

## تعیین خطوط کاندیدا با استفاده از شاخص های پایداری خطوط جهت حل مسئله برنامه ریزی توسعه خطوط انتقال

رضا غفاریپور<sup>۱\*</sup>، محمدحسین ولایتی<sup>۲</sup>

۱- مربی و عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین (ع)، ۲- دکتری دانشگاه سمنان

(دریافت: ۹۵/۰۸/۲۷، پذیرش: ۹۶/۰۳/۰۴)

### چکیده

طراحی و بهره برداری صحیح از خطوط انتقال انرژی که تحت عنوان برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال شناخته می شود، به عنوان تنها ابزار کارآمد به منظور انتقال بهینه و پیوسته انرژی الکتریکی به کشورهای همسایه شناخته شده است که منافع اقتصادی و امنیتی زیادی را نصیب کشور می کند. یکی از دغدغه های پدافند غیرعامل در کنار عواملی از قبیل پایداری سامانه قدرت و کفایت خطوط، تعیین خطوط کاندیدای مناسب جهت اعمال آن به روش های حل مسئله برنامه ریزی توسعه خطوط انتقال است. بدین منظور، در این مقاله با استفاده از شاخص های پایداری خطوط شامل شاخص های FSVI و  $L_{mn}$  که مبتنی بر معادلات پخش بار هستند، ارتباطی میان پدافند غیرعامل و مسئله برنامه ریزی توسعه خطوط انتقال ایجاد کرده تا با استفاده از آن امنیت و کفایت خطوط انتقال در توابع هدفی که به منظور حل مسئله مذکور مورد استفاده قرار می گیرند، لحاظ گردد. با استفاده از این شاخص ها، خطوط کاندیدا که به عنوان ورودی در روش های حل مسئله مذکور مورد استفاده قرار می گیرند، تعیین می شوند.

**کلیدواژه ها:** شاخص پایداری خط، کفایت و امنیت شبکه انتقال، برنامه ریزی توسعه خطوط، پدافند غیرعامل

## Determination of Candidate Lines Using Line Stability Indexes for Solving the Transmission Expansion Planning Problem

R. Ghaffarpour\*, M. H. Velayati

Imam Hossein University

(Received: 17/11/2016; Accepted: 25/05/2017)

### Abstract

Proper design and operation of transmission lines, known as transmission expansion planning, is known as the only efficient tool for optimization and continuous transmission of electrical energy to neighbor countries, affording economic and security interests to Iran. In order to achieve this goal, different items such as maintaining power system stability after the development of lines, the adequacy of lines after the end of the year planning horizon, are important. Along with the operation of the transmission network constraints and economic objectives, one of the concerns of passive defence is the determination of appropriate candidates to apply it to solving the problem of transmission expansion planning. In this paper, using the line stability indexes such as FSVI and  $L_{mn}$  indexes which are based on the load flow analysis, relation between passive defence and the transmission expansion planning has been created. Using these criteria, candidate lines which are used as input in transmission expansion planning methods, are determined.

**Keywords:** Line Stability Index, Network Security and, Transmission Expansion Planning, Passive Defense

\*Corresponding Author E-mail: rgaffarpour@ihu.ac.ir

## ۱. مقدمه

نیاز مشترکین با کمترین هزینه و با رعایت مجموعه‌ای از قیود فنی، بهره‌برداری و قابلیت اطمینان صورت می‌گیرد [۲ و ۳]. در حقیقت، لزوم فراهم کردن فضای انتقال برای تولیدات فعلی و جدید، امکان رقابت در هر زمان، ایجاد دسترسی عادلانه برای تمام کسانی که تمایل حضور در بازار رقابتی را دارند و نگهداری قابلیت اطمینان در سطح مطلوب (تأمین بستر ایمن و همواره برقرار به منظور انتقال انرژی الکتریکی)، از مواردی هستند که توجه به موضوع TEP را جدی‌تر می‌سازند [۴]. بر این اساس، TEP به عنوان یک ابزار محاسباتی-منطقی برای دستیابی به یک یا چند نقطه بهینه تابع هدف برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال، مطرح می‌شود [۳].

با توجه به وجود عدم قطعیت‌های مختلف در محیط‌های تجدید ساختار یافته که به دلایلی از قبیل تغییر مداوم استراتژی بازیگران بازارهای رقابتی و یا رفتار غیر مشخص تولید کنندگان مستقل توان ایجاد می‌شود [۵ و ۶]، لزوم توجه به این موضوع در حل مسئله TEP ضروری است [۷، ۸]. در نتیجه، امروزه روش‌های مختلفی مانند الگوریتم بهینه‌سازی چند منظوره<sup>۲</sup> [۹]، الگوریتم‌های مبتنی بر تئوری فازی [۱۰]، تئوری بازی مشارکتی<sup>۳</sup> [۱۱]، روش‌های مبتنی بر معیارهای قابلیت اطمینان [۱۲]، روش بهینه‌یابی غیر خطی عدد صحیح [۱۳]، روش‌های مبتنی بر الگوریتم ژنتیک [۱۴]، روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی متمرکز<sup>۴</sup> و غیر متمرکز<sup>۵</sup> [۱۵]، به منظور حل این مسئله ارائه شده است. در تمامی روش‌های مذکور، تعیین نقاط کاندیدای اولیه به منظور توسعه و یا احداث خطوط جدید، اهمیت بالایی دارد که ارائه یک روش ساده و سریع جهت دستیابی به این خطوط می‌تواند در سرعت و دقت عملکرد روش‌های مذکور بسیار تأثیرگذار باشد.

بر این اساس، هدف از این مقاله، ارائه راه‌کاری مبتنی بر شاخص‌های پایداری خطوط بوده تا با استفاده از نتایج به‌دست آمده از این شاخص‌ها، مهم‌ترین خطوط به عنوان خطوط کاندیدای اولیه در حل مسئله TEP تعیین شوند. ویژگی مهم این شاخص‌ها در این است که همانند اکثر روش‌های مطالعات TEP، مبتنی بر معادلات پخش بار بوده و به راحتی قابل محاسبه هستند. در بخش دوم، مفاهیم متناظر با برنامه‌ریزی توسعه خطوط و عوامل مؤثر در روش‌های انجام مطالعات آن بیان خواهد شد. در بخش سوم، شاخص‌های پایداری خطوط و چگونگی محاسبه آن‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت. ارتباط میان شاخص‌های پایداری خطوط، پدافند غیرعامل و TEP و نیز چگونگی تعیین خطوط کاندیدای اولیه در بخش چهارم بیان خواهد شد. در بخش پنجم،

به دلیل وسعت شبکه برق ایران و موقعیت جغرافیایی کشور در منطقه، مرکزیت و راهبری شبکه برق کشورهای عضو اکو عملاً می‌تواند به کشور ایران محول شود. در حقیقت با اتصال شبکه برق کشورهای همسایه و حتی کشورهای اروپایی به شبکه برق ایران نه تنها ایران می‌تواند به عنوان کریدور برق میان کشورهای شرق و غرب خاورمیانه تعریف شده و به منافع مالی ناشی از آن دست پیدا کند، بلکه با این اتفاق، مشکلات کنترل فرکانس، ولتاژ، ذخیره و مسائل دیگر نیز منتفی خواهد شد. علاوه بر این، با توجه به وابسته شدن شبکه برق کشورهای مختلف به یکدیگر، از حیث امنیتی نیز این وابستگی می‌تواند برای شبکه برق ایران نیز مؤثر باشد. علی‌رغم این، لازمه دستیابی به این اهداف، داشتن یک شبکه انتقال با کفایت و امنیت بالا است. در نتیجه، همانند برنامه‌ریزی مشارکت نیروگاه‌ها [۱]، برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال باید بر اساس تعاریف و معیارهای متناظر با کفایت و امنیت شبکه برق صورت گرفته تا بتواند به صورت پیوسته انرژی برق را میان نواحی مختلف هم در داخل و هم در خارج از کشور انتقال دهد.

