

# برنامه‌ریزی توسعه تولید مبتنی بر ریزشبکه‌ها در سیستم قدرت

علیرضا صارمی<sup>۱</sup>، محمدابراهیم حاجی‌آبادی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد برق دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات ، saremi831@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار برق دانشگاه حکیم سبزواری، ebrahim.hajiabadi@gmail.com

چکیده - در این مقاله، مدلی قابل انعطاف جهت تأثیر ریزشبکه‌ها بر برنامه‌ریزی توسعه تولید ارائه شده است. هر پارامتری که مدل بار و رشد بار را تغییر دهد، بر برنامه‌ریزی توسعه تولید اثرگذار خواهد بود. ریزشبکه‌ها با تغییر بار شبکه، برنامه‌ریزی توسعه تولید را تغییر می‌دهند، لذا مدل‌سازی بار در دو حالت عدم وجود ریزشبکه و نفوذ آن‌ها در سیستم‌های توزیع انجام شده است. در حالت نفوذ ریزشبکه‌ها سه سناریو بررسی شده است. در سناریوی اول ریزشبکه به صورت منفصل از شبکه بوده و لذا با کاهش بار شبکه برنامه-ریزی توسعه تولید را تغییر داده است. در سناریوی دوم ریزشبکه متصل به شبکه اصلی بوده و در صورتی که با کمبود توان مواجه شود، شارش توان از شبکه اصلی به سمت ریزشبکه خواهد بود و در سناریوی سوم شارش توان بین ریزشبکه و شبکه اصلی دوطرفه خواهد بود و واحدهای تولیدی ریزشبکه قادر خواهند بود مازاد انرژی الکتریکی تولیدی خود را به شبکه اصلی نیز تحویل دهند. از دیدگاه شبکه، ریزشبکه به صورت یک بار خوش‌رفتار عمل می‌کند. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار *MATLAB* بر روی شبکه ۲۴ باسه *IEEE* انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که در صورت نفوذ ۲۵ درصد ریزشبکه‌ها در سیستم‌های قدرت، تقریباً ۶ درصد در هزینه‌های کلی برنامه‌ریزی در پایان افق برنامه‌ریزی صرفه‌جویی خواهد شد.

کلید واژه- برنامه‌ریزی توسعه تولید، ریزشبکه، بهینه‌سازی

## ۱- مقدمه

### ۱-۱- انگیزه تحقیق

مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید ( $GEP^D$ ) یک مسئله با ابعاد بزرگ است که با متغیرهای زیاد و دارای عدم قطعیت است.  $GEP$  از دیدگاه-های مختلفی مانند روش‌های حل، قابلیت اطمینان، بازار برق، عدم قطعیت‌ها، اثرات زیست‌محیطی و مدیریت سمت مصرف موردبررسی قرار گرفته است [۱]. با این وجود، تولیدات پراکنده و ریزشبکه‌ها هنوز در مسئله  $GEP$  به‌خوبی موردبررسی قرار نگرفته است. با به‌کارگیری ریزشبکه‌ها و یکپارچه‌سازی تولیدات پراکنده، به افزایش تولید کمک کرده و در هزینه زیاد احداث نیروگاه‌های پیک صرفه‌جویی می‌شود. از نقطه نظر شبکه، ریزشبکه به عنوان یک واحد کنترل شده مستقل در درون سیستم قدرت بوده که می‌تواند به عنوان بار متراکم شده واحد عمل کند. ریزشبکه‌ها با تغییر بار شبکه بر برنامه‌ریزی توسعه تولید تأثیر می‌گذارند.

### ۲-۱- مروری بر ادبیات موضوع

روش‌های حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید، شامل روش‌های بهینه‌سازی ریاضی و کلاسیک می‌شوند. در مراجع [۲-۴] روش‌های تئوری بازی‌ها، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و برنامه‌ریزی خطی بررسی شده است. پیاده‌سازی روش‌های کلاسیک آسان بوده و مطالعات

دینامیکی در آن‌ها قابل انجام است، ولی زمان شبیه‌سازی طولانی بوده و پاسخ بهینه خیلی دقیق نیست. مرجع [۵] از روش الگوریتم ژنتیک و تئوری بازی‌ها و همچنین برنامه‌ریزی تکاملی برای حل مسئله  $GEP$  استفاده کرده است. مرجع [۶] به برنامه‌ریزی توسعه تولید از دیدگاه قابلیت اطمینان پرداخته است. در مرجع [۷] بهینه‌سازی مشترک برنامه‌ریزی توسعه تولید و انتقال انجام شده و به بررسی مکان‌های نصب ریزشبکه در سیستم قدرت می‌پردازد. مرجع [۸] به برنامه‌ریزی ریزشبکه با توجه به مشکلات جزیره‌ای آن پرداخته و مینیمم‌سازی هزینه‌های تولید منابع محلی و خرید انرژی از شبکه اصلی را بررسی کرده است. در یک دسته‌بندی کلی برای مسئله  $GEP$  تا قبل از تجدید ساختار صنعت برق، تابع هدف را به صورت حداقل کردن هزینه-ها تحت قیود مشخص می‌توان در نظر گرفت [۹]. پس از تجدید ساختار در صنعت برق و شکل‌گیری بازارهای برق، تولید انرژی الکتریکی از حالت انحصاری خارج گردیده، فلذا در این سیستم‌ها تابع هدف به صورت ماکزیمم کردن سود شرکت تولیدی می‌باشد. مرجع [۱۰] [۱۱، ۱۲] برخی از سیاست‌های تشویقی برای کاهش آلاینده‌های نیروگاهی بر برنامه‌ریزی توسعه تولید (تغییر تعرفه‌ها-مالیات بر کربن-تجارت آلاینده‌گی و...) بررسی شده‌اند. برنامه‌ریزی بهینه ترکیب‌شده با تولید و پاسخگویی بار توسط حداقل کردن هزینه بهره‌برداری سیستم

شامل هزینه DR<sup>۱</sup> و هزینه تولید معمولی به همراه قیود تولید و DR در مرجع [۱۳] بررسی شده است.

