

ارایه رویکردهای جدید در بهبود تعیین جواب‌های شدنی مدل برنامه‌ریزی کسری خطی بازه‌ای

فاطمه سالاری پور شریف آباد^۱، مهدی الله دادی^{۲*}، حسن میش مست نهی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه سیستان و بلوچستان، گروه ریاضی کاربردی، زاهدان، ایران

۲- دانشیار، دانشگاه سیستان و بلوچستان، گروه ریاضی کاربردی، زاهدان، ایران

۳- استاد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، گروه ریاضی کاربردی، زاهدان، ایران

رسید مقاله: ۱۰ اسفند ۱۳۹۸

پذیرش مقاله: ۴ اسفند ۱۳۹۹

چکیده

در این تحقیق، مدل برنامه‌ریزی کسری خطی بازه‌ای در نظر گرفته شده است و از آن جایی که این مدل یک مدل بازه‌ای است لذا به دنبال روش‌هایی هستیم که یک مجموعه جواب بهینه به دست آوریم. در این مقاله دو روش برای تعیین مجموعه جواب بهینه مدل برنامه‌ریزی کسری خطی بازه‌ای پیشنهاد می‌شود به طوری که این روش‌ها از دو زیر مدل تشکیل شده‌اند. جواب‌های به دست آمده از حل این دو زیر مدل یک ناحیه تشکیل می‌دهند که آن را به عنوان مجموعه جواب بهینه مدل برنامه‌ریزی کسری خطی بازه‌ای در نظر می‌گیریم. اگر جواب حاصل در بزرگ‌ترین ناحیه‌ی قیود بازه‌ای مدل برنامه‌ریزی کسری خطی بازه‌ای صدق کند، جواب را شدنی گویند. در روش اول، ممکن است مجموعه جواب بهینه به گونه‌ای باشد که بعضی از نقاط آن در بعضی از محدودیت‌های بزرگ‌ترین ناحیه صدق نکنند در این صورت از یک روش جایگزین برای بهبود مجموعه جواب بهینه استفاده می‌کنیم به طوری که با استفاده از روش جایگزین بتوان بخش نشدنی مجموعه جواب بهینه روش اول را حذف کرد و مجموعه جواب بهینه‌ای شدنی را به دست آورد. در روش دوم، برای تضمین این که مجموعه جواب بهینه، شدنی باشد یک محدودیت اضافی به زیر مدل دوم اضافه می‌شود و مجموعه جواب بهینه‌ای شدنی را به دست می‌آوریم.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی کسری خطی بازه‌ای، شدنی بودن، عدم قطعیت، مجموعه جواب بهینه.

۱ مقدمه

از دیرباز مسایل برنامه‌ریزی خطی در زمینه‌های مختلف فعالیت‌های انسانی به‌ویژه مدیریت و اقتصاد کاربردهای فراوانی داشته است و روش‌های متنوع و کارآمدی برای حل آنها معرفی شده است [۱،۲] در حالی که در دهه‌های گذشته، کاربردهای برنامه‌ریزی کسری چندان شناخته شده نبود. در واقع آسان‌تر بودن تحلیل و حل برنامه‌ریزی

* عهده‌دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: m_allahdadi@math.usb.ac.ir

خطی منجر به مهجور ماندن برنامه‌ریزی کسری و نادیده گرفتن کارهای اندک صورت گرفته در این زمینه گردید. از آنجایی که نمی‌توان تمام مسایل جهان حقیقی را در قالب‌های خطی گنجانند از این‌رو مساله برنامه‌ریزی کسری خطی در دهه ۶۰ و ۷۰ میلادی به شدت مورد توجه محققان واقع گردید و مطالعات آکادمیک برنامه‌ریزی کسری با توجه به نیاز به ایجاد مدل‌های کارآمدتر برای حل مسایل جهان حقیقی شروع شدند و کاربردها و روش‌های متنوعی برای حل آنها ارایه گردیده است [۱۰-۳].

در شاخه‌های جدید بهینه‌سازی و تحقیق در عملیات، بررسی و حل دسته‌های گوناگون برنامه‌ریزی کسری اهمیت به‌سزایی پیدا کرده است. از طرفی بالا بردن سوددهی یکی از دغدغه‌های مهم فعالیت‌های انسانی اعم از علوم انسانی، اقتصاد، ... بوده است. در بیشتر مواقع به محض اینکه مدل ریاضی سوددهی مورد توجه قرار می‌گیرد نتیجه حاصل، بهینه کردن یک کسر می‌باشد که نسبت خروجی فعالیت به ورودی آن است به‌عنوان نمونه در بسیاری از فعالیت‌ها، بهینه نمودن نسبت‌های موجودی/سرمایه، سرمایه واقعی/سرمایه لازم، وام‌های خارجی/کل وام‌ها و ... از اهداف مهم به‌شمار می‌آیند.

انسان روزانه با مسایلی برخورد می‌کند که در آنها بهینه‌سازی یک هدف نسبت به قیود مختلف مورد نیاز می‌باشد. لذا برای رسیدن به این منظور، الگوریتم‌های مختلف و روش‌های بسیار کارایی ابداع شده است. به‌طور مختصر می‌توان به مهم‌ترین روش‌ها برای حل این‌گونه مسایل اشاره کرد از جمله در سال ۱۹۶۲، چارنز و کوپر [۱۱] نشان دادند که با یک تغییر و متغیر غیرخطی و اضافه کردن یک محدودیت جدید می‌توان یک مساله برنامه‌ریزی کسری خطی را به مدل خطی تقلیل داد در حالی که در سال ۱۹۶۷، دینکلباخ [۱۲] با استفاده از روش پارامتری، مساله برنامه‌ریزی کسری خطی را به مساله برنامه‌ریزی خطی تبدیل کرد بدون این‌که ناحیه شدنی تغییر کند.

نظریه سیستم‌های خاکستری یکی از روش‌های توسعه‌یافته برای مطالعه عدم قطعیت است و هم‌چنین یکی از روش‌های برتر در تجزیه و تحلیل دقیق سیستم‌ها با عدم قطعیت اطلاعات است. یک سیستم خاکستری به‌عنوان یک سیستمی تعریف می‌شود که شامل اطلاعات غیرقطعی باشد. اگر اطلاعات واضح مربوط به یک سیستم را با رنگ سفید و اطلاعات ناشناخته با رنگ سیاه نشان داده شوند اطلاعات مربوط به اکثر سیستم‌های طبیعی، سفید یا سیاه نیستند بلکه ترکیبی از هر دو هستند و این به معنی خاکستری است. چندین نوع اعداد خاکستری وجود دارد به‌طوری که در میان آنها می‌توان به اعداد خاکستری بازه‌ای و یا اعداد خاکستری فازی اشاره کرد [۱۳].

نظر به اهمیت مسایل برنامه‌ریزی کسری خطی با عدم قطعیت داده‌ها، بسیاری از پژوهشگران توجه خود را به بررسی و حل این دسته از مسایل معطوف کرده‌اند. بر پایه دیدگاه فازی، ورومانی و سوماتی [۱۴] با استفاده از α -برش برای پارامترهای فازی تابع هدف و I -برش برای پارامترهای فازی محدودیت‌ها، مساله برنامه‌ریزی کسری خطی فازی (با اعداد فازی مثلثی) را به دو زیر مدل تبدیل کردند و با استفاده از حدود به‌دست آمده برای مقدار بهینه تابع هدف، تابع عضویت مقدار بهینه را ساختند. اما ابراهیم نژاد و همکارانش [۱۵] نشان دادند که این روش نیز دارای نواقصی است و همواره منجر به جواب‌های بهینه فازی نامنفی نمی‌شود. لذا روش آنها را اصلاح نمودند به‌طوری که جواب‌های بهینه فازی نامنفی را تولید می‌نماید و این روش را برای اعداد فازی ذوزنقه‌ای تعمیم دادند.

در روش مستقل دیگری نایاک و اوگا [۱۶] مجدداً از α -برش برای پارامترهای فازی توابع هدف و β -برش برای پارامترهای فازی محدودیت‌ها، برای مساله برنامه‌ریزی چند هدفه کسری خطی فازی (با اعداد فازی مثلثی) استفاده کردند و هر هدف مساله برنامه‌ریزی کسری خطی فازی را به دو زیر مدل تبدیل کردند و از روش چارنز و کوپر برای خطی‌سازی زیر مدل‌ها استفاده کردند و براساس بسط تیلور حول جواب‌های به‌دست آمده از روش چارنز و کوپر و استفاده از روش مجموع وزن‌دار توانستند مساله برنامه‌ریزی چند هدفه کسری خطی فازی را به دو زیر مدل خطی با داده‌های حقیقی تبدیل کنند و حدود مقدار بهینه تابع هدف را به‌دست آورند.

