

## برنامه‌ریزی تولید بهینه در سیستم‌های تجدیدساختاریافته‌ی برق با در نظر گرفتن رزرو چرخان و پخش بار بهینه

احمد حیدری<sup>۱\*</sup>، سعیداله مرتضوی<sup>۲</sup>

\* ۱- گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، a.heidari41@gmail.com

۲- دانشیار، گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، Mortazavi\_s@scu.ac.ir

**چکیده:** در سیستم‌های تجدیدساختاریافته‌ی برق، اپراتور مستقل سیستم (ISO) از ابزارهای زیادی جهت مینیمم‌سازی قیمت برای توزیع توان به مصرف‌کنندگان در وضعیتی پایدار و قابل اطمینان استفاده می‌کند. برای مینیمم‌سازی قیمت‌ها، ISO از بهمدار آوردن امنیت-مقید نیروگاه‌ها (SCUC) استفاده می‌کند و رزروهای سیستم را برای ارضای قابلیت اطمینان سیستم، برنامه‌ریزی می‌کند. از نقطه‌نظر پایداری، ISO پخش بار بهینه (OPF) را برای ایمن‌سازی حاشیه‌ی ولتاژ شین‌ها و کاهش تلفات، پیاده‌سازی می‌کند. در این مقاله، الگوریتمی برای در نظر گرفتن برنامه‌ریزی بهینه‌ی تولید، همراه با قیود انتقال پیشنهاد شده است و یک مطالعه‌ی موردی برای تایید الگوریتم پیشنهاد شده، پیاده‌سازی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** اپراتور مستقل سیستم، بهمدار آوردن امنیت-مقید نیروگاه‌ها، پخش بار بهینه، تلفات، رزرو چرخان.

تکنیک معمولاً برای حل مسائلی استفاده می‌شود که براساس قیود خطی هستند [۵]؛ هرچندکه در این مقاله، نویسندگان از برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته به عدد صحیح (MINLP) برای افزایش دقت استفاده کرده‌اند [۶].

در سیستم تجدیدساختاریافته‌ی برق، دو گزینه‌ی دیگر برای توزیع انرژی و خدمات رزرو وجود دارد که عبارتند از توزیع ترتیبی و توزیع همزمان [۷]. همان طور که مرجع [۷] پیشنهاد می‌دهد، از نقطه‌نظر بهینه‌سازی، جواب بهتر مسئله زمانی یافت می‌شود که کلیه‌ی قیود به جای اینکه پشت سرهم در نظر گرفته شوند، به صورت همزمان بررسی شوند. مرجع [۸] از روش احتمالاتی-قطعی ترکیبی برای الگوریتم رزرو-مقید تسویه‌ی بازار که شامل بهمدار آوردن نیروگاه‌ها است، استفاده می‌کند. هرچند که مرجع [۸] الگوریتم را فقط برای یک دوره زمانی اجرا می‌کند. مراجع دیگر مانند [۷] و [۹] رزروهای دیگر سیستم مانند بار قابل قطع را بررسی می‌کنند. در تمامی این مقالات، قیود قابلیت اطمینان بدون در نظر گرفتن پارامترهای خط حل می‌شوند.

### ۱- مقدمه

در بازار تجدید ساختاریافته‌ی برق، اپراتور مستقل سیستم (ISO) از ابزارهای زیادی برای تولید و توزیع برق استفاده می‌کند. ISO از بهمدار آوردن امنیت-مقید نیروگاه‌ها (SCUC) برای مینیمم‌سازی قیمت‌ها از نقطه‌نظر اقتصادی استفاده می‌کند و همچنین رزروهای واحدها مانند رزرو چرخان را برای فراهم کردن قابلیت اطمینان سیستم برنامه‌ریزی می‌کند. ISO همچنین برای کاهش تلفات در سیستم قدرت و ایمن سازی حاشیه‌ی ولتاژ شین‌ها از پخش بار بهینه (OPF) نیز استفاده می‌کند. تکنیک‌های مدل‌سازی و بهینه‌سازی فراوانی برای حل مسئله SCUC پیشنهاد شده است [۱-۳]. به خاطر طبیعت مسائل سیستم های قدرت که برنامه‌ریزی آمیخته به عدد صحیح (MIP) هستند، تکنیک تجزیه‌ی بندرز (Benders Decomposition) [۴] بیشتر از روش‌های دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش تجزیه‌ی بندرز یک تکنیک جداسازی است که مسئله‌ی اصلی و زیرمسئله را به گونه‌ای جدا می‌کند که حل کل مسئله نیاز به بار محاسباتی کمتری دارد. این