### ۱-۳- هدف، روش، نوآوری

هدف از این مقاله بررسی اثر نفوذ ریزشکه‌ها بر برنامه‌ریزی توسعه تولید است. بهره‌برداری ریزشکه می‌تواند به صورت‌های مختلفی انجام شود. یک ریزشکه بسته به موقعیت آن در شبکه می‌تواند به صورت منفصل از شبکه و یا متصل به شبکه مورد بهره‌برداری قرار گیرد. مسلماً حضور ریزشکه‌ها بار شبکه را تغییر می‌دهد. از آنجایی که متغیر اساسی در برنامه‌ریزی توسعه تولید مدل بار و رشد بار می‌باشد، بنابراین هر پارامتری که مدل رشد بار را تغییر دهد، برنامه‌ریزی توسعه تولید را نیز تغییر خواهد داد. یکی از پارامترهای اساسی که مدل رشد بار را تغییر می‌دهد نفوذ ریزشکه‌ها در شبکه توزیع است؛ بنابراین در این مقاله جهت رسیدن به هدف اصلی کارهای زیر انجام می‌گیرد:

- مدل‌سازی رشد بار با در نظر گرفتن اثر ریزشکه‌ها در سیستم‌های توزیع انجام‌شده و تأثیر ریزشکه در دو مود جزیره‌ای و متصل به شبکه، بر مدل بار بررسی می‌گردد.
  - برنامه‌ریزی توسعه تولید در حالت‌های عدم وجود ریزشکه در شبکه و وجود ریزشکه در شبکه بررسی می‌شود.
  - در حالت وجود ریزشکه، برنامه‌ریزی توسعه تولید با در نظر گرفتن سه سناریو مطابق جدول (۷) انجام می‌شود.
- روش به کاررفته در این تحقیق بدین صورت است که آرایه‌ای از واحدهای کاندید جهت توسعه تولید، ماتریس S را تشکیل می‌دهند. تعداد سطرهای ماتریس S برابر با تعداد نیروگاه‌های کاندید از هر نوع و ستون‌های آن، حالت‌های مختلف قرار گرفتن نیروگاه‌ها است. اگر  $N_i$  تعداد نیروگاه‌های کاندید نوع  $i$  و  $n$  تعداد واحدهای هر نیروگاه باشد، تعداد کل حالات از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$I = \prod_{i=1}^n (N_i + 1) \quad (1)$$

سپس با انتخاب حالات قرارگیری واحدها، قیود مسئله بررسی می‌شوند. حالتی که قیود را برآورده سازند جهت توسعه تولید انتخاب شده و با توجه به تابع هدف هزینه‌ها محاسبه شده و بهترین طرح توسعه انتخاب می‌گردد. در مرجع [۷] ریزشکه‌ها در یک رقابت، جهت توسعه تولید شرکت می‌کنند و هزینه‌های ریزشکه و نیروگاه‌های کاندید کمینه می‌گردد، ما فرض کرده‌ایم که ریزشکه‌ها در سیستم توزیع نصب و بهره‌برداری شده‌اند. حال در سه سناریو مطابق جدول (۷) تأثیر آن‌ها را بر برنامه‌ریزی توسعه تولید بررسی می‌نماییم.

### ۲- برنامه‌ریزی تولید بدون در نظر گرفتن اثر ریزشکه

در این حالت ریزشکه وجود ندارد. شبکه تحت نفوذ نیروگاه‌های متمرکز موجود بوده و مجموعاً ۳۴۰۵ مگاوات توان تحویل شبکه می-

دهند. اطلاعات و مشخصات نیروگاه‌های موجود در شبکه از مرجع [۱۴] گرفته شده است. دوره برنامه‌ریزی را یک دوره ۵ ساله ( $T=5$ )، در نظر گرفته و برنامه‌ریزی به صورت سالانه انجام می‌شود. رشد بار در هر سال را مقداری ثابت و برابر ۱۰ درصد فرض کرده‌ایم. شبیه‌سازی با توجه به شبکه استاندارد ۲۴ باسه IEEE و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. بار پایه در سال مبدأ را با  $L_{base}$  نشان داده و مقدار آن برابر 2850Mw می‌باشد. جدول (۱) با توجه به رشد بار، مقدار پیک سالیانه بار مصرفی در هر سال از دوره برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد.

جدول (۱): پیک بار مصرفی

سال	۱	۲	۳	۴	۵
پیک بار (Mw)	۳۱۳۵	۳۳۲۳،۱	۳۵۸۸،۹	۳۸۴۰،۲	۴۱۰۸،۹

بار موردنظر برای برنامه‌ریزی توسعه تولید در هر سال  $t$  با  $L_{new,t}$  و درصد رشد بار با  $B$  نشان داده شده و مدل‌سازی بار مطابق روابط (۲) و (۳) می‌باشد:

$$L_{new,t} = L_{t-1} + \left(\frac{B}{100}\right)L_{t-1} = \left(1 + \frac{B}{100}\right)L_{t-1} \quad (2)$$

$$L_{new,t} = \left(1 + \frac{B}{100}\right)^t L_{base} \quad (3)$$

جدول (۲) واحدهای تولیدی کاندید جهت توسعه تولید را نشان می‌دهد. تعداد و ظرفیت واحدها با توجه به رشد بار در افق مورد مطالعه در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): مشخصات واحدهای کاندید

نوع واحد (Type)	تعداد (NO)	ظرفیت (Cap) (مگاوات)	طول عمر (Life_Gen) (سال)	نرخ خروج اجباری (FOR) (درصد)
H/C بخاری/غال سنگ	۴	۱۵۰	۳۰	۱،۵
CC سیکل ترکیبی	۴	۱۶۰	۱۵	۰،۹
GT گازی	۴	۱۸۰	۲۰	۱
H/O بخاری/گازوئیل	۴	۱۶۵	۲۵	۱،۵

هزینه‌های واحدهای تولیدی، شامل هزینه سرمایه‌گذاری و نصب، هزینه تعمیر و نگهداری به عنوان هزینه‌های ثابت و هزینه‌های متغیر شامل هزینه سوخت (بهره‌برداری) و هزینه انرژی تأمین نشده می‌باشد. جدول (۳) انواع هزینه‌های ثابت نیروگاه‌های کاندید را نشان می‌دهد.

