

## حل برنامه ریزی دو سطحی<sup>۱</sup> با الگوریتم جستجوی ممنوع<sup>۲</sup>

سیدرضا حجازی

دانشجوی دکترای دانشکده مهندسی صنایع و سیستم - دانشگاه صنعتی اصفهان

عزیز اله معماریانی

استادیار بخش مهندسی صنایع - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

محمد مهدی سپهری

استادیار بخش مهندسی صنایع - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

غلامرضا جهانشاهلو

استاد بخش ریاضی - دانشگاه تربیت معلم

(تاریخ دریافت ۷۹/۶/۶، تاریخ تصویب ۸۰/۵/۳۰)

### چکیده

برنامه ریزی دو سطحی ابزاری برای مدلسازی مسئله تصمیم گیری غیر متمرکز است. که در آن تصمیم گیرنده سطح یک و دو بترتیب رهبر و پیرو گفته می شوند. ثابت شده است که مسئله برنامه ریزی دو سطحی یک مسئله  $Np\_hard$  است. روشهای زیادی برای حل این مسئله ارائه شده است؛ اما کارایی محاسباتی<sup>۳</sup> آنها در حدی نیست که بتوانند مسائل بزرگ را حل کنند. در این مقاله سعی شده است روشی بر اساس جستجوی ممنوع برای حل مسئله برنامه ریزی دو سطحی توسعه داده شود. این روش از روشهای فراابتکاری<sup>۴</sup> است که می تواند مسائل بزرگ را نیز تا رسیدن به یک جواب نزدیک به جواب بهینه حل کند. در این مقاله همچنین با حل مسائل متعدد روش پیشنهادی با روش ارائه شده توسط ماتيو و همکارانش [۱] مقایسه شده است.

**واژه های کلیدی:** برنامه ریزی ریاضی، برنامه ریزی دوسطحی، روشهای فراابتکاری، جستجوی ممنوع

### مقدمه

$$\text{Max}_x F(x, y) = c_1x + d_1y$$

$$\text{Max}_y f(x, y) = c_2x + d_2y$$

$$\text{st: } \begin{cases} A_1x + A_2y \leq b \\ x, y \geq 0 \end{cases}$$

(۱)

که در آن  $F(x, y)$  تابع هدف رهبر و  $f(x, y)$  تابع هدف پیرو می باشد، همچنین  $x$  و  $y$  متغیرهای را نشان می دهند که بترتیب تحت کنترل تصمیم گیرنده سطح یک و دو هستند.

نقطه  $(x_0, y_0)$  را یک نقطه شدنی می گوئیم اگر در محدودیتهای مدل (۱) صدق کند و آن را یک نقطه قابل دستیابی برای تصمیم گیرنده سطح یک می گوئیم اگر

بیشتر مدل‌های ریاضی شامل یک تصمیم گیرنده و یک تابع هدف هستند، که برای برنامه ریزی متمرکز بکار می روند؛ اما برنامه ریزی ریاضی دو سطحی برای تصمیم گیری غیرمتمرکز توسعه داده شده است. در برنامه ریزی دو سطحی (BLP) که تصمیم گیرنده سطح یک آن را رهبر و سطح دو آن را پیرو می گوئیم، هر تصمیم گیرنده سعی می کند تابع هدف خود را بدون توجه به هدف قسمت دیگر بهینه کند؛ اما تصمیم هر تصمیم گیرنده بر مقدار تابع هدف و فضای تصمیم گیری سطح دیگر اثر می گذارد. شکل ریاضی برنامه ریزی دوسطحی بصورت زیر است:

حل این مسئله است؛ در این روش فرآیند جستجو از ناحیه غیر قابل دستیابی شروع شده و اولین نقطه قابل دستیابی که پیدا شود، الگوریتم متوقف می شود و این نقطه جواب بهینه مسئله BLP است.

بیالاس و کاروان [۴] همچنین روشی را پیشنهاد کرده اند که از یک نقطه رأسی ناحیه قابل دستیابی جستجو را آغاز می کند؛ اما این روش ممکن است در یک جواب بهینه نسبی<sup>۱۱</sup> متوقف شود.

الگوریتم دیگری بنام GSA<sup>۱۲</sup> توسط برد [۵] و بنام BCP<sup>۱۳</sup> توسط انلو [۶] بر پایه برنامه ریزی خطی دو معیاری توسعه داده شده است؛ ولی این روش توسط کندلر [۷]، کلارک و وستبرگ [۸]، ون و سو [۹]، بن ایاد و بلایر [۱۰] و بالاخره توسط مارکوت و ساوارد [۱۱] با ارائه مثالهای نقض مورد انتقاد قرار گرفته و نشان داده شده است که مفاهیم پارتو و بهینگی برنامه ریزی دو سطحی کاملاً متفاوت بوده و نمی توان آنها را بسادگی بهم ارتباط داد.

#### ب - روشهایی بر اساس شرایط کوهن-تاکر

در این دسته از روشها شرایط کوهن-تاکر برای تابع هدف سطح دوم جایگزین شده و مسئله با تابع هدف سطح یک حل می شود. آمارت و مک کارل [۱۲] برای حل این مسئله محدودیتهای مکمل<sup>۱۴</sup> بوجود آمده را به محدودیتهای خطی با متغیرهای صفر و یک تبدیل کرده و مسئله را حل می کنند. بیالاس و کاروان [۴،۳] الگوریتم چرخش لولایی مکمل پارامتری<sup>۱۵</sup> (PCP) را توسعه داده اند، در این روش تابع هدف سطح یک بصورت محدودیتی بشکل  $c_1x + d_1y \leq \alpha$  به محدودیتهای مسئله اضافه شده و به یک مسئله مکمل خطی<sup>۱۶</sup> (LCP) تبدیل می شود؛ اگر این مسئله شدنی باشد، با افزایش  $\alpha$  می توان به یک جواب بهتر دست یافت؛ اگر در مرحله ای، LCP شدنی نباشد، جواب شدنی مرحله قبل جواب مسئله مورد نظر با این روش است.

