یک روش شبه دینامیکی برای حل مسئله توسعه سیستم‌های انتقال

محمدرضا حبیبی فتح‌آبادی[1] مسعود رشیدی نژاد[2] امیر عبداللهی[3]

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان- کرمان- ایران
m.habibi@student.kgut.ac.ir

۲- استاد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید باهنر کرمان - کرمان- ایران
mrashidi@uk.ac.ir

۳- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید باهنر کرمان - کرمان- ایران
a.abdollahi@uk.ac.ir

چکیده: یکی از روش‌های حل مسئله چندمرحله‌ای توسعه سیستم‌های انتقال، شکستن آن به چند مسئله تک‌مرحله‌ای است. این شیوه، حل «شبه دینامیکی» مسئله نام دارد. در روشهای شبه دینامیکی موجود از بهترین جواب یافت شده برای مسائل تک‌مرحله‌ای در حل مسئله چندمرحله‌ای استفاده شده است و به اهمیت سایر بهینه‌های محلی یافت شده توجهی نشده است. در این مقاله، با فرمول‌بندی مجدد مسئله، رابطه‌ای بین جواب بهینه مسئله چندمرحله‌ای و مجموعه جواب‌های بهینه محلی مسائل تک‌مرحله‌ای یافت می‌شود. سپس با استفاده از این رابطه، روشی شبه دینامیکی برای حل مسئله پیشنهاد می‌شود. استفاده از مجموعه بهینه‌های محلی فضای جستجو را افزایش داده و احتمال رسیدن به جواب را بیشتر می‌کند. روش پیشنهادی بر روی سیستم‌های ۲۴ باسه IEEE، ۹۳ باسه کلمبیا، ۵۷ باسه بولیوی و سیستم ۵۱ باسه جنوب شرق ایران پیاده‌سازی گردید و نتایج حاصل، کارایی این روش را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: **توسعه سیستم‌های انتقال، مسئله توسعه شبکه‌های انتقال چندمرحله‌ای، روش‌های شبه دینامیکی.**

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۵/۱۱/۰۳

تاریخ پذیرش مشروط مقاله : ۱۳۹۶/۰۴/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۶/۱۰/۱۶

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر مسعود رشیدی نژاد

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران – کرمان – انتهای بلوار ۲۲ بهمن – دانشگاه شهید باهنر کرمان – دانشکده‌ی برق

۱- مقدمه

توسعه سیستم‌های انتقال به معنای احداث خطوط و تجهیزات جدید در شبکه است، به‌طوری‌که شبکه برای برآورده ساختن قیود بهره‌برداری سیستم آماده گردد. به دلیل هزینه بالای این فرآیند، یافتن الگوی بهینه توسعه شبکه از اهمیت بالایی برخوردار است. یافتن این الگوی بهینه تحت عنوان یک مسئله ریاضی به نام «مسئله توسعه سیستم‌های انتقال»[۱] مطرح می‌گردد [۱].

این مسئله از نظر نحوه در نظر گرفتن زمان به دو حالت برنامه‌ریزی تک‌مرحله‌ای[۲] و چندمرحله‌ای[۳] تقسیم می‌گردد [۲ و ۳]. در مسئله تک‌مرحله‌ای فرض می‌گردد که تمامی خطوط بایستی در ابتدای شروع برنامه‌ریزی به شبکه اضافه شوند. در مقابل، مسئله چندمرحله‌ای بازه زمانی برنامه‌ریزی را به چند زیربازه تقسیم و خطوطی که بایستی در هر افق زمانی به شبکه اضافه شوند را مشخص می‌سازد [۴]. در مسئله چندمرحله‌ای ، هدف کمینه کردن مجموع ارزش فعلی هزینه‌ها در طول بازه زمانی برنامه‌ریزی است [۵].

مسئله چندمرحله‌ای به دلیل در نظر گرفتن زمان، مسئله پیچیده‌تری نسبت به مسئله تک‌مرحله‌ای است [۶]. محدودیت‌های پردازشی یکی از عوامل مهمی است که توسعه مدل‌های چندمرحله‌ای را دشوار می‌سازد [۷]. روش‌های شبه دینامیکی به‌منظور کاهش حجم پردازشی مسئله ارائه‌شده‌اند [۸].

در روش‌های شبه دینامیکی، مسئله چندمرحله‌ای به تعدادی مسئله تک‌مرحله‌ای شکسته می‌شود [۹]. به دلیل ساختار ساده‌تر مسائل تک‌مرحله‌ای ، این روش‌ها موجب ساده‌تر شدن حل و توسعه مسئله می‌گردند. این سادگی می‌تواند توسعه مدل‌های جدید را تسهیل کند [۱۰]. تاکنون مدل‌های باارزشی در قالب مسئله تک‌مرحله‌ای ارائه شده‌اند، مانند برنامه‌ریزی با در نظر گرفتن مسائلی ازجمله قابلیت اطمینان، منابع توان راکتیو، ادوات FACTS و غیره [۱۱-۱۵]. وجود یک روش شبه دینامیکی کارآمد می‌تواند ورود این مدل‌ها به مسئله چندمرحله‌ای را ساده کند.

از معروف‌ترین روش‌های شبه دینامیکی می‌توان به روش‌های پیشرو[۴]، پسرو[۵] و پیشرو-پسرو[۶] اشاره نمود [۹]. در روش پیشرو، ابتدا برنامه‌ریزی تک‌مرحله‌ای برای اولین افق برنامه‌ریزی انجام می‌گیرد. سپس با در مدار نگه‌داشتن خطوط اضافه‌شده در هر افق زمانی، برنامه‌ریزی برای افق‌های زمانی بعدی انجام می‌گیرد [۱۶]. در روش پسرو، ابتدا برنامه‌ریزی تک‌مرحله‌ای برای آخرین افق زمانی انجام می‌گیرد. سپس برنامه‌ریزی برای افق‌های زمانی قبل‌تر انجام می‌گیرد؛ به‌طوری‌که خطوط اضافه‌شده در هر افق زمانی به‌عنوان یک حد بالا برای خطوط اضافه‌شده در افق زمانی قبل از آن در نظر گرفته می‌شود [۱۷]. به‌طور معمول، روش پسرو جواب بهتری نسبت به روش پیشرو ایجاد می‌کند. در روش پیشرو – پسرو، برنامه‌ریزی با اعمال متوالی فرآیندهای پیشرو و پسرو انجام می‌شود که امکان دستیابی به یک جواب بهتر را فراهم می‌آورد [۱۸].

روش‌های پسرو و پیشرو-پسرو در بسیاری از موارد می‌توانند جواب‌هایی نزدیک به جواب بهینه ایجاد نمایند؛ اما این روش‌ها دارای محدودیت‌های ذاتی اند که در برخی سیستم‌ها، مانع از دستیابی به جواب بهینه مطلق می‌گردد [۹]. به‌طور مثال درصورتی‌که در جواب بهینه مطلق مسئله چندمرحله‌ای ، تعداد خطوط اضافه شونده در آخرین افق زمانی برابر با جواب بهینه مطلق مسئله تک‌مرحله‌ای متناظرش نباشد، روش پسرو قادر به دستیابی به جواب بهینه مطلق مسئله چندمرحله‌ای نخواهد بود.

در [۱۹]، روشی جهت کاهش فضای جستجوی مسئله چندمرحله‌ای با توجه به جواب مسائل تک‌مرحله‌ای ارائه‌شده است. در این روش، پس از حل مسائل تک‌مرحله‌ای برای افق‌های زمانی مختلف، تنها اضافه کردن خطوطی در مسئله چندمرحله‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرند که حداقل در جواب یکی از مسائل تک‌مرحله‌ای ظاهر شده باشند. در [۱۹] نشان داده شده است که این روش در حالت کلی دارای جوابی بهتر از روش‌های پیشرو و پسرو است؛ اما در این روش، پس از کاهش فضای جستجو نیاز به حل یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی با اعداد صحیح وجود دارد که تعمیم آن به مدل‌های کامل‌تر مسئله را دشوار می‌سازد.