جهت دستیابی به یک شبکه بهم پیوسته که دارای قابلیت اطمینان بالا بوده و از سویی دیگر، کاملاً بهینه باشد، انجام مطالعات گوناگون ضروری به نظر می‌رسد. دسته‌بندی این مطالعات که مبتنی بر افق زمانی مطالعات است، در شکل (۱) نشان داده شده است. این دسته‌بندی، در برگیرنده تمام نیازهای شبکه برق از مطالعات پایداری تا مطالعات زمان‌بندی تعمیرات و طراحی و توسعه است.



شکل ۱. انواع مطالعات سامانه قدرت بر اساس افق زمانی مطالعات

برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال (TEP)<sup>۱</sup> از مهم‌ترین بخش‌های برنامه‌ریزی در سامانه‌های قدرت است که با هدف تعیین مکان، زمان و چگونگی احداث خطوط انتقال جدید به منظور برآوردن

<sup>۲</sup> Multiple Objective Optimization Algorithm

<sup>۳</sup> Cooperative Game Theory

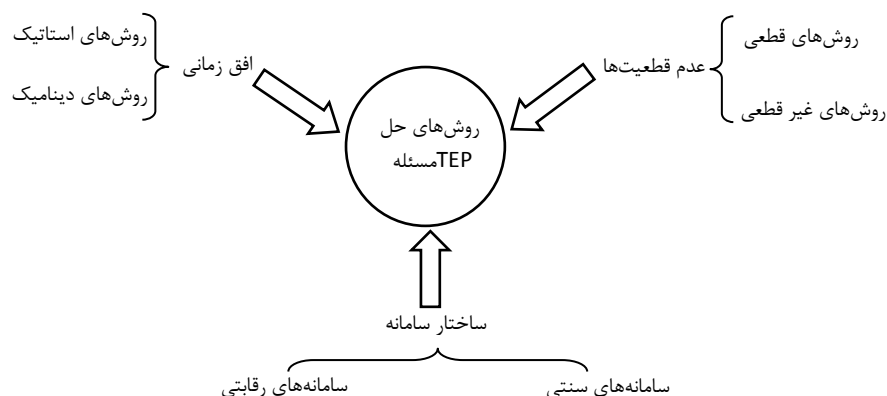
<sup>۴</sup> Centralized Planning

<sup>۵</sup> Decentralized Planning

<sup>۱</sup> Transmission Expansion Planning (TEP)

انتقال لحاظ کند. علاوه بر این بهینه‌ترین هزینه نیز در طرح‌های توسعه باید لحاظ گردد. بر این اساس، مسئله توسعه شبکه انتقال غالباً مسئله‌ای غیرخطی همراه با متغیرهای صحیح و در ابعاد بزرگ است.

با توجه به اینکه افق مورد مطالعه در برنامه‌ریزی سامانه‌های قدرت بلند مدت است، بنابراین برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال به دو شکل دینامیکی و استاتیکی انجام می‌گیرد. در نوع دینامیکی، برنامه‌ریزی به صورت چند مرحله‌ای بوده و کلیه پارامترهای مجهول به طور هم‌زمان تعیین می‌شوند. این در حالیست که در برنامه‌ریزی استاتیکی، پارامتر زمان از میان مجهولات مسئله حذف شده و برنامه‌ریزی برای یک افق از پیش تعیین شده انجام می‌گیرد. علاوه بر این، عدم قطعیت‌ها و نیز ساختار سامانه که مشتمل بر سامانه‌های سنتی و تجدید ساختار یافته است، در حل مسئله TEP بسیار تأثیرگذار هستند. روش‌هایی که عدم قطعیت‌ها را لحاظ می‌کنند، معمولاً شامل روش‌های قطعی و غیر قطعی هستند. در روش‌های قطعی، طرح انتقال تنها برای بدترین حالت سامانه بدون در نظر گرفتن احتمال رخداد (درجه رخداد) آن‌ها طراحی می‌شود. در روش‌های غیر قطعی (نامعین)، طرح انتقال برای تمامی موارد ممکن که احتمال وقوع در آینده دارند، با در نظر گرفتن احتمال رخداد آن‌ها، طراحی می‌شود [۱، ۵ و ۶]. در شکل (۲)، عوامل مؤثر در روش‌های انجام مطالعات TEP بیان شده است.



شکل ۲. عوامل مؤثر در روش‌های انجام مطالعات TEP

همان‌طور که اشاره شد، مسئله توسعه شبکه انتقال غالباً مسئله‌ای غیر خطی همراه با عدم قطعیت‌های متعدد است. علاوه بر این، در هنگام برنامه‌ریزی توسعه برای یک شبکه گسترده، تعداد کاندیداها توسعه بسیار زیاد است. به عنوان مثال، اگر در یک شبکه ۲۴ شینه تعداد کاندیداها توسعه ۴۱ باشد و قرار باشد ۴ خط توسعه جدید ایجاد گردد، در این صورت تعداد کل

نتایج عددی از چگونگی رفتار خطوط انتقال بر اساس شاخص‌های پایداری خطوط بیان خواهد شد.

## ۲. برنامه‌ریزی توسعه خطوط و عوامل مؤثر در روش‌های انجام مطالعات آن

برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال (TEP) از مهم‌ترین بخش‌های برنامه‌ریزی سامانه‌های قدرت است. از این رو، لزوم فراهم کردن فضای انتقال برای تولیدات فعلی و جدید، امکان رقابت در هر زمان، ایجاد دسترسی عادلانه برای تمام کسانی که تمایل حضور در بازار رقابتی را دارند و نگهداری قابلیت اطمینان در سطح مطلوب (تأمین بستر ایمن و همواره برقرار به منظور انتقال انرژی الکتریکی)، از مواردی هستند که توجه به موضوع TEP را جدی‌تر می‌سازند [۴]. بر این اساس، TEP به عنوان یک ابزار محاسباتی-منطقی برای دستیابی به یک یا چند نقطه بهینه تابع هدف برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال، مطرح می‌شود [۳]. بنابراین، هدف از این موضوع، تعیین مکان، زمان و چگونگی احداث خطوط انتقال جدید به منظور برآوردن نیاز مشترکین با کمترین هزینه و با رعایت مجموعه‌ای از قیود فنی، بهره‌برداری و قابلیت اطمینان است [۲ و ۳].

