

# ارزیابی اقتصادی یک شبکه مستقل با کنترل داخلی شامل منابع انرژی پراکنده

محمدحسن مرادی و علی خندان

$M_{SS}$ : هزینه نگهداری سیستم ذخیره انرژی

$P_B$ : توان خروجی بویلر

$PC_{SS}$ : توان ورودی به سیستم ذخیره انرژی

$PD_{SS}$ : توان تخلیه شده از سیستم ذخیره انرژی

$P_{FC}$ : توان خروجی پیل سوختی

$P_{SS}$ : توان خروجی سیستم ذخیره انرژی

$P_{buy}$ : توان خریداری شده از شبکه بالادست

$P_{sell}$ : توان فروخته شده به شبکه بالادست

$PR_{buy}$ : قیمت خرید انرژی

$PR_{sell}$ : قیمت فروش انرژی

$PR_{base}$ : قیمت حق اشتراک خرید انرژی

$t_{repair}$ : زمان تعمیر

$t_{isolate}$ : زمان جداسازی

$t_{reconfig}$ : زمان تغییر ساختار

$\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$ : ضرایب تبدیل هزینه اولیه به سالیانه

چکیده: در این مقاله ۴ سناریوی تأمین انرژی مصرف‌کنندگان با استفاده از تابع هدف پیشنهادی با هم مقایسه گردیده و مناسب‌ترین روش تأمین انرژی مشخص شده است. ۴ سناریوی تأمین انرژی عبارتند از: تأمین انرژی تنها به وسیله شبکه، شبکه و منابع تولید پراکنده، ریزشبکه به تنهایی و ریزشبکه متصل به شبکه بالادست. این سناریوهای تأمین انرژی در قالب دو حالت، بارها بر روی یک فیدر و بارها بر روی فیدرهای مجزا محاسبه و با هم مقایسه می‌شوند. تابع هدف پیشنهادی برای هر کدام از سناریوها دارای دو بعد اقتصادی و قابلیت اطمینان است. بعد اقتصادی شامل هزینه ثابت و هزینه جاری تأمین انرژی و بعد قابلیت اطمینان شامل انرژی تأمین نشده مصرف‌کنندگان می‌باشد که پس از تبدیل تابع هدف به یک بعد با استفاده از برنامه‌ریزی خطی حل می‌شود. روش پیشنهادی در این مقاله با روش مشابه مقایسه شده که نتایج نشان از کارآمد بودن و کاربردی تر بودن روش فوق دارد.

کلید واژه: مدیریت انرژی، قابلیت اطمینان، مباحث اقتصادی، تولیدات پراکنده.

## نمادهای مورد استفاده

$U$ : ضریب سود سالیانه

$l$ : نشانگر (علامت) بار

$s$ : نشانگر (علامت) فصل

$t$ : نشانگر (علامت) زمان

$d_s$ : تعداد روزهای هر فصل

$HR$ : ضریب بازیابی حرارتی

$F_B$ : هزینه سوخت بویلر

$F_{FC}$ : هزینه سوخت پیل سوختی

$IC_B$ : هزینه اولیه بویلر

$IC_{FC}$ : هزینه اولیه پیل سوختی

$IC_{MG}$ : هزینه اولیه ایجاد ریزشبکه

$IC_{SS}$ : هزینه اولیه سیستم ذخیره‌ساز انرژی

$IB$ : ظرفیت نصب شده بویلر

$IFC$ : ظرفیت نصب شده پیل سوختی

$ISS$ : ظرفیت نصب شده سیستم ذخیره‌ساز انرژی

$L_e$ : بار الکتریکی

$L_h$ : بار حرارتی

$M_B$ : هزینه نگهداری بویلر

$M_{FC}$ : هزینه نگهداری پیل سوختی

## ۱- مقدمه

ریزشبکه‌ها، شبکه‌های کوچکی هستند که به منظور تأمین بار تعداد محدودی مصرف‌کننده ایجاد می‌شوند. این شبکه‌ها، منابع تولید را در کنار مصرف‌کنندگان قرار می‌دهند و در نتیجه هزینه خطوط انتقال و تلفات را کاهش داده و قابلیت اطمینان را بالا می‌برند. منابع تولید انرژی در ریزشبکه‌ها منابع تولید پراکنده و همچنین شبکه بالادست می‌باشند به طوری که معمولاً بخش بیشتر انرژی را منابع تولید پراکنده و مقداری از آن را (در صورت لزوم) شبکه بالادست تأمین می‌نماید. در طراحی و ساخت ریزشبکه‌ها مباحث اقتصادی و فنی باید مورد نظر قرار بگیرد. در طراحی ریزشبکه ابتدا باید چگونگی کاهش هزینه و سودآوری ایجاد ریزشبکه مورد بررسی قرار گیرد. در [۱] نویسنده با استفاده از برنامه‌ریزی خطی به کاهش هزینه‌ها برای ایجاد و بهره‌برداری از ریزشبکه پرداخته و نحوه تأمین انرژی بهینه توسط هر کدام از تولیدکننده‌ها (یونیت کامیت منت) را به دست آورده است. در [۲] نویسنده به چگونگی تأمین بار توسط چند تولیدکننده پرداخته و جواب بهینه را با ترکیبی از روش برنامه‌ریزی خطی و الگوریتم ژنتیک به دست آورده است. برنامه‌ریزی غیر خطی برای کاهش هزینه‌های ریزشبکه به همراه کاهش آلاینده‌ها در [۳] مورد استفاده قرار گرفته است. قابلیت اطمینان عامل دیگری است که در تصمیم‌گیری برای ایجاد ریزشبکه مؤثر است. در [۴] و [۵] نویسنده تأثیر ریزشبکه را در افزایش قابلیت اطمینان در شبکه بررسی می‌نماید و عنوان می‌دارد که با کاهش وقفه و زمان رفع آن، قابلیت اطمینان افزایش خواهد

این مقاله در تاریخ ۴ اسفند ماه ۱۳۹۰ دریافت و در تاریخ ۱۳ مهر ۱۳۹۱ بازنگری شد.

محمدحسن مرادی، استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، (email: mh\_moradi@yahoo.co.uk).

علی خندان، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، (email: alikhandoon@gmail.com).

بخش ۶ آورده شده است.

## ۲- پیش زمینه

### ۲-۱ ریزشبه

شکل ۱، یک ریزشبه را نشان می‌دهد. اجزای ریزشبه نشان داده شده عبارتند از: سیستم کنترل کننده، منابع تولید انرژی، ذخیره کننده‌های انرژی و بارهایی که ریزشبه تأمین می‌کند. اتصال ریزشبه به شبکه بالادست یا کارکرد ایزوله آن به همراه میزان و نوع بارهایی که ریزشبه تأمین می‌نماید از جمله مواردی است که در عملکرد ریزشبه تأثیرگذار می‌باشد. در ادامه اجزا و عوامل تأثیرگذار در ریزشبه توضیح داده می‌شود. سیستم کنترل: هر ریزشبه یک سیستم کنترلی دارد که به تنظیم میزان تولید و مصرف در ریزشبه می‌پردازد. نصب این سیستم هزینه‌هایی دارد که این هزینه‌ها در تابع هدف پیشنهادی اعمال شده‌اند.

بار: مهم‌ترین عامل در ریزشبه میزان و نوع بارهایی است که ریزشبه باید تأمین نماید. در این بررسی با در نظر گرفتن ۴ مصرف کننده به تأمین انرژی الکتریکی و حرارتی آنها با فرض معلوم بودن میزان مصرف پرداخته می‌شود.