تمامی فرمول‌های مسئله‌ی به‌مدار آوردن امنیت-مقید نیروگاه‌ها به صورت زیر است [۱۰]:  
 قيد تعادل بار

$$\sum_{i=1}^{Ng} [P_{i,t} u_{i,t}] + P_{wind}(t) = P_{load}(t) \quad (1)$$

$$t = 1, \dots, Nt$$

محدوده‌های توان اکتیو واحدهای تولیدی

$$P_{G \min}(i) \leq P_{i,t} \leq P_{G \max}(i) \quad (2)$$

$$i = 1, \dots, Ng \quad t = 1, \dots, Nt$$

قيود مينييم زمان افزايش و مينييم زمان کاهش

$$[X_{i,t}^{on} - T^{on}(i)] \times [u_{i,t-1} - u_{i,t}] \geq 0 \quad (3)$$

$$[X_{i,t-1}^{off} - T^{off}(i)] \times [u_{i,t-1} - u_{i,t}] \geq 0$$

قيد نرخ افزايش واحد

$$P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq Rup(i) \quad (4)$$

نماعدله‌ی توان اکتیو واحدهای تولیدی

$$P_{i,t} \geq 0 \quad (5)$$

تابع هدف مسئله‌ی مينييم‌سازی

$$\sum_{i=1}^{Ng} \sum_{t=1}^{Nt} [F_i(P_{i,t})u_{i,t} + s_{i,t} + sd_{i,t}] \quad (6)$$

$$F_i(P_{i,t}) = CP_{i,t}^2 + BP_{i,t} + A$$

در معادلات بالا،  $i$  و  $t$  به ترتیب نشان‌دهنده‌ی واحدهای تولیدی و دوره‌ی زمانی هستند.  $P$  توان اکتیو واحدهای تولیدی،  $P_{wind}$  توان اکتیو خروجی نیروگاه بادی،  $P_{load}$  توان اکتیو مصرف شده در شين ها،  $Rup$  قيد نرخ افزايش واحد،  $s$  نشان‌دهنده‌ی هزینه‌ی راه‌اندازی،  $sd$  نشان‌دهنده‌ی هزینه‌ی خاموش کردن نیروگاه‌ها و  $u$  مقدار باینری است که وضعیت روشن و خاموش بودن نیروگاه‌ها را به‌دست می‌دهد.  $A$ ،  $B$  و  $C$  ثابت‌هایی هستند که تابع هزینه‌ی سوخت را برای واحدهای تولیدی تعريف می‌کنند.

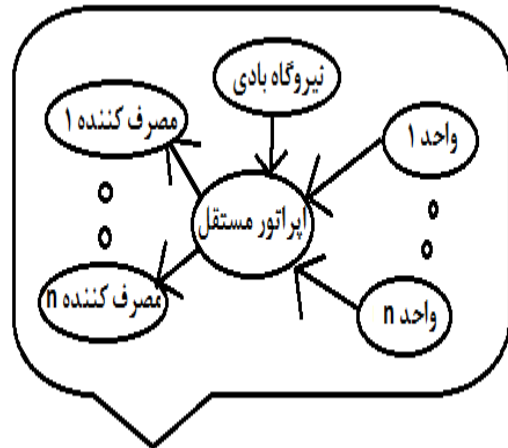
## ۲-۲-۲-۲ - رزرو چرخان و EENS

از لحاظ قابلیت‌اطمینان،  $EENS$  میانگین انرژی استفاده نشده مربوط به واحدهای تولیدی سیستم است. در این مقاله،  $EENS$  به صورت قيد در نظر گرفته نشده است؛ بدین معنی که اگر  $EENS$  برآورده نشود، تنها یک جمله‌ی جریمه به تابع هزینه اضافه می‌شود که باعث افزایش قیمت می‌شود. در سیستم‌های تجدید ساختار یافته‌ی برق، با فراهم کردن رزرو چرخان کافی در سیستم، امنیت بهبود می‌یابد.

تمامی اطلاعات و فرمول‌بندی قیود قابلیت اطمینان به‌کار گرفته شده در این مقاله در زیر آمده است:

کاهش تلفات یکی از مسائلی است که تمامی شرکت‌های برق باید آن را بررسی کنند. متعاقباً، ISO از پخش بار بهینه برای کاهش تلفات در خطوط انتقال استفاده می‌کند.

در این مقاله، ISO مسئله‌ی به‌مدار آوردن امنیت-مقید نیروگاه‌ها، رزروهای چرخان و پخش‌بار بهینه را برای به دست‌آوردن مينييم هزینه در یک سیستم تجدیدساختار شده‌ی برق با ایمن‌سازی حاشیه‌های ولتاژ، پیاده‌سازی می‌کند. شکل (۱) شمای کلی یک سیستم تجدید ساختار شده را نشان می‌دهد.



شکل (۱): مدل پیشنهاد شده برای سیستم تجدیدساختار شده‌ی برق

مطالب این مقاله به ترتیب زیر آمده‌اند:

بخش ۲ درباره‌ی فرمول‌بندی و روش‌شناسی مسئله بحث می‌کند. بخش ۳ یک مطالعه‌ی موردی برای تایید الگوریتم پیشنهاد شده ارائه می‌دهد و بخش ۴ نتیجه‌گیری حاصل از مقاله را بیان می‌کند.

## ۲- فرمول‌بندی و روش‌شناسی مسئله

### ۲-۱- فرمول‌بندی مسئله‌ی به‌مدار آوردن امنیت-

#### مقید نیروگاه‌ها

برای فرمول‌بندی مسئله‌ی به‌مدار آوردن امنیت-مقید نیروگاه‌ها از لحاظ ریاضی، قیود به صورت زیر هستند:

قيد تعادل بار، قیود مينييم زمان افزايش و مينييم زمان کاهش، قيد نرخ افزايش واحد، محدوده‌ی ولتاژ شين‌ها و محدوده‌ی توان انتقالی خطوط.