بنابراین، با توجه به آنچه که بیان شد، مالک شبکه انتقال برق باید با انتخاب توسعه بهینه، سود همه شرکت‌کنندگان در بازار با به عبارت دیگر، رفاه عمومی را در برنامه‌ریزی توسعه خطوط

علی‌رغم موارد مؤثر بیان شده، فاکتور امنیت نیز اهمیت بالایی در حل مسئله TEP دارد که در اکثر مطالعات صورت گرفته این مورد لحاظ نمی‌شود. در حقیقت، این فاکتور بیانگر عکس‌العمل شبکه در شرایط بحرانی است که معمولاً به صورت یک تابع هزینه مدل‌سازی می‌شود [۱۶ و ۱۷].

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

### ۲-۳. شاخص FVSI

این شاخص بر مبنای پخش توان در طول یک خط انتقال بوده و برای یک خط انتقال نوعی مطابق با شکل (۱)، از رابطه (۲) به دست می‌آید [۲۱ و ۲۲]:

$$FVSI_{ij} = \frac{4Z^2 Q_j}{V_i^2 X} \quad (2)$$

در رابطه فوق،  $Z$  امپدانس خط،  $X$  راکتانس خط،  $Q_j$  توان راکتیو در نقطه دریافت انتهایی خط و  $V_i$  ولتاژ نقطه ابتدایی خط هستند. چنانچه مقدار شاخص فوق به یک نزدیک باشد، در این صورت آن خط یک خط بحرانی بوده و ممکن است سامانه را به سمت ناپایداری سوق دهد. علاوه بر این، شاخص FVSI می‌تواند جهت تعیین باس‌های ضعیف سامانه نیز مورد استفاده قرار بگیرد. در حقیقت، ضعیف‌ترین باس سامانه بر اساس حداکثر بار مجاز در باسبار تعیین می‌شود. بدیهی است که ضعیف‌ترین باس سامانه، باسی است که کمترین بارگذاری مجاز در آن می‌تواند رخ دهد.

### ۴. ارتباط شاخص‌های پایداری خطوط، پدافند

#### غیرعامل و TEP

از آنجا که خطوط انتقال برق اصلی‌ترین بخش در انتقال توان تولیدی واحدهای نیروگاهی و تأمین انرژی مورد نیاز مشترکین مختلف هستند، بنابراین اعمال قیود پدافند غیرعامل در مسائل متناظر با توسعه این بخش از صنعت برق اجتناب‌ناپذیر است. از سویی دیگر، طرح‌های پیشنهادی به منظور توسعه شبکه قدرت باید پاسخگوی کفایت و امنیت شبکه قدرت باشند که این موضوع کاملاً متناظر با مسئله پدافند غیرعامل در شبکه برق است.

در این بخش، بر اساس مفاهیم کفایت و امنیت شبکه برق، رویه‌ای به منظور توسعه خطوط انتقال با در نظر گرفتن شاخص‌های پدافند غیرعامل ارائه خواهد شد. بر این اساس، در شکل (۴)، تلاش شده است تا ارتباط میان پدافند غیرعامل، قیود و تابع هدف به منظور حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال نشان داده شود. با توجه به این شکل، از دید پدافند غیرعامل، هم مکان و زمان اجرای طرح توسعه و هم میزان کفایت و قابلیت اطمینان (امنیت) شبکه قبل و پس از توسعه اهمیت داشته که این موارد در حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال به صورت تابع هدف و مجموعه قیود در نظر گرفته می‌شوند. همچنین، با توجه به شکل (۴)، از دید پدافند غیرعامل، علاوه بر مکان و زمان اجرای طرح، کفایت، قابلیت اطمینان و پایداری شبکه انتقال نیز دارای اهمیت بالایی در حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال دارد

کاندیداهای توسعه  $41^4 = 2825761$  است. بنابراین، محاسبه تابع هدف برای این تعداد کاندیدا بسیار سخت و در مواردی محال به نظر می‌رسد. بر این اساس، در این مقاله با استفاده از شاخص‌های پایداری خط، روشی به منظور تعیین بهینه خطوط کاندیدای اولیه ارائه خواهد شد. در بخش بعد، جزئیات این شاخص‌ها و روش پیشنهادی بیان شده است.

### ۳. شاخص پایداری خطوط

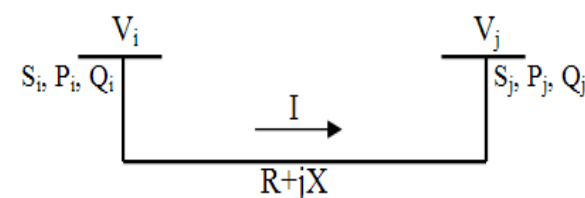
امروزه شاخص‌های مختلفی مانند شاخص SNB<sup>۱</sup> [۱۸] و شاخص میرایی نوسانات سامانه قدرت [۱۹]، به منظور تحلیل و بهره‌برداری صحیح از سامانه قدرت ارائه شده‌اند. با این حال، در این بخش، چگونگی محاسبه شاخص‌های  $L_{mn}$  و FSVI که مبتنی بر مطالعات پخش بار بوده و در تعیین وضعیت بهره‌برداری خطوط انتقال مورد استفاده قرار می‌گیرند، بیان شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۱-۳. شاخص $L_{mn}$

این شاخص نشان می‌دهد که کدام خط موجود در سامانه به نقطه ناپایداری نزدیک‌تر است. هر چه مقدار این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد خط مورد نظر به نقطه ناپایداری نزدیک‌تر است. به عبارتی بهتر این شاخص ضعیف‌ترین نقاط شبکه که مستعد فروپاشی ولتاژ هستند را نشان می‌دهد

خطی که دارای بیشترین مقدار  $L_{mn}$  است، در مقایسه با خطوطی که مقادیر کمتری دارند، ضعیف‌تر است. برای یک خط انتقال با داده‌های بیان شده در شکل (۳)، نحوه محاسبه شاخص پایداری خط  $L_{mn}$  بر اساس رابطه (۱) است.

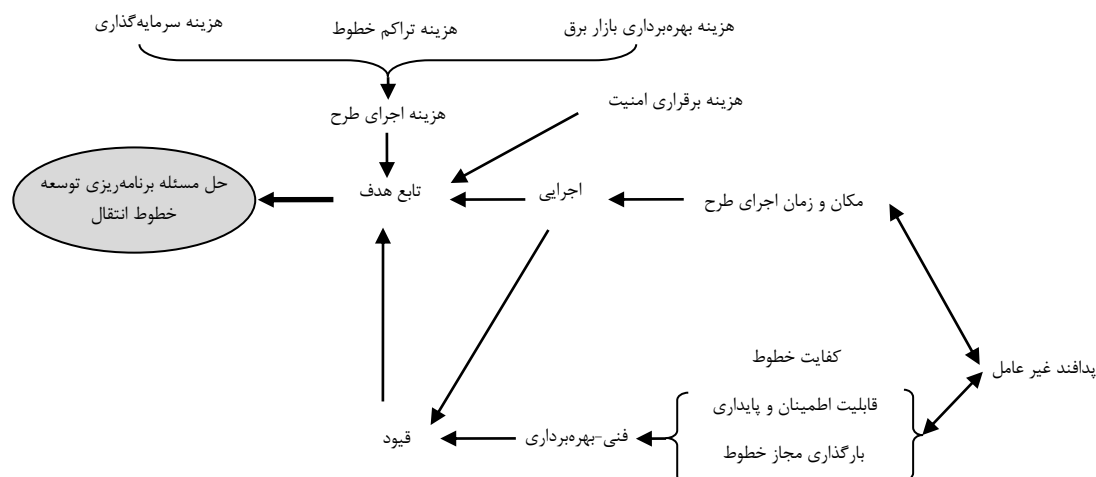
$$L_{mn} = \frac{4XQ_j}{[V_i \sin(\theta - \delta)]^2} \quad (1)$$



