

# بهینه‌سازی پخش بار اقتصادی در ریزشبه‌های DC در حضور منابع تجدیدپذیر دارای کنترلر ولتاژ با استفاده از امپدانس مجازی در شرایط قیمت گذاری زمان واقعی

سید مهدی حکیمی<sup>۱</sup> آرزو حسنخانی<sup>۲</sup> الناز شهبابی فراهانی<sup>۳</sup>

۱- استادیار - گروه برق و مرکز تحقیقات انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند، دماوند، ایران

[sm\\_hakimi@damavandiau.ac.ir](mailto:sm_hakimi@damavandiau.ac.ir)

۲- دانشجوی دکتری - دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه فلوریدا آتلانتیک - فلوریدا - آمریکا

[ahasankhani2019@fau.edu](mailto:ahasankhani2019@fau.edu)

۳- کارشناسی ارشد - وزارت نیرو - شرکت توانیر - تهران - ایران

[e.shahrabi@tavanir.org.ir](mailto:e.shahrabi@tavanir.org.ir)

**چکیده:** در این مقاله یک مسئله پخش بار اقتصادی برای کمینه کردن هزینه‌های بهره‌برداری در ریزشبه‌های DC بررسی شده است. هزینه‌های بهره‌برداری شامل هزینه تولیدات پراکنده و برق شبکه می‌باشد که راندمان تجهیزات شبکه نیز در آن در نظر گرفته شده است. در این مقاله مدل‌سازی ریزشبه DC بر روی شبکه‌ای دارای تولیدات بادی، خورشیدی، پیل سوختی و سیستم ذخیره‌سازی با کنترل‌کننده‌های محلی ولتاژ بر روی باس‌های تولیدات پراکنده با استفاده از امپدانس مجازی سری با منبع انجام شده است. همچنین این ریزشبه به شبکه سراسری نیز متصل می‌باشد. بهینه‌سازی و شبیه‌سازی‌ها توسط دو نرم‌افزار MATLAB و GAMS صورت گرفته و نتایج حاصل از هر یک از این دو نرم‌افزار با یکدیگر مورد مقایسه و سپس تحلیل و بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این نقش ذخیره‌سازها در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری در ریزشبه‌های DC نیز مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در ساعات پرمصرف که کارایی الگوریتم اهمیت بیشتری پیدا می‌کند هر دو نرم‌افزار عملکرد مناسب و مشابه یکدیگر دارند. پروفایل ولتاژ در هر دو نرم‌افزار نشان می‌دهد که ولتاژ باس‌ها در هیچ ساعتی از حدود مجاز تجاوز نکرده و نمودارهای پخش بار اقتصادی نیز حاکی از آن هستند که در بهینه‌سازی با MATLAB بیشتر از انرژی سیستم ذخیره‌ساز استفاده شده اما در بهینه‌سازی با GAMS توزیع متنوع‌تری از تولیدات پراکنده به دست آمده و در ساعات بیشتری از شبانه‌روز، ریزشبه به شبکه اصلی برق می‌فروشد.

**واژه‌های کلیدی:** ریزشبه DC، منابع تجدیدپذیر، پخش بار اقتصادی، الگوریتم ژنتیک

DOI: 10.52547/jiaeee.19.1.111

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۸/۰۷/۲۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۳۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سید مهدی حکیمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - دماوند - میدان معلم - مجتمع دانشگاه - دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند - گروه برق

## ۱- مقدمه

ریزشبکه‌های کنترل توان، کنترل ولتاژ و کنترلر اکتیو را دارد. در این مقاله، در ابتدا مساله پخش بار بهینه برای ریزشبکه‌های DC مستقل فرموله شده و در مرحله بعدی راه‌حل بهینه بر پایه برنامه‌نویسی درجه دو ارائه شده است.

انجام پخش بار اقتصادی و تخصیص توان به واحدهای تولیدی مختلف در ریزشبکه‌ها در مقالات کمی دنبال شده است. در مقاله [۸]، پخش بار اقتصادی در ریزشبکه DC با کنترلر اکتیو با هدف کمینه کردن هزینه در حالت قیمت‌گذاری زمان حقیقی انجام گرفته است. در این مقاله، روش فراابتکاری به منظور حل پخش بار انتخاب شده و تولید تصادفی واحدهای تجدیدپذیر و مصرف تصادفی بارها در نظر گرفته شده است. در مطالعه‌ای دیگر [۹]، روشی به منظور پخش بار بهینه در ریزشبکه AC/DC با در نظر گرفتن ماهیت تصادفی منابع تجدیدپذیر و بارها ارائه شده است. این روش با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری منجر به کاهش هزینه در مقایسه با سایر روش‌ها شده است. انجام پخش بار بهینه با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی به منظور طراحی سیستم ذخیره‌ساز در یک ریزشبکه جزیره‌ای مستقل، در مقاله [۱۰] بررسی شده است. تاثیر طراحی سیستم با این رویکرد و استفاده از ابرخازن‌ها منجر به افزایش طول عمر باتری‌ها و مزایای اقتصادی شده است. اهداف اقتصادی در ریزشبکه‌های ترکیبی AC/DC در رابطه با طراحی ریزشبکه‌های بر مبنای کنترلر اکتیو و سیستم‌های الکترونیک قدرت مرتبط با آن در [۱۱] مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

مینگ و همکارانش در سال ۲۰۱۶ با محاسبه و ارائه روابط مربوط به منابع موجود در یک ریزشبکه DC به مدل‌سازی آن پرداخته و یک سیستم کنترلی سلسله‌مراتبی به منظور کنترل منابع موجود در شبکه DC ارائه نموده‌اند [۱۲].

در مقاله [۱۳] به تجزیه شبکه توزیع استاندارد ۳۳ شین شعاعی به چندین ریز شبکه با حضور گسترده منابع تولید پراکنده متفاوت، از جمله منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر بادی و خورشیدی به منظور قابلیت اطمینان بالا پرداخته شده است. شبکه مورد بحث از نظر سرپرستی و مدیریت تولید می‌تواند تا ۵ قسمت تقسیم گردد و هر قسمت با مدیریت جداگانه اداره شود که تعداد و محدوده این بخش‌ها را نتیجه بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک مشخص می‌نماید. برای تولید منابع بادی و خورشیدی رژیم ساعتی متوسط سالانه فرض شده است. فاکتور انرژی از دست رفته (ENS) به عنوان شاخص قابلیت اطمینان سیستم مد نظر قرار گرفته است.

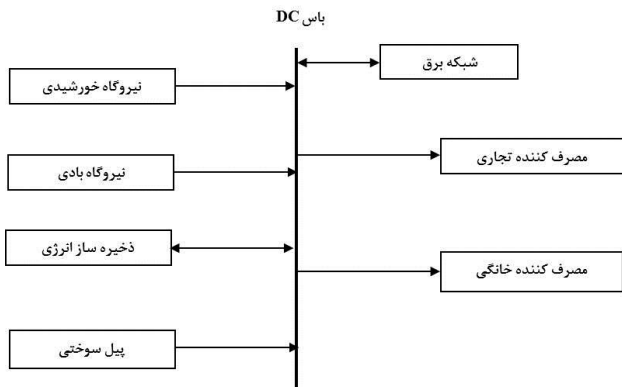
مقاله [۱۴] یک مدل ریاضی مناسب جهت برنامه‌ریزی عملکرد و بهره‌برداری ۲۴ ساعته‌ی یک ریزشبکه هوشمند متصل به شبکه با تولید همزمان برق و حرارت و در نظر گرفتن ناپیچینی‌های مصرف و تولید توان پیشنهاد داده است که در آن یک ماژول مدیریت همزمان ریسک و هزینه در ریزشبکه ارائه شده است. مقاله [۱۵] نیز مدل

امروزه با افزایش سرمایه‌گذاری‌ها بر روی منابع تولید پراکنده به ویژه منابع انرژی تجدیدپذیر، نیاز به ساختارهای جدید برای افزایش بازده و کاهش هزینه توزیع این نوع منابع به صورت جدی مطرح شده است. منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر، نظیر نیروگاه‌های فتوولتاییک و پیل سوختی ذاتاً جریان مستقیم (DC) هستند و در نیروگاه‌های بادی نیز به دلیل ماهیت نوسانی سرعت باد، به نحوی از مبدل‌های الکترونیک قدرت با لینک DC استفاده می‌شود. از این رو برای اتصال این منابع به سیستم توزیع AC از مبدل‌های واسط الکترونیک قدرت استفاده می‌شود که علاوه بر کاهش قابلیت اطمینان، خود باعث ایجاد تلفات و افزایش هزینه بهره‌برداری از این گونه منابع می‌شود. به همین دلیل، در سالهای اخیر استفاده از سیستم توزیع DC به منظور اتصال و توزیع انرژی تجدیدپذیر، به عنوان جایگزین و یا رقیب جدی سیستم‌های AC مرسوم، مطرح شده است و در این مقاله یک روش جدید پخش بار اقتصادی در ریزشبکه DC دارای کنترلر ولتاژ برای کمینه کردن هزینه‌های بهره‌برداری در شرایط قیمت‌گذاری زمان واقعی، ارائه شده است.

در این ادامه، مطالعات انجام گرفته در رابطه با بهره‌برداری از ریزشبکه DC و مدل‌های ارائه شده به منظور انجام پخش بار اقتصادی را بررسی می‌کنیم.

