



A Method for Finding Non-Dominated Solutions of the Multi Objective Combinatorial Optimization Problems by Elastic Constraints Method

M. Darrudi & R. Sadeghian^{*}

Maryam Darrudi, Master of Science Student at Bu Ali Sina University, Engineering Department, Industrial Engineering Group, Hamedan, Iran.
Ramin Sadeghian, Assistant Professor at Tehran Payam Noor University, Industrial Engineering Group, Tehran, Iran, sadeghian@pnu.ac.ir,

Keywords

Multi Objective Integer
Programming (MOIP),
Multi Objective Combinatorial
Optimization (MOCO),
Elastic Constraints (EC) Method

ABSTRACT

In this paper, a general procedure is developed to find all non-dominated solutions of the multi objective combinatorial optimization (MOCO) problem. This procedure is based on the elastic constraints method and applies the identification of objective's bounds for it. The bounds of objectives are determined by solving single objective integer programming problems. First, the elastic constraints method is performed on a bi-objective and tri-objective problem respectively, then it is developed on a general multi objective integer programming (MOIP) problem. In this paper, a numerical example such as tri-objective assignment problem is presented to clear the proposed method.

© 2014 IUST Publication, IJIIEPM. Vol. 25, No. 1, All Rights Reserved

^{*}
Corresponding author. Ramin Sadeghian
Email: sadeghian@pnu.ac.ir

یافتن راه‌حل‌های مؤثر در مسائل بهینه‌سازی ترکیبی چندهدفه به کمک روش قیود ارتجاعی

مریم دررودی و رامین صادقیان*

کلمات کلیدی

برنامه‌ریزی عددصحيح چندهدفه،
بهینه‌سازی ترکیبی چندهدفه،
روش قیود ارتجاعی

چکیده:

در این مقاله، یک فرآیند کلی برای یافتن تمام راه‌حل‌های مؤثر از مسأله بهینه‌سازی ترکیبی چندهدفه تشریح می‌شود. این فرآیند بر پایه روش قیود ارتجاعی بوده و به شناسایی حدود هر هدف می‌پردازد. حدود اهداف، با حل مسائل برنامه‌ریزی عددصحيح تک هدفه، به دست می‌آیند. ابتدا روش قیود ارتجاعی بر روی مسأله دوهدفه و سپس بر روی مسأله سه‌هدفه بررسی شده و از این طریق به مسأله برنامه‌ریزی عددصحيح چندهدفه کلی تعمیم داده می‌شود. در این مقاله، جهت روشن‌تر شدن روش کار، یک مثال عددی شامل مسأله تخصیص با سه تابع هدف ارائه می‌گردد.

۱. مقدمه

مسائل بهینه‌سازی ترکیبی چندهدفه^۲، نمونه‌های خاصی از مسائل برنامه‌ریزی عددصحيح چندهدفه^۳ هستند که به واسطه مجموعه‌های محدودیت ساختاریافته خاص‌شان، تمیز داده می‌شوند. بسیاری از پدیده‌های جهان واقعی طبعاً یک بهینه‌سازی ترکیبی چندهدفه هستند، زیرا اکثر این پدیده‌ها دارای متغیرهای عددصحيح و با اهداف ناسازگارند.

هرقات و گاندی بلکس^۴ در مورد مسائل مربوط به بهینه‌سازی ترکیبی چندهدفه روی روش‌های تقریبی و دقیق بررسی‌هایی انجام دادند. آنها روی برخی انواع خاص مسائل بررسی کرده و در مورد متدلوژی‌های حل‌شان بحث کردند. آنها بدون اینکه به برنامه‌ریزی غیرخطی، زمان‌بندی و برنامه‌ریزی چند سطحی محدود شوند، برخی دیگر از مسائل بهینه‌سازی چندمعیاره را بررسی کردند [۱-۲].

تاریخ وصول: ۹۰/۴/۱۹

تاریخ تصویب: ۹۱/۴/۱۷

مریم دررودی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی صنایع، همدان، ایران.

*نویسنده مسئول مقاله: دکتر رامین صادقیان، استادیار دانشگاه پیام نور

تهران، دانشکده مهندسی صنایع، ایران، sadeghian@pnu.ac.ir

² Multi Objective Combinatorial Optimization (MOCO)

³ Multi Objective Integer Programming (MOIP)

⁴ Ehrgott & Gandibleux

هنان و کلین^۵ برای مسأله برنامه‌ریزی عددصحيح خطی چندهدفه، الگوریتمی بر اساس راه‌حل‌های متوالی از مدل‌های تک هدفه ارائه کردند، که در آن از برخی محدودیت‌های اضافی برای حذف راه‌حل‌های مسلط شناخته‌شده، استفاده می‌شود [۳]. الگوریتم آنها یک زیرمجموعه تولید می‌کند که لزوماً مجموعه کاملی از راه‌حل‌های مؤثر نیست. کرما و سیلوا روشی برای پیدا کردن مجموعه بردارهای غیرمسلط در برنامه‌های خطی عددصحيح چندهدفه عرضه کردند، که دیدگاه هنان و کلین را با یکی کردن تمام اهداف در یک تابع وزنی توسعه داده و یافتن تمام راه‌حل‌های مؤثر را تضمین کردند [۴]. لاومانس^۶ و همکاران یک الگوریتم فرا ابتکاری برای به دست آوردن راه‌حل‌های مؤثر مسأله برنامه‌ریزی عددصحيح چندهدفه، به صورت تقریبی و با استفاده از روش ϵ -محدودیت ارائه کردند [۵]. اشکال اصلی دیدگاه‌های ارائه شده، مشکل بودن حل مسائل مربوطه است که ناشی از افزایش تعداد محدودیت‌ها و متغیرها و در نتیجه افزایش در تعداد راه‌حل‌های مؤثر مسأله می‌باشد.

تکنیک عددی‌سازی^۸ یکی از روش‌های حل مسائل برنامه‌ریزی عددصحيح چندهدفه است، که استفاده از آن جهت پیدا کردن راه‌حل‌های مؤثر مسائل چندهدفه بسیار رایج است [۱۰-۶]. این

5 Klein & Hannan

6 Sylva & Crema

7 Laumanns

8 Scalarization Technique

$$\begin{aligned} \min_{x \in X} \quad & c_j x + \sum_{k \neq j} \mu_k s_k \\ \text{subject to} \quad & c_k x + l_k - s_k = \varepsilon_k \quad k \neq j \\ & s_k, l_k \geq 0 \quad k \neq j. \end{aligned} \quad (3)$$

هرقات و ریان^۶، از این ایده برای ایجاد روش قیود ارتجاعی استفاده کردند [۱۳]. پارامترها عبارتند از ضرایب جریمه μ_k و مقادیر سمت راست، ε_k . در این روش از دو مجموعه متغیرهای اضافی استفاده می‌شود: متغیرهای کمکی l_k و متغیرهای مازاد s_k . استفاده از این متغیرها به منظور تبدیل حدود بالای مقادیر هدف از (۲) به محدودیت‌های مساوی صورت می‌گیرد که می‌تواند با انتخاب مناسب s و l برای هر $x \in X$ فراهم آید.