برنامه‌ریزی درجه دوم با داده‌های فازی یکی از موضوعات مورد توجه محققین در حوزه تحقیق در عملیات است. ناصری و همکارانش [۱۷] روشی برای حل مسایل برنامه‌ریزی درجه دوم فازی پیشنهاد کردند به طوری که برای بهینه‌سازی تابع هدف با به کارگیری مفاهیم فازی، مساله برنامه‌ریزی درجه دوم فازی را به مسایل درجه دوم متداولی تبدیل نمودند که با استفاده الگوریتم متداول قابل حل می‌باشند و به ترتیب کران‌های بالا و پایین تابع هدف فازی را در هر سطح α نتیجه می‌دهد.

به جز روش‌های فوق، یکی از دسته‌های برنامه‌ریزی کسری با عدم قطعیت داده‌ها که در این مقاله به حل آن‌ها خواهیم پرداخت، برنامه‌ریزی کسری خطی بازه‌ای^۱ است که روش‌های اندکی برای حل این مسایل ارایه شده است به طوری که تنها توانسته‌اند حدود مقدار بهینه تابع هدف را به‌دست آورند. از جمله لدیک [۱۸] یک روش برای محاسبه حدود مقدار بهینه تابع هدف ILFP تعمیم‌یافته ارایه کرد به طوری که برای محاسبه هر کران باید یکی از دو مساله برنامه‌ریزی کسری خطی حقیقی مقدار تعمیم‌یافته حل شود. برزا و همکارانش [۱۹] با استفاده از ترکیب محدب، بهترین مقدار بهینه تابع هدف مساله برنامه‌ریزی کسری خطی با ضرایب تابع هدف بازه‌ای را به‌دست آوردند. جیاکومار و همکارانش [۲۰] با استفاده از بهینه‌سازی قوی، بعضی از قضایای دوگان را برای مینماکس ILFP توسعه دادند. سان و چای [۲۱] با استفاده از بهینه‌سازی قوی، دوگان قوی را برای حل ILFP به کار بردند. مصطفایی و لدیک [۲۲] روشی برای تعیین حدود مقدار واقعی تابع هدف ILFP پیشنهاد دادند در حالی که بعضی از ضرایب صورت و مخرج کسر وابستگی خاص دارند. سالاری و همکارانش [۲۳] برای اولین بار روشی برای محاسبه حدود مقدار بهینه تابع هدف مدل ILFP معرفی کردند. در این روش ابتدا مدل ILFP را به دو زیر مدل تبدیل کردند به طوری که توابع هدف هر دو زیر مدل غیرخطی هستند و با حل اولین زیر مدل، بهترین مقدار بهینه تابع هدف روی بزرگ‌ترین ناحیه شدنی را به‌دست می‌آورند و با حل دومین زیر مدل، بدترین مقدار بهینه تابع هدف روی کوچک‌ترین ناحیه شدنی را به‌دست می‌آورند.

یک نقطه به‌دست آمده شدنی است اگر در همه محدودیت‌های بزرگ‌ترین ناحیه صدق کند و بهینه است اگر جواب حداقل یک مدل مشخص باشد. در این مقاله، دو روش جدید برای به‌دست آوردن مجموعه جواب بهینه شدنی ILFP با محدودیت نامساوی پیشنهاد می‌کنیم به طوری که جواب حاصل از هر دو روش شدنی است.

^۱ ILFP

لازم به ذکر است ژو و همکارانش [۲۴] محدودیت‌هایی مشابه با محدودیت‌های روش ارایه شده در این مقاله را برای مساله برنامه‌ریزی خطی بازه‌ای به کار برده‌اند اما ما در این مقاله، اثباتی کاملاً متفاوت را ارایه کرده‌ایم. روش‌های متعددی برای مقایسه اعداد بازه‌ای معرفی شده است از جمله روش ارایه شده توسط مور [۲۵] و یا روش‌های ارایه شده توسط ایشیوچی و تاناکا [۲۶]. برای توضیحات بیشتر می‌توانید به [۲۷] مراجعه کنید. اما در این مقاله مقایسه جواب‌های بازه‌ای به دست آمده از روش‌های پیشنهادی با هیچ یک از این روش‌های ارایه شده توسط مور و ایشیوچی و تاناکا مطابقت ندارد لذا در این مقاله هدف ما به دست آوردن مجموعه جواب بهینه‌ای است که کاملاً شدنی باشد و مجموعه جواب بهینه را از نظر شدنی بودن مقایسه می‌کنیم. ادامه این مقاله به صورت زیر تنظیم شده است: در بخش ۲، بعضی از تعاریف پایه‌ای و قضایا معرفی شده‌اند. در بخش ۳، روش سالاری و همکارانش به صورت مختصر شرح داده شده است. در بخش ۴، دو مثال عددی آورده شده است و روش‌های ارایه شده در این مقاله با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در بخش پایانی، نتایج آورده شده است.

۲ نمادها و تعاریف

در این قسمت به معرفی برخی از قضایا و تعاریف مهم که در این مقاله مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌پردازیم. **تعریف ۱** [۱۷] یک عدد بازه‌ای، یک داده با عدم قطعیت است به طوری که حدود آن (کران بالا و پایین) مشخص شده‌اند و به صورت x^\pm نمایش داده می‌شود به طوری که $x^- \leq x^+$ و عدد بازه‌ای x^\pm تباهیده است اگر $x^- = x^+$ و x^\pm مثبت (منفی) است اگر و تنها اگر $(x^+ \leq 0)$ یا $(x^- \geq 0)$.

تعریف ۲ [۱۷] یک ماتریس بازه‌ای، ماتریسی است که مقدار مولفه‌های آن نامشخص است اما مرزهایش (کران بالا و پایین) معلوم است و به صورت $A^\pm = [A^-, A^+]$ نمایش داده می‌شود به طوری که $A^- = (a_{ij}^-), A^+ = (a_{ij}^+) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ و $a_{ij}^- \leq a_{ij}^+$ برای هر i, j . مقادیر A^-, A^+ را به ترتیب کران بالا و پایین بازه A^\pm می‌نامیم. یک حالت خاص از ماتریس بازه‌ای، بردار بازه‌ای است به طوری که $b^- = (b_i^-), b^+ = (b_i^+) \in \mathbb{R}^n$ و $b_i^- \leq b_i^+$ برای هر i . بردار بازه‌ای حقیقی مقدار را به صورت $b^\pm = [b^-, b^+]$ تعریف می‌کنیم به طوری که $b^\pm = \{b \in \mathbb{R}^m \mid b^- \leq b \leq b^+\}$.

تعریف ۳ [۱۷] مرکز و شعاع بردار بازه‌ای b^\pm به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$b^c = (b_1^c, \dots, b_n^c)^t; b_j^c = \frac{1}{2}(b_j^+ + b_j^-), j = 1, \dots, n,$$

$$\Delta_b = (\Delta_{b_1}, \dots, \Delta_{b_n})^t; \Delta_{b_j} = \frac{1}{2}(b_j^+ - b_j^-), j = 1, \dots, n.$$

تعریف ۴ [۲۸] برای یک عدد بازه‌ای x^\pm ، تابع علامت و مقدار قدر مطلق بازه‌ای به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\text{sign}(x^\pm) = \begin{cases} 1 & \text{if } x^- \geq 0 \\ -1 & \text{if } x^+ \leq 0 \end{cases}, |x^\pm| = \begin{cases} x^- & \text{if } x^- \geq 0 \\ -x^+ & \text{if } x^+ \leq 0 \end{cases}, |x^\pm|^+ = \begin{cases} x^+ & \text{if } x^- \geq 0 \\ -x^- & \text{if } x^+ \leq 0 \end{cases}.$$

مدل برنامه‌ریزی کسری خطی بازه‌ای را می‌توان به صورت زیر فرمول‌بندی کرد:

$$\begin{aligned} \text{Max } z^\pm &= \frac{\mathbf{C}^{\pm t} \mathbf{x}^\pm + \alpha^\pm}{\mathbf{D}^{\pm t} \mathbf{x}^\pm + \beta^\pm} \\ \text{s.t. } \quad \mathbf{A}^\pm \mathbf{x}^\pm &\leq \mathbf{b}^\pm, \\ \mathbf{x}^- &\geq 0, \end{aligned} \tag{1}$$

به طوری که \mathbf{C}^\pm و \mathbf{D}^\pm دو بردار بازه‌ای $n \times 1$ با مولفه‌های c_j^\pm و d_j^\pm برای $j = 1, \dots, n$ هستند، α^\pm و β^\pm دو عدد بازه‌ای هستند، \mathbf{b}^\pm یک بردار بازه‌ای $m \times 1$ با مولفه‌های b_i^\pm برای $i = 1, \dots, m$ است و \mathbf{A}^\pm یک ماتریس بازه‌ای $m \times n$ با مولفه‌های بازه‌ای به صورت a_{ij}^\pm برای $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$ است.