برد و مور [۱۳] نیز روش شاخه و کرانی برای حل این مسئله توسعه داده اند. همچنین وایت و آناندالینگام [۱۴] و آناندالینگام و وایت [۱۵] با اضافه کردن یک تابع

برای  $x = x_0$ ،  $y_0$  جواب بهینه مسئله سطح دوم باشد. مسئله سطح دوم بصورت زیر تعریف می شود [۳].

$$\begin{aligned} \max \quad & d_2y + c_2x_0 \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} A_2y \leq b - A_1x_0 \\ y \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن  $x_0$  توسط سطح یک تعیین شده است. همچنین مجموعه تمام نقاط قابل دستیابی را ناحیه قابل دستیابی<sup>۱۷</sup> مسئله BLP می گوئیم که زیر مجموعه ای از مجموعه جوابهای شدنی BLP است و لزوماً یک مجموعه محدب نیست. هدف از حل مسئله BLP، بدست آوردن نقطه ای از فضای قابل دستیابی است که به ازاء آن مقدار تابع هدف سطح یک، روی ناحیه قابل دستیابی بهینه شده باشد. از ویژگیهای مهم ناحیه قابل دستیابی این است که، مجموعه نقاط رأسی<sup>۱۸</sup> آن، زیر مجموعه نقاط رأسی فضای شدنی است و جواب بهینه BLP نیز یکی از این نقاط رأسی است.

روشهای ارایه شده برای حل این مسئله را می توان بصورت زیر دسته بندی کرد:

- الف - روشهایی بر اساس شمارش رئوس<sup>۱۹</sup>
- ب - روشهایی بر اساس شرایط کوهن-تاکر
- پ - نگرش فازی<sup>۲۰</sup> برای حل BLP
- ت - روشهای فراابتکاری برای حل BLP

#### الف - روشهایی بر اساس شمارش رئوس

اساس این دسته از روشها بر این ایده استوار است که نقاط رأسی ناحیه قابل دستیابی برای مسئله BLP، زیرمجموعه نقاط رأسی فضای شدنی مسئله مورد نظر است و جواب بهینه مسئله نیز یکی از این نقاط رأسی است.

اولین روش بر این اساس را فالک [۲] برای مسئله Max\_Min که یک مورد خاص از BLP است، توسعه داده است. در این روش نقاط رأسی مسئله سطح یک، با یک روش شاخه و کران<sup>۲۱</sup> جستجو می شود. بیالاس و کاروان [۳] الگوریتمی تحت عنوان K-امین بهترین<sup>۲۲</sup> ارایه کرده اند که یکی از روشهای مهم توسعه داده شده برای

توسعه داده شده است و نقاط رأسی فضای قابل دستیابی را جستجو می کند.

جریمه<sup>۱۷</sup> بعنوان بخشی از تابع هدف سطح یک، جهت ارضاء محدودیتهای مکمل، مسئله مورد نظر را حل کرده اند.

### بکارگیری TS برای حل BLP

#### معرفی روش جستجوی ممنوع

این روش بطور کلی شامل دو قسمت است که عبارتند از:

الف - فرآیند رفتن به یک جواب بهینه نسبی

ب - فرآیند خروج از نقطه بهینه نسبی

در روش جستجوی ممنوع ابتدا با استفاده از شیوه های موجود، یک جواب شدنی اولیه برای مسئله بدست می آید. سپس با اعمال حرکت های تعریف شده، مجموعه جواب های همسایگی جواب فعلی ارزیابی شده و حرکتی که بیشترین بهبود در تابع هدف می دهد، اعمال می شود تا جواب شدنی بعدی بدست آید و بدلیل اینکه جواب های تکراری تولید نشود و الگوریتم در یک حلقه بسته قرار نگیرد، این حرکت در لیست حرکت های ممنوع قرار می گیرد. با تکرار این فرآیند پس از چند مرحله یک جواب بهینه نسبی بدست می آید. این فرآیند، فرآیند رفتن به یک جواب بهینه نسبی گفته می شود.

بمنظور اینکه الگوریتم در یک نقطه بهینه نسبی متوقف نشود، هر حرکت ممنوع، پس از چند مرحله اجرای الگوریتم دو باره مجاز می شود؛ و یا اینکه پس از چند مرحله اجرای الگوریتم، بطریقی که به ماهیت مسئله بستگی دارد فضای جستجو تغییر داده می شود تا الگوریتم از نقطه بهینه نسبی خارج شود و به نقطه بهینه نسبی دیگر برود، این فرآیند، فرآیند خروج از نقطه بهینه نسبی گفته می شود. با تکرار دو فرآیند فوق نهایتاً الگوریتم به سمت جواب بهینه مطلق خواهد رفت.

### تعاریف و قضایای اولیه لازم برای حل BLP

مدل برنامه ریزی دو سطحی (۱) را در نظر می گیریم؛ در ابتدا شرایط کوهن-تاکر را برای مسئله سطح دوم نوشته و در مدل جایگزین می کنیم. در این صورت خواهیم داشت [۳،۴]:

### پ - نگرش فازی برای حل BLP

با این نگرش در سال ۱۹۹۶ روشی توسط شیبه و همکارانش [۱۶] ارایه شده است که پس از آن ساکاوا، نیشی زاکی و یومورا [۱۷] این روش را با اصلاحاتی ارایه کرده اند. در این روش اصل عدم همکاری<sup>۱۸</sup> که یکی از اصول اساسی BLP است حذف شده است و در واقع روشی برای رسیدن به یک جواب توافقی ارایه شده است.

### ت - روش های فرا ابتکاری برای حل BLP

در این زمینه در سال ۱۹۹۴ ماتئو، پیتارد و آناندالینگام [۱] روشی بر اساس الگوریتم ژنی<sup>۱۹</sup> ارایه کرده اند، روش ارایه شده، تمام ناحیه قابل دستیابی را جستجو می کند و هر کروموزوم<sup>۲۰</sup> شدنی آن معرف یک جواب قابل دستیابی BLP است.