۳. ارائه مدل پیشنهادی

روش قیود ارتجاعی یکی از تکنیک‌های عددی‌سازی در حل مسائل برنامه‌ریزی عددصحيح چندهدفه است که در واقع ترکیبی از دو روش جمع‌وزنی و ε -محدودیت می‌باشد. روش قیود ارتجاعی دربردارنده مزیت‌های روش جمع‌وزنی و ε -محدودیت به‌طور توأمان بوده و برخی از معایب این دو روش را از بین می‌برد. این روش از سادگی حل تک‌هدفه‌شدن مسأله (مانند روش جمع‌وزنی بر خلاف روش ε -محدودیت) و امکان یافتن تمام راه‌حل‌های مؤثر (مانند روش ε -محدودیت بر خلاف روش جمع‌وزنی) بهره می‌برد.

در راستای بهره‌برداری از روش جدید قیود ارتجاعی و نیز به منظور تسهیل در استفاده از روش مذکور، فرآیندی برای یافتن راه‌حل‌های مؤثر مسائل برنامه‌ریزی عددصحيح چندهدفه بر پایه روش قیود ارتجاعی ارائه خواهد شد.

برای این منظور ابتدا فرآیند روی مسائل برنامه‌ریزی عدد صحيح دو هدفه و سپس بر روی مسأله سه‌هدفه بررسی شده و از این طریق به مسأله برنامه‌ریزی عددصحيح چندهدفه کلی تعمیم داده می‌شود.

در فرآیند پیشنهادی، برای یافتن تمام راه‌حل‌های مؤثر، همان‌طور که در ادامه ثابت خواهد شد، یک محدوده از مقادیر μ_i که منجر به راه‌حل مؤثر می‌شوند، بستگی به f_i^L و f_i^U دارند که به‌ترتیب حدود بالایی و پایینی روی f_i از هر حل شدنی هستند. از طرفی در این فرآیند، s_i مقداری می‌شود تا حد بالا تولید شود و سپس مقدار s_i به‌طور مرتب کاهش می‌یابد تا جایی که s_i به حد پایینی f_i برسد.

توجه شود که بدون از دست دادن کلیت مطلب، می‌توان فرض کرد که محدودیت زیر از مسأله (۳):

تکنیک خود شامل چندین روش است که مرسوم‌ترین آنها روش‌های جمع‌وزنی^۱ و روش ε -محدودیت^۲ هستند [۱۱-۱۲]. هرقات روی تکنیک‌های عددی‌سازی مسأله برنامه‌ریزی عددصحيح خطی چندهدفه، بحث کرد و برخی خصوصیات راه‌حل‌های مؤثر را توسعه داد و تکنیک جدیدی از عددی‌سازی با عنوان روش قیود ارتجاعی^۳ را معرفی نمود. البته او در مقاله خود نحوه پیاده‌سازی و اجرای این روش را بیان نکرده و فقط ایده آن را طرح کرد [۷].

۲. مفاهیم و تعاریف

یک روش کلی برای یافتن مجموعه راه‌حل‌های مؤثر از مسائل برنامه‌ریزی چندهدفه، روش عددی‌سازی است، که در آن مسأله چندهدفه به شکل‌های خاصی به مسائل تک‌هدفه تبدیل شده و متناوباً تا رسیدن به جواب مورد نظر با دقت تعیین شده حل می‌شوند. برخی روش‌های عددی‌سازی در ذیل معرفی می‌شوند.

۱. روش جمع‌وزنی: عددی‌سازی روش جمع‌وزنی یک ترکیب محدب از p هدف از برنامه‌ریزی عددصحيح چندهدفه می‌باشد و از بردار وزن‌ها $\lambda \in R_+^p$ به عنوان پارامتر استفاده می‌کند [۱۱].

$$\min_{x \in X} \sum_{k=1}^p \lambda_k f_k(x). \quad (1)$$

۲. روش ε -محدودیت: در روش ε -محدودیت، یکی از p هدف (j امین هدف) برای مینیمم‌سازی باقی می‌ماند و $p-1$ هدف دیگر در محدودیت‌ها قرار می‌گیرند.

$$\begin{aligned} \min_{x \in X} \quad & f_j(x) \\ f_k(x) & \leq \varepsilon_k \quad k \neq j. \end{aligned} \quad (2)$$

این روش توسط هایمیس^۴ معرفی شده و بحث گسترده‌تر توسط چانکونگ^۵ و هایمیس انجام گرفته‌است [۱۲].

۳. روش قیود ارتجاعی: ایده این روش، ایجاد ارتجاع قیود به منظور کسب مسأله‌ای با حل آسان‌تر، است. زیرا در این روش حدود بالای روی مقادیر هدف مختل شده و از طرفی دیگر نقض محدودیت، جریمه می‌شود. عددی‌سازی این مسأله به‌صورت زیر می‌باشد:

- 1 The Weighted Sum Method
- 2 The ε -Constraint Method
- 3 Elastic Constraints Method
- 4 Haimes
- 5 Chankong

اثبات: در حل مسئله زیر مقدار مشخصی از s_2 در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } f_1(x) + \mu_2 s_2 \\ \text{s.t. } f_2(x) - s_2 \leq \varepsilon_2 \\ x \in X. \end{aligned}$$

با استفاده از قضیه (۱)، راه‌حل‌های مؤثر دو هدفه دارای حد بالایی روی $f_2(x)$ ، حد پائینی روی هدف دیگر $f_1(x)$ فراهم می‌کند. با تعریف مناسب μ_2 ، بیشترین کاهش در f_2 (که سهمی در تابع هدف ندارد) به میزان کمترین افزایش در f_1 می‌باشد. بیشترین کاهش در f_2 از $f_2^U - f_2^L$ بیشتر نیست. از طرفی از آنجا که $\mu_2 \leq 1$ پس:

$$\begin{aligned} \mu_2 (f_2^U - f_2^L) &\leq 1 \\ \mu_2 &\leq \frac{1}{f_2^U - f_2^L} \\ \frac{1}{f_2^U - f_2^L + n} &\leq \frac{1}{f_2^U - f_2^L} \end{aligned}$$

بطور معادل:

از طرفی:

لذا در مسئله (۴) به‌ازای مقدار مشخصی از s_2 با μ_2 ، حد بالایی روی f_2 از راه‌حل‌های مؤثر دوهدفه فراهم می‌کند. ■

۳-۲. مسئله برنامه ریزی عدد صحیح سه هدفه $TOIP^2$

روش قیود ارتجاعی را روی مسئله $TOIP$ پیاده سازی کرده و سپس روی کارایی‌اش بحث می‌گردد.

$$\begin{aligned} \text{Min } f_1(x) + \mu_2 s_2 + \mu_3 s_3 \\ \text{s.t. } f_2(x) - s_2 \leq \varepsilon_2 \\ f_3(x) - s_3 \leq \varepsilon_3 \end{aligned} \quad (5)$$

قضیه زیرخاصیتی از یک حد بالا روی مقدار $f_1(x)$ از تمام راه‌حل‌های مؤثر سه‌هدفه ارائه می‌دهد، در صورتیکه مقدار $f_1(x)$ بیشتر از s_1 نباشد.

قضیه (۳): یک راه‌حل مؤثر سه‌هدفه که حد بالایی روی هدف $f_1(x)$ فراهم می‌کند، به‌ازای مقدار مشخصی از s_1 ، مؤثر دوهدفه نسبت به دو هدف دیگر است.