شکل ۳. سامانه دو باسه جهت محاسبه شاخص  $L_{mn}$

در رابطه (۱)، زاویه امپدانس خط،  $\delta$  اختلاف زاویه میان ولتاژ ابتدا و انتهای خط،  $X$  راکتانس خط،  $V_i$  ولتاژ ابتدای خط و  $Q_j$  توان راکتیو در نقطه انتهایی خط می‌باشند. برای حفظ شرایط پایدار در سامانه، مقدار شاخص  $L_{mn}$  باید کمتر از ۱ باشد [۲۰].

<sup>۱</sup> Saddle Node Bifurcation



شکل ۴. ارتباط میان پدافند غیرعامل، قیود و تابع هدف به منظور حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال

شبکه برق کشور مد نظر است. بر این اساس، برای حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال با اهداف بیان شده، تعیین نقاط کاندیدا اهمیت بالایی دارد که در این بخش با توجه به قابلیت شاخص‌های  $L_{mn}$  و FSVI، روشی به منظور تعیین خطوط کاندیدا ارائه خواهد شد.

همان‌طور که اشاره شد، این شاخص‌ها نشان می‌دهند که کدام خط موجود در سامانه به نقطه ناپایداری نزدیک‌تر است. هر چه مقدار این شاخص‌ها به یک نزدیک‌تر باشد خط مورد نظر به نقطه ناپایداری نزدیک‌تر است. به عبارتی بهتر این شاخص‌ها ضعیف‌ترین نقاط شبکه که مستعد فروپاشی هستند را نشان می‌دهد. از سویی دیگر، خطی که دارای بیشترین مقدار  $L_{mn}$  و یا FSVI است، در مقایسه با خطوطی که مقادیر کمتری دارند، ضعیف‌تر است. بنابراین، این خطوط، خطوطی بحرانی بوده که از دست رفتن آن‌ها می‌تواند هزینه‌های منفی مختلفی از قبیل بروز ناپایداری در شبکه، عدم انتقال توان به دلیل عدم وجود ظرفیت کافی برای انتقال توان و ...، به بهره‌برداران شبکه تحمیل کنند. بر این اساس، اولین گام در اجرای مسئله برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال، تعیین نقاط کاندیدای بهینه برای حل این مسئله است که این گام با توجه به شاخص‌های بیان شده صورت خواهد گرفت.

روش پیشنهادی به منظور تعیین خطوط بحرانی بر اساس شاخص‌های پایداری خط در شکل (۵)، بیان شده است. با توجه به این شکل می‌توان چنین برداشت کرد:

- تعیین سال مطالعات: از آنجا که برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال برای سال‌های آتی (افق) صورت می‌گیرد. بنابراین، این موضوع در مطالعات باید لحاظ گردد. در اینجا، تعیین شاخص‌های پایداری خطوط برای سال موجود و سال افق صورت می‌گیرد. به

این موارد، علاوه بر این که می‌توانند به صورت مستقیم وارد تابع هدف شوند، می‌توانند به صورت مجموعه‌ای از قیود در حل این مسئله اعمال گردند. علاوه بر موارد فوق، به طور مرسوم، تابع هدفی که به منظور حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال مورد استفاده قرار می‌گیرد، به صورت یک تابع هزینه مدل‌سازی شده که این هزینه در محیط‌های سنتی، به صورت کم کردن هزینه در جهت بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. همچنین این هزینه در محیط‌های تجدید ساختار یافته صنعت برق به صورت افزایش سود شرکت کنندگان در بازار برق مطرح می‌شود. از سویی دیگر، با توجه به اینکه هدف از این مقاله حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه خطوط با در نظر گرفتن پدافند غیرعامل است، بنابراین در نظر گرفتن هزینه برقراری امنیت نیز ضروری است. بنابراین، با توجه به شکل (۴)، علاوه بر در نظر گرفتن سود همه شرکت کنندگان در بازار، هزینه ساخت و میزان بهبود امنیت شبکه نیز در برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های انتقال دارای اهمیت است. از سویی دیگر، همان‌طور که اشاره شد، از اهدافی که در TEP مورد توجه است، پایداری، کفایت و امنیت شبکه هستند که متناظر با قابلیت اطمینان سامانه بوده و باید همواره مد نظر قرار گیرند. بدین منظور، برای تعیین خطوط کاندیدا به منظور حل مسئله TEP، در ابتدا با توجه به معیارهای پایداری بیان شده در بخش قبل (شاخص‌های پایداری خط)، خطوط بحرانی سامانه تعیین می‌شوند. این خطوط می‌تواند به عنوان خطوط کاندیدای اولیه جهت اعمال به تابع هدف مسئله TEP در نظر گرفته شود.

#### ۴-۱. چگونگی تعیین خطوط کاندیدا بر اساس شاخص‌های پایداری خط

انتقال پایدار و پیوسته انرژی و ایفای نقش کریدور انرژی در برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال به عنوان هدف اصلی در مدیریت

لازم به ذکر است که تعیین خطوط بحرانی به عنوان کاندیدا می‌تواند بر اساس معیاری که توسط اپراتور شبکه تعیین می‌شود، صورت گیرد. به عنوان مثال، خطوطی که  $L_{mn}/FSVI > 0.8$  دارند، می‌توانند به عنوان بحرانی‌ترین خطوط و خطوط کاندیدا جهت حل مسئله TEP مورد استفاده قرار گیرد.

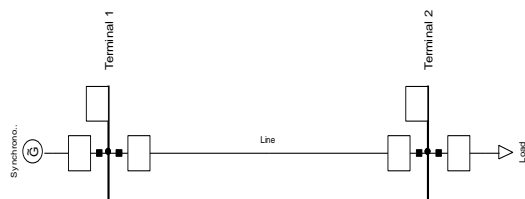
## ۵. نتایج عددی از چگونگی تعیین شاخص‌های پایداری خطوط

در این بخش، نتایج تحلیلی از بررسی شاخص‌های  $L_{mn}$  و  $FSVI$  بیان خواهد شد. هدف از این بخش، بررسی قابلیت شاخص‌های مذکور و چگونگی استفاده از آن‌ها در تعیین خطوط بحرانی و اولویت‌بندی خطوط کاندیدا است.

