

## یک روش شبه دینامیکی برای حل مسئله توسعه سیستم‌های انتقال

محمد رضا حبیبی فتح آبادی<sup>۱</sup> مسعود رشیدی نژاد<sup>۲</sup> امیر عبداللهی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان- کرمان- ایران

[m.habibi@student.kgut.ac.ir](mailto:m.habibi@student.kgut.ac.ir)

۲- استاد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید باهنر کرمان - کرمان- ایران

[mrashidi@uk.ac.ir](mailto:mrashidi@uk.ac.ir)

۳- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید باهنر کرمان - کرمان- ایران

[a.abdollahi@uk.ac.ir](mailto: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

فرآیندهای پیشرو و پسرو انجام می‌شود که امکان دستیابی به یک جواب بهتر را فراهم می‌آورد [۱۸].

روش‌های پیشرو 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 در صورتی که 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 ارائه شده 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 شبه‌دینامیکی 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 بهینه‌سازی 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

توسعه سیستم‌های انتقال به معنای احداث خطوط و تجهیزات جدید در شبکه است، به‌طوری که 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» مطرح می‌گردد [۱].

این مسئله از نظر نحوه در نظر گرفتن زمان به دو حالت برنامه‌ریزی تک‌مرحله‌ای<sup>۲</sup> و چندمرحله‌ای<sup>۳</sup> 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 شبه‌دینامیکی به‌منظور کاهش حجم پردازشی مسئله ارائه شده‌اند [۸].

در روش‌های شبه‌دینامیکی، 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 از جمله قابلیت اطمینان، منابع توان راکتیو، ادوات FACTS و غیره [۱۱-۱۵]. وجود یک روش شبه‌دینامیکی کارآمد می‌تواند ورود این مدل‌ها به مسئله چندمرحله‌ای را ساده کند.

از معروف‌ترین روش‌های شبه‌دینامیکی می‌توان به روش‌های پیشرو<sup>۴</sup>، پسرو<sup>۵</sup> و پیشرو-پسرو<sup>۶</sup> اشاره نمود [۹]. در روش پیشرو، ابتدا برنامه‌ریزی تک‌مرحله‌ای برای اولین افق برنامه‌ریزی انجام می‌گیرد. سپس با در مدار نگاه‌داشتن 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؛ به‌طوری که 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

همچنین بدیهی است که تعداد خطوط احداث شونده بایستی یک عدد صحیح باشد؛ بنابراین:

$$0 \leq n_l \leq \bar{N}_l, \quad \forall 1 \leq l \leq L \quad (3)$$

$$n_l \text{ integer}, \quad \forall 1 \leq l \leq L \quad (4)$$

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:

$$\min C(n) \quad (5)$$

$$n \in OPC^t \quad (6)$$

### ۲-۲-۲ مدل سازی 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؛ به طوری که مجموع ارزش فعلی هزینه‌های توسعه شبکه کمینه گردد و قیود بهره‌برداری نیز برآورده شوند. در [۲۰] مدل سازی این مسئله در قالب یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی با اعداد صحیح آورده شده است. در ادامه به مرور تابع هدف و قیود مسئله پرداخته می‌شود:

### ۱-۲-۲-۱ تابع هدف مسئله چندمرحله‌ای

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

$$\min \sum_{s=1}^S [(1-I)^{t_s-t_0} \sum_{l=1}^L n_l^s \times c_l] \quad (7)$$

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 نماینده تعداد خطوطی است که در بازه زمانی  $t_{s-1}$  تا  $t_s$  در مسیر  $l$  احداث می‌گردند. در [۲۰] با تعریف  $\delta_{inv}^{t_s} = (1-I)^{t_s-t_0}$ ، معادله (۷) به صورت زیر نوشته شده است:

$$\min \sum_{s=1}^S [\delta_{inv}^{t_s} \sum_{l=1}^L n_l^s \times c_l] \quad (8)$$

### ۲-۲-۲-۲ قیود بهره‌برداری مسئله چندمرحله‌ای

به منظور 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 اضافه بار داشته باشند. در فرمول بندی رایج

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 نتیجه گیری اختصاص دارد.

### ۲-۲ مدل سازی ریاضی مسئله

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

### ۱-۲-۱ مدل سازی 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 فرمول بندی مسئله تک‌مرحله‌ای پیشنهاد شده است که یکی از آن‌ها، مدل DC است. در این مدل، قیود الکتریکی حاکم بر مسئله بر اساس معادلات پخش بار DC مدل سازی می‌شوند [۱۴]. مسئله تک‌مرحله‌ای برای افق زمانی  $t$  به صورت زیر بیان می‌شود [۲۰]:

### ۱-۱-۲-۱ تابع هدف مسئله تک‌مرحله‌ای:

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

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

در این معادله،  $n_l$  تعداد خطوط اضافه شده در مسیر  $l$  ام،  $n = \{n_l\}$  بیانگر مجموعه خطوط اضافه شده و  $C(n)$  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.