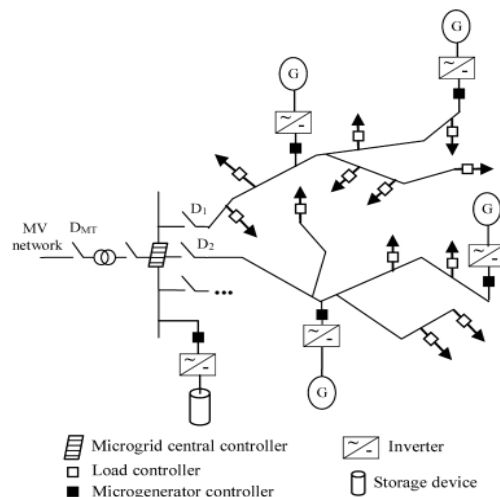
منابع تولید انرژی: منابع تولیدی در ریزشبه می‌تواند هر کدام از منابع تولید پراکنده مثل توربین بادی، سلول خورشیدی، پیل سوختی و میکروتوربین باشد. هر کدام از این تولیدکننده‌ها ویژگی‌هایی در تولید انرژی دارد که علاوه بر در نظر گرفتن این ویژگی‌ها و مباحث اقتصادی باید شرایط جغرافیایی برای نصب این منابع تولیدی را نیز در نظر گرفت. در این بررسی از پیل سوختی برای تأمین انرژی استفاده می‌شود. این انتخاب با توجه به نیاز تولید انرژی الکتریکی و حرارتی و همچنین عدم وابستگی به شرایط جغرافیایی صورت گرفته است.

ذخیره‌ساز: ذخیره‌ساز انرژی از دیگر عواملی است که در نحوه عملکرد ریزشبه تأثیرگذار است. ذخیره‌سازها با تأمین بار در زمان اوج مصرف بار در زمان بی‌باری نقش عمده‌ای در یکنواخت کردن میزان مصرف دارند. بسته به نوع تولیدکننده سیستم‌های مختلفی می‌توان برای ذخیره انرژی در نظر گرفت. در این ریزشبه که پیل سوختی تولیدکننده می‌باشد می‌توان از ذخیره‌سازهایی چون باتری و الکترولایزر استفاده نمود. در ادامه باتری به عنوان ذخیره‌ساز انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مدهای کاری ریزشبه: اتصال ریزشبه به شبکه بالادست در مقایسه با کارکرد ایزوله ریزشبه هم مانند استفاده از ذخیره‌ساز انرژی باعث یکنواخت شدن میزان مصرف در ریزشبه می‌شود به طوری که در اوج مصرف انرژی از شبکه خریده و در زمان بی‌باری می‌توان انرژی مازاد را به شبکه فروخت. البته این مسئله به شدت از قیمت خرید و فروش انرژی تأثیر می‌پذیرد.

### ۲-۲ مباحث اقتصادی

هزینه‌هایی که مصرف‌کنندگان برای ایجاد و استفاده از ریزشبه می‌پردازند به دو دسته تقسیم می‌شود: هزینه‌های ثابت و هزینه‌های جاری. هزینه‌های ثابت آن دسته از هزینه‌هایی است که در ابتدا برای ایجاد ریزشبه پرداخته می‌شود و شامل هزینه خرید و نصب منابع تولید پراکنده و هزینه ایجاد ریزشبه با تجهیزات جانبی آن می‌باشد. هزینه‌های تعمیر، نگهداری و سوخت، هزینه‌های جاری نامیده می‌شوند. برای یکسان سازی دوره‌های زمانی، تمام هزینه‌های جاری و هزینه‌های ثابت به صورت هزینه سالیانه تبدیل شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱: ریزشبه.

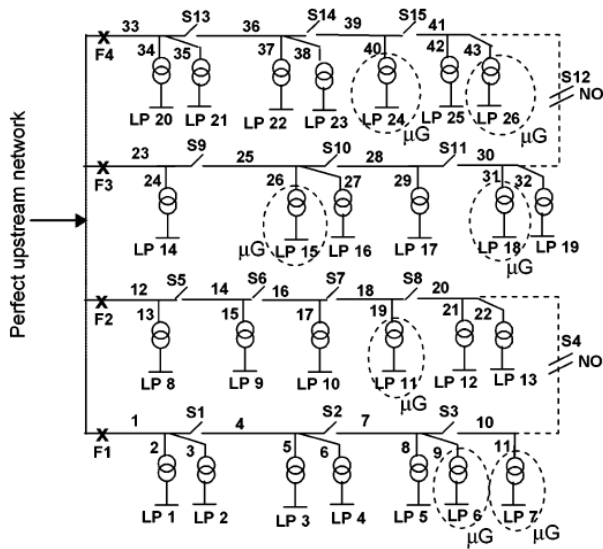
یافت. در [۶] نویسنده تأثیر ریزشبه را در افزایش قابلیت اطمینان و کیفیت توان بررسی می‌کند.

از جمله مباحث فنی که در ساخت ریزشبه مد نظر قرار می‌گیرد می‌توان به نحوه برقراری ارتباط با شبکه بالادست [۷]، نحوه حفاظت ریزشبه [۸]، نحوه کنترل تولید و مصرف در ریزشبه [۹] و [۱۰] و پیش‌بینی بار [۱۱] اشاره نمود.

در نظر گرفتن مباحث اقتصادی و قابلیت اطمینان به طور هم‌زمان در تابع هدف، باعث به دست آمدن نتایج واقعی‌تر می‌گردد. در این موارد، غالباً قابلیت اطمینان به صورت بار تأمین نشده بیان شده و با ضرایب مناسب به هزینه تبدیل شده و قابل جمع با هزینه‌ها در تابع هدف می‌گردد. در [۱۲]، قابلیت اطمینان به همراه هزینه نصب و ایجاد ریزشبه در تابع هدف دیده شده و ظرفیت ریزشبه و هزینه عملکرد ریزشبه برای تأمین بار بهینه گردیده است. در مقاله فوق رابطه ساده‌ای برای قابلیت اطمینان بیان شده و قابلیت اطمینان برای عملکرد ایزوله ریزشبه ۱۰۰٪ در نظر گرفته شده است، در صورتی که در حالت عملکرد ایزوله ریزشبه هم احتمال وقوع خرابی وجود دارد. در [۱۳]، با فرض موجود بودن ریزشبه و مشخص بودن ظرفیت مولدها در آن، هزینه جاری تأمین بار در ۲۴ ساعت به همراه قابلیت اطمینان و کاهش آلاینده‌ها در تابع هدف بهینه شده است.

در این مقاله تابع هدف دوعده‌ای شامل هزینه تولید انرژی و قابلیت اطمینان پیشنهاد شده است. هزینه تولید انرژی عبارت از سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه جاری تأمین بار است. سرمایه‌گذاری اولیه بر اساس طول عمر تجهیزات مختلف در نظر گرفته شده و با استفاده از ضریب تبدیل هزینه اولیه به سالیانه، به هزینه سالیانه تبدیل شده است. برای حل این تابع هدف دوعده‌ای ابتدا قابلیت اطمینان به صورت بارهای تأمین نشده (سالیانه) بیان شده و سپس با ضرب این بارهای تأمین نشده در ضریب جریمه به هزینه تبدیل گشته است و در نتیجه مسئله بهینه‌سازی دوعده‌ای به مسئله یک‌بعدی تبدیل شده است. سپس مناسب‌ترین جواب در مسئله یک‌بعدی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی به دست آمده است. روش پیشنهادی به یک شبکه ولتاژ پایین با ۴ بار مختلف، برای ۴ سناریوی متفاوت اعمال گردید که در این سناریوها شبکه اصلی، شبکه اصلی و منابع تولید پراکنده، ریزشبه به تنهایی و در آخرین سناریو ریزشبه به همراه شبکه اصلی تأمین کننده انرژی مورد نیاز بارها است.