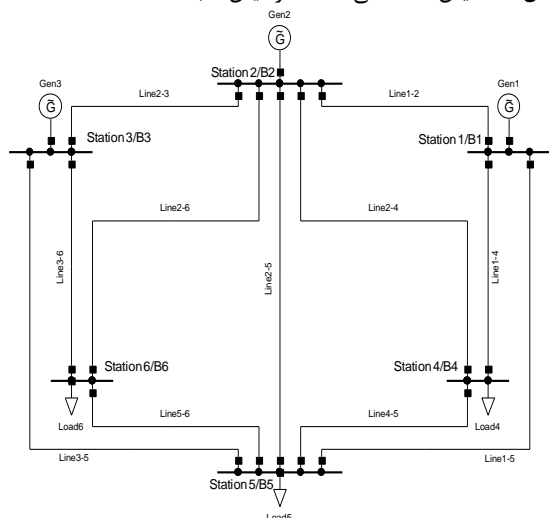
شکل‌های (۶) و (۷) نمایش تک‌خطی سامانه‌های آزمایش مذکور را نشان می‌دهد. همچنین، آنالیزهای صورت گرفته بر روی سامانه‌های مذکور با استفاده از نرم‌افزارهای PSAT [۲۵]، DIGSILENT [۲۶] و متلب [۲۷] انجام شده است.

### ۵-۱. نتایج سامانه آزمایش ۲ باسه

در آنالیز این سامانه، نتایج برای ضریب توان‌های ۰/۸، ۰/۶۵ و ۰/۹۵ مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر عددی شاخص‌های مذکور به ازای بارگذاری‌ها و ضرایب توان مختلف در جدول (۱)، بیان شده است.



شکل ۶. نمایش تک خطی سامانه آزمایش ۲ باسه



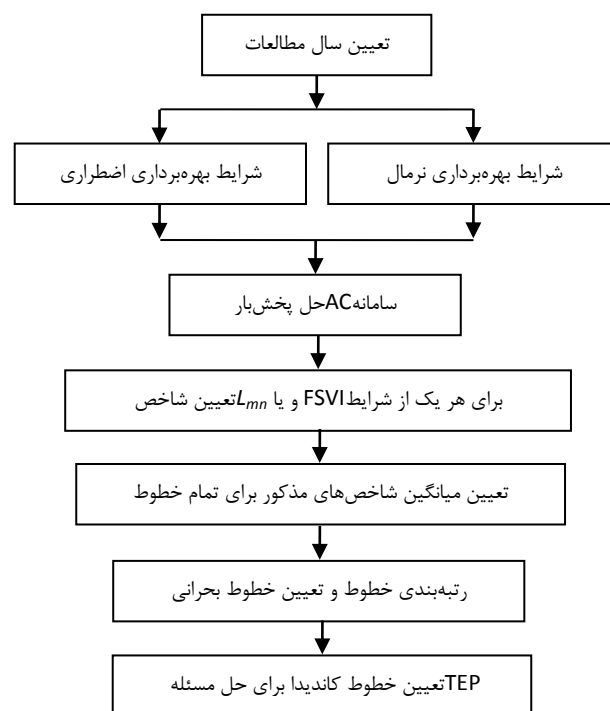
شکل ۷. نمایش تک خطی سامانه آزمایش ۶ باسه

منظور مدل‌سازی سال افق، بار و تولید سال افق مدل‌سازی می‌شوند. این موارد می‌تواند بر اساس الگوریتم‌های پیش‌بینی بار [۲۳ و ۲۴] تعیین شوند. شرایط بهره‌برداری: در اینجا تعیین شاخص‌های پایداری خطوط هم برای شرایط نرمال و هم برای شرایط اضطراری ( $n-1$ ) تعیین می‌شوند. در حقیقت هدف از این کار تحلیل وضعیت خطوط در شرایط بهره‌برداری مختلف است. همچنین، شرایط اضطراری می‌تواند به صورت تصادفی به شبکه اعمال گردد.

- پخش بار AC: همچنان که اشاره شد، به منظور تعیین پایداری شبکه برق کامل‌ترین نوع پخش بار، پخش بار AC بوده که در آن وضعیت توان راکتیو شبکه نیز لحاظ می‌شود.

- پس از انجام مراحل مذکور، شاخص‌های  $L_{mn}$  و  $FSVI$  برای هر یک از خطوط تعیین می‌گردد. در این مرحله، با توجه به سال مطالعات و شرایط بهره‌برداری، برای هر خط چند شاخص به دست آمده که در نتیجه متوسط این شاخص‌ها برای هر خط تعیین می‌شود.

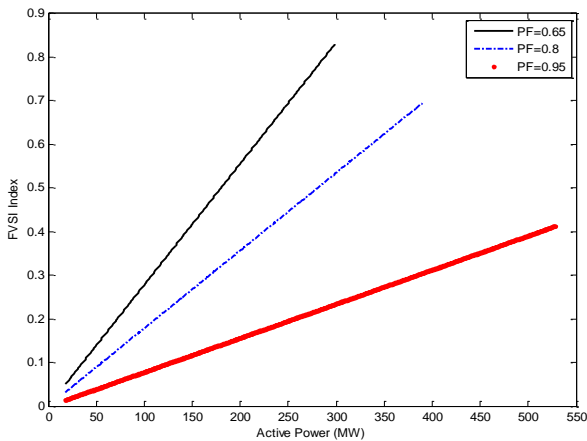
- در نهایت، با توجه به میانگین به دست آمده، رتبه‌بندی خطوط انجام شده و خطوط بحرانی تعیین می‌شوند. خطوط بحرانی به عنوان خطوط کاندیدای نهایی در حل مسئله TEP مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۸. مراحل تعیین خطوط بحرانی بر اساس شاخص‌های پایداری خط

جدول ۱. مقادیر شاخص‌های مختلف در ضرایب توان و بارگذاری‌های مختلف در سامانه آزمایش ۲ باسه

| Load Scale | PF=0.95  |          | PF=0.80  |          | PF=0.65  |          | Average  |          |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|            | $L_{mn}$ | FVSI     | $L_{mn}$ | FVSI     | $L_{mn}$ | FVSI     | $L_{mn}$ | FVSI     |
| 1          | 0.014149 | 0.014063 | 0.032258 | 0.03209  | 0.050241 | 0.050023 | 0.032216 | 0.032059 |
| 1.8        | 0.025591 | 0.025314 | 0.058301 | 0.057762 | 0.090737 | 0.090042 | 0.058210 | 0.057706 |
| 3          | 0.042973 | 0.04219  | 0.097794 | 0.09627  | 0.152032 | 0.15007  | 0.097600 | 0.096177 |
| 6          | 0.08773  | 0.08438  | 0.199104 | 0.192541 | 0.308662 | 0.30014  | 0.198499 | 0.192354 |
| 9          | 0.134728 | 0.12657  | 0.305007 | 0.288811 | 0.471631 | 0.450211 | 0.303789 | 0.288531 |
| 12         | 0.184591 | 0.16876  | 0.417191 | 0.385082 | 0.644359 | 0.600281 | 0.415380 | 0.384708 |
| 16.6       | 0.26881  | 0.233452 | 0.609228 | 0.532697 | 0.977121 | 0.830388 | 0.618386 | 0.532179 |



شکل ۹. تغییرات شاخص FVSI به ازای بارگذاری‌ها و ضرایب توان مختلف - سامانه آزمایش ۲ باسه

متناظر با نتایج شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، در جدول (۲)، نتایج عددی حاصل از بررسی رفتار شاخص‌های مختلف در بارگذاری‌های متفاوت در دو ضریب توان‌های متفاوت نشان داده شده است.