### ۲-۱-۲-۲ قیود بهره‌برداری:

در مدل DC، شبکه طراحی شده بایستی بتواند قیود پخش بار DC مربوط به افق زمانی  $t$  را بدون وقوع اضافه بار بر روی خطوط برآورده سازد. در این مقاله، قید مذکور به طور خلاصه به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$n = \{n_l\} \in OC^t \quad (2)$$

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

### ۳-۱-۲-۲ قیود مربوط تعداد خطوط:

تعداد خطوط احداث شونده در مسیر  $l$  نمی‌تواند از یک تعداد مشخص شده که در اینجا با  $\bar{N}_l$  نمایش داده می‌شود بیشتر باشد.

$$\max_{1 \leq s' \leq s} N_l^{s'} \leq \hat{N}_l^s, \forall 1 \leq s \leq S. \quad (15)$$

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

$$\hat{N}_l^s = \max_{1 \leq s' \leq s} N_l^{s'}, \forall 1 \leq s \leq S. \quad (16)$$

با توجه به رابطه (۹):

$$n_l^s = \begin{cases} \hat{N}_l^1, & s=1 \\ \hat{N}_l^s - \hat{N}_l^{s-1}, & s \geq 2 \end{cases} \quad (17)$$

$$n_l^s = \begin{cases} N_l^1, & s=1 \\ \max_{1 \leq s' \leq s} N_l^{s'} - \max_{1 \leq s' \leq s-1} N_l^{s'}, & s \geq 2 \end{cases} \quad (18)$$

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

$$\min (\delta_{inv}^h \sum_{l=1}^L N_l^1 \times c_l + \sum_{s=2}^S [\delta_{inv}^{t_s} \sum_{l=1}^L (\max_{1 \leq s' \leq s} N_l^{s'} - \max_{1 \leq s' \leq s-1} N_l^{s'}) \times c_l]) \quad (19)$$

$$N^s = \{N_l^s\} \in OC^{t_s}, \forall 1 \leq s \leq ns. \quad (20)$$

$$0 \leq N_l^s \leq \bar{N}_l, \quad \forall 1 \leq l \leq L \quad (21)$$

$$N_l^s \text{ integer}, \quad \forall 1 \leq l \leq L, \forall 0 \leq s \leq S \quad (22)$$

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

$$\min (\delta_{inv}^h \sum_{l=1}^L N_l^1 \times c_l + \sum_{s=2}^S [\delta_{inv}^{t_s} \sum_{l=1}^L (\max_{1 \leq s' \leq s} N_l^{s'} - \max_{1 \leq s' \leq s-1} N_l^{s'}) \times c_l]) \quad (23)$$

$$N^s \in OPC^{t_s}, \forall 1 \leq s \leq S. \quad (24)$$

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

$$\min C(N^1, N^2, \dots, N^S) \quad (25)$$

$$N^s \in OPC^{t_s}, \forall 1 \leq s \leq S. \quad (26)$$

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

$$\hat{N}_l^s = \sum_{s'=1}^s n_l^{s'} \quad (9)$$

با توجه به توضیحات ذکر شده، قیود بهره‌برداری مسئله چندمرحله‌ای به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\hat{N}^s = \{\hat{N}_l^s\} \in OC^{t_s}, \forall 1 \leq s \leq ns. \quad (10)$$

### 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.

$$0 \leq \hat{N}_l^s \leq \bar{N}_l, \quad \forall 1 \leq l \leq L \quad (11)$$

$$n_l^s \text{ integer}, \quad \forall 1 \leq l \leq L, \forall 0 \leq s \leq S \quad (12)$$

### ۲-۳- فرمول بندی مجدد مسئله چندمرحله‌ای

همان گونه که پیش از این بیان شد، در فرمول بندی معمول مسئله از امکان در مدار نیارودن خطوط اضافه شده به شبکه صرف نظر شده است؛ اما در ادامه نشان داده می‌شود که لحاظ نمودن این امکان، شکستن یک مسئله چندمرحله‌ای را به مسائل کوچک تر تک مرحله‌ای ممکن می‌نماید. از این رو در این بخش با ارائه یک فرمول بندی 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. به منظور 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 احداث شده وجود داشته باشد؛ بنابراین:

$$N_l^s \leq \hat{N}_l^s, \forall 1 \leq s \leq S \quad (13)$$

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

$$N_l^{s'} \leq \hat{N}_l^s, \forall s' \leq s, \forall 1 \leq s \leq S \quad (14)$$