مدل مشخصه‌ی (۱)، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Max } z^\circ &= \frac{\mathbf{C}^\circ \mathbf{x} + \alpha^\circ}{\mathbf{D}^\circ \mathbf{x} + \beta^\circ} \\ \text{s.t. } \quad \mathbf{A}^\circ \mathbf{x} &\leq \mathbf{b}^\circ, \\ \mathbf{x} &\geq 0, \end{aligned} \tag{2}$$

به طوری که $\mathbf{A}^\circ \in \mathbf{A}^\pm$ و $\mathbf{b}^\circ \in \mathbf{b}^\pm$ ، $\beta^\circ \in \beta^\pm$ ، $\alpha^\circ \in \alpha^\pm$ ، $\mathbf{D}^\circ \in \mathbf{D}^\pm$ ، $\mathbf{C}^\circ \in \mathbf{C}^\pm$.

قضیه ۱ [۲۹] نامعادله بازه‌ای $A^\pm x \leq_s b^\pm$ شدنی قوی است اگر و تنها اگر نامعادله $A^+ x \leq b^-$ شدنی باشد.

نظر به این که مخرج کسر مدل (۱) یک چند جمله‌ای بر حسب x^\pm با ضرایب بازه‌ای است و تعیین ناحیه‌ای که علامت مخرج کسر مثبت، منفی و یا صفر باشد دشوار است. برای جلوگیری و ممانعت از صفر شدن مخرج کسر فرض می‌کنیم که در مدل (۱) برای هر جواب شدنی x^\pm ، $D^\pm x^\pm + \beta^\pm$ مثبت باشد.

لم زیر نشان می‌دهد این فرض باعث از دست دادن کلیت مساله نمی‌شود.

لم ۱ برای هر جواب شدنی x^\pm ، $D^\pm x^\pm + \beta^\pm >_s 0$ ، اگر و تنها برای هر x در بزرگ‌ترین ناحیه شدنی، $D^- x + \beta^- > 0$.

اثبات. فرض کنید برای هر جواب شدنی x^\pm ، $D^\pm x^\pm + \beta^\pm >_s 0$ ، از جمله برای $D^- x + \beta^-$ و x . در این صورت برای هر جواب شدنی x ، $D^- x + \beta^- > 0$.

برعکس، فرض کنید برای هر x در بزرگ‌ترین ناحیه شدنی، $D^- x + \beta^- > 0$. از طرفی ما داریم:

$$D^\circ x + \beta^\circ > D^- x + \beta^- > 0$$

در این صورت برای هر x ، $D^\circ x + \beta^\circ > 0$. بنابراین برای هر جواب شدنی x^\pm ، $D^\pm x^\pm + \beta^\pm >_s 0$.

هم چنین می‌توان برای جلوگیری از صفر شدن مخرج کسر، فرض کنیم تمام ضرایب بازه‌ای مخرج کسر هم علامت باشند لذا

(۱) اگر تمام ضرایب بازه‌ای را مثبت در نظر بگیریم ($D^- \geq 0, \beta^- > 0$) در این صورت طبق لم ۱ داریم $D^\pm x^\pm + \beta^\pm >_s 0$.

(۲) اگر تمام ضرایب بازه‌ای را منفی در نظر بگیریم ($D^- \leq 0, \beta^- < 0$)، از علامت منفی فاکتور می‌گیریم و مساله ما کسیم‌سازی ILFP به مساله مینیم‌سازی ILFP تبدیل می‌شود و لذا طبق لم ۱ داریم $D^\pm x^\pm + \beta^\pm >_s 0$.

بنابراین با توجه به موارد ۱ و ۲، برای هر جواب شدنی $0, x^\pm$ اگر $D^\pm x^\pm + \beta^\pm >_s$ و تنها اگر برای هر جواب شدنی $D^-x + \beta^- > 0, x$

قضیه ۲ [۳۰] در مدل (۱)، بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین ناحیه شدنی به ترتیب به صورت زیر هستند:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}^- x_j \leq b_i^+, \sum_{j=1}^n a_{ij}^+ x_j \leq b_i^-, i = 1, \dots, m.$$

لازم به ذکر است در این مقاله، روش‌های پیشنهادی برای بازه‌های بسته که نامثبت یا نامنفی باشند ارایه شده است و چون بازه‌هایی که بخشی از آن مثبت و بخشی از آن منفی باشند دارای نوسان هستند و رفتار ثابتی ندارند لذا از این گونه بازه‌ها استفاده نمی‌کنیم و هم‌چنین بزرگ‌ترین ناحیه شدنی باید ناتهی باشد. برای مطالعه قوانین حساب بازه‌ای می‌توانید به آلفلد و هرزبرگر [۳۱] مراجعه کنید.

۳ مرور یک روش برای حل ILFP

سالاری و همکارانش [۲۳] در ۲۰۲۰ برای اولین بار روشی برای محاسبه حدود مقدار بهینه تابع هدف مدل ILFP معرفی کردند. در این روش ابتدا مدل ILFP را به دو زیر مدل تبدیل کردند به طوری که توابع هدف هر دو زیر مدل غیرخطی هستند و با حل اولین زیر مدل، بهترین مقدار بهینه تابع هدف روی بزرگ‌ترین ناحیه شدنی را به دست می‌آوردند و با حل دومین زیر مدل، بدترین مقدار بهینه تابع هدف روی کوچک‌ترین ناحیه شدنی را به دست می‌آوردند.

قضیه ۳ فرض کنید $B_1 = \{j : c_j^- \geq 0\}$ و $B_2 = \{j : c_j^+ \leq 0\}$. بهترین و بدترین حدود مقدار بهینه مدل (۱) با حل دو زیر مدل زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \text{Max } z^+ = & \begin{cases} \frac{\sum_{j \in B_1} c_j^+ x_j + \alpha^+}{\sum_{j=1}^n d_j^- x_j + \beta^-} + \frac{\sum_{j \in B_2} c_j^+ x_j}{\sum_{j=1}^n d_j^+ x_j + \beta^+}, & \text{if } \text{sign}(\alpha^\pm) = \text{sign}(c_j^\pm); j \in B_1 \\ \frac{\sum_{j \in B_1} c_j^+ x_j}{\sum_{j=1}^n d_j^- x_j + \beta^-} + \frac{\sum_{j \in B_2} c_j^+ x_j + \alpha^+}{\sum_{j=1}^n d_j^+ x_j + \beta^+}, & \text{if } \text{sign}(\alpha^\pm) = \text{sign}(c_j^\pm); j \in B_2 \end{cases} \\ \text{s.t. } & \sum_{j=1}^n a_{ij}^- x_j \leq b_i^+, i = 1, \dots, m, \\ & x_j \geq 0, j = 1, \dots, n, \end{aligned} \tag{۳}$$

و

$$\begin{aligned}
 \text{Max } z^- = & \begin{cases} \frac{\sum_{j \in B_1} c_j^- x_j + \alpha^-}{\sum_{j=1}^n d_j^+ x_j + \beta^+} + \frac{\sum_{j \in B_2} c_j^- x_j}{\sum_{j=1}^n d_j^- x_j + \beta^-}, \text{ if } \text{sign}(\alpha^\pm) = \text{sign}(c_j^\pm); j \in B_1 \\ \frac{\sum_{j \in B_1} c_j^- x_j}{\sum_{j=1}^n d_j^+ x_j + \beta^+} + \frac{\sum_{j \in B_2} c_j^- x_j + \alpha^-}{\sum_{j=1}^n d_j^- x_j + \beta^-}, \text{ if } \text{sign}(\alpha^\pm) = \text{sign}(c_j^\pm); j \in B_2 \end{cases} \\
 \text{s.t. } & \sum_{j=1}^n a_{ij}^+ x_j \leq b_i^-, i = 1, \dots, m, \\
 & x_j \geq 0, j = 1, \dots, n.
 \end{aligned} \tag{۴}$$

با حل دو زیر مدل (۳) و (۴)، حدود مقدار بهینه تابع هدف و همچنین مجموعه جواب بهینه مدل ILFP به دست می آید.