با توجه به این شکل‌ها، بر اساس شاخص  $L_{mn}$  به ترتیب خطوط ۱-۵، ۲-۵، ۳-۵، ۴-۵، ۱-۴، ۲-۴، ۳-۴ و بر اساس شاخص FVSI به ترتیب خطوط ۱-۵، ۲-۵، ۳-۵، ۴-۵، ۱-۴، ۲-۴، ۳-۴ و ۲ دارای حساسیت بالاتری بوده و به عنوان خطوط بحرانی سامانه معرفی می‌شوند. با توجه به این نتایج، چند نکته حائز اهمیت است:

- با توجه به نتایج، با افزایش ضریب توان بار، حد استاتیکی پایداری افزایش پیدا می‌کند.
- با افزایش ضریب بارگذاری بارهای سامانه، نقادیر شاخص‌های  $L_{mn}$  و FVSI افزایش پیدا می‌کند. حد پایداری در ضریب توان ۰/۷۳، ۱۰/۷۱۶۶ و در ضریب توان ۰/۸۳، ۱۱/۱۶۸ است.
- هر چه ضریب توان بارها کمتر باشد، مقادیر شاخص‌های مذکور در بارگذاری ثابت، بیشتر است.

متناظر با نتایج بیان شده در جدول (۱)، شکل‌های (۸) و (۹)، به ترتیب تغییرات شاخص‌های  $L_{mn}$  و FVSI را به ازای بارگذاری‌های مختلف و نیز ضرایب توان مختلف برای بار سامانه نشان می‌دهند. با توجه به نتایج بیان شده؛

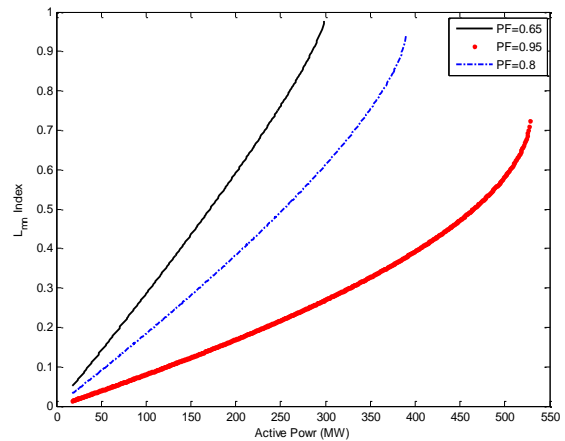
- هر چه ضریب بارگذاری بیشتر می‌شود، مقادیر شاخص‌های  $L_{mn}$  و FVSI افزایش می‌یابد.

- با توجه به نتایج بیان شده، مقدار شاخص‌های  $L_{mn}$  و FVSI در ضریب توان‌های پایین‌تر بیشتر از ضریب توان‌های بالاتر است. در نتیجه، هر دو شاخص قابلیت استفاده در تعیین وضعیت بحرانی خطوط را دارند.

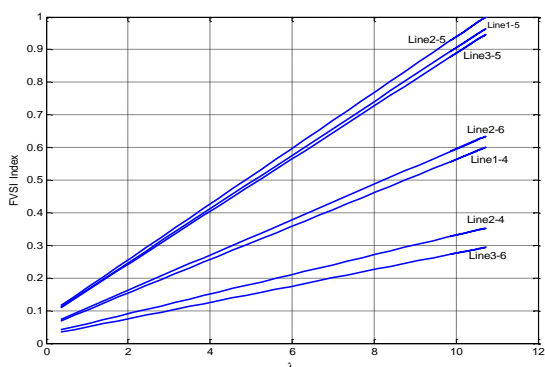
- هر دو شاخص مورد استفاده، رفتاری تقریباً خطی دارند.

#### ۲-۵. نتایج سامانه آزمایش ۶ باسه

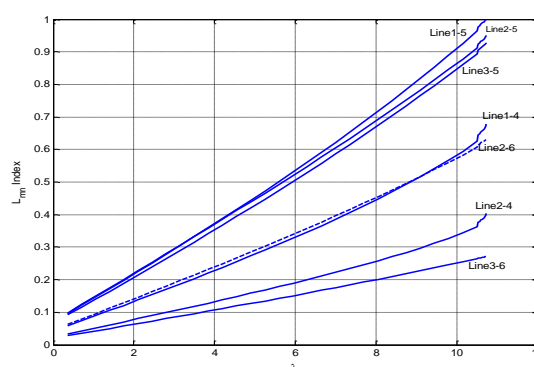
در این قسمت، تأثیر دو ضریب توان بار مختلف بر روی شاخص‌های  $L_{mn}$  و FVSI مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) تغییرات شاخص‌های  $L_{mn}$  و FVSI نسبت به تغییرات بار سامانه آزمایش ۶ باسه نشان داده شده در شکل (۶)، برای تمام خطوط نشان داده شده است.



شکل ۸. تغییرات شاخص  $L_{mn}$  به ازای بارگذاری‌ها و ضرایب توان مختلف - سامانه آزمایش ۲ باسه



شکل ۱۱. تغییرات شاخص FSVI به ازای بارگذاری‌های مختلف در ضریب توان ۰/۷۳ - سامانه آزمایش ۶ باسه



شکل ۱۰. تغییرات شاخص  $L_{mn}$  به ازای بارگذاری‌های مختلف در ضریب توان ۰/۷۳ - سامانه آزمایش ۶ باسه

جدول ۲. مقادیر شاخص‌های  $L_{mn}$  و FSVI به ازای بارگذاری‌ها و ضرایب توان مختلف - سامانه آزمایش ۶ باسه