در این مقاله، مسئله‌ی به‌مدار آوردن امنیت-مقید نیروگاه‌ها یک مسئله‌ی MINLP است و با تکنیک تجزیه‌ی بندرز همراه با در نظر گرفتن رزرو چرخان حل می‌شود. در روش بندرز، مسئله‌ی به‌مدار آوردن نیروگاه‌ها، مسئله‌ی اصلی برنامه است که وضعیت روشن و خاموش بودن نیروگاه‌ها را به‌دست می‌دهد؛ در گام بعدی، زیرمسئله، مسئله‌ی پخش بار اقتصادی همراه با رزرو چرخان را به صورت همزمان حل می‌کند.

قيود رزروچرخان [۸]

## ۲-۴- الگوریتم

الگوریتمی که در این مقاله پیاده‌سازی شده، در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، ISO در ابتدا با حل مسئله‌ی به‌مدار آوردن نیروگاه‌ها، وضعیت روشن و خاموش آنها را به دست می‌دهد. سپس، پخش بار اقتصادی و رزرو چرخان برای هر واحد تولیدی محاسبه می‌شود. اگر تفاوت مقدار مطلق مسئله‌ی اصلی که مسئله‌ی به‌مدار آوردن نیروگاه‌ها را تعیین می‌کند و زیرمسئله که پخش بار اقتصادی همراه با رزرو چرخان را تعیین می‌کند، کمتر از تولرانس از پیش تعیین شده باشد، الگوریتم پخش بار بهینه را حل می‌کند؛ در غیر این صورت، برش‌های بندرز برای از ابتدا شروع کردن الگوریتم مورد استفاده قرار می‌گیرند. هزینه‌ی کل سیستم، مجموع هزینه‌های بهره‌برداری و هزینه‌های رزروچرخان سیستم است که منجر به مینیمم‌سازی قیمت می‌شود.

$$0 \leq SR_i^T \leq u_i P_i^{\max} - P_i \quad (7)$$

$$SR_i^T \leq Rup_i^T$$

و در نهایت، تابع هدف رزروچرخان به معادله‌ی (۶) که تابع هدف اصلی برنامه است، افزوده می‌گردد.

$$\sum (F(P_{i,t}) \times u_{i,t} + s_{i,t} + sd_{i,t}) + \sum (P_{SR} \times SR \times u_{i,t}) \quad (8)$$

در معادلات بالا،  $SR$  نشان‌دهنده‌ی رزروچرخان برحسب مگاوات و  $P_{SR}$  هزینه برای هر مگاوات توان رزروچرخان تولید شده برحسب واحد پول است.

## ۲-۳- پخش بار بهینه

هدف از پخش بار بهینه، یافتن تنظیمات بهینه‌ی سیستم قدرت داده شده است که تابع هدف سیستم را به گونه‌ای بهینه می‌کند که تلفات سیستم، تغییرات ولتاژ و معادلات توان انتقالی سیستم را برآورده کند [۳]. در این مقاله، برای کاهش تلفات جهت ایمن‌سازی حاشیه‌ی ولتاژ شین‌ها، پخش بار بهینه به صورت زیر پیاده‌سازی می‌شود. تابع هدف عبارت است از:

$$\min PL = F(P_{gslack}) \quad (9)$$

که  $P_{gslack}$  توان حقیقی واحدهای شین مبناست و  $PL$  نیز کل تلفات سیستم را نشان می‌دهد.

سایر قيود برای پخش بار بهینه عبارتند از:

$$P_i(V, \theta) = P_{Gi} - P_{Di} \quad (10)$$

$$Q_i(V, \theta) = Q_{Gi} - Q_{Di} \quad (11)$$

$$P_{Gi \min} \leq P_i(V, \theta) \leq P_{Gi \max} \quad (12)$$

$$Q_{Gi \min} \leq Q_i(V, \theta) \leq Q_{Gi \max} \quad (13)$$

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max} \quad (14)$$

در معادلات و نامعادلات بالا،  $P_{Gi}$  و  $Q_{Gi}$  به ترتیب نشان‌دهنده‌ی توان حقیقی و توان راکتیو تولیدی متصل به شین  $i$ ،  $P_{Di}$  و  $Q_{Di}$  به ترتیب نشان‌دهنده‌ی توان حقیقی و توان راکتیو بار متصل به شین  $i$ ،  $P_i$  و  $Q_i$  به ترتیب نشان‌دهنده‌ی توان حقیقی و توان راکتیو تزریق شده در شین  $i$  و  $V_i$  نیز اندازه‌ی ولتاژ در باس  $i$  است.

## ۳- مطالعه‌ی موردی

در این بخش، یک سیستم نمونه برای تایید الگوریتم پیشنهادشده در بازار روز پیش‌رو (Day Ahead Market) برای بهینه‌سازی چندزمانه، پیاده‌سازی می‌شود. مسئله‌ی اصلی، یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی آمیخته به عدد صحیح (MIP) است که از حل‌کننده‌ی CPLEX استفاده می‌کند و زیرمسئله، یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته به عدد صحیح (MINLP) است که با استفاده از حل‌کننده KNITRO حل می‌شود. الگوریتم پخش بار بهینه براساس روش نقطه درونی تغییریافته (Modified Interior Point) است. الگوریتم با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و در یک m-file پیاده‌سازی شده است.

## ۳-۱- گراف سیستم

شکل ۳. گراف سیستم نمونه را نشان می‌دهد. در این گراف  $W$  نشان دهنده‌ی نیروگاه بادی است که توان تولیدشده از انرژی باد را نشان می‌دهد و  $G.U.$  نشان‌دهنده‌ی واحدهای تولیدی است. دو ترانسفرمر tap-changer بین خطوط ۱-۷ و ۳-۸ قرار گرفته است. دو phase-shifter نیز بین خطوط ۱-۹ و ۵-۷ قرار گرفته است.