سahین و سیریت [۱۸] روشی بر اساس سیمولیتد اننیلینگ ارایه کرده اند. ایده اصلی این روش بسط فضای جستجو با فازی سازی مسئله و جستجوی تصادفی بکمک زنجیره های مارکوف<sup>۲۱</sup> است. آنها مسائل کم و کوچکی را حل و گزارش کرده اند که گزارش ارایه شده نشان می دهد، این روش کارایی محاسباتی مناسبی برای حل برنامه ریزی دو سطحی خطی را ندارد. بعنوان نمونه مسئله اول گزارش شده که یک برنامه ریزی دو سطحی خطی است، دارای سه متغیر و پنج محدودیت است که الگوریتم آنها در حدود ۴۴ ثانیه آن را حل می کند؛ اما بهر حال این روش قادر است هر برنامه ریزی دو سطحی مانند خطی، غیر خطی یا عدد صحیح را حل کند.

روش نیز بر اساس الگوریتم ژنی توسط حجازی و همکارانش [۱۹] توسعه داده شده است که در این روش هر کروموزوم شدنی معرف یک نقطه رأسی ناحیه قابل دستیابی است و نسبت به روش ماتئو، پیتارد و آناندالینگام [۱] فضای بسیار محدود تری را جستجو می کند.

روشی که در این مقاله ارایه می شود بر اساس TS

صفر قرار می دهیم در این صورت در مدل (۴)،  $v_j, y_j$  همواره مساوی صفر خواهد بود. بدین ترتیب مدل (۴) بگونه ای ساخته می شود که مجموعه جوابهای شدنی آن زیر مجموعه ای از مجموعه جوابهای شدنی مدل (۳) باشد.

تعریف ۱: یک رشته اعداد بطول  $m + n_2$  که هر جزء آن عدد صفر یا یک باشد را یک جواب الگوریتم TS می نامیم.

تعریف ۲: اگر مدل (۴)، متناظر یک جواب TS شدنی باشد، این جواب TS را شدنی و در غیر این صورت آن را نشدنی می گوئیم.

با توجه به تعاریف فوق، فضای جوابهای TS برای مدل (۳) گسسته و تعداد جوابهای آن  $2^{m+n_2}$  است، که برخی از آنها شدنی و برخی نشدنی هستند.

قضیه ۱: فرض کنیم مجموعه جوابهای مدل (۳)، S باشد و N تعداد جوابهای شدنی TS باشد که فضای جوابهای شدنی مدل (۴)، مربوط به هر کدام را با  $A_1, A_2, \dots, A_N$  نشان دهیم، آنگاه داریم؛

$$S = \bigcup_{i=1}^N A_i$$

اثبات: بدیهی است که هر جواب متعلق به  $A_i$  (  $i=1,2,\dots,N$  )، چون تمام محدودیتهای مدل (۳) را ارضاء می کند متعلق به S نیز است، یعنی داریم:

$$\bigcup_{i=1}^N A_i \subseteq S \quad (a_1)$$

از طرف دیگر اگر جوابی مانند  $(x_0, y_0, u_0, v_0, z_0)$  متعلق به S باشد؛ آنگاه به ازاء  $(i=1,2,\dots,m)$ ،  $u_{0i} z_{0i} = 0$ ؛ باید حتماً  $u_i$  و یا  $z_i$  مساوی صفر باشد. در این صورت جواب TS مانند P را می سازیم؛ بطوریکه اگر  $u_{0i}$  مساوی صفر است، جزء  $i$ ام از m جزء اول آن عدد یک باشد، اگر  $u_{0i}$  بزرگتر از صفر است، جزء  $i$ ام مساوی صفر باشد و اگر  $u_{0i}$  و  $z_{0i}$  هر دو مساوی صفر باشند؛ آنگاه این جزء می تواند بطور اختیاری عدد صفر یا یک انتخاب شود.

همچنین بازاء  $(j=1,2,\dots,n_2)$ ؛  $v_{0j} y_{0j} = 0$ ؛

حتماً باید  $v_{0j}$  و یا  $y_{0j}$  مساوی صفر باشد. اگر  $y_{0j}$

$$\text{Max } c_1 x + d_1 y$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} A_1 x + A_2 y + u = b \\ z A_2 - v = d_2 \\ uz = 0, vy = 0 \\ x, y, z, u, v \geq 0 \end{cases}$$

(۳)

مدل (۳) یک برنامه ریزی ریاضی غیر خطی است. اگر  $u, v, z, y$  ها را بگونه ای محدود کنیم که محدودیتهای  $uz = 0$  و  $vy = 0$  برقرار باشد، می توانیم این محدودیتهای را حذف کرده و برنامه ریزی خطی زیر را داشته باشیم، که فضای جوابهای شدنی آن بخشی از فضای جوابهای شدنی مدل (۳) است.

$$\text{Max } c_1 x + d_1 y'$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} A_1 x + A_2 y' + u' = b \\ z' A_2' - v' = d_2 \\ x, y', z', u', v' \geq 0 \end{cases}$$

(۴)

برای ساختن مدل (۴) با ویژگی ذکر شده (هر جواب شدنی مدل (۴) یک جواب شدنی مدل (۳) باشد)، از یک رشته اعداد به طول  $m + n_2$  که هر عدد (جزء) آن می تواند صفر یا یک باشد، بعنوان راهنمای تغییرات استفاده می کنیم. که m تعداد محدودیتهای مدل (۱) و  $n_2$  تعداد متغیرهای تحت کنترل تصمیم گیرنده سطح دو یا اندازه بردار  $y$  است.

نحوه تغییر مدل (۳) با استفاده از رشته اعداد تعریف شده به این صورت است که، m جزء اول این رشته را متناظر m معادله  $uz = 0$  و  $n_2$  جزء آخر آن را متناظر  $n_2$  معادله  $vy = 0$  در نظر می گیریم. اگر جزء  $i$ ام از m جزء اول عدد یک باشد، در مدل (۴)  $u_i$  را مساوی صفر قرار می دهیم. و اگر جزء  $i$ ام از m جزء اول عدد صفر باشد، در مدل (۴)  $z_i$  را مساوی صفر قرار می دهیم تا همواره  $u_i z_i$  در مدل (۴) مساوی صفر باشد. همچنین اگر جزء  $i$ ام از بین  $n_2$  جزء آخر رشته اعداد مورد نظر عدد یک باشد، در مدل (۴)  $y_j$  را مساوی صفر قرار می دهیم و اگر این جزء عدد صفر باشد، در مدل (۴)  $v_j$  را مساوی

می کنیم، اگر این مسئله شدنی باشد، آنگاه P نیز یک جواب شدنی TS خواهد بود و در غیر این صورت P یک جواب نشدنی TS است.