جدول (۳): هزینه‌های واحدهای کاندید

نوع واحد	هزینه سرمایه‌گذاری (Inv.) R/Mw (*۱۰ <sup>۹</sup> )	هزینه تعمیر و نگهداری (M.) R/Mw/Month (*۱۰ <sup>۳</sup> )
بخاری/غال سنگ	۲۷	۴۵۰۰
سیکل ترکیبی	۱۵	۱۵۰۰
گازی	۱۰،۵	۶۰۰
بخاری/گازوئیل	۲۴،۳۷۵	۳۶۰۰

اطلاعات روزانه، هفتگی و ماهانه بار معلوم بوده و منحنی تداوم بار شبکه (LDC) مطابق شکل (۱) می‌باشد.

هر واحد با توجه به جدول (۳) قابل محاسبه خواهد بود. هزینه‌های ثابت  $fixed\_cost$  شامل سرمایه‌گذاری و تعمیر و نگهداری در حالت  $I$  ام و برای ژنراتور  $j$  ام از رابطه (۵) به دست می‌آیند:

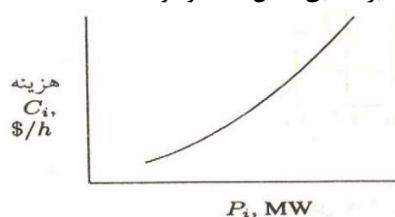
$$fixed\_cost = S(j, I) * Capaci\_Gen(j) * \left( Invest\_Gen(j) * A\_P(j) + M\_Cost\_Gen(j) * 12 \right) \quad (5)$$

در رابطه فوق  $Capaci\_Gen$  ظرفیت تولیدی،  $Invest\_Gen$  هزینه سرمایه‌گذاری،  $A\_P$  تبدیل نرخ بهره و  $M\_Cost\_Gen$  هزینه تعمیر و نگهداری واحد تولیدی  $j$  ام می‌باشد. جهت محاسبه هزینه بهره‌برداری (هزینه سوخت) توزیع اقتصادی (E.D<sup>II</sup>) بار بین واحدهای موجود و هر حالت مطابق رابطه (۶) انجام می‌شود. اطلاعات بار با توجه به منحنی LDC معلوم می‌باشد. بار موردنیاز جهت برنامه‌ریزی با توجه به ظرفیت واحدهای تولیدی موجود و قید رزرو تعیین می‌گردد.

$$Min F = \sum_i^n C(P_i), C(P_i) = AP^2 + BP + C \quad (6)$$

$$s.t \ P_{i,min} < P_i < P_{i,max}, P_i = P_L$$

تعداد نیروگاه‌های موجود ۳۲ واحد بوده و تعداد واحدهای کاندید نیز با توجه به هر حالت مشخص می‌شود. در اکثر روش‌های حل مسئله توزیع اقتصادی، منحنی مشخصه ورودی خروجی برای مدل‌سازی واحدهای حرارتی تولید انرژی الکتریکی به صورت یک تابع درجه دوم مشخص می‌باشد. بهینه‌سازی درجه دو یا Quadratic با استفاده از تابع quadprog در نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. تابع هزینه بهره‌برداری (سوخت) واحدهای تولیدی کاندید و موجود که یک تابع درجه دوم می‌باشد، نیز مطابق شکل (۳) موجود هست.

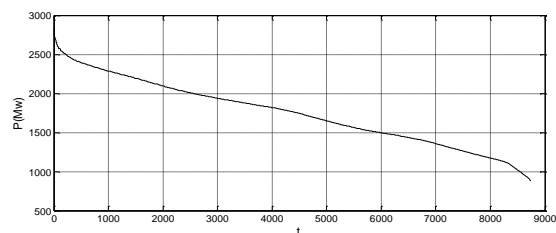


شکل (۳): منحنی مشخصه تابع هزینه نیروگاه

ضرایب تابع هزینه که به صورت تابع  $Ap^2 + Bp + C$  هست، برای واحدهای تولیدی موجود از نرم‌افزار Mat Power، اطلاعات شبکه ۲۴ باسه استخراج شده و جهت واحدهای کاندید مطابق جدول (۴) هست.

جدول (۴): ضرایب تابع هزینه بهره‌برداری واحدهای کاندید

نوع واحد (Type)	A	B	C
بخاری/زغال سنگ	۰.۰۰۷۵۰۷۸	۱۱.۱۴۹۴۷	۳۴۴.۰۱۵۱۹
سیکل ترکیبی	۰	۱۰۵.۳	۳۲۴.۵۵۴۷۷
گازی	۰	۱۱۷	۳۶۰.۶۱۶۴۱