## ۳-۲- داده‌های سیستم

در پیوست مقاله آمده است.

## ۳-۳- نتایج پیاده‌سازی الگوریتم

با پیاده‌سازی برنامه‌ی بهینه‌سازی، داده‌های زیر به خروجی داده می‌شوند.

آن است که تابع هزینه‌ی این واحد نسبت به واحدهای ديگر ارزان‌تر است (طبق جدول الف در پیوست).

همان‌طور که از جدول‌های ۲ تا ۵ پیداست، واحد ۱ به‌دلیل ارزان‌تر بودن، در تمامی ساعت‌ها در مقدار بیشینه‌ی خود در حال تولید است و فقط در ساعت‌های اولیه است که بیشینه‌ی توان خود را تولید نمی‌کند.

جدول (۱): وضعیت روشن و خاموش‌بودن واحدهای تولیدی

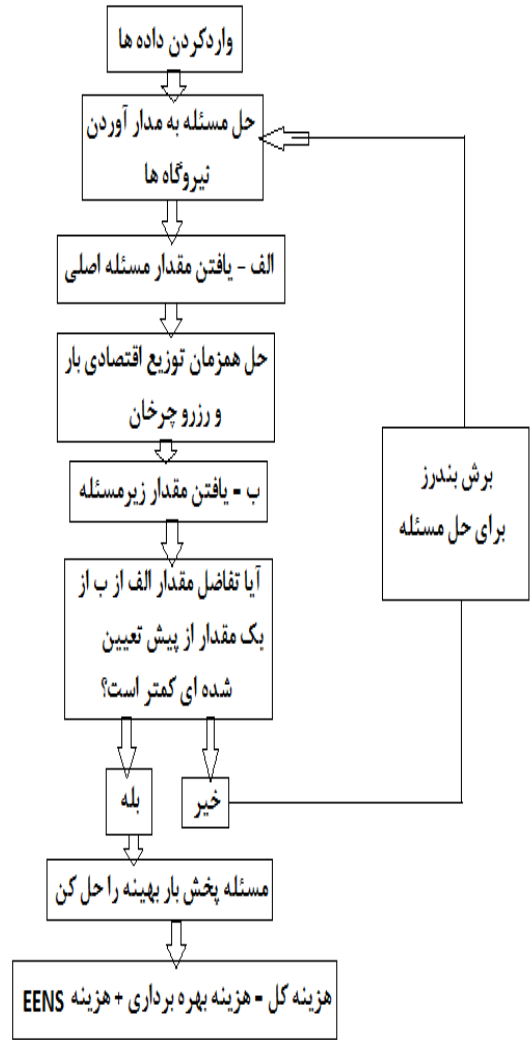
واحد تولیدی ساعت‌ها \	۱	۲	۳	۴
۱ ساعت	۱	۰	۰	۰
۲ ساعت	۱	۰	۱	۰
۳ ساعت	۱	۰	۱	۰
۴ ساعت	۱	۰	۱	۰
۵ ساعت	۱	۰	۱	۰
۶ ساعت	۱	۰	۱	۰
۷ ساعت	۱	۱	۰	۰
۸ ساعت	۱	۱	۰	۰
۹ ساعت	۱	۱	۰	۰
۱۰ ساعت	۱	۱	۰	۰
۱۱ ساعت	۱	۰	۰	۱
۱۲ ساعت	۱	۰	۰	۱
۱۳ ساعت	۱	۰	۰	۱
۱۴ ساعت	۱	۰	۰	۱
۱۵ ساعت	۱	۰	۰	۱
۱۶ ساعت	۱	۰	۰	۱
۱۷ ساعت	۱	۱	۱	۰
۱۸ ساعت	۱	۱	۱	۰
۱۹ ساعت	۱	۱	۱	۰
۲۰ ساعت	۱	۱	۱	۰
۲۱ ساعت	۱	۱	۱	۰
۲۲ ساعت	۱	۱	۰	۰
۲۳ ساعت	۱	۱	۰	۰
۲۴ ساعت	۱	۱	۰	۰

جدول (۲): توزیع اقتصادی بار برای واحد ۱

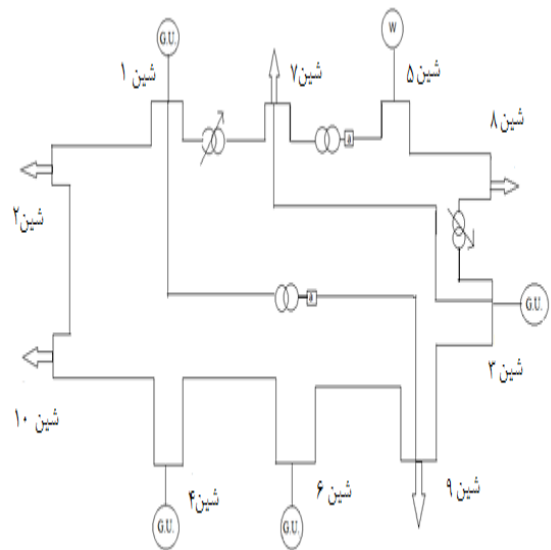
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۲۰.۵	۵۲.۰۵	۲۰.۰	۲۰.۰	۲۰.۰	۲۰۲.۳۵	۲۲۰	۲۲۰
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰
۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰

جدول (۳): توزیع اقتصادی بار برای واحد ۲

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۷.۸۵	۶۳.۵
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۵۹.۷	۷۵.۶۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۷۸.۸۵	۵۲.۹۵	۶۵.۳	۴۰.۳	۴۹.۸	۸۹.۹	۵۳.۹۵	۴۳



شکل (۲): الگوریتم پیشنهاد شده



شکل (۳): سیستم نمونه

همان‌طور که در جدول (۱) مشخص است، واحد تولیدی ۱ در تمامی زمان تعیین‌شده در حال تولید است و دلیل این امر نیز

جدول(۴): توزیع اقتصادی بار برای واحد ۳

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۰	۱۴.۴۵	۲۰	۲۰	۲۰	۱۷.۶۵	۰	۰
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۰	۰	۰

جدول(۱۰): ولتاژ شین ۶ برحسب پریونیت

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۰.۹۸۸	۰.۹۸۲	۰.۹۸۲	۰.۹۸۱	۰.۹۸۰	۰.۹۷۷	۰.۹۶۵	۰.۹۵۹
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۰.۹۶۳	۰.۹۱۸	۰.۹۱۸	۰.۹۱۹	۰.۹۲۱	۰.۹۱۹	۰.۹۴۹	۰.۹۷۱
۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۰.۹۸۱	۰.۹۷۶	۰.۹۸۶	۰.۹۸۳	۰.۹۶۰	۰.۹۶۳	۰.۹۸۱	۰.۹۸۱

جدول(۵): توزیع اقتصادی بار برای واحد ۴

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۰	۰	۱۱۵	۱۲۹.۳	۱۲۳.۱	۱۲۳.۸	۱۳۴.۴	۱۰۷.۹
۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول(۱۱): ولتاژ شین ۷ برحسب پریونیت

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۱.۰۱۰	۱.۰۰۹	۱.۰۰۸	۱.۰۰۸	۱.۰۰۸	۱.۰۰۸	۱.۰۰۵	۱.۰۰۵
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۱.۰۰۵	۱.۰۰۶	۱.۰۰۳	۱.۰۰۳	۱.۰۰۳	۱.۰۰۲	۱.۰۰۳	۱.۰۰۶
۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۱.۰۰۷	۱.۰۰۸	۱.۰۰۷	۱.۰۰۹	۱.۰۰۸	۱.۰۰۶	۱.۰۰۵	۱.۰۰۸

جدول(۱۲): ولتاژ شین ۸ برحسب پریونیت

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۰.۹۷۷	۰.۹۷۳	۰.۹۷۳	۰.۹۷۱	۰.۹۷۱	۰.۹۶۹	۰.۹۶۲	۰.۹۵۹
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۰.۹۶۱	۰.۹۶۳	۰.۹۵۰	۰.۹۵۰	۰.۹۵۰	۰.۹۵۰	۰.۹۵۰	۰.۹۶۲
۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۰.۹۶۹	۰.۹۷۳	۰.۹۷۰	۰.۹۷۵	۰.۹۷۴	۰.۹۶۳	۰.۹۶۱	۰.۹۷۲

همان‌طور که از جدول‌های (۶) تا (۱۴) مشخص است، هیچ ولتاژ شینی براساس داده‌های ولتاژ داده شده در پیوست، از محدوده‌ی خود تجاوز نمی‌کند و الگوریتم پیاده‌شده، نتایج خوبی را نشان می‌دهد. لازم‌به‌ذکر است که برای پیاده‌سازی پخش بار بهینه، شین ۱ به عنوان شین مبنا انتخاب شده است.

جدول(۶): ولتاژ شین ۲ برحسب پریونیت

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۰.۹۸	۰.۹۷	۰.۹۷	۰.۹۷	۰.۹۷	۰.۹۷	۰.۹۵	۰.۹۵
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۰.۹۵	۰.۹۶	۰.۹۱	۰.۹۱	۰.۹۱	۰.۹۱	۰.۹۱	۰.۹۴
۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۰.۹۷	۰.۹۷	۰.۹۷	۰.۹۸	۰.۹۷	۰.۹۵	۰.۹۵	۰.۹۷

جدول(۱۳): ولتاژ شین ۹ برحسب پریونیت

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۱.۰۰۵	۱.۰۰۱	۱.۰۰۱	۱	۱	۰.۹۹۸	۰.۹۸۹	۰.۹۸۵
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۰.۹۸۸	۰.۹۸۹	۰.۹۶۰	۰.۹۶۰	۰.۹۶۱	۰.۹۶۲	۰.۹۶۰	۰.۹۸۰
۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۰.۹۹۴	۱	۰.۹۹۷	۱.۰۰۴	۱.۰۰۲	۰.۹۸۷	۰.۹۸۸	۱

جدول(۷): ولتاژ شین ۳ برحسب پریونیت

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۱.۰۰۸	۱.۰۰۴	۱.۰۰۴	۱.۰۰۲	۱.۰۰۲	۱	۰.۹۹۳	۰.۹۹۰
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۰.۹۹۲	۰.۹۹۴	۰.۹۷۸	۰.۹۷۸	۰.۹۷۸	۰.۹۷۸	۰.۹۷۸	۰.۹۹۲
۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۰.۹۹۲	۱.۰۰۳	۱.۰۰۱	۱.۰۰۵	۱.۰۰۴	۰.۹۹۳	۰.۹۹۲	۱.۰۰۲