بنابراین:

### 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:

$$\min C(N) \quad (27)$$

$$N \in OPC^{t_s} \quad (28)$$

که در آن،  $C(N)$  نسبت به  $N$  صعودی باشد. به عبارت دیگر، 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. به عبارت دیگر  $N' \in OPC^{t_s}$ .
- $N'$  هیچ خط غیرضروری نداشته باشد؛ یعنی با حذف هیچ یک از خطوط آن، نتوان به یک جواب کافی دیگر دست پیدا کرد.

در اینجا، مجموعه بهینه‌های محلی این مسئله با عبارت  $\Pi^s$  نمایش 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  $C(N^1, N^2, \dots, N^s)$  نسبت به هر یک از  $N^s$  ها صعودی است. به عبارت دیگر، 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 به طوری 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. به عبارت دیگر:

$$N^s \in \Pi^s, \forall 1 \leq s \leq S \quad (29)$$

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 به صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$\min C(N^1, N^2, \dots, N^s) \quad (30)$$

$$N^s \in \Pi^s, \forall 1 \leq s \leq S. \quad (31)$$

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:

$$\min C(N^1) \quad (32)$$

$$N \in OPC^1 \quad (33)$$

سپس با در مدار نگاه‌داشتن 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:

$$\min C(N^s) \quad (34)$$

$$N \in OPC^s \quad (35)$$

$$N_l^{s-1} \leq N_l^s, \quad \forall 1 \leq l \leq L \quad (36)$$

#### 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:

$$\min C(N^s) \quad (37)$$

$$N \in OPC^s \quad (38)$$

**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  $\Gamma^s$  و مجموعه  $\Pi^{s+1}$ ، جامعه‌ای مانند  $\Gamma^{s+1} = \{[M, N^{s+1}] | M \in \Gamma^s, N^{s+1} \in \Pi^{s+1}\}$  است. جامعه حاصل، شامل تمام دنباله‌هایی است که از الحاق یک عضو از  $\Gamma^s$  و یک عضو از  $\Pi^{s+1}$  است.

**تعریف ۹:** پالایش جامعه  $\Gamma^s$  که با نماد  $\hat{\Gamma}^s$  نمایش داده می‌شود، با حذف اعضای ناکارآمد از  $\Gamma^s$  به دست می‌آید. به این منظور، در صورتی که دو عضو  $M_i$  و  $M_j$  متعلق به  $\Gamma^s$  باشند، اگر  $C(M_i) \leq C(M_j)$  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  $\Pi^s$  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  $\Pi^1$  را به‌عنوان یک دنباله تک‌عضوی مانند  $M = [N^1]$  در نظر بگیرید. مجموعه دنباله‌های مذکور، جامعه  $\Gamma^1$  را تشکیل می‌دهند. جامعه  $\hat{\Gamma}^1 = \Gamma^1$  هیچ عضو ناکارآمدی ندارد و بنابراین  $\hat{\Gamma}^1 = \Gamma^1$ .

۳- قرار دهید  $s := 1$ .

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

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  $1 \leq s < S$ :

$$\min C(N^s) \quad (39)$$

$$N \in OPC^s \quad (40)$$

$$N_l^s \leq N_l^{s+1}, \quad \forall 1 \leq l \leq L \quad (41)$$

با توجه به (۴۰) در صورتی‌که در جواب بهینه مطلق مسئله چندمرحله‌ای، تعداد خطوط اضافه‌شده 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 فرمول‌بندی نهایی ارائه‌شده، جواب مسئله چندمرحله‌ای به فرم  $M = [N^1, N^2, \dots, N^s]$  است که در آن،  $N^s$  از اعضای  $\Pi^s$  است.

**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  $0 \leq s \leq s'$  است. این مقدار با توجه به (۲۳) قابل محاسبه است.

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

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

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 گزارش شده در [۱۹ و ۲۳] است. پاسخ بهینه این سیستم از طریق روش‌های شبه دینامیکی پسرو و پیشرو-پسرو نیز قابل دستیابی 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.

#### ۲-۶- 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 استهلاك سرمایه در [۲۲] قابل دسترسی است.

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

به‌منظور کاهش حجم محاسباتی و حافظه مورد نیاز، تنها تعداد مشخصی از اعضای  $\hat{\Gamma}^{s+1}$  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  $\hat{\Gamma}^s$ ، عضوی مانند  $M^* \in \hat{\Gamma}^s$  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.