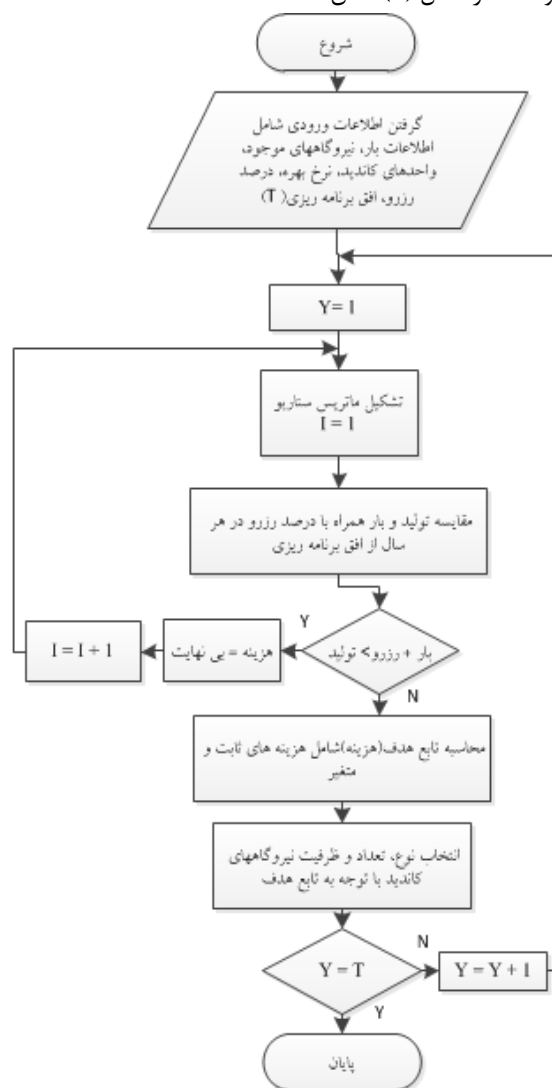


شکل (۱): منحنی تداوم بار شبکه در سال مبدأ

تابع هدف به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود:

$$Min \sum_t \sum_i (C_{Inv} + C_{Fuel} + C_M + C_{ENS}) \quad (4)$$

که  $C_{Inv}$  هزینه سرمایه‌گذاری،  $C_{Fuel}$  هزینه سوخت،  $C_M$  هزینه تعمیر و نگهداری،  $C_{ENS}$  هزینه انرژی مورد انتظار تأمین نشده می‌باشد. روندنما در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): روند نمای برنامه‌ریزی توسعه تولید پیشنهادی

هزینه‌ی سرمایه‌گذاری را با توجه به نرخ بهره محاسبه کرده و مقدار آن را ۱۲ درصد در نظر می‌گیریم. فرض کرده‌ایم تمام سرمایه‌گذاری در ابتدای سال صورت می‌گیرد. هزینه تعمیرات و نگهداری نیز با توجه ظرفیت واحد تولیدی و ریال بر مگاوات به صورت ماهانه برای

ابتدا واحدهای با هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تعمیر و نگهداری پایین‌تر جهت طرح توسعه انتخاب می‌شوند به‌طوری‌که دارای نرخ خروج کمتری نسبت به سایر واحدها باشند. هزینه‌های سوخت واحدها نیز با توزیع اقتصادی بار بین واحدهای موجود و کاندید به دست می‌آیند، به صورتی که شرط برابری تولید و مصرف و قید حداقل و حداکثر توان تولیدی نیز رعایت گردد.

### ۳- برنامه‌ریزی توسعه تولید با در نظر گرفتن نفوذ ریزشبه

مسلماً هر عاملی که بار شبکه را تغییر دهد، برنامه‌ریزی توسعه را تغییر خواهد داد. ریزشبه شبیه یک بار یا تولیدکننده خوش‌رفتار است. این تعبیر برای ریز شبکه‌ها بدین معناست که ریزشبه مدل رشد بار را تغییر خواهد داد. ریزشبه در دو حالت متصل به شبکه و منفصل از شبکه قابل بهره‌برداری است. جدول (۷) سناریوهای مختلف در نظر گرفته را نشان می‌دهد.

جدول (۷): انواع سناریو	
سناریوی اول	برنامه‌ریزی توسعه تولید با در نظر گرفتن اثر ریزشبه به‌صورت منفصل از شبکه
سناریوی دوم	برنامه‌ریزی توسعه تولید با در نظر گرفتن اثر ریزشبه به‌صورت متصل به شبکه (تأمین توان از شبکه در مواقع اضطراری، کمبود تولید در ریزشبه)
سناریوی سوم	برنامه‌ریزی توسعه تولید با در نظر گرفتن اثر ریزشبه به‌صورت متصل به شبکه و تأمین توان اضطراری

### ۳-۱- سناریوی اول

در این حالت ریزشبه را به‌صورت منفصل از شبکه در نظر می‌گیریم، جدول (۸) مشخصات واحدهای تولیدی ریزشبه را نشان می‌دهد.

جدول (۸): مشخصات واحدهای تولید پراکنده ریزشبه

نوع واحد (Type)	تعداد (NO)	ظرفیت (Cap) (Mw)	نرخ خروج اجباری (F.O.R)
WT بادی	۲۰۰	۲.۵	۰.۲
PV خورشیدی	۱۰۰۰	۰.۰۸	۰.۲
DG دیزلی	۴۰	۱۰	۰.۱۵

مقادیر F.O.R با توجه به ماهیت تصادفی واحدهای بادی و خورشیدی فرض شده‌اند. جدول احتمالاتی خروج ظرفیت (COPT<sup>۱</sup>) را برای واحدهای تولیدی ریزشبه به دست آورده و بار مصرفی ریزشبه (Lmg) را مقداری ثابت در نظر گرفته و فرض می‌نماییم برابر ۸ درصد پیک‌بار شبکه اصلی باشد (A=8).

