

فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی
سال سوم / شماره ۷ / تابستان ۱۳۹۶ / صفحات ۴۲-۷

ارائه یک مدل ریاضی تامین انرژی الکتریکی پایدار در ریز شبکه متصل به شبکه

سید فرید قادری

استاد دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه تهران
ghaderi@ut.ac.ir

اعظم محمدی بوساری

کارشناسی ارشد مهندسی صنایع دانشگاه پیام نور
amohamadi.ie@gmail.com

محمود نعیمی

کارشناسی ارشد مهندسی انرژی آزاد واحد علوم تحقیقات
mahmoodnaeimi@gmail.com

رکسانا فکری

استادیار رشته مهندسی صنایع دانشگاه پیام نور
r.fekri@pnu.ac.ir

امروزه توسعه ریز شبکه‌ها به عنوان مولفه‌های اساسی شبکه‌های هوشمند، یکی از اهداف اصلی پژوهش‌ها در صنعت برق به شمار می‌آید. ریز شبکه‌ها با افزایش سهم نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر و امکان تجارت انتشار کربن، مسیر دست‌یابی به عرضه انرژی پایدار را هموار می‌سازند. این مقاله، بهبود و ارتقای مدیریت عملیات یک ریز شبکه متصل به شبکه را در منطقه بفراجرد از توابع استان اردبیل دنبال می‌کند. بدین منظور، عملیات زمان‌بندی در یک ریز شبکه، شامل انواع مختلفی از منابع توان، اعم از تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر به همراه ذخیره‌ساز انرژی در قالب یک مساله ریاضی چنددهفه مدل‌سازی می‌گردد. این مدل ریاضی، به صورت همزمان پیشنهادی درآمد ریز شبکه، کمینه‌سازی انتشار آلانده‌ها و کمینه‌سازی هزینه‌های آن را با توجه به ملاحظات پیمان کیوت و با هدف تامین باری پایدار دنبال می‌کند. برای حل این مساله، از روش ترکیبی بهینه‌سازی لکسیکوگراف و اپسیلون محدودیت تکامل یافته به منظور دستیابی به جواب‌های کارا و تشکیل جبهه پارتو استفاده می‌شود. انتخاب جواب مرجح از بین جواب‌های بهینه پارتو با استفاده از روش تضمیم‌گیری فازی خواهد بود. سپس مدل پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد مدل ریاضی پیشنهادی با استفاده از روش حل بکارگرفته شده، با نگاهی جامع بر ابعاد اقتصادی/زیست محیطی بهره‌برداری از واحدهای تولید مختلف یک ریز شبکه، در افق زمانی ۲۴ ساعته، رویکردی کارا و مؤثر جهت توسعه، بهبود و کاربردی نمودن مدل‌های زمان‌بندی عملیات ریز شبکه‌ها فراهم می‌آورد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت تامین انرژی الکتریکی، توزیع اقتصادی-زیست محیطی بار، توسعه پایدار، بهینه سازی چنددهفه، ریز شبکه

۱. مقدمه

سیستم‌های توان موجود را می‌توان به دلیل استفاده بلندمدت از منابع فسیلی به عنوان عامل اصلی تغییرات اکولوژیکی و زیست محیطی جهانی در نظر گرفت. مجموعه اقدامات انجام گرفته‌ی طی چند دهه اخیر که به منظور پاسخ به چالش‌های زیست محیطی به انجام رسیده‌اند، نشان می‌دهد آینده تولیدات انرژی، حرکت به سوی تجمعی منابع انرژی تجدیدپذیر با سیستم‌های تولید توان سنتی موجود خواهد بود. تجمعی و یکپارچه‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر در کنار سیستم‌های تولید توان موجود که تحت عنوان شبکه‌های هوشمند معرفی می‌شوند، می‌توانند نقش حیاتی در گذار به آینده‌ای با منابع انرژی پایدار (تجددیدپذیر، دردسترس و کارآمد) ایفا نمایند (Ricalde, et al., 2011) و (Kempener, et al., 2013). در این خصوص، ریزشبکه‌ها با قابلیت ادغام منابع انرژی پراکنده مقیاس کوچک (عمدتاً تجدیدپذیر مانند انرژی‌های خورشیدی و بادی) و بهره‌گیری از فناوری‌های کنترل پیشرفته، زیرساخت‌های لازم را به منظور تجمعی این منابع به شبکه برق سراسری فراهم آورده و به عنوان ابزاری کارآمد در اختیار شبکه‌های هوشمند قرار گرفته‌اند: ریزشبکه‌های هوشمند (Ricalde, et al., 2011) و (رضوانی و همکاران، ۲۰۱۵) و (Liao, 2012). بررسی تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهد بهره‌برداری از منابع تولید جدید و جایگزین در سیستم‌های مدیریت انرژی که چشم‌اندازی از ورود ریزشبکه‌ها به صنعت برق را متادر می‌سازند، می‌تواند به عنوان مفهومی جدید و امید بخش، راه حل مناسبی به منظور دست‌یابی به استقلال منابع انرژی و پاسخگویی به چالش‌های زیست محیطی به همراه آورند (Dondi, et al., 2002). بر این اساس، مطالعات فراوانی به منظور توسعه و ارتقای این سیستم‌های توان جدید در ادبیات موضوع به چشم می‌خورد. در حوزه توزیع اقتصادی بار که یکی از متدائل‌ترین مسائل بهینه‌سازی در عملیات سیستم‌های توان می‌باشد، تعیین اقتصادی‌ترین واحد تولید مورد بررسی قرار می‌گیرد. بسیاری از روش‌های گزارش شده در این حوزه، هزینه، درآمد و یا سود را به منظور یافتن بهترین توزیع توان در نظر گرفته‌اند که از میان