در برخی از مطالعات، پخش بار با روش‌های مختلف برای ریزشبکه‌های AC/DC انجام گرفته است. در مقاله [۱]، روشی به منظور انجام پخش بار در ریز شبکه ترکیبی AC/DC ارائه شده است، که بر پایه روش نیوتن رافسون عمل می‌کند. در این روش فقدان باس slack در حالت عملکرد جزیره‌ای و حضور کنترلر اکتیو در ژنراتورها در نظر گرفته شده است. روند انجام مدیریت توان و انجام پخش بار بهینه در حضور چندین ریزشبکه AC/DC در مقاله [۲] نیز مطالعه شده است. در مقاله [۳]، روشی به منظور انجام پخش بار بهینه با هدف بیشینه کردن سود بر پایه الگوریتم تپه نوردی ارائه شده است.

در مطالعات انجام شده، پخش بار به منظور دستیابی به اهداف مختلف و با استفاده از روش‌های متفاوتی صورت گرفته است. در مطالعه [۴]، تخصیص توان به واحدها با هدف کمینه کردن تلفات در ریزشبکه DC نمونه و ریز شبکه DC بر مبنای شبکه ۱۴ باس IEEE صورت گرفته است. در مقاله [۵]، روش نیوتن بهبودیافته به منظور انجام پخش بار و همگرایی پاسخ آن در ریزشبکه‌های DC ارائه شده است. در این مقاله، کارایی روش در حالات مختلف در ریزشبکه DC مورد تست قرار گرفته است. در مطالعه‌ای دیگر، پخش بار بهینه برای ریزشبکه‌ای DC در حالت مستقل و جزیره‌ای با استفاده از روش‌های فراابتکاری حل شده و کارایی آن با نتایج عددی تایید شده است [۶]. در مقاله [۷]، انجام پخش بار توسط یک کنترلر واحد تعریف شده در ریزشبکه DC انجام گرفته که امکان عملکرد و صدور فرمان کنترلی در



شکل (۱): ساختار ریزشبکه DC مورد مطالعه

در مطالعات و فرمولاسیون مربوط به پخش بار اقتصادی که در ادامه ارائه می‌شود، تمامی واحدهای فوق مدل‌سازی می‌شوند.

### ۳- مدل‌سازی تابع هدف پخش بار اقتصادی

مدل‌سازی مسئله بهینه‌سازی شامل دو بخش مدل‌سازی هزینه‌ها و مدل‌سازی معادلات توان شبکه می‌باشد. متغیرهای بهینه‌سازی که در این مقاله مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از:

- توان ورودی یا خروجی سیستم ذخیره‌ساز
- توان تولیدی سلول سوختی
- توان دریافتی یا ارسالی به شبکه
- ولتاژ باس‌ها
- امپدانس مجازی کنترلر ولتاژ در باس تولیدات پراکنده.

توزیع اقتصادی بار، روشی با بیشترین کارآمدی، کم‌ترین هزینه و بهره‌برداری قابل اطمینان، یک سیستم قدرت را به وسیله پخش مناسب منابع تولید انرژی برای تأمین بار سیستم تعیین می‌کند. هدف اولیه آن به حداقل رساندن هزینه کل تولید با در نظر گرفتن محدودیت‌های بهره‌برداری منابع تولید می‌باشد. مسأله توزیع اقتصادی بار، مقدار بار را برای نیروگاه‌ها به منظور کم کردن هزینه‌ها معین می‌کند. فرمول‌بندی آن نیز به عنوان یک مسأله بهینه‌سازی برای به حداقل رساندن هزینه کلی سوخت مجموع نیروگاه‌هایی که بار و تلفات را تأمین می‌کنند، ارائه می‌شود.

در ادامه تابع هدف مورد استفاده در مقاله که شامل مجموع هزینه‌های بهره‌برداری از ریزشبکه DC و قیود مربوط به آن است، ارائه می‌شود.

#### ۳-۱- تابع هدف

تابع هدف نیز عبارتست از مجموع هزینه‌های بهره‌برداری از ریزشبکه DC که فرمولاسیون آن در زیر آمده است. مقدار هزینه کل ( $C_{total}$ ) را می‌توان با استفاده از مجموع هزینه‌های هر واحد مطابق رابطه (۱) و (۲) محاسبه کرد.

$$C_{total}(u, R_{vi}) \quad (1)$$

دقیق‌تری از هزینه تحمیل شده به بهره‌بردار شبکه توزیع برای استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی ارائه داده است.

نوآوری‌های مقاله پیش رو به شرح زیر می‌باشد:

- مدل‌سازی کنترل‌کننده‌های محلی ولتاژ بر روی باس‌های تولیدات پراکنده با استفاده از امپدانس مجازی سری با منبع
- بررسی نقش ذخیره‌سازها در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری در ریزشبکه‌های DC با استفاده از نمودار پخش بار اقتصادی
- در نظر گرفتن راندمان تجهیزات شبکه و تلفات در معادلات پخش بار سیستم مورد مطالعه

در این مقاله یک مسئله پخش بار اقتصادی برای کمینه کردن هزینه‌های بهره‌برداری در ریزشبکه‌های DC در حضور منابع تجدیدپذیر دارای کنترلر ولتاژ با استفاده از امپدانس مجازی در شرایط قیمت‌گذاری زمان واقعی ارائه شده است که هزینه‌های بهره‌برداری شامل هزینه تولیدات پراکنده و برق شبکه می‌باشد که علاوه بر آن‌ها فاکتوری مانند راندمان تجهیزات شبکه نیز در آن نظر گرفته شده است. همچنین با در نظر گرفتن معادلات پخش بار در مسئله پیش رو، امکان محاسبه تلفات و در نظر گرفتن آن به عنوان یکی از هزینه‌های سیستم نیز میسر شده است. مسئله دیگری که در این پژوهش به آن پرداخته شده است، وجود کنترلرهای محلی ولتاژ بر روی باس تولیدات پراکنده می‌باشد. این کنترلرها با ایجاد یک امپدانس مجازی بین باس و منبع پراکنده، ولتاژ منبع تولید پراکنده را در مقدار نامی حفظ می‌نمایند. مقدار این امپدانس در پخش توان و هزینه‌های بهره‌برداری تأثیر مستقیم داشته و در این مطالعه به عنوان یکی از متغیرهای بهینه‌سازی، بهینه شده است. لازم به ذکر می‌باشد که بهینه‌سازی و شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در دو نرم‌افزار MATLAB و GAMS انجام شده و نتایج حاصل از هر یک از این دو نرم‌افزار با هم مقایسه و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

### ۲- ساختار ریزشبکه DC مورد مطالعه و اجزای آن

در این مقاله، پخش بار اقتصادی در یک ریزشبکه DC صورت می‌گیرد که ساختار آن مطابق شکل (۱) می‌باشد.

مطابق شکل، در ریزشبکه‌های DC که شامل دیزل ژنراتور، میکروتوربین، توربین بادی، سلول‌های خورشیدی، ذخیره‌ساز انرژی از نوع باتری، مبدل AC/DC و کنترل‌کننده مرکزی ریزشبکه می‌باشند، همه سیگنال‌های اندازه‌گیری شده در واحدهای تولیدی به کنترلر مرکزی ریزشبکه فرستاده می‌شود. سپس کنترل‌کننده مرکزی ریزشبکه براساس مدل تعریف‌شده برای تجهیزات و بهره‌برداری ریزشبکه و دیگر سیگنال‌های اطلاعاتی مانند پیش‌بینی بار، کمترین هزینه را برای بهره‌برداری از ریزشبکه پیدا می‌کند و سیگنال‌های لازم را برای کنترل واحدهای تولیدی ارسال می‌نماید.

محاسبات پخش بار انجام می‌شود که در ادامه مقاله بطور دقیق‌تر بررسی خواهد شد.

$$C_{loss} = \frac{\lambda_{buy} P_{loss}}{\Delta T} \quad (8)$$

$P_{Loss}$  تلفات توان منتقل شده می‌باشد.

### ۲-۲- قیود تابع هدف

قیود و محدودیت‌های مسئله پخش بار در این مقاله به سه بخش کلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از:

- معادلات پخش بار شبکه
- کنترلر ولتاژ بر روی باس‌ها
- حدود ولتاژ و توان منابع

اولین رابطه در مسأله برنامه‌ریزی برق و توزیع بهینه بار رابطه اصل بقای انرژی می‌باشد که مطابق رابطه (۹) می‌باشد [۱۹].

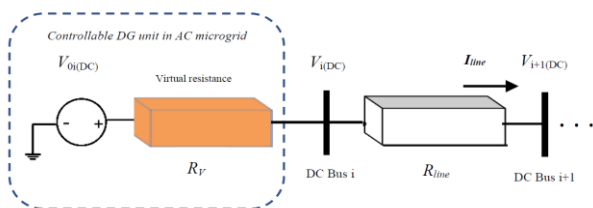
$$P_{renewable} + P_{utility} + P_{FC} + P_{ESS} - P_{load} - P_{loss} = 0 \quad (9)$$

مطابق رابطه فوق، مجموع توان تولید شده توسط کلیه واحدهای در مدار باید با مجموع مصرف سیستم برابر باشد. در رابطه (۱۰)، مقدار تلفات شبکه از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$P_{loss} = \frac{1}{2} \times \sum_i \sum_j Y_{ij(DC)} (V_{i(DC)} - V_{j(DC)})^2 \quad (10)$$

در رابطه بالا،  $Y_{ij}$  ادمیتانس‌های شبکه مورد نظر می‌باشد.