در این مقاله، ابتدا یک فرمول‌بندی جدید از مسئله چندمرحله‌ای ارائه می‌شود که در آن در مدار آوردن تمامی خطوط اضافه‌شده، الزامی تلقی نمی‌شود. نشان داده می‌شود که با لحاظ نمودن این امکان، رابطه‌ای بین جواب بهینه مطلق مسئله چندمرحله‌ای و مجموعه جواب‌های بهینه مطلق مسائل تک‌مرحله‌ای متناظر یافت می‌شود. سپس بر اساس این رابطه، روش شبه دینامیکی پیشنهادی ارائه می‌گردد.

برخلاف روش‌های شبه‌دینامیکی موجود که تنها از بهترین جواب یافت شده در روند حل مسائل تک‌مرحله‌ای استفاده می‌نمایند، روش پیشنهادی از مجموعه بهینه‌های محلی یافت شده استفاده می‌کند که امکان پوشش محدوده بزرگ‌تری از فضای مسئله را فراهم می‌آورد. افزایش فضای جستجو موجب رفع محدودیتهای ذاتی روش‌های شبه‌دینامیکی می‌گردد. برخلاف [۱۹]، این روش برای ترکیب جواب‌های مسائل تک‌مرحله‌ای نیاز به حل مسائل بهینه سازی پیچیده‌ای ندارد که این موضوع تعمیم این روش به سایر مدلهای مسئله را تسهیل می‌نماید. همچنین به دلیل حذف یک قید غیرضروری از مسئله، جواب حاصل در برخی موارد بهتر از روش‌های مرسوم است.

مباحث مطرح‌شده در بخش‌های بعدی مقاله به‌صورت زیر است: در بخش دوم، به‌مرور فرمول‌بندی رایج و ارائه فرمول‌بندی جدید پرداخته می‌شود. در بخش سوم، به ارائه رابطه یافت شده بین بهینه‌های محلی دو مسئله پرداخته می‌شود. در بخش چهارم، به مرور روشهای شبه

دینامیکی رایج پرداخته می‌شود. در بخش پنجم روش پیشنهادی شرح داده می‌شود. در بخش ششم به ارائه نتایج عددی پرداخته می‌شود و در پایان، بخش هفتم به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲- مدل‌سازی ریاضی مسئله

همان‌گونه که پیش از این بیان شد، مسئله توسعه سیستم‌های انتقال به دو صورت تک‌مرحله‌ای و چندمرحله‌ای مدل‌سازی می‌شود. در ادامه به مروری بر نحوه مدل‌سازی ریاضی این دو مسئله پرداخته می‌شود:

۲-۱- مدل‌سازی ریاضی مسئله تک‌مرحله‌ای

مسئله تک‌مرحله‌ای، به یافتن مجموعه خطوطی می‌پردازد که اضافه شدن آن‌ها به شبکه موجب برآورده سازی قیود بهره‌برداری با کمترین هزینه می‌گردد. تاکنون مدل‌های مختلفی برای فرمول‌بندی مسئله تک‌مرحله‌ای پیشنهادشده است که یکی از آن‌ها، مدل DC است. در این مدل، قیود الکتریکی حاکم بر مسئله بر اساس معادلات پخش بار DC مدل‌سازی می‌شوند [۱۴]. مسئله تک‌مرحله‌ای برای افق زمانی t به‌صورت زیر بیان می‌شود [۲۰]:

۲-۱-۱- تابع هدف مسئله تک‌مرحله‌ای:

تابع هدف این مسئله، کمینه کردن هزینه توسعه شبکه است. در مدل DC، این هزینه با معادله زیر بیان می‌شود:

$$\min C(\mathrm{n})=\sum_{l=1}^{L} n_l \times c_l \qquad (۱)$$

در این معادله، n_l تعداد خطوط اضافه‌شده در مسیر l ام، $n=\{n_l\}$ بیانگر مجموعه خطوط اضافه‌شده و $\mathrm{C}(n)$ هزینه اضافه شدن این خطوط را نمایش می‌دهد. c_l بیانگر هزینه اضافه شدن یک خط در مسیر l ام و L بیانگر تعداد کل مسیرهاست.

۲-۱-۲- قیود بهره‌برداری:

در مدل DC، شبکه طراحی‌شده بایستی بتواند قیود پخش بار DC مربوط به افق زمانی t را بدون وقوع اضافه‌بار بر روی خطوط برآورده سازد. در این مقاله، قید مذکور به‌طور خلاصه به‌صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$n=\{n_l\}\in OC^t \qquad (۲)$$

که در آن، OC^t بیانگر قیود بهره‌برداری مربوط به افق زمانی t است.

۲-۱-۳- قیود مربوط تعداد خطوط:

تعداد خطوط احداث شونده در مسیر l نمی‌تواند از یک تعداد مشخص‌شده که در اینجا با $\bar{N}_l$ نمایش داده می‌شود بیشتر باشد. همچنین بدیهی است که تعداد خطوط احداث شونده بایستی یک عدد صحیح باشد؛ بنابراین:

$$0\le n_l \le \bar{N}_l, \quad \forall 1\le l\le L \qquad (۳)$$

$$n_l \ integer, \quad \forall 1\le l\le L \qquad (۴)$$

اگر مجموعه قیود بهره‌برداری و قیود مربوط به تعداد خطوط با نماد OPC^t نمایش داده شود، مسئله تک‌مرحله‌ای را می‌توان به فرم فشرده زیر بازنویسی نمود:

$$\min C(n) \qquad (۵)$$

$$n\in OPC^t \qquad (۶)$$

۲-۲- مدل‌سازی ریاضی مسئله چندمرحله‌ای

در این قسمت، به مرور مسئله چندمرحله‌ای پرداخته می‌شود. در مسئله چندمرحله‌ای، هدف مشخص ساختن تعداد و زمان احداث خطوط در هر مسیر است؛ به‌طوری‌که مجموع ارزش فعلی هزینه‌های توسعه شبکه کمینه گردد و قیود بهره‌برداری نیز برآورده شوند. در [۲۰] مدل‌سازی این مسئله در قالب یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی با اعداد صحیح آورده شده است. در ادامه به‌مرور تابع هدف و قیود مسئله پرداخته می‌شود:

۲-۲-۱- تابع هدف مسئله چندمرحله‌ای

با در نظر گرفتن یک نرخ استهلاک سرمایه (که در اینجا با I نمایش داده می‌شود)، تابع هدف مسئله چندمرحله‌ای به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\min \sum_{s=1}^{S}[(1-\mathrm{I})^{t_s-t_0}\sum_{l=1}^{L} n_l^s \times c_l] \qquad (۷)$$

که در آن S بیانگر تعداد افق زمانی، t_s بیانگر زمان متناظر با افق زمانی s و t_0 بیانگر زمان حال است. همچنین n_l^s نماینده تعداد خطوطی است که در بازه زمانی t_{s-1} تا t_s در مسیر l احداث می‌گردند. در [۲۰] با تعریف $\delta_{inv}^{t_s}=(1-\mathrm{I})^{t_s-t_0}$، معادله (۷) به‌صورت زیر نوشته شده است:

$$\min \sum_{s=1}^{S}[\delta_{inv}^{t_s}\sum_{l=1}^{L} n_l^s \times c_l] \qquad (۸)$$

۲-۲-۲- قیود بهره‌برداری مسئله چندمرحله‌ای

به‌منظور برآورده ساختن قیود بهره‌برداری، خطوطی که در هر افق زمانی در مدار حضور دارند بایستی توانایی برآورده ساختن معادلات پخش بار DC را بدون وقوع اضافه‌بار داشته باشند. در فرمول‌بندی رایج

مسئله، امکان قطع کردن خطوط موجود در زمان بهره‌برداری لحاظ نمی‌شود. به‌بیان‌دیگر، فرض می‌شود که تمامی خطوط احداث‌شده تا زمان t_s بایستی در این زمان در مدار قرار گیرند. این یک قید عملیاتی نیست و صرفاً به دلیل ساده‌سازی فرمول‌بندی در مسئله گنجانده شده است. تعداد خطوط احداث‌شده تا زمان t_s که در اینجا برابر است با نماد $\hat{\mathrm{N}}_l^s$ نمایش داده می‌شود، برابر است با:

$$\hat{\mathrm{N}}_l^s=\sum_{s'=1}^{s} n_l^{s'}$$ (۹)