اثبات: فرض کنید که $x' \in X$ یک راه حل مؤثر سه هدفه باشد که حد بالایی روی $f_1(x)$ فراهم می‌کند، لذا برای تمام $x \in X$ داریم: $f_1(x) \leq f_1(x')$ از این رو x' در هدف i غیرمسلط نیست. از تعریف مؤثر بودن چنین برمی‌آید که، یک راه‌حل مؤثر حداقل یک هدف غیرمسلط توسط هر راه‌حل مؤثر دیگری دارد. بنابراین به منظور داشتن حداقل یک هدف غیرمسلط، راه‌حل محدود شده

$$\begin{aligned} c_k x + l_k - s_k &= \varepsilon_k \\ c_k x - s_k &\leq \varepsilon_k \end{aligned}$$

معادل است با:

زیرا l_k متغیر کمکی مسئله می‌باشد و می‌توان آن را تحت متغیر کمبود مسئله فرض کرد.

۳-۱. مسئله برنامه ریزی عدد صحیح دو هدفه $BOIP^1$

روش قیود ارتجاعی را روی مسئله $BOIP$ پیاده سازی کرده و سپس روی کارایی‌اش بحث می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{Min } f_1(x) + \mu_2 s_2 \\ \text{s.t. } f_2(x) - s_2 \leq \varepsilon_2 \\ x \in X. \end{aligned} \quad (4)$$

راه‌حل بهینه مسئله (۴)، راه‌حل مؤثر مسئله دوهده می‌باشد. در این مسئله مقدار s_2 محدودیت را نقض کرده و جریمه این نقض را μ_2 می‌پردازد.

قضیه زیر یک خصوصیت از حد بالایی روی $f_1(x)$ از تمام راه‌حل‌های مؤثر دوهده ارائه می‌دهد، مشروط به اینکه مقدار $f_1(x)$ بیشتر از s_1 نباشد.

قضیه (۱): یک راه‌حل مؤثر دو هدفه که حد بالایی روی $f_1(x)$ فراهم می‌کند، به‌ازای مقدار مشخصی از s_1 ، حد پائینی روی هدف دیگر $f_j(x)$ می‌دهد.

اثبات: فرض کنید $x' \in X$ راه‌حل مؤثر دو هدفه باشد که حد بالایی روی $f_1(x)$ فراهم می‌کند، لذا برای تمام $x \in X$ داریم: $f_1(x) \leq f_1(x')$ از این رو x' در هدف i غیرمسلط نیست.

از تعریف مؤثر بودن چنین برمی‌آید که، یک راه‌حل مؤثر حداقل یک هدف غیرمسلط توسط هر راه‌حل مؤثر دیگری دارد. بنابراین راه‌حل محدود شده مفروض توسط تمام راه‌حل‌ها در هدف دیگر $f_j(x)$ بایستی غیرمسلط باشد. یعنی حد پائینی روی هدف $f_j(x)$ ارائه دهد. ■

با استفاده از این حدود، قضیه (۲) به‌ازای مقدار مشخصی از s_2 در مدل (۴)، محدوده مقادیری از μ_2 را بیان می‌کند که یک راه‌حل مؤثر برمی‌گردانند.

قضیه (۲): راه‌حل مسئله (۴) با $\mu_2 = \frac{1}{f_2^U - f_2^L + n}$ ، به‌ازای مقدار مشخصی از s_2 و $n \geq 1, n \in \mathbb{Z}$ ، حد بالایی روی مقادیر f_2 از تمام راه‌حل‌های مؤثر فراهم می‌کند.

² Tri-Objective Integer Programming

¹ Bi-Objective Integer Programming

$$\mu_2(f_3^U - f_3^L) < \frac{1}{f_2^U - f_2^L + n}$$

$$\mu_2 < \frac{1}{(f_2^U - f_2^L + n)(f_3^U - f_3^L)} \quad \text{بطور معادل:}$$

$$\frac{1}{(f_2^U - f_2^L + n)(f_3^U - f_3^L + n)} < \frac{1}{(f_2^U - f_2^L + n)(f_3^U - f_3^L)}$$

از طرفی
لذا مسأله بالا به‌ازای مقدار مشخصی از s_2 با
حد بالایی روی f_3 از $\mu_2 = \frac{1}{(f_2^U - f_2^L + n)(f_3^U - f_3^L + n)}$
راه‌حل‌های مؤثر سه‌هدفه فراهم می‌کند. ■

۳-۳. مسأله برنامه‌ریزی عددصحیح k هدفه (چندهدفه) MOIP

روش قیود ارتجاعی را روی مسأله MOIP پیاده‌سازی کرده و سپس روی کارایی‌اش بحث می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{Min } f_j(x) + \sum_{k \neq j} \mu_k s_k \\ \text{s.t. } f_k(x) - s_k \leq \varepsilon_k \quad k \neq j \\ x \in X. \end{aligned} \quad (۶)$$

قضیه زیر یک خصوصیت از حد بالایی روی $f_1(x)$ از تمام راه‌حل‌های مؤثر k هدفه ارائه می‌دهد مشروط به اینکه مقدار $f_1(x)$ بیشتر از s_1 نباشد.

قضیه (۵): یک راه‌حل مؤثر k هدفه که حد بالایی روی هدف $f_1(x)$ فراهم می‌کند، به‌ازای مقدار مشخصی از s_1 ، مؤثر $(k-1)$ هدفه نسبت به $(k-1)$ هدف دیگر است.

اثبات: فرض کنید که $x' \in X$ یک راه حل مؤثر سه هدفه باشد که حد بالایی روی $f_1(x)$ فراهم می‌کند، لذا برای تمام $x \in X$ داریم: $f_1(x) \leq f_1(x')$ از این رو x' در هدف i غیرمسلط نیست.

از تعریف مؤثر بودن چنین برمی‌آید که، یک راه‌حل مؤثر حداقل یک هدف غیرمسلط توسط هر راه‌حل مؤثر دیگری دارد. بنابراین به منظور داشتن حداقل یک هدف غیرمسلط، راه‌حل محدود شده مفروض توسط تمام راه‌حل‌ها در یک هدف، بایستی در $(k-1)$ هدف دیگر، مؤثر $(k-1)$ هدفه باشد. ■

قضیه زیر یک محدوده برای μ_k مشخص می‌کند که یافتن راه‌حل‌های غیرمسلط k هدفه را تضمین کرده و از طرفی این راه‌حل‌ها به‌ازای مقدار مشخصی از s_k حد بالایی روی $f_k(x)$ فراهم می‌کنند.

قضیه (۶): راه‌حل مسأله (۶) با

$$\mu_k = \frac{1}{(f_2^U - f_2^L + n)(f_3^U - f_3^L + n) \dots (f_k^U - f_k^L + n)}$$

به‌ازای

مفروض توسط تمام راه‌حل‌ها در یک هدف، بایستی در دو هدف دیگر، مؤثر دو هدفه باشد. ■

قضیه زیر یک محدوده برای μ_3 مشخص می‌کند که یافتن راه‌حل‌های غیرمسلط سه هدفه را تضمین کرده و از طرفی این راه‌حل‌ها به‌ازای مقدار مشخصی از s_2 حد بالایی روی $f_3(x)$ فراهم می‌کنند.

