

پیشنهاد یک روش جدید جهت برنامه‌ریزی توسعه تولید (GEP) بر مبنای تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)

رضا اعتماد^۱، دانشجوی دکتری، محسن کیا^۲، دانشجوی دکتری، محمدصادق سپاسیان^۳، دانشیار، مهرداد ستایش‌نظر^۴، استادیار،
محمدصادق قاضی‌زاده^۵، دانشیار

۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ - دانشکده مهندسی برق - پردیس فنی شهیدعباسپور، دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران
(re.etemad@gmail.com)^۱، (Mohsenkia@gamil.com)^۲، (Sepasian@pwut.ac.ir)^۳، (msnazar@pwut.ac.ir)^۴،
(Ghazizadeh@pwut.ac.ir)^۵

چکیده: برنامه توسعه تولید به معیارهای مختلفی وابسته است. در این مقاله، ابتدا به بررسی معیارهای موثر در برنامه‌ریزی توسعه تولید (GEP^۱) پرداخته شده و سپس یک مدل جدید برای GEP پیشنهاد گردیده است. در این مدل با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP^۲) که یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه (MADM^۳) است، برنامه‌ریزی توسعه تولید مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور پنج معیار اساسی معرفی گردیده است که به طور هم‌زمان و با استفاده از روش FAHP به بهینه‌سازی مساله GEP پرداخته شده و مکان بهینه نصب نیروگاه جدید تعیین می‌گردد. برای این منظور در مرحله اول با استفاده از پخش بار بهینه، مقدار هزینه حدی ناحیه‌ای (LMP^۴) در هر یک از شین‌ها محاسبه می‌گردد. در گام بعد با استفاده از یک شاخص پیشنهادی، مکان‌های کاندیدا برای نصب نیروگاه تعیین می‌گردند. در نهایت با استفاده از روش FAHP هر یک از معیارها ارزشی نسبت داده شده و با استفاده از این ارزش، بهینه‌ترین مکان نصب نیروگاه از بین مکان‌های کاندیدا انتخاب می‌گردد. برای بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، روش مذکور بر روی شبکه ۱۴ شین IEEE پیاده‌سازی شده است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی توسعه تولید (GEP)، روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)، تصمیم‌گیری چند معیاره، هزینه حدی ناحیه‌ای (LMP).

A Novel Approach for Generation Expansion Planning Based on Fuzzy-Analytical Hierarchy Process (FAHP)

R. Etemad¹, M. Kia², M- S. Sepasian³, M. Setayesh- nazar⁴, M- S. Ghazi- zadeh⁵,
1, 2, 3, 4 & 5 - Abbaspour College of engineering, Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract: Due to growing demand of the electric energy, the need to generation expansion planning is inevitable. In this paper at first effective criteria in Generation Expansion Planning (GEP) are determined and a novel approach for GEP is proposed. In this approach Fuzzy-Analytical Hierarchy Process (FAHP) is utilized for GEP. The Fuzzy is one of the techniques that uses for weight assessment in decision making in Multi Criteria Decision Making (MCDM) model. For this purpose, five criteria are introduced and then by utilization of the FAHP, the optimization of GEP problem is implemented. In the first stage, the Local Marginal Price (LMP) of each bus is calculated by Optimal Power Flow (OPF) execution. In the next stage, base on the criteria that will describe, the candidate places for power plants installation are determined. Finally, the FAHP is used to assign a value to each criterion and by using these values the optimal place for installation of power plant among the candidate places is determined. The IEEE 14 bus network is used to simulate and evaluate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Generation Expansion Planning (GEP), Fuzzy-Analytical Hierarchy Process (FAHP), Multi Criteria Decision Making (MCDM), Local Marginal Price (LMP).

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۲/۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱/۲۹

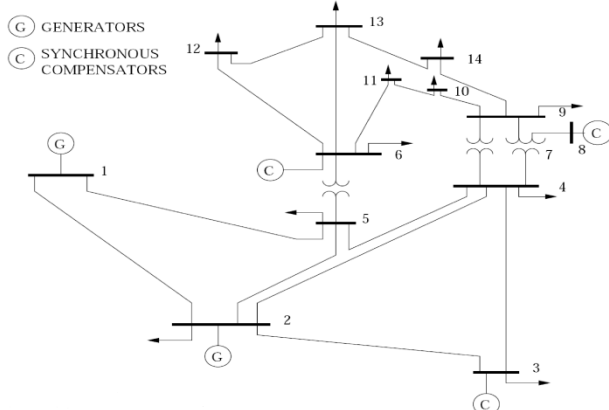
نام نویسنده مسئول: رضا اعتماد

نشانی نویسنده مسئول: ایران- تهران- حکیمیه- خ وفادار- دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور- پژوهشکده دانشجویان دکتری برق

۱- مقدمه

انتظار واحدهای تولید انرژی در نظر گرفته شده است و برای این منظور از روش بهینه‌سازی PSO استفاده گردیده است و عدم قطعیت‌های موجود توسط تابع توزیع احتمال و روش مونت کارلو شبیه‌سازی شده است. مرجع [۱۰] با استفاده از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح (MILP) به برنامه‌ریزی هم‌زمان توسعه تولید و انتقال پرداخته است. روش پیشنهادی در این مقاله به صورت یک مدل پیشنهادی در سه سطح می‌باشد. با توجه به در نظر گرفتن تاثیر برنامه‌ریزی توسعه انتقال بر برنامه‌ریزی توسعه تولید و هم‌چنین به دلیل خطی بودن فرمولاسیون این روش جهت پیاده‌سازی بر روی شبکه‌های بزرگ دارای مزیت می‌باشد. البته خطی‌سازی‌های صورت گرفته و مدل‌های تقریبی مورد استفاده ممکن است اندکی در دقت پاسخ مساله تاثیر منفی بگذارد.

در این مقاله یک روش ابتکاری جهت برنامه‌ریزی توسعه تولید پیشنهاد گردیده است. این روش از سه مرحله تشکیل شده که در مرحله اول، مقدار LMP مربوط به هر یک از شینه‌ها با استفاده از پخش بار بهینه (OPF⁵) تعیین می‌گردد. در مرحله بعد، با استفاده از LMP‌های به دست آمده، مکان‌های کاندید تعیین می‌گردند. در مرحله پایانی، با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی که از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه (MADM) است و با استفاده از تکنیک فازی جهت ارزیابی اوزان برای شاخص‌ها، با بهینه‌سازی پنج معیار (واریانس LMP مربوط به شین‌های مختلف، میانگین LMP مربوط به شین‌های مختلف، میزان هزینه تولید مورد نیاز، تلفات و توپولوژی مکان نصب نیروگاه با توجه به ساختار شبکه)، بهترین مکان نصب نیروگاه از بین مکان‌های کاندیدا انتخاب می‌گردد. دیاگرام تک‌خطی شبکه ۱۴ شین IEEE در شکل (۱) نشان داده شده است. الگوریتم پیشنهادی، در یک شبکه‌ی ۱۴ شین IEEE پیاده‌سازی شده است. نتایج حاصله کارایی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل (۱): دیاگرام تک‌خطی شبکه ۱۴ شین IEEE

۲- محاسبه LMP

مقدار LMP در واقع نشان‌دهنده حداقل هزینه تامین یک مگاوات بعدی بار، با لحاظ نمودن هزینه‌های افزایشی تولید ژنراتورها، پرشدگی