جدول(۱۴): ولتاژ شین ۱۰ برحسب پریونیت

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۰.۹۵۸	۰.۹۴۷	۰.۹۴۸	۰.۹۴۶	۰.۹۴۵	۰.۹۴۰	۰.۹۳۱	۰.۹۰۸
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۰.۹۱۴	۰.۹۱۵	۰.۸۵۵	۰.۸۵۶	۰.۸۶۱	۰.۸۵۷	۰.۹۰۱	۰.۹۲۸
۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۰.۹۴۳	۰.۹۳۴	۰.۹۵۰	۰.۹۴۶	۰.۹۱۰	۰.۹۱۵	۰.۹۴۲	۰.۹۵۵

جدول(۸): ولتاژ شین ۴ برحسب پریونیت

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۹۷.۰	۹۶.۰	۹۶.۰	۹۶.۰	۹۶.۰	۹۶.۰	۹۴.۰	۹۳.۰
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۹۴.۰	۹۴.۰	۸۸.۰	۸۸.۰	۸۹.۰	۸۹.۰	۸۹.۰	۹۲.۰
۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۹۵.۰	۹۶.۰	۹۵.۰	۹۷.۰	۹۶.۰	۹۳.۰	۹۴.۰	۹۶.۰

جدول(۹): ولتاژ شین ۵ برحسب پریونیت

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۱.۰۰۳	۱.۰۰۱	۱	۰.۹۹۹	۱	۰.۹۹۹	۰.۹۹۶	۰.۹۹۵
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۰.۹۹۶	۰.۹۹۸	۱	۱	۰.۹۹۹	۰.۹۹۷	۰.۹۹۹	۱
۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۱	۱.۰۰۱	۱	۱.۰۰۲	۱.۰۰۱	۰.۹۹۸	۰.۹۹۶	۱.۰۰۱

### ۴-۳- نتایج حاصل از پیاده‌سازی قیود قابلیت-

#### اطمینان

$$P_{SR} = 4.5, EENS_{max} = 0.01, VOLL = 5000$$

در رابطه‌ی بالا،  $VOLL$  به عنوان مقدار بار تلف شده تعریف می‌شود که ضریب جریمه‌ای است که در مقدار منحرف‌شده‌ی  $EENS$  ضرب می‌شود تا هزینه‌ی عدم تولید توان برای تولیدکننده بالا رود و این امر نیز بدین دلیل است که تولیدکننده باید بتواند قابلیت اطمینان سیستم را ارضا کند. مقدار جریمه برابر است با:

جدول (۱۹): تلفات بدون در نظر گرفتن پخش بار بهینه بر حسب مگاوات

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۰.۷۱۵	۰.۸۳۰	۰.۸۲۳	۰.۸۶۵	۰.۸۷۵	۰.۹۴۷	۱.۲۱۰	۱.۲۶۸
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۱.۱۷۶	۱.۱۰۵	۹.۵۶۴	۹.۴۶۸	۸.۹۶۱	۸.۳۱۲	۹.۱۶۲	۱.۴۹۳
۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۰.۸۹۹	۰.۷۲۶	۰.۸۲۳	۰.۶۴۶	۰.۶۹۵	۱.۱۳۷	۱.۱۹۳	۰.۷۸۹

مجموع تلفات بدون در نظر گرفتن پخش بار بهینه برابر است با: ۶۳.۶۹۴ بر حسب مگاوات.

جدول (۲۰): تلفات با در نظر گرفتن پخش بار بهینه بر حسب مگاوات

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۰.۸۲۳	۰.۸۸۳	۰.۸۷۶	۰.۹۱۹	۰.۹۲۹	۱.۰۰۲	۱.۲۳۱	۱.۲۵۲
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۱.۱۷۰	۱.۰۸۳	۲.۴۷۱	۲.۴۴۱	۲.۴۰۹	۲.۳۵۷	۲.۴۱۲	۱.۶۸۶
۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۰.۸۷۵	۰.۷۳۳	۰.۸۱۶	۰.۶۶۲	۰.۷۰۵	۱.۰۹۲	۱.۱۹۲	۰.۸۱۱

مجموع تلفات با در نظر گرفتن پخش بار بهینه برابر است با: ۳۰.۸۴۲ بر حسب مگاوات.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تلفات در سیستم با در نظر گرفتن پخش بار بهینه تا ۳۰ مگاوات کاهش یافته است و این مورد نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهاد شده، تاثیر مثبتی در کاهش تلفات سیستم داشته است.

### ۳-۶- هزینه کل

با جمع کردن هزینه‌ها بر اساس الگوریتم، هزینه بهره‌برداری ۱۰۹۳۷۶.۳۳۸۷۸ به واحد پول و با افزودن هزینه‌های اضافی به آن، هزینه کل برابر با ۱۱۹۲۴۶.۶۳ به واحد پول می‌باشد. توجه شود که هزینه اضافی، امنیت سیستم را ارضا می‌کند.

### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برنامه‌ریزی تولید بهینه در یک سیستم تجدید ساختار شده‌ی برق و در بازار روز پیش‌رو برای مدت زمان ۲۴ ساعت پیاده سازی شده است. مسئله‌ی به‌مدار آوردن امنیت-مقید نیروگاه‌ها، قیود قابلیت‌اطمینان و پخش بار بهینه مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده از مطالعه‌ی موردی، همگرایی خوبی را با الگوریتم نشان می‌دهند. با در نظر گرفتن پخش بار بهینه، تلفات سیستم نیز کاهش یافت.

$$VOLL \times (EENS_{tor} - EENS_{max}) \quad (15)$$

مقدار  $EENS$  برای تمامی زمان‌ها برابر با ۱.۳۵ است و از آنجا که این مقدار از ماکزیمم داده شده‌ی  $EENS$  به برنامه یعنی ۰.۰۱۰ بیشتر است؛ مقدار زیر به تابع هزینه افزوده می‌شود:

$$5000 \times (1.35 - 0.010) = 6682.79 \$$$

با توجه به جدول‌های ۱۵ تا ۱۸، واحدهای تولیدی، رزروهای چرخان را در ساعاتی تولید می‌کنند تا قابلیت‌اطمینان سیستم ارضا شود و امنیت سیستم بهبود یابد.

و نهایتاً، هزینه‌ی رزروچرخان برای سیستم برابر است با: ۳۱۸۷.۵ بر حسب واحد پول که از مجموع هزینه‌های رزروچرخان تک‌تک واحدهای تولیدی به‌دست آمده است.

جدول (۱۵): رزروچرخان واحد ۱ بر حسب مگاوات

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۷.۸۸
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۹.۹۰	۱۰.۷۶	۰	۰	۰	۰	۰	۲۲.۷۵
۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۶.۴۲	۲.۱۳۸	۴.۵۱	۰	۰	۱۱.۴۳	۹.۶۸	۰

جدول (۱۶): رزروچرخان واحد ۲ بر حسب مگاوات

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴۰	۳۹.۷۶
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۳۹.۳۹۹	۳۹.۲۷۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۱۷.۵۰	۱۷.۵۶	۱۷.۵۳	۱۷.۵	۱۷.۶	۳۹.۸	۳۹.۴	۳۹.۳۵

جدول (۱۷): رزروچرخان واحد ۳ بر حسب مگاوات

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۰	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۰	۰
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۰.۵۱۵	۰.۵۰۵	۰.۵۲۶	۰.۵۳۴	۰.۵۲۶	۰	۰	۰

جدول (۱۸): رزروچرخان واحد ۴ بر حسب مگاوات

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۰	۰	۴۲.۳۷۶	۳۸.۲۶۹	۲۲.۱۲۵	۸.۹۸۷	۳۹.۸۷۹	۱۸.۷۶۲
۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

### ۳-۵- بررسی تلفات

ابتدا، تلفات را بدون در نظر گرفتن پخش بار بهینه محاسبه می‌کنیم. نتایج در جدول ۲۶ آمده‌اند. در گام بعدی، پخش بار بهینه برای کاهش تلفات پیاده‌سازی می‌شود.

## ضمایم

جدول (الف): داده‌های واحدهای تولیدی

واحد	شماره شین	A (MBtu)	B (MBtu/MWh)	C (MBtu/MWh)	$P_{max}$ (MW)	$P_{min}$ (MW)	$Q_{max}$ (MVAR)	$Q_{min}$ (MVAR)
واحد ۱	۱	۱۷۶.۹	۱۳.۵	۰.۱	۲۲۰	۱۰۰	۲۰۰	-۸۰
واحد ۲	۴	۱۲۹.۹	۳۲.۶	۰.۱	۱۰۰	۱۰	۷۰	-۴۰
واحد ۳	۶	۱۳۷.۴	۱۷.۶	۰.۱	۲۰	۱۰	۵۰	-۴۰
واحد ۴	۳	۱۶۵.۸	۲۰.۴	۰.۱	۱۵۰	۵۰	۱۰۰	-۶۰

واحد	Int. S(h)	Min Down(h)	Min Up(h)	Ramp (MW/h)	St.Up (بر حسب واحد پول)	Shut.Dn (بر حسب واحد پول)	هزینه سوخت (بر حسب واحد پول)
واحد ۱	۴	۴	۴	۵۰	۱۰۰	۳۰۰	۱.۲۴۶۹
واحد ۲	۲	۲	۲	۴۰	۳۰۰	۸۰۰	۱.۲۴۶۱
واحد ۳	۲	۲	۲	۱۵	۰	۱۰۰	۱.۲۴۶۲
واحد ۴	۲	۲	۲	۴۵	۲۰۰	۵۰۰	۱.۲۴۶۳

جدول (ب): توان تولیدی نیروگاه بادی بر حسب مگاوات

n	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۴۴.۳	۷۱.۶	۷۵.۵	۸۵	۸۲.۸	۸۵.۵	۱۰۱.۴	۱۰۵.۷
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۸۰.۱	۵۷.۲	۹۸.۸	۸۷.۵	۹۰.۳	۷۹	۷۳.۵	۲۹.۶
۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۳.۷	۹.۵	۱۱.۴	۵.۳	۶.۴	۵۸.۵	۷۹.۶	۵۵.۱

جدول (ث): داده‌های بار برای شین‌های شماره ۸ و ۹ بر حسب مگاوات

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۴۳.۰	۴۸.۴	۴۸.۲	۴۸.۹	۴۹.۶	۵۱.۴	۶۱.۱	۶۶.۸
۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۶۴.۵	۶۳.۷	۷۹.۵	۷۹.۳	۷۸.۷	۷۷.۸	۷۸.۹	۶۵.۹
۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۵۶.۶	۵۲.۲	۵۵.۳	۴۹.۱	۵۱.۱	۶۴.۳	۶۴.۳	۵۲.۹