۴ رویکرد جدید در تعیین جواب‌های شدنی مدل ILFP

برای تعیین جواب ILFP، دو زیر مدل معرفی می کنیم به طوری که یکی از آنها روی بزرگ‌ترین ناحیه و بهترین مقدار تابع هدف و دیگری روی کوچک‌ترین ناحیه و بدترین مقدار تابع هدف را تعیین می کند. بنابراین مقدار تابع هدف و جواب به دست آمده از یک مدل ماکزیم‌سازی بازه‌ای به صورت یک بازه خواهد بود. ژو و همکارانش [۲۴] محدودیت‌هایی مشابه با محدودیت‌های روش ارایه شده در این مقاله را برای مساله برنامه‌ریزی خطی بازه‌ای به کار برده‌اند و ناحیه جوابی شدنی را برای مساله برنامه‌ریزی خطی بازه‌ای به دست آوردند اما در این مقاله، اثباتی کاملاً متفاوت برای قضایا ارایه شده است. در ادامه، دو روش پیشنهاد می شود به طوری که در هر دو روش، مجموعه جواب بهینه شدنی به دست آورده می شود.

۴-۱ روش اول

در این زیربخش، روش اول را که شامل دو زیر مدل است؛ پیشنهاد می دهیم که یکی از آنها روی بزرگ‌ترین ناحیه و بهترین مقدار تابع هدف و دیگری روی کوچک‌ترین ناحیه و بدترین مقدار تابع هدف است. برای به دست آوردن تابع هدف و محدودیت‌های متناظر با دو زیر مدل، قضیه‌ی زیر را داریم.

قضیه ۴ [۳۲] فرض کنید $B_1 = \{j : c_j^+ \leq 0\}$ ، $B_2 = \{j : c_j^- \geq 0\}$ و $\alpha^- \geq 0$. برای مدل ILFP با متغیر تصمیم نامنفی، دو زیر مدل روش اول به صورت زیر تعریف می شوند:

زیر مدل اول:

$$\begin{aligned}
 \text{Max } z^+ &= \frac{\sum_{j \in B_1} c_j^+ x_j^+ + \alpha^+}{\sum_{j \in B_1} d_j^- x_j^+ + \sum_{j \in B_2} d_j^- x_j^+ + \beta^-} + \frac{\sum_{j \in B_2} c_j^+ x_j^+}{\sum_{j \in B_1} d_j^+ x_j^+ + \sum_{j \in B_2} d_j^+ x_j^+ + \beta^+}, \\
 \text{s.t. } & \sum_{j \in B_1} |a_{ij}^\pm|^- \text{sign}(a_{ij}^\pm) x_j^+ + \sum_{j \in B_2} |a_{ij}^\pm|^+ \text{sign}(a_{ij}^\pm) x_j^- \leq b_i^+, i = 1, \dots, m, \quad (5) \\
 & x_j^+ \geq 0, \text{ for } j \in B_1, \\
 & x_j^- \geq 0, \text{ for } j \in B_2.
 \end{aligned}$$

زیر مدل دوم

$$\begin{aligned}
 \text{Max } z^- &= \frac{\sum_{j \in B_1} c_j^- x_j^- + \alpha^-}{\sum_{j \in B_1} d_j^+ x_j^- + \sum_{j \in B_2} d_j^+ x_j^- + \beta^+} + \frac{\sum_{j \in B_2} c_j^- x_j^-}{\sum_{j \in B_1} d_j^- x_j^- + \sum_{j \in B_2} d_j^- x_j^- + \beta^-}, \\
 \text{s.t. } & \sum_{j \in B_1} |a_{ij}^\pm|^+ \text{sign}(a_{ij}^\pm) x_j^- + \sum_{j \in B_2} |a_{ij}^\pm|^- \text{sign}(a_{ij}^\pm) x_j^+ \leq b_i^-, i = 1, \dots, m, \quad (6) \\
 & x_{j_{opt}}^+ \geq x_j^- \geq 0, \text{ for } j \in B_1, \\
 & x_j^+ \geq x_{j_{opt}}^- \geq 0, \text{ for } j \in B_2.
 \end{aligned}$$

$$x_j^- = \begin{cases} x_j^-, & j \in B_1 \\ x_j^+, & j \in B_2 \end{cases} \text{ و } x_j^+ = \begin{cases} x_j^+, & j \in B_1 \\ x_j^-, & j \in B_2 \end{cases} \text{ به طوری که}$$

اگر $x_{j_{opt}}^-$ و $x_{j_{opt}}^+$ برای هر $j \in B_1$ و $j \in B_2$ جواب‌های دو زیر مدل باشند آنگاه جواب ILFP به صورت

$$\begin{pmatrix} [x_{1_{opt}}^-, x_{1_{opt}}^+] \\ \vdots \\ [x_{n_{opt}}^-, x_{n_{opt}}^+] \end{pmatrix} \text{ است.}$$

مجموعه جواب به دست آمده از این روش به صورت x_{opt}^\pm است. اگر مجموعه جواب به دست آمده در بزرگ‌ترین ناحیه‌ی قیود بازه‌ای مدل (1) قرار نگیرد در این صورت مجموعه جواب به دست آمده نشدنی خواهد بود؛ لذا از یک فرآیند محدودکننده برای فضای جواب جهت حذف جواب‌های نشدنی به کار گرفته می‌شود به طوری که به این عمل انقباض فضای جواب گویند. در این حالت، از روشی جایگزین جهت پیدا کردن نرخ انقباض برای همه متغیرها با هدف به حداکثر رساندن فضای جواب شدنی استفاده می‌شود به طوری که هر متغیر را با نرخ متفاوت منقبض می‌کند.

مجموعه جواب x_{opt}^\pm حاصل از روش اول را در نظر بگیرید به طوری که بخشی از مجموعه جواب به دست آمده نشدنی است. شعاع و مرکز بردار بازه‌ای x_{opt}^\pm را به دست می‌آوریم. نرخ انقباض را با q برای $j = 1, \dots, l, l+1, \dots, n$ نشان می‌دهیم به طوری که در میان جواب x_{opt}^\pm ، l تای اول از متغیر تصمیم اعداد بازه‌ای هستند و برای $n-l$ تای دیگر داریم $q_j = 0$.

اکنون برای به دست آوردن نرخ انقباض q برای $j = 1, \dots, l$ قضیه زیر را داریم:

قضیه ۵ فرض کنید $A_+ = \{j: a_{ij}^+ \leq 0\}$ و $A_- = \{j: a_{ij}^- \geq 0\}$. اگر مجموعه جواب حاصل از روش جایگزین را با y^\pm نمایش دهیم به طوری که $y_j^\pm = [x_j^c - q_j \Delta_{x_j}, x_j^c + q_j \Delta_{x_j}]$ در این صورت روش جایگزین به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} & \text{Max } q_1 \times \dots \times q_l \\ & \text{s.t. } \sum_{j \in A_+} a_{ij}^- q_j \Delta_{x_j} - \sum_{j \in A_-} a_{ij}^- q_j \Delta_{x_j} \leq b_i^+ - \sum_{j=1}^n a_{ij}^- x_j^c, \quad i = 1, \dots, m, \\ & \quad 0 \leq q_j \leq 1, \quad \text{for } j = 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (7)$$

اثبات: تابع هدف روش جایگزین، ماکزیمم کردن نرخ انقباض هر متغیر تصمیم است به طوری که فضای جواب شدنی را به حداکثر برسانیم.

اکنون برای محدودیت‌های روش جایگزین داریم:

اگر y_{opt}^\pm مجموعه جواب حاصل از روش جایگزین باشد باید در بزرگ‌ترین ناحیه قیود بازه‌ای مدل (۱) صدق کند در این صورت $\sum_{j=1}^n a_{ij}^- y_j \leq b_i^+$ که می‌توان آن را به صورت زیر نوشت:

$$\sum_{j \in A_+} a_{ij}^- y_j + \sum_{j \in A_-} a_{ij}^- y_j \leq b_i^+.$$

توجه کنید $a_{ij}^- \geq 0$ برای $j \in A_+$ و $a_{ij}^+ \leq 0$ برای $j \in A_-$. بنابراین برای تضمین شدنی بودن، کافی است که

$$\sum_{j \in A_+} a_{ij}^- y_j^+ + \sum_{j \in A_-} a_{ij}^- y_j^- \leq b_i^+, \quad i = 1, \dots, m, \quad (8)$$

به طوری که $y_j^- = x_j^c - q_j \Delta_{x_j}$ و $y_j^+ = x_j^c + q_j \Delta_{x_j}$ برای $j = 1, \dots, n$.