در بخش ۲ پیش‌زمینه‌ای از ساختار ریزشبه و قابلیت اطمینان و در بخش ۳ فرمول‌نویسی مسئله بیان شده است. مطالعات موردی مسئله در بخش ۴، مباحثه نتایج شبیه‌سازی و مقایسه در بخش ۵ و نتیجه‌گیری در



شکل ۳: شبکه ولتاژ متوسط با ریزشکبه.

و در غیر این صورت سیستم کنترل ریزشکبه با قطع چند بار کیفیت توان لازم را برآورده می‌نماید. برای ایزوله کردن ریزشکبه از شبکه بالادست، سیستم‌های حفاظتی وارد عمل می‌شوند. این سیستم‌ها با درصد عملکرد خوبی شبکه بالادست را در صورت وقوع خرابی از ریزشکبه جدا می‌کنند اما احتمال عمل نکردن آنها هم وجود دارد که این احتمال در  $(P_M)$  با نشان داده شده است. اما هنگامی که خرابی در داخل شبکه ولتاژ پایین رخ دهد شرایط کاملاً متفاوت خواهد بود. در این حالت ریزشکبه کاملاً از کار افتاده و نیاز به راه‌اندازی مجدد دارد. در  $(P_L)$  این حالت به وسیله ترم دوم مدل شده و در این حالت انرژی تأمین نشده به صورت زیر به دست می‌آید

$$NDE_c = \left( \sum_{i \in f} \lambda_i r_i + \sum_{i \in \Phi} \lambda_i P_L T_a + \lambda_{up} P_M T_a \right) L_c \quad (4)$$

در رابطه بالا ترم دوم مربوط به وقوع خطا در فیدهای غیر از فیدر  $f$  در ریزشکبه است که منجر به خاموشی ریزشکبه می‌شود،  $T_a$  بیان کننده فیدهای ریزشکبه به جز فیدر  $f$  است و  $T_a$  زمان لازم برای راه‌اندازی مجدد ریزشکبه می‌باشد. راه‌اندازی مجدد ریزشکبه به عوامل متعددی چون سیستم کنترل مرکزی ریزشکبه و نحوه کنترل اینورترها بستگی دارد و این زمان به مکان بارها و منابع تولید بستگی ندارد. همچنین فرض می‌شود که در یک ریزشکبه پس از یک خرابی ریزشکبه خاموش خواهد شد، از این رو  $P_L = 1$  در نظر گرفته می‌شود.

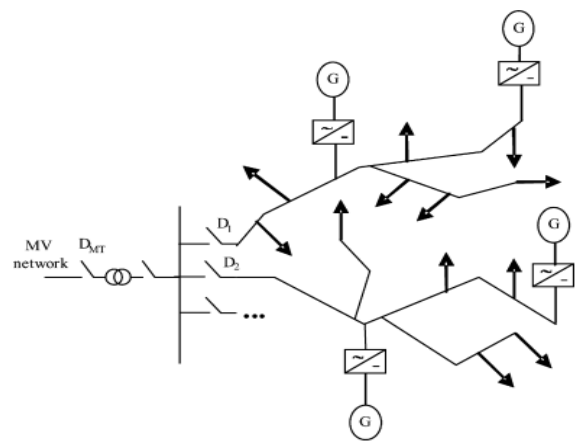
در صورتی که فرض شود با قطع ریزشکبه از شبکه بالادست تمام بار تأمین می‌شود،  $(P_M)$  میزان انرژی تأمین نشده یک ریزشکبه را نشان می‌دهد. اما با قطع ریزشکبه از شبکه بالادست و عدم وجود انرژی لازم برای تأمین تمام بارها کنترل کننده ریزشکبه با قطع برخی بارها از افت فرکانس و ولتاژ جلوگیری می‌کند. رابطه زیر انرژی تأمین نشده را برای بارهایی که کنترل کننده ریزشکبه آنها را قطع می‌کند، نشان می‌دهد

$$NDE_c = \left( \sum_{i \in f} \lambda_i r_i + \sum_{i \in \Phi} \lambda_i P_L T_a + U_{up} \right) L_c \quad (5)$$

در روابط بالا عنوان شد که قابلیت اطمینان شبکه بالادست در قابلیت اطمینان ریزشکبه تأثیرگذار است اما قابلیت اطمینان شبکه بالادست خود از نحوه قرارگیری ریزشکبه و شبکه‌های ولتاژ پایین دیگر در شبکه بالادست تأثیر می‌پذیرد.

### ۳-۳-۲ قابلیت اطمینان شبکه بالادست ولتاژ متوسط

شکل ۳ یک شبکه ولتاژ متوسط را نشان می‌دهد که از چندین شبکه



شکل ۲: شبکه ولتاژ پایین.

### ۳-۲ قابلیت اطمینان

انرژی تأمین نشده (NDE) در طول سال جریمه‌هایی را برای سیستم در پی خواهد داشت. این هزینه به سبب تعهدی است که سیستم تأمین انرژی به مصرف‌کنندگان دارد و مقدار این جرایم به نوع بار و مدت تأمین نشدن بار بستگی دارد. مدت قطع بار با قابلیت اطمینان سیستم مرتبط است و با افزایش قابلیت اطمینان، بارهای تأمین نشده کاهش یافته و در نتیجه جریمه مربوطه کاهش می‌یابد. در ادامه قابلیت اطمینان برای حالت‌های ۱، ۲ و ۳ مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در حالت ۱ قابلیت اطمینان برای یک شبکه ولتاژ پایین در صورت عدم وجود ریزشکبه بررسی می‌گردد. در حالت ۲ قابلیت اطمینان یک شبکه ولتاژ پایین که به صورت ریزشکبه می‌باشد بررسی شده و در حالت ۳ قابلیت اطمینان شبکه بالادست ولتاژ متوسط با فرض وجود یا عدم وجود ریزشکبه بررسی خواهد شد.

### ۳-۲-۱ قابلیت اطمینان شبکه ولتاژ پایین

قابلیت اطمینان شبکه ولتاژ پایین بر حسب قابلیت اطمینان شبکه بالادست و شبکه ولتاژ پایین تأمین کننده انرژی قابل بیان است. رابطه احتمال خرابی  $(\lambda_c)$ ، عدم دسترسی  $(U_c)$  و انرژی تأمین نشده (NDE) برای مصرف کننده  $C$  در یک شبکه ولتاژ پایین شکل ۲ به صورت (۱) تا (۳) قابل بیان است [۴] و [۵]

$$\lambda_c = \sum_{i \in f} \lambda_i + \lambda_{up} \quad (1)$$

$$U_c = \sum_{i \in f} \lambda_i r_i + U_{up} \quad (2)$$

$$NDE_c = \left( \sum_{i \in f} \lambda_i r_i + U_{up} \right) L_c \quad (3)$$

که در آن  $\lambda_i$  احتمال خرابی در بخش  $i$ ام از فیدر  $f$  و  $r_i$  زمان لازم برای رفع این خرابی می‌باشد.  $\lambda_{up}$  و  $U_{up}$  احتمال خرابی و عدم دسترسی برای شبکه بالادست را نشان می‌دهد که بر اساس احتمال وقوع خطا بر کیلومتر است و به عوامل مختلفی از جمله شرایط محیطی و شرایط آب و هوایی بستگی دارد.