جدول (پ): ولتاژ شین‌ها بر حسب پریونیت

شماره شین	$V_{max}$	$V_{min}$
۱	۱.۰۵	۰.۹۵
۲	۱.۱۵	۰.۸۵
۳	۱.۱۵	۰.۸۵
۴	۱.۱۵	۰.۸۵
۵	۱.۰۵	۰.۹۱
۶	۱.۱۵	۰.۸۵
۷	۱.۱۵	۰.۸۵
۸	۱.۰۵	۰.۹۵
۹	۱.۰۵	۰.۹۵
۱۰	۱.۱۵	۰.۸۵

مقادیر برای شین‌های شماره ۷ و ۱۰، مقادیر برای شین‌های شماره ۸ و ۹ به علاوه ۱۰ مگاوات هستند و مقادیر برای شین ۲، مقادیر برای شین‌های شماره ۸ و ۹ به علاوه ۲۰ مگاوات هستند. برای مثال، توان اکتیو مصرف شده برای شین شماره ۲، در ساعت ۱ برابر با ۶۳ مگاوات است.

جدول (ج): داده‌های TAP-CHANGER

از شین	به شین	X (pu)	ماکزیمم زاویه	مینیمم زاویه
۷	۵	۰.۱۸	۳۰	-۳۰
۱	۹	۰.۱۸	۳۰	-۳۰

جدول (چ): داده‌های PHASE-SHIFTER

از شین	به شین	X (pu)	ماکزیمم زاویه	مینیمم زاویه
۱	۷	۰.۰۳۷	۰.۹۸	۰.۹۵
۳	۸	۰.۰۳۷	۰.۹۸	۰.۹۵

جدول (ت): داده‌های خط بر حسب پریونیت

از شین	به شین	R(pu)	X(pu)
۴	۶	۰.۰۰۲	۰.۱۴
۶	۹	۰.۰۰۵	۰.۱۶
۹	۳	۰.۰۰۶	۰.۱۶۵
۷	۳	۰.۰۰۳	۰.۲۵۸
۵	۸	۰.۰۰۵	۰.۱۶
۲	۱	۰.۰۰۵	۰.۱۷
۱۰	۲	۰.۰۰۳	۰.۲۵۸
۱۰	۴	۰.۰۰۷	۰.۱۹۷

## مراجع

- [1] N. P. Padhy, "Unit Commitment-A Bibliographical Survey", IEEE Trans. Power System, vol. 19, pp. 1196-1205, May. 2004.

های کامپیوتری، و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است و در حال حاضر دانشیار گروه برق دانشگاه شهید چمران اهواز می‌باشد.

- [2] M. Baghdadi, S. S. Mortazavi, A. Saidian, S. M. M. Tafreshi, "Optimal operation of a distribution company with integration of reliability considerations based on generalized benders decomposition method", Modern Electric Power Systems, Wroclaw, Poland, MEPS'10 - paper 11.4., 2010.
- [3] J. Zhu, "Optimization of Power system Operation", (Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2009, p. 251).
- [4] A. M. Geoffrion, "Generalized benders decomposition", J. Optim Theory Appl., vol. 10, no. 4, pp. 237-261, 1972.
- [5] M. Carrion, J. M. Arroyo, "A computationally efficient mixed-Integer linear formulation for the thermal unit commitment problem", Power Systems, IEEE Transactions on, vol.21, no.3, pp.1371-1378, Aug. 2006.
- [6] A. J. Conejo, E. Castillo, R. Minguez, R. Garcia-Bertrand, "Decomposition Techniques in Mathematical Programming, Engineering and Science Applications" Springer, p.251., 2006.
- [7] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, "Reliability-Constrained Unit Commitment Considering Interruptible Load Participation", Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering, vol. Nos.1 & 2, pp. 10-20, Jan. 2007.
- [8] F. Bouffard, F. Galiana, "an electricity market with a Probabilistic spinning reserve criterion", IEEE Trans. Power Systems, vol. 19, No. 1, pp. 300-307, Feb. 2004.
- [9] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Shahidehpour, "Unit Commitment with Probabilistic Spinning Reserve and Interruptible Load Consideration", IEEE Trans. Power System, vol. 24, pp. 388-397 NO. 1, Feb.2009.
- [10] Y. Fu, M. Shahidehpour, Z. Li, "Security-constrained unit Commitment with AC constraints", IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 3, pp.1538-1550, Aug. 2005

## رزومه



**احمد حیدری** در گچساران متولد شده است (۱۳۶۵). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق - قدرت از دانشگاه شیراز (۱۳۸۸)، کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت از دانشگاه شهید چمران اهواز (۱۳۹۰) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت و انرژی‌های نو است.



**سید سعیداله مرتضوی** در بهبهان متولد شده است (۱۳۴۲). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق - قدرت از دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۶۶)، کارشناسی ارشد مهندسی برق - کنترل از دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۶۹) و دکتری مهندسی برق - کنترل از دانشگاه Indian Institute of Technology-New Delhi (IIT) (۱۳۷۷) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه کنترل سیستم‌های قدرت، کنترل هوشمند، شبکه