**قضیه ۲:** جواب بهینه بدست آمده از مدل (۴) مربوط به یک جواب شدنی TS، متناظر یک نقطه رأسی ناحیه قابل دستیابی مدل (۱) است.

**اثبات:** فرض کنیم جواب بهینه مدل (۴)  $(x_0, y_0, u_0, v_0, z_0)$  باشد. چون این جواب یک جواب مدل (۳) است، در شرایط کوهن-تاکر برای مسئله سطح دوم نیز صدق می کند، پس یک جواب قابل دستیابی برای مدل (۱) خواهد بود؛ اما از طرفی  $(x_0, y_0, u_0)$  جواب بهینه مدل (۵) است، در نتیجه یک جواب پایه برای این مسئله است؛ یعنی ستونهای  $A_1$  و  $A_2$  متناظر با مؤلفه های مخالف صفر  $x_0$  و  $y_0$  مستقل خطی هستند. پس  $(x_0, y_0)$  یک نقطه رأسی  $\{A_1x + A_2y \leq b; x, y \geq 0\}$  خواهد بود. از طرفی گفتیم این جواب یک جواب قابل دستیابی است، پس  $(x_0, y_0)$  یک نقطه رأسی ناحیه قابل دستیابی برای مدل (۱) است.

با توجه به قضیه ۲، الگوریتمی که توسعه داده می شود نقاط رأسی ناحیه قابل دستیابی را جستجو و ارزیابی می کند.

**قضیه ۳:** اگر مسئله (۶)، برای یک جواب TS مانند P نشدنی باشد؛ هر جواب TS دیگری مانند Q که اجزاء صفر P در آن نیز صفر باشد، نشدنی است. **اثبات:** فرض کنیم مسئله (۶)، متناظر P بصورت زیر باشد:

$$\begin{cases} z^* A_2^T - v^* = d_2 \\ z^*, v^* \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

در این مدل بعضی از  $z_i$  ها و  $v_j$  ها مساوی صفر هستند. اگر مسئله (۶) متناظر Q بصورت زیر باشد:

$$\begin{cases} z'' A_2^T - v'' = d_2 \\ z'', v'' \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

در این مدل علاوه بر  $z_i$  و  $v_j$  هایی که در (۷) مساوی

مساوی صفر است، در P، جزء  $n_2$  از آخر را برابر عدد یک قرار می دهیم و اگر  $y_{0j}$  بزرگتر از صفر است، این جزء را صفر قرار می دهیم و در صورتیکه  $v_{0j}$  و  $y_{0j}$  هر دو صفر باشند، جزء مورد نظر را بطور اختیاری عدد صفر یا یک انتخاب می کنیم.

بدین ترتیب P یک جواب شدنی TS خواهد بود که  $(x_0, y_0, u_0, v_0, z_0)$ ، یک جواب شدنی مدل (۴) متناظر آن است. پس می توان نتیجه گرفت:

$$S \subseteq \bigcup_{i=1}^N A_i \quad (a_2)$$

از روابط  $(a_1)$  و  $(a_2)$  نتیجه می شود که:

$$S = \bigcup_{i=1}^N A_i$$

**روش حل مدل (۴)**

برای حل مدل (۴) متناظر یک جواب TS، می توان ابتدا این مدل را به دو مسئله کاملاً از هم جدا بصورت زیر تجزیه کرد:

$$\text{Max } c_1x + d_1y'$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} A_1x + A_2y' + u' = b \\ x, y', u' \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} z^* A_2^T - v^* = d_2 \\ z^*, v^* \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

چون دو مسئله (۵) و (۶) هیچ متغیر مشترکی ندارند تجزیه فوق مجاز است. حال اگر هر دو مسئله فوق شدنی باشد، مدل (۴) شدنی است در غیر این صورت مدل (۴) نشدنی است.

**پروسی شدنی بودن یک جواب TS**

برای اینکه تعیین کنیم یک جواب TS مانند P شدنی است یا نه، ابتدا مسئله (۵) متناظر آن را می سازیم و حل می کنیم، اگر نشدنی باشد آنگاه P نیز نشدنی خواهد بود. در غیر این صورت مسئله (۶)، متناظر P را حل

مساری صفر قرار داده شده بود، می تواند بزرگتر یا مساوی صفر بشود، که موجب گسترش فضای شدنی مسئله (۵) می شود، در نتیجه چون مسئله (۵) قبلاً" شدنی بود اکنون نیز شدنی خواهد بود. از آنجاییکه فضای شدنی گسترش پیدا می کند بدتر نشدن مقدار بهینه تابع هدف مسئله نیز بدیهی است.

**قضیه ۶:** اگر P یک جواب شدنی TS باشد و یک جزء آن از صفر به یک تغییر کند، مسئله (۶) متناظر جواب جدید نیز شدنی خواهد بود.

**اثبات:** با تغییر یک جزء P از صفر به یک، طبق قواعد تعریف شده یکی از متغیرهای Z یا v که در مسئله (۶) مساری صفر قرار داده شده بود، می تواند بزرگتر یا مساوی صفر بشود، که موجب گسترش فضای شدنی مسئله (۶) می شود، در نتیجه چون مسئله (۶) قبلاً" شدنی بود اکنون نیز شدنی خواهد بود.

نکته قابل ذکر دیگر در اینجا تعریف حرکت های الگوریتم است. حرکت هایی که در این الگوریتم برای رفتن از یک جواب به جواب دیگر استفاده می شود بصورت زیر تعریف می شود.