با توجه به توضیحات ذکرشده، قیود بهره‌برداری مسئله چندمرحله‌ای به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\hat{N}^s=\{\hat{N}_l^s\}\in OC^{t_s},\ \forall 1\le s\le ns .$$ (۱۰)

۲-۲-۳- قیود مربوط تعداد خطوط:

تعداد خطوطی که تا آخرین افق برنامه‌ریزی به شبکه اضافه می‌شوند، نباید از محدودیت تعداد خطوط اضافه شونده بیشتر شود. همچنین تعداد خطوطی که در هر بازه زمانی اضافه می‌شود باید یک عدد صحیح باشد.

$$0\le \hat{N}_l^S \le \bar{N}_l,\quad \forall 1\le l\le L$$ (۱۱)

$$n_l^s\ integer,\quad \forall 1\le l\le L, \forall 0\le s\le S$$ (۱۲)

۲-۳- فرمول‌بندی مجدد مسئله چندمرحله‌ای

همان‌گونه که پیش از این بیان شد، در فرمول‌بندی معمول مسئله از امکان در مدار نیاوردن خطوط اضافه‌شده به شبکه صرف‌نظر شده است؛ اما در ادامه نشان داده می‌شود که لحاظ نمودن این امکان، شکستن یک مسئله چندمرحله‌ای را به مسائل کوچک‌تر تک‌مرحله‌ای ممکن می‌نماید. ازاین‌رو در این بخش با ارائه یک فرمول‌بندی جدید، این امکان در مسئله لحاظ می‌شود.

در این مقاله، مجموعه تعداد خطوطی که قرار است در زمان t_s در مدار قرار گیرند با $N^s=\{N_l^s\}$ نمایش داده می‌شوند. به‌منظور دستیابی به هدف مذکور، معادلات بر اساس N^s بازنویسی می‌شود.

در افق زمانی s بایستی حداقل به تعداد خطوطی که قرار است در مدار قرار گیرند، خط احداث‌شده وجود داشته باشد؛ بنابراین:

$$N_l^s\le \hat{N}_l^s,\ \forall 1\le s\le S$$ (۱۳)

با توجه به رابطه فوق و در نظر گرفتن اینکه $\hat{N}_l^{s'}\le \hat{N}_l^s,\ \forall s'\le s$، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$N_l^{s'}\le \hat{N}_l^s,\ \forall s'\le s,\ \forall 1\le s\le S$$ (۱۴)

بنابراین:

$$\max_{1\le s'\le s} N_l^{s'}\le \hat{N}_l^s,\ \forall 1\le s\le S .$$ (۱۵)

واضح است که به دلیل هزینه‌بر بودن احداث خطوط، تعداد خطوط احداث شونده ($\hat{N}_l^s$) باید حداقل مقداری انتخاب شود که شرط فوق را برآورده می‌سازد؛ بنابراین:

$$\hat{N}_l^s=\max_{1\le s'\le s} N_l^{s'},\ \forall 1\le s\le S .$$ (۱۶)

با توجه به رابطه (۹):

$$\mathrm{n}_l^s=\begin{cases}\hat{N}_l^1 & ,\ s=1\\ \hat{N}_l^s-\hat{N}_l^{s-1}, & s\ge 2\end{cases}$$ (۱۷)

$$\mathrm{n}_l^s=\begin{cases}N_l^1 & ,\ s=1\\ \max\limits_{1\le s'\le s} N_l^{s'}-\max\limits_{1\le s'\le s-1} N_l^{s'}, & s\ge 2\end{cases}$$ (۱۸)

با جایگذاری (۱۳) و (۱۸) در فرمول‌بندی مسئله چندمرحله‌ای و با توجه به اینکه قیود بهره‌برداری بایستی توسط خطوط موجود در مدار برآورده گردند، فرمول‌بندی مسئله چندمرحله‌ای به‌صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$\begin{aligned}&\min\ (\delta_{inv}^{t_1}\sum_{l=1}^{L} N_l^1\times c_l\\ &+\sum_{s=2}^{S}[\delta_{inv}^{t_s}\sum_{l=1}^{L}(\max_{1\le s'\le s} N_l^{s'}-\max_{1\le s'\le s-1} N_l^{s'})\times c_l])\end{aligned}$$ (۱۹)

$$N^s=\{N_l^s\}\in OC^{t_s},\ \forall 1\le s\le ns .$$ (۲۰)

$$0\le N_l^{s'}\le \bar{N}_l,\quad \forall 1\le l\le L$$ (۲۱)

$$N_l^s\ integer,\quad \forall 1\le l\le L, \forall 0\le s\le S$$ (۲۲)

قیود (۲۰)، (۲۱) و (۲۲) را می‌توان با قید $N^s\in OPC^{t_s}$ جایگزین نمود؛ بنابراین:

$$\begin{aligned}&\min\ (\delta_{inv}^{t_1}\sum_{l=1}^{L} N_l^1\times c_l\\ &+\sum_{s=2}^{S}[\delta_{inv}^{t_s}\sum_{l=1}^{L}(\max_{1\le s'\le s} N_l^{s'}-\max_{1\le s'\le s-1} N_l^{s'})\times c_l])\end{aligned}$$ (۲۳)

$$N^s\in OPC^{t_s},\ \forall 1\le s\le S .$$ (۲۴)

به‌منظور سادگی، در اینجا تابع هدف مسئله به فرم خلاصه $C(N^1,N^2,\ldots,N^s)$ نمایش داده می‌شود:

$$\min C(N^1,N^2,\ldots,N^s)$$ (۲۵)

$$N^s\in OPC^{t_s},\ \forall 1\le s\le S .$$ (۲۶)

۳- بهینه‌های محلی و ارتباط دو مسئله

در این بخش پس از تعریف بهینه محلی، به بررسی رابطه بهینه‌های محلی دو مسئله تک‌مرحله‌ای و چندمرحله‌ای پرداخته می‌شود. یک مسئله توسعه سیستم‌های انتقال به فرم زیر را در نظر بگیرید:

$$\min C(N) \quad (۲۷)$$

$$N \in OPC^{t_s} \quad (۲۸)$$

که در آن، $C(N)$ نسبت به N صعودی باشد. به‌عبارت‌دیگر، در هیچ شرایطی مقدار $C(N)$ در اثر اضافه نمودن یک خط انتقال جدید به شبکه کاهش نیابد.

تعریف ۱: جوابی مانند N' یکی از بهینه‌های محلی مسئله فوق است، اگر دارای دو شرط زیر باشد:

- N' یک جواب کافی باشد. به‌عبارت‌دیگر $N' \in OPC^{t_s}$.
- N' هیچ خط غیرضروری نداشته باشد؛ یعنی با حذف هیچ‌یک از خطوط آن، نتوان به یک جواب کافی دیگر دست پیدا کرد.

در اینجا، مجموعه بهینه‌های محلی این مسئله با عبارت Π^s نماش داده می‌شود. جواب بهینه مطلق مسئله فوق، یکی از بهینه‌های محلی آن خواهد بود. همان‌گونه که در تعریف بهینه محلی مشاهده می‌گردد، مجموعه بهینه‌های محلی وابسته به قیود مسئله است؛ بنابراین در صورت تغییر تابع هدف مسئله، با این شرط که تابع هدف همچنان صعودی بماند، مجموعه بهینه‌های محلی بدون تغییر خواهد ماند.

حال مسئله چندمرحله‌ای (۲۵) را در نظر بگیرید. تابع $C(\mathrm{N}^1, N^2, \ldots, N^s)$ نسبت به هر یک از N^s ها صعودی است. به‌عبارت‌دیگر، تصمیم‌گیری برای در مدار آوردن یک خط جدید در هر یک از افق‌های زمانی، موجب کاهش مقدار تابع هدف نمی‌شود.