برنامه‌ریزی توسعه نیروگاه‌ها یک زیرمساله از مساله کلی برنامه‌ریزی توسعه شبکه می‌باشد. مجموعه ظرفیت عملی نیروگاه‌های نصب شده در یک شبکه برق باید مساوی مجموع توان مورد نیاز کلیه مصرف‌کنندگان، مجموعه تلفات توان ناشی از انتقال توان، مجموعه توان مصرفی داخلی پست‌ها و نیروگاه‌ها در محدوده زمانی مشخص مورد مطالعه باشد. حل مساله برنامه‌ریزی توسعه تولید دارای مشکلاتی مانند زیاد بودن تعداد جواب‌ها بوده که می‌تواند منجر به همگرا شدن به نقطه بهینه محلی گردد. نظر به این که مساله برنامه‌ریزی توسعه تولید ذاتاً یک مساله ترکیبی است، این امر سبب تعدد انتخاب‌ها می‌گردد که ممکن است از نقطه نظر محاسباتی غیرعملی یا بسیار وقت‌گیر باشد.

روش‌های مورد کاربرد جهت حل مسائل برنامه‌ریزی توسعه تولید به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: (۱) روش‌های ریاضی مبتنی بر تجزیه، (۲) الگوریتم‌های ترکیبی و (۳) روش‌های ابتکاری [۳-۱۱]. استفاده از الگوریتم‌های ریاضی برای استفاده در سیستم‌های قدرت با ابعاد بزرگ چندان مناسب نیستند. روش‌های ترکیبی دارای پاسخ‌های مناسبی می‌باشند، اما زمان حصول جواب بهینه بسیار طولانی است و به ابعاد مساله و تعداد پارامترهای آن بستگی دارد. روش‌های ابتکاری بسیار مناسب می‌باشند و اجرای آن‌ها ساده بوده و فاقد پیچیدگی محاسباتی است.

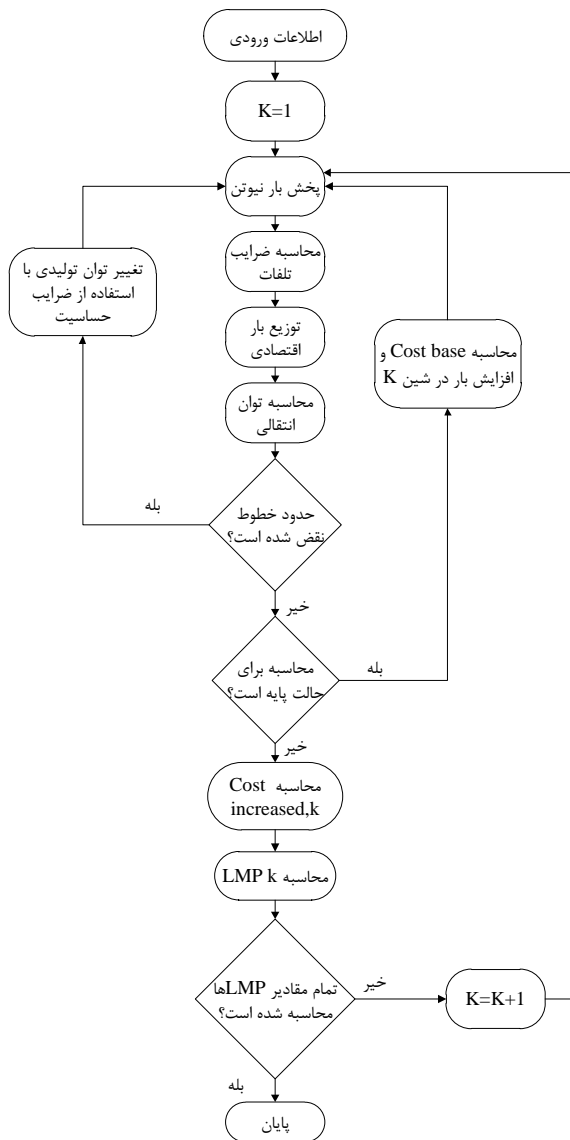
همانگی احتمالاتی مدل برنامه‌ریزی توسعه تولید و انتقال در مرجع [۴] مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای نشان دادن خروج تصادفی واحد تولیدی و خطوط انتقال و عدم قطعیت‌های پیش‌بینی بلندمدت بار استفاده شده است. هم‌چنین برای کاهش حجم محاسبات از روش کاهش سناریو استفاده گردیده است. در [۵] از برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح برای توسعه تولید استفاده شده است. تابع هدف مساله بهینه‌سازی، حداکثرسازی رفاه اجتماعی بلندمدت است. مرجع [۶] روشی جهت برنامه‌ریزی توسعه تولید نیروگاه‌های متداول و تجدیدپذیر پیشنهاد کرده است. برای این منظور از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح استفاده شده و از روش خطی‌سازی برای تبدیل معادلات غیرخطی به معادلات خطی بهره گرفته شده است. تابع هدف مساله بهینه‌سازی در این مقاله، شامل هزینه کلی و هزینه بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری در نظر گرفته شده است. روش‌شناسی برنامه‌ریزی توسعه تولید در تجدید ساختار در مرجع [۷] مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر تجدید ساختار بر روش‌شناسی برنامه‌ریزی توسعه تولید را نشان داده است. در مرجع [۸] با استفاده از یک مدل پنج هدفه به برنامه‌ریزی توسعه توان در افق برنامه‌ریزی مورد مطالعه پرداخته است. برنامه‌ریزی توسعه تولید با قید امنیت در حضور منابع بادی در [۹] مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله به بررسی تاثیر عدم قطعیت بار در برنامه‌ریزی توسعه تولید و بازار برق پرداخته شده است. تابع هدف این مقاله افزایش سود مورد

در رابطه (۸) P_{flowl} شار عبوری از خط ۱ (MW) است. رابطه‌های (۹) و (۱۰)، محدودیت اندازه‌ی ولتاژ و زاویه ولتاژ هر کدام از شین‌های شبکه می‌باشند.

$$v_k^m \leq v \leq v_k^M \quad (9)$$

$$\delta_k^m \leq \delta_k \leq \delta_k^M \quad (10)$$

که در رابطه‌های (۹) و (۱۰)، دامنه ولتاژ باس k و δ_k زاویه ولتاژ باس k است. فلوچارت محاسبه LMP در شین‌های مختلف، در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): فلوچارت محاسبه LMP

خطوط انتقال و تلفات شبکه در هر یک از شین‌های شبکه است. محاسبه مقدار LMP به‌طور خلاصه به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

الف) محاسبه تابع هزینه برای حالت پایه شبکه مورد مطالعه که این مقدار به $Cost_{base}$ موسوم است.

ب) افزایش بار در هر یک از شین‌ها به اندازه یک مگاوات.

ج) یافتن تابع هزینه برای حالت بار افزایش یافته که این مقدار برای شین k ام، با پارامتر $Cost_{increased,k}$ نشان داده می‌شود.