این مقالات می‌توان به (Bansal, et al., 2014), (Alarcon-Rodriguez, et al., 2010) و (Brown, et al., 2008) و (Korpaas, et al., 2003) اشاره نمود. به عنوان مثال، در تحقیقی که در سال ۲۰۰۳ توسط (Korpaas et al., 2003) به انجام رسید، مساله زمانبندی و مدیریت عملیات در یک ریز شبکه (شامل نیروگاه‌های توان بادی و ذخیره سازها) در قالب یک مساله بهینه سازی تک هدفه بیشینه سازی درآمد، مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله، از یک الگوریتم برنامه‌نویسی پویا جهت تعیین مقدار بهینه مبادلات انرژی در بازار برق استفاده شده است. در (Belfkira, et al., 2011) از یک الگوریتم قطعی به منظور بهینه سازی سایزبندی یک سیستم انرژی هایبرید (بادی/خورشیدی و دیزلی) در حالت جزیره‌ای با هدف کمینه سازی هزینه کل سیستم و تضمین تقاضای بار استفاده شده است. در مقاله (مرزبند و همکاران، ۲۰۱۶) به منظور یافتن برنامه زمانبندی کوتاه مدت انرژی در یک ریز شبکه (در حالت جزیره‌ای) از الگوریتم بهینه سازی مورچگان چند لایه، در یک سیستم مدیریت انرژی استفاده شده است. هدف از این مقاله، تامین تقاضای مورد نیاز با کمینه سازی هزینه تولید الکتریسته در بازار محلی برق است. از سوی دیگر، کمینه سازی هزینه عملیاتی یک ریز شبکه از طریق زمانبندی و سایل گوناگون به عنوان مثال، ملزومات، باتری‌ها، ژنراتورهای گرمایی و توربین بادی در مقاله (Yang, et al., 2016) ارائه و از طریق تجزیه بندرز حل شده است. طی چند دهه اخیر، تحقیقات و پژوهش‌ها حول مباحث اقتصادی ریز شبکه‌ها ادامه یافته است، اما با گسترش نگرانی‌های زیست محیطی و بخصوص پس از انتشار پیام اصلاح قانون هوای پاک در سال ۱۹۹۰، تحقیقات پژوهشی در سیستم‌های توان، با نگاه صرفاً اقتصادی، همچنان که امروزه شاهد آن هستیم، دیگر نمی‌توانند به شیوه‌ای رضایت‌بخش تامین کننده نیازهای عملیاتی ریز شبکه و پاسخگوی انتظارات از آن باشند. بدین ترتیب، امروزه بیشتر پژوهش‌ها با محوریت توزیع اقتصادی/زیست محیطی ترکیب یافته، به عنوان پاسخی عملی و به منظور حل مساله مدیریت و زمانبندی عملیات در سیستم‌های توان پیشنهاد و مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این

نظر، یک سیستم توان بهینه‌سازی شده می‌تواند با درنظر گیری چندین معیار و تحت تاثیر مجموعه‌ای از محدودیت‌های اجتناب ناپذیر به روشنی اقتصادی و با تحمیل تأثیرات زیست محیطی کمتر، به شیوه‌ای کارا رفتار نماید (رضوانی و همکاران، ۲۰۱۵) و (مقدم و همکاران، ۲۰۱۲). در میان مقالاتی که مساله مدیریت عملیات ریز شبکه را با در نظر گیری توزیع اقتصادی/زیست محیطی مورد بررسی قرار داده‌اند می‌توان به مجموعه مقالات (Lei, et al., 2009), (Mohamed, et al., 2007), (Mchedlidze, et al., 2012), (Arnette, et al., 2012), (Hafez, et al., 2012), (Zhe, et al., 2014), (B. Zhao, et al., 2014), (Bo Zhao, et al., 2014) (Zhang, et al., 2016)، (ایزدبخش و همکاران، ۲۰۱۵)، (رضوانی و همکاران، ۲۰۱۵) و (Hafez, et al., 2012) (Lei, et al., 2009) مقالاتی هستند که مساله اشاره نمود. به عنوان نمونه، (Lei, et al., 2009) و (Hafez, et al., 2012) مقالاتی هستند که مساله بهینه‌سازی اقتصادی توزیع بار را با درنظر گیری ملاحظات زیست محیطی به صورت تک هدفه مورد بررسی قرار داده‌اند. همچنین مساله مدیریت بلاذرنگ عملیات یک ریز شبکه، در قالب یک مساله بهینه‌سازی چند‌هدفه و با ساختاری غیرخطی در مرجع (Mohamed, et al, 2007) ارائه شده است. نویسنده‌گان در (مقدم و همکاران، ۲۰۱۲)، یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با خاصیت خودتطییقی فازی^(۱) (FSAPSO) را به منظور بهینه‌سازی زمان‌بندی عملیات در یک ریز شبکه توسعه داده‌اند. بهینه‌سازی هزینه عملیاتی و انتشار به عنوان توابع هدف مساله چند‌هدفه در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است. مساله زمان‌بندی اقتصادی/زیست محیطی منابع انرژی در یک ریز شبکه متصل به شبکه در (رضوانی و همکاران، ۲۰۱۵) ارائه شده است. این مقاله با استفاده از روش اپسیلون محدودیت وزن‌دار تکامل یافته به همراه روش بهینه‌سازی لکسیکوگراف، به بررسی تأثیرات متقابل هر یک از توابع هدف (هزینه و انتشار) بر جواب بهینه مساله چند‌هدفه می‌پردازد. نویسنده‌گان در (ایزدبخش و همکاران، ۲۰۱۵) به توسعه مدل ارائه شده در (رضوانی و همکاران، ۲۰۱۵) از طریق

1.Fuzzy Self Adaptive Particle Swarm Optimization

حل با استفاده از روش تقاطع مرزی نرم‌ال (NBI^۱) پرداختند. زمان‌بندی مصرف انرژی در خانه‌های هوشمند و با استفاده از سیستم یک ریز شبکه در (Zhang, et al., 2016)، با ارائه یک مدل برنامه‌نویسی خطی عدد صحیح آمیخته (MILP^۲) ارائه می‌شود. موارد مصرف توان روزانه از طریق یک مساله بهینه‌سازی چند هدفه اقتصادی/زیست محیطی و با هدف توسعه پایدار مدل سازی و با روش اپسیلون محدودیت حل می‌گردد. نهایتاً یک بازنگری جامع، جهت دست‌یابی به گرایش‌های اخیر در حوزه کاری برنامه‌ریزی انرژی و راهبردهای زمان‌بندی با مرور بر مفاهیم زمان‌بندی انرژی، مدل‌سازی ریاضی، نظریه فازی، رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره، روش‌های ترکیبی بکار گرفته شده در برنامه‌ریزی انرژی و راهبردهای زمان‌بندی طی سال‌های ۱۹۵۷ تا ۲۰۱۷ در (Bhowmik, et al., 2016) به انجام رسیده است.