پاسخ بهینه مطلق مسئله چندمرحله‌ای ، مجموعه‌ای از N^s هاست به‌طوری که علاوه بر برآورده سازی قیود مسئله، مقدار تابع هدف را کمینه کند. از سویی، هر یک از N^s ها بایستی شرط $N^s \in OPC^{t_s}$ را برآورده نمایند و از سوی دیگر، در مدار آوردن خطوط اضافه در صورتی که به برآورده شدن قیود بهره‌برداری کمک نکند، موجب بهبود تابع هدف نمی‌شود. با توجه به این موضوع، هر یک از این N^s ها، یکی از بهینه‌های محلی مسئله (۲۷) خواهد بود. به‌عبارت‌دیگر:

$$N^s \in \Pi^s, \forall 1 \le s \le S \quad (۲۹)$$

قید (۲۹)، یک شرط لازم برای بهینه بودن جواب مسئله و یک شرط کافی برای برآورده ساختن قیود بهره‌برداری است؛ بنابراین فرمول‌بندی نهایی مسئله چندمرحله‌ای به‌صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$\min C(N^1, N^2, \ldots, N^s) \quad (۳۰)$$

$$N^s \in \Pi^s, \forall 1 \le s \le S\,. \quad (۳۱)$$

بر اساس فرمول‌بندی فوق، فضای جستجوی مسئله چندمرحله‌ای می‌تواند با توجه به مجموعه بهینه‌های محلی مسائل تک‌مرحله‌ای محدود گردد.

۴- روشهای شبه دینامیکی رایج

در این قسمت، به توضیح روشهای شبه دینامیکی پیشرو، پسرو و پیشرو-پسرو پرداخته می‌شود. این روشها از معروفترین و در عین حال ساده‌ترین روشهای شبه دینامیکی به شمار می‌آیند [۹]. الگوریتم این روشها به شرح زیر است:

۴-۱- روش پیشرو

در روش پیشرو، ابتدا برنامه‌ریزی تک‌مرحله‌ای برای اولین افق برنامه‌ریزی انجام می‌گیرد. به عبارت دیگر، تعداد خطوط اضافه شونده در افق زمانی اول از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\min C(\mathrm{N}^1) \quad (۳۲)$$

$$N \in OPC^1 \quad (۳۳)$$

سپس با در مدار نگه‌داشتن خطوط اضافه‌شده در هر افق زمانی، برنامه‌ریزی برای افق‌های زمانی بعدی انجام می‌گیرد. به بیان دیگر، تعداد خطوط اضافه شده در افق زمانی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\min C(\mathrm{N}^s) \quad (۳۴)$$

$$N \in OPC^s \quad (۳۵)$$

$$N_l^{s-1} \le N_l^s, \quad \forall 1 \le l \le L \quad (۳۶)$$

۴-۲- روش پسرو

در روش پسرو، ابتدا برنامه‌ریزی تک‌مرحله‌ای برای آخرین افق زمانی انجام می‌گیرد و تعداد خطوط اضافه شونده در آخرین افق زمانی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\min C(\mathrm{N}^S) \quad (۳۷)$$

$$N \in OPC^S \quad (۳۸)$$

سپس برنامه‌ریزی افق‌های زمانی قبل‌تر انجام می‌گیرد؛ به‌طوری‌که خطوط اضافه‌شده در هر افق زمانی به‌عنوان یک حد بالا برای خطوط اضافه‌شده در افق زمانی قبل از آن در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر به ازای $1 \le s < S$:

$$\min C(\mathrm{N}^S) \quad (۳۹)$$

$$N \in OPC^S \quad (۴۰)$$

$$N_l^s \le N_l^{s+1}, \quad \forall 1 \le l \le L \quad (۴۱)$$

با توجه به (۴۰) درصورتی‌که در جواب بهینه مطلق مسئله چندمرحله‌ای ، تعداد خطوط اضافه شونده در آخرین افق زمانی برابر با جواب بهینه مطلق مسئله تک‌مرحله‌ای متناظرش نباشد، روش پسرو قادر به دستیابی به جواب بهینه مطلق مسئله چندمرحله‌ای نخواهد بود. این موضوع یکی از محدودیتهای اساسی این روش در دستیابی به جواب بهینه مسئله را نشان می‌دهد.

۴-۳- روش پیشرو-پسرو

در روش پیشرو – پسرو، ابتدا برنامه ریزی آخرین افق زمانی بر اساس روش پیشرو انجام می‌گیرد. سپس با شروع از N^S بدست آمده از روش پیشرو، برنامه ریزی افقهای زمانی پیشین با استفاده از (۳۹) انجام می‌گیرد. این روش نیز دارای محدودیتهایی در زمینه یافتن پاسخ بهینه مسئله است، از جمله این که جواب بدست آمده برای آخرین افق زمانی از روش پیشرو نیز ممکن است تطابق کامل با معادل آن در جواب بهینه نداشته باشد.

۵- روش پیشنهادی

در این بخش، روش پیشنهادی برای حل مسئله (۳۰) ارائه می‌گردد. پیش از شرح روش، تعاریف زیر ارائه می‌گردد:

تعریف ۲: در این مقاله، یک دنباله از N^s ها به‌صورت $M=[N^1,N^2,\dots,N^{s'}]$ نمایش داده می‌شود. با توجه به فرمول‌بندی نهایی ارائه‌شده، جواب مسئله چندمرحله‌ای به فرم $M=[N^1,N^2,\dots,N^S]$است که در آن، N^s از اعضای Π^sاست.

تعریف ۳: افق زمانی دنباله $M=[N^1,N^2,\dots,N^{s'}]$ برابر با s' است.

تعریف ۴: $C(M)=C(N^1,N^2,\dots,N^{s'})$ بیانگر هزینه احداث خطوط لازم برای در مدار آوردن مجموعه خطوط دنباله $M=[N^1,N^2,\dots,N^S]$ در هر یک از افق‌های زمانی $0 \le s \le s'$ است. این مقدار با توجه به (۲۳) قابل محاسبه است.

تعریف ۵: تجمیع یک دنباله مانند $M=[N^1,N^2,\dots,N^{s'}]$ که با نماد $\hat{N}^{s'}=U(M)$ نمایش داده می‌شود، بیانگر مجموعه خطوطی است که احداث آن‌ها تا افق زمانی s'، به‌منظور در مدار آوردن دنباله M ضروری است. این مجموعه خطوط از رابطه (۱۶) به دست می‌آید.

تعریف ۶: الحاق N^{s+1} به دنباله $M=[N^1,N^2,\dots,N^s]$ که با نماد $M'=[M,N^{s+1}]$ نمایش داده می‌شود، دنباله‌ای به‌صورت $M=[N^1,N^2,\dots,N^s,N^{s+1}]$ است.

تعریف ۷: یک جامعه با افق زمانی s' که با نماد $\Gamma^{s'}$، مجموعه‌ای از دنباله‌ها با افق زمانی s' است.

تعریف ۸: تصادم جامعه Γ^s و مجموعه Π^{s+1}، جامعه‌ای مانند $\Gamma^{s+1}=\{[M,N^{s+1}] \mid M\in\Gamma^s, N^{s+1}\in\Pi^s\}$ است. جامعه حاصل، شامل تمام دنباله‌هایی است که از الحاق یک عضو از Γ^s و یک عضو از Π^{s+1} است.

تعریف ۹: پالایش جامعه Γ^s که با نماد $\widehat{\Gamma}^s$ نمایش داده می‌شود، با حذف اعضای ناکارآمد از Γ^s به دست می‌آید. به این منظور، در صورتی که دو عضو M_i و M_j متعلق به Γ^s باشند، اگر $C(M_i)\le C(M_j)$ و $U(M_j)$ هیچ خط انتقالی اضافه بر $U(M_i)$ نداشته باشد، M_i از جامعه مذکور حذف می‌گردد.

روش پیشنهادی بایستی دنباله M^S را به شکلی بیابد که مقدار تابع $C(M^S)$را کمینه سازد. این روش دارای مراحل زیر است:

۱- مسئله (۲۷) را برای هر افق زمانی، به‌طور مجزا حل نموده و مجموعه‌های Π^s را به دست آورید. حل مسئله تک‌مرحله‌ای بایستی با روشی انجام گیرد که یک مجموعه باکیفیت از بهینه‌های محلی ارائه نمایند. به این منظور، از روش معرفی‌شده در [۲۱] استفاده شد که با هدف دستیابی به یک مجموعه باکیفیت از بهینه‌های محلی طراحی گردیده است. کد نوشته شده برای این الگوریتم، تحت نرم‌افزار متلب، در [۲۲] قابل دسترسی است.