اکنون معادله (۸) را بازنویسی می‌کنیم:

$$\begin{aligned} \sum_{j \in A_+} a_{ij}^- y_j^+ + \sum_{j \in A_-} a_{ij}^- y_j^- &= \sum_{j \in A_+} a_{ij}^- (x_j^c + q_j \Delta_{x_j}) + \sum_{j \in A_-} a_{ij}^- (x_j^c - q_j \Delta_{x_j}) = \\ &= \sum_{j \in A_+} a_{ij}^- x_j^c + \sum_{j \in A_+} a_{ij}^- q_j \Delta_{x_j} + \sum_{j \in A_-} a_{ij}^- x_j^c - \sum_{j \in A_-} a_{ij}^- q_j \Delta_{x_j} \leq b_i^+, \end{aligned}$$

در این صورت

$$\sum_{j \in A_+} a_{ij}^- q_j \Delta_{x_j} - \sum_{j \in A_-} a_{ij}^- q_j \Delta_{x_j} \leq b_i^+ - \sum_{j \in A_+} a_{ij}^- x_j^c - \sum_{j \in A_-} a_{ij}^- x_j^c.$$

بنابراین داریم:

$$\sum_{j \in A_+} a_{ij}^- q_j \Delta_{x_j} - \sum_{j \in A_-} a_{ij}^- q_j \Delta_{x_j} \leq b_i^+ - \sum_{j=1}^n a_{ij}^- x_j^c.$$

■

بنابراین در روش جایگزین مجموعه جواب شدنی نهایی به صورت زیر است:

$$Y_{Jopt}^\pm = \{y_{Jopt}^\pm \mid y_{Jopt}^\pm = [x_j^c - q_j \Delta_{x_j}, x_j^c + q_j \Delta_{x_j}]\}, \quad (9)$$

و با جایگذاری y_{opt}^\pm در تابع هدف مدل (۵) و (۶)، مقدار تابع هدف روش جایگزین به صورت زیر خواهد بود:

$$z^+ = \frac{\sum_{j \in B_1} c_j^+ x_j^c + \sum_{j \in B_1} c_j^+ q_j \Delta_{x_j} + \alpha^+}{\sum_{j=1}^n d_j^- x_j^c + \sum_{j \in B_1} d_j^- q_j \Delta_{x_j} - \sum_{j \in B_1} d_j^- q_j \Delta_{x_j} + \beta^-} + \frac{\sum_{j \in B_1} c_j^+ x_j^c - \sum_{j \in B_1} c_j^+ q_j \Delta_{x_j}}{\sum_{j=1}^n d_j^+ x_j^c + \sum_{j \in B_1} d_j^+ q_j \Delta_{x_j} - \sum_{j \in B_1} d_j^+ q_j \Delta_{x_j} + \beta^+}, \quad (10)$$

$$z^- = \frac{\sum_{j \in B_1} c_j^- x_j^c - \sum_{j \in B_1} c_j^- q_j \Delta_{x_j} + \alpha^-}{\sum_{j=1}^n d_j^+ x_j^c + \sum_{j \in B_1} d_j^+ q_j \Delta_{x_j} - \sum_{j \in B_1} d_j^+ q_j \Delta_{x_j} + \beta^+} + \frac{\sum_{j \in B_1} c_j^- x_j^c + \sum_{j \in B_1} c_j^- q_j \Delta_{x_j}}{\sum_{j=1}^n d_j^- x_j^c - \sum_{j \in B_1} d_j^- q_j \Delta_{x_j} + \sum_{j \in B_1} d_j^- q_j \Delta_{x_j} + \beta^-}, \quad (11)$$

مزیت اصلی روش جایگزین این است که مجموعه جواب نهایی کاملاً شدنی است گر چه ممکن است بسیاری از جواب‌های شدنی در فرآیند فشرده کردن فضای جواب حذف شوند به خصوص نواحی جواب مربوط به کوچک‌ترین ناحیه شدنی.

اگر نقطه مرکزی مجموعه جواب روش اول که مبنای محدود کردن فضای جواب و در نهایت تعیین مجموعه جواب روش جایگزین است نشدنی باشد آنگاه روش جایگزین نیز نشدنی خواهد بود. در زیربخش بعدی، ما روش دیگری را معرفی خواهیم کرد به طوری که مجموعه جواب به دست آمده کاملاً شدنی خواهد بود.

۲-۴ روش دوم

در این زیر بخش، روشی برای حل ILFP معرفی می‌کنیم به طوری که دارای دو زیر مدل است. زیر مدل اول مشابه با زیر مدل دوم از روش اول است. برای زیر مدل دوم، زیر مدل اول از روش اول را در نظر می‌گیریم. برای تضمین شدنی بودن جواب حاصل از روش دوم، محدودیت اضافی زیر را به زیر مدل دوم اضافه می‌کنیم لذا مجموعه جواب به دست آمده از این روش کاملاً شدنی است.

قضیه ۶ فرض کنید $E_1 = \{j : j \in B_1, a_{ij}^- \geq 0\}$ ، $E_2 = \{j : j \in B_1, a_{ij}^+ \leq 0\}$ ، $E_3 = \{j : j \in B_1, a_{ij}^+ \leq 0\}$ و $E_4 = \{j : j \in B_1, a_{ij}^- \geq 0\}$. برای تضمین شدنی بودن مجموعه جواب حاصل، محدودیت زیر به زیر مدل دوم اضافه می‌شود:

$$\sum_{j \in E_1} a_{\eta j}^- x_j^+ + \sum_{j \in E_2} a_{\eta j}^- x_{j_{opt}}^- + \sum_{j \in E_3} a_{\eta j}^- x_j^- + \sum_{j \in E_4} a_{\eta j}^- x_{j_{opt}}^+ \leq b_{\eta}^+, \quad (12)$$

به طوری که η اندیس محدودیت‌هایی از مدل (۱) است که $sign(a_{\eta j}^{\pm}) = sign(c_j^{\pm})$; $j \in E_1, E_2$ و $sign(a_{\eta j}^{\pm}) \neq sign(c_j^{\pm})$; $j \in E_3, E_4$.

اثبات: ابتدا زیر مدل اول را حل می‌کنیم و جواب به دست آمده به صورت $(x_j^-; j \in B_1, x_j^+; j \in B_1)^t$ را به دست می‌آوریم. فرض کنید برای محدودیت η ام مدل (۱) داشته باشیم

$$sign(a_{\eta j}^{\pm}) \neq sign(c_j^{\pm}); j \in E_3, E_4 \text{ و } sign(a_{\eta j}^{\pm}) = sign(c_j^{\pm}); j \in E_1, E_2$$

محدودیت η ام بزرگ‌ترین ناحیه شدنی را در نظر بگیرید یعنی $\sum_{j=1}^n a_{\eta j}^- x_j \leq b_{\eta}^+$ که می‌توان آن را

به صورت زیر نوشت:

$$\sum_{j \in E_1} a_{\eta j}^- x_j + \sum_{j \in E_2} a_{\eta j}^- x_j + \sum_{j \in E_3} a_{\eta j}^- x_j + \sum_{j \in E_4} a_{\eta j}^- x_j \leq b_{\eta}^+,$$

توجه کنید برای $a_{\eta j}^- \geq 0; j \in E_1, E_4$ و برای $a_{\eta j}^+ \leq 0; j \in E_2, E_3$ بنابراین کافی است

$$\sum_{j \in E_1} a_{\eta j}^- x_j^+ + \sum_{j \in E_2} a_{\eta j}^- x_{j_{opt}}^- + \sum_{j \in E_3} a_{\eta j}^- x_j^- + \sum_{j \in E_4} a_{\eta j}^- x_{j_{opt}}^+ \leq b_{\eta}^+ . \quad \blacksquare$$

بنابراین دو زیر مدل روش دوم به صورت زیر خواهند بود:

زیر مدل اول:

$$\begin{aligned} \text{Max } z^- &= \frac{\sum_{j \in B_1} c_j^- x_j + \alpha^-}{\sum_{j \in B_1} d_j^+ x_j + \sum_{j \in B_2} d_j^+ x_j + \beta^+} + \frac{\sum_{j \in B_1} c_j^- x_j}{\sum_{j \in B_1} d_j^- x_j + \sum_{j \in B_2} d_j^- x_j + \beta^-}, x_j = \begin{cases} x_j^-, & j \in B_1 \\ x_j^+, & j \in B_2 \end{cases} \\ \text{s.t. } & \sum_{j \in B_1} |a_{ij}^{\pm}|^+ \text{sign}(a_{ij}^{\pm}) x_j^- + \sum_{j \in B_2} |a_{ij}^{\pm}|^- \text{sign}(a_{ij}^{\pm}) x_j^+ \leq b_i^-, i = 1, \dots, m, \\ & x_j^- \geq 0, \text{ for } j \in B_1, \\ & x_j^+ \geq 0, \text{ for } j \in B_2. \end{aligned} \quad (13)$$