| PF=0.73                 |          |         |          |         |          |         |          |        |          |       |          | Line |
|-------------------------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|--------|----------|-------|----------|------|
| Scale of Loads          |          |         |          |         |          |         |          |        |          |       |          |      |
| 10.5611 (پس از فروپاشی) |          | 10.7166 |          | 10.7153 |          | 10.6999 |          | 6.2999 |          | 0.35  |          |      |
| FVSI                    | $L_{mn}$ | FVSI    | $L_{mn}$ | FVSI    | $L_{mn}$ | FVSI    | $L_{mn}$ | FVSI   | $L_{mn}$ | FVSI  | $L_{mn}$ |      |
| 0.289                   | 0.267    | 0.295   | 0.272    | 0.294   | 0.271    | 0.293   | 0.270    | 0.183  | 0.159    | 0.034 | 0.028    | 3-6  |
| 0.933                   | 0.916    | 0.947   | 0.928    | 0.946   | 0.926    | 0.944   | 0.924    | 0.589  | 0.530    | 0.109 | 0.092    | 3-5  |
| 0.348                   | 0.403    | 0.354   | 0.404    | 0.353   | 0.399    | 0.352   | 0.394    | 0.219  | 0.200    | 0.041 | 0.034    | 2-4  |
| 0.592                   | 0.674    | 0.602   | 0.678    | 0.600   | 0.673    | 0.599   | 0.668    | 0.374  | 0.347    | 0.069 | 0.058    | 1-4  |
| 0.951                   | 0.987    | 0.965   | 1        | 0.964   | 0.999    | 0.963   | 0.996    | 0.601  | 0.561    | 0.111 | 0.096    | 1-5  |
| 0.625                   | 0.624    | 0.635   | 0.631    | 0.634   | 0.630    | 0.633   | 0.628    | 0.395  | 0.358    | 0.073 | 0.063    | 2-6  |
| 0.986                   | 0.939    | 1       | 0.950    | 0.999   | 0.948    | 0.998   | 0.944    | 0.623  | 0.549    | 0.115 | 0.098    | 2-5  |
| PF=0.83                 |          |         |          |         |          |         |          |        |          |       |          | Line |
| Scale of Loads          |          |         |          |         |          |         |          |        |          |       |          |      |
| 11.1678 (پس از فروپاشی) |          | 11.168  |          | 11.1677 |          | 10.8484 |          | 6.2999 |          | 0.35  |          |      |
| FVSI                    | $L_{mn}$ | FVSI    | $L_{mn}$ | FVSI    | $L_{mn}$ | FVSI    | $L_{mn}$ | FVSI   | $L_{mn}$ | FVSI  | $L_{mn}$ |      |
| 0.266                   | 0.242    | 0.267   | 0.243    | 0.267   | 0.242    | 0.260   | 0.234    | 0.160  | 0.136    | 0.029 | 0.024    | 3-6  |
| 0.944                   | 0.925    | 0.946   | 0.927    | 0.946   | 0.926    | 0.921   | 0.882    | 0.568  | 0.503    | 0.105 | 0.087    | 3-5  |
| 0.320                   | 0.378    | 0.321   | 0.378    | 0.321   | 0.376    | 0.312   | 0.328    | 0.193  | 0.174    | 0.036 | 0.029    | 2-4  |
| 0.545                   | 0.623    | 0.546   | 0.624    | 0.546   | 0.621    | 0.532   | 0.559    | 0.328  | 0.297    | 0.061 | 0.050    | 1-4  |
| 0.961                   | 0.997    | 0.964   | 1        | 0.964   | 0.999    | 0.939   | 0.951    | 0.578  | 0.532    | 0.107 | 0.091    | 1-5  |
| 0.576                   | 0.572    | 0.577   | 0.574    | 0.577   | 0.573    | 0.562   | 0.544    | 0.346  | 0.309    | 0.064 | 0.054    | 2-6  |
| 0.997                   | 0.951    | 0.999   | 0.953    | 0.999   | 0.952    | 0.974   | 0.902    | 0.599  | 0.523    | 0.111 | 0.093    | 2-5  |

FSVI و  $L_{mn}$  و رتبه به‌دست آمده برای خطوط بر اساس این شاخص‌ها، در دو ستون آخر این جدول بیان شده است. بر این اساس، ملاحظه می‌شود که هر دو شاخص تقریباً با رفتاری مشابه با یکدیگر، خطوط بحرانی را رتبه‌بندی کرده‌اند. به عنوان مثال، هر دو شاخص  $L_{mn}$  و FSVI، خط ۲-۵ را به عنوان بحرانی‌ترین خط شناسایی کرده‌اند.

با توجه به نتایج بیان شده در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) و نیز جدول (۲)، شاخص‌های پایداری خط به ازای شرایط مختلف بهره‌برداری رفتاری خطی داشته که این موضوع کمک بسیاری در تعیین ترتیب خطوط بحرانی سامانه می‌کند. همچنین، متناظر با این نتایج، متوسط شاخص‌های مذکور در ضرایب توان مختلف در جدول (۳)، بیان شده است. علاوه بر این، متوسط کل شاخص‌های

جدول ۳. مقادیر متوسط شاخص‌های  $L_{mn}$  و FSVI به ازای بارگذاری‌ها و ضرایب توان مختلف - سامانه آزمایش ۶ باسه

| Average $L_{mn}$ | Average FSVI | PF=0.73  |        | PF=0.83  |        | Line |
|------------------|--------------|----------|--------|----------|--------|------|
|                  |              | $L_{mn}$ | FVSI   | $L_{mn}$ | FVSI   |      |
| 0.1879 (7)       | 0.2082 (7)   | 0.2      | 0.2198 | 0.1758   | 0.1966 | 3-6  |
| 0.6725 (3)       | 0.7021 (3)   | 0.68     | 0.707  | 0.665    | 0.6972 | 3-5  |
| 0.2716 (6)       | 0.2502 (6)   | 0.2862   | 0.2638 | 0.257    | 0.2366 | 2-4  |
| 0.4575 (4)       | 0.4257 (5)   | 0.4848   | 0.4488 | 0.4302   | 0.4026 | 1-4  |
| 0.6912 (2)       | 0.7156 (2)   | 0.7304   | 0.7208 | 0.7146   | 0.7104 | 1-5  |
| 0.4364 (5)       | 0.4496 (4)   | 0.462    | 0.474  | 0.4108   | 0.4252 | 2-6  |
| 0.7225 (1)       | 0.7417 (1)   | 0.6978   | 0.747  | 0.6846   | 0.7364 | 2-5  |



## ۳-۵. تحلیل نتایج

صورت استفاده در شبکه‌های بزرگ برق، روش‌های مبتنی بر شبکه‌های هوشمند و منطق فازی می‌توانند هم از حیث سرعت محاسبات و هم از حیث دقت محاسبات، بر روش ارائه شده در این مقاله پیشی گیرند.