یکی از مسائلی که در این پژوهش به آن پرداخته شده است، وجود کنترلرهای محلی ولتاژ بر روی باس تولیدات پراکنده می‌باشد که ساختار و نحوه عملکرد آنها در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): مدل مربوط به کنترلرهای محلی ولتاژ بر روی باس تولیدات پراکنده

همانگونه که مشاهده می‌شود، این کنترلرها با ایجاد یک امپدانس مجازی بین باس و منبع تولید پراکنده، ولتاژ منبع را در مقدار نامی حفظ می‌کنند. مقدار این امپدانس در پخش توان و هزینه‌های بهره‌برداری تأثیر مستقیم داشته و در این مطالعه به عنوان یکی از متغیرهای بهینه‌سازی، بهینه می‌شود. معادله مربوط به کنترلر ولتاژ در باس‌های تولید پراکنده را که به عنوان قید در نظر گرفته می‌شود در رابطه (۱۱) آورده شده است.

$$C_{total} = C_{utility} + C_{ESS} + C_{FC} + C_{loss} \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $C_{utility}$  هزینه برق شبکه می‌باشد که مطابق رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۱۶].

$$C_{utility} = \begin{cases} \frac{\lambda_{buy} P_{utility}}{\Delta T} & P_{utility} \geq 0 \\ \frac{\lambda_{sell} P_{utility}}{\Delta T} & P_{utility} \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه فوق،  $\lambda_{buy}$  قیمت خرید برق،  $\lambda_{sell}$  قیمت فروش برق و  $\Delta T$  تعداد دوره‌های بهینه‌سازی در یک ساعت می‌باشد.

در این مطالعه هزینه بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز بر اساس بازدهی سیستم مدلسازی می‌شود. یکی از فاکتورهای اساسی که بازدهی سیستم ذخیره‌ساز را تحت تأثیر قرار می‌دهد نرخ شارژ و میزان شارژ سیستم ذخیره‌ساز می‌باشد، که به صورت ذیل مدل می‌شود [۱۷].

$$\eta_{ch} = a_{ch} - b_{ch} P_{ESS} \quad (4)$$

در این رابطه  $\eta_{ch}$  بازه شارژ،  $a_{ch}$  و  $b_{ch}$  ضرایب خطی حالت شارژ و  $P_{ESS}$  توان اندازه‌گیری شده جاری از ریزشبه DC به سیستم ذخیره‌ساز در ترمینال‌های خروجی آن می‌باشد.

در بازه دشارژ، بازدهی در رابطه (۵)، می‌تواند بصورت ذیل نوشته شود:

$$\eta_{dis} = a_{dis} + b_{dis} P_{ESS} \quad (5)$$

در این رابطه  $\eta_{dis}$  بازه دشارژ،  $a_{dis}$  و  $b_{dis}$  ضرایب خطی حالت دشارژ و  $P_{ESS}$  توان اندازه‌گیری شده جاری از ریزشبه DC به سیستم ذخیره‌ساز در ترمینال‌های خروجی آن می‌باشد.

$C_{ESS}$  هزینه بهره‌برداری سیستم ذخیره‌ساز برای حالت‌های شارژ و دشارژ به شرح ذیل محاسبه می‌شود:

$$C_{ESS} = \begin{cases} \frac{\lambda_{buy} (P_{ESS} - \eta_{ch} P_{ESS})}{\Delta T} & P_{ESS} \geq 0 \\ \frac{\lambda_{sell} (P_{ESS} - P_{ESS} / \eta_{dis})}{\Delta T} & P_{ESS} \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

هزینه تولید هر نیروگاه را می‌توان از روی منحنی هزینه سوخت آن نیروگاه بدست آورد و به همین دلیل برای محاسبه هزینه تولید مربوط به پیل سوختی از یک رابطه غیرخطی استفاده می‌شود که مطابق رابطه (۷) می‌باشد [۱۸].

$$C_{FC} = \frac{a_{FC} P_{FC}^2 + b_{FC} P_{FC} + c_{FC}}{\Delta T} \quad (7)$$

در این رابطه  $a_{FC}$  و  $b_{FC}$  و  $c_{FC}$  ضرایب ثابت هستند. همچنین برای مدل‌سازی هزینه مربوط به تلفات در سیستم مذکور از رابطه (۸) استفاده می‌شود. در واقع تلفات با توجه به

$$0 \leq P_{FC} \leq P_{FC,max} \quad (21)$$

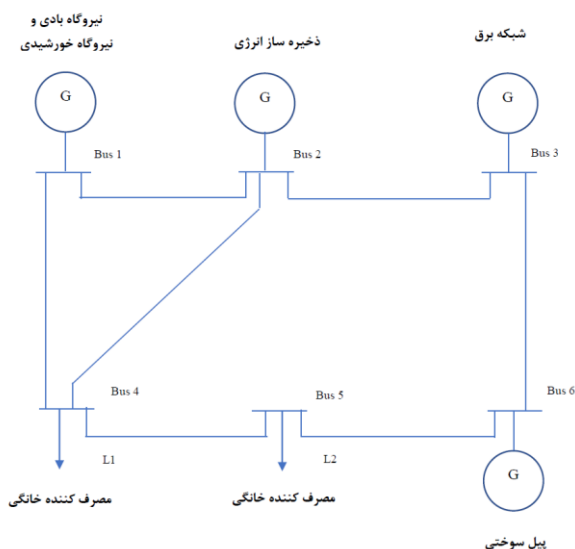
لازم به ذکر این نکته می‌باشد که به عنوان محدودیتی دیگر، در این پژوهش فرض شده است که در زمان دشارژ ذخیره‌ساز به ریزشبه، ریزشبه نمی‌تواند برقی به شبکه سراسری بفروشد. به عبارت دیگر، فروش برق از ذخیره‌ساز به شبکه سراسری ممنوع است. معادله محدودیت عدم فروش برق به شبکه سراسری در زمان دشارژ ذخیره‌ساز مطابق رابطه (۲۲) می‌باشد.

$$\left( \frac{\text{sign}(P_{ESS})}{2} + \frac{1}{2} \right) \times P_{utility} \geq 0 \quad (22)$$

### ۳-۳- شبیه‌سازی و نتایج

#### ۳-۳-۱- مشخصات شبکه مورد مطالعه و اجزای آن

در این مقاله به منظور آزمون روش پیشنهادی از یک ریزشبه DC شامل شش باس استفاده شده است. یک باس نقطه اتصال این ریزشبه با شبکه سراسری و سه باس دیگر محل تولیدات پراکنده است. دو باس نیز مربوط به بارهای مسکونی استفاده کننده از این ریزشبه است. دیاگرام تک خطی این ریزشبه در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): شبکه نمونه مورد استفاده در مقاله به منظور بررسی نتایج شبیه‌سازی

داده‌های و اطلاعات مربوط به شبکه و همچنین قیود و محدودیت مربوط به ظرفیت هر یک از واحدهای انرژی موجود در شبکه در جداول (۱) و (۲) ارائه شده‌اند.

$$V_{0i(DC)} - R_{vi(DC)} \frac{P_{Gi(DC)}}{V_{i(DC)}} - V_{i(DC)} = 0 \quad (11)$$

لازم به ذکر می‌باشد که در رابطه فوق،  $V_{0i(DC)}$  ولتاژ نامی،  $R_{vi}$  مقدار مقاومت مجازی باس نام،  $P_{i(DC)}$  مقدار توان عبوری از هر گره،  $V_{i(DC)}$  ولتاژ گره نام می‌باشد. همچنین رابطه (۱۲)، توازن و تعادل توان در هر گره شبکه شکل (۴) را نشان می‌دهد [۲۰].

$$P_{Gi(DC)} - P_{Di(DC)} - P_{i(DC)} = 0 \quad (12)$$

مقدار توان عبوری از هر نقطه یا  $P_{i(DC)}$  در معادلات (۱۳) و (۱۴) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_{i(DC)} = V_{i(DC)} I_{i(DC)} \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)  $I_{i(DC)}$  جریان DC عبوری از باس نام می‌باشد. این رابطه می‌تواند بصورت رابطه ذیل نوشته شود:

$$P_{i(DC)} = V_{i(DC)} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij(DC)} (V_{i(DC)} - V_{j(DC)}) \quad (14)$$

همچنین مقدار ولتاژ خروجی منبع DC،  $V_{Gi(DC)}$  از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود [۲۰] و [۲۱].

$$V_{i(DC)} = V_{Gi(DC)} = V_{0i(DC)} - R_{vi(DC)} I_{Gi(DC)} \quad (15)$$

در رابطه فوق  $I_{Gi(DC)}$  مقدار جریان خروجی واحد نام می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$I_{Gi(DC)} = \frac{P_{Gi(DC)}}{V_{i(DC)}} \quad (16)$$

در این رابطه  $P_{Gi(DC)}$  توان تولید شده توسط واحد نام می‌باشد. برای مقدار مقاومت مجازی و ولتاژ باس‌های مربوط به واحد نام محدودیت‌هایی مطابق رابطه (۱۷) و (۱۸) برقرار می‌باشند.

$$0 \leq R_{vi} \leq R_{vi,max} \quad (17)$$

$$V_{i(DC),min} \leq V_{i(DC)} \leq V_{i(DC),max} \quad (18)$$

می‌دانیم که ظرفیت تولید هر ژنراتور مقداری محدود است و هر ژنراتور دارای یک محدودیت حداکثر تولید می‌باشد. همچنین به دلیل برخی از محدودیت‌ها توان تولیدی هر منبع نمی‌تواند به هر میزان کاهش یابد. بنابراین برای تولید هر تولیدکننده انرژی، دو محدودیت حداکثر و حداقل وجود دارد که به صورت رابطه (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) نشان داده می‌شوند.