زیر مدل دوم:

$$\begin{aligned} \text{Max } z^+ &= \frac{\sum_{j \in B_1} c_j^+ x_j + \alpha^+}{\sum_{j \in B_1} d_j^- x_j + \sum_{j \in B_2} d_j^- x_j + \beta^-} + \frac{\sum_{j \in B_2} c_j^+ x_j}{\sum_{j \in B_1} d_j^+ x_j + \sum_{j \in B_2} d_j^+ x_j + \beta^+}, x_j = \begin{cases} x_j^+, & j \in B_1 \\ x_j^-, & j \in B_2 \end{cases} \\ \text{s.t. } & \sum_{j \in B_1} |a_{ij}^{\pm}|^- \text{sign}(a_{ij}^{\pm}) x_j^+ + \sum_{j \in B_2} |a_{ij}^{\pm}|^+ \text{sign}(a_{ij}^{\pm}) x_j^- \leq b_i^+, i = 1, \dots, m, \\ & \sum_{j \in E_1} a_{\eta j}^- x_j^+ + \sum_{j \in E_2} a_{\eta j}^- x_{j_{opt}}^- + \sum_{j \in E_3} a_{\eta j}^- x_j^- + \sum_{j \in E_4} a_{\eta j}^- x_{j_{opt}}^+ \leq b_{\eta}^+, \\ & x_j^+ \geq x_{j_{opt}}^- \geq 0, \text{ for } j \in B_1, \\ & x_{j_{opt}}^+ \geq x_j^- \geq 0, \text{ for } j \in B_2. \end{aligned} \quad (14)$$

۵ مثال های عددی و آنالیز نتایج

برای نشان دادن کارایی روش های ارایه شده، ابتدا روش های پیشنهادی را برای مدل ILFP به کار می بریم سپس جواب های عددی به دست آمده را با یکدیگر مقایسه می کنیم.

مثال ۱ مدل ILFP زیر را در نظر بگیرید

$$\begin{aligned} \text{Max } z^{\pm} &= \frac{-[3, 3/5]x_1^{\pm} + [1, 1/2]x_2^{\pm} - [3/45, 5/79]}{[0/27, 1/28]x_1^{\pm} + [1/3, 2/9]x_2^{\pm} + [0/5, 1/5]}, \\ \text{s.t. } & [1, 1/1]x_1^{\pm} + [1/6, 1/8]x_2^{\pm} \leq [11/6, 12], \\ & [3, 4]x_1^{\pm} - [2, 3]x_2^{\pm} \geq [6/5, 7], \\ & x_1^-, x_2^- \geq 0. \end{aligned} \quad (15)$$

با استفاده از روش اول برای مدل (۱۵)، زیر مدل های زیر را خواهیم داشت:

زیر مدل اول:

$$\begin{aligned} \text{Max } z^+ &= \frac{-3x_1^- - 3/45}{1/28x_1^- + 2/9x_2^+ + 1/5} + \frac{1/2x_2^+}{0/27x_1^- + 1/3x_2^+ + 0/5}, \\ \text{s.t. } & 1/1x_1^- + 1/6x_2^+ \leq 12, \\ & 4x_1^- - 2x_2^+ \geq 6/5, \\ & x_1^-, x_2^+ \geq 0. \end{aligned}$$

جواب بهینه عبارت است از $x_{1opt}^- = 4$ و $x_{2opt}^+ = 4/75$ و مقدار تابع هدف عبارت است از $z_{opt}^+ = -0/225$.

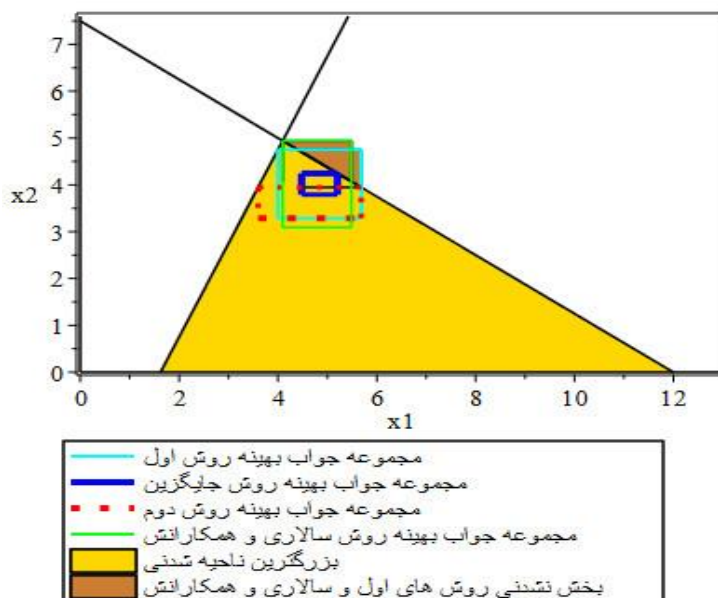
زیر مدل دوم:

$$\begin{aligned} \text{Max } z^- &= \frac{-3/5x_1^+ - 5/79}{0/27x_1^+ + 1/3x_2^- + 0/5} + \frac{x_2^-}{1/28x_1^+ + 2/9x_2^- + 1/5}, \\ \text{s.t. } & x_1^+ + 1/8x_2^- \leq 11/6, \\ & 3x_1^+ - 3x_2^- \geq 7, \\ & 0 \leq x_{1opt}^- \leq x_1^+, \\ & x_{2opt}^- \geq x_2^- \geq 0. \end{aligned}$$

جواب بهینه عبارت است از $x_{1opt}^+ = 5/6857$ و $x_{2opt}^- = 3/2857$. مقدار تابع هدف عبارت است از

$z_{opt}^- = -3/8940$. بنابراین مجموعه جواب بهینه حاصل از روش اول عبارت است از

$x_{opt}^\pm = [-3/8940, -0/225]$ و $x_{opt}^\pm = \left[\begin{matrix} [4/0000, 5/6857] \\ [3/2857, 4/7500] \end{matrix} \right]$ مجموعه جواب بهینه به دست آمده در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱. مجموعه جواب بهینه حاصل از روش‌های پیشنهادی برای مدل (۱۵)

بزرگ‌ترین ناحیه شدنی است و بدین معنی است که هر نقطه دلخواه از جواب به‌دست آمده توسط روش اول نباید خارج از بزرگ‌ترین ناحیه شدنی قرار گیرد، در حالی که بعضی از نقاط جواب توسط این روش ممکن است در بزرگ‌ترین ناحیه شدنی قرار نگیرند بنابراین جواب به‌دست آمده ممکن است شدنی نباشد. مدل (۱۵) را در نظر بگیرید، بزرگ‌ترین ناحیه شدنی به‌صورت زیر است:

$$\begin{cases} x_1^\pm + 1/6x_2^\pm \leq 12, \\ 4x_1^\pm - 2x_2^\pm \geq 6/5. \end{cases}$$

یک نقطه دلخواه از جواب به‌دست آمده را در نظر بگیرید. برای مثال نقطه $(5/6857, 4/75)^t$ در اولین محدودیت بزرگ‌ترین ناحیه شدنی صدق نمی‌کند، یعنی،

$$x_{1opt}^+ + 1/6x_{2opt}^+ \leq 12$$

نقطه $(5/6857, 4/75)^t$ ، یک نقطه شدنی نیست در حالی که به‌عنوان یک نقطه از مجموعه جواب بهینه به‌دست آمده توسط روش اول در نظر گرفته شده است. ممکن است یک تعداد نامتناهی از این نقاط وجود داشته باشند که در محدودیت $x_{1opt}^+ + 1/6x_{2opt}^+ \leq 12$ صدق نکنند.

بنابراین از روش جایگزین برای اصلاح مجموعه جواب بهینه استفاده خواهیم کرد. طبق روش جایگزین داریم:

$$\text{Max } q_1 \times q_2$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & 0/8429q_1 + 1/6 \times 0/7322q_2 \leq 12 - 4/8429 - 1/6 \times 4/0.179, \\ & -4 \times 0/8429q_1 - 2 \times 0/7322q_2 \geq 6/5 - 4 \times 4/8429 + 2 \times 4/0.179, \\ & 0 \leq q_1, q_2 \leq 1. \end{aligned}$$

جواب‌های مدل بالا عبارت است از $q_1 = 0/4321$ و $q_2 = 0/3109$. بنابراین مجموعه جواب بهینه نهایی

$$\text{به‌صورت زیر است } y_{opt}^\pm = \begin{pmatrix} [4/4787, 5/2071] \\ [3/7903, 4/2455] \end{pmatrix} \text{ و مقدار تابع هدف نهایی عبارت است از}$$

$z_{opt}^\pm = [-3/1244, -0/1592]$. مجموعه جواب بهینه به‌دست آمده از روش جایگزین کاملاً شدنی است و این مجموعه جواب بهینه در شکل ۱ نشان داده شده است.