### ۳-۲-۲ قابلیت اطمینان ریزشکبه

اگر به جای شبکه ولتاژ پایین شکل ۲، ریزشکبه شکل ۱ جایگزین شود روابط بالا تغییر خواهند کرد. ریزشکبه می‌تواند در صورت وقوع خرابی در شبکه بالادست به صورت ایزوله کار کرده و بارها را تأمین نماید. این تأمین بار در صورتی که ظرفیت منابع تولید کافی باشد، به طور کامل انجام شده

### ۳- فرموله کردن مسئله

در این بهینه‌سازی، هدف کم کردن هزینه انرژی مصرفی مشتریان و افزایش قابلیت اطمینان می‌باشد. تابع هدف پیشنهادی و محدودیت‌ها به صورت (۸) بیان می‌گردد که کاهش هزینه سرمایه‌گذاری و جاری به همراه کاهش انرژی تأمین نشده (افزایش قابلیت اطمینان) هدف هستند

$$\begin{aligned} \min F(x) &= \{C(x), R(x)\} \\ \text{s.t } G_i(x) &= G_{ie}(x) \\ G_{il}(x) &\leq G_i(x) \leq G_{iu}(x) \end{aligned} \quad (8)$$

دو بعد این تابع هدف هزینه تأمین انرژی  $(C(x))$  و قابلیت اطمینان  $(R(x))$  می‌باشد. هزینه تأمین انرژی از جنس پول و قابلیت اطمینان از جنس توان (kWh) است. در این رابطه در واقع انرژی تأمین نشده در طول سال برای مصرف کنندگان که خود تابعی از قابلیت اطمینان می‌باشد به عنوان قابلیت اطمینان در نظر گرفته می‌شود. رابطه قابلیت اطمینان با انرژی تأمین نشده را در (۲۱) و (۲۲) مشاهده خواهید نمود. در این مقاله با استفاده از ضریب  $\delta$  قابلیت اطمینان به هزینه تبدیل شده و به این ترتیب تابع هدف یک‌بعدی می‌شود که می‌توان به بهینه‌سازی آن پرداخت. ضریب  $\delta$  در واقع جریمه‌ای است که عدم تأمین یک کیلووات ساعت بار در پی دارد

$$F(x) = C(x) + \delta \times R(x) \quad (9)$$

در (۵) بردار  $X$  شامل متغیرهایی است که با تغییر در آنها هزینه نهایی تغییر خواهد کرد. با حل تابع هدف مقدار بهینه  $X$  که شامل توان تولید پیل سوختی، بویلر، باتری و انرژی تبادل یافته با شبکه در هر ساعت شبانه روز برای ۴ فصل و برای هر کدام از مصرف کنندگان است، مشخص می‌شود.

### ۳-۱ هزینه‌های تأمین انرژی

هزینه تأمین انرژی مصرف کنندگان شامل دو بخش هزینه‌های ثابت و هزینه‌های جاری می‌شود. در رابطه زیر  $C_1(x)$  هزینه‌های ثابت (اولیه) و  $C_2(x)$  هزینه‌های جاری تأمین انرژی است که هر یک جداگانه توضیح داده می‌شود

$$C(x) = C_1(x) + C_2(x) \quad (10)$$

### ۳-۱-۱ هزینه‌های ثابت

هزینه‌های ثابت شامل سرمایه‌گذاری اولیه خرید و نصب منابع تولید پراکنده و سرمایه‌گذاری برای ایجاد ریزشبه می‌باشد. سرمایه‌گذاری ایجاد ریزشبه شامل سرمایه لازم برای خرید و نصب سیستم کنترل، سیستم‌های حفاظتی و خطوط ارتباطی شبکه است که در رابطه زیر به وسیله  $IC_{MG}$  بیان شده است

$$\begin{aligned} C_1(x) &= \alpha \cdot IC_{FC} \cdot IFC + \beta \cdot IC_B \cdot IB + \gamma \cdot IC_{SS} \cdot ISS + IC_{MG} \\ \alpha, \beta, \gamma &= \frac{u(1+u)^{n_{\alpha, \beta, \gamma}}}{(1+u)^{n_{\alpha, \beta, \gamma}} - 1} \end{aligned} \quad (11)$$

سرمایه‌گذاری اولیه با ضرب شدن در ضریب تبدیل سرمایه‌گذاری اولیه به سالیانه به هزینه سالیانه تبدیل می‌شود. در (۱۱)  $IC_{MG}$  هزینه اولیه ایجاد ریزشبه می‌باشد که به هزینه سالیانه تبدیل شده است.

### ۳-۱-۲ هزینه‌های جاری

هزینه‌های جاری تأمین انرژی شامل هزینه سوخت مصرفی در منابع تولید پراکنده، هزینه خرید و فروش انرژی و هزینه تعمیر و نگهداری

ولتاژ پایین و ریزشبه تشکیل شده است. اگر یک خطا در شاخه ۱۴ اتفاق بیفتد، کلید حفاظتی F2 عمل می‌کند و مراحل زیر اتفاق می‌افتد: (۱) کلید S5 و S6 باز شده تا خطا از بقیه شبکه جدا شود، (۲) کلید S4 بسته شده تا بارهای ۱۰ تا ۱۳ با فیدر جایگزین تأمین شوند و (۳) کلید F2 بسته می‌شود تا بار ۸ مجدداً تأمین شود.

با اتصال کلید S4 ساختار شبکه تغییر کرده و بارهای ۱۰ تا ۱۳ و بار ۸ به ترتیب از طریق فیدر شماره ۱ و ۲ تأمین می‌شوند. اتصال کلید S4 و تجدید ساختار شبکه همیشه امکان‌پذیر نبوده و محدودیت‌های فنی چون پروفیل ولتاژ و ظرفیت شبکه باید رعایت شود. وجود ریزشبه در فیدر دارای خطا روند تجدید ساختار شبکه را به دلیل تأمین بخشی از بار آسان می‌کند. بالاخص اگر نسبت تولید به مصرف داخلی (GLR) ریزشبه بیشتر از یک باشد که در این صورت بار داخلی را تأمین کرده و می‌تواند بخشی از توان مورد نیاز مصرف کنندگان خارجی را نیز تأمین نماید.

مکان ریزشبه در امکان تجدید ساختار شبکه بالادست مؤثر است. برای مثال در شکل ۳ با عمل کردن کنترل کننده MV و جداسازی بخش دارای خطا، ۳ موقعیت برای ریزشبه قابل تصور است:

(۱) در بخشی از فیدر باشد که با ساختار اولیه تأمین می‌شود (LP-۸).

(۲) در بخش دارای خطا باشد که از شبکه ایزوله می‌شود (LP-۹).

(۳) در بخشی از فیدر باشد که با تجدید ساختار به وسیله شبکه تأمین می‌گردد (LP-۱۰, LP-۱۳) که از طریق کلید S4 و توسط فیدر F1 تأمین می‌شوند).

همان طور که مشاهده می‌شود اگر ریزشبه در موقعیت سوم قرار داشته باشد، با تأمین بخشی از بار مصرف کنندگان تجدید ساختار شبکه را آسان می‌کند اما در حالت ۱ و ۲ ریزشبه در تجدید ساختار شبکه تأثیر چندانی ندارد.

تجدید ساختار شبکه باعث می‌شود زمان وقفه برای بارها در موقعیت سوم (LP-۱۰, LP-۱۳) کاهش یابد که برابر با زمان لازم برای ایزوله کردن خطا و ایجاد ساختار جدید خواهد بود. همچنین زمان وقفه برای بارها در موقعیت اول (LP-۸) برابر با زمان لازم برای ایزوله کردن خطا می‌باشد و برای بارها در موقعیت دوم (LP-۹) زمان وقفه برابر با زمان رفع خطا خواهد بود.