در مقاله حاضر، توزیع اقتصادی/زیست محیطی توان و مساله مدیریت و زمان‌بندی عملیات در یک ریز شبکه نمونه و در قالب یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه مدل سازی می‌گردد. بهینه‌سازی درآمد، کمینه‌سازی هزینه کل ریز شبکه و کمینه‌سازی انتشار آلانده‌های زیست‌محیطی، به عنوان توابع هدف مساله، با بکار گیری تکنیک اپسیلون محدودیت تکامل یافته و بهینه‌سازی لکسیکو گراف بهینه‌سازی می‌شوند. مدل ریاضی ارائه شده در تحقیق حاضر را می‌توان مدل توسعه یافته مقاله (رضوانی و همکاران، ۲۰۱۵) در نظر گرفت. ساختار کلی این مقاله و همچنین مهمترین نوآوری‌های آن نسبت به مقاله فوق (و مقالات دیگر در این حوزه (مقدم و همکاران، ۲۰۱۲) و (ایزدبخش و همکاران، ۲۰۱۵) را می‌توان در موارد زیر دانست:

- ارائه یک مدل ریاضی چندهدفه زمان‌بندی عملیات ریز شبکه با درنظر گیری سود، هزینه

کل و انتشار به عنوان توابع هدف مساله چندهدفه

-
1. Normal Boundary Intersection
 2. Mixed Integer Linear Programming

- بکارگیری بهینه‌سازی لکسیکوگراف در کنار روش اپسیلون محدودیت تکامل بافت به منظور بهینه‌سازی همزمان سود، هزینه کل و انتشار آلاینده‌های زیست محیطی ریز شبکه افروden تابع هدف درآمد به ساختار تابع هدف و ایجاد یک مساله بهینه‌سازی سه هدفه (در مقابل مسائل مطرح در این حوزه (رضوانی و همکاران، ۲۰۱۵) که مساله زمانبندی بار را تنها با توجه به ابعاد هزینه و انتشار مورد مطالعه قرار داده اند). بدین طریق، درآمد حاصل از فروش برق به شبکه برق سراسری و درآمد حاصل از فروش مالیات کریم در قالب تابع درآمد در ساختار توابع هدف در نظر گرفته می‌شود که این امر، امکان افزایش تبادلات بار با شبکه برق سراسری و همچنین بهره‌برداری اقتصادی بهینه در ریز شبکه را موجب می‌گردد.
- در نظر گیری ملاحظات زیست محیطی پیمان کیوت و مدل‌سازی آن در صورت توابع هدف درآمد و هزینه و همچنین لحاظ نمودن آن در ساختار قیود مساله که تاکنون در ادبیات موضوع مقالات پیشین لحاظ نشده است، می‌تواند وجود الزامی سخت گیرانه را در حرکت به سوی توسعه انرژی پایدار فراهم آورد.
- مدل‌سازی مساله حاضر با مقادیر واقعی و بهروز در صنعت برق، هم از بعد مسائل فنی تجهیزات بکار گرفته شده در ساختار ریز شبکه و هم از بعد مسائل اقتصادی، که از داده‌های واقعی و کنونی در مدل‌سازی بهره می‌گیرد، سبب می‌شود تا مقادیر نتایج خروجی واقعی و قابل استناد بوده و به این ترتیب، در ک بهتری از آنها جهت بررسی‌های کاربردی بیشتر حاصل گردد.
- داده‌های مورد استفاده در بخش تولید انرژی‌های تجدیدپذیر خورشیدی و بادی، برخلاف مقالات پیشین، داده‌های واقعی و گردآوری شده از منطقه مورد مطالعه (منطقه بفراجرد از توابع استان اردبیل) می‌باشند که این امر نیز بر کاربردی بودن این پژوهش دلالت دارد.

با مطالعه و مرور بر ادبیات مقالات نگارش یافته در این حوزه می‌توان چنین نتیجه گرفت که در هیچ کار مشابهی، مساله زمان‌بندی مدیریت عملیات ریز شبکه با توجه همزمان به تمام موارد فوق الذکر مورد بررسی قرار نگرفته است و این مقاله با پیگیری اهداف فوق، سعی در بهبود و ارتقای مدیریت عملیات یک ریز شبکه به عنوان مولفه‌ای از شبکه‌های هوشمند دارد.

ادامه مقاله بدین صورت زیر خواهد بود: مدل مدیریت عملیات و زمان‌بندی ریز شبکه در بخش دوم ارائه می‌شود؛ بخش سوم، بهینه‌سازی لکسیکوگراف، تکنیک اپسیلون محدودیت تکامل یافته را شامل می‌شود؛ بخش چهارم به شرح جزئیات عملیاتی ریز شبکه نمونه و بررسی نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل پیشنهادی می‌پردازد و نهایتاً برخی از نتایج مرتبط با این مقاله و ارائه پیشنهادها برای تحقیقات آتی در بخش پنجم ارائه می‌گردد.

۲. مدیریت عملیات یک ریز شبکه با درنظر گیری اهداف اقتصادی / زیست محیطی

توزیع اقتصادی / زیست محیطی بهینه توان و همچنین مساله مدیریت و زمان‌بندی عملیات یک ریز شبکه را می‌توان در قالب یک مساله ریاضی چنددهدله مدل‌سازی نمود. در فرآیند بهینه‌سازی مساله تامین بار، سه تابع هدف مفروض بیشینه سازی درآمد ریز شبکه، کمینه سازی هزینه کل آن و کمینه سازی انتشار آلاینده‌های زیست محیطی در حالی که محدودیت‌های سیستم را ارضاء می‌نمایند، به صورت همزمان بهینه‌سازی می‌شوند. لذا مدل نهایی زمان‌بندی تامین بار پایدار مورد استفاده در این پژوهش به صورت زیر می‌باشد. (کلیه اختصارات واژه‌ها در جدول (۱) آمده است)

$$\text{Multi - Objective Function} = \begin{cases} \text{Revenue Maximization } F_1 = \text{Revenue} \\ \text{Emission Minimization } F_2 = \text{Emission} \\ \text{Cost Minimization } F_3 = \text{Cost} \end{cases} \quad (1)$$