قضیه (۴): راه‌حل مسأله (۵) با $\mu_2 = \frac{1}{(f_2^U - f_2^L + n)(f_3^U - f_3^L + n)}$ به‌ازای مقدار مشخصی از s_2 و $n \geq 1, n \in \mathbb{Z}$ از تمام راه‌حل‌های مؤثر سه هدفه، حد بالایی روی مقدار $f_3(x)$ فراهم می‌کند.

اثبات: به‌ازای مقدار مشخصی از s_2 ، برای حل مسأله محدود شده زیر استفاده می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } f_1(x) + \frac{1}{f_2^U - f_2^L + n} s_2 + \mu_3 s_3 \\ \text{s.t. } f_2(x) - s_2 \leq \varepsilon_2 \\ f_3(x) - s_3 \leq \varepsilon_3 \\ x \in X \end{aligned}$$

از قضیه (۳) مشخص است که راه‌حل‌های مؤثر سه هدفه با حداکثر مقدار $f_3(x)$ بایستی مؤثر دو هدفه نسبت به f_1 و f_2 باشند، که این امر، مؤثر بودن دو هدفه و مینیمم کردن $f_3(x)$ روی مجموعه دو هدفه غیرمسلط را تضمین می‌کند. به‌جای این فرایند سلسله مراتبی دو مرحله‌ای، برای یافتن راه‌حل‌های غیرمسلط دوهدفه که هم‌چنین غیرمسلط سه‌هدفه هستند، از یک هدف تکی در مسأله بالا استفاده می‌شود.

در مسأله بالا اگر μ_3 چنان تعریف شود که بیشترین کاهش در f_3 به میزان کمترین افزایش در f_1 و f_2 باشد آنگاه یک مجموعه دو هدفه غیرمسلط با حداکثر مقدار f_3 فراهم می‌آید. چون بطور سلسله‌ای f_1 و سپس f_2 را بهینه می‌شود لذا سهم f_2 همواره کمتر از f_1 است، بنابراین می‌توان به‌جای بررسی هر دو هدف فقط سهم f_2 را بررسی کرد. بیشترین کاهش در f_3 از $f_3^U - f_3^L$ بیشتر نیست. کمترین افزایش در f_2 کمتر از $\frac{1}{f_2^U - f_2^L + n}$ نیست. با توجه به اینکه بیشترین کاهش در f_3 از کمترین افزایش در f_2 بیشتر نیست، پس:

$$f_3^U - f_3^L < \frac{1}{f_2^U - f_2^L + n}$$

چون $\mu_2 < 1$ پس

$$\mu_2(f_3^U - f_3^L) < f_3^U - f_3^L$$

در نتیجه

مقدار مشخصی از s_k و $n \geq 1, n \in \mathbb{Z}$ از تمام راه‌حل‌های مؤثر k هدفه، حد بالایی روی مقدار $f_k(x)$ فراهم می‌کند. اثبات: به‌ازای مقدار مشخصی از s_k ، از مسأله محدود شده زیر برای حل استفاده می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } f_1(x) &+ \frac{1}{f_2^U - f_2^L + n} s_2 + \frac{1}{(f_2^U - f_2^L + n)(f_3^U - f_3^L + n)} s_3 + \dots \\ &+ \frac{1}{(f_2^U - f_2^L + n)(f_3^U - f_3^L + n) \dots (f_{k-1}^U - f_{k-1}^L + n)} s_{k-1} + \mu_k s_k \\ \text{s.t. } f_2(x) - s_2 &\leq k_2 \\ f_3(x) - s_3 &\leq k_3 \\ &\dots \\ f_k(x) - s_k &\leq k_k \\ x &\in X. \end{aligned}$$

$$\mu_k (f_k^U - f_k^L) < \frac{1}{(f_2^U - f_2^L + n)(f_3^U - f_3^L + n) \dots (f_{k-1}^U - f_{k-1}^L + n)}$$

بطور معادل:

$$\mu_k < \frac{1}{(f_2^U - f_2^L + n)(f_3^U - f_3^L + n) \dots (f_{k-1}^U - f_{k-1}^L + n)(f_k^U - f_k^L)}$$

از طرفی

$$\frac{1}{(f_2^U - f_2^L + n)(f_3^U - f_3^L + n) \dots (f_k^U - f_k^L + n)} < \frac{1}{(f_2^U - f_2^L + n)(f_3^U - f_3^L + n) \dots (f_k^U - f_k^L)}$$

لذا مسأله بالا به‌ازای مقدار مشخصی از s_k با مقدار $\mu_k = \frac{1}{(f_2^U - f_2^L + n)(f_3^U - f_3^L + n) \dots (f_k^U - f_k^L + n)}$ حد بالایی

روی f_k از راه‌حل‌های مؤثر k هدفه فراهم می‌کند. ■

فرآیند: یافتن تمام راه‌حل‌های غیرمسلط از یک مسأله k هدفه با روش قیود ارتجاعی

(۱) قرار دهید

$$\mu_j = \frac{1}{(f_2^U - f_2^L + n)(f_3^U - f_3^L + n) \dots (f_k^U - f_k^L + n)} \quad j = 2, \dots, k$$

(۲) قرار دهید $s_2 = f_2^U$

(۳) قرار دهید $s_j = f_j^U \quad j = 3, \dots, k$

(۴) مسأله ۶ را با $s_j \quad j = 2, \dots, k$ حل کنید. اگر حل نشدنی بود

به مرحله ۷ بروید، در غیراینصورت به

مرحله ۵ بروید.

(۵) راه‌حل بهینه را x^* قرار دهید.

$$E = E \cup (f_1(x^*), f_2(x^*), \dots, f_k(x^*))$$

با استفاده از قضیه (۵)، راه‌حل‌های مؤثر k هدفه با حداکثر مقدار $f_k(x)$ بایستی مؤثر $(k-1)$ هدفه برای $(k-1)$ هدف دیگر باشند، جهت یافتن حد بالا روی مقادیر $f_k(x)$ از راه‌حل‌های مؤثر k هدفه، می‌توان راه‌حل‌های غیرمسلط $(k-1)$ هدفه نسبت به اهداف $f_1, f_2, \dots, f_{k-1}$ پیدا کرد، که این امر، مؤثر بودن $(k-1)$ هدفه و مینیمم کردن $f_k(x)$ روی مجموعه $(k-1)$ هدفه غیرمسلط را تضمین می‌کند. به‌جای این فرآیند سلسله مراتبی دو مرحله‌ای، برای یافتن راه‌حل‌های غیرمسلط $(k-1)$ هدفه که هم‌چنین غیرمسلط k هدفه هستند، از یک هدف تکی در مسأله بالا استفاده می‌شود.

در مسأله بالا اگر μ_k چنان تعریف شود که بیشترین کاهش در f_k به میزان کمترین افزایش در هر یک از اهداف $f_1, f_2, \dots, f_{k-1}$ باشد آنگاه یک مجموعه $(k-1)$ هدفه غیرمسلط با حداکثر مقدار f_k فراهم می‌آید.