در این حالت فرض بر آن است که مقدار بار مصرفی ریزشبه توسط ظرفیت تولیدی آن تأمین شود و ریزشبه تبادل توان با شبکه اصلی ندارد. چون ریزشبه در مود جزیره‌ای است، از دیدگاه شبکه بار مصرفی کل به‌اندازه بار مصرفی ریزشبه کاهش پیدا کرده است. سیستم کنترل مرکزی ریزشبه باید توانایی کنترل منابع داخل

دسترس به انرژی الکتریکی بدون وقفه و باکیفیت از اهداف هر مصرف‌کننده این انرژی است. لذا در یک رقابت سالم، واحدهای تولیدی موفق‌تر هستند که قیود قابلیت اطمینان را رعایت نمایند. به دلایل زیادی مانند تعمیرات پیش‌بینی‌نشده واحدهای تولیدی، خروج‌های غیرقابل برنامه‌ریزی، تغییرات بار و... مقداری از انرژی موردنیاز مصرف‌کنندگان تأمین نخواهد شد. مقدار انرژی تأمین نشده مورد انتظار (EENS) که طبق رابطه (۷) تعریف‌شده، در زیر مسئله محاسبه شده و به تابع هدف اضافه‌شده است.

$$C_{ENS,t} = EENS_t * VOLL_t \quad (۷)$$

$VOLL^D$  که قیمت بار حذف‌شده برای جبران خسارت مشتریان است، بستگی به عوامل مختلفی از جمله نوع مشتریان، مقدار و مدت قطع و زمان قطع برق دارد؛ و مقدار آن را ۱۸۰۰۰۰۰۰ ریال بر مگاوات ساعت در نظر گرفته‌ایم. قیود سیستم نیز طبق روابط (۸) و (۹) می‌باشد:

$$PG_t \left(1 + Res_t / 100\right) PL_t \leq \sum_t \sum_i PG_i X_{it} \quad (۸)$$

$$0 \leq N_{it} \leq N_{it}^{max} \quad (۹)$$

که  $PG_t$  ظرفیت در دسترس واحد موجود در سال  $Res_{it}$  رزرو موردنیاز در سال  $PL_{it}$  مقدار بار در سال  $PG_{it}$  ظرفیت واحد نوع  $i$   $X_{it}$  (Mw) تعداد واحد موردنیاز نوع  $i$  در سال  $t$  و  $N_{it}^{max}$  حداکثر تعداد واحد کاندید هست. جداول (۵) و (۶) نتایج حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. (تمامی اعداد مربوط به هزینه‌ها با واحد میلیارد ریال بر سال می‌باشد).

جدول (۵): نتایج طرح توسعه (بدون اثر ریزشبه)

سال نصب	۱	۲	۳	۴	۵
H/C نوع و تعداد	-	-	۱	۳	-
CC واحد کاندید	-	۳	۱	-	-
GT	۳	-	۱	-	-
H/O	-	-	-	-	۴

جدول (۶): هزینه‌های طرح توسعه تولید (بدون اثر ریزشبه)

نوع هزینه	سرمایه‌گذاری	سوخت	تعمیر و نگهداری	انرژی مورد انتظار تأمین نشده
(۱۰۸*)	۵۱۴۷,۸۱	۰,۸۵۳	۶۹۵,۹	۱۸,۹۵

همان‌طور که از نتایج پیداست، هزینه‌های سرمایه‌گذاری بخش غالب هزینه‌ها را در احداث یک واحد نیروگاهی دارد. واحدهای کاندید جهت طرح توسعه، نسبت به واحدهای قدیمی و موجود در شبکه دارای دسترس‌پذیری بالاتری بوده و به‌تدریج تا انتهای افق برنامه‌ریزی که واحدهای کاندید به شبکه افزوده می‌شوند، قابلیت اطمینان سیستم بالاتر رفته و مقدار انرژی تأمین نشده کاهش می‌یابد. چون هدف، تأمین بار با کمترین هزینه و حداکثر قابلیت اطمینان مدنظر بوده، در

جدول (۱۱): مقایسه نتایج

سناریو	هزینه	سرمایه- گذاری	سوخت	تعمیر و نگهداری	انرژی تأمین نشده	جمع کل هزینه‌ها
بدون اثر ریزش شبکه	۵۱۴۷,۸	۰,۸۵۳	۶۹۵,۹	۱۸,۹۵	۵۸۶۱	
نفوذ ۸٪ ریزش شبکه	۴۲۰,۸	۰,۷۰۹۶	۴۶۲,۹	۱۱,۳۲	۴۶۸۲	
مقایسه	٪۱۸,۶	٪۱۶,۸	٪۳۳,۴	٪۴۰,۲۶	٪۲۰,۱۱	

چون ریزش شبکه در مود جزیره‌ای قرار دارد با کاهش بار مصرفی از دیدگاه شبکه، قابلیت اطمینان شبکه نیز افزایش خواهد یافت و بنابراین انرژی تأمین نشده کاهش می‌یابد.

### ۳-۲- سناریوی دوم

در این حالت فرض شده است ریزش شبکه در حالت متصل (مود اتصال) به شبکه اصلی قرار دارد قابلیت تبادل توان یک‌طرفه با شبکه بالادست را دارد. در ساعاتی که توان تولیدی ریزش شبکه بار مصرفی آن را تأمین نکند، کمبود توان موردنیاز از شبکه اصلی تأمین خواهد شد. فرض شده است که سیستم ذخیره انرژی الکتریکی در ریزش شبکه وجود ندارد و کنترل مرکزی ریزش شبکه کمبود توان در داخل ریزش شبکه را تشخیص داده و در هر لحظه بتواند انتقال توان با شبکه بالادستی انجام شود. مجدداً روابط (۱۱) تا (۱۳) را جهت مدل سازی رشد بار شبکه و مقدار بار ریزش شبکه در نظر می‌گیریم.