جدول ۱. فهرست علائم و اختصارات

		شاخص‌ها	
Pmin(r)	حداقل بار تولیدی در صورت فعل بودن منبع r	r	
Pmax(r)	حداکثر بار تولیدی در صورت فعل بودن منبع r	b	باتری
Pgl(t)	حداکثر ارسال بار از شبکه به ریزشبکه در دوره t	m	میکروتوربین
Pg2($\forall t \in T_{\text{Peak}}, T - T_{\text{Peak}}$)	حداکثر مجاز انتشار گاز گلخانه‌ای بدون هزینه	f	پل سوختی
maxEm	هزینه انتشار هر واحد انتشار (kg/MWh)	p	سلول فتوولتائیک
fEm	غیرمجاز گاز گلخانه‌ای	w	توربین بادی
cSS(r)	هزینه راه‌اندازی یا خاموش کردن منبع r	t	زمان
		مجموعه‌ها	
متغیرها		R = {m, f, b, p, w}	مجموعه منابع انرژی
P(r,t)	میزان توان تولیدی توسط منبع r در دوره t	NR = {m, f, b} ∈ R	مجموعه منابع انرژی تجدید ناپذیر
x2c(r, t)	میزان بار ارسالی از منبع r به مشتری در دوره t	RR = {p, w} ∈ R	مجموعه منابع انرژی تجدید پذیر
xg(t)	میزان بار دریافتی از شبکه در دوره t	E = {CO ₂ , SO ₂ , NO _X }	مجموعه انتشار گازهای گلخانه‌ای
x2g(r,t)	میزان بار ارسالی از منبع r به شبکه در دوره t	T = {t ₁ , t ₂ , ..., t ₂₄ }	مجموعه دوره‌های برنامه‌ریزی
y(r, t)	متغیر بازنی که اگر منبع r در دوره t فعال باشد،	T _{peak} = {t ₁₁₋₁₄ , t ₁₉₋₂₂ }	دوره‌های پیک مصرف شبکه
	آنگاه مقدار آن ۱ است و در غیر این صورت، ۰ است.		پارامترها (ورودی مساله)
cEmiss	هزینه انتشار غیر مجاز گاز گلخانه‌ای	SP(r)	قیمت فروش بار از منبع r
rEmiss	درآمد حاصل از جلوگیری از انتشار غیر مجاز گازهای گلخانه‌ای	b(r)	هزینه تولید انرژی از هر منبع r
Revenue	درآمد ریز شبکه (تابع هدف اول)	bg(t)	هزینه خرید بار از شبکه در دوره t
Emission	میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای	em(e, nr)	میزان انتشار گاز گلخانه‌ای e منبع
Cost	هزینه کل ریزشبکه	load(t)	تجدد ناپذیر nr به ازای هر واحد بار تولیدی
			میزان بار مورد نیاز در دوره t

۱-۲. توابع هدف

هدف اول: بیشینه سازی درآمد ریز شبکه

تابع هدف درآمد حاصل از فروش برق به شبکه برق سراسری و همچنین درآمد حاصل از فروش

مالیات کردن را می توان به صورت رابطه (۲) مدل سازی نمود:

$$\text{max Revenue} = \sum_r \sum_t SP(r).x2g(r, t) + rEmiss \quad (2)$$

در این رابطه، $SP(r)$ قیمت فروش برق از منبع r خواهد بود که به صورت ثابت تعریف می شود.

$x2g(r, t)$ میزان بار ارسالی از منبع r به شبکه در دوره t است و $rEmiss$ درآمد حاصل شده از

جلوگیری از انتشار غیر مجاز گازهای گلخانه ای را بیان می کند. بنابراین، با استفاده از تابع هدف اول، مجموع درآمد حاصل از فروش مزاد بار تولید شده و درآمد حاصل از جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه ای بیشینه می گردد.

هدف دوم: کمینه سازی انتشار

تابع هدف میزان انتشار کل حاصل از واحد های تولید کننده انرژی به صورت زیر بیان می گردد:

$$\text{max Emission} = \sum_{nr} \sum_e \sum_t em(e, nr).P(nr, t) \quad (3)$$

در این رابطه، $em(e, nr)$ ضریب انتشار e این نوع گاز گلخانه ای $\{CO_2, SO_2, NOX\}$ از هر

منبع تجدیدناپذیر nr به ازای هر واحد بار تولیدی خواهد بود و $P(nr, t)$ میزان تولیدی توسط

منبع تجدیدناپذیر nr را در هر دوره زمانی t بیان می کند و به این وسیله با استفاده از تابع

میزان کل انتشار حاصل از منابع تجدیدناپذیر در دوره زمانی مورد نظر محاسبه می گردد.

کمینه سازی هزینه کل ریز شبکه

تابع هدف هزینه عملیاتی کل ریز شبکه به صورت زیر بیان می گردد:

$$\text{max Cost} = \sum_r \sum_t b(r).P(r, t) + \sum_t bg(t).xg(t) + \sum_r \sum_t cSS(r).|y(r, t) - y(r, t-1)| + cEmiss \quad (4)$$

در این رابطه، پارامتر $b(r)$ هزینه تولید هر واحد توان از هر منبع r ریز شبکه، $P(r, t)$ میزان توان تولیدی توسط آن منبع در دوره زمانی t ، $bg(t)$ هزینه خرید توان از شبکه در دوره زمانی t و $xg(t)$ میزان توان دریافتی از شبکه در دوره t هزینه راه اندازی یا خاموش کردن منبع r $y(r, t)$ متغیر باین‌ری که اگر منبع r در دوره t فعال باشد، آنگاه مقدار آن ۱ است و در غیر این صورت، صفر است و c_{Emiss} هزینه انتشار غیر مجاز گازهای گلخانه‌ای خواهد بود و بدین ترتیب، در سومین تابع هدف مجموع کل هزینه‌های ریز شبکه حداقل می‌گردد.

۲-۲. تعریف محدودیت‌ها

تعادل بار

اولین محدودیت از محدودیت‌های مساله بهینه‌سازی، توازن بار مورد نیاز را در هر دوره زمانی

بیان می‌کند:

$$\sum_r x_2 c(r, t) + xg(t) = \text{load}(t) \quad \forall t \in T \quad (5)$$

این رابطه بیان می‌کند که مجموع تولید توان ریز شبکه برای مشترکین $(x_2 c(r, t))$ به همراه توان خریداری شده از شبکه سراسری $(xg(t))$ در موقع لزوم، پاسخگوی نیاز مشترکین $(\text{load}(t))$ می‌باشد.

میزان تولید توان

دومین محدودیت این مساله بهینه‌سازی، میزان توان تولیدی ریز شبکه را در هر دوره زمانی بیان

می‌کند:

$$x_2 c(r, t) + x_2 g(r, t) = P(r, t) \quad \forall t \in T, r \in R \quad (6)$$

رابطه (6) بیان می‌کند که میزان تولید بار توسعه هر منبع $(P(r, t))$ در هر دوره، برابر با مجموع مقادیر ارسال شده به مشتریان $(x_2 c(r, t))$ و شبکه برق سراسری $(x_2 g(r, t))$ می‌باشد.

ظرفیت تولید توان

سومین محدودیت این مساله بهینه‌سازی، ظرفیت تولید توان هر تجهیز ریزشبکه را در هر دوره زمانی بیان می‌کند:

$$P_{\min}(r).y(r,t) \leq P(r,t) \leq P_{\max}(r).y(r,t) \quad \forall t \in T \quad (7)$$

بر اساس رابطه (7)، در صورت فعال بودن ($y(r,t) = 1$) هر منبع r (NR, RR) در هر دوره زمانی t ، مقدار بار تولیدی توسط آن منبع ($P(r,t)$) باید بین مقادیر کمینه و پیشینه تعريف شده تولید آن قرار گیرد.