۲- هر یک از اعضای مجموعه Π^1 را به‌عنوان یک دنباله تک عضوی مانند $M=[N^1]$ در نظر بگیرید. مجموعه دنباله‌های مذکور، جامعه Γ^1 را تشکیل می‌دهند. جامعه Γ^1 هیچ عضو ناکارآمدی ندارد و بنابراین $\widehat{\Gamma}^1=\Gamma^1$.

۳- قرار دهید $s:=1$.

۴- با تصادم Γ^s و Π^s، جامعه Γ^{s+1} را تشکیل دهید. سپس جامعه $\widehat{\Gamma}^{s+1}$ را از طریق پالایش Γ^{s+1} به دست آورید.

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.16- No.3- Fall 2019

به‌منظور کاهش حجم محاسباتی و حافظه مورد نیاز، تنها تعداد مشخصی از اعضای $\widehat{\Gamma}^{s+1}$ که دارای کمترین هزینه اند را حفظ نموده و سایر اعضا را حذف نمایید. (در این کار، تعداد اعضای حفظ شونده برابر با ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است.)

۵- در صورتی که $s < S$، مقدار s را یک واحد افزایش داده و به مرحله ۴ باز گردید. در غیر این صورت، به مرحله ۶ بروید.

۶- در این مرحله، از میان اعضای $\widehat{\Gamma}^{S}$، عضوی مانند $M^* \in \widehat{\Gamma}^{S}$ که دارای کمترین مقدار $C(M^*)$ باشد، پاسخ بهینه مسئله چندمرحله‌ای را مشخص می‌سازد. لازم به یادآوری است که دنباله M^*، تعداد خطوطی را مشخص می‌سازد که بایستی در هر افق زمانی در مدار قرار گیرند (یعنی N_l^s). برای محاسبه تعداد خطوطی که بایستی در هر افق زمانی احداث گردند (یعنی n_l^s) از رابطه (۱۸) استفاده نمایید.

در بخش بعد، به بررسی نتایج حاصل از این روش پرداخته می‌شود. کد نوشته شده برای این الگوریتم، تحت نرم‌افزار متلب، در [۲۲] قابل دسترسی است.

۶- نتایج عددی

در این قسمت، سیستم ۲۴ باسه IEEE، سیستم ۹۳ باسه کلمبیا و سیستم ۵۷ باسه بولیوی جهت بررسی کارایی روش پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته اند. نتایج حاصل از اجرای این روش، با پاسخ بهینه گزارش‌شده در [۱۹ و ۲۳] و همچنین با جواب حاصل از روش‌های پیشرو، پسرو و پیشرو-پسرو مقایسه شده است.

۶-۱- سیستم ۲۴ باسه IEEE

این سیستم دارای سه افق زمانی، ۴۱ مسیر جهت احداث خطوط انتقال، ۱۰ ژنراتور و ۱۷ باس مصرف است. دارای ۸۵۵۰ مگاوات مصرف در افق زمانی اول، ۸۹۸۸ مگاوات در افق زمانی دوم و ۹۴۳۷ مگاوات در افق زمانی سوم است. در هر مسیر امکان احداث ۵ خط انتقال وجود دارد [۲۳]. اطلاعات این سیستم به همراه نرخ استهلاک سرمایه در [۲۲] قابل دسترسی است.

در جدول ۱، پاسخ بهینه به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی با پاسخ روش‌های دیگر مقایسه شده است:

جدول (۱): مقایسه پاسخ بهینه روش‌های مختلف برای سیستم ۲۴ باسه IEEE

هزینه	خطوط اضافه‌شده	روش
۲۲۰,۲۹	$n_{6-10}^1=1, n_{7-8}^1=2, n_{10-12}^1=1, n_{11-13}^1=1,$ $n_{20-23}^2=1, n_{1-5}^3=1, n_{3-24}^3=1.$	[۱۹]
۲۲۰,۲۹	$n_{6-10}^1=1, n_{7-8}^1=2, n_{10-12}^1=1, n_{11-13}^1=1,$ $n_{20-23}^2=1, n_{1-5}^3=1, n_{3-24}^3=1.$	[۲۳]
۲۸۴,۱۰	$n_{6-10}^1=1, n_{7-8}^1=2, n_{10-12}^1=1, n_{14-16}^1=1,$ $n_{1-5}^2=1, n_{3-24}^2=1, n_{13-14}^2=1, n_{15-24}^3=1.$	روش پیشرو
۲۲۰,۲۹	$n_{6-10}^1=1, n_{7-8}^1=2, n_{10-12}^1=1, n_{14-16}^1=1,$ $n_{1-5}^2=1, n_{3-24}^2=1, n_{13-14}^2=1, n_{15-24}^3=1.$	روش پسرو
۲۲۰,۲۹	$n_{6-10}^1=1, n_{7-8}^1=2, n_{10-12}^1=1, n_{14-16}^1=1,$ $n_{1-5}^2=1, n_{3-24}^2=1, n_{13-14}^2=1, n_{15-24}^3=1.$	روش پیشرو-پسرو
۲۲۰,۲۹	$n_{6-10}^1=1, n_{7-8}^1=2, n_{10-12}^1=1, n_{11-13}^1=1,$ $n_{20-23}^2=1, n_{1-5}^3=1, n_{3-24}^3=1.$	روش پیشنهادی

بهترین جواب یافت شده برای مسئله تک افقه مربوط به آخرین افق زمانی این سیستم، به صورت زیر است:

$$n_{1-5}=1, n_{3-24}=1, n_{6-10}=1, n_{7-8}=2, n_{10-12}=1, n_{11-13}=1, n_{20-23}=1.$$

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، این جواب شامل پاسخ بهینه به‌دست‌آمده از این روش برابر با پاسخ بهینه گزارش‌شده در [۱۹ و ۲۳] است. پاسخ بهینه این سیستم از طریق روش‌های شبه دینامیکی پسرو و پیشرو-پسرو نیز قابل‌دستیابی است. دلیل این موضوع آن است که جواب مسئله تک افقه شامل تمامی خطوطی است که بایستی در افقهای زمانی مختلف به شبکه اضافه شوند. این حالت در بسیاری از سیستمهای ساده قابل مشاهده است.

۶-۲- سیستم ۹۳ باسه کلمبیا

این سیستم دارای سه افق زمانی، ۱۵۵ مسیر، ۳۵ ژنراتور در افق زمانی اول، ۴۰ ژنراتور در افق زمانی دوم و ۴۹ ژنراتور در افق زمانی سوم است. دارای ۵۵ باس مصرف است و مجموع توان مصرفی آن، ۹۷۵۰ مگاوات در افق زمانی اول، ۱۲۱۶۲ مگاوات در افق زمانی دوم و ۱۴۵۵۹ مگاوات در افق زمانی سوم است. در هر مسیر، امکان احداث ۲ خط انتقال وجود دارد [۲۳]. اطلاعات این سیستم به همراه نرخ استهلاک سرمایه در [۲۲] قابل دسترسی است.