اگر توان تولیدی را با  $SumGen$  و بار مصرفی در ریزش شبکه را با  $L_{em\_MG}$  نشان دهیم، کمبود بار در ریزش شبکه  $L_{em\_MG}$  از رابطه (۱۵) به دست می‌آید:

$$L_{em\_MG} = sumGen - L_{MG} \quad (15)$$

مقدار انتظاری توان تولیدی ریزش شبکه از رابطه (۱۶) قابل محاسبه خواهد بود:

$$\begin{aligned} Exp.(SumGen) = & NO_{PV} * Cap_{PV} * \\ & (1 - FOR_{PV}) * C.F_{PV} + NO_{Wind} * Cap_{Wind} * \\ & (1 - FOR_{Wind}) * C.F_{Wind} + NO_{Diesel} * \\ & Cap_{Diesel} * (1 - FOR_{Diesel}) \end{aligned} \quad (16)$$

در رابطه فوق مقدار C.F (Capacity Factor) را به ترتیب برای واحدهای بادی و خورشیدی مقدار ۰,۴ و ۰,۵ در نظر می‌گیریم. با توجه به ماهیت تصادفی منابع تولید پراکنده موجود در ریز شبکه، نرخ خروج اجباری را مطابق جدول (۸) در نظر می‌گیریم. سپس با توجه به رابطه (۱۷) توان تولیدی در ریزش شبکه به صورت تصادفی به دست خواهد آمد.

$$SumGen = A_{MG} * cap \quad (17)$$

با انتخاب یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱، در صورتی که مقدار عدد تصادفی به دست آمده، از مقدار F.O.R واحد بزرگتر بود، جهت ماتریس  $A_{MG}$  مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار صفر منظور می‌شود. در

ریزش شبکه را داشته باشد و تعادل بین عرضه و تقاضا را بررسی نماید و مسائل حفاظتی را نیز برآورده سازد.

### ۳-۱-۱- مدل سازی بار در ریزش شبکه (مود جزیره‌ای)

همان طور که قبلاً بیان شد فرض کرده‌ایم که بار شبکه سالیانه به اندازه  $B$  درصد رشد داشته باشد، اگر نقطه بار  $t$  ام و بدون نفوذ ریزش شبکه را با  $L_{base,jt}$  نمایش دهیم پیک بار جدید در سال  $t$  مطابق رابطه (۱۰) می‌باشد:

$$L_{new,jt} = (1 + \frac{B}{100})^t L_{base,jt} \quad (10)$$

نفوذ ریزش شبکه در این نقطه بار را با  $A_j$  نشان داده و داریم:

$$0 \leq A_j \leq 1, j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (11)$$

که در آن  $N$  تعداد نقاط بار می‌باشد. آنگاه بار ریزش شبکه در زمان  $t$  در تعداد نقاط بار  $j$  را مطابق رابطه (۱۲) داریم:

$$L_{MG,jt} = A * L_{new,jt} \quad (12)$$

بار جدید شبکه اصلی جهت برنامه‌ریزی توسعه تولید  $L_{Planning}$  طبق روابط (۱۳) و (۱۴) محاسبه خواهد شد:

$$\begin{aligned} L_{planning,jt} &= L_{new,jt} - L_{MG,jt} = \\ L_{new,jt} - A * L_{new,jt} &= (1 - A) L_{new,jt} \end{aligned} \quad (13)$$

$$L_{planning,jt} = (1 - A) * (1 + \frac{B}{100})^t L_{base,jt} \quad (14)$$

از آنجا که مطالعات انجام شده برای برنامه‌ریزی توسعه در سطح HLI صورت می‌گیرد اثر شبکه را در نظر نمی‌گیریم. جداول (۹) و (۱۰) نتایج حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول (۹): نتایج طرح توسعه (سناریوی اول)

سال نصب	۱	۲	۳	۴	۵
H/C	-	-	-	۱	۳
CC	۲	۲	-	-	-
GT	-	-	۲	۲	-
H/O	-	-	-	-	-

جدول (۱۰): هزینه‌های طرح توسعه تولید (سناریوی اول)

نوع هزینه	سرمایه- گذاری	سوخت	تعمیر و نگهداری	انرژی مورد انتظار تأمین نشده
۱۰ <sup>۹</sup> *	۴۲۰,۸	۰,۷۰۹۶	۴۶۲,۹	۱۱,۳۲

جدول (۱۱) نتایج برنامه‌ریزی توسعه تولید، بدون در نظر گرفتن اثر ریزش شبکه‌ها و نفوذ ۸ درصدی آن‌ها در شبکه به صورت منفصل از شبکه را مقایسه می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که در پایان افق برنامه‌ریزی ۲۰٪ درصد در کل هزینه‌ها صرفه جویی خواهد شد.

پایان توان تولیدی از حاصل ضرب ماتریس باینری  $A_{MG}$  در ظرفیت هر واحد با توجه به ضریب ظرفیت حاصل می‌شود.

فرض کرده‌ایم که توان تولیدی در ریزشبه‌ها از بار آن کمتر می‌باشد بنابراین مقدار  $L_{em\_MG}$  عددی منفی یا صفر به دست خواهد آمد. مقدار صفر به معنی برابری تولید و مصرف در داخل ریزشبه بوده و مقدار منفی نشان‌دهنده کمبود توان در داخل ریزشبه می‌باشد که سیستم کنترل مرکزی ریزشبه‌ها این کمبود توان را از شبکه اصلی تأمین می‌نماید بنابراین مقدار بار مصرفی شبکه مطابق رابطه (۱۸) تغییر می‌نماید:

$$L_{planning,jt} = L_{new,jt} - L_{em\_MG} \quad (18)$$

نتایج برنامه‌ریزی توسعه تولید حاصل از شبیه‌سازی در جداول (۱۲) و (۱۳) مشاهده می‌شود.