$$P_{utility,min} \leq P_{utility} \leq P_{utility,max} \quad (19)$$

$$P_{ESS,min} \leq P_{ESS} \leq P_{ESS,max} \quad (20)$$

جدول (۴): پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک مورد استفاده در

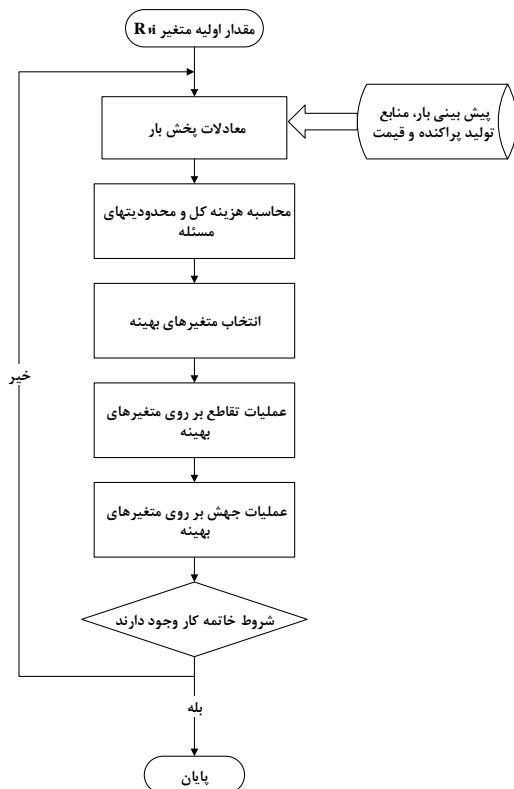
مقدار	پارامتر
۴۰	جمعیت
۱۰۰	تعداد نسل
۰/۲	نرخ جهش
۰/۰۵	نرخ انتخاب
20	حد stall
Penalty	Non-linear Constraint Algorithm

فلوچارت روش آرایه شده در مقاله به منظور انجام بهینه‌سازی اقتصادی در شکل (۴) نمایش داده شده است.

در ادامه به بررسی نتایج شبیه‌سازی‌های به دست آمده در این پژوهش می‌پردازیم.

### ۳-۲-۳- نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب

به منظور انجام بهینه‌سازی در MATLAB ابتدا تابع هزینه بر اساس معادلات ارائه شده و محدودیت‌های غیرخطی نوشته شدند و بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک صورت گرفت. مسئله حل شده مجموعاً دارای ۱۳ متغیر است که به صورت جدول (۵) ارائه شده است.



شکل (۴): فلوچارت بهینه‌سازی اقتصادی

جدول (۱): مقادیر پارامترهای خطوط شبکه مورد استفاده در شبیه

طول (m)	R(pu)	به باس	از باس	شماره خط
۲۰۰	۰,۰۰۵۸	۲	۱	۱
۳۰۰	۰,۰۰۸۷	۴	۱	۲
۱۴۰	۰,۰۰۴	۴	۲	۳
۲۰۰	۰,۰۰۵۸	۵	۳	۴
۱۰۰	۰,۰۰۲۹	۶	۵	۵
۱۵۰	۰,۰۰۴۳	۶	۳	۶
۱۷۰	۰,۰۰۴۹	۳	۲	۷

جدول (۲): قیود و محدودیت مربوط به ظرفیت هر یک از واحدهای

واحد تولید کننده	شبکه سراسری	ذخیره ساز	سلول سوختی
قیود ظرفیت kW	(-۳۰, ۳۰)	(-۳۰, ۳۰)	(۰, ۳۰)

انرژی موجود در شبکه ضرایب و پروفیل هزینه مربوط به تولیدات پراکنده، بارها در جدول (۳) ارائه شده است. همچنین پارامترهای مربوط به الگوریتم ژنتیک نیز در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول (۳): ضرایب هزینه مربوط به تولیدات پراکنده، بارها

ساعت	L1 [KW]	L2 [KW]	DGs [KW]	قیمت [cent/Kwh]
۱	۰/۶۹۵۳۱	۰/۵۲۹۲۱۴	۰/۵۶۸	۱۶/۶۱
۲	۰/۵۷۵۷۹	۰/۴۴۱۹۲۷	۰/۴۳۸	۱۳/۳۹
۳	۰/۷۲۲۳۲	۰/۶۴۴۶۶	۰/۵۸۳	۷/۷۷
۴	۰/۹۳۴۳۶	۰/۸۱۹۷۵۱	۰/۸۲	۱۱/۴۶
۵	۰/۹۹۸۱۰	۰/۸۳۰۱۶۳	۰/۸۳۲	۱۶/۷۹
۶	۰/۸۲۵۴۴	۰/۷۷۷۲۳۲	۰/۶۹۱	۴/۸۲
۷	۰/۹۳۳۱۹	۰/۸۲۲۷۱۲	۰/۵۲۶	۱۱/۰۵
۸	۰/۸۷۵۲۳	۰/۶۸۵۴۰۳	۰/۶۴۴	۱۸/۹۸
۹	۰/۸۳۰۶۵	۰/۶۷۷۳۸۵	۰/۸۴۲	۱۵/۳۳
۱۰	۰/۷۸۳۲۷	۰/۵۷۱۲۹۷	۰/۵۴۲	۲۱/۲۰
۱۱	۰/۷۶۵۱۶	۰/۶۴۴۸۶۷	۰/۷۴۳	۱۲/۰۳
۱۲	۰/۷۶۲۱۵	۰/۶۰۲۸۵۴	۰/۴۹۷	۱۵/۹۳
۱۳	۰/۸۲۳۹۲	۰/۶۸۷۲۷۸	۰/۵۵۳	۱۳/۶۶
۱۴	۰/۸۱۸۲۶	۰/۸۱۶۳۳	۰/۶۷۷	۰/۱۹
۱۵	۰/۸۷۹۰۷	۰/۷۶۴۱۸۱	۰/۷۶۴	۱۱/۴۹
۱۶	۰/۸۷۱۹۰	۰/۸۱۷۱۸۸	۰/۸۵۲	۵/۴۷
۱۷	۰/۸۲۸۴۴	۰/۸۲۵۸۴۵	۰/۶۲۳	۱/۲۶
۱۸	۱/۱۱۰۹۴	۰/۹۱۳۸۲۶	۰/۷۹۲	۱۹/۷۱
۱۹	۱/۰۲۲۳۸	۱/۰۲۱۰۳۷	۰/۹۹۹	۱/۱۳
۲۰	۱/۳۸۵۳۹	۱/۰۴۷۴۰۸	۱/۰۵	۳۳/۸۰
۲۱	۱/۳۲۶۴۹	۱/۰۲۶۴۹۹	۱/۰۲۹	۳۰/۰۰
۲۲	۱/۵۷۷۰۶	۱/۰۶۸۰۱۹	۱/۰۸۸	۵۰/۹۰
۲۳	۰/۹۵۳۲۲	۰/۹۵۴۲۷۳	۰/۹۷۷	-۰/۱۱
۲۴	۱/۰۵۱۶۹	۰/۸۶۰۵۹۲	۰/۸	۱۹/۱۱



۳-۳-۳- نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار GAMS

نرم‌افزار GAMS از قدیمی‌ترین و قدرتمندترین ابزارهای بهینه‌سازی است که الگوریتم‌های حل متعددی در آن برای انواع مسائل بهینه‌سازی وجود دارد. مشابه پیاده‌سازی مسئله در MATLAB در اینجا نیز تابع هدف و توابع محدودیت‌ها به ترتیب و با زبان برنامه‌نویسی GAMS پیاده‌سازی می‌شوند و از الگوریتم گسسته LindoGlobal برای حل آن استفاده شده است.

در بهینه‌سازی انجام شده با استفاده از GAMS توان و ولتاژ تمامی نقاط شبکه در کنار امپدانس مجازی منابع تولید پراکنده به صورت متغیر در نظر گرفته شده و در مواردی که توان صفر یا معلوم است، مقدار متغیر بر روی عدد معلوم ثابت شده است. بنابراین مجموع ۱۵ متغیر بهینه‌سازی در هر ساعت وجود دارد. در ادامه نتایج بهینه‌سازی انجام شده در نرم‌افزار گمز را به ازای ساعت‌های مختلف شبانه روز مورد بررسی قرار می‌دهیم.

شکل (۹) هزینه‌های بهره‌برداری پیش و پس از بهینه‌سازی در نرم‌افزار گمز را نشان می‌دهد.

همانگونه که مشاهده می‌شود، در این حالت نیز هزینه بهره‌برداری پس از بهینه‌سازی صورت گرفته در اغلب ساعت‌ها کاهش یافته است. همچنین شکل‌های (۱۰) و (۱۱) به ترتیب پروفیل ولتاژ باس‌های شبکه مورد مطالعه و نتایج حاصل از پخش بار اقتصادی به دست آمده در نرم‌افزار گمز را نشان می‌دهد.

مطابق شکل (۱۰)، منحنی پروفایل ولتاژ نشان می‌دهد که ولتاژ باس‌ها در هیچ ساعتی از حدود مجاز و مشخص تجاوز نکرده و در شکل (۱۱) نمودارهای پخش بار اقتصادی نیز حاکی از آن هستند که در بهینه‌سازی با GAMS توزیع متنوع‌تری از تولیدات پراکنده به دست آمده و در ساعات بیشتری از شبانه‌روز، ریزشبکه به شبکه اصلی برق می‌فروشد.