#### ۶-۶- 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 گزارش شده 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 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 استهلاك سرمایه در [۲۲] قابل دسترسی است.

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

۳-۶- 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 به دست آمده از روش پیشنهادی با پاسخ روش‌های دیگر مقایسه شده است:

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

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

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

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

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

در این سیستم نیز، پاسخ بهینه به دست آمده برابر با پاسخ بهینه گزارش شده 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:

$$n_{15-18} = 1, n_{19-82} = 2, n_{27-29} = 1, n_{27-64} = 1, n_{30-65} = 1, n_{30-72} = 1,$$

$$n_{43-88} = 2, n_{55-84} = 1, n_{57-81} = 2, n_{55-57} = 1, n_{55-62} = 1, n_{45-81} = 1,$$

$$n_{62-73} = 1, n_{68-86} = 1, n_{72-73} = 1, n_{82-85} = 1.$$



روش پسرو	$n_{13-14(1)}^1 = 1, n_{36-39}^1 = 1, n_{21-39}^1 = 1, n_{27-50}^2 = 1,$ $n_{21-39}^2 = 1, n_{43-51}^3 = 2, n_{20-22}^4 = 1, n_{24-25}^4 = 1,$ $n_{35-36}^4 = 1, n_{41-45}^4 = 1, n_{52-53(1)}^4 = 1, n_{52-53(2)}^4 = 2,$ $n_{43-53}^4 = 2, n_{53-51}^4 = 1, n_{51-54}^4 = 1, n_{55-20(1)}^4 = 1,$ $n_{55-20(2)}^4 = 1, n_{55-32}^4 = 4, n_{55-35}^4 = 2.$	۷۲, ۷۲
روش پیشرو-پسرو	$n_{13-14(1)}^1 = 1, n_{36-39}^1 = 1, n_{21-39}^1 = 1, n_{21-22}^2 = 1,$ $n_{22-39(1)}^2 = 2, n_{27-50}^2 = 1, n_{43-51}^3 = 2, n_{21-39}^3 = 1,$ $n_{13-14(3)}^4 = 1, n_{24-25}^4 = 1, n_{41-45}^4 = 1, n_{52-53}^4 = 2,$ $n_{43-53}^4 = 2, n_{53-51}^4 = 1, n_{51-54}^4 = 1, n_{21-55}^4 = 2,$ $n_{55-20(2)}^4 = 2, n_{55-32}^4 = 3, n_{55-35}^4 = 2.$	۷۱, ۹۰
روش پیشنهادی	$n_{13-14(1)}^1 = 1, n_{36-39}^1 = 1, n_{21-39}^1 = 1, n_{27-50}^2 = 1,$ $n_{21-39}^2 = 1, n_{43-51}^3 = 2, n_{13-14(3)}^4 = 1, n_{24-25}^4 = 1,$ $n_{41-45}^4 = 1, n_{52-53(2)}^4 = 2, n_{43-53}^4 = 2, n_{53-51}^4 = 1,$ $n_{51-54}^4 = 1, n_{21-55}^4 = 2, n_{55-20(2)}^4 = 2, n_{55-32}^4 = 3,$ $n_{55-35}^4 = 2.$	۷۰, ۳۷

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 نیارودن 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 پیشرو، 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

$$n_{1-18}^1 = 1, n_{1-20}^1 = 1, n_{7-8}^1 = 1, n_{7-21}^1 = 1, n_{7-28}^1 = 1, n_{11-12}^1 = 1, n_{11-13}^1 = 1,$$

$$n_{12-21}^1 = 1, n_{24-51}^1 = 1, n_{27-39}^1 = 1, n_{27-51}^1 = 1, n_{31-32}^1 = 1,$$

$$n_{33-50}^1 = 2, n_{42-43}^1 = 1, n_{44-45}^1 = 2, n_{44-46}^1 = 1.$$

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(2) و (13-14(3) 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

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

- [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 سید. 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 ایبانه حسین، شریعتی دهقان 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.

انجام شده 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، قابل تجزیه 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 می‌تواند 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.

- [22] Mohamad R. Habibi, "The Pseudo-Dynamic Method Materials", July 2016, [http://tepstudies.ir/Pseudo\\_Dynamic\\_Method](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.

---

<sup>1</sup> Transmission Expansion Planning Problem (TEP)

<sup>2</sup> Single-Stage TEP (STEP)

<sup>3</sup> Multistage TEP (MTEP)

<sup>4</sup> Forward

<sup>5</sup> Backward

<sup>6</sup> Forward-Backward