جدول (۱۲): نتایج طرح توسعه (سناریوی دوم)

					سال نصب	
۵	۴	۳	۲	۱		نوع و تعداد واحد کاندید
-	۲	۲	-	-	H/C	
-	-	-	۱	۳	CC	
-	-	۱	۲	۱	GT	
۳	۱	-	-	-	H/O	

جدول (۱۳): هزینه‌های طرح توسعه تولید (سناریوی دوم)

نوع هزینه	سرمایه-گذاری	سوخت	تعمیر و نگهداری	انرژی مورد انتظار تأمین نشده
(*) <sup>۱۰۸۹</sup>	۵۵۹۴,۴	۰,۸۹۳	۷۲۵,۶	۵۸,۴۴

نتایج نشان می‌دهد، در اینجا ریزشبه‌ها با تأمین توان اضطراری از شبکه اصلی، هزینه‌های سالیانه طرح توسعه را افزایش داده است؛ یعنی ریزشبه‌ها با تأمین توان اضطراری خود از شبکه اصلی، حدود ۸,۸٪ درصد به هزینه‌ها اضافه کرده است. مقایسه نتایج برنامه‌ریزی توسعه تولید در حالت بدون اثر ریزشبه‌ها و سناریوی دوم نشان می‌دهد؛ که با افزایش بار شبکه با توجه به نیاز ریزشبه‌ها، هزینه‌ها افزایش می‌یابند.

### ۳-۳- سناریوی سوم

در سناریوی سوم تبادل توان بین ریزشبه‌ها و شبکه اصلی به صورت دوطرفه انجام می‌شود، لذا ریزشبه‌ها با توجه به بار مصرفی خود، می‌تواند به صورت تصادفی به عنوان تولیدکننده توان یا مصرف‌کننده توان از دیدگاه شبکه باشد.

مدل سازی بار در این حالت مطابق با روابط سناریوی دوم می‌باشد با این تفاوت که در رابطه (۱۵) مقدار به دست آمده برای  $L_{em\_MG}$  مقداری مثبت، صفر یا منفی خواهد بود. در هر ساعت از سال مشخص  $t$  از بار  $z$  مقدار  $L_{em\_MG}$  از بار کل شبکه کم شده و با توجه به مثبت و یا منفی بودن مقدار  $L_{em\_MG}$ ، بار جدید شبکه حاصل خواهد شد. جداول (۱۴) و (۱۵) نتایج حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول (۱۴): نتایج طرح توسعه (سناریوی سوم)

سال نصب					نوع و تعداد واحد کاندید	
۵	۴	۳	۲	۱		
-	۲	۲	-	-		H/C
-	-	-	۱	۳		CC
-	-	۱	۲	۱		GT
۳	۱	-	-	-	H/O	

جدول (۱۵): هزینه‌های طرح توسعه تولید (سناریوی سوم)

نوع هزینه	سرمایه-گذاری	سوخت	تعمیر و نگهداری	انرژی مورد انتظار تأمین نشده
(*) <sup>۱۰۸۹</sup>	۵۰۵۴,۴	۰,۷۶۴	۶۳۵,۶	۴۳,۷۴

نتایج سناریوی سه و حالت بدون اثر ریزشبه‌ها در نظر گرفتن نفوذ ۸ درصدی ریزشبه‌ها نشان می‌دهد که هزینه سرمایه‌گذاری ۱,۸٪، هزینه سوخت ۱۰,۴٪ و هزینه تعمیرات ۸,۶٪ کاهش و هزینه انرژی تأمین نشده ۱۳۰٪ افزایش یافته است. چون ریزشبه‌ها به صورت تصادفی با شبکه بالادست تبادل توان دارد، باعث افزایش قابلیت اعتماد ریزشبه‌ها شده ولی قابلیت اعتماد شبکه اصلی کاهش یافته است.

نتایج شبیه‌سازی با در نظر گرفتن نفوذ ریزشبه‌ها به اندازه ۸ درصد بار شبکه بود. چنانچه درصد بالاتری از شبکه تحت تأثیر ریزشبه‌ها قرار گیرد، سناریوهای دوم و سوم را مجدداً شبیه‌سازی کرده و بانفوذ ۲۵ درصدی ریزشبه‌ها نتایج جداول (۱۶) تا (۱۹) حاصل شد.

جدول (۱۶): نتایج طرح توسعه بانفوذ ۲۵٪ ریزشبه‌ها (سناریوی ۲)

					سال نصب	
۵	۴	۳	۲	۱		نوع و تعداد واحد کاندید
۱	۲	-	-	-	H/C	
-	-	۳	۱	-	CC	
-	-	-	-	۴	GT	
۲	-	-	-	-	H/O	

جدول (۱۷): هزینه‌های طرح توسعه بانفوذ ۲۵٪ ریزشبه‌ها (سناریوی ۲)

نوع هزینه	سرمایه-گذاری	سوخت	تعمیر و نگهداری	انرژی مورد انتظار تأمین نشده
(*) <sup>۱۰۸۹</sup>	۵۶۴۴	۰,۸۶۲	۷۲۰,۶	۶۳,۷

در این حالت مقدار توان تولیدی ریزشبه‌ها ۶۱۵ مگاوات بوده و بیشترین بار مصرفی ریزشبه‌ها ۷۸۳ مگاوات و کمترین مقدار آن ۲۶۵ مگاوات می‌باشد. در ۱۳۰۱ ساعت سال توان تولیدی ریزشبه‌ها کمتر از بار مصرفی آن بوده که از شبکه اصلی تأمین خواهد شد، بنابراین در این ساعات بار شبکه افزایش می‌یابد. چون ریزشبه‌ها کمبود توان خود را از شبکه اصلی تأمین کرده، فلذا بار شبکه افزایش پیدا کرده است.