د) مقدار LMP برای شین k ام با LMP_k نشان داده شده است و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

$$LMP_k = Cost_{increased,k} - Cost_{base} \quad (1)$$

تابع هدف جهت محاسبه LMP به‌صورت زیر است.

$$Min Cost_k = \sum_{i \in G} C_i(P_{Gi}) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، G مجموعه ژنراتورها و $C_i(P_{Gi})$ هزینه تولید توان در شین i ($\$/h$) است. در واقع تابع هدف مساله بهینه‌سازی نشان‌دهنده مجموع هزینه‌های تولید است. قیود مورد استفاده در محاسبه LMP به‌صورت رابطه‌های (۳) الی (۱۰) می‌باشند.

رابطه (۳)، تعادل توان اکتیو تولیدی و مصرفی و تلفات اکتیو خطوط انتقال است.

$$\sum_{i \in G} P_{gi} - \sum_{i \in L} P_{lossl} - \sum_{k \in N} P_{dk} = 0 \quad (3)$$

که در رابطه (۳)، L مجموعه خطوط، N تعداد شین‌های شبکه، i شماره خط بین شین‌های n و m ، توان اکتیو تولیدی در شین i (MW)، P_{di} توان اکتیو مصرفی در شین i (MW) و P_{lossl} میزان تلفات خط l (MW) است. رابطه‌های (۴) و (۵)، قیود مربوط به تعادل توان اکتیو و راکتیو در شین‌های تولید و مصرف می‌باشند.

$$P_{gi} - P_{di} = P_i(v, \delta) = 0 \quad i \in N \quad (4)$$

$$Q_{gi} - Q_{di} = Q_i(v, \delta) = 0 \quad i \in C \quad (5)$$

که در رابطه‌های (۴) و (۵) Q_{gi} توان راکتیو تولیدی در شین i (MVar)، Q_{di} توان راکتیو مصرفی در شین i (MVar) و C تعداد شین‌های PQ می‌باشد. محدودیت‌های تولید توان اکتیو و توان راکتیو ژنراتورها در رابطه‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است.

$$P_{gi}^m \leq P_{gi} \leq P_{gi}^M \quad (6)$$

$$Q_{gi}^m \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^M \quad (7)$$

m و M محدودیت‌های کمینه و بیشینه توان اکتیو و راکتیو می‌باشند. رابطه (۸)، محدودیت توان عبوری از خطوط شبکه است.

$$|P_{flowl}| \leq P_{flowl}^M \quad (8)$$

منظور نیاز به یک مدل سلسله مراتبی و اصطلاحاً درخت تصمیم‌گیری است. به بیان دیگر، تصمیم‌گیری را به سه بخش هدف مساله، معیارها و زیر معیارهای مناسب در تصمیم‌گیری مساله و در نهایت گزینه‌ها و انتخاب‌های موجود در مساله تجزیه می‌شود. نمونه‌ای از یک مساله AHP در شکل (۳) نشان داده شده است [۳].

در این روش به هر یک از معیارها در مقایسه با سایر معیارها، عددی نسبت داده می‌شود و ماتریس قضاوت مربوط به معیارها تشکیل می‌گردد. در مرحله بعد، مقادیر ویژه مربوط به هر کدام از ماتریس‌ها محاسبه می‌گردد. سپس در مرحله پایانی، وزن نهایی هر کدام از معیارها محاسبه می‌گردد. جهت محاسبه مقادیر وزن نهایی چهار روش وجود دارد:

- (۱) روش حداقل مربعات^۷
- (۲) روش حداقل مربعات لگاریتمی^۸
- (۳) روش بردار ویژه^۹
- (۴) روش‌های تقریبی^{۱۰}

روش‌های تقریبی مورد استفاده برای AHP عبارت‌اند از:

- (الف) مجموع سطری
- (ب) مجموع ستونی
- (ج) میانگین حسابی
- (د) میانگین هندسی

در این مقاله پنج معیار برای رسیدن به جواب بهینه مورد نظر گرفته شده است. این معیارها عبارت‌اند از: واریانس LMP مربوط به شین‌های مختلف، میانگین LMP مربوط به شین‌های مختلف، میزان هزینه تولید توان مورد نیاز، تلفات و مکان نصب نیروگاه با توجه به توپولوژی شبکه.

احداث هر نیروگاه جدید باعث تغییراتی در شبکه می‌گردد. از جمله این تغییرات می‌توان تغییر LMP شین‌ها، تغییر هزینه بهره‌برداری در بخش بار بهینه و تغییر تلفات را نام برد. حداقل نمودن واریانس LMP شین‌های مختلف یکی از معیارهای مهم در برنامه‌ریزی توسعه تولید است. معیار دوم میانگین LMP شبکه است. در واقع این معیار نشان‌دهنده رفاه اجتماعی مصرف‌کنندگان است. جهت تعیین وزن هر یک از شاخص‌ها و استفاده از تکنیک فازی، تعدادی جدول در اختیار بهره‌برداران و اساتید قرار داده شده که در آن هر یک از افراد با توجه به درجه اهمیت هر یک از شاخص‌ها به هر یک از معیارها عددی بین صفر تا ده نسبت داده‌اند. سپس با استفاده از میانگین هندسی به میانگین‌گیری بین جداول حاصله پرداخته شده است. به‌طور کل استفاده از میانگین هندسی به علت به تصویر کشیدن مناسب‌تر اختلافات در روش AHP پیشنهاد شده که در این مقاله نیز استفاده شده است [۱۱]. در مرحله بعد جدول حاصل از میانگین‌گیری، نرمالیزه می‌گردد. جدول نرمالیزه حاصله بر طبق نظرات بهره‌برداران و اساتید به‌صورت زیر به‌دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود واریانس و میانگین LMP مقادیر بیش‌تری را به خود اختصاص داده‌اند

۳- تعیین مکان‌های کاندیدا برای نصب نیروگاه جدید در برنامه‌ریزی توسعه تولید با استفاده از معیار

پیشنهادی

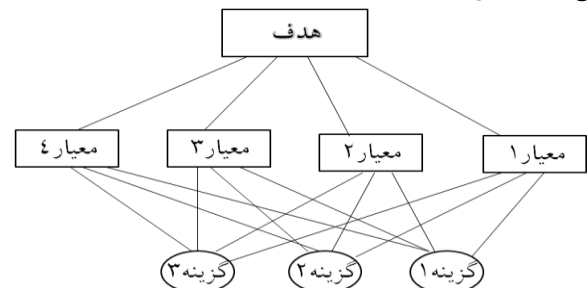
انتخاب مکان‌های کاندیدا برای نصب نیروگاه یکی از مسائل مهم در برنامه‌ریزی توسعه تولید است. که در این مقاله با استفاده از یک معیار پیشنهادی که به مقدار LMP در هر شینه وابسته است مکان‌های کاندیدا برای نصب نیروگاه انتخاب می‌شوند. بعد از تحلیل شبکه پایه و تعیین LMPها در هر شینه، با استفاده از رابطه پیشنهادی (۱۱) مکان‌های کاندیدا برای نصب نیروگاه تعیین می‌گردد.

$$LMP_x \geq \frac{\sum_{i=1}^N LPM_i}{N} \quad (11)$$

رابطه (۱۱) نشان می‌دهد که مکان‌هایی که مقدار LMP در آن‌ها بیش‌تر از مقدار میانگین LMP شبکه است را می‌توان به‌عنوان مکان‌های مناسب برای نصب نیروگاه در نظر گرفت. زیرا در این مکان‌ها هزینه تولید نسبتاً بالا بوده و نصب نیروگاه در این مکان موجب بهبود هزینه بخش بار بهینه و کاهش LMP شبکه می‌گردد. احداث چنین نیروگاه‌هایی موجب می‌گردد که LMPهای شبکه به سمت برابری سوق پیدا کند.