همچنین شکل (۱۲) پروفیل مربوط به جریان خطوط مختلف را در این حالت نشان می‌دهد. در این حالت نیز، مقدار جریان‌ها از مقادیر مجاز تخطی نکرده‌اند و بنابراین بهینه‌سازی به خوبی عمل کرده است.

جدول (۵): جدول متغیرهای بهینه‌سازی در مقاله با استفاده از نرم‌افزار

شماره	متغیر
۱	P <sub>utility</sub>
۲	P <sub>ESS</sub>
۳	P <sub>FC</sub>
۴	P <sub>loss</sub>
۵	V1
۶	V2
۷	V3
۸	V4
۹	V5
۱۰	V6
۱۱	Rv1
۱۲	Rv2
۱۳	Rv3

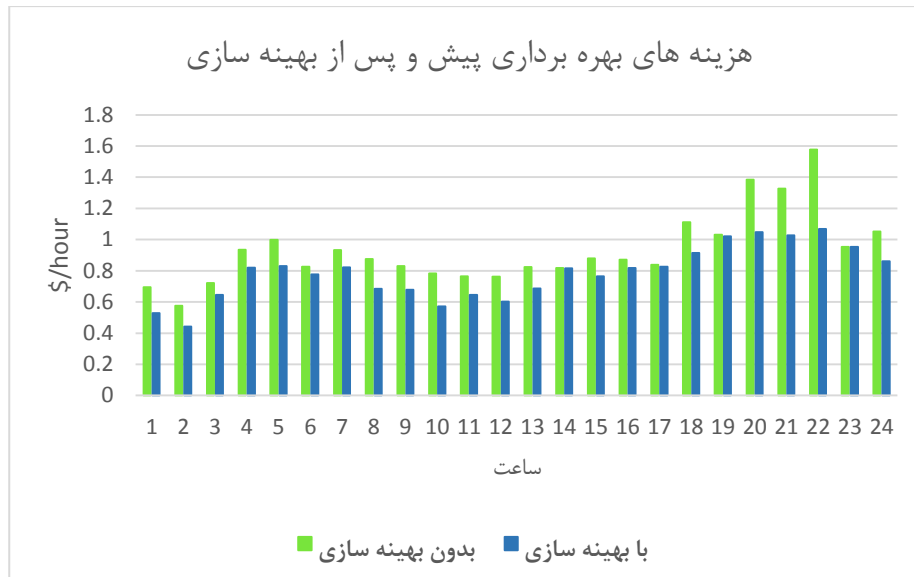
در ادامه نتایج بهینه‌سازی صورت گرفته به ازای ساعت‌های مختلف شبانه‌روز مورد بررسی قرار می‌گیرند. شکل (۵) نمودار میله‌ای مربوط به هزینه‌های بهره‌برداری پیش و پس از بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

مطابق شکل (۵)، در تمامی ساعات شبانه‌روز، هزینه بهره‌برداری پس از بهینه‌سازی نسبت به حالتی که بهینه‌سازی صورت نگرفته است کاهش یافته است و این به معنای عملکرد مناسب الگوریتم بهینه‌سازی ارائه شده در این مقاله می‌باشد. لازم به ذکر می‌باشد که در برخی از ساعات شبانه‌روز این اختلاف مقادیر قابل توجه می‌باشد. همچنین شکل (۶) منحنی‌های ولتاژ مربوط به هر یک از باس‌های شبکه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

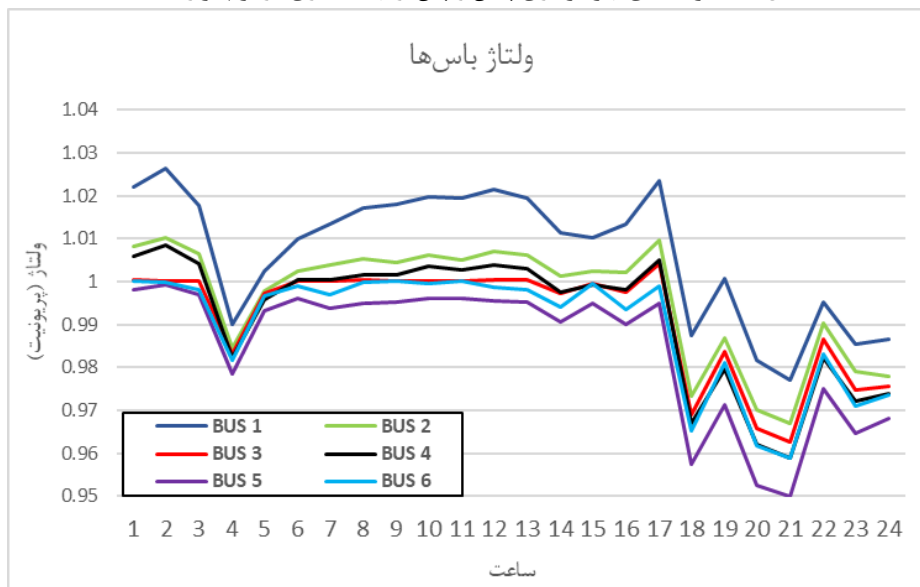
همانگونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، منحنی پروفایل نشان می‌دهد که ولتاژ باس‌ها در هیچ ساعتی از حدود مجاز تجاوز نکرده و منحنی ولتاژ حالت یکنواختی دارد.

همچنین شکل (۷) نتایج به دست آمده از پخش بار اقتصادی صورت گرفته با الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک را در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در این منحنی میزان هر یک از واحدها به تفکیک در ساعات مختلف نشان داده شده است.

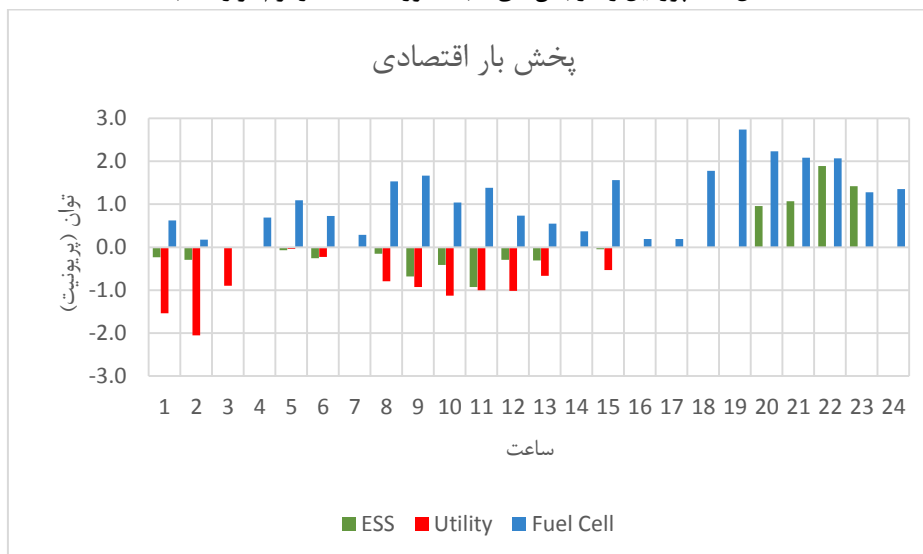
همانگونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، مشارکت هر یک از واحدهای تولید انرژی در ساعات مختلف شبانه‌روز متفاوت می‌باشد که بسته به شرایط مصرف‌کنندگان می‌باشد. به طور کلی نمودارهای پخش بار اقتصادی حاکی از آن است که در این حالت، بیشتر از انرژی سیستم ذخیره‌ساز استفاده شده است. همچنین شکل (۸) منحنی مربوط به جریان خطوط مختلف را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، منحنی جریان خطوط هم از محدوده مجاز تخطی نکرده‌اند و بنابراین بهینه‌سازی سیستم به خوبی صورت گرفته است.