چون بطور مرتب $f_1, f_2, \dots, f_{k-1}$ بهینه می‌شوند لذا سهم f_{k-1} همواره کمتر از $f_1, f_2, \dots, f_{k-2}$ است، بنابراین می‌توان فقط سهم f_{k-1} را بررسی کرد. بیشترین کاهش در f_k از $f_k^U - f_k^L$ بیشتر نیست. کمترین افزایش در f_{k-1} کمتر از $\frac{1}{(f_2^U - f_2^L + n)(f_3^U - f_3^L + n) \dots (f_{k-1}^U - f_{k-1}^L + n)}$ نیست. با توجه به اینکه بیشترین کاهش در f_k از کمترین افزایش در f_{k-1} بیشتر نیست، پس:

$$f_k^U - f_k^L < \frac{1}{(f_2^U - f_2^L + n)(f_3^U - f_3^L + n) \dots (f_{k-1}^U - f_{k-1}^L + n)}$$

$$\mu_k (f_k^U - f_k^L) < f_k^U - f_k^L \quad \text{چون } \mu_k < 1 \text{ پس:}$$

در نتیجه

(۶) به مرحله ۳ بروید. $s_k := s_k - 1$ در ازای $j = (k-1), \dots, 3, 2$ اگر $s_j \geq f_j^L$ آنگاه $s_{j+1} = f_{j+1}^U$ و $s_j = s_j - 1$ در غیر این صورت توقف کنید.

جدول ۱. حدود بالایی و پائینی توابع هدف به همراه جایگشت هر یک

$F_1^U = 338$	۱	۵	۳	۴	۲
$F_1^L = 127$	۲	۴	۱	۵	۳
$F_2^U = 395$	۲	۱	۴	۳	۵
$F_2^L = 137$	۵	۴	۱	۲	۳
$F_3^U = 421$	۴	۲	۱	۳	۵
$F_3^L = 116$	۱	۳	۴	۵	۲

۴. مثال عددی

به منظور ارزیابی عملکرد فرآیند حل روش قیود ارتجاعی، مسئله تخصیص سه‌هدفه در نظر گرفته می‌شود. این مسئله در فرآیند مذکور حل شده و مسئله تحلیل می‌گردد، سپس دو روش جمع وزنی و ϵ -محدودیت در حل مسئله به همراه تحلیل عملکرد هر روش ارائه می‌شود و مشکلات اصلی پیش‌رو هر روش در مسئله تخصیص سه‌هدفه مطرح می‌گردد. مسئله تخصیص با p هدف (pAP) بررسی می‌شود:

$$\min (Z_1(X), \dots, Z_p(X)) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij}^k x_{ij} \quad k = 1, \dots, p$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad i, j = 1, \dots, n$$

بطوریکه تمام ضرایب تابع هدف c_{ij}^k عدد صحیح غیر منفی هستند و $X = (X_{11}, \dots, X_{nn})$ ماتریس متغیرهای تصمیم می‌باشد. مسئله تخصیص سه‌هدفه در نظر گرفته می‌شود. ضرایب تابع هدف به صورت رندوم از توزیع یکنواخت گسسته بین ۱ تا ۱۰۰ تولید می‌شوند. در جدول (۲) شامل ضرایب سه تابع هدف برای تخصیص هر سطر به هر ستون است. هر راه‌حل توسط یک جایگشت از مقادیر شاخص ستون، تخصیص یافته به سطرها ۱ تا ۵، ارائه می‌شود. برای شناسایی حدود بالایی و پائینی کلی، بایستی مسائل تخصیص تک هدفه بطور انفرادی حل شوند. لذا با راه‌حل‌های تخصیص تک‌هدفه، می‌توان حدود بالایی و پائینی کلی را روی تک تک اهداف شناسایی کرد.

جدول ۲. ضرایب تابع هدف برای مثال مسئله تخصیص سه‌هدفه

سه‌هدفه	۱	۲	۳	۴	۵
c^1	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۳۵	۳۶	۲۹	۸	۱۳
۲	۲۰	۸۴	۷۶	۶	۵۷
۳	۲۶	۵۹	۷۶	۵۴	۴۷
۴	۶۲	۵۵	۳۹	۷۸	۲
۵	۴۸	۹۲	۵۷	۹۴	۳۴
c^2	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۷۶	۷۱	۸۳	۴۴	۴۹
۲	۷۵	۴	۷۰	۳۹	۴۵
۳	۴۰	۲۸	۳۲	۷۷	۶۵
۴	۶۶	۵	۹۶	۸۰	۷۱
۵	۱۸	۱۰	۴	۱۹	۷۶
c^3	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۲۸	۵۰	۷۶	۹۶	۸۵
۲	۶۸	۹۶	۲۶	۵۵	۲۶
۳	۶۶	۳۵	۵۱	۱۴	۸۲
۴	۱۷	۵۹	۷۰	۱۵	۲۵
۵	۱۲	۲۳	۹۰	۲۶	۹۳

در مجموع، ۱۲۸ مسئله برای شناسایی ۳۱ راه‌حل مؤثر از مسئله تخصیص سه‌هدفه، حل شده‌است. توجه شود که در این مثال در تعیین n مسئله عددی سازی مربوطه فرض شده که $n = 1$ راه حل‌های مؤثر به دست آمده از این مسئله به صورت جدول (۳) می‌باشد. در ادامه به تحلیل مسئله تخصیص سه‌هدفه با روش قیود ارتجاعی و مقایسه آن با عملکردهای روش‌های جمع وزنی و ϵ -محدودیت در تخصیص سه‌هدفه پرداخته می‌شود.

¹ p- objective Assignment Problem

جدول ۳. راه‌حل‌های مؤثر مساله

F ^۱	F ^۲	F ^۳		R ^۱	R ^۲	R ^۳	R ^۴	R ^۵
۱۲۷	۲۲۵	۲۸۶		۲	۴	۱	۵	۳
۱۴۴	۲۳۹	۲۰۳		۳	۴	۲	۵	۱
۱۴۶	۲۲۲	۳۱۴		۴	۱	۲	۵	۳
۱۵۵	۲۴۳	۲۴۵		۳	۴	۱	۵	۲
۱۵۷	۱۳۷	۳۵۵		۵	۴	۱	۲	۳
۱۵۹	۲۱۸	۲۳۳		۱	۴	۲	۵	۳
۱۶۸	۲۳۱	۱۹۳		۲	۴	۳	۵	۱
۱۷۷	۱۶۳	۳۷۳		۴	۲	۱	۵	۳
۱۸۵	۲۱۰	۲۸۴		۳	۴	۵	۲	۱
۱۸۷	۱۹۳	۳۹۵		۴	۱	۵	۲	۳
۱۹۰	۲۹۲	۲۷۶		۳	۴	۲	۱	۵
۱۹۳	۲۳۱	۱۹۴		۴	۳	۲	۵	۱
۱۹۷	۱۸۶	۲۸۲		۵	۴	۲	۱	۳
۱۹۸	۱۴۳	۲۶۲		۵	۴	۳	۲	۱
۲۰۳	۱۳۸	۳۳۷		۴	۵	۱	۲	۳
۲۰۴	۲۳۵	۲۳۶		۴	۳	۱	۵	۲
۲۰۶	۲۲۸	۲۸۶		۱	۴	۳	۲	۵
۲۱۱	۲۲۸	۱۸۲		۱	۴	۳	۵	۲
۲۱۸	۱۶۸	۲۸۰		۴	۲	۳	۵	۱
۲۱۹	۲۸۶	۲۵۸		۱	۴	۵	۳	۲