در نتیجه کل بار تأمین نشده کاهش خواهد یافت، هرچند احتمال وقوع خطا تغییری نخواهد کرد. در نهایت احتمال وقوع خطا و انرژی تأمین نشده در شبکه بالادست به صورت (۶) و (۷) قابل بیان است

$$\lambda_{MV} = \sum_{i \in \Phi} \lambda_i \quad (6)$$

که  $\Phi$  مجموعه شاخه‌هایی است که بار را به شبکه بالادست متصل می‌کند و  $\lambda_j$  احتمال خطا در شاخه  $j$  فیدر می‌باشد.

برای به دست آوردن انرژی تأمین نشده شبکه بالادست از رابطه زیر می‌توان استفاده کرد

$$U_{MV} = \sum_{i \in \Theta} \lambda_j t_{repair} + \sum_{i \in \Omega} \lambda_j t_{isolate} + \sum_{i \in \Lambda} \lambda_j t_{reconfig} \quad (7)$$

$\Omega$ ،  $\Theta$  و  $\Lambda$  به ترتیب باس‌های موجود در موقعیت‌های ۱، ۲ و ۳ می‌باشند.  $\Omega$  بخشی از شبکه است که با جدا کردن خطا از بقیه شبکه می‌توان بار آن را تأمین نمود.  $\Theta$  بخشی از شبکه است که باید پس از وقوع خطا بازبایی شود و  $\Lambda$  بخشی از شبکه است که با تجدید ساختار شبکه بالادست بار آن از فیدر دیگری تأمین می‌شود. قابل ذکر است که با تجدید ساختار، بارهایی که با فیدر جایگزین تأمین می‌شوند از مجموعه  $\Theta$  جدا شده و به مجموعه  $\Lambda$  اضافه خواهند شد.

جدول ۱: جدول خلاصه سناریوهای مطرح شده.

ریزشبکه	شبکه ولتاژ پایین		شبکه بالادست	سناریوی
	منابع تولید	منابع تولید پراکنده		
✓	✓	✓	✓	۱ سناریوی
✓	✓	✓	✓	۲ سناریوی
✓	✓	✓	✓	۳ سناریوی
✓	✓	✓	✓	۴ سناریوی

$$NDE(t, s, l) = \sum_{i \in f} \lambda(t, s, l) r + \sum_{i \in \gamma} \lambda(t, s, l) P_L T_a + \lambda_{up}(t, s) P_M T_a L(t, s, l) \quad (21)$$

رابطه بالا انرژی تأمین نشده برای هر یک از مصرف کنندگان (NDE) را نشان می‌دهد. برای به دست آوردن  $R(x)$  از رابطه بالا انرژی تأمین نشده محاسبه شده در رابطه زیر قرار می‌گیرد

$$R(x) = \sum_l \sum_s \sum_t NDE(t, s, l) \quad (22)$$

#### ۴- مطالعه موردی

در این بخش ریزشبکه شکل ۱ در نظر گرفته شده و برای تأمین بار مصرف کنندگان آن در دو حالت عدم تشکیل ریزشبکه و تشکیل ریزشبکه ۴ سناریو بررسی می‌گردد. در صورت عدم تشکیل ریزشبکه سناریوهای ۱ و ۲ را خواهیم داشت که در سناریوی ۱ بار مصرف کنندگان از شبکه اصلی تأمین می‌شود و در سناریوی ۲ هر مصرف کننده، انرژی مورد نیاز را از شبکه می‌خرد و در عین حال می‌تواند منابع تولید پراکنده مورد نیاز را نصب نماید. در سناریوهای ۳ و ۴ ریزشبکه تشکیل شده، در سناریوی ۳ منابع تولید پراکنده تأمین کننده انرژی می‌باشند و در سناریوی ۴ منابع تولید پراکنده و در صورت نیاز شبکه بالادست تأمین کننده انرژی مورد نیاز هستند. جدول ۱ خلاصه این سناریوها را نشان می‌دهد. هزینه‌های تأمین انرژی و قابلیت اطمینان (در قالب بار تأمین نشده) در سناریوهای مختلف با هم مقایسه شده و بهترین راهکار برای تأمین انرژی معرفی می‌گردد. علاوه بر این که برای تأمین بارهای مورد نیاز ۴ سناریو در نظر گرفته شده است، برای به دست آوردن قابلیت اطمینان این ریزشبکه دو حالت (مدل) متصور می‌باشد:

(۱) هر چهار بار مورد بحث به یک فیدر متصل باشند.

(۲) هر کدام از بارهای مورد بحث به یک فیدر متصل باشند.

در حالت ۱ اگر خطایی در ریزشبکه اتفاق بیفتد، زمان لازم برای مدار قرار دادن بارها برابر با زمان لازم برای بر طرف کردن خطاست (که در این مقاله ۴ ساعت فرض شده است) اما در حالت ۲ زمان لازم برای برق‌دار کردن فیدرهای دیگر برابر با زمان راه‌اندازی ریزشبکه است (در این مقاله ۰.۲۵ ساعت در نظر گرفته شده است). وقوع عیب در این حالت سبب می‌شود تا ریزشبکه از کار افتاده و خاموش شود. با از کار افتادن ریزشبکه فیدری که عیب در آن رخ داده از ریزشبکه جدا شده و ریزشبکه مجدداً کار خود را ادامه خواهد داد. با توجه به (۲۱) میزان قابلیت اطمینان در این دو حالت با یکدیگر متفاوت خواهد بود.

در جدول ۲ هزینه‌های لازم برای ایجاد ریزشبکه به تفکیک اجزای آن همچون کنترل محلی، دستگاه جبران‌ساز، مدیر انرژی، خط انتقال و خطوط مخابراتی به همراه طول آنها آمده است. این هزینه را به هزینه

تجهیزات می‌باشد و این هزینه‌ها در رابطه زیر نشان داده شده است. در این رابطه ابتدا هزینه سوخت و تعمیر و نگهداری تولیدکنندگان و سپس هزینه خرید و فروش انرژی آورده شده است

$$C_r(x) = \sum_{l=1}^4 \sum_{s=1}^4 d_s \sum_{t=1}^{24} \{ (F_{FC} + M_{FC}) P_{FC}(t, s, l) + (F_B + M_B) P_B(t, s, l) + M_{SS} P_{SS}(t, s, l) + PR_{buy}(t, s, l) P_{buy}(t, s, l) - PR_{sell}(t, s, l) P_{sell}(t, s, l) \} \quad (12)$$

$$+ 12 PR_{base} P_{buy}^{max}$$

$$P_{buy}^{max} = \max \left\{ \sum_{l=1}^4 P_{buy}(t, s, l) \mid t = 1, \dots, 24, s = 1, \dots, 4 \right\}$$

#### ۳-۱-۳ قیود

قیود شامل تعادل بین انرژی الکتریکی و انرژی حرارتی تولیدی توسط مولدها و انرژی الکتریکی خریداری شده از شبکه بالادست با انرژی الکتریکی و حرارتی مورد نیاز مصرف کنندگان و انرژی فروخته شده به شبکه بالادست می‌باشد که در (۱۳) و (۱۴) بیان شده است. همچنین محدودیت دشارژ باتری در (۱۵) آمده است

$$\sum_{l=1}^4 L_e(t, s, l) = \sum_{l=1}^4 \{ P_{FC}(t, s, l) + PD_{SS}(t, s, l) - PC_{SS}(t, s, l) + P_{buy}(t, s, l) - P_{sell}(t, s, l) \} \quad (13)$$

$$\sum_{l=1}^4 L_h(t, s, l) \leq \sum_{l=1}^4 \{ HR.P_{FC}(t, s, l) + P_B(t, s, l) \} \quad (14)$$

$$\sum_{l=1}^4 \{ PD_{SS}(t, s, l) \} \leq \sum_{l=1}^4 \{ PC_{SS}(t, s, l) \} \quad (15)$$