شکل (۵): هزینه‌های بهره‌برداری پیش و پس از بهینه‌سازی در نرم‌افزار متلب

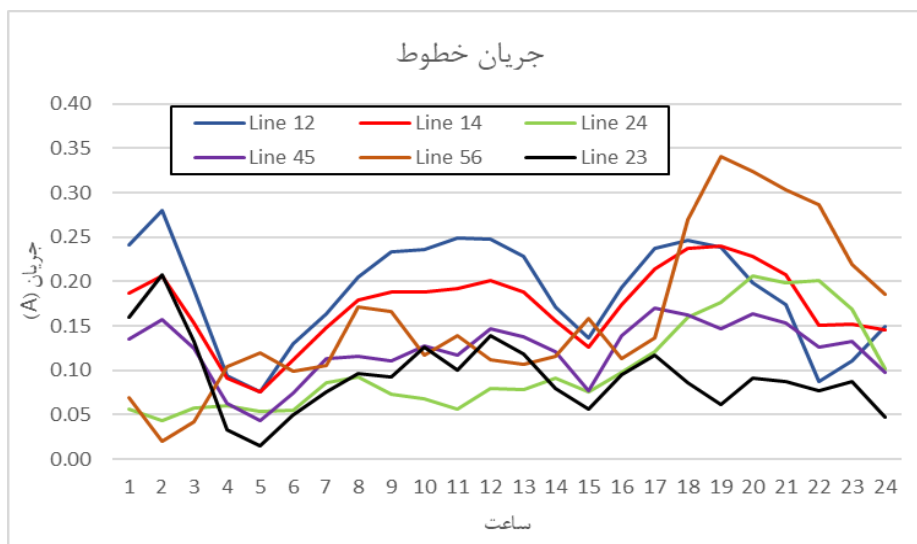


شکل (۶): پروفیل ولتاژ باس‌های شبکه مورد مطالعه در نرم‌افزار متلب

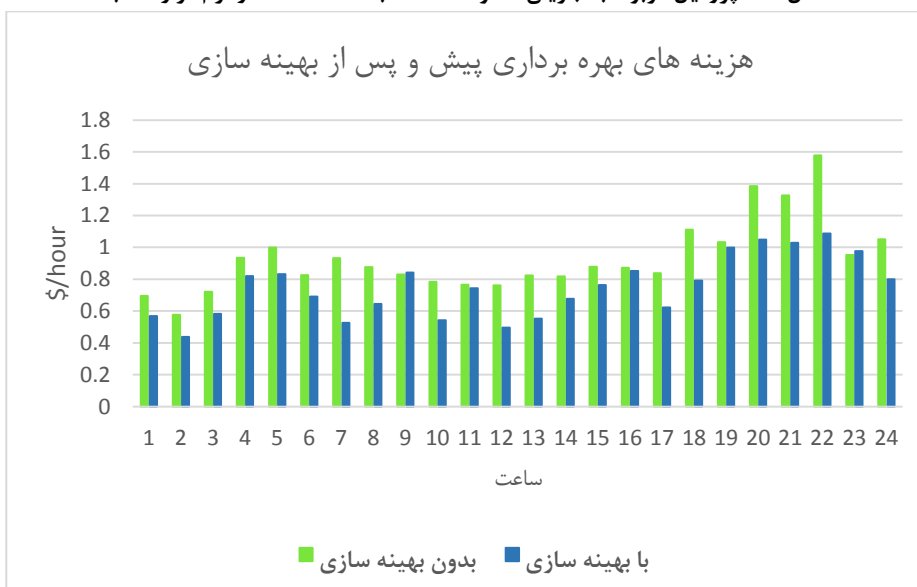


شکل (۷): نتایج حاصل از پخش بار اقتصادی به دست آمده در نرم‌افزار متلب

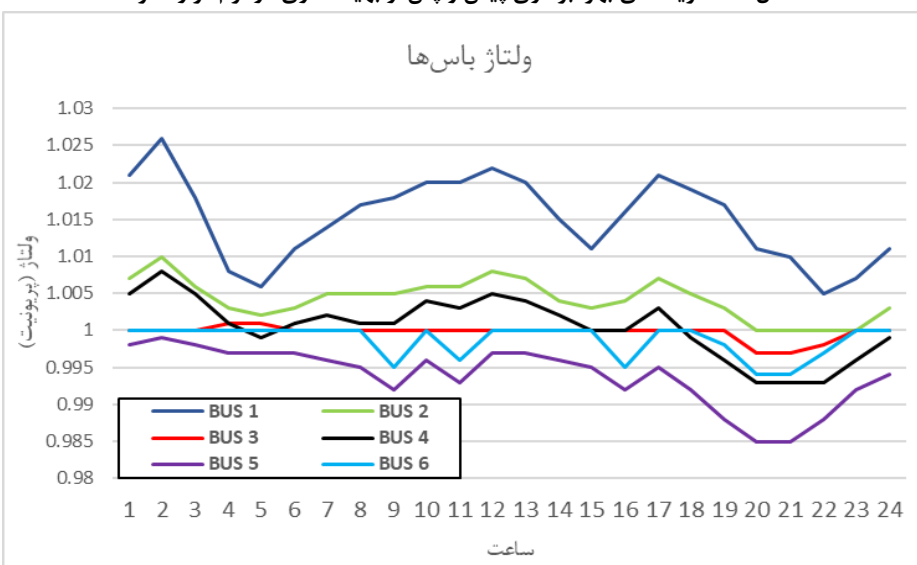




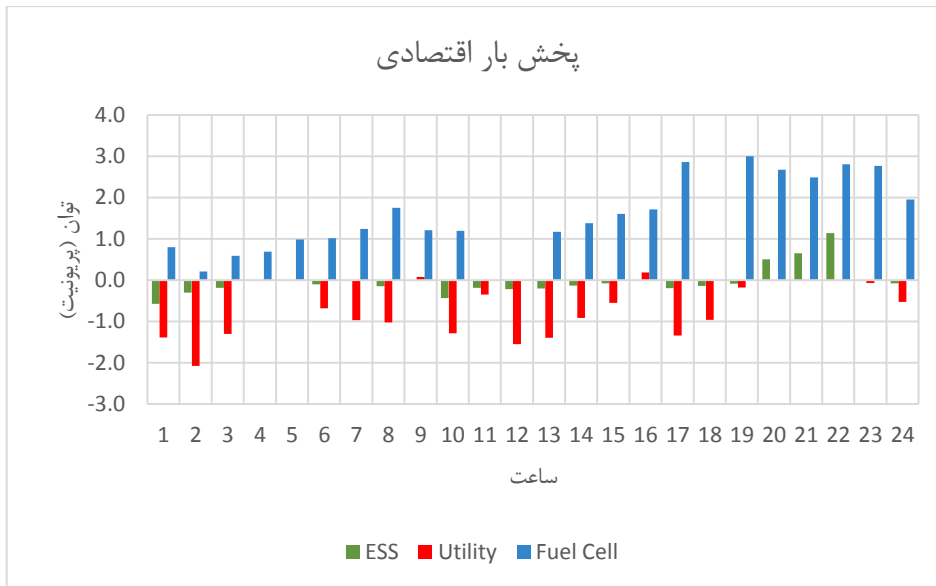
شکل (۸): پروفیل مربوط به جریان خطوط مختلف به دست آمده در نرم‌افزار متلب



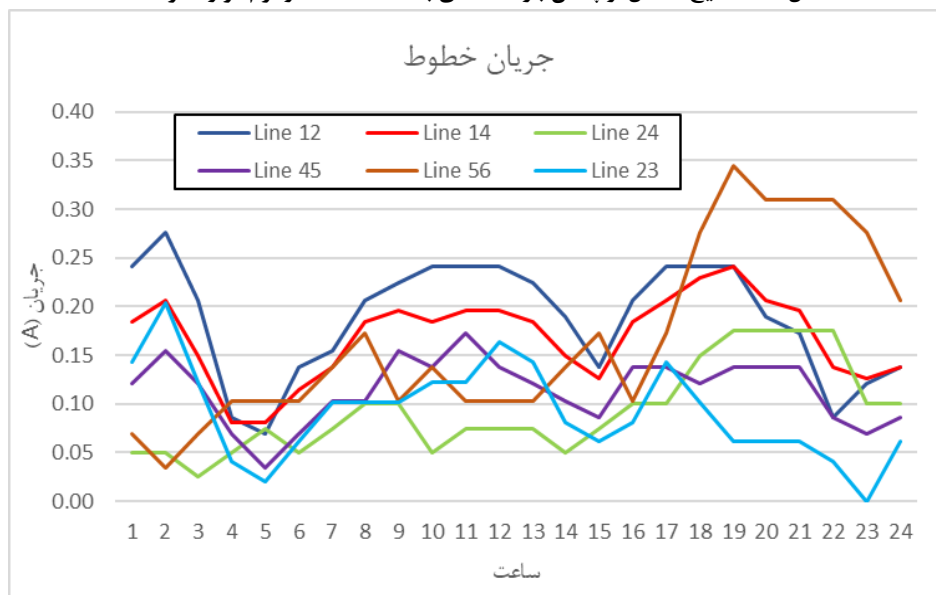
شکل (۹): هزینه‌های بهره‌برداری پیش و پس از بهینه‌سازی در نرم‌افزار گمز



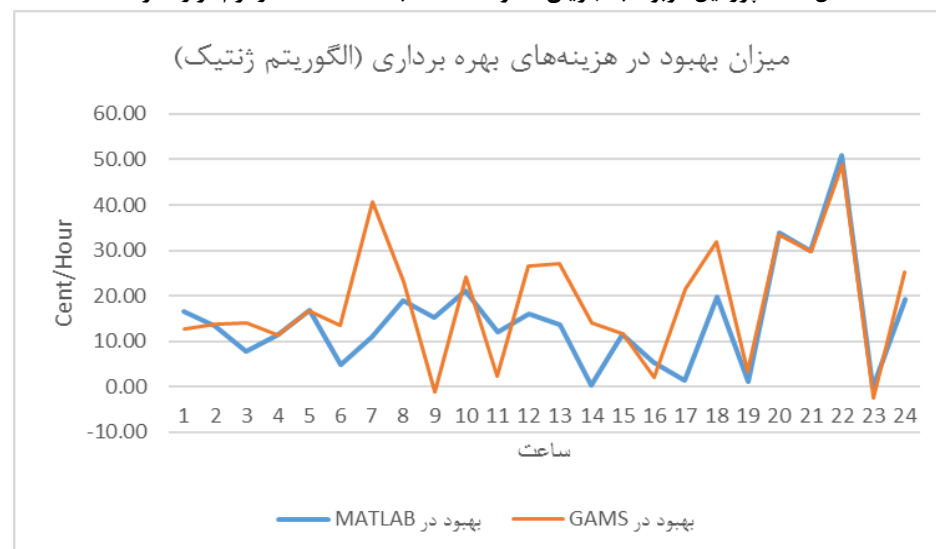
شکل (۱۰): پروفیل ولتاژ باس‌های شبکه مورد مطالعه در نرم‌افزار گمز