F ^۱	F ^۲	F ^۳		R ^۱	R ^۲	R ^۳	R ^۴	R ^۵
۲۲۸	۲۶۸	۲۲۰		۲	۱	۳	۵	۴
۲۳۲	۲۳۲	۲۵۳		۱	۲	۴	۵	۳
۲۳۴	۲۷۱	۱۹۳		۲	۳	۱	۵	۴
۲۳۵	۲۱۷	۲۸۶		۳	۲	۱	۵	۴
۲۳۶	۲۶۳	۲۵۳		۳	۴	۵	۱	۲
۲۴۳	۲۲۸	۱۸۷		۳	۵	۴	۲	۱
۲۴۶	۲۱۹	۱۹۶		۵	۳	۴	۲	۱
۲۴۹	۱۹۶	۲۳۱		۵	۴	۳	۱	۲
۲۵۸	۱۸۰	۲۸۹		۵	۱	۳	۲	۴
۲۵۹	۳۰۴	۱۱۶		۱	۳	۴	۵	۲

شود که با انتخاب مقادیر بزرگتر از μ ، مشکلات محاسباتی روش ϵ - محدودیت حاصل می‌شود. مقدار μ ، نقض محدودیت را کنترل می‌کند و در حکم جریمه نقض می‌باشد. مقدار جریمه کمتر، اجازه می‌دهد نقض‌ها بزرگتر شوند، در حالی که مقدار جریمه بیشتر، نقض‌های کوچکتری را سبب می‌شود. بنابراین مقدار خیلی بزرگ از μ ، اثر یکسانی تحت محدودیت سخت خواهد داشت، در حالی که مقادیر خیلی کوچک μ ، محدودیت را نادید خواهد گرفت و اجازه می‌دهد تا مسأله سریعاً حل شود.

مسأله تخصیص سه‌هدفه با روش قیود ارتجاعی به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & Z_1(X) + \mu_2 s_2 + \mu_3 s_3 \\
 & Z_2(X) - s_2 \leq \varepsilon_2 \\
 & Z_3(X) - s_3 \leq \varepsilon_3 \\
 & s_k \geq 0 \quad k = 2, 3 \\
 & x \in X
 \end{aligned}$$

در روش قیود ارتجاعی، زمان‌های محاسباتی شدیداً بستگی به مقدار μ دارند: با μ کوچکتر، مسأله سریعتر حل می‌شود. توجه

راه‌حل‌های بهینه از مسائل E- محدودیت با انتخاب مناسب از E هستند. اما از طرفی به دلیل تغییر تطبیقی از E با سه‌هدف، زمان برای پیدا کردن تمام نقاط مؤثر، پیش‌رونده مستقیم است. لازم است که به این نکته هم توجه شود که روش قیود ارتجاعی در رابطه با مسئله پیچیده وابسته به روش‌های حل نوع تک‌هدفه MOIP، دارای قدرت اعمال بهتری است. در زمان حل مسئله برنامه‌ریزی عددصحیح چندهدفه کلی، محدودیت‌های روی اهداف، فقط مجموعه دیگری از محدودیت‌ها هستند و سود اندکی در استفاده قیود ارتجاعی نسبت به قیود سخت وجود دارد. حقیقتاً، نکته اینجا است که روش قیود ارتجاعی در حد امکان، باعث سودمندی ساختار مسئله تک‌هدفه می‌شود، در حالیکه روش E- محدودیت آن را تخریب می‌کند.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، نشان داده شد که روش‌های عددی‌سازی رایج برای حل مسائل برنامه‌ریزی عدد صحیح چندهدفه قادر به پیدا کردن تمام راه‌حل‌های مؤثر نیستند و همچنین به‌کارگیری آنها در حل کاربردهای جهان واقعی، به‌شدت مشکل است. از جمله روش‌های عددی‌سازی رایج، روش جمع وزنی و روش E- محدودیت می‌باشد، که هرکدام دارای مزایا و معایبی بودند که استفاده از هر یک به‌تنهایی، ما را به هدف غایی خود که همانا پیدا کردن تمام راه‌حل‌های مؤثر و حتی‌الامکان به روش ساده، نمی‌رساند. سپس تکنیک جدید عددی‌سازی، روش قیود ارتجاعی را معرفی شد که این روش ویژگی‌های مفید روش‌های E- محدودیت و جمع وزنی را ترکیب کرده و از برخی مشکلات آنها اجتناب می‌ورزد. بعد از آن فرآیندی را روی روش قیود ارتجاعی پیاده‌سازی گردید تا عملاً یافتن راه‌حل‌های مؤثر، محسوس‌تر شوند. روش قیود ارتجاعی از طریق این فرآیند، روی مسائل برنامه‌ریزی عددصحیح دوهدفه، سه‌هدفه و چندهدفه پیاده‌سازی شده‌است. با حل مسئله تخصیص سه‌هدفه از طریق فرآیند مذکور، نشان داده شد که روش قیود ارتجاعی دارای توانایی بالقوه‌ای در پیدا کردن راه‌حل‌های مؤثر نسبت به دیگر روش‌های رایج عددی‌سازی می‌باشد. در روش قیود ارتجاعی تمام راه‌حل‌های مؤثر مسئله برنامه‌ریزی عددصحیح چندهدفه پیدا می‌شود و اگر به‌طور مناسبی بکار رود باعث کاهش تلاش محاسباتی مورد نیاز برای حل مسئله عددی‌سازی شده می‌گردد.

در زیر تحلیل‌های زمانی روی دو روش قیود ارتجاعی و E- محدودیت بررسی می‌شوند. برای این تحلیل‌ها، از حل مساله تخصیص چندهدفه با استفاده از نرم افزار مطلب کمک گرفته شده‌است. همانطور که قبلاً هم اشاره شد، روش قیود ارتجاعی

لذا با توجه به مقدار پیشنهاد شده برای μ در فرآیند حل قیود ارتجاعی، یعنی مقدار زیر:

$$\mu_k = \frac{1}{(f_2^U - f_2^L + n)(f_3^U - f_3^L + n) \dots (f_k^U - f_k^L + n)}$$

با افزایش n ، $n \in \mathbb{Z}$ و $n \geq 1$ مقدار μ کاهش یافته و باعث تسریع در حل مسئله می‌شود. مسئله تخصیص سه‌هدفه با روش جمع وزنی به صورت زیر فرموله می‌شود:

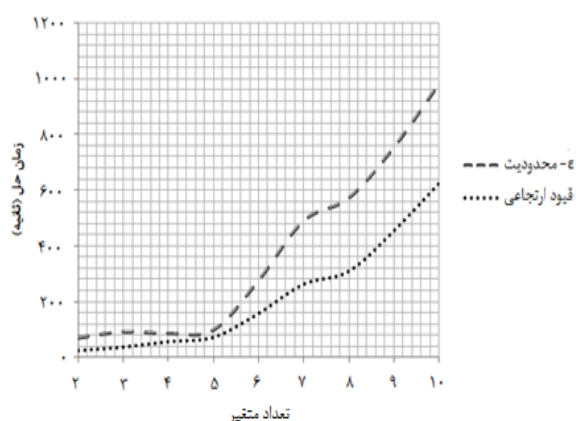
$$\min \lambda_1 Z_1(x) + \lambda_2 Z_2(x) + \lambda_3 Z_3(x) \\ x \in X.$$