رابطه (۱۶) تا (۱۹) به ترتیب محدودیت حداقل و حداکثر توان تولیدی توسط پیل سوختی، بویلر و باتری را بیان می‌کند و (۲۰) شرط مثبت بودن توان‌ها را برآورده می‌کند

$$0 \leq P_{FC}(t, s, l) \leq IFC(l) \quad (16)$$

$$0 \leq P_B(t, s, l) \leq IB(l) \quad (17)$$

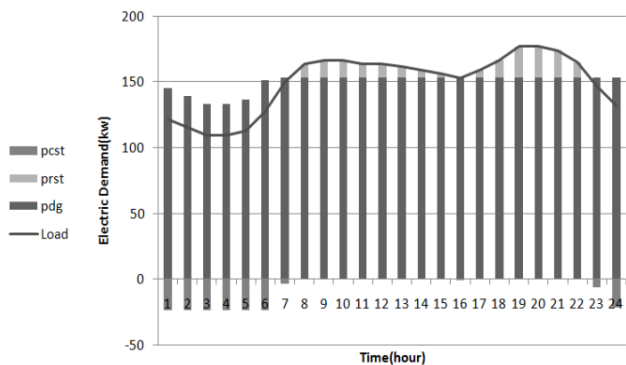
$$0 \leq PD_{SS}(t, s, l) \leq Iss(l) \quad (18)$$

$$0 \leq PC_{SS}(t, s, l) \leq Iss(l) \quad (19)$$

$$0 \leq P_{buy}(t, s, l), P_{sell}(t, s, l), IFC(l), IB(l), Iss(l) \quad (20)$$

#### ۳-۲ قابلیت اطمینان

رابطه (۴) انرژی تأمین نشده برای یک بار در ریزشبکه را بیان می‌کند که در آن  $\lambda$  برای هر بار در تمام فصول و در تمام ساعات شبانه‌روز ثابت است اما در عمل  $\lambda$  تابعی از نوع بار، فصل و ساعات شبانه‌روز می‌باشد. برای مثال با افزایش میزان مصرف در فصل تابستان احتمال تأمین نشدن انرژی از فصول دیگر بیشتر خواهد بود. همچنین احتمال وقفه در ساعات پرمصرف شبانه‌روز بیشتر از ساعات کم‌مصرف خواهد بود. برخی از محققین قابلیت اطمینان را به صورت روزانه در نظر گرفته‌اند [۱۴] اما در این مقاله قابلیت اطمینان به صورت فصلی در نظر گرفته می‌شود. از این رو (۴) را به صورت (۲۱) بازنویسی می‌نماییم. در این رابطه  $\lambda$  تابعی از نوع بار، فصل و ساعات تأمین انرژی می‌باشد. در این رابطه فرض شده است که با قطع ریزشبکه از شبکه بالادست، ریزشبکه می‌تواند تمام بار را تأمین نماید. در (۶) احتمال وقوع خرابی در شبکه بالادست نشان داده شده است



شکل ۳: نحوه تأمین انرژی الکتریکی هتل در فصل تابستان.

جدول ۳: منابع تولید پراکنده.

بویلر	ذخیره‌کننده انرژی	پیل سوختی	
۰/۰۸	۰/۰۱۳	۰/۱۳	هزینه عملکرد (\$/kW)
۲۶۰	۲۶۰۰	۲۶۰۰	سرمایه‌گذاری اولیه (\$/kW)
۳۰	۱۵	۶	طول عمر (سال)

جدول ۴: قرارداد خرید انرژی (رنج ثابت).

نوع	هزینه اشتراک (kW)	هزینه انرژی (kWh)	دیگر فصل‌ها
بار تجاری (دلار)	۲۰/۴۷۵	۰/۱۵۸۲	۰/۱۴۳۷۸
توان ولتاژ بالا (دلار)	۱۴/۶۹	۰/۱۴۵۸۶	۰/۱۳۲۶

### ۱-۵ مقایسه با روش مشابه

در [۱۲] روشی مشابه روش این مقاله با کمی اختلاف مورد استفاده قرار گرفته است. هر دو روش از ۴ سناریو برای تأمین انرژی استفاده کرده‌اند و هر دو روش هزینه تأمین انرژی و قابلیت اطمینان را در تابع هدف منظور نموده‌اند.

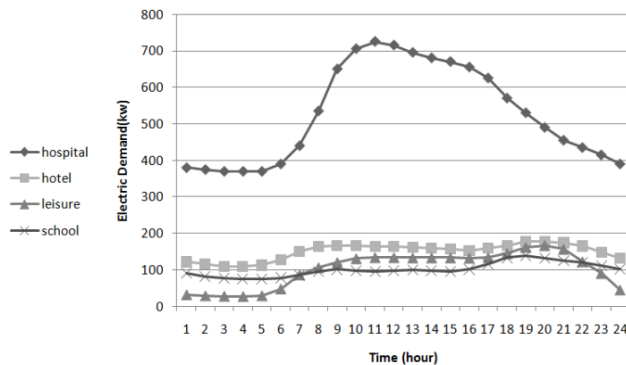
#### ۱-۱-۵ تفاوت دو روش

محاسبه قابلیت اطمینان: در [۱۲] قابلیت اطمینان برای ریزشکبه ایزوله ۱۰۰٪ منظور شده است، در صورتی که در عمل چنین نمی‌باشد و احتمال وقوع خرابی و بروز وقفه در ریزشکبه هم وجود دارد. در این مقاله قابلیت اطمینان در ریزشکبه به صورت تابعی از احتمال وقفه در آن محاسبه شده است که به واقعیت نزدیک‌تر است و هزینه بار تأمین نشده در این حالت (ریزشکبه ایزوله) در تابع هدف منظور شده است. روش مورد استفاده، روش بهبودیافته [۴] برای محاسبه قابلیت اطمینان است. در این روش احتمال بروز خطا با توجه به میزان بار و شرایط آب و هوایی متغیر در نظر گرفته شده است. علت این کار افزایش احتمال بروز خطا با افزایش میزان بار مصرفی می‌باشد. همچنین در این مقاله به منظور ساده‌سازی فرض شده است که در صورت وقوع وقفه در شبکه بالادست، بارها در ریزشکبه ایزوله به‌طور کامل تأمین می‌شوند، در صورتی که می‌توان برای افزایش دقت محاسبات از این فرض صرف نظر کرد.

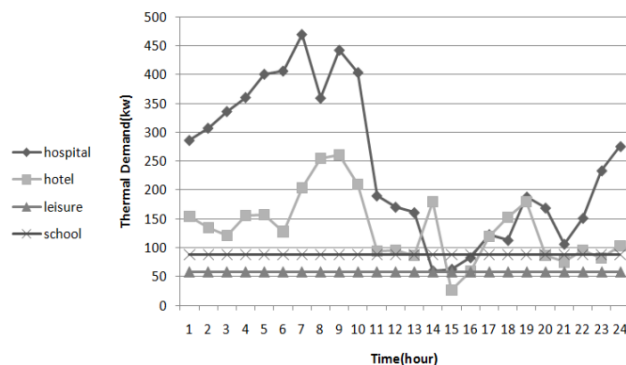
تبادل انرژی با شبکه بالادست: در [۱۲] امکان فروش انرژی تولیدشده توسط منابع تولید پراکنده در صورت مقرون به صرفه بودن به شبکه بالادست در نظر گرفته نشده در حالی که در این تحقیق امکان فروش انرژی به شبکه بالادست در نظر گرفته شده است.