**تعریف ۳:** اگر P یک جواب TS باشد، حرکت جابجایی در P عبارت است از تغییر مقدار دو جزء از P که یکی صفر و دیگری یک است.

**تعریف ۴:** تغییر مقدار یک جزء جواب شدنی TS از یک به صفر یا بعکس را یک حرکت جهشی می گوئیم.

لازم بذکر است در الگوریتمی که توسعه داده می شود حرکت های ممنوع با توجه به ماهیت مسئله عبارتند از؛ الف - حرکت هایی که نتیجه آنها یک جواب نشدنی TS است.

ب - حرکت هایی که ممکن است باعث کاهش مقدار تابع هدف مسئله (۵) (تابع هدف سطح یک) بشوند. (این ممنوعیت در قسمت حرکت بسمت یک نقطه بهینه نسبی بکار می رود).

#### نحوه ساختن جواب شدنی اولیه الگوریتم TS

برای ساختن جواب اولیه الگوریتم ابتدا مدل شماره (۱۱) را حل می کنیم:

صفر هستند، ممکن است  $Z_i$  و  $v_j$  های دیگری نیز صفر باشند، به همین دلیل فضای شدنی (۸) زیر مجموعه ای از فضای شدنی (۷) است؛ پس می توان نتیجه گرفت اگر (۷) نشدنی باشد، (۸) نیز نشدنی است؛ یعنی Q نیز یک جواب نشدنی TS خواهد بود.

**قضیه ۴:** اگر مسئله (۵)، برای یک جواب TS مانند P نشدنی باشد؛ هر جواب دیگری مانند Q که اجزاء عدد یک P در آن نیز عدد یک باشد، نیز نشدنی است.

**اثبات:** فرض کنیم مسئله (۵) متناظر P بصورت زیر باشد:

$$\text{Max } c_1x + d_1y \textcircled{C}$$

$$\text{s.t. : } \begin{cases} A_1x + A_2y \textcircled{C} + u \textcircled{C} = b \\ x, y \textcircled{C}, u \textcircled{C} \geq 0 \end{cases}$$

(۹)

در مدل (۹) بعضی از مؤلفه های بردارهای  $y$  و  $u$  مساوی صفر هستند. اگر مسئله (۵) متناظر Q بصورت زیر باشد:

$$\text{Max } c_1x + d_1y''$$

$$\text{s.t. : } \begin{cases} A_1x + A_2y'' + u'' = b \\ x, y'', u'' \geq 0 \end{cases}$$

(۱۰)

آنگاه در این مدل علاوه بر  $u_i$  و  $y_j$  هاییکه در مدل (۹) مساوی صفر هستند ممکن است  $u_i$  و  $y_j$  های دیگری نیز مساوی صفر باشند؛ به همین دلیل فضای شدنی مدل (۱۰) زیر مجموعه فضای شدنی مدل (۹) خواهد بود؛ بنابر این اگر مدل (۹) نشدنی باشد مدل (۱۰) نیز نشدنی است؛ یعنی Q نیز یک جواب نشدنی TS است. از قضایای ۳ و ۴ برای تشخیص جوابهای TS نشدنی قبل از حل مدل های (۵) و (۶) و با استفاده از اطلاعات مراحل قبل در الگوریتم مورد نظر استفاده خواهد شد.

**قضیه ۵:** اگر P یک جواب شدنی TS باشد و یک جزء آن از یک به صفر تغییر کند، مسئله (۵) متناظر جواب جدید نیز شدنی خواهد بود. و مقدار بهینه تابع هدف آن بدتر نخواهد شد. (یا بهتر می شود یا تغییر نمی کند).

**اثبات:** با تغییر یک جزء P از یک به صفر، طبق قواعد تعریف شده یکی از متغیرهای  $y$  یا  $u$  که در مسئله (۵)

می رویم.

- در غیر این صورت بدون تغییر Q به گام سه

می رویم.

گام سه : - اگر معیار توقف برقرار است، به گام چهار

می رویم.

- در غیر این صورت؛ با یک حرکت جهشی که در آن یک

جزء صفر P به یک تغییر می کند یا با یک حرکت

جابجایی فضای جواب را تغییر داده و به گام یک می رویم.

گام چهارم : جواب مسئله (۵) متناظر Q را بعنوان جواب

BLP مورد نظر با این الگوریتم معرفی می کنیم و

الگوریتم پایان می یابد.

$$\text{Max } d_2 y + c_2 x_0$$

$$\begin{cases} A_2 y \leq b - A_1 x_0 \\ y \geq 0 \end{cases}$$

$$y \geq 0$$

(۱۱)

سپس یک جواب TS مانند P را به این صورت

می سازیم که اگر  $u_i$  بزرگتر از صفر باشد، جزء  $u_i$  از m

جزء اول P را مساوی عدد صفر و در غیر این صورت آن را

برابر یک قرار می دهیم. همچنین اگر  $z_j$  بزرگتر از صفر

باشد، جزء  $z_j$  از  $n_2$  جزء آخر P را مساوی عدد صفر و در

غیر این صورت آن جزء را برابر یک قرار می دهیم. بدین

ترتیب P بعنوان یک جواب شدنی الگوریتم TS ساخته

می شود.

## تجزیه و تحلیل نتایج محاسباتی

برای تجزیه و تحلیل نتایج محاسباتی الگوریتم

توسعه داده شده، مسائل برنامه ریزی خطی را با نرم افزار

LINDO حل می کنیم و یک برنامه رابط به زبان ++C

نوشته شده است که جوابهای بدست آمده از حل

مسئله های خطی توسط LINDO را گرفته و طبق

الگوریتم توسعه داده شده جواب BLP مورد نظر را

جستجو می کند.

در این بخش ابتدا  $TS_1$  را با حرکت جهشی و  $TS_2$

را با حرکت جابجایی برای خروج از نقطه بهینه نسبی

مورد بررسی قرار می دهیم و با حل مسائل مختلف اثر  $n_0$

بر کارایی محاسباتی هر دو الگوریتم را بررسی می کنیم؛

سپس کارایی محاسباتی  $TS_1$  و  $TS_2$  را با هم مقایسه

می کنیم تا TS مناسب تعیین شود. در انتها با حل مسائل

مختلف این روش را با روش GA ارایه شده توسط ماتيو و

همکارانش [۱] مقایسه می کنیم.