در جدول ۲، پاسخ بهینه به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی با پاسخ روش‌های دیگر مقایسه شده است:

جدول (۲): مقایسه پاسخ بهینه روش‌های مختلف برای سیستم ۹۳ باسه کلمبیا

هزینه	خطوط اضافه‌شده	روش
۴۹۲,۱۷	$n_{57-81}^{1}=2, n_{55-57}^{1}=1, n_{55-62}^{1}=1, n_{45-81}^{1}=1,$ $n_{82-85}^{1}=1, n_{27-29}^{2}=1, n_{62-73}^{2}=1, n_{72-73}^{2}=1,$ $n_{19-82}^{2}=1, n_{43-88}^{3}=2, n_{15-18}^{3}=1, n_{30-65}^{3}=1,$ $n_{30-72}^{3}=1, n_{55-84}^{3}=1, n_{27-64}^{3}=1, n_{19-82}^{3}=1,$ $n_{68-86}^{3}=1.$	[۱۹]
۴۹۲,۱۷	$n_{57-81}^{1}=2, n_{55-57}^{1}=1, n_{55-62}^{1}=1, n_{45-81}^{1}=1,$ $n_{82-85}^{1}=1, n_{27-29}^{2}=1, n_{62-73}^{2}=1, n_{72-73}^{2}=1,$ $n_{19-82}^{2}=1, n_{43-88}^{3}=2, n_{15-18}^{3}=1, n_{30-65}^{3}=1,$ $n_{30-72}^{3}=1, n_{55-84}^{3}=1, n_{27-64}^{3}=1, n_{19-82}^{3}=1,$ $n_{68-86}^{3}=1.$	[۲۳]
۵۱۸,۲۹	$n_{57-81}^{1}=2, n_{55-57}^{1}=1, n_{55-62}^{1}=1, n_{45-81}^{1}=1,$ $n_{82-85}^{1}=1, n_{57-84}^{2}=1, n_{55-84}^{2}=1, n_{27-29}^{2}=1,$ $n_{62-73}^{2}=1, n_{72-73}^{2}=1, n_{19-82}^{2}=1, n_{43-88}^{3}=2,$ $n_{15-18}^{3}=1, n_{30-65}^{3}=1, n_{30-72}^{3}=1, n_{27-64}^{3}=1,$ $n_{19-82}^{3}=1, n_{68-86}^{3}=1.$	روش پیشرو
۴۹۲,۱۷	$n_{57-81}^{1}=2, n_{55-57}^{1}=1, n_{55-62}^{1}=1, n_{45-81}^{1}=1,$ $n_{82-85}^{1}=1, n_{27-29}^{2}=1, n_{62-73}^{2}=1, n_{72-73}^{2}=1,$ $n_{19-82}^{2}=1, n_{43-88}^{3}=2, n_{15-18}^{3}=1, n_{30-65}^{3}=1,$ $n_{30-72}^{3}=1, n_{55-84}^{3}=1, n_{27-64}^{3}=1, n_{19-82}^{3}=1,$ $n_{68-86}^{3}=1.$	روش پسرو
۴۹۲,۱۷	$n_{57-81}^{1}=2, n_{55-57}^{1}=1, n_{55-62}^{1}=1, n_{45-81}^{1}=1,$ $n_{82-85}^{1}=1, n_{27-29}^{2}=1, n_{62-73}^{2}=1, n_{72-73}^{2}=1,$ $n_{19-82}^{2}=1, n_{43-88}^{3}=2, n_{15-18}^{3}=1, n_{30-65}^{3}=1,$ $n_{30-72}^{3}=1, n_{55-84}^{3}=1, n_{27-64}^{3}=1, n_{19-82}^{3}=1,$ $n_{68-86}^{3}=1.$	روش پیشرو-پسرو
۴۹۲,۱۷	$n_{57-81}^{1}=2, n_{55-57}^{1}=1, n_{55-62}^{1}=1, n_{45-81}^{1}=1,$ $n_{82-85}^{1}=1, n_{27-29}^{2}=1, n_{62-73}^{2}=1, n_{72-73}^{2}=1,$ $n_{19-82}^{2}=1, n_{43-88}^{3}=2, n_{15-18}^{3}=1, n_{30-65}^{3}=1,$ $n_{30-72}^{3}=1, n_{55-84}^{3}=1, n_{27-64}^{3}=1, n_{19-82}^{3}=1,$ $n_{68-86}^{3}=1.$	روش پیشنهادی

در این سیستم نیز، پاسخ بهینه به‌دست‌آمده برابر با پاسخ بهینه گزارش‌شده در [۱۹ و ۲۳] است. به دلیل سادگی سیستم، روش‌های شبه دینامیکی پسرو و پیشرو-پسرو نیز قادر به دستیابی به پاسخ بهینه این روش می‌باشند. به طور مشابه با نتیجه بدست آمده برای سیستم ۲۴ باسه، این موضوع نیز به طور مشابه با مقایسه جواب بهینه مسئله مسئله تک افقه مربوط به آخرین افق زمانی که در زیر آورده شده است قابل دریافت است:

$$n_{15-18}=1, n_{19-82}=2, n_{27-29}=1, n_{27-64}=1, n_{30-65}=1, n_{30-72}=1,$$
$$n_{43-88}=2, n_{55-84}=1, n_{57-81}=2, n_{55-57}=1, n_{55-62}=1, n_{45-81}=1,$$
$$n_{62-73}=1, n_{68-86}=1, n_{72-73}=1, n_{82-85}=1.$$

۶-۳- سیستم ۵۱ باسه جنوب شرق ایران

این سیستم دارای دو افق زمانی، ۸۹ مسیر جهت احداث خطوط انتقال و ۵۱ باس مصرف است. دارای ۱۰۲۶۸ مگاوات مصرف در افق زمانی اول و ۱۳۱۰۵ مگاوات در افق زمانی دوم است. در هر مسیر امکان احداث ۴ خط انتقال وجود دارد. اطلاعات این سیستم به همراه نرخ استهلاک سرمایه در [۲۲] قابل دسترسی است.

در جدول ۳، پاسخ بهینه به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی با پاسخ روش‌های دیگر مقایسه شده است:

جدول (۳): مقایسه پاسخ بهینه روش‌های مختلف برای سیستم ۵۱ باسه جنوب شرق ایران

هزینه	خطوط اضافه‌شده	روش
۷۸۸۷,۲۴	$n_{11-13}^{1}=1, n_{12-21}^{1}=1, n_{7-21}^{1}=1, n_{7-8}^{1}=1,$ $n_{10-20}^{1}=1, n_{29-35}^{1}=1, n_{35-39}^{1}=1, n_{29-30}^{1}=1,$ $n_{30-32}^{1}=1, n_{30-31}^{1}=1, n_{33-50}^{1}=1, n_{27-28}^{1}=1,$ $n_{42-43}^{1}=1, n_{44-45}^{1}=1, n_{32-50}^{1}=3, n_{27-51}^{1}=2,$ $n_{7-25}^{2}=1, n_{1-18}^{2}=1, n_{4-14}^{2}=1, n_{1-20}^{2}=1,$ $n_{29-35}^{2}=1, n_{44-46}^{2}=1, n_{33-50}^{2}=1.$	روش پیشرو
۷۵۰۱,۴۲	$n_{11-13}^{1}=1, n_{12-21}^{1}=1, n_{7-21}^{1}=1,$ $n_{7-28}^{1}=1, n_{1-18}^{1}=1, n_{7-8}^{1}=1,$ $n_{10-20}^{1}=1, n_{27-39}^{1}=1, n_{24-51}^{1}=1,$ $n_{33-50}^{1}=1, n_{42-43}^{1}=1, n_{31-32}^{1}=1,$ $n_{44-45}^{1}=1, n_{27-51}^{1}=1, n_{11-12}^{2}=1,$ $n_{1-20}^{2}=1, n_{23-49}^{2}=1, n_{44-46}^{2}=1,$ $n_{33-50}^{2}=1.$	روش پسرو
۷۸۷۲,۳۲	$n_{11-13}^{1}=1, n_{12-21}^{1}=1, n_{7-21}^{1}=1, n_{1-18}^{1}=1,$ $n_{7-8}^{1}=1, n_{1-20}^{1}=1, n_{29-35}^{1}=1, n_{35-39}^{1}=1,$ $n_{33-50}^{1}=1, n_{27-28}^{1}=1, n_{42-43}^{1}=1, n_{31-32}^{1}=1,$ $n_{44-45}^{1}=1, n_{27-51}^{1}=2, n_{7-25}^{2}=1, n_{4-14}^{2}=1,$ $n_{29-35}^{2}=1, n_{44-46}^{2}=1, n_{29-30}^{2}=1, n_{30-31}^{2}=1,$ $n_{33-50}^{2}=1.$	روش پیشرو-پسرو
۷۴۰۳,۴۶	$n_{11-13}^{1}=1, n_{12-21}^{1}=1, n_{7-21}^{1}=1, n_{7-28}^{1}=1,$ $n_{1-18}^{1}=1, n_{7-8}^{1}=1, n_{1-20}^{1}=1, n_{27-39}^{1}=1,$ $n_{24-51}^{1}=1, n_{33-50}^{1}=1, n_{42-43}^{1}=1, n_{31-32}^{1}=1,$ $n_{44-45}^{1}=1, n_{27-51}^{1}=1, n_{11-12}^{2}=1, n_{23-49}^{2}=1,$ $n_{44-46}^{2}=1, n_{33-50}^{2}=1.$	روش پیشنهادی