#### ۲-۱-۵ مقایسه نتایج دو روش

هزینه تأمین انرژی: مقایسه شکل ۷ این مقاله و شکل ۸ در [۱۲]



شکل ۴: نمودار انرژی الکتریکی مصرفی ۴ مصرف‌کننده در فصل تابستان.



شکل ۵: نمودار انرژی حرارتی مصرفی ۴ مصرف‌کننده در فصل تابستان.

جدول ۲: هزینه ایجاد ریزشکبه.

تجهیزات	مدیر انرژی	دستگاه جداسازی	کنترل محلی	خط انتقال	خط مخابراتی
هزینه (دلار)	۴۵۵۰۰	۱۹۵۰۰۰	۳۹۰۰	۳۹۰۰۰	۳۹۰۰۰
طول عمر (سال)	۶	۲۰	۶	۳۰	۲۰

سالیانه تبدیل کرده و در (۱۱) قرار خواهیم داد. در جدول ۳ هزینه‌های ثابت و جاری و همچنین طول عمر پیل سوختی سیستم ذخیره‌کننده انرژی و بویلر را مشاهده می‌نمایید. جدول ۴ و ۵ نیز قراردادهای موجود برای خرید انرژی از شبکه را نشان می‌دهد. همچنین در شکل‌های ۴ و ۵ میزان انرژی الکتریکی و حرارتی مورد نیاز ۴ مصرف‌کننده در نظر گرفته شده را در فصل تابستان مشاهده می‌نمایید.

پس از حل تابع هدف نحوه تأمین انرژی الکتریکی و حرارتی هر کدام از بارها در هر چهار فصل در طول شبانه‌روز نیز تعیین می‌شود. شکل ۶ نحوه تأمین انرژی الکتریکی هتل را در فصل تابستان در طول شبانه‌روز نشان می‌دهد. در نهایت در جدول ۶ و ۷ ظرفیت هر منبع تولیدی، هزینه قابلیت اطمینان و مجموع هزینه‌های تأمین انرژی را مشاهده می‌نمایید.

### ۵- بحث

در این مقاله ۴ سناریوی تأمین انرژی از نظر اقتصادی و قابلیت اطمینان با هم مقایسه شده‌اند. در تابع هدف پیشنهادی برای مقایسه سناریوها، هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه جاری و قابلیت اطمینان به‌عنوان دو بعد مطرح شده و سپس با تبدیل آن به تابعی یک‌بعدی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی بهینه می‌شود. تبدیل دو بعد تابع تبدیل به یک بعد سبب می‌شود تصمیم‌گیری در مورد سناریوها ساده‌تر باشد. در ادامه ابتدا نتایج به‌دست آمده از روش پیشنهادی با روش مشابه در [۱۲] مقایسه شده و سپس نتایج به‌دست آمده برای سناریوهای مختلف بحث می‌گردد.

جدول ۵: قرارداد خرید انرژی (بر حسب زمان مصرف).

نوع	هزینه اشتراک (kW)	هزینه انرژی (kWh)	
		تابستان	دیگر فصلها
بار تجاری (دلار)	۲۰,۴۷۵	۰,۱۸۶۶	۰,۱۸۰۴
توان ولتاژ بالا (دلار)	۱۴,۶۹	۰,۱۷۸۸	۰,۱۶۸۶

جدول ۶: نتایج شبیه‌سازی برای ۴ سناریو در مدل ۱.

مدل ۱	سناریوی ۱	سناریوی ۲	سناریوی ۳	سناریوی ۴
ظرفیت پیل سوختی (kW)	۰	۱۰,۴۴۵	۸۸۶,۱۹۵	۷۳۷,۷۳۷
ظرفیت ذخیره‌ساز (kW)	۰	۰	۳۲۱,۸۰۵	۰
ظرفیت بویلر (kW)	۲۴۱۵,۵۶۴	۱۸۹۳,۳۱۴	۱۹۸۱,۳۲۴	۲۰۴۶,۶۹۴
انرژی خریداری شده (MWh)	۸۴,۴۱۲	۶,۸۴۲	۰	۱۷,۱۴۰
انرژی فروخته شده (MWh)	۰	۲۱,۴۲۶	۰	۴,۱۵۲
هزینه قابلیت اطمینان ( $\$ \times 10^5$ )	۵,۰۰۷	۵,۰۰۷	۴,۰۰۵	۴,۱۰۵۵
مجموع هزینه ( $\$ \times 10^5$ )	۳۱,۰۸۷	۲۸,۰۳۳	۲۷,۹۵۵	۲۷,۲

جدول ۷: نتایج شبیه‌سازی برای ۴ سناریو در مدل ۲.

مدل ۲	سناریوی ۱	سناریوی ۲	سناریوی ۳	سناریوی ۴
ظرفیت پیل سوختی (kW)	۰	۱۰,۴۴۵	۸۸۶,۱۹۵	۷۳۷,۷۳۷
ظرفیت ذخیره‌ساز (kW)	۰	۰	۳۲۱,۸۰۵	۰
ظرفیت بویلر (kW)	۲۴۱۵,۵۶۴	۱۸۹۳,۳۱۴	۱۹۸۱,۳۲۴	۲۰۴۶,۶۹۴
انرژی خریداری شده (MWh)	۸۴,۴۱۲	۶,۸۴۲	۰	۱۷,۵۹۵
انرژی فروخته شده (MWh)	۰	۲۱,۴۲۶	۰	۴,۰۰۶
هزینه قابلیت اطمینان ( $\$ \times 10^5$ )	۵,۰۰۷	۵,۰۰۷	۱,۱۸۸۲	۱,۱۹۴۷
مجموع هزینه ( $\$ \times 10^5$ )	۳۱,۰۸۷	۲۸,۰۳۳	۲۵,۱۴	۲۴,۲۹

ریزش شبکه ایزوله صفر خواهد بود، در صورتی که در این مقاله احتمال وقوع وقفه در ریزش شبکه منظور شده و جریمه انرژی تأمین نشده در تابع هدف آمده است (شکل ۷).

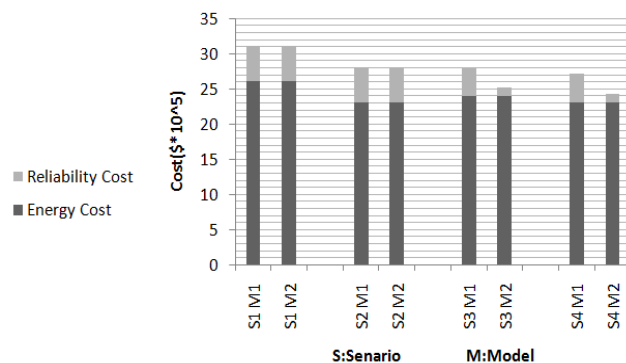
## ۲-۵ مقایسه نتایج سناریوهای مختلف در روش پیشنهادی

هزینه تأمین انرژی: شکل ۷ هزینه تأمین انرژی برای سناریوهای ۴ گانه را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار به ترتیب سناریوهای ۲، ۳، ۴ و ۱ کمترین هزینه تأمین انرژی را دارا می‌باشند که نشان می‌دهد نصب منابع تولید پراکنده هزینه تأمین انرژی را کاهش خواهد داد. همچنین با شبیه‌سازی‌های انجام گرفته نتایج نشان داد که امکان فروش انرژی به شبکه بالادست و قیمت فروش انرژی در سناریوهایی که از منابع تولید پراکنده استفاده می‌شود، تأثیر به‌سزایی بر نتایج دارد.