با حل مسئله تخصیص سه‌هدفه با روش جمع وزنی با تعداد زیادی از راه‌حل‌ها مواجه می‌شویم، هم‌چنین در برخی راه‌حل‌ها، فواصل پارامتر λ خیلی کوچک‌اند. این نشان می‌دهد، راه‌حل‌ها خیلی حساس به تغییرات کوچک λ هستند، که این عملاً مناسب نیست. توجه شود که در روش جمع وزنی هیچ شرط کافی برای وجود راه‌حل‌های مؤثر ارائه نشده‌است. اگرچه وزن‌های مثبت همواره راه‌حل‌های بطورمناسب مؤثر را نتیجه می‌دهند، برخی وزن‌های صفر منجر به کسب راه‌حل‌های مؤثر با معاوضات بیکران می‌شوند. اگرچه بردارهای وزن $\lambda \geq 0$ ممکن است نقاط بطور ضعیف مؤثر را موجب شود، از طرفی امکان ارائه توصیفی از راه‌حل‌های مؤثر وجود ندارد. لذا روش جمع وزنی تمام راه‌حل‌های مؤثر مسئله را پیدا نمی‌کند. مسئله تخصیص سه‌هدفه با روش E- محدودیت به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\min Z_1(X) \\ \text{s. t: } Z_2(X) \leq \varepsilon_2 \\ Z_3(X) \leq \varepsilon_3 \\ x \in X.$$

روش E- محدودیت نیازمند زمان‌های محاسباتی غیرمعقول می‌باشد. برای راه‌حل مؤثر x^* در روش E- محدودیت، در اثبات اینکه وجود دراد برخی E ها بطوریکه x^* بهینه است، بایستی فقط $\varepsilon_k = f_k(x^*)$ انتخاب شود. اما در عمل، این مقدار ناشناخته است چرا که هنوز x^* مجهول است. بنابراین روش E- محدودیت برای بررسی اینکه آیا x^* مؤثر است یا نه، مناسب است.

برای یک E مفروض، اگر مسئله E- محدودیت شدنی باشد، آنگاه راه‌حل بهینه بطور ضعیف مؤثر است. تمام راه‌حل‌های مؤثر،



شکل ۲. مقایسه دو روش E- محدودیت و قیود ارتجاعی با افزایش تعداد متغیرها

روش قیود ارتجاعی به استفاده از شکلهای فوق با روش E- محدودیت کفایه گردید. در این قسمت می‌خواهیم این روش را با معیار دیگری به نام روش ۲ فازی مقایسه نماییم. جهت مقایسه روش پیشنهادی با روش دو فازی، مسأله دیگری با سه تابع هدف به صورت زیر در نظر بگیرید.

جدول ۴. ضرایب تابع هدف برای مسأله تخصیص سه‌هدفه

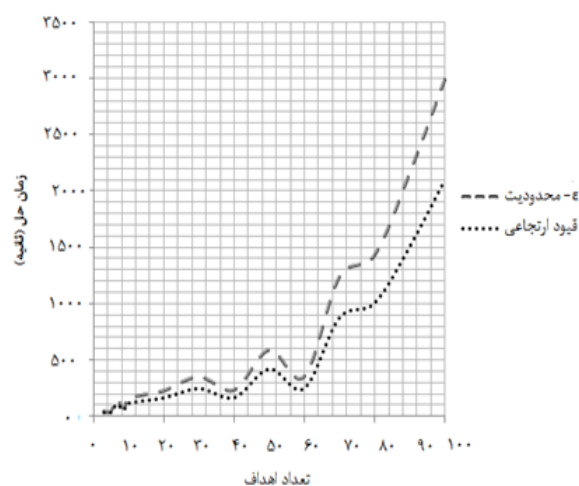
c^1	۲	۳	۴
۱	5	4	7
۲	3	5	7
۳	8	4	2
۴	5	2	5

c^2	۲	۳	۴
۱	3	6	2
۲	3	7	3
۳	2	7	4
۴	6	3	5

c^3	۲	۳	۴
۱	2	5	3
۲	3	4	3
۳	3	5	2
۴	4	7	3

حاصل اشتراک دو روش E- محدودیت و جمع وزنی می‌باشد، اما این روش، شباهت بیشتری به روش E- محدودیت و بالطبع تفاوت بیشتری با روش جمع وزنی دارد، زیرا در هر دو روش عددی سازی، قیود ارتجاعی و E- محدودیت، یکی از اهداف تابع هدف قرار گرفته و بقیه اهداف به محدودیت‌ها منتقل می‌شوند. ولی در روش جمع وزنی، تمامی اهداف به صورت جمع وزنی در تابع هدف قرار می‌گیرند، بدون اینکه محدودیتی به فضای شدنی اضافه شود. با اندکی تامل، پیچیدگی حل روش جمع وزنی، کاملاً محرز است.

زیرا از طرفی، وزن‌دهی مناسب هر هدف بایستی توسط تصمیم‌گیرنده صورت گیرد و از طرف دیگر، راه‌حل‌ها بسیار به تغییرات وزن‌ها، حساس هستند. از این‌رو، افزایش تعداد اهداف، باعث افزایش مهار نشدنی زمان حل مسأله می‌گردد. در شکل (۱)، دو روش قیود ارتجاعی و E- محدودیت از نظر زمان اجرا (حل) با افزایش تعداد اهداف، مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، با افزایش تعداد اهداف، زمان حل هر دو روش نیز افزایش می‌یابد. میزان اختلاف زمانی دو روش مقایسه، تا حدود ۶۰ هدف کم و قابل مهار می‌باشد، اما از آن به بعد، اختلاف زمانی دو روش، افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. در شکل (۲)، تحلیل زمانی دو روش مذکور، با افزایش تعداد متغیرها بررسی شده‌اند. در اینجا نیز با افزایش تعداد متغیرها، زمان حل هر دو روش افزایش می‌یابد. میزان اختلاف زمانی دو روش مقایسه، تا حدود ۶ متغیر جزیی است، اما از آن به بعد، اختلاف زمانی دو روش افزایش می‌یابد. برتری روش قیود ارتجاعی در این مقایسات کاملاً محسوس است.



شکل ۱. مقایسه دو روش E- محدودیت و قیود ارتجاعی با افزایش تعداد اهداف

جدول ۵. حدود بالایی و پائینی توابع هدف

$f_1^U = 26$	$f_2^U = 21$	$f_3^U = 18$
$f_1^L = 9$	$f_2^L = 11$	$f_3^L = 13$

جزئیات تکرار فرایند پیشنهادی در جدول (۶) ارائه شده است که شامل تعداد مسائل حل شده و مقادیر b_2 و b_3 می‌باشد و جدول (۷) راه‌حل‌های مؤثر را لیست می‌کند.

باید توجه داشت بیشتر روش‌های دقیق منتشر شده برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی چندهدفه بطور ضمنی از نوع دوهدفه استفاده می‌کنند و نمی‌توانند به‌سادگی برای بیشتر از دوهدف سازمان‌دهی شوند. مقالاتی که بطور صریح در ارتباط با سه (یا بیشتر) هدف باشند نسبتاً نادر هستند. هر راه‌حل توسط یک جایگشت از مقادیر شاخص ستون، تخصیص یافته به سطرها ۱ تا ۴، ارائه می‌شود. جدول زیر شامل حدود بالایی و پائینی کلی هر سه هدف می‌باشد.