بررسی اثر مقدار  $n_0$  بر کارایی محاسباتی  $TS_1$  و  $TS_2$

برای بررسی اثر مقدار  $n_0$  بر کارایی محاسباتی هر

دو الگوریتم، چهار گروه مسئله با اندازه های مختلف حل

شده است. (هر گروه شامل هفت مسئله است). متوسط

زمان رسیدن به جواب مورد نظر در هر گروه برای  $TS_1$  در

جدول شماره (۱) و برای  $TS_2$  در جدول شماره (۲) ارایه

شده است.

## گامهای الگوریتم TS برای حل BLP

گام صفر: با روشی که در بخش قبل توضیح داده شد، یک

جواب شدنی اولیه مانند P برای ادامه الگوریتم

می سازیم. این جواب را با نام Q بعنوان بهترین جواب

پیدا شده تا به حال، نگهداری می کنیم.  $n \leftarrow 0$  و به گام

یک می رویم.

گام یک: ۱- اگر  $n \geq n_0$ : به گام دو می رویم.  $n_0$  تعداد

حرکات در هر مرحله صعود به نقطه بهینه نسبی است.

۲- در غیر این صورت؛ یک عدد صحیح مانند  $r$  را از بین

اعداد یک تا  $n_2 + m$  بطور تصادفی انتخاب می کنیم.

- اگر جزء  $r$  از جواب P صفر باشد به ۲ بر می گردیم.

- در غیر این صورت، مسئله (۶) متناظر P تغییر یافته را

بررسی می کنیم.

- اگر این مسئله نشدنی باشد. حرکت ممنوع است،  $n \leftarrow$

$n+1$  بدون تغییر P به ۱ بر می گردیم.

- در غیر این صورت حرکت ممنوع نیست،  $n+1 \leftarrow n$ ، P

را تغییر داده و به ۱ بر می گردیم.

گام دو: - اگر P نسبت به مرحله قبل تغییر نکرده است

به گام سه می رویم.

- در غیر این صورت مسئله (۵) متناظر P را حل

می کنیم، این مسئله حتماً شدنی است.

- اگر مقدار بهینه تابع هدف آن بهتر از مقدار بهینه تابع

هدف مسئله (۵) متناظر Q باشد  $P \leftarrow Q$  و به گام سه

جدول ۱: متوسط زمان رسیدن به جواب مورد نظر با استفاده از TS<sub>1</sub>

n <sub>0</sub> =	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
۷-۴-۵	۳/۹۶	۲/۹۲	۱/۸۰	۲/۳۴	۳/۰۶	۲/۸۷	۲/۴۵	۲/۷۱	۴/۲۰	-	-	-
۱۰-۶-۹	۱۱/۷	۱۹/۰۴	۹/۱۹	۱۲/۹۸	۱۲/۵۹	۱۶/۰۶	۱۹/۱۲	۱۲/۲۷	۱۸/۵۷	۱۶/۶۱	-	-
۱۵-۸-۱۰	-	-	۱۶/۱۰	۱۶/۱۵	۷/۵۳	۱۲/۳۹	۸/۵۴	۲۱/۱۵	۱۴/۴۵	۱۶/۳۵	-	-
۱۷-۷-۱۲	-	-	-	-	۷۵/۱۵	۴۰/۷۰	۵۱/۵۴	۲۹/۰۱	۵۵/۷۴	۲۱/۱۳	۷۵/۱۳	۵۸/۹۴

جدول ۲: متوسط زمان رسیدن به جواب مورد نظر با استفاده از TS<sub>2</sub>

n <sub>0</sub> =	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
۷-۴-۵	۲/۱	۱/۷۹	۱/۲۸	۱/۶۷	۲/۶۴	۲/۲۷	۳/۲۱	۲/۴۹	۳/۳۰	۳/۸۲	-	-	-
۱۰-۶-۹	-	۱۷/۹	۱۱/۹	۱۶/۸۴	۱۴/۳۱	۹/۲۹	۱۰/۰۷	۱۳/۳۵	۱۷/۴۵	۱۵/۳۷	-	-	-
۱۵-۸-۱۰	-	-	-	۲۸/۳۲	۴۵/۴۳	۳۳/۹۰	۱۶/۵	۱۲/۴۶	۲۰/۵۲	۹/۱۲	۱۸/۰۶	۱۲/۳۸	۱۴/۶
۱۷-۷-۱۲	-	-	-	-	-	۶۵/۵۳	۸۵/۹۳	۵۷/۲۰	۶۵/۳۴	۶۹/۴۴	۵۷/۴۵	۳۵/۰۲	۴۶/۵

نخستین این رشته، مقادیر متغیرهای تحت کنترل تصمیم گیرنده رهبر و  $n_2$  عدد باقیمانده مقادیر متغیرهای تحت کنترل تصمیم گیرنده پیرو هستند. و در واقع هر کروموزوم شدنی در این روش یک جواب قابل دستیابی BLP است؛ اما این جواب لزوماً یک نقطه راسی فضای قابل دستیابی نیست.

جدول ۳: متوسط زمان رسیدن به جواب با استفاده از TS<sub>1</sub> و TS<sub>2</sub>.

m-n <sub>1</sub> -n <sub>2</sub>	t <sub>TS1</sub>	n <sub>0</sub> TS1	t <sub>TS2</sub>	n <sub>0</sub> TS2
۷-۴-۵	۱/۸۰	۳	۱/۲۸	۳
۱۰-۶-۹	۹/۱۹	۳	۹/۲۹	۶
۱۵-۸-۱۰	۷/۵۳	۵	۹/۱۲	۱۰
۱۷-۷-۱۲	۲۱/۱۳	۱۰	۳۵/۰۲	۱۲