۴- روش پیشنهادی جهت تعیین بهترین مکان نصب ژنراتور از میان مکان‌های کاندیدا

با توجه به اینکه انتخاب بهینه محل نصب ژنراتور به معیارهای مختلفی وابسته است لذا در این مقاله جهت انتخاب بهینه محل نصب ژنراتور از میان مکان‌های کاندیدا، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره پیشنهاد شده است. تصمیم‌گیری چندمعیاره، یک روش مناسب برای تعیین جواب بهینه در حالتی است که در مساله با چندین معیار رو به رو هستیم و می‌بایست با توجه به معیارها و عدم قطعیت‌ها، بهینه‌ترین طرح انتخاب گردد.



شکل (۳): ساختار یک مساله AHP ساده

روش AHP^۶ یکی از بهترین ابزارهای تصمیم‌گیری چندمعیاره در تحلیل و فرمولاسیون تصمیم‌گیری‌ها است که علاوه بر معیارهای کمی، معیارهای کیفی را در آن می‌توان به‌خوبی در نظر گرفت. برای این

روش AHP در میان سایر روش‌های MCDM، ناتوانی در لحاظ نمودن عدم قطعیت‌ها و نادقیقی‌های موجود در نشان دادن ادراک تصمیم‌گیران با اعداد قطعی، منجر به استفاده از تئوری اعداد فازی در مسائل گردیده است [۱۳] و [۱۴]. به بیان دیگر، در بسیاری از موارد تصمیم‌گیران با عدم قطعیت و موارد فازی در لحاظ نمودن اهمیت نسبی یک معیار با معیارهای دیگر مواجه می‌گردد. بنابراین روش FAHP به کار گرفته می‌شود. در این روش نسبت‌های مقایسه‌ای غیرقطعی با رفتار فازی مدل می‌گردد.

در روش AHP متداول، بعد از تعریف ساختار تصمیم‌گیری، گروهی از افراد ارزیابی‌کننده یک ماتریس مقایسه‌ای مانند جدول (۳) را تکمیل می‌نمایند.

جدول (۳): ماتریس مقایسه معیارها در روش AHP

معیار ۱	معیار ۲	معیار ۳	معیار ۴	معیار ۵
۱	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}
C_{21}	۱	C_{23}	C_{24}	C_{25}
C_{31}	C_{32}	۱	C_{34}	C_{35}
C_{41}	C_{42}	C_{43}	۱	C_{45}
C_{51}	C_{52}	C_{53}	C_{54}	۱
C_1	C_2	C_3	C_4	C_5

متغیرهای زبانی^{۱۳} که در جدول (۴) نشان داده شده است، غالباً برای تکمیل ماتریس مقایسه به کار گرفته می‌شود [۱۱]. در ماتریس مقایسه هر درایه معکوس درایه ترانهاده خود است. با استفاده از این روش می‌توان به داده‌های کیفی همانند داده‌های کمی، مقداری عددی نسبت داد. معمولاً دامنه اعداد از ۱ تا ۹ است، به این معنی که عدد ۱ نشان‌دهنده "به یک اندازه مهم" و عدد ۹ نشان‌دهنده "فوق‌العاده مهم‌تر" می‌باشند و تمام دامنه مقایسه را پوشش می‌دهند.

جدول (۴): متغیرهای زبانی مورد استفاده در روش AHP

مقیاس	تعریف
۱	به یک اندازه مهم
۳	اندکی مهم‌تر
۵	خیلی مهم‌تر
۷	خیلی خیلی مهم‌تر
۹	فوق‌العاده مهم‌تر
۲، ۴، ۶ و ۸	مقادیر میانی

اگرچه مقایسه قطعی معیارها در روش AHP که در جدول (۴) نشان داده شده است دارای مزایایی مانند سادگی است، ولی برای نشان دادن دقیق نظرات تصمیم‌گیران کافی نیست. لذا، اعداد فازی برای مقایسه معیارها در روش AHP به کار گرفته می‌شود که در جدول (۵) نشان داده شده است.

که این امر به علت اهمیت بیشتر این شاخص‌ها از دید بهره‌برداران و اساتید بوده است.

در مرحله بعد، با استفاده از روش فازی به محاسبه وزن نهایی هریک از شاخص‌ها پرداخته خواهد شد.

جدول (۱): جدول نهایی میانگین‌گیری شده و نرمالیزه شده از نظرات افراد

مکان نصب نیروگاه	تلفات	هزینه تولید	میانگین LMP	واریانس LMP	معیار
۰/۳۰۰۴۲	۰/۳۱۸۷۴۵	۰/۴۷۳۴۵	۰/۶۲۶۴۴۴	۰/۵۰۷۴۵۶	واریانس LMP
۰/۲۱۸۵۳۴	۰/۲۹۳۰۳	۰/۳۶۶۷۳۳	۰/۲۰۸۸۱۵	۰/۱۶۹۱۵۲	میانگین LMP
۰/۲۲۸۲۷	۰/۲۹۳۰۳	۰/۱۰۷۵۸۹	۰/۰۶۱۲۶	۰/۱۱۵۳۱۶	هزینه تولید
۰/۲۰۰۹۰۳	۰/۰۷۵۶۶	۰/۰۲۷۷۷۹	۰/۰۵۳۹۱۶	۰/۱۲۰۴۵۴	تلفات
۰/۰۵۱۸۷۳	۰/۰۱۹۵۳۵	۰/۰۲۴۴۴۹	۰/۰۴۹۵۶۶	۰/۰۸۷۶۲۱	مکان نصب نیروگاه

تئوری فازی در ۱۹۶۵ توسط آقای لطفی‌زاده مطرح گردیده است. به طور کلی هرچه یک تصمیم‌گیری بیش‌تر درگیر نیروی انسانی و همچنین سیستم‌های پیچیده شود، پدیده فازی بیش‌تر مسلط بر توضیح این سیستم‌ها می‌گردد. به‌عنوان مثال یک ماتریس تصمیم‌گیری از یک مدل MADM حاوی اطلاعاتی است که روش فازی می‌تواند به‌عنوان معیاری برای ارزیابی آن به کار رود. یک ماتریس تصمیم‌گیری را به‌صورت جدول (۲) در نظر می‌گیریم.

جدول (۲): یک ماتریس تصمیم‌گیری نمونه

	X_1	X_2	X_n
A_1	r_{11}	r_{12}	r_{1n}
A_2	r_{21}	r_{22}	r_{2n}
.
.
.
A_m	r_{m1}	r_{m1}	r_{mn}

r_{ij} و بردار اوزان W در یک مساله MADM ممکن است به‌جای قطعی بودن^{۱۱}، فازی و زبانی باشد [۱۲]. به‌طور کلی با استفاده از روش فازی می‌توان به مقابله با قضاوت موضوعی اپراتورها، عدم قطعیت‌ها و ... متخصصان دخیل در امر تصمیم‌گیری پرداخت و جواب‌های نهایی مورد اطمینان و دقیق‌تری حاصل نمود.