جدول ۶. مراحل اجرای فرایند حل مثال تخصیص سه هدفه

$b_3 \leq 18$	f_1	f_2	f_3	$b_2 \leq$	$b_3 \leq 16$	f_1	f_2	f_3	$b_2 \leq$
<u>1</u>	9	13	16	21	<u>4</u>	9	13	16	21
<u>2</u>	19	11	17	12	<u>5</u>	infeasible			12
<u>3</u>	infeasible			10					

$$\max(f_3) = 17$$

$$\max(f_3) = 16$$

$b_3 \leq 15$	f_1	f_2	f_3	$b_2 \leq$
<u>6</u>	14	20	14	21
<u>7</u>	14	18	15	19
<u>8</u>	20	17	14	17
<u>9</u>	infeasible			16

$b_3 \leq 14$	f_1	f_2	f_3	$b_2 \leq$
<u>10</u>	14	20	14	21
<u>11</u>	18	18	14	19
<u>12</u>	20	17	14	17
<u>13</u>	infeasible			16

$$\max(f_3) = 15$$

$$\max(f_3) = 14$$

$b_3 \leq 13$	f_1	f_2	f_3	$b_2 \leq$
<u>14</u>	18	20	13	21
<u>15</u>	infeasible			19

$b_3 \leq 12$	f_1	f_2	f_3	$b_2 \leq$
<u>16</u>	infeasible			21

$$\max(f_3) = 13$$

توجه شود که در این مثال در تعیین n مسأله عددی سازی مربوطه فرض شده که $n = 1$.

در مجموع، ۱۶ مسأله برای شناسایی ۷ راه‌حل مؤثر از مسأله تخصیص سه‌هدفه، حل شده‌است.

- [2] Przybylski, A., Gandibleux, X., Ehrgott, M., *The Biobjective Integer Minimum Cost Flow Problem—Incorrectness of Sedeño-Noda and González-Martin's Algorithm*, Computers & Operations Research, May 2006, Vol. 33, Issue 5, pp. 1459-1463.
- [3] Klein, D., Hannan, E., *An Algorithm for the Multiple Objective Integer Linear Programming Problem*, European Journal of Operational Research, 1982, 9, 378-385.
- [4] Sylva, J., Crema, A., *A Method for Finding the Set of Non-Dominated Vectors for Multiple Objective Integer Linear Programs*, European Journal of Operational Research, 2004, 158, pp. 46-55.
- [5] Laumanns, M., Thiele, L., Zitzler, E., *An Efficient Adaptive Parameter Variation Scheme for Metaheuristics Based on the Epsilon-Constraint Method*, European Journal of Operational Research, 2006, 169, pp. 932-942.
- [6] Guu, S.M., Huang, N.J., *Scalarization Approaches for Set-Valued Vector Optimization Problems and Vector Variational Inequalities*, Journal of Mathematical Analysis and Applications, 15 August 2009, Volume 356, Issue 2, pp. 564-576.
- [7] Ehrgott, M., *A Discussion of Scalarization Techniques for Multiple Objective Integer Programming*, Ann Oper Res, 2006, 147:343-360.
- [8] Jiménez, B., Novo, V., Sama, M., *Scalarization and Optimality Conditions for Strict Minimizers in Multi Objective Optimization Via Contingent Epiderivatives*, Journal of Mathematical Analysis and Applications, 15 April 2009, Volume 352, Issue 2, Pages 788-798.
- [9] Hernández, E., Rodríguez-Marín, L., *Nonconvex Scalarization in Set Optimization with Set-Valued Maps* Journal of Mathematical Analysis and Applications, 1 January 2007, Volume 325, Issue 1, Pages 1-18.
- [10] Gutiérrez, C., Jiménez, B., Novo, V., *Optimality Conditions Via Scalarization for a New ε -Efficiency Concept in Vector Optimization Problems*, European Journal of Operational Research, 16 February 2010, Volume 201, Issue 1, Pages 11-22.
- [11] Geoffrion, A.M., *Proper Efficiency and the Theory of Vector Maximization*, Journal of Mathematical Analysis and Applications, 1968, 22:618-630.

جدول ۷. راه‌حل‌های مؤثر مساله تخصیص سه هدفه

F ^۱	F ^۲	F ^۳
۱۹	۱۱	۱۷
۹	۱۳	۱۶
۱۴	۱۸	۱۵
۱۴	۲۰	۱۴
۲۰	۱۷	۱۴
۱۸	۲۰	۱۳
۱۸	۱۸	۱۴

روش ۲- فازی یکی از روش‌های دقیق حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی چندهدفه، می‌باشد [۱۵]. الگوریتم حل این روش با پیدا کردن تمام راه‌حل‌های مؤثر برای مسأله با K-1 هدف به منظور محاسبه نقطه سمت‌القدم از مسأله با K هدف شروع می‌شود. سپس زیرفضاها توسط این راه‌حل‌ها مشخص می‌شوند. برای هر زیرفضا محوری از تحقیق محاسبه‌شده و یک مسأله تک‌هدفه حل می‌شود. بعد از آن راه‌حل جدیدی پیدا شده، فضای جستجو تقسیم می‌شود و برخی جستجوهای جدید شروع می‌شوند. این روش زمانی متوقف می‌شود که تمام فضای جستجو امتحان شود و هیچ راه‌حل جدیدی یافت نشود. با این روش، فضای جستجو به منظور رسیدن به زیرفضای مناسب تقسیم می‌شود و جستجوی تک‌هدفه برای هر راه‌حل مؤثر مورد نیاز است. بنابراین با توجه به اینکه برای یک مسأله مفروض، جستجوهای تک‌هدفه زمان‌بر هستند، زمان زیادی برای حل نمونه‌هایی از این مسأله مورد نیاز است.

با حل مسأله ۲ فازی و با توجه به توضیحات فوق با توجه به اینکه برای مسأله تک تک زیرفضاهای مسأله تک هدفه را پیدا کرده و راه حل مؤثر را می‌یابد، زمان حل و یافتن راه حل‌های مؤثر در این روش در مقایسه با روش قیود ارتجاعی که برای یافتن راه حل‌های مؤثر فقط ۱۶ مسأله را حل نمود، تقریباً $\binom{2}{1}$ یعنی در این مثال حدود ۶ برابر است. البته از مزایای روش ۲ فازی اینست که پس از حل کامل مدل راه حل‌های مؤثر شناسایی شده را تماماً بازیابی می‌کند در حالیکه روش قیود ارتجاعی ممکن است هنوز دارای راه حل‌های مؤثری باشد که تاکنون شناسایی نشده است.

مراجع

- [1] Ehrgott, M., Gandibleux, X., *Bound Sets for Biobjective Combinatorial Optimization Problems*, Computers & Operations Research, September 2007, Vol. 34, Issue 9, pp. 2674-2694.

- [12] Chankong, Haimes, Y.Y., *Multi objective Decision Making Theory and Methodology*, Elsevier Science, New York, 1983.
- [13] Ehrgott, M., Ryan, D.M., *Constructing Robust Crew Schedules with Bi Criteria Optimization*, Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 2002, 11(3): 139–150.
- [14] Ehrgott, M., Gandibleux, X., *A Survey and Annotated Bibliography of Multi Objective Combinatorial Optimization*, OR Spektrum, 2000, 22: 425–460.
- [15] Przybylski, A., Gandibleux, X., Ehrgott, M., *A Two Phase Method for Multi-Objective Integer Programming and its Application to the Assignment Problem with Three Objectives*, Discrete Optimization, 2010, Vol. 7, pp. 149_165.