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، پاسخ بهینه به‌دست‌آمده از این روش بهتر از روش‌های شبه دینامیکی پیشرو، پسرو و پیشرو-پسرو است. جواب بهینه مسئله مسئله تک افقه مربوط به آخرین افق زمانی این سیستم در زیر مشاهده می‌گردد:

$$n^{1}_{1-18}=1, n^{1}_{1-20}=1, n_{7-8}=1, n_{7-21}=1, n_{7-28}=1, n_{11-12}=1, n_{11-13}=1,$$
$$n_{12-21}=1, n_{24-51}=1, n_{27-39}=1, n_{27-51}=1, n_{31-32}=1,$$
$$n_{33-50}=2, n_{42-43}=1, n_{44-45}=2, n_{44-46}=1.$$

همانگونه که مشاهده می‌گردد، خط 23-49 که در جواب بهینه مسئله چند افقه ظاهر شده، در جواب بهینه مسئله تک افقه حضور ندارد و همین موضوع مانع از به نتیجه رسیدن روش پسرو می‌گردد. این خط در جواب روش پیشرو نیز ظاهر نگردیده است که خود عاملی برای عدم امکان به نتیجه رسیدن روش پیشرو-پسرو است.

۶-۴- سیستم ۵۷ باسه بولیوی

این سیستم دارای ۴ افق زمانی، ۵۷ باس و ۹۲ مسیر است. مجموع بار مصرفی برابر با ۹۶۲,۳ مگاوات در افق زمانی اول، ۱۰۲۹,۹ مگاوات در افق زمانی دوم، ۱۲۲۹,۲ مگاوات در افق زمانی سوم و ۱۷۳۳,۳ مگاوات در افق زمانی چهارم است. در بیشتر مسیرها امکان اضافه نمودن دو خط و در مسیرهای دیگر، امکان اضافه نمودن سه خط وجود دارد [۲۳]. در این سیستم، برای برخی مسیرها امکان اضافه نمودن بیش از یک نوع خط در نظر گرفته شده است، به‌طور مثال بین باس‌های ۱۳ و ۱۴، امکان اضافه نمودن سه نوع خط لحاظ شده است که با شماره‌های $13-14(1)$، $13-14($ و $13-14($ نشان داده می‌شود. اطلاعات این سیستم به همراه نرخ استهلاک سرمایه در [۲۲] قابل دسترسی است.

در جدول ۴، پاسخ بهینه به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی با پاسخ روش‌های دیگر مقایسه شده است:

جدول (۴): مقایسه پاسخ بهینه روش‌های مختلف برای سیستم ۵۷ باسه بولیوی

هزینه	خطوط اضافه‌شده	روش
۷۱,۷۸	$n^{1}_{13-14(1)}=1, n^{1}_{36-39}=1, n^{1}_{21-39}=1, n^{2}_{27-50}=1, n^{3}_{43-51}=2, n^{4}_{24-25}=1, n^{4}_{41-45}=1, n^{4}_{52-53(2)}=2, n^{4}_{43-53}=2, n^{4}_{53-51}=1, n^{4}_{51-54}=1, n^{4}_{21-55}=2, n^{4}_{55-20(2)}=2, n^{4}_{55-32}=3, n^{4}_{55-35}=2.$	[۱۹]
۷۱,۷۷	$n^{1}_{13-14(1)}=1, n^{1}_{36-39}=1, n^{1}_{21-39}=1, n^{2}_{27-50}=1, n^{2}_{21-39}=1, n^{3}_{43-51}=2, n^{4}_{24-25}=1, n^{4}_{41-45}=1, n^{4}_{52-53(1)}=2, n^{4}_{43-53}=2, n^{4}_{53-51}=1, n^{4}_{51-54}=1, n^{4}_{21-55}=2, n^{4}_{55-20(1)}=1, n^{4}_{55-20(2)}=1, n^{4}_{55-32}=3, n^{4}_{55-35}=2.$	[۲۳]
۷۶,۸۰	$n^{1}_{13-14(1)}=1, n^{1}_{36-39}=1, n^{1}_{21-39}=1, n^{2}_{22-39(1)}=1, n^{2}_{27-50}=1, n^{3}_{27-50}=1, n^{4}_{13-14(3)}=1, n^{4}_{24-25}=1, n^{4}_{41-45}=1, n^{4}_{43-51}=2, n^{4}_{52-53(2)}=2, n^{4}_{43-53}=2, n^{4}_{53-51}=1, n^{4}_{51-54}=1, n^{4}_{21-55}=2, n^{4}_{55-20(2)}=2, n^{4}_{55-32}=3, n^{4}_{55-35}=2.$	روش پیشرو
۷۲,۷۲	$n^{1}_{13-14(1)}=1, n^{1}_{36-39}=1, n^{1}_{21-39}=1, n^{2}_{27-50}=1, n^{2}_{21-39}=1, n^{3}_{43-51}=2, n^{4}_{20-22}=1, n^{4}_{24-25}=1, n^{4}_{35-36}=1, n^{4}_{41-45}=1, n^{4}_{52-53(1)}=1, n^{4}_{52-53(2)}=2, n^{4}_{43-53}=2, n^{4}_{53-51}=1, n^{4}_{51-54}=1, n^{4}_{55-20(1)}=1, n^{4}_{55-20(2)}=1, n^{4}_{55-32}=4, n^{4}_{55-35}=2.$	روش پسرو
۷۱,۹۰	$n^{1}_{13-14(1)}=1, n^{1}_{36-39}=1, n^{1}_{21-39}=1, n^{2}_{21-22}=1, n^{2}_{22-39(1)}=2, n^{2}_{27-50}=1, n^{3}_{43-51}=2, n^{3}_{21-39}=1, n^{4}_{13-14(3)}=1, n^{4}_{24-25}=1, n^{4}_{41-45}=1, n^{4}_{52-53}=2, n^{4}_{43-53}=2, n^{4}_{53-51}=1, n^{4}_{51-54}=1, n^{4}_{21-55}=2, n^{4}_{55-20(2)}=2, n^{4}_{55-32}=3, n^{4}_{55-35}=2.$	روش پیشرو-پسرو
۷۰,۳۷	$n^{1}_{13-14(1)}=1, n^{1}_{36-39}=1, n^{1}_{21-39}=1, n^{2}_{27-50}=1, n^{2}_{21-39}=1, n^{3}_{43-51}=2, n^{4}_{13-14(3)}=1, n^{4}_{24-25}=1, n^{4}_{41-45}=1, n^{4}_{52-53(2)}=2, n^{4}_{43-53}=2, n^{4}_{53-51}=1, n^{4}_{51-54}=1, n^{4}_{21-55}=2, n^{4}_{55-20(2)}=2, n^{4}_{55-32}=3, n^{4}_{55-35}=2.$	روش پیشنهادی

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی پاسخ بهتری نسبت به روش‌های دیگر حل مسئله ارائه می‌نماید. دلیل این موضوع آن است که اجازه در مدار نیاوردن خطوط $21-39$ و $13-14(1)$ که در افق زمانی اول اضافه شده‌اند، در افق زمانی چهارم داده شده است. حذف این قید غیرضروری، موجب ایجاد امکان دستیابی به یک جواب بهتر شده است.