ظرفیت تبادل توان با شبکه برق سراسری

میزان تبادلات توان با شبکه برق سراسری را می‌توان با روابط (8) و (9) بیان نمود:

$$xg(t) \leq Pg1(t) \quad \forall t \in T \quad (8)$$

رابطه (8) بیان کننده میزان توان دریافتی از شبکه برق سراسری در هر دوره زمانی t می‌باشد.

$$\sum_r x2g(r,t) \leq Pg2(t) \quad \forall t \in T_{\text{Peak}}, T - T_{\text{Peak}} \quad (9)$$

رابطه (9) میزان بار ارسالی از منبع r به شبکه برق سراسری را با مقادیر متفاوت در دوره‌های زمانی پیک و غیرپیک بیان می‌کند.

محدودیت‌های انتشار مطابق با پیمان کیوتو

همان طور که بیان گردید، در این مقاله، با هدف تامین بار پایدار و توجه بیشتر به ملاحظات زیست محیطی، مدل‌سازی پیمان کیوتو در ساختار مدل پیشنهادی لحاظ می‌گردد. بر این اساس، مدل ارائه شده در (طیار و همکاران، ۲۰۱۳) که سقف مجازی از انتشار را برای انتشار گاز دی اکسید کربن (به عنوان مهمترین آلاینده) در تابع هزینه در نظر می‌گیرد، در این مقاله توسعه داده شده و مطابق با روابط (۱۰) و (۱۱) در قالب محدودیت‌های جدیدی به ساختار مدل‌های ارائه شده در مقالات پیشین در این حوزه (مقدم و همکاران، ۲۰۱۲)، (رضوانی و همکاران، ۲۰۱۵) و

(ایزدبخش و همکاران، ۲۰۱۵) افزوده می‌شود. مدل سازی پیمان کیوتو به این صورت خواهد بود که هنگامی که میزان انتشار $(\sum_{nr} \sum_e \sum_t em(e, nr).P(nr, t))$ از حد مجاز (maxEm) بیشتر باشد، هزینه ناشی از این تخطی مطابق با معادله (۱۰) محاسبه می‌گردد و به عنوان جریمه در صورت تابع هدف هزینه قرار می‌گیرد.

$$cEmiss = fEm . \left(\sum_{nr} \sum_e \sum_t em(e, nr).P(nr, t) - maxEm \right) \quad (10)$$

هنگامی که میزان انتشار، $\sum_{nr} \sum_e \sum_t em(e, nr).P(nr, t)$ از حد مجاز (maxEm) کمتر باشد، ریز شبکه قادر خواهد بود مطابق با معادله (۱۱) حق مالیات کربن خود را به منظور افزایش درآمد زایی ریز شبکه به فروش برساند:

$$rEmiss = fEm . \left(maxEm - \sum_{nr} \sum_e \sum_t em(e, nr).P(nr, t) \right) \quad (11)$$

در این روابط، fEm هزینه انتشار هر واحد انتشار غیرمجاز گاز گلخانه‌ای (Kg/MWh) و $cEmiss$ هزینه ناشی از انتشار غیرمجاز و $rEmiss$ درآمد ناشی از فروش مالیات کربن را معین می‌سازد.

۳. روش‌شناسی حل مساله برنامه‌نویسی ریاضی چند هدفه (MMP)

روش‌های برنامه‌نویسی ریاضی چند هدفه، به حل مسائلی می‌پردازند که در آنها بیش از یک تابع هدف در ساختار مساله مورد توجه قرار می‌گیرد. حل این گونه مسائل، معمولاً به هیچ جواب بهینه منفردی دست نمی‌یابد که بتواند به طور همزمان، همه توابع هدف مساله را بهینه‌سازی نماید. در چنین شرایطی، جواب ارجح از دید تصمیم گیرندگان، به عنوان جواب مساله در نظر گرفته می‌شود. همچنین مفهوم بهینگی، با مجموعه جواب کارا یا بهینه پارتو جایگزین می‌گردد (نوروزی و

همکاران (الف)، ۲۰۱۴). روش اپسیلون محدودیت یک روش شناخته شده و ساختار یافته جهت حل مسائل MMP است که به بهینه‌سازی یک تابع هدف اصلی در میان سایر توابع هدف می‌پردازد. صورت کلی این روش حل (برای یک مساله کمینه‌سازی با P تابع هدف) به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Min } f_1(x) \quad (12)$$

$$\text{Subject to } f_r(x) \leq e_r \quad f_r(x) \leq e_r \quad f_p(x) \leq e_p$$

در این رابطه، P نشان‌دهنده تعداد توابع هدف رقابتی است. در میان مزیت‌های بیان شده در رابطه با روش اپسیلون محدودیت نسبت به سایر روش‌های دقیق در این حوزه (نوروزی و همکاران (الف)، ۲۰۱۴)، دو نکته کلیدی وجود دارد که توجه به آن را به هنگام بکارگیری این روش ضروری می‌سازد: اول اینکه، هیچ تضمینی مبنی بر بهینگی محدوده توابع هدف در مجموعه کارا وجود ندارد، روش بهینه‌سازی لکسیکوگراف روش مناسبی است که به منظور غلبه بر این اشکال می‌تواند به کار گرفته شود. دوم اینکه، در ارتباط با روش اپسیلون محدودیت، احتمال مغلوب بودن یا ناکارآمدی جواب‌های بهینه پارتو بدست آمده به وسیله این روش می‌باشد. یکی از راه‌های مورد پذیرش برای حذف این اشکال، استفاده از روش اپسیلون محدودیت تکامل یافته است.

جزییات بیشتر در رابطه با بکارگیری بهینه‌سازی لکسیکوگراف و اپسیلون محدودیت تکامل یافته را می‌توان در (آقایی و همکاران، ۲۰۱۱) یافت.

۱-۳. ارزیابی جواب بهینه

پس از تعیین جواب‌های بهینه پارتو، تصمیم‌گیرنده مطابق با معیارهای مشخص، نیاز به انتخاب سازگارترین جواب ممکن را دارد. در این مقاله، مطابق با (امجدی و همکاران، ۲۰۰۹) و (نوروزی و همکاران (ب)، ۲۰۱۴)، یک رویکرد فازی برای فرآیند تصمیم‌گیری پیشنهاد می‌شود که در آن،

یکتابع عضویت خطی (μ_i^r) برای هر یک از توابع هدف مطابق با معادلات (۱۳) و (۱۴) تعریف می‌شود که در آن، f_i^r و μ_i^r به ترتیب مقدار آمین تابع هدف در i امین جواب بهینه پارتو و مقدار تابع عضویت آن را نشان می‌دهند. فرآیند فازی‌سازی بیان شده در روابط (۱۵) و (۱۶) به ترتیب برای توابع هدفی که می‌بایست بیشینه‌سازی و کمینه‌سازی شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

$$f_i^r = \begin{cases} 1 & f_i^r \geq f_i^{\max} \\ \frac{f_i^r - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} & f_i^{\min} \leq f_i^r \leq f_i^{\max} \\ 0 & f_i^r \leq f_i^{\min} \end{cases} \quad (13)$$

$$f_i^r = \begin{cases} 1 & f_i^r \leq f_i^{\min} \\ \frac{f_i^{\max} - f_i^r}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} & f_i^{\min} \leq f_i^r \leq f_i^{\max} \\ 0 & f_i^{\max} \leq f_i^r \end{cases} \quad (14)$$