قابلیت اطمینان: همان طور که در شکل ۷ دیده می‌شود، جریمه پرداخت شده برای انرژی تأمین نشده به ترتیب در سناریوهای ۴، ۳، ۲ و ۱ بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر سناریوی ۴ بیشترین قابلیت اطمینان و سناریوی ۱ کمترین قابلیت اطمینان را دارد. در نتیجه ایجاد ریزش شبکه سبب افزایش قابلیت اطمینان خواهد شد که این امر در مدل ۲ بیشتر به چشم می‌آید.

## ۶- نتیجه گیری

هدف این مقاله بررسی تأثیر ایجاد ریزش شبکه در تأمین انرژی مصرف‌کنندگان است. برای این کار ۴ سناریوی تأمین انرژی بررسی شد.



شکل ۷: نمودار هزینه تأمین انرژی و قابلیت اطمینان ۴ سناریو در دو مدل.

نشان می‌دهد که سناریوی ۱ بیشترین هزینه تأمین انرژی و سناریوی ۴ کمترین هزینه تأمین انرژی را برای هر دو روش دارد اما اختلاف نتایج دو مقاله در سناریوهای ۲ و ۳ می‌باشد. در [۱۲] هزینه تأمین انرژی در سناریوی ۲ بیشتر است که علت آن را می‌توان ناشی از عدم امکان فروش انرژی به شبکه بالادست دانست اما در این مقاله با در نظر گرفتن امکان فروش انرژی به شبکه بالادست، هزینه تأمین انرژی در سناریوی ۲ کمتر از سناریوی ۳ می‌باشد. وجود دو روش برای تأمین انرژی در سناریوی ۲ (شبکه بالادست و منابع تولید پراکنده) نسبت به سناریوی ۳ که تنها از منابع تولید پراکنده قادر به تأمین انرژی می‌باشد، نتایج این مقاله مبنی بر کم‌تر بودن هزینه تأمین انرژی در سناریوی ۲ را تأیید می‌کند.

قابلیت اطمینان: همان گونه که بیان شد، [۱۲] قابلیت اطمینان را برای ریزش شبکه ۱۰۰٪ منظور کرده است که در نتیجه هزینه بار تأمین نشده در

- [8] T. Loix, T. Wijnhoven, and G. Deconinck, "Protection of microgrids with a high penetration of inverter-coupled energy sources," in *Proc. IEEE PES/CIGRE Joint Symp. Integration of Wide-Scale Renewable Resources Into the Power Delivery System*, 6 pp., Canada, 29-31 Jul. 2009.
- [9] E. Serban and H. Serban, "A control strategy for a distributed power generation microgrid application with voltage and current controlled source converter," *IEEE Trans on Power Electronics*, vol. 25, no. 12, pp. 2981-2992, Dec. 2010.
- [10] R. Majumder, A. Ghosh, G. Ledwich, and F. Zare, "Power management and power flow control with back-to-back converters in a utility connected microgrid," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 25, no. 2, pp. 821-834, May 2010.
- [11] N. Amjadi, F. Keynia, and H. Zareipour, "Short-term load forecast of microgrids by a new bilevel prediction strategy," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 286-294, Dec. 2010.
- [12] Y. Zoka, A. Sugimoto, N. Yorino, K. Kawahara, and J. Kubokawa, "An economic evaluation for an autonomous independent network of distributed energy resources," *Electric Power Systems Research*, vol. 77, no. 7, pp. 831-838, May 2007.
- [13] M. Meiqin, J. Meihong, D. Wei, and L. Chang, "Multi-objective economic dispatch model for a microgrid considering reliability," in *Proc. 2nd IEEE Int. Symp. on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, pp. 993-998, 16-18 Jun. 2010.
- [14] P. Wang and R. Billinton, "Reliability cost/worth assessment of distribution systems incorporating time-varying weather conditions and restoration resources," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 17, no. 1, pp. 260-265, Jan. 2002.

**محمد حسن مرادی** در سال ۱۳۶۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی شریف و در سال ۱۳۷۲ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه تربیت مدرس دریافت نمود. از سال ۱۳۷۲ نامبرده در دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا در همدان مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشکده می باشد. دکتر مرادی در سال ۱۳۷۷ به دوره دکتری مهندسی برق در دانشگاه استراسکالاید در گلاسکو اسکاتلند وارد گردید و در سال ۱۳۸۱ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق از دانشگاه مذکور گردید. زمینه های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند مدل سازی، شبیه سازی و کنترل نیروگاه های سیکل ترکیبی، ریز شبکه و پروسه های صنعتی، انرژی های نو، کیفیت توان و اتوماسیون می باشد.

**علی خندانی** در سال ۱۳۸۸ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه علم و صنعت ایران و در سال ۱۳۹۱ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه بوعلی همدان دریافت نمود. از سال ۱۳۹۰ نامبرده در دانشگاه ها و مراکز عالی مشغول به فعالیت می باشد. زمینه های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان سیستم های تولید پراکنده، ریز شبکه؛ روش های بهینه سازی هوشمند و مدل سازی می باشد.

تابع هدف پیشنهادی برای هر کدام از این سناریوها شامل هزینه های ثابت و جاری تأمین انرژی و قابلیت اطمینان می باشد. سناریوهای تأمین انرژی شامل تأمین انرژی فقط به وسیله شبکه، شبکه و منابع تولید پراکنده، ریز شبکه به تنهایی، ریز شبکه و شبکه بالادست هستند. با توجه به سناریوهای مطرح شده نتایج نشان داد که تأمین انرژی با ایجاد ریز شبکه و امکان اتصال ریز شبکه به شبکه بالادست کمترین هزینه تأمین انرژی را برای مشتریان در پی دارد و قابلیت اطمینان را افزایش خواهد داد. علاوه بر این نتایج نشان می دهد که نصب منابع تولید پراکنده با ایجاد ریز شبکه یا بدون ایجاد ریز شبکه هزینه های تأمین انرژی را کاهش خواهد داد.

همچنین نتایج نشان داد که اگر هر یک از بارها یا بارهای مشابه به یک فیدر در ریز شبکه متصل شوند، قابلیت اطمینان افزایش خواهد یافت. مقایسه روش پیشنهادی با روش مشابه، کارآمدتر و کاربردی تر بودن روش پیشنهادی این مقاله را نشان داد.

## مراجع

- [1] A. D. Hawkes and M. A. Leach, "Modelling high level system design and unit commitment for a microgrid," *Applied Energy*, vol. 86, no. 7-8, pp. 1253-1265, Jul. 2009.
- [2] H. Morais, P. Kadar, P. Faria, Z. A. Vale, and H. M. Khodr, "Optimal scheduling of a renewable micro-grid in an isolated load area using mixed-integer linear programming," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 1, pp. 151-156, Jan. 2010.
- [3] F. A. Mohamed and H. N. Koivo, "MicroGrid Online Management and Balancing Using Multiobjective Optimization," in *Proc. IEEE Lausanne Power Tech.*, pp. 639-644, 1-5 Jul. 2007.
- [4] P. Moises Costa and M. A. Matos, "Assessing the contribution of microgrids to the reliability of distribution networks," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 2, pp. 382-389, 2009.
- [5] P. Moises Costa and M. A. Matos, "Economic analysis of microgrids including reliability aspects," in *Proc. 9th Int. Conf. on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, 8 pp., Stockholm, Sweden, Jun. 2006.
- [6] C. Marnay, "Microgrids and heterogeneous power quality and reliability," *Int. J. of Distributed Energy Resources*, vol. 4, no. 4, pp. 281-295, Oct. 2008.
- [7] J. Rocabert, et al., "Microgrid connection management based on an intelligent connection agent," in *Proc. IEEE 36th Industrial Electronics Society Annual Conf., IECON'10*, pp. 3028-3033, 7-10 Nov. 2010.