تصمیم‌گیری در محیط‌های پیچیده که شامل معیارهای گوناگون است (معیارهای کمی و کیفی) یکی از مسائل مهم است. برای این منظور روش AHP که توسط Saaty پیشنهاد گردیده است، یکی از پرکاربردترین و معتبرترین روش‌های MCDM^{۱۳} است [۱۱]. روش AHP تنها روشی است که توانایی لحاظ نمودن قضاوت تصمیم‌گیران را دارا است. معمولاً ترجیح داده می‌شود که تصمیم‌گیران، معیارها را به‌صورت دودویی مقایسه نمایند. علی‌رغم محبوبیت و کاربردی بودن

در روش FAHP عدم قطعیت در قضاوت و نادقیق بودن نظرات متخصصان دخیل در امر تصمیم‌گیری به‌خوبی لحاظ می‌گردد و نتایج نهایی دارای دقت و قابلیت اطمینان بالاتری خواهند بود.

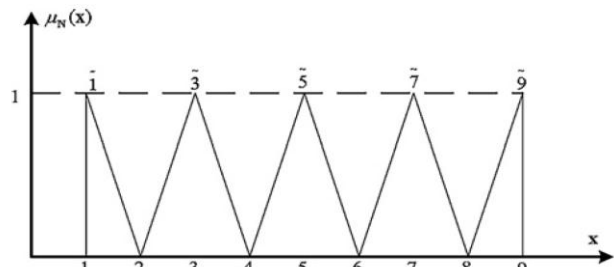
جدول (۵): فازی‌سازی روش AHP با استفاده از اعداد مقیاس فازی

مقیاس	تعریف	تابع عضویت
$\tilde{1}$	به یک اندازه مهم	(1,1,2)
$\tilde{3}$	اندکی مهم‌تر	(2,3,4)
$\tilde{5}$	خیلی مهم‌تر	(4,5,6)
$\tilde{7}$	خیلی خیلی مهم‌تر	(6,7,8)
$\tilde{9}$	فوق‌العاده مهم‌تر	(8,9,9)

در این مقاله از اعداد فازی مثلثی به علت پرکاربرد بودنشان جهت فازی‌سازی روش AHP استفاده شده است. تابع عضویت اعداد فازی مثلثی \tilde{N} در $\mathcal{R} = (-\infty, +\infty)$ توسط رابطه (۱۲) تعریف می‌گردد.

$$\mu_{\tilde{N}}(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l} & l < x < m \\ \frac{u-x}{u-m} & m < x < u \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

هنگامی که تابع عضویت $\mu_{\tilde{N}}: \mathcal{R} \rightarrow [0,1]$ باشد، l به‌عنوان حد پایین، m به‌عنوان حد متوسط و u به‌عنوان حد بالا تابع عضویت در نظر گرفته می‌شود. شکل (۴) مقیاس اعداد فازی بیان شده توسط Saaty را نشان می‌دهد [۱۵].



شکل (۴): رفتار فازی بیان شده توسط Saaty [۱۵]

پس از آن که تصمیم‌گیران از اعداد فازی نشان داده شده در جدول (۳) برای تکمیل ماتریس مقایسه استفاده نمودند، ماتریس قضاوت \tilde{A} حاصل می‌گردد.

$$\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij}) = \begin{pmatrix} \tilde{a}_{11} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \cdots & \tilde{a}_{nn} \end{pmatrix} \quad (13)$$

در این ماتریس n نشان‌دهنده تعداد معیارهای مورد کاربرد جهت مقایسه، است.

تعدادی از عملگرهای فازی مهم و مورد استفاده در این مقاله به‌صورت زیر بیان می‌گردد [۱۴] و [۱۶].

دو عدد فازی مثلثی $A_1 = (l_1, m_1, u_1)$ و $A_2 = (l_2, m_2, u_2)$ را در نظر می‌گیریم.

(۱) جمع:

$$A_1 \oplus A_2 = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (14)$$

(۲) ضرب:

$$A_1 \otimes A_2 = (l_1 l_2, m_1 m_2, u_1 u_2) \quad (15)$$

(۳) معکوس:

$$(l, m, u)^{-1} = \left(\frac{1}{u}, \frac{1}{m}, \frac{1}{l}\right) \quad (16)$$

شایان ذکر است که معمولاً در دنیای واقعی تصمیم‌گیران در رتبه‌بندی مسائل با تعداد زیادی از توصیفات مواجه می‌شوند، بنابراین مقایسه‌های بیش‌تری بین معیارها لازم است. در هنگام تکمیل ماتریس مقایسه، تصمیم‌گیران به مقایسه هر یک از معیارها به‌صورت جداگانه می‌پردازند. در این صورت ممکن است که تصمیم‌گیران در تکمیل ماتریس مقایسه به‌صورت ناسازگار و ناهماهنگ اقدام نمایند. به‌عنوان مثال تصمیم‌گیری ممکن است که $A > B$ و $B > C$ درجه‌بندی نماید، ولی به‌صورت ناسازگاری $C > A$ نیز درجه‌بندی نماید. در این صورت اگر درجه-بندی C اندکی بالاتر از A باشد، قابل قبول بوده و جواب مناسب نیز حاصل می‌گردد. ولی در صورتی که C بسیار بیش‌تر از A درجه-بندی گردد، درجه‌بندی نادرست است. لذا می‌بایست سازگار و هماهنگ بودن ماتریس مقایسه کیفی مورد بررسی قرار گیرد. نرخ سازگاری^{۱۴} جهت بررسی سازگاری و هماهنگی تصمیمات تصمیم‌گیر صورت می‌پذیرد [۱۱]. برای این منظور در مرحله اول شاخص سازگاری CI^{15} محاسبه می‌گردد.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (17)$$

در این رابطه، پارامتر λ_{\max} نشان‌دهنده بزرگ‌ترین مقدار ویژه^{۱۶} ماتریس مقایسه است. شاخص CR به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (18)$$

مقدار پارامتر RI^{17} با توجه به‌اندازه ماتریس‌های مختلف در جدول (۶) نشان داده شده است [۱۱].

جدول (۶): شاخص RI

n	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
RI	۰	۰	۰/۵۲	۰/۸۹	۱/۱۱	۱/۲۵	۱/۳۵	۱/۴	۱/۴۵	۱/۴۹

در صورتی که مقدار شاخص CR کوچک‌تر از ۰/۱ باشد به این معنی است که ماتریس مقایسه سازگار است [۱۱].

اینک با توضیحات بیان شده در مورد روش فازی، وزن نهایی شاخص‌های بیان شده در جدول (۱) به‌صورت جدول (۷) به‌دست می‌آید:

جدول (۷): وزن نهایی شاخص‌ها بعد از استفاده از تکنیک آنتروپی

معیار	مکان نصب نیروگاه	تلفات	هزینه تولید	میانگین LMP	واریانس LMP
وزن نهایی	۰/۱۸۸۵۸۷	۰/۱۷۱۱۲۲	۰/۱۷۶۲۸۹	۰/۱۶۱۸۸۶	۰/۱۸۸۶۷۲

$$V_{Var LMP,k}^{\min} + 2\Delta_{Var LMP} \leq V_{Var LMP,k} \leq V_{Var LMP,k}^{\min} + 3\Delta_{Var LMP} \quad (22)$$

درجه ارزش (ب):

$$V_{Var LMP,k}^{\min} + 3\Delta_{Var LMP} \leq V_{Var LMP,k} \leq V_{Var LMP,k}^{\min} + 4\Delta_{Var LMP} \quad (23)$$

درجه ارزش (خ):

$$V_{Var LMP,k}^{\min} + 4\Delta_{Var LMP} \leq V_{Var LMP,k} \leq V_{Var LMP,k}^{\max} \quad (24)$$

به همین صورت به تمامی انتخاب‌ها نسبت به تمام معیارها، درجه‌ای از ارزش نسبت داده می‌شود.