در الگوریتم GA ارایه شده دو روش برای تولید جمعیت نسل جدید استفاده شده است. روش اول تولید تصادفی مقدار متغیرهای تصمیم گیرنده رهبر و بدست آوردن متغیرهای تصمیم گیرنده پیرو با استفاده از حل مسئله سطح دوم است و روش دیگر استفاده از فرایند جهش است که در این روش یک یا چند جزء از  $n_1$  جزء اول یک کروموزوم موجود را تغییر داده و  $n_2$  جزء آخر آن، با حل مسئله سطح دوم پس از اعمال تغییرات بدست می آید. در فرایند جهش این الگوریتم حدود تغییر اجزاء در هر مرحله تغییر می کند و بتدریج کاهش پیدا می کند وقتی این حدود تغییر از مقدار کوچکی مانند  $\epsilon$  کمتر شود

با توجه به جدول شماره (۱) بهترین مقدار  $n_0$  در چهار گروه از مسائل مورد نظر بترتیب ۵،۳،۳ و ۱۲ است. همانطور که پیداست با بزرگ شدن اندازه مسئله مقدار مناسب  $n_0$  نیز بزرگتر می شود، اما رابطه مشخصی نمی توان بین اندازه مسئله و مقدار مناسب  $n_0$  برقرار کرد. همچنین با توجه به جدول شماره (۲) بهترین مقدار  $n_0$  در چهار گروه از مسائل مورد نظر بترتیب ۱۰،۶،۳ و ۱۲ است. که می توان این مقادیر را از رابطه  $[ (m + n_2)/2 - 2.5 ]$  بدست آورد.

#### مقایسه TS<sub>1</sub> و TS<sub>2</sub>

برای مقایسه TS<sub>1</sub> و TS<sub>2</sub>، بهترین حالت حل مسائل قسمت قبل بطور خلاصه در جدول شماره (۳) ارایه شده است. با توجه به اطلاعات این جدول در مسائل گروه دوم، سوم و چهارم TS<sub>1</sub> کارایی بهتری داشته است و فقط در مسائل گروه اول TS<sub>2</sub> در متوسط زمان کمتری به جواب رسیده است، بنابراین TS<sub>1</sub> بعنوان الگوریتم TS مورد نظر پذیرفته می شود.

#### مقایسه روش GA ارایه شده توسط ماتئو و همکارانش با روش TS پیشنهادی

ماتئو و همکارانش [۱] روشی بر پایه الگوریتم ژنی برای حل BLP ارایه کرده اند. در این روش هر کروموزوم یک رشته اعداد حقیقی بطول  $n_1+n_2$  است.  $n_1$  عدد



جدول ۴: مقایسه روش پیشنهادی با روش ماتیو و همکارانش.

شماره مسائل	m-n <sub>1</sub> -n <sub>2</sub>	t <sub>TS</sub>	Δ <sub>TS</sub>	t <sub>GA</sub>	Δ <sub>GA</sub>
۱	۶-۱-۳	۰/۵۵	۰/۰۰	۳/۵۱	۲۲/۸۰
۲	۵-۴-۵	۱/۳۰	۰/۰۰	۱۲/۵۹	۳۳/۷۴
۳	۷-۴-۵	۳/۱۶	۰/۰۰	۱۵/۴۰	۴۲/۱۶
۴	۸-۵-۶	۴/۵۳	۰/۰۰	۳۳/۱۰	۵۰/۱۲
۵	۹-۶-۸	۵/۹۰	۰/۰۰	۲۵/۷۰	۵۰/۰۶
۶	۱۰-۸-۵	۱۵/۲۵	۰/۰۰	۶۷/۶۳	۸۰/۴۷
۷	۱۱-۷-۱۰	۱۸/۳۸	۰/۰۰	-	-
۸	۱۵-۱۰-۱۰	۲۸/۳۳	۰/۳۴	-	-
۹	۲۵-۱۵-۱۵	۱۵۳/۶۰	۷/۵۳	-	-
۱۰	۳۰-۱۵-۲۰	۱۸۷/۵۹	۸/۶۱	-	-

همچنین از نظر متوسط زمان رسیدن به جواب نیز روش TS پیشنهادی در زمانهای بسیار کمتری به جواب رسیده است.

بنابر این روش TS با توجه به مسائل حل شده هم از نظر زمان رسیدن به جواب وهم از نظر کیفیت جواب بدست آمده برتری مشخصی نسبت به روش GA ارایه شده توسط ماتیو و همکارانش دارد.

### خلاصه و نتیجه گیری

روشهای فراابتکاری برای کاهش پیچیدگی محاسباتی ارایه شده اند و می توانند در حل BLP که یک مسئله Np\_hard است مؤثر باشند.

هدف از تهیه این مقاله توسعه روشی براساس الگوریتم TS برای حل BLP بوده است. در روش توسعه داده شده، ابتدا شرایط کوهن-تاکر برای مسئله سطح دوم نوشته می شود تا مسئله بصورت یک برنامه ریزی یک هدفی با محدودیتهای مکمل تبدیل شود، سپس با تعریف یک جواب TS، برای مدل تبدیل شده، و بیان چند قضیه اساسی روش TS برای حل BLP توسعه داده شده است، که این روش نقاط رآسی فضای قابل دستیابی را جستجو و ارزیابی می کند.

پس از تخمین مقدار مناسب پارامترهای الگوریتم

الگوریتم متوقف شده و بهترین جواب بدست آمده را بعنوان جواب BLP گزارش می کند.

در این مقاله مقایسات با دو عامل زمان انجام محاسبات برای رسیدن به جواب مورد نظر (واحد ثانیه) و کیفیت جواب بدست آمده که بصورت زیر سنجیده می شود انجام می شود:

$$\Delta = ((F^* - F) / F^*) \times 100$$

بطوریکه  $F^*$  مقدار بهینه تابع هدف سطح یک و  $F$  مقدار بدست آمده با استفاده از الگوریتمهای TS و GA برای تابع هدف سطح یک است. هر چه قدر  $\Delta$  برای یک جواب کمتر باشد آن جواب بهتر است.

برای مقایسه دو الگوریتم ده گروه از مسائل با اندازه های مختلف که در هر گروه پنج مسئله قرار دارد حل شده است و نتایج بدست آمده در جدول شماره (۴) ارایه شده است. با توجه به دادههای جدول شماره (۴) در هفت گروه اول از مسائل  $\Delta_{TS}$  برای روش TS پیشنهادی صفر است یعنی روش پیشنهادی جواب بهینه را بدست آورده است و در سه گروه آخر نیز  $\Delta_{TS}$  کوچکتر یا مساوی ۸/۶۱٪ است.