به‌طور کلی مشاهده می‌گردد که روش پیشنهادی دارای کارایی مناسبتری نسبت به سایر روشهای موجود است. کارایی این روش به دلیل جستجوی فضایی بزرگتر نسبت به آنچه در روشهای پیشر، پس‌رو و پیشرو-پسرو انجام می‌شود، همیشه بهتر یا مساوی با این روشهاست که مطالعات عددی نیز این موضوع را تایید می‌نمایند. همچنین فرمول‌بندی جدید مسئله به دلیل حذف یک قید ضروری، امکان رسیدن به طراحی‌های بهتری را نسبت به مدل مرسوم مسئله فراهم می‌سازد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش شبه دینامیکی برای حل مسئله توسعه سیستم‌های انتقال چندمرحله‌ای ارائه شده است. برخلاف روش‌های پیشرو و پسرو، این روش به دلیل استفاده از مجموعه بهینه‌های محلی، قابلیت دستیابی به جواب بهینه مسئله چندمرحله‌ای را دارد. همچنین به دلیل عدم حل مجدد مسئله چندمرحله‌ای، روش پیشنهادی وابستگی زیادی به مدل ندارد با اعمال تغییراتی جزئی، می‌تواند برای حل مدل‌های دیگر مسئله توسعه سیستم‌های انتقال مورد استفاده قرار گیرد.

در این مطالعه، الزامی برای در مدار قرار گرفتن تمام خطوط اضافه‌شده در هنگام بهره‌برداری در نظر گرفته نشد. مطالعات عددی

انجام‌شده نشان داد که حذف این قید می‌تواند موجب دستیابی به جوابی بهتر و کم‌هزینه‌تر از جواب مربوط به فرمول‌بندی متداول مسئله گردد. با حذف این قید غیرضروری و ارائه یک فرمول‌بندی جدید، نشان داده شد که تعداد خطوط قرار گیرنده در مدار در هر افق زمانی برابر با یکی از جواب‌های بهینه محلی مسئله تک‌مرحله‌ای متناظر خواهد بود.

روش ارائه شده در این مقاله، شیوه‌ای کلی در حل مسئله توسعه سیستمهای انتقال را ترسیم می‌نماید. در واقع به نظر می‌رسد که هر مسئله چندمرحله‌ای به فرم (۲۵) به شرط داشتن یک تابع هدف صعودی، قابل‌تجزیه به مسائل تک‌مرحله‌ای است. در این مقاله نحوه انجام این کار برای مدل یک مدل ساده از مسئله بیان گردیده‌است. اثبات ریاضی این موضوع برای حالت کلی مسئله به عنوان پیشنهادی برای مطالعات آینده ارائه می‌گردد.

فرمول‌بندی مدلهای کاملتر مسئله به فرم (۲۵) و حل آنها از طریق این روش نیز می تواند در مطالعات آینده پیگیری گردد. در این مقاله، «تعداد خطوط اضافه شونده» به‌عنوان تنها متغیر تصمیم‌گیری مسئله مورد بررسی قرار گرفت، اما برای حل بسیاری از مدلهای مسئله، لازم است متغیرهای مربوط به سایر تجهیزات (مانند تعداد خازن‌ها و ادوات FACTS اضافه شونده) نیز در چارچوب پیشنهادی در نظر گرفته شوند.

مراجع

[۱] خراسانی حمید، رشیدی نژاد مسعود. یک روش ترکیبی برای برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال. مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۱; ۹ (۱) :۶۵-۷۴

[۲] کی‌پور رضا، حقی‌فام محمود رضا، سیفی حسین. برنامه‌ریزی بلندمدت توسعه شبکه انتقال در بازارهای رقابتی برق بر مبنای سود کاربران با استفاده از الگوریتم ژنتیک. مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۸۶; ۴ (۱) :۱۲-۲۱

[3] Samadi M, Javidi M H, Sadeh J. Long Term Weighted Modeling for transmission expansion planning in Deregulated Power Systems . Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers. 2012; 8 (1) :49-56

[4] Qiu, Jing, et al. "Multi-stage flexible expansion co-planning under uncertainties in a combined electricity and gas market." *IEEE Transactions on Power Systems* 30.4 (2015): 2119-2129.

[5] Rastgou, Abdollah, and Jamal Moshtagh. "Improved harmony search algorithm for transmission expansion planning with adequacy–security considerations in the deregulated power system." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 60 (2014): 153-164.

[6] Kamyab, Gholam-Reza, Mahmood Fotuhi-Firuzabad, and Masoud Rashidinejad. "A PSO based approach for multi-stage transmission expansion planning in electricity markets." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 54 (2014): 91-100.

[7] Lumbreras, S., A. Ramos, and P. Sánchez. "Automatic selection of candidate investments for Transmission Expansion Planning." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 59 (2014): 130-140.

[8] Kishore, T. S., and S. K. Singal. "Optimal economic planning of power transmission lines: A review." Renewable and Sustainable Energy Reviews 39 (2014): 949-974.

[9] Latorre, Gerardo, et al. "Classification of publications and models on transmission expansion planning." IEEE Transactions on Power Systems 18.2 (2003): 938-946.

[10] Castanheira, Luís, et al. "Coordination of transmission and distribution planning and operations to maximise efficiency in future power systems." 2005 International Conference on Future Power Systems. IEEE, 2005.

[۱۱] معقولی پوریا، حسنی مرزونی مسعود، حمید حسینی سیّد. برنامه‌ریزی شبکه انتقال در راستای افزایش کارایی بازار و با استفاده از معیارهای احتمالاتی قابلیت اطمینان. مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۸۶; ۴ (۱) :۳-۱۱

[۱۲] عسگریان ابیانه حسین، شریعتی دهاقان حسین، جاویدی دشت بیاض محمد حسین، رضوی فرزاد. برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال تحت شرایط بازار برق با در نظر گرفتن هزینه برقراری امنیت . مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۸۸; ۶ (۲) :۵۷-۶۹

[13] Moradi, Mansour, et al. "Transmission Expansion Planning in the presence of wind farms with a mixed AC and DC power flow model using an Imperialist Competitive Algorithm." Electric Power Systems Research (2016).

[14] Ugranli, Faruk, and Engin Karatepe. "Transmission Expansion Planning for Wind Turbine Integrated Power Systems Considering Contingency." IEEE Transactions on Power Systems 31.2 (2016): 1476-1485.

[15] Torres, Santiago P., and Carlos A. Castro. "Specialized differential evolution technique to solve the alternating current model based transmission expansion planning problem." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 68 (2015): 243-251.

[16] Zhong, J., and Felix F. Wu. "Transmission expansion planning from past to future." 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition. IEEE, 2006.

[17] Hemmati, Reza, Rahmat-Allah Hooshmand, and Amin Khodabakhshian. "State-of-the-art of transmission expansion planning: Comprehensive review." Renewable and Sustainable Energy Reviews 23 (2013): 312-319.

[18] Hemmati, Reza, Rahmat-Allah Hooshmand, and Amin Khodabakhshian. "Comprehensive review of generation and transmission expansion planning." IET Generation, Transmission & Distribution 7.9 (2013): 955-964.

[19] Vinasco, Guillermo, Marcos J. Rider, and Ruben Romero. "A strategy to solve the multistage transmission expansion planning problem." IEEE Transactions on Power Systems 26.4 (2011): 2574-2576.

[20] Sum-Im, Taylor, et al. "Differential evolution algorithm for static and multistage transmission expansion planning." IET generation, transmission & distribution 3.4 (2009): 365-384.

[21] Habibia, M. R., and M. Rashidinejad. "Territory concept to improve transmission expansion planning problem solution algorithms." Scientia Iranica. Transaction D, Computer Science & Engineering, Electrical 22.3 (2015): 1094.

[22] Mohamad R. Habibi, “The Pseudo-Dynamic Method Materials”, July 2016, , http://tepstudies.ir/Pseudo_Dynamic_Method

[23] da Silva, Emivan F., Mohsen Rahmani, and Marcos J. Rider. "A Search Space Reduction Strategy and a Mathematical Model for Multistage Transmission Expansion Planning with N-1 Security Constrains." Journal of Control, Automation and Electrical Systems 26.1 (2015): 57-67.

---

[1] Transmission Expansion Planning Problem (TEP)
[2] Single-Stage TEP (STEP)
[3] Multistage TEP (MTEP)
[4] Forward
[5] Backward
[6] Forward-Backward