پس از تعیین درجه ارزش تمامی انتخاب‌ها در همه‌ی معیارها، وزن نهایی هر یک از انتخاب‌ها با استفاده از رابطه (۲۵) بیان می‌شود:

$$W_k = \sum_i C_i \times LV_{i,k} \quad (25)$$

که در رابطه (۲۵) C_i وزن معیار i ام، $LV_{i,k}$ وزن درجه ارزش انتخاب k ام نسبت به معیار i ام، W_k وزن نهایی مربوط به انتخاب k ام می‌باشد.

۵- پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی شبکه ۱۴ شین IEEE

در این قسمت فرض می‌شود که مطالعات توسعه تولید برای رشد بار ۳۰٪ انجام می‌شود. همان‌طور که در قسمت‌های قبل توضیح داده شد، روش پیشنهادی شامل سه مرحله است که به ترتیب اجرا می‌گردد.

جدول (۱۰): مقدار LMP در تمامی شین‌های شبکه

شین	LMP (\$/MWh)	مکان‌های کاندیدا جهت نصب نیروگاه
۱	۳۷/۱۹۲	
۲	۳۸/۹۱۴	
۳	۴۱/۱۵	×
۴	۴۰/۷۶۹	×
۵	۴۰/۲۲	
۶	۴۰/۲۹۷	
۷	۴۰/۷۴۶	×
۸	۴۰/۷۳۴	×
۹	۴۰/۷۵۷	×
۱۰	۴۰/۹۸۲	×
۱۱	۴۰/۸۰۹	×
۱۲	۴۱/۱۵۵	×
۱۳	۴۱/۴۱۲	×
۱۴	۴۲/۲۱۷	×

مرحله ۱: تعیین LMP تمامی شین‌های شبکه که با استفاده از پخش بار بهینه محاسبه می‌شود. مقادیر به‌دست آمده در جدول (۱۰) بیانگر مقدار LMP هر شینه می‌باشد.

مرحله ۲: در این مرحله با استفاده از مقدار LMP شین‌های شبکه مکان‌های کاندیدا جهت نصب نیروگاه با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی (۱۱) تعیین می‌گردد. در جدول (۱۰) این مکان‌ها با علامت × نشان

با توجه به این که به طور معمول تعداد انتخاب‌ها (مکان‌های کاندیدا) زیاد است، جهت استفاده از روش AHP می‌بایست برای هر یک از انتخاب‌ها درجه‌ای از ارزش قائل شویم. این درجه‌ها عبارت‌اند از: خیلی خوب (خخ)، خوب (خ)، متوسط (م)، بد (ب) و خیلی بد (خب). ماتریس قضاوت مربوط به درجات بیان شده در جدول (۸) نشان داده شده است.

جدول (۸): ماتریس قضاوت درجات ارزش

معیار	خخ	خ	م	ب	خب
خخ	۱	۲	۳	۴	۵
خ	۰/۵	۱	۱/۵	۲	۲/۵
م	۰/۳۳	۰/۶۶	۱	۱/۳۳	۱/۶۶
ب	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۱	۱/۲۵
خب	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۸	۱

جهت محاسبه وزن نهایی درجات ارزش از روش میانگین حسابی استفاده شده است. مقادیر فوق در جدول (۹) نشان داده شده است.

جدول (۹): وزن نهایی مربوط به درجات ارزش

معیار	خخ	خ	م	ب	خب
وزن نهایی	۰/۴۴۳	۰/۲۲۲	۰/۱۴۵	۰/۱۰۶	۰/۰۸۴

در ادامه نحوه اختصاص درجات ارزش برای هر یک از انتخاب‌ها بیان می‌گردد. مقدار محاسبه شده معیار i ام با توجه به انتخاب k ام، $V_{i,k}$ نامیده می‌شود. برای تمامی انتخاب‌ها، کم‌ترین مقدار را $V_{i,k}^{\min}$ و بیش‌ترین مقدار را $V_{i,k}^{\max}$ می‌نامیم. بنابراین بازه D_i را با رابطه (۱۹) تعریف می‌کنیم:

$$D_i = V_{i,k}^{\max} - V_{i,k}^{\min} \quad (19)$$

با توجه به این که در روش بیان شده، پنج درجه ارزش در نظر گرفته شده است، بنابراین بازه D_i را به پنج زیر بازه مساوی تقسیم می‌نماییم. به‌عنوان مثال واریانس LMPها را در نظر می‌گیریم و این معیار را معیار i ام فرض می‌کنیم. می‌خواهیم برای هر یک از انتخاب‌ها نسبت به معیار واریانس LMP، درجه‌ای از ارزش اختصاص دهیم. همان‌طور که بدیهی است هرچه معیار واریانس LMP مربوط به یک انتخاب کم‌تر باشد، آن انتخاب دارای ارزش بالاتری است. لذا درجه ارزش (خخ) را به انتخاب‌هایی می‌دهیم که دارای معیار واریانس LMP در بازه بیان شده در رابطه (۲۰) باشند.

$$V_{Var LMP,k}^{\min} \leq V_{Var LMP,k} \leq V_{Var LMP,k}^{\min} + \Delta_{Var LMP} \quad (20)$$

وزن درجه مربوط به انتخاب k ام را نسبت به معیار i ام، $LV_{i,k}$ می‌نامیم. به همین صورت می‌توان سایر بازه‌ها را نیز محاسبه نمود که در روابط (۲۱) الی (۲۴) نشان داده شده است.

درجه ارزش (خ):

$$V_{Var LMP,k}^{\min} + \Delta_{Var LMP} \leq V_{Var LMP,k} \leq V_{Var LMP,k}^{\min} + 2\Delta_{Var LMP} \quad (21)$$

درجه ارزش (م):

همان‌گونه که از جدول (۱۳) مشاهده می‌شود، کم‌ترین مقدار مربوط به معیار تلفات متعلق به نصب نیروگاه در شین ۳ است که مقدار آن برابر با ۷/۷۰ مگاوات است و بیش‌ترین این مقدار نیز متعلق به نصب نیروگاه در شین ۱۲ بوده که مقدار آن برابر با ۲۱/۹۶ مگاوات است. لذا با استفاده از رابطه (۱۹)، بازه D_{loss} به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$D_{loss} = V_{loss,k}^{max} - V_{loss,k}^{min} = 21/96 - 7/70 = 14/26$$

هم‌چنین مقدار زیربازه Δ_{loss} نیز به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta_{loss} = \frac{D_{loss}}{\delta} = \frac{14/26}{5} = 2/852$$