در فرآیند فشرده کردن فضای جواب ناگزیر برخی از جواب‌های شدنی نیز حذف می‌شوند و لذا مجموعه جواب بهینه به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است در این صورت حدود مقدار تابع هدف نیز کاهش پیدا کرده است.

اکنون روش دوم را برای مدل (۱۵) به کار می‌بریم. ابتدا، مدل متناظر با z^- را حل می‌کنیم و سپس زیرمدل متناظر با z^+ را حل می‌کنیم، بنابراین داریم:
زیر مدل اول:

$$\begin{aligned} \text{Max } z^- &= \frac{-3/5x_1^+ - 5/79}{0/27x_1^+ + 1/3x_2^- + 0/5} + \frac{x_2^-}{1/28x_1^+ + 2/9x_2^- + 1/5}, \\ \text{s.t. } & x_1^+ + 1/8x_2^- \leq 11/6, \\ & 3x_1^+ - 3x_2^- \geq 7, \\ & x_1^+, x_2^- \geq 0. \end{aligned}$$

جواب بهینه عبارت است از $x_{1opt}^+ = 5/6857$ و $x_{2opt}^- = 3/2858$ و مقدار تابع هدف عبارت است از

$$z_{opt}^- = -3/8940.$$

زیر مدل دوم:

$$\begin{aligned} \text{Max } z^+ &= \frac{-3x_1^- - 3/45}{1/28x_1^- + 2/9x_2^+ + 1/5} + \frac{1/2x_2^+}{0/7x_1^- + 1/3x_2^+ + 0/5}, \\ \text{s.t. } & 1/1x_1^- + 1/6x_2^+ \leq 12, \\ & 4x_1^- - 2x_2^+ \geq 6/5, \\ & x_{1opt}^+ + 1/6x_2^+ \leq 12, \\ & 0 \leq x_1^- \leq x_{1opt}^+, \\ & x_2^+ \geq x_{2opt}^- \geq 0. \end{aligned}$$

جواب بهینه عبارت است از $x_{1opt}^- = 3/5982$ و $x_{2opt}^+ = 3/9464$ و مقدار تابع هدف عبارت است از

$$z_{opt}^+ = -0/943. \text{ بنابراین مجموعه جواب بهینه حاصل از روش دوم عبارت است از } x_{opt}^\pm = \left(\begin{array}{l} [3/5982, 5/6857] \\ [3/2857, 3/9464] \end{array} \right)$$

و $z_{opt}^\pm = [-3/8940, -0/943]$. مجموعه جواب بهینه در شکل ۱ نمایش داده شده است.

مجموعه جواب بهینه به دست آمده توسط روش دوم در همه محدودیت‌های بزرگ‌ترین ناحیه شدنی صدق می‌کند؛ بنابراین مجموعه جواب بهینه به دست آمده از این روش کاملاً شدنی است.

با استفاده از روش سالاری و همکارانش برای مدل (۱۵)، زیر مدل‌های زیر را خواهیم داشت:

زیر مدل اول:

$$\begin{aligned} \text{Max } z^+ &= \frac{-3x_1 - 3/45}{1/28x_1 + 2/9x_2 + 1/5} + \frac{1/2x_2}{0/27x_1 + 1/3x_2 + 0/5}, \\ \text{s.t. } & x_1 + 1/6x_2 \leq 12, \\ & 4x_1 - 2x_2 \geq 6/5, \\ & x_1, x_2 \geq 0. \end{aligned}$$

جواب بهینه عبارت است از $x_{1opt} = 4/952$ و $x_{2opt} = 4/9405$. مقدار تابع هدف عبارت است از

$$z_{opt}^+ = -0/0084$$

زیر مدل دوم:

$$\begin{aligned} \text{Max } z^- &= \frac{-3/5x_1 - 5/79}{0/27x_1 + 1/3x_2 + 0/5} + \frac{x_3}{1/28x_1 + 2/9x_2 + 1/5}, \\ \text{s.t. } & 1/1x_1 + 1/8x_2 \leq 11/6, \\ & 3x_1 - 3x_2 \geq 7/2, \\ & x_1, x_2 \geq 0. \end{aligned}$$

جواب بهینه عبارت است از $x_{1opt} = 5/4897$ و $x_{2opt} = 3/0897$ و مقدار تابع هدف عبارت است از

$$z_{opt}^- = -3/9915. \text{ بنابراین مجموعه جواب بهینه حاصل از روش اول عبارت است از } x_{opt} = \left(\left[\begin{array}{c} 4/0952, 5/4897 \\ 3/0897, 4/9405 \end{array} \right] \right)$$

و $z_{opt}^+ = [-3/9915, -0/0084]$. مجموعه جواب بهینه در شکل ۱ نمایش داده شده است.

یک نقطه دلخواه از جواب به دست آمده را در نظر بگیرید. برای مثال نقطه $(5/4897, 4/9405)^t$ در اولین

$$x_{1opt}^+ + 1/6x_{2opt}^+ \leq 12 \text{ یعنی نمی‌کند، صدق نمی‌کند، یعنی } x_{1opt}^+ + 1/6x_{2opt}^+ \leq 12$$

نقطه $(5/4897, 4/9405)^t$ ، یک نقطه شدنی نیست در حالی که به عنوان یک نقطه از مجموعه جواب بهینه به دست آمده توسط روش اول در نظر گرفته شده است. ممکن است یک تعداد نامتناهی از این نقاط وجود داشته باشند که در محدودیت $x_{1opt}^+ + 1/6x_{2opt}^+ \leq 12$ صدق نکنند.

لازم به ذکر است که اگر چه روش سالاری و همکارانش بهترین و بدترین مقدار بهینه تابع هدف را به دست آورند و هم چنین بزرگترین مجموعه جواب بهینه را به دست آوردند اما بخشی از این مجموعه جواب بهینه، نشدنی است. در صورتی که در روش دوم و روش جایگزین، مجموعه جواب بهینه‌ای کاملاً شدنی را به دست آورده‌ایم.

مثال ۲ مدل ILFP زیر را در نظر بگیرید

$$\begin{aligned} \text{Max } z^\pm &= \frac{[2/6, 2/8]x_1^\pm + [3/2, 4/1]x_2^\pm + [4, 5]x_3^\pm + [3, 3/2]}{[1/3, 2/8]x_1^\pm + [2/4, 4/9]x_2^\pm + [5, 6]x_3^\pm + [1, 2]}, \\ \text{s.t. } & [0, 3]x_1^\pm + [1/5, 2]x_2^\pm + [3/2, 5]x_3^\pm \geq [19/6, 20], \\ & [1, 5/5]x_1^\pm + [1/5, 3/5]x_2^\pm - [1, 1/5]x_3^\pm \leq [5, 7], \\ & [1/5, 1/6]x_1^\pm - [2/8, 7]x_2^\pm + [2/5, 3]x_3^\pm \leq [4, 5/9], \\ & x_1^-, x_2^-, x_3^- \geq 0. \end{aligned} \tag{16}$$

اکنون با استفاده از روش‌های ارزیابی شده مدل (۱۶) را حل می‌کنیم. نتایج در جدول ۱ آورده شده‌اند.

مجموعه جواب بهینه به دست آمده از روش دوم کاملاً شدنی است در حالی که مجموعه جواب بهینه به دست آمده از روش اول شدنی نیست. برای مثال، نقطه $(2/8709, 3/4540, 2/9540)^t$ در دومین محدودیت بزرگترین ناحیه شدنی یعنی $x_{1opt} + 2/5x_{2opt} - 1/5x_{3opt} \leq 7$ صدق نمی‌کند و یا نقطه $(2/8709, 0/9485, 4/5059)^t$ در سومین محدودیت بزرگترین ناحیه شدنی یعنی $1/5x_{1opt} - 7x_{2opt} + 2/5x_{3opt} \leq 5/9$ صدق نمی‌کند. بنابراین

از روش جایگزین جهت پیدا کردن نرخ انقباض استفاده می‌کنیم. با حل مدل جایگزین، نرخ انقباض مجموعه جواب بهینه جواب به دست آمده از روش جایگزین نسبت به روش اول کاهش یافته است و مجموعه جواب بهینه کاملاً شدنی است. مجموعه جواب بهینه به دست آمده از روش سالاری و همکارانش شدنی نیست زیرا نقطه $(1, 0/6543, 1)^t = (q_1, q_2, q_3)^t$ را به دست می‌آوریم. جواب‌های اصلاح شده مدل (۱۶) را به دست می‌آوریم و $3x_{opt} + 2x_{opt} + 5x_{opt} \geq 19/6$ یعنی $(0/0000, 0/4875, 0/1349)^t$ در اولین محدودیت بزرگ‌ترین ناحیه شدنی یعنی $(5/9836, 2/7322, 0/1349)^t$ در دومین محدودیت بزرگ‌ترین ناحیه شدنی یعنی $x_{opt} + 2/5x_{opt} - 1/5x_{opt} \leq 7$ صدق نمی‌کند؛ لذا مجموعه جواب بهینه حاصل از روش سالاری و همکارانش کاملاً شدنی نیست.