## ۷. مراجع

- [1] Ghaffarpour, R.; Hashemi, Y.; Ehsan, M. "Involving Defensive Approach in Unit Commitment Scheduling and Presenting Probability Model of Plants Inaccessibility"; *Advanced Defence Sci. and Tech.* 2015, 5, 231-246
- [2] Oloomi Buygi, M.; Shanechi, M. H.; Balzer, G.; Shahidehpour, M. "Transmission Planning Approaches in Restructured Power System"; *Power Tech. Conf. Proc., IEEE Bologna* 2003, 23-26.
- [3] Latorre, G.; Cruz, R. D.; Areiza, J. M.; Villegas. A. "Classification of Publications and Models on Transmission Expansion Planning"; *IEEE Trans. Power Syst.* 2003, 18, 938-946.
- [4] Rothwell, G.; Gomez. T. "Electricity Economics: Regulation and Deregulation"; *Wiley-IEEE Press eBook Chapters: IEEE*, 2003, 277-278.
- [5] Shahidehpour, M.; Alomoush. M. "Restructured Electrical Power Systems"; *Marcel Dekker Publishers*, 2001.
- [6] Mansour, W.; Li. Y.; Korczynski, J. K.; ILLS, B. J. M. "Application of Transmission Reliability Assessment in Probabilistic Planning of BC Hydro Vancouver Sout Metro System"; *IEEE Trans. Power Syst.* 1995, 10, 964-970.
- [7] Fang, R.; Hill. D. J. "A New Strategy for Transmission Expansion in Competitive Electricity Markets"; *IEEE Trans. Power Syst.* 2003, 18, 374-380.
- [8] Oloomi Buygi, M.; Shanechi, M. H.; Shahidehpour. M. "Transmission Planning in Deregulated Environments"; *IJE Transaction A* 2002, 15, 245-255.
- [9] Sun, H.; Yu, D. C. "A Multiple Objective Optimization Model of Transmission Enhancement Planning for Independent Transmission Company (ITC)"; *Proc. Society Summer Meeting, IEEE Power Eng.* 2002, 2033-2038.
- [10] Contreras, J.; Wu, F. F. "Coalition Formation in Transmission Expansion Planning"; *IEEE Trans. Power Syst.* 1999, 11, 1144-1152.
- [11] Yen, J.; Yan, Y. H.; Wang, B. J.; Sin P. K. H.; Wu, F. F. "Multi Agent Coalition Formation in Power Transmission Planning"; *Proc. Int. Conf. IEEE Power Syst.* 1998, 433-443.
- [12] Pereira, M. V. F.; McCoy, M. F.; Merrill. H. M. "Managing Risk in the New Power Business"; *IEEE Computer Application Power* 2000, 18-24.
- [13] Styczynski, Z. A. "Power Network Planning using Game Theory"; *Proc. Int. Conf. Power System, Trondheim* 1999, 607-613.
- [14] Ilic, M.; Galiana F.; Fink. L. "Power System Restructuring, Engineering and Economics"; *Kluwer Academic, Netherlands*, 1998.
- [15] Rudnick, H.; Palma, R.; Cura, E.; Silva, C. "Economically Adopted Transmission System in Open Access Schemes-Application of GA"; *IEEE Trans. Power Syst.* 1996, 11, 1427-1430.

با توجه به نتایج بیان شده برای سامانه‌های آزمایش ۲ و ۶ باسه و با در نظر گرفتن الگوریتم پیشنهادی به منظور تعیین خطوط بحرانی سامانه با استفاده از شاخص‌های  $L_{mn}$  و FSVI، هر دو شاخص  $L_{mn}$  و FSVI، با رفتاری مشابه، خطوط بحرانی سامانه را تعیین می‌کنند. علاوه بر این، رتبه‌بندی خطوط بحرانی بر اساس شاخص‌های مذکور، تقریباً مشابه یکدیگر است. این نتایج برای شرایط بهره‌برداری مختلف که در این مقاله به صورت بارگذاری‌ها و ضرایب توان مختلف مدل‌سازی شده است، صادق بوده که به خوبی بیانگر قابلیت این شاخص‌ها در رتبه‌بندی و تعیین خطوط بحرانی سامانه است. به عبارتی دیگر، مقادیر به‌دست آمده برای خطوط سامانه بر اساس شاخص‌های مذکور، به نوعی بیانگر میزان کفایت و امنیت خطوط شبکه در بهره‌برداری با قابلیت اطمینان مناسب از شبکه است. بنابراین، با در اختیار داشتن این مقادیر و نیز رتبه‌بندی خطوط بحرانی سامانه، خطوط کاندیدای اولیه به منظور اعمال به روش‌های حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه خطوط، تعیین می‌شود.

## ۶. نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال (TEP) در ایجاد یک بستر مناسب با کفایت و امنیت کافی برای انتقال انرژی الکتریکی، در این مقاله، این موضوع مورد بررسی قرار گرفت و برخی از عوامل مؤثر در حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه خطوط انتقال، بیان شد. بر این اساس با توجه به اینکه در اکثر روش‌های ارائه شده به منظور حل مسئله TEP، خطوط کاندیدای اولیه بسیار اهمیت دارند، بنابراین، در این مقاله روشی مبتنی بر شاخص‌های  $L_{mn}$  و FSVI به منظور تعیین خطوط کاندیدای اولیه، ارائه شد. از مهم‌ترین ویژگی‌های شاخص‌های مذکور، سادگی و سرعت محاسبه این شاخص‌ها و مبتنی بودن آن‌ها به معادلات استاتیکی پخش بار سامانه است. بر این اساس، مقادیر شاخص‌های مذکور در شرایط مختلف بهره‌برداری شامل بارگذاری‌ها و ضرایب توان مختلف، برای تمام خطوط سامانه‌های آزمایش مورد مطالعه، محاسبه شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، شاخص‌های مذکور خطوط بحرانی سامانه را به خوبی تعیین و رتبه‌بندی می‌کنند. بنابراین با استفاده از شاخص‌های استاتیکی بیان شده، خطوط کاندیدا می‌توانند به راحتی و با دقت و سرعت بالا جهت اعمال به روش‌های حل مسئله TEP تعیین شوند. شایان ذکر است که روش ارائه شده در این مقاله در مقایسه با روش‌های مبتنی بر شبکه‌های هوشمند و منطق فازی ساده‌تر است. با این حال، در

- [21] Musirin, I.; Abdul Rahman, T. K. "Novel Fast Voltage Stability Index (FVSI) for Voltage Stability Analysis in Power Transmission System"; Student Conf. on Research and Development 2002, 265-268.
- [22] Verayiah, R.; Zainal Abidin, I. "A Study on Static Voltage Collapse Proximity Indicators"; 2<sup>nd</sup> IEEE Int. Conf. Power and Energy 2008, 531-536.
- [23] Amjady, N. "Short-Term Bus Load Forecasting of Power Systems by a New Hybrid Method"; IEEE Trans. Power Syst. 2003, 22, 333-341.
- [24] Amjady, N.; Keynia, F. "Short-term Load Forecasting of Power Systems by Combination of Wavelet Transform and Neuro-Evolutionary Algorithm"; J. Energy 2009, 34, 46-57.
- [25] PSAT Software Package, Available: <http://www.power.uwaterloo.ca/~fmlano/psat.htm>, accessed Jan 30, 2012.
- [26] DIgSILENT User Manual Toolbox, Available: <http://www.digsilent.de/>.
- [27] MATLAB Software Package, Available: <http://www.mathworks.com>, accessed May 20, 2014.
- [16] Subramaniam, R. K.; Billinton, R.; Wacker, G. "Understanding Industrial Losses Resulting from Electric Service Interruption"; IEEE Trans. Industry Application 1993, 29, 238-244.
- [17] Subramaniam, R. K.; Billinton, R.; Wacker, G. "Understanding Commercial Losses Resulting from Electric Service Interruption"; IEEE Trans. Industry Application 1993, 29, 233-237.
- [18] Amjady, N.; Velayati, M. H. "Dynamic Voltage Stability Prediction of Power Systems by a New Feature Selection Technique and Probabilistic Neural Network"; J. European Trans. on Electrical Power 2011, 21, 312-328.
- [19] Velayati, M. H.; Ghaffarpour, R. "Enhance the Passive Defense of Power System Networks Using Prediction Damping, Type and Location of Power System's Oscillations"; Advanced Defence Sci. and Tech. 2015, 6, 19-31.
- [20] Moghavvemi, M.; Omar, F. M. "Technique for Contingency Monitoring and Voltage Collapse Prediction"; IEEE Proc. Generation, Transmission and Distribution 1998, 634-640.