در حالیکه برای روش GA در شش گروه اول از مسائل  $\Delta_{GA}$  حداقل ۲۲/۸٪ است و در چهار گروه آخر، الگوریتم GA بترتیب در زمانهای ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ ثانیه هیچ جوابی بدست نیاورده است.

برنامه ریزی دوسطحی با الگوریتم ژنی آماده کرده اند که در دست چاپ می باشد؛ همچنین تحقیقات آتی برای بکارگیری روشهای فراابتکاری دیگر و تعیین بهترین روش فراابتکاری برای حل BLP ادامه دارد.

### قدردانی

از داوران محترم این مقاله که نظرات ارزنده آنها باعث بهبود کیفیت مقاله شده است، تشکر و سپاسگزاری می کنیم.

توسعه داده شده با حل مسائل متعدد، این روش با روش GA ارایه شده توسط ماتیو و همکارانش [۱] مقایسه شده است. نتایج محاسبات نشان می دهد که روش TS پیشنهادی هم از نظر زمان محاسبات و هم از نظر کیفیت جواب بدست آمده برتری زیادی نسبت به روش ماتیو و همکارانش دارد.

در زمینه استفاده از روشهای فراابتکاری برای حل BLP مؤلفین این مقاله تحقیقاتی را انجام داده اند، که علاوه بر مقاله حاضر مقاله ای تحت عنوان حل

### مراجع

- 1 - Mathiue, R., Pittard, L. and Anandalingam, G. (1994). , "Genetic algorithm based approach to bilevel linear programming." *Recherche Op rationnelle / Operations Research*, Vol. 28, No. 1, PP.1-21.
- 2 - Falk, J. E. (1973). "A linear max-min problem." *Math. Prog.*, Vol. 5, PP. 169-188 .
- 3 - Bialas, W. F. and Karwan, M. H. (1982). "On two-level optimization." *IEEE Trans. Autom. Control*, Vol. 27, No. 1, PP. 11-214.
- 4 - Bialas, W. F. and Karwan, M. H. (1983). "Two-level linear programming." *Mgmt. Sci.*, Vol. 30, PP. 1004 – 1020.
- 5 - Bard, J. F. (1983). "An efficient point algorithm for a linear two-stage optimization problem." *Ops. Res.*, Vol. 38, PP. 670-684.
- 6 - nl , G. (1987). "A linear bilevel programming algorithm based on bicritria programming." *Comput. Ops. Res.* , Vol. 14, PP. 173-179.
- 7 - Candler, W. (1983). "A linear bilevel programming algorithm : a comment." *Comput. Ops. Res.*, Vol. 15, No. 3, PP. 297-298.
- 8 - Clark, P. A. and Westerberg, A. W. (1988). "A note on the optimality conditions for the bilevel programming problem." *Nav. Res. Logist. Q.* , Vol. 35, 413-418,1988.
- 9 - Wen, U.P., and Hsu, S.T., "A Note on a Linear Bilevel Programming Algorithm Based on Bicriteria programming," *Comput. Ops. Res.*, Vol. 16, No. 1, PP. 79-83.
- 10 - Ben\_Ayed, O. and Blair, C. E. (1990). "Computational difficulties of bilevel linear programming." *Ops. Res.*, Vol. 38, PP. 556-560.
- 11 - Marcotte, P. and Savard, G. (1991). "A not on the pareto optimality of solutions to the linear bilevel programming problem." *Comput. Ops. Res.*, Vol. 18, No. 4, PP. 355-359.
- 12 - Fortuny\_Amat, J. and McCarl, B. (1981). "A representation and economic interpretation of a two-level programming problem." *J. Opl. Res. Soc.*, Vol. 32, PP. 783-792.
- 13 - Bard, J. F. and Moore, J. T., (1990). "A branch and bound algorithm for the bilevel programming problem." *SIAM J. Sci. Stat. Comput.*, Vol. 11, No. 2, PP. 281-292.

- 14 - White, D. J. and Anandalingam, G. (1973). "A penalty function approach for solving bilevel linear programs." *J. Glob. Optimiz.*, Vol. 3, PP. 397-419.
- 15 - Anandalingam, G. and White, D. J. (1990). "A solution for the linear static stackelberg problem using penalty functions." *IEEE Trans. Autom. Control*, Vol. 35, PP. 1170-1173.
- 16 - Shih, S. H., Lai, Y. J. and Lee, E. S. (1983). "Fuzzy approach for multi-level programming problem." *Comput. Ops. Res.*, Vol. 23, No. 1, PP. 773-791.
- 17 - Sakava, M., Nishizaki, I. and Uemura, Y. (1997). "Interactive fuzzy programming for multilevel linear programming problem." *Comput. Math. Applic.*, Vol. 6, PP. 71-86.
- 18 - Sahin, K. H. and Cirit, A. R. (1998). "A dual temperature simulated annealing approach for solving bilevel programming problems." *Computers Chemical Engineering*, Vol. 23, PP. 11-25.
- 19 - Hejazi, S. R., Memariani, A., Jahanshahloo, G. and Sepehri, M. M. (1999). "Bilevel programming solution by genetic algorithm." (Communicated).

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Bilevel Programming
- 2 - Tabu Search (TS)
- 3 - Computational Efficiency
- 4 - Modern Heuristic Method
- 5 - Vertex Points
- 6 - Accessible Region
- 7 - Vertex Enumeration
- 8 - Fuzzy Approach
- 9 - Branch and Bound
- 10 - Kth\_Best
- 11 - Local Optima
- 12 - Grid Search Algorithm (GSA)
- 13 - Bicriteria Programming (BCP)
- 14 - Complementary Constraints
- 15 - Parametric Complementary Pivot
- 16 - Linear Complementary Problem (LCP)
- 17 - Penalty Function
- 18 - Noncooperative Principle
- 19 - Genetic Algorithm
- 20 - Chromosome
- 21 - Markov Chains

