دارا هستند، استفاده شود و نتایج با الگوریتم استفاده‌شده در پژوهش حاضر مقایسه شود؛ همچنین روابط غیرخطی میان پروژه‌ها (سینرژی) در مدل ریاضی دیده شود.

## منابع

۱. برارجه، میثم. (۱۳۹۲). بهینه‌سازی سبد پروژه با سناریوهای مختلف. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده صنایع دانشگاه تهران، استاد راهنما: دکتر یقچالی.
۲. پور کاظمی، م؛ فتاحی، م؛ مظاهری، س. (۱۳۹۲). بهینه‌سازی سبد پروژه‌های با اثر متقابل با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری (ICA). *مدیریت صنعتی تهران*، ۵، ۱-۲۰.
۳. ربیعه، م. (۱۳۸۹). *طراحی مدل ریاضی استوار زنجیره تأمین*. رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مدیریت، استاد راهنما: دکتر عادل آذر.
۴. سلامی، ز؛ نادری، ب؛ توکلی‌مقدم، ر. (۱۳۹۲). استفاده از مدل برنامه‌ریزی آرمانی چندمنظوره برای حل مسئله انتخاب سبد پروژه پژوهش و توسعه در صنایع خودروسازی. *چشم‌انداز مدیریت صنعتی*، ۹، ۱۴۷-۱۶۷.
۵. فارسیجانی، ح؛ فتاحی، م؛ نوروزی، م. (۱۳۹۱). انتخاب سبد پروژه با اثر متقابل، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات (PSO) و دینامیک آشوبی. *چشم‌انداز مدیریت صنعتی*، ۵، ۲۷-۴۸.
6. Bergey, P., Ragsdale, C. (2005). Modified differential evolution: A greedy random strategy for genetic recombination. *Management Science*, 255-265
7. Bhattacharyya, R., Kumar, P., & Kar, S. (2011). Fuzzy R & D portfolio selection of interdependent projects. *Computers and Mathematics with Applications*, 62, 3857-3870
8. Fliege, J; & Werner, R. (2013). Robust multi objective optimization & applications in portfolio optimization. *European Journal of Operational Research*, 13, 340-351
9. Forouzanfar, M; Doustmohammadi, Menhaj, M; Hasanzadeh, S. (2010). Modeling and estimation of the natural gas consumption for residential and commercial sectors in Iran. *Applied Energy*, 87(1), 268-278
10. Ghahtarani, A; & Amir Abbas, N. (2013). Robust goal programming for multi-objective portfolio selection problem. *Economic Modelling*, 33, 588-592
11. Ghasemzadeh, F., Archer, N., & Iyogun, P. (1999). A Zero-One Model for Project Portfolio Selection and Scheduling. *The Journal of the Operational Research Society*, 50(7), 745-755.
12. Ghorbani, S., & Rabbani, M. (2009). A new multi-objective algorithm for a project selection problem. *Advances in Engineering Software*, 40, 9-14.
13. Gnoni, M.G., Lavagnilio, R., Mossa, G., Mummolo, G., Leva, A.D. (2003). Production of a multisite manufacturing system by hybrid modeling: A case study from the automotive industry. *International Journal of Production Economics*, 251-262
14. Hassanzadeh, F., Nemati, H., & Sun, M. (2014). Robust optimization for interactive multiobjective programming with imprecise information applied to R&D project portfolio selection. *European Journal of Operational Research*, Article in press, XX-XX.
15. Hu, G., Wang, L., Fetch, S., & Bidanda, B. (2008). A multi-objective model for project portfolio selection to implement lean and Six Sigma concepts. *International Journal of Production Research*, 46 (23), 6611-6625



16. Inuiguchi, M., Sakawa, M., (1998). Robust optimization under softness in a fuzzy linear programming problem. *International Journal of Approximate Reasoning*, 18, 21–34.
17. Khalil-Damghani, K., & Tavana, M. (2014). A Comprehensive Framework for Sustainable Project Portfolio Selection Based on Structural Equation Modeling. *Project Management Journal*, 45 (2), 82-97.
18. Khalili-Damghani, K., Tavana, M., & Sadi-Nezhad, S. (2012). An integrated multi-objective framework for solving multi-period project selection problems. *Applied Mathematics and Computation*, 219, 3122–3138.
19. Khalili-Damghania, Kaveh, Nojavana, M., & Tavanab, M. (2013). Solving fuzzy Multidimensional Multiple-Choice Knapsack Problems: The multi-start Partial Bound Enumeration method versus the efficient epsilon-constraint method. *Applied Soft Computing*, 13, 1627–1638.
20. Lang, M. J. (1990). Project management in the oil industry. *International Journal of Project Management*, 8(3), 159–162
21. Li, Y.P., Huang, G.H., Nie, X.H., Nie. S.L., (2008). A two-stage fuzzy robust integer programming approach for capacity planning of environmental management systems. *European Journal of Operational Research*, 189, 399–420.
22. Liesio, J; Mild, P; & Salo, A. (2008). Robust portfolio modeling with incomplete cost information. *European Journal of Operational Research*, 190, 679–695.
23. Musrrat, A., Patrick, S. (2012). An efficient Differential Evolution based algorithm for solving multi-objective optimization problems. *European Journal of Operational Research*, 217(2), 404–416
24. Nie, X.H., Huang, G.H., Li, Y.P., liu, L., (2007). IFRP: A hybrid interval-parameter fuzzy robust programming approach for waste management planning under uncertainty. *Journal of Environmental Management*, 87, 1-11.
25. Pemsel, S., Wiewiora, A., & Müller, R. (2014). A conceptualization of knowledge governance in project-based organizations. *International Journal of Project Management*, 32 (4), 1411–1422.
26. Rabbani, M., Tavakoli Moghadam, R., Jolaei, F., & Ghorbani, H. R. (2012). A Comprehensive Model for R and D Project Portfolio Selection with Zero-One Linear Goal Programming. *IJPMA*, 325-333.
27. Storn, R., Price, k. V. (1996). Minimizing the real functions of the ICEC'96 contest by differential evolution. *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, 842-844
28. Storn, R., Price.K. V. (1997). Differential evolution- A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous space, *Global Optimization*, 341-359
29. Viktorovna, N. (2012). *Genetic Algorithms for multicriteria project selection and scheduling*. Ph.D Thesis, North Carolina State University
30. Rad, P. F., & Levin, G. (2006). *Project Portfolio Management: Tools and Techniques (1st Ed.)*. N.Y: Judith W. Umlas, 47-49
31. Tavana, M; Khalili dameghani, K; & Abtahi, A. (2013). A fuzzy multidimensional multiple-choice knapsack model for project portfolio selection using an evolutionary algorithm. *Annals of Operations Research*, 206, 449-483

32. Tsou, Ching-Shih. (2008). Multi-objective inventory planning using MOPSO and TOPSIS. *Expert Systems with Applications*, 35, 136-142
33. Zitzler, E. (1999). *Evolutionary Algorithms for multi-objective optimization: method and applications*, P.h.D Thesis, dissertation ETH NO. 13398, Swaziland Federal Institute of Technology Zorikh, Switzerland.
34. Zitzler, E; Deb, K; Thiele, L. (2000). Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: empirical results, *Evolutionary Computation journal*, 8(2), 125-148