اکنون می‌توان با استفاده از روابط (۲۰) تا (۲۴)، بازه مربوط به هر یک از انتخاب‌ها را نسبت به معیار تلفات به‌دست آورد. بازه مربوط به ارزش (خ):

$$\begin{aligned} V_{loss,k}^{min} &\leq V_{loss,k} \leq V_{loss,k}^{min} + \Delta_{loss} \Rightarrow \\ 7/70 &\leq V_{loss,k} \leq 7/70 + 2/852 \Rightarrow \\ 7/70 &\leq V_{loss,k} \leq 10/552 \end{aligned}$$

بازه مربوط به درجه ارزش (خ) نسبت به معیار تلفات:

$$10/552 \leq V_{loss,k} \leq 13/404$$

بازه مربوط به درجه ارزش (م) نسبت به معیار تلفات:

$$13/404 \leq V_{loss,k} \leq 16/256$$

بازه مربوط به درجه ارزش (ب) نسبت به معیار تلفات:

$$16/256 \leq V_{loss,k} \leq 19/108$$

بازه مربوط به درجه ارزش (خب) نسبت به معیار تلفات:

$$19/108 \leq V_{loss,k} \leq 21/96$$

جدول (۱۳): مقدار هر یک از معیارها با ازای اضافه شدن نیروگاه

شین	میانگین LMP (\$/MWh)	وار یانس LMP (\$/MWh)	هزینه تولید (\$/hr)	تلفات (MW)	مکان نصب
۳	۳۵/۶۲۵۹۳	۱/۲۳۰۲۲۵	۹۲۴۰/۸۰	۷/۷۰	۵
۴	۳۴/۷۳۵۹۳	۰/۷۸۲۷۲	۹۲۶۵/۰۸	۸/۲۸	۱
۷	۳۴/۹۹۵۹۳	۱/۱۰۱۵۴۸	۹۲۹۷/۸۴	۹/۳۴	۳
۸	۳۵/۸۵۵۳۶	۱/۸۵۵۸۹۶	۹۳۲۳/۶۷	۱۰/۲۰	۹
۹	۳۵/۲۹۶۹۳	۱/۳۹۵۰۶۵	۹۳۳۸/۷۵	۱۰/۶۲	۳
۱۰	۳۶/۱۹۶۷۹	۲/۰۳۹۵۹۸	۹۴۸۹/۴۳	۱۴/۹۹	۳
۱۱	۳۷/۳۲۶۸۶	۳/۲۳۱۹۲۳	۹۶۸۷/۴۶	۱۹/۷۹	۳
۱۲	۳۸/۰۲۲۲۹	۷/۰۹۱۵۲۸	۹۹۷۳/۶۰	۲۱/۹۶	۳
۱۳	۳۷/۰۹۵۵	۳/۵۵۰۵۳۲	۹۶۲۷/۵۳	۱۸/۴۸	۵
۱۴	۳۷/۳۷۸۷۹	۳/۷۳۴۱۲۴	۹۷۱۱/۶۲	۷/۷۰	۷

طبق همین روال مقادیر مورد نظر برای تمامی معیارها می‌بایست محاسبه شود. در جدول (۱۴) درجه ارزش هر یک از انتخاب‌ها نسبت به تمام معیارهای در نظر گرفته شده نشان داده شده است. پس از

داده شده است. مشخصات نیروگاه مورد نظر در جدول (۱۱) نشان داده شده است. این نیروگاه همانند نیروگاه موجود در شین ۱ شبکه در نظر گرفته شده است.

جدول (۱۱): مشخصات نیروگاه کاندید

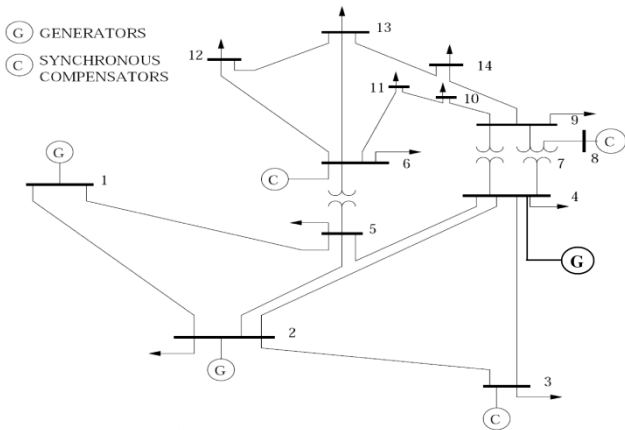
هزینه بهره‌برداری (\$/hour)	a	b	c
$Cost = a + b.P + c.P^2$	۰	۲۰	۰/۰۴۳
حداقل تولید توان اکتیو (MW)	۰		
حداکثر تولید توان اکتیو (MW)	۳۳۲		
حداقل تولید توان راکتیو (MVar)	۰		
حداکثر تولید توان راکتیو (MVar)	۱۰		

در این مقاله هم‌چنین برای نشان دادن تاثیر مکان نصب ژنراتور از نقطه نظر توپولوژی شبکه در مکان‌یابی نصب ژنراتور، برای نصب ژنراتور در شین‌هایی که در آن‌ها ژنراتوری وجود ندارد ارجحیت قائل شده است و برای سایر شین‌ها با اعمال ضریبی، محدودیتی اعمال می‌شود. از دیگر عوامل موثر بر ضریب مکان نصب ژنراتورها می‌توان وجود بار در شین و هم‌چنین تعداد خطوط متصل به شین را نام برد. جدول (۱۲) اطلاعات مربوط به ضرایب مکان نصب ژنراتور در هر یک از شین‌ها را نشان می‌دهد.

جدول (۱۲): ضرایب مکان نصب ژنراتورها

شین	ضریب مکان کاندید جهت نصب نیروگاه
۳	۵
۴	۱
۷	۳
۸	۹
۹	۳
۱۰	۳
۱۱	۳
۱۲	۳
۱۳	۵
۱۴	۷

پس از تعیین مکان‌های کاندیدای نصب نیروگاه با استفاده از روش بیان شده، با اضافه نمودن تک‌تک این نیروگاه‌های پیشنهادی به شبکه، مقدار معیارهای در نظر گرفته شده برای هر یک از این انتخاب‌ها محاسبه می‌شود. این مقادیر در جدول (۱۳) نشان داده خواهند شد. مرحله (۳): در این مرحله به تعیین بهترین انتخاب از بین کاندیداهای موجود با استفاده از روش FAHP پرداخته می‌شود. برای این منظور می‌بایست با استفاده از تعدادی جدول نظرات بهره‌برداران و اساتید در مورد ارجحیت هر یک از معیارها سنجیده شود و با استفاده از این جداول و روش FAHP وزن نهایی هر یک از معیارها تعیین شود. در مرحله بعد، درجه ارزش هر یک از معیارها نسبت به هر یک از انتخاب‌ها محاسبه می‌گردد. برای این منظور به‌طور نمونه نحوه کار برای یک نمونه نشان داده شده است. فرض می‌شود که محاسبه درجه ارزش مربوط به تمام انتخاب‌ها نسبت به معیار تلفات مورد نظر است.