جدول (۱۸): نتایج طرح توسعه بانفوذ ۲۵٪ ریزشبه‌ها (سناریوی ۳)

					سال نصب	
۵	۴	۳	۲	۱		نوع و تعداد واحد کاندید
۱	۲	-	-	-	H/C	
-	-	۳	۱	-	CC	
-	-	-	-	۴	GT	
۲	-	-	-	-	H/O	

- [6] JÜRGEN SCHLABBACH, KARL-HEINZ ROFALSK "Power System Engineering Planning, Design and Operation of Power Systems and Equipment" Second, Updated and Enlarged Edition 2014.
- [7] AMIN KHODAEI, AND MOHAMMAD SHAHIDEHPOUR, "Microgrid-Based Co-Optimization of Generation and Transmission Planning in Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, may 2013.
- [۸] روفه‌گری نژاد رضا، مدل‌سازی و توسعه نرم‌افزار جهت بهره‌برداری بهینه منابع پراکنده انرژی در یک میکروگرید هوشمند، کارشناسی ارشد، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۹۰.
- [۹] روحانی احمد، برنامه‌ریزی مرکب توسعه نیروگاه‌ها و خطوط انتقال با در نظر گرفتن تولیدات پراکنده، کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان، ۱۳۸۹.
- [10] JAE HYUNG ROH, MOHAMMAD SHAHIDEHPOUR, AND YONG FU, "Security-Constrained Resource Planning in Electricity Markets", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 2, may 2007.
- [11] FRANCESCO CARERI, CAMILLO GENESI, PAOLO MARANNINO, MARIO MONTAGNA, STEFANO ROSSI, AND ILARIA SIVIERO, "Generation Expansion Planning in the Age of Green Economy", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 4, november 2011
- [12] Y.P. Li, G.H. Huang "Electric-power systems planning and greenhouse-gas emission management under uncertainty". Energy Conversion and Management 57 (2012) 173–182
- [13] HYUNG-GEUN KWAG, JIN-O KIM, "Optimal combined scheduling of generation and demand response with demand resource constraints"; Applied Energy Volume 96, August 2012, Pages 161–170
- [14] "A report prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, NO. 3, August 1999

جدول (۱۹): هزینه‌های طرح توسعه بانفوذ ۲۵٪ ریزش‌بکه (سناریوی ۳)

نوع هزینه (۱۰۰٪)	سرمایه- گذاری	سوخت	تعمیر و نگهداری	انرژی مورد انتظار تأمین نشده
	۴۹۴۳	۰,۷۵۶	۵۶۲	۳۷,۱۷

بانفوذ ۲۵ درصدی ریزش‌بکه، مقایسه نتایج در جدول (۲۰) نشان داده شده است. از جدول (۲۰) پیداست که چنانچه ریزش‌بکه با شبکه اصلی تبادل توان دوطرفه داشته باشد و مازاد توان تولیدی را به شبکه تزریق نماید حدود ۵,۵ درصد در هزینه‌های برنامه‌ریزی توسعه تولید صرفه‌جویی خواهد شد.

جدول (۲۰): مقایسه نتایج در مود اتصال ریزش‌بکه (نفوذ ۲۵٪)

هزینه سناریو	سرمایه- گذاری	سوخت	تعمیر و نگهداری	انرژی تأمین نشده	جمع کل هزینه‌ها
بدون اثر ریزش‌بکه	۵۱۴۷,۸	۰,۸۵۳	۶۹۵,۹	۱۸,۹۵	۵۸۶۱
دوم	۵۶۴۴	۰,۸۶۲	۷۲۰,۶	۶۳,۷	۶۴۲۸,۷
مقایسه	-۹,۶٪	-۱٪	-۳,۵٪	-۲۳,۶٪	-۹,۶۸٪
سوم	۴۹۴۳	۰,۷۵۶	۵۶۲	۳۷,۱۷	۵۵۴۲,۹
مقایسه	۴٪	۱۱,۳٪	۱۹,۲٪	-۹,۶٪	۵,۴۳٪

#### ۴- نتیجه‌گیری

امروزه تولیدات پراکنده در حال گسترش و موردتوجه دولت-هاست. در این پژوهش نقش ریزش‌بکه‌ها بر توسعه تولید بررسی شد و نشان دادیم بانفوذ ۲۵٪ آن‌ها در سیستم قدرت، ۵,۵٪ در هزینه‌های توسعه تولید صرفه‌جویی می‌شود. مسلماً با سرمایه‌گذاری بخش خصوصی در احداث ریزش‌بکه‌ها، در هزینه احداث و توسعه نیروگاه‌های متمرکز جهت پاسخگویی به بار پیک شبکه صرفه‌جویی شده و برنامه‌ریزی توسعه تولید دستخوش تغییر خواهد شد.

#### مراجع

- [1] REZAHEMMATI, RAHMAT-ALLAH HOOSHMAND, AMIN KHODABAKHSHIAN, "Comprehensive review of generation and transmission expansion planning", IET Gener. Transm. Distrib. 2013, Vol. 7, Iss. 9, pp. 955–964
- [2] XIAOTONG, L. YIMEI, L. XIAOLI, Z. MING, Z. "Generation and transmission expansion planning based on game theory in power engineering", Syst. Eng. Proc. 2012, 4, pp. 79–86
- [3] WILLIAM GANDULFO AND ESTEBAN GIL. "Generation Capacity Expansion Planning under Demand Uncertainty Using Stochastic Mixed-Integer Programming", IEEE Power & Energy Society General Meeting, jul.27-31, 2014.
- [4] RISHABH P. KOTHARI, DIRK P. KROESE. "Optimal Generation Expansion Planning Via The Cross-Entropy Method", Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference
- [5] SHAYANFAR, LAHIJI, AGHAEI, RABIEE, "Generation expansion planning in pool market: a hybrid modified game theory and improved genetic algorithm", Energy Convers. Manage. 2009 50, (5), pp. 1149–1156

- Generation Expansion Planning
- Demand Response
- Economic Dispatch
- Value Of Loss Load
- Capacity Outage Probability Table