جدول ۱. مجموعه جواب‌های بهینه به دست آمده روش‌های پیشنهادی برای مدل (۱۶)

روش‌ها	مجموعه جواب بهینه	مقدار تابع هدف
روش اول	$\left(\begin{array}{l} [1/1111, 1/2708] \\ [0/9485, 3/9930] \\ [2/9540, 4/2533] \end{array} \right)$	$[0/7547, 1/3252]$
روش دوم	$\left(\begin{array}{l} [1/1111, 2/8709] \\ [0/9485, 3/4540] \\ [2/9540, 4/5059] \end{array} \right)$	$[0/7547, 1/3482]$
روش جایگزین	$\left(\begin{array}{l} [1/1111, 2/8709] \\ [1/3816, 3/0210] \\ [2/9540, 4/5059] \end{array} \right)$	$[0/7474, 1/3373]$
روش سالاری و همکارانش	$\left(\begin{array}{l} [0/0000, 5/9836] \\ [0/4875, 2/7322] \\ [0/1349, 3/8834] \end{array} \right)$	$[0/7050, 2/1346]$

۶ نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل ILFP را مورد مطالعه قرار دادیم. دو روش برای به دست آوردن مجموعه جواب بهینه ILFP معرفی کردیم. در هر دو روش، مدل ILFP به دو زیر مدل تبدیل می‌شود. در روش اول، ممکن است یک مجموعه جواب بهینه که بعضی از نقاط آن شدنی نیستند را به دست آوریم یعنی یک تعداد از نقاط بزرگ‌ترین ناحیه شدنی را نقض می‌کنند. بنابراین برای حذف بخش نشدنی، از یک فرآیند محدود کردن فضای جواب در جهت حذف بخش نشدنی استفاده کردیم که به این عمل انقباض فضای جواب می‌گویند. برای به دست آوردن نرخ انقباض از روش جایگزین استفاده کردیم به طوری که هر متغیر را با نرخ متفاوت منقبض می‌کنند. مجموعه جواب بهینه به دست آمده از این روش به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد اما مجموعه جواب بهینه نهایی به دست آمده کاملاً شدنی است. در روش دوم، برای تضمین شدنی بودن مجموعه جواب بهینه حاصل، یک محدودیت اضافی به زیر مدل دوم اضافه کردیم. بنابراین یک مجموعه جواب بهینه کاملاً شدنی را به دست می‌آوریم.

منابع

- [1] Allahdadi, M., Mishmast Nehi, H. (2017). New solution space for solving the interval linear programming model. *Journal of Operational Research in Its Applications*, 14(2), 111-121.
- [2] Khoshandam, L. (2019). An Extension to Imprecise Data Envelopment Analysis, *Journal of Operational Research in Its Applications*, 16(1), 117-129.
- [3] Cui, L., Li, Y., Huang, G. (2016). Double-sided fuzzy chance-constrained linear fractional programming approach for water resources management. *Engineering Optimization*, 48, 949-965.
- [4] Das, S. K., Mandal, T. (2017). A MOLFP method for solving linear fractional programming under fuzzy environment. *International journal of research in industrial engineering*, 6(3), 202-213.
- [5] Ghadle, K. P., Pawar, T. S. (2015). An Alternative Method for Solving Linear Fractional Programming Problems. *international journal recent scientific research*, 6, 4418-4420.
- [6] Jiao, H., Liu, S. (2014). A new linearization technique for minimax linear fractional programming. *International Journal of Engineering and Technology*, 91, 1730-1743.
- [7] Kumar-Das, S. (2019). A new method for solving fuzzy linear fractional programming problem with new ranking function. *International journal of research in industrial engineering*, 8(4), 384-393.
- [8] Liu, F., Wen, Z., Xu, Y. (2016). A fuzzy fractional chance-constrained programming model for air quality management under uncertainty. *Engineering Optimization*, 48, 135-153.
- [9] Singh, S. K., Yadav, S. P. (2016). Fuzzy programming approach for solving intuitionistic fuzzy linear fractional programming problem. *international journal of fuzzy systems*, 18, 263-269.
- [10] Wu, H. C. (2015). Parametric continuous-time linear fractional programming problems. *Journal of Inequalities and Applications*, 1, 1-22.
- [11] Charnes, A., Cooper, W. W. (1962). Programming with linear fractional functionals. *Naval Research Logistics Quarterly*, 9(3-4), 181-186.
- [12] Dinkelbach, W. (1967). On nonlinear fractional programming, *Management Science*, 13(7), 492-498.
- [13] Liu, S., Lin, Y. (2006). *Grey Information, Theory and Practical Applications*, Springer-Verlag, London.
- [14] Veeramani, C., Sumathi, M. (2016). Solving the linear fractional programming problem in a fuzzy environment: Numerical approach. *Applied Mathematical Modelling*, 40, 6148-6164.
- [15] Ebrahimnejad, A., Jafarnejad Ghomi, S., Mirhosseini-Alizamini, S. M. (2018). A revisit of numerical approach for solving linear fractional programming problem in a fuzzy environment. *Applied Mathematical Modelling*, 57, 459-473.
- [16] Nayak, S., Ojha, A. K. (2018). Multi-objective Linear Fractional Programming Problem with Fuzzy Parameters. *Soft Computing for Problem Solving*, 79-90.
- [17] Naseri S. H., Taleshian F., Taghinezhad N. A., Khalili F. (2013). Quadratic Programming With Fuzzy Parameters: An Extension Principle Approach. *Journal of Operational Research in Its Applications*, 9(4), 9-25.
- [18] Hladik, M. (2010). Generalized linear fractional programming under interval uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 205(1), 42-46.
- [19] Borza, M., Rambely, A. S., Saraj, M. (2012). Solving linear fractional programming problems with interval coefficients in the objective function. A new approach. *Applied Mathematical Sciences*, 6, 3443- 3452.
- [20] Jeyakumar, V., Li, G., Srisatkunarajah, S. (2013). Strong duality for robust minimax fractional programming problems. *European Journal of Operational Research*, 228(2), 331-336.
- [21] Sun, X. K., Chai, Y. (2014). On robust duality for fractional programming with uncertainty data. *Positivity*, 18, 9-28.
- [22] Mostafaeae, A., Hladik, M. (2020). Optimal value bounds in interval fractional linear programming and revenue efficiency measuring. *Central European Journal of Operational Research*, 28(3), 963-981.
- [23] Salary Pour Sharif Abad, F., Allahdadi, M., Mishmast Nehi, H. (2020). Interval linear fractional programming: optimal value range of the objective function. *Computational and Applied Mathematics*, 260-271.
- [24] Zhou, F., Huang, G. H., Chen, G. X., Guo, H. C. (2009). Enhanced-interval linear programming. *European Journal of Operational Research*, 199, 323-333.
- [25] Moore, R. E. (1979). *Method and Application of Interval Analysis*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 74-79.

- [26] Ishibuchi, H., Tanaka, H. (1990). Multi objective programming in optimization of the interval objective function. *European Journal of Operational Research*, 48(2), 219-225.
- [27] Darvishi, D., Forrest, J., Liu, S. (2019). A comparative analysis of grey ranking approaches. *Grey Systems Theory and Application*, 9(4), 472-487.
- [28] Hansen, H., Walster, G. W. (1992). *Global Optimization Using Interval Analysis: Second Edition, Revised and Expanded*. New York: Dekker.
- [29] Fiedler, M., Nedoma, J., Ramik, J., Rohn, J., Zimmermann, K. (2006). *Linear optimization problems with inexact data*. Springer, New York.
- [30] Tong, S. C. (1994). Interval number, fuzzy number linear programming. *fuzzy sets and systems*, 66, 301-306.
- [31] Alefeld, G., Herzberger, J. (1983). *Introduction to Interval Computations*. New York: Academic Press.
- [32] Salary Pour Sharif Abad, F., Allahdadi, M., Mishmast Nehi, H. (2020). Interval Linear Fractional Programming Problem: Optimal Solution Range of the Decision Variables. *Thai Journal of Mathematics*, submitted.