شکل (۵): دیاگرام تک‌خطی شبکه ۱۴ شین IEEE با نصب بهینه‌ترین نیروگاه

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با معرفی یک شاخص پیشنهادی جهت انتخاب گزینه‌های کاندیدا برای محل نصب نیروگاه، به مساله برنامه‌ریزی توسعه تولید (GEP) پرداخته شده است. روش پیشنهادی در برنامه‌ی توسعه تولید بر مبنای روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و مشخصاً تکنیک سلسله مراتبی فازی (FAHP) است. در این مقاله واریانس هزینه حدی ناحیه‌ای (LMP)، میانگین LMP مربوط به شین‌های مختلف، میزان هزینه تولید توان مورد نیاز، تلفات و مکان نصب نیروگاه با توجه به توپولوژی شبکه به عنوان معیارهای اصلی در انتخاب محل نصب واحد تولید این بهینه‌سازی معرفی شده است. روش پیشنهادی بر روی شبکه ۱۴ شین IEEE پیاده‌سازی شده و مکان بهینه جهت احداث نیروگاه در برنامه‌ریزی توسعه تولید تعیین گردیده است. ترکیب توسعه تولید و انتقال به‌صورت هم‌زمان با روش پیشنهادی در این مقاله از دیگر کارهایی است که در ادامه‌ی این کار می‌توان به آن پرداخت.

مراجع

- [1] M. V. F. Pereira, L. M. V. G. Pinto, S. H. F. Cunha and G. C. Oliveira, "A decomposition approach to automated generation/transmission expansion planning," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 104, No. 4, pp. 3074-3083, Nov. 1985.
- [2] M. Q. Suo, Y. P. Li and G. H. Huang, "Multicriteria decision making under uncertainty: an advanced ordered weighted averaging operator for planning electric power systems", Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 25, Iss. 1, pp. 72-81, 2012.
- [۳] ذوالفقاری مقدم و منصف، «ارائه روش جدید برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال بر مبنای تصمیم‌گیری چند معیاره»، بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، ۲۰۰۹.
- [4] J. H. Roh, M. Shahidehpour and L. Wu, "Market-based generation and transmission planning with uncertainties," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 3, pp. 1578-1598, 2009.

معین نمودن درجات ارزش تمام انتخاب‌ها نسبت به معیارهای تعیین شده، وزن نهایی با استفاده از رابطه (۲۵) محاسبه می‌گردد. وزن نهایی مربوط به تمام انتخاب‌ها به صورت نرمالیزه شده در جدول (۱۵) نشان داده شده است.

جدول (۱۴): درجه ارزش هر یک از انتخاب‌ها نسبت به هر یک از معیارها

شین کاندیدا	واریانس LMP (\$/MWh)	میانگین LMP (\$/MWh)	هزینه تولید (\$/hr)	تلفات (MW)	مکان نصب
وزن معیار	۰/۱۸۸۶۷۲	۰/۱۶۱۸۸۶	۰/۱۷۶۲۸۹	۰/۱۷۱۱۲۲	۰/۱۸۸۵۸۷
۱	خ	خ	خ	خ	ب
۲	خ	خ	خ	خ	خ
۳	خ	خ	خ	خ	م
۴	خ	خ	خ	خ	خ
۵	خ	خ	خ	خ	م
۶	خ	خ	خ	خ	م
۷	خ	خ	خ	خ	م
۸	خ	خ	خ	خ	م
۹	خ	خ	خ	خ	م
۱۰	خ	م	خ	م	م
۱۱	خ	ب	ب	خ	م
۱۲	خ	خ	خ	خ	م
۱۳	م	ب	م	ب	ب
۱۴	م	خ	ب	ب	ب

جدول (۱۵): وزن نهایی مربوط به هر یک از انتخاب‌ها با استفاده از روش

FAHP

شین کاندیدا جهت نصب نیروگاه	وزن نهایی	اولویت نصب نیروگاه
۳	۰/۲۹۳۴۱۴	۴
۴	۰/۳۹۲۷۴۵	۱
۷	۰/۳۳۶۵۴۵	۲
۸	۰/۲۸۹۲۶۵	۵
۹	۰/۲۹۸۷۲۷	۳
۱۰	۰/۱۵۶۶۵۳	۶
۱۱	۰/۱۱۹۴۵۱	۷
۱۲	۰/۰۸۵۹۷۵	۱۰
۱۳	۰/۱۰۸۲۰۸	۸
۱۴	۰/۰۹۷۷۷۲	۹

جدول (۱۵)، وزن نهایی مربوط به تمامی انتخاب‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از روش پیشنهادی، بهترین انتخاب جهت محل نصب نیروگاه نصب نیروگاه در شین ۴ است و احداث این نیروگاه با توجه به معیارهای بیان شده بهینه‌ترین حالات است. در این جدول اولویت‌های بعدی جهت نصب نیروگاه نیز به ترتیب معرفی شده است. دیاگرام تک‌خطی شبکه ۱۴ شین IEEE با نصب بهینه‌ترین نیروگاه در شکل (۵) نشان داده شده است. گزینه‌های بعدی به ترتیب شین ۷ و ۹ و ۳ است.

17 Random Consistency Index

- [5] M. Pirnia and J. D. Fuller, "A mixed integer nonlinear program for electric generation expansion with energy and capacity pricing," Power and Energy Society General Meeting, 2010.
- [6] J. Aghaei, M. A. Akbari, A. Roosta, M. Gitizadeh and T. Niknam, "Integrated renewable-conventional generation expansion planning using multiobjective framework," IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 6, No. 8, pp.773-784, 2012.
- [7] Z. Hu, "Study on methodology of generation expansion planning for power restructuring," International Conference on Power System Technology, 2002.
- [8] M. Zakerinia, and S. A. Torabi, "Multiobjective power expansion planning in the planning horizon," IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES), 2010.
- [9] R. Hemmati, R. A. Hooshmand and A. Khodabakhshian, "reliability constrained generation expansion planning with consideration of wind farms uncertainties in deregulated electricity market," Energy Conversion and Management, Vol.76, pp. 517-526, 2013.
- [10] D. Pozo, E. E. Sauma and J. Contreras, "A three-level static milp model for generation and transmission expansion planning," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, No. 1, pp. 202-210, 2013.
- [11] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw-Hill, 1980.
- [۱۲] محمد جواد اصغریور، «تصمیم‌گیری‌های چند معیاره»، موسسه انتشارات دانشگاه تهران، چاپ هفتم، ۱۳۸۸.
- [13] C. K. Mechefske and Z. Wang, "Using fuzzy linguistics to select optimum maintenance and condition monitoring strategies," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 15, No. 6, pp. 1129-1140, 2001.
- [14] H. J. Zimmermann, *Fuzzy Sets, Decision Making and Expert Systems*, Norwell, MA: Kluwer, 1987.
- [15] A.A. Razi Kazemi, and P. Dehghanian, "A practical approach on optimal rtu placement in power distribution systems incorporating fuzzy sets theory," Vol. 37, No. 1, pp. 31-42, 2012.
- [16] M. Hanss, *Applied Fuzzy Arithmetic: An Introduction with Engineering Applications*, Berlin, Germany: Springer, 2005.

زیرنویس‌ها

- 1 Generation Expansion Planning
- 2 Fuzzy Analytical Hierarchy Process
- 3 Multi Attribute Decision Making
- 4 Local Marginal Price
- 5 Optimal Power Flow
- 6 Analytical Hierarchy Process
- 7 Least Squares Method
- 8 Logarithmic Least Squares Method
- 9 Eigenvector Method
- 10 Approximation Methods
- 11 Crisp
- 12 Multi Criteria Decision Making
- 13 Linguistic Variable
- 14 Consistency Ratio
- 15 Consistency Index
- 16 Eigenvalue