در این روابط، f_i^{\max} و f_i^{\min} به ترتیب مقادیر حداقلی و حداکثری هر تابع i خواهد بود. تابع عضویت تعریف شده μ_i^r درجه بهینگی آمین تابع هدف را در i امین جواب بهینه پارتو نشان می‌دهد. تابع عضویت کل آمین جواب بهینه پارتو (μ^r) بر اساس توابع عضویت جداگانه آن، مطابق با رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

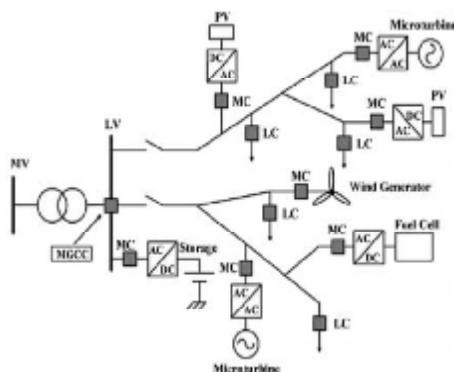
$$\mu^r = \frac{\sum_{i=1}^P w_i \times \mu_i^r}{\sum_{r=1}^M \sum_{i=1}^P w_i \times \mu_i^r} \quad (15)$$

که در آن، w_i مقدار وزن آمین تابع هدف در مسئله MMP و M تعداد جواب‌های بهینه پارتو است. مقدار وزن w_i می‌تواند بر اساس اهمیت جنبه‌های مختلف از دیدگاه

تصمیم‌گیرنده‌گان انتخاب گردد. براساس عامل‌های وزنی انتخاب شده، جواب با حداکثر مقدار تابع عضویت کل^۱ μ ، جواب ارجح سازگار خواهد بود و بنا براین، به عنوان جواب بهینه پارتیو یا جواب نهایی مساله MMP انتخاب می‌گردد.

۴. مدل‌سازی یک ریزشبکه

این مقاله با هدف ارائه یک برنامه تامین بار پایدار، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی عملیات منابع یک ریزشبکه ولتاژ پایین (LV) را در افق زمانی ۲۴ ساعته مورد بررسی قرار می‌دهد. ریزشبکه مفروض در منطقه بفرادرج استان اردبیل با مشخصات جغرافیایی $N ۳۷^{\circ} ۲۹' E ۴۸^{\circ} ۳۳'$ شبه‌یاری می‌گردد. هدف از این بررسی، یافتن بهترین برنامه زمان‌بندی منابع ریزشبکه با صرف حداقل هزینه و حداقل انتشار در کنار بیشینه‌سازی درآمد آن می‌باشد. این ریزشبکه مانند شکل (۱) ترکیبی از انواع مختلفی از منابع پراکنده فسیلی: MT (میکروتوربین)، FC (پیل سوختی) و تجدید پذیر: WT (توربین بادی)، PV (سلول فتوولتائیک) است.



شکل ۱. یک نمونه از ریزشبکه ولتاژ پایین (رضوانی و همکاران، ۲۰۱۵)

1. Low Voltage

جدول ۲. اطلاعات فنی تجهیزات ریز شبکه

تجهیزات ریز شبکه	Pmin(KW)	Pmax(KW)	CO ₂ (Kg/MWh)	SO ₂ (Kg/MWh)	NOX(Kg/MWh)
میکروتوربین(MT)	۸	۴۰	۷۲۰/۰	۰/۰۰۳۶۰۰	۰/۱۰۰۰
(FC) بیل سوختی	۴	۳۰	۴۶۰/۰	۰/۰۰۳۰۰۰	۰/۰۰۷۵۰۰
(PV) سلول خورشیدی	۰	۳۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
(WT) توربین بادی	۰	۵۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
(BA) باتری	۰	۴۰	۱۰/۰۰	۰/۰۰۰۲۰۰۰	۰/۰۰۱۰۰۰

در ریز شبکه مفروض با قابلیت اتصال به شبکه یک رابط توان بین ریز شبکه فوق و شبکه بالادستی به منظور تبادل و تجارت انرژی در طول ساعات مختلف شبانه‌روز بر اساس تصمیمات اتخاذ شده از سوی کنترل مرکزی ریز شبکه (MGCC) وجود دارد. همچنین فرض می‌شود همه منابع تولید پراکنده در عامل توان واحد، بدون جذب یا تولید توان را کتیو فعال هستند. در ریز شبکه مذکور میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای {CO₂, SO₂, NOX} ناشی از تولید انرژی، به منظور اجرای تعهدات زیست محیطی پیمان کیوتو و مشابه با (رضوانی و همکاران، ۲۰۱۵) در نظر گرفته می‌شود. اطلاعات مربوط به تجهیزات ریز شبکه در جدول (۲) نمایش داده شده است. در این جدول، P_{min} و P_{max} به ترتیب حد بالا و پایین ظرفیت تولید منابع ریز شبکه را بیان می‌کنند. همچنین در این جدول میزان انتشار هر یک از مولدهای تولید بر حسب Kg/MWh آورده شده است.

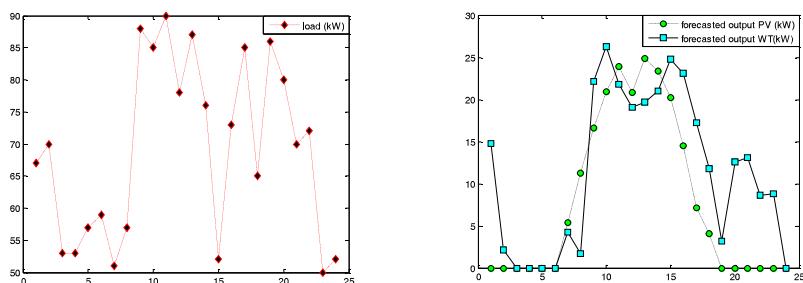
1.Micro-grid Central Control

همچنین اطلاعات اقتصادی ریزشبکه شامل هزینه تولید هریک از مولدها ($b(r)$) بر حسب KWh /ریال، هزینه راه اندازی و خاموش کردن واحد های تولید (SUC/SDC) از (رضوانی و همکاران، ۲۰۱۵) تبدیل یافته بر حسب ریال و همچنین قیمت فروش هر کیلووات ساعت انرژی تولید شده از منابع مختلف ریزشبکه ($SP(r)$) بر اساس تعرفه های قیمت سال ۱۳۹۵ در جدول (۳) آمده است.