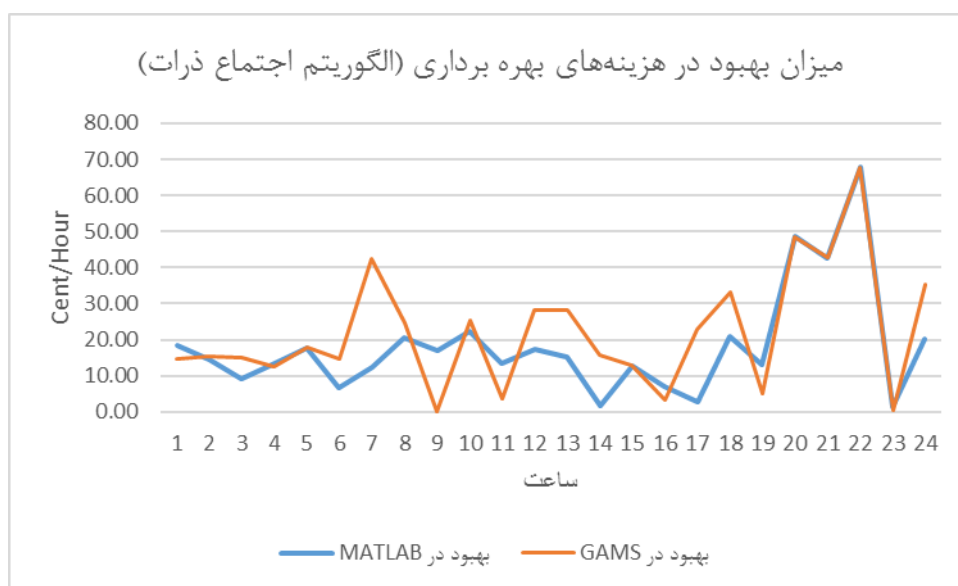
شکل (۱۱): نتایج حاصل از پخش بار اقتصادی به دست آمده در نرم‌افزار گمز



شکل (۱۲): پروفیل مربوط به جریان خطوط مختلف به دست آمده در نرم‌افزار گمز



شکل (۱۳): میزان بهبود در هزینه‌های بهره‌برداری در متلب و گمز (الگوریتم ژنتیک)



شکل (۱۴). میزان بهبود در هزینه‌های بهره‌برداری در متلب و گمز (الگوریتم اجتماع ذرات بهبود یافته)

تقریباً مشابه بوده ولی در برخی از ساعات الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات بهبود یافته عملکرد بهتری در مقایسه با الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک داشته است. در بهینه‌سازی با الگوریتم اجتماع ذرات بهبود نیز مشابه الگوریتم ژنتیک نتایج بصورت کلی در نرم افزار گمز بهتر از نرم افزار متلب می باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

توزیع اقتصادی بار، روشی با بیشترین کارآمدی، کم‌ترین هزینه و بهره‌برداری است که قابلیت اطمینان یک سیستم قدرت را به وسیله پخش مناسب منابع تولید انرژی برای تأمین بار سیستم تأمین می‌کند. هدف اولیه آن به حداقل رساندن هزینه کل تولید با در نظر گرفتن محدودیت‌های بهره‌برداری منابع تولید می‌باشد. مسأله توزیع اقتصادی بار، به عنوان یک مسأله بهینه‌سازی برای به حداقل رساندن هزینه کلی سوخت مجموع نیروگاه‌هایی که بار و تلفات را تأمین می‌کنند، ارائه می‌شود.

نتایج نشان می‌دهد، در ریزشبه‌هایی که تولید و مصرف در نزدیکی هم می‌باشند، بایستی به مقوله تغییرات ولتاژ و فرکانس و به طور کلی کیفیت توان و هزینه تمام شده انرژی توجه ویژه داشت؛ در این گونه از ریزشبه‌ها، هنگامی که تولید بیشتر از نیاز باشد، انرژی اضافه به گرما تبدیل می‌شود؛ این توان را می‌توان برای زمان‌های اوج نیاز بار ذخیره نیز کرد. عمده تفاوت عملکرد دو روش بهینه‌سازی مربوط به ساعت‌های کم‌مصرف تر است. در ساعات پرمصرف که کارایی الگوریتم اهمیت بیشتری پیدا می‌کند (ساعات ۱۹ تا ۲۴) هر دو الگوریتم عملکرد مناسب و مشابه یکدیگر دارند. اما در مجموع می‌توان گفت که کاهش هزینه‌های بهره‌برداری پس از بهینه‌سازی در GAMS اندکی بهتر از نتایج حاصل از بهینه‌سازی در MATLAB است.

#### ۳-۳-۴- مقایسه نتایج شبیه‌سازی

مقایسه هزینه‌های بهره‌برداری در دو نرم‌افزار انجام شده در MATLAB و GAMS نشان می‌دهد که مقادیر به دست آمده در آنها متفاوت هستند. پروفایل ولتاژ در هر دو نوع بهینه‌سازی نشان می‌دهد که ولتاژ باس‌ها در هیچ ساعتی از حدود مجاز تجاوز نکرده و در بهینه‌سازی با MATLAB ولتاژهای یکنواخت‌تری وجود دارد.

همچنین نمودارهای پخش بار اقتصادی نیز حاکی از آن هستند که در بهینه‌سازی با MATLAB بیشتر از انرژی سیستم ذخیره‌ساز استفاده شده اما در بهینه‌سازی با GAMS توزیع متنوع‌تری از تولیدات پراکنده به دست آمده و در ساعات بیشتری از شبانه‌روز، ریزشبه به شبکه اصلی برق می‌فروشد. جدول (۶) نتایج بهینه‌سازی در دو نرم‌افزار را با یکدیگر مقایسه می‌کند.

همچنین شکل (۱۳) میزان بهبود در هزینه‌های بهره‌برداری در دو روش بهینه‌سازی صورت گرفته در متلب و گمز را نشان می‌دهد.

همانطور که در جدول (۶) و شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، عمده تفاوت عملکرد دو روش بهینه‌سازی مربوط به ساعت‌های کم‌مصرف تر است. در ساعات پرمصرف که کارایی الگوریتم اهمیت بیشتری پیدا می‌کند (ساعات ۱۹ تا ۲۴) هر دو الگوریتم عملکرد مناسب و مشابه یکدیگر دارند. اما در مجموع می‌توان گفت که کاهش هزینه‌های بهره‌برداری پس از بهینه‌سازی در GAMS اندکی بهتر از نتایج حاصل از بهینه‌سازی در MATLAB است. بمنظور صحت‌گذاری روش بهینه‌سازی، میزان بهبود در هزینه‌های بهره‌برداری علاوه بر الگوریتم ژنتیک (شکل (۱۳))، با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات بهبود یافته نیز انجام شد که نتایج آن در شکل (۱۴) نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج دو الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات بهبود یافته

جدول (۶): خلاصه نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب و گمز

ساعت	هزینه بهره برداری بدون بهینه‌سازی (ساعت/\$)	هزینه بهینه با MATLAB (ساعت/\$)	هزینه بهینه با GAMS (ساعت/\$)	بهبود در MATLAB (سنت/ساعت)	بهبود در GAMS (سنت/ساعت)
۱	۰/۶۹۵۳۱	۰/۵۲۹۲۱۴	۰/۵۶۸	۱۶/۶۱	۱۲/۷۳
۲	۰/۵۷۵۷۹	۰/۴۴۱۹۲۷	۰/۴۳۸	۱۳/۳۹	۱۳/۷۸
۳	۰/۷۲۲۳۲	۰/۶۴۴۶۶	۰/۵۸۳	۷/۷۷	۱۳/۹۳
۴	۰/۹۳۴۳۶	۰/۸۱۹۷۵۱	۰/۸۲	۱۱/۴۶	۱۱/۴۴
۵	۰/۹۹۸۱۰	۰/۸۳۰۱۶۳	۰/۸۳۲	۱۶/۷۹	۱۶/۶۱
۶	۰/۸۲۵۴۴	۰/۷۷۷۲۳۲	۰/۶۹۱	۴/۸۲	۱۳/۴۴
۷	۰/۹۳۳۱۹	۰/۸۲۲۷۱۲	۰/۵۲۶	۱۱/۰۵	۴۰/۷۲
۸	۰/۸۷۵۲۳	۰/۶۸۵۴۰۳	۰/۶۴۴	۱۸/۹۸	۲۳/۱۲
۹	۰/۸۳۰۵۶	۰/۶۷۷۳۸۵	۰/۸۴۲	۱۵/۳۳	-۱/۱۴
۱۰	۰/۷۸۳۲۷	۰/۵۷۱۲۹۷	۰/۵۴۲	۲۱/۲۰	۲۴/۱۳
۱۱	۰/۷۶۵۱۶	۰/۶۴۴۸۶۷	۰/۷۴۳	۱۲/۰۳	۲/۲۲
۱۲	۰/۷۶۲۱۵	۰/۶۰۲۸۵۴	۰/۴۹۷	۱۵/۹۳	۲۶/۵۲
۱۳	۰/۸۲۳۹۲	۰/۶۸۷۲۷۸	۰/۵۵۳	۱۳/۶۶	۲۷/۰۹
۱۴	۰/۸۱۸۲۶	۰/۸۱۶۳۳	۰/۶۷۷	۰/۱۹	۱۴/۱۳
۱۵	۰/۸۷۹۰۷	۰/۷۶۴۱۸۱	۰/۷۶۴	۱۱/۴۹	۱۱/۵۱
۱۶	۰/۸۷۱۹۰	۰/۸۱۷۱۸۸	۰/۸۵۲	۵/۴۷	۱/۹۹
۱۷	۰/۸۳۸۴۴	۰/۸۲۵۸۴۵	۰/۶۲۳	۱/۲۶	۲۱/۵۴
۱۸	۱/۱۱۰۹۴	۰/۹۱۳۸۲۶	۰/۷۹۲	۱۹/۷۱	۳۱/۸۹
۱۹	۱/۰۳۲۲۸	۱/۰۲۱۰۳۷	۰/۹۹۹	۱/۱۳	۳/۳۴
۲۰	۱/۳۸۵۳۹	۱/۰۴۷۴۰۸	۱/۰۵	۳۳/۸۰	۳۳/۵۴
۲۱	۱/۳۲۶۴۹	۱/۰۲۶۴۹۹	۱/۰۲۹	۳۰/۰۰	۲۹/۷۵
۲۲	۱/۵۷۷۰۶	۱/۰۶۸۰۱۹	۱/۰۸۸	۵۰/۹۰	۴۸/۹۱
۲۳	۰/۹۵۳۲۲	۰/۹۵۴۲۷۳	۰/۹۷۷	-۰/۱۱	-۲/۳۸
۲۴	۰/۰۵۱۶۹	۰/۸۶۰۵۹۲	۰/۸	۱۹/۱۱	۲۵/۱۷
	میانگین				
	۱۸/۵۰	۱۴/۶۷			