جدول ۳. اطلاعات اقتصادی ریزشبکه (رضوانی و همکاران، ۲۰۱۵) و (تعرفه خرید تضمینی برق از نیروگاه های تجدیدپذیر و پاک، ۱۳۹۵)

تجهیزات ریزشبکه	$b(r)$ /ریال KWh	$SP(r)$ /ریال KWh	ریال SUC/SDC
میکروتوربین (MT)	۲۰۵/۶۵	۱۰۰	۴۳۲
پبل سوختی (FC)	۱۳۲/۳	۴۸۷۳	۴۳۲/۵
سلول خورشیدی (PV)	۱۱۶۲/۸	۹۷۷۰	.
توربین بادی (WT)	۴۸۲/۸۵	۵۹۳۰	.
باتری (BA)	۱۷۱	۴۴۳۰/۵	.

مقدار خروجی توان دو مولد توربین بادی (WT) و سلول فتوولتائیک (PV) با استفاده از تکنیک سری های زمانی ترکیب یافته با شبکه های عصبی در روز ۱۲ اردیبهشت سال ۱۳۹۱ مطابق با ۵/۱/۲۰۱۲ تخمین زده شده است (شیوه برآورد با استفاده از تکنیک فوق در مقالات بعدی این نویسنده خواهد آمد). همچنین مقدار تقاضای بار برای این روز برابر با $1656 KWh$ می باشد. شکل های (۲) و (۳) به ترتیب مقدار خروجی منابع تجدیدپذیر و مقدار تقاضای بار در ساعت مختلف شبانه روز در تاریخ مذکور را نمایش می دهند.



شکل ۲. مقدار خروجی توان پیش‌بینی شده دو مولد توربین بادی (WT) و سلول فتوولتائیک (PV) در بازه زمانی ۲۴ ساعته

۱-۴. اطلاعات تبادل توان با شبکه برق سراسری

میزان تبادلات توان از سوی شبکه به ریزشبکه در ساعتی که کنترل کننده مرکزی تصمیم می‌گیرد بنا بر حداقل سازی هزینه و انتشار، میزان بار مورد تقاضا را از شبکه تامین کند، در کلیه ساعت‌ها KW^{۳۰} و میزان فروش توان ریز شبکه به شبکه سراسری در ساعت پیک KW^{۴۰} و در باقی ساعت‌ها برابر با KW^{۳۰} در نظر گرفته شده است. همچنین فرض می‌شود در ساعت‌های پیک بار هیچ خریدی از شبکه صورت نمی‌گیرد. قیمت خرید برق از شبکه در ساعت‌های مختلف شبانه روز (bg(t)) در جدول (۴) آمده است.

جدول ۴. قیمت خرید برق از شبکه در ساعت‌های مختلف شبانه روز
(تعوفه‌های برق و شرایط عمومی آنها، ۱۳۹۵)

	bg(t)/دیال (KWh)
میان بار (۱۵-۱۰ و ۷-۱۸)	۶۵۵
اوج بار (۱۹-۲۲ و ۱۱-۱۴)	۱۳۱۰
کم بار (۶-۲۳)	۳۲۷/۵

۵. نتایج شبیه‌سازی

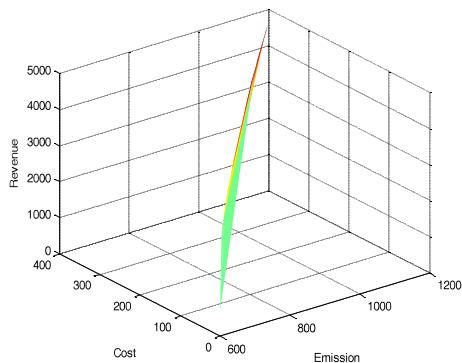
مدل ریاضی پیشنهادی برای حل مساله زمان‌بندی عملیات ریز شبکه که در بخش دوم بیان گردید، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته (MINLP) می‌باشد که با هدف دستیابی به جواب بهینه سراسری، با استفاده از شیوه‌های غیرخطی سازی، تبدیل به یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته (MILP) و قابل حل توسط سالورهای خطی شده است. مدل ریاضی این مساله در نرم افزار GAMS و با استفاده از CPLEX Solver حل شده است. همان طور که در بخش سوم تشریح گردید، روش شناسی حل این مساله چندهدفه با استفاده از ترکیب دو تکنیک اپسیلون محدودیت تکامل‌یافته و بهینه سازی لک‌سیکوگراف خواهد بود. تابع هدف اصلی روش بهینه سازی اپسیلون محدودیت، بیشینه سازی درآمد خواهد بود (Revenue Maximization $F_i = \text{Revenue}$) در حالی که نقاط شبکه برای دو تابع هدف دیگر، کمینه سازی هزینه و کمینه سازی انتشار برابر با ۲۴ خواهد بود. به این ترتیب، مساله ۲۵ بار جهت به دست آوردن کلیه جواب‌های بهینه پارتو که با استفاده از روش حل به کار گرفته شده و موجه بودن همگی تضمین شده است، حل خواهد شد. نتایج حاصل از حل مدل پیشنهادی در روز ۱۲ اردیبهشت سال ۱۳۹۱ مطابق با ۵/۱/۲۰۱۲ با میانگین دمای $8/7^{\circ}\text{C}$ ، حداقل دمای $6/8^{\circ}\text{C}$ ، حداکثر دمای $10/6^{\circ}\text{C}$ و میانگین رطوبت روزانه $67/4$ جدول موازنه‌ای به صورت زیر خواهد داشت:

Reveue	Emission	Cost
PayOff= $\begin{pmatrix} 190/30 & 67/04 & 694/72 \\ 3790/98 & 273/63 & 859/27 \end{pmatrix}$		

همان طور که جدول موازنه نشان می‌دهد، حداقل سازی توابع انتشار و هزینه (به ترتیب با مقادیر $67/04$ و $10/3 R$) درآمد حاصل از فروش را به مقدار $(190/30)$ Kg می‌رساند در

1. Mixed Integer Non Linear Programming

حالی که با بیشینه‌سازی درآمد ($R^3 = F_1 \cdot 3790$)، انتشار و هزینه به ترتیب معادل با ($R^3 = 273/63$) و ($R^3 = 859/27$) خواهد بود. رویه حل جهت به دست آوردن جبهه پارتو بدین صورت خواهد بود که اهداف دوم و سوم (انتشار و هزینه)، ابتدا در بهترین حالت ممکن خود قرار دارند (ردیف اول از جدول موازنہ) و بتدریج طی ۲۵ تکرار حل مساله بهینه‌سازی، سطح سخت‌گیری این اهداف کاهش یافته و تابع درآمد افزایش خواهد یافت. شکل (۴) جبهه پارتو بدست آمده از حل مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد. این شکل بخوبی رفتار متعارض سه تابع هدف درآمد، انتشار و هزینه را نمایش می‌دهد.



شکل ۴. نمودار جبهه پارتو (بهبود تدریجی درآمد با افزایش انتشار و هزینه)

مطلوب‌ترین جواب از بین جواب‌های بهینه پارتو با استفاده از روش تصمیم‌گیری فازی (در بخش ۱-۴ تشریح شد) انتخاب می‌گردد. انتخاب عامل‌های وزنی برای توابع هدف مساله جهت پیاده‌سازی تصمیم‌گیری فازی می‌تواند به صلاح‌حدید تصمیم‌گیرندگان متغیر باشد. در اینجا با هدف بیشینه‌سازی درآمد بیشترین وزن به تابع هدف درآمد اختصاص می‌یابد ($w_1 = 5/12$) و به دو تابع هدف انتشار و هزینه نیز به ترتیب عامل وزنی ($w_2 = 3/12$ و $w_3 = 1/12$)

$w_r = \frac{4}{12}$) نسبت داده می شود. نتایج حاصل از پیاده سازی تصمیم گیری فازی نشان

می دهد بالاترین مقدار عضویت کل برابر با 0.638771 ، برای جواب یازدهم از بین 25

جواب بهینه پارتو می باشد. مقادیر عضویت هر یک از توابع هدف این جواب در جدول (۵)

نمایش داده شده است:

جدول ۵. جواب بهینه مساله زمان بندی تامین بار

تابع هدف	عامل وزنی	مقدار تابع هدف	تابع عضویت
Revenue ($1.^r R$)	۵/۱۲	۳۰۴۴/۳۱۷	۰/۷۹۹۱۲
Emission(Kg)	۴/۱۲	۱۵۱/۳۸۵۴	۰/۶
Cost ($1.^r R$)	۲/۱۲	۷۶۳/۲۸۱۸	۰/۱۹۶۴۹۵

جداول (۶) تا (۹) به صورت دقیق نتایج حاصل از پیاده سازی مدل پیشنهادی را در بهترین

جواب ممکن (جواب یازدهم) نمایش می دهند (در محاسبه نتایج شبیه سازی، مقادیر fEm و

$maxEm$ به روش تقریبی و مناسب با سطح پارامترهای اقتصادی مساله و همچنین سطح

انتشار بدست آمده در اجراهای مختلف بر مدل پیشنهادی، تخمین زده شده اند). جدول (۶)

میزان تولید هر یک از تجهیزات ریزشبکه ($iP_{t,i}$) را در بازه زمانی 24 ساعته نمایش می دهد.

**جدول ۶. مقدار بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری در مطلوب‌ترین جواب کارا
(میزان تولید از منابع ریزشکه $(P(r,t))$)**

Time (h)	P(r,t)				
	p	w	f	m	b
۱	.	۱۴/۷۶	.	.	۲۲/۲۴
۲	.	۲/۱۲	.	.	۳۷/۸۸
۳	.	.	.	.	۲۳/۰۰
۴	.	.	.	.	۲۳/۰۰
۵	.	.	.	.	۲۷/۰۰
۶	.	.	.	.	۲۹/۰۰
۷	۵/۴۰	۴/۲۴	.	.	۴۰/۰۰
۸	۱۱/۳۰	۱/۷۵	۴/۰۰	.	۴۰/۰۰
۹	۱۶/۹۰	۲۲/۱۴	۹/۲۶	.	۴۰/۰۰
۱۰	۲۰/۹۰	۲۶/۳۰	.	.	۴۰/۰۰
۱۱	۲۳/۹۰	۲۱/۸۴	۳۰/۰۰	.	۴۰/۰۰
۱۲	۲۰/۸۰	۱۹/۱۰	۳۰/۰۰	.	۴۰/۰۰
۱۳	۲۶/۹۰	۱۹/۷۰	۳۰/۰۰	.	۴۰/۰۰
۱۴	۲۳/۴۰	۲۱/۰۴	۳۰/۰۰	.	۴۰/۰۰
۱۵	۲۰/۲۰	۲۴/۷۷	.	.	۳۱/۲۵
۱۶	۱۶/۵۰	۲۳/۱۰	.	.	۳۵/۴۰
۱۷	۷/۱۱	۱۷/۲۴	۲۰/۶۵	.	۴۰/۰۰
۱۸	۴/۱۲	۱۱/۸۴	۹/۰۴	.	۴۰/۰۰
۱۹	.	۳/۲۰	۳۰/۰۰	۱۸/۰۹	۴۰/۰۰
۲۰	.	۱۲/۶۰	۳۰/۰۰	.	۴۰/۰۰
۲۱	.	۱۳/۱۰	۳۰/۰۰	.	۴۰/۰۰
۲۲	.	۸/۶۰	۳۰/۰۰	.	۴۰/۰۰
۲۳	.	۸/۸۰	.	.	۱۱/۲۰
۲۴	.	.	.	.	۲۲/۰۰

جدول (۷) میزان عرضه توان هر یک از تجهیزات ریز شبکه به مشتریان را در مطلوب‌ترین جواب کارا بیان می‌دارد.

**جدول ۷. مقدار بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری
در مطلوب‌ترین جواب کارا (ارسال به مشتریان)**

Time (h)	x _{2g(r,t)}				
	p	w	f	m	b
۱	.	۱۴/۷۶	.	.	۲۲/۲۴
۲	.	۲/۱۲	.	.	۳۷/۸۸
۳	.	۰	.	.	۲۳/۰۰
۴	.	۰	.	.	۲۳/۰۰
۵	.	۰	.	.	۲۷/۰۰
۶	.	۰	.	.	۲۹/۰۰
۷	.	۰	.	.	۲۱/۰۰
۸	.	۰	.	.	۲۷/۰۵
۹	.	۸/۷۴	۹/۲۶	.	۴۰/۰۰
۱۰	.	۱۷/۲۰	.	.	۴۰/۰۰
۱۱	.	۲۰/۰۰	۳۰/۰۰	.	۴۰/۰۰
۱۲	.	۸/۰۰	۳۰/۰۰	.	۴۰/۰۰
۱۳	.	۱۷/۰۰	۳۰/۰۰	.	۴۰/۰۰
۱۴	.	۶/۰۰	۳۰/۰۰	.	۴۰/۰۰
۱۵	.	۱۴/۹۷	.	.	۳۱/۲۵
۱۶	.	۷/۹۰	.	.	۳۵/۴۰
۱۷	.	۰	۱۵/۰۰	.	۴۰/۰۰
۱۸	.	۰	۰	.	۳۵/۰۰
۱۹	.	۰	۲۷/۹۴	۱۸/