پروفایل ولتاژ در هر دو نوع بهینه‌سازی نشان می‌دهد که ولتاژ باس‌ها در هیچ ساعتی از حدود مجاز تجاوز نکرده و در بهینه‌سازی با MATLAB ولتاژهای یکنواخت‌تری وجود دارد. نمودارهای پخش بار اقتصادی نیز حاکی از آن هستند که در بهینه‌سازی با MATLAB بیشتر از انرژی سیستم ذخیره‌ساز استفاده شده اما در بهینه‌سازی با GAMS توزیع متنوع‌تری از تولیدات پراکنده به دست آمده و در ساعات بیشتری از شبانه‌روز، ریزشبکه به شبکه اصلی برق می‌فروشد.

### ضمیمه - فهرست اختصارها و نشانه‌ها

انرژی از دست رفته	ENS
مجموع هزینه بهره‌برداری از ریزشبکه	$C_{total}$
هزینه بهره‌برداری برق از شبکه	$C_{utility}$
هزینه بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز	$C_{ESS}$
هزینه بهره‌برداری از سلول سوختی	$C_{FC}$

هزینه تلفات توان	$C_{loss}$
قیمت زمان واقعی خرید برق از شبکه	$\lambda_{buy}$
قیمت فروش برق به شبکه	$\lambda_{sell}$
توان تولیدی سلول سوختی	$P_{FC}$
توان مبادله شده با شبکه	$P_{utility}$
توان مبادله شده توسط سیستم ذخیره‌ساز	$P_{ESS}$
مقدار تلفات شبکه	$P_{loss}$
مقدار توان عبوری از هر گره	$P_{i(DC)}$
توان واحدهای تجدیدپذیر	$P_{renewable}$
توان مصرفی در بار	$P_{load}$
توان تولید شده توسط واحد آم	$P_{Gi(DC)}$
توان مصرف شده توسط واحد آم	$P_{Di(DC)}$
مقدار توان عبوری از هر گره	$P_{i(DC)}$
تعداد دوره‌های بهینه‌سازی در یک ساعت	$\Delta T$
بازه شارژ	$\eta_{ch}$
ضرایب خطی حالت شارژ	$a_{ch}$ و $b_{ch}$
بازه دشارژ	$\eta_{dis}$
ضرایب خطی حالت دشارژ	$a_{dis}$ و $b_{dis}$
ضرایب هزینه بهره‌برداری سلول سوختی	$b_{FC}$ و $c_{FC}$
	$a_{FC}$
مقدار جریان DC منبع DC	$I_{Gi(DC)}$
مقدار جریان DC عبوری از باس آم	$I_{i(DC)}$
مقدار مقاومت مجازی در ریزشبکه DC	$R_{vi(DC)}$
ولتاژ در باس آم	$V_{i(DC)}$
مقدار ولتاژ خروجی منبع DC	$V_{Gi(DC)}$
ولتاژ نامی خروجی منبع DC	$V_{Oi(DC)}$
ادمیتانس‌های شبکه	$Y_{ij}$

### مراجع

- [1] E. Aprilia, K. Meng, M. A. Hosani, H. H. Zeinldin and Z. Y. Dong, "Unified power flow algorithm for standalone AC/DC hybrid microgrids," IEEE transactions on smart grid, vol. 10, no. 1, pp. 639-649, 2019.
- [2] Y. Xia, W. Wei, M. Yu, X. Wang and Y. Peng, "Power Management for a Hybrid AC/DC Microgrid With Multiple Subgrids," IEEE transactions on power electronics, vol. 33, no. 4, pp. 3520-3533, 2018.
- [3] O. Khan, S. Acharya, M. A. Hosani and M. S. E. Moursi, "Hill Climbing Power Flow Algorithm for Hybrid DC/AC Microgrids," IEEE transactions on power electronics, vol. 33, no. 7, pp. 5532-5537, 2018.
- [4] J. Ma, L. Yuan, Z. Zhao and F. He, "Transmission Loss Optimization-Based Optimal Power Flow Strategy by Hierarchical Control for DC Microgrids," IEEE

- M. Guerrero, "Power Flow Analysis for Low-voltage AC and DC Microgrids Considering Droop Control and Virtual Impedance," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1.
- [20] C. Li, S. K. Chaudhary, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Power flow analysis for droop controlled LV hybrid AC-DC microgrids with virtual impedance," in 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, 2014, pp. 1-4.
- [21] C. Li, S. K. Chaudhary, T. Dragicevic, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Power flow analysis for DC voltage droop controlled DC microgrids," in 11th International Multi-Conference on Systems, Signals Devices (SSD), 2014, pp. 1-5.
- transactions on power electronics, vol. 32, no. 3, pp. 1952-1963, 2017.
- [5] A. Garces, "On the convergence of Newton's method in power flow studies for DC microgrid," *IEEE transactions on power systems*, vol. 33, no. 5, pp. 5770-5777, 2018.
- [6] J. Li, F. Liu, Zhaojian, S. H. Low and S. Mei, "Optimal Power Flow in Stand-Alone DC Microgrids," *Optimal power flow in stand-alone DC microgrids*, vol. 33, no. 5, pp. 5496-5506, 2018.
- [7] Z. Wang, F. Liu, Y. Chen, S. H. Low and S. Mei, "Unified Distributed Control of Stand-Alone DC Microgrids," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 10, no. 1, pp. 1013-1024, 2019.
- [8] C. Li, F. d. Bosio, F. Chen, S. K. Chaudhary, J. C. Vasquez and J. M. Guerrero, "Economic Dispatch for Operating Cost Minimization Under Real-Time Pricing in Droop-Controlled DC Microgrid," *IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 587-595, 2017.
- [9] A. Maulik and D. Das, "Optimal power dispatch considering load and renewable generation uncertainties in an AC-DC hybrid microgrid," *IET generation, transmission & distribution*, vol. 13, no. 7, pp. 1164-1176, 2019.
- [10] G. Oriti, A. L. Julian, N. Anglani and G. D. Hernandez, "Novel Economic Analysis to Design the Energy Storage Control System of a Remote Islanded Microgrid," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 54, no. 6, pp. 6332-6342, 2018.
- [11] S. M. Malik, Y. Sun, X. Ai, Z. Chen and K. Wang, "Cost-Based Droop Scheme for Converters in Interconnected Hybrid Microgrids," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 82266 - 82276, 2019.
- [12] L. Meng, E. R. Sanseverino, A. Luna, T. Dragicevic, J. C. Vasquez and J. M. Guerrero, "Microgrid supervisory controllers and energy management systems: A literature review," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 60, pp. 1263-1273, 2016.
- [۱۳] امیر کمالی، محسن سیماب، "طراحی ریز شبکه ها بر اساس قابلیت اطمینان توسط الگوریتم ژنتیک"، کنفرانس بین المللی تحقیقات بنیادین در مهندسی برق، ۱۳۹۶.
- [۱۴] اسماعیل جلال‌آبادی، اشکان رحیمی‌کیان، "بهره‌برداری بهینه و مدیریت ریسک یک ریز شبکه متصل به شبکه" نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۳۹۳.
- [۱۵] سعید سلمانی، شهرام جدید، " بهره‌برداری بهینه شبکه توزیع هوشمند در حضور منابع انرژی پراکنده " نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۳۹۵.
- [16] A. J. Conejo, J. M. Morales, and L. Baringo, "Real-Time Demand Response Model," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 236, 242, Dec. 2010.
- [17] Y. Xu, W. Zhang, G. Hug, S. Kar, and Z. Li, "Cooperative control of distributed energy storage systems in a microgrid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, pp. 238-248, 2015.
- [18] M. Y. Nguyen and Y. T. Yoon, "A Comparison of Microgrid Topologies Considering Both Market Operations and Reliability," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 42, pp. 585-594, 2014.
- [19] C. Li; S. K. Chaudhary; M. Savaghebi; J. C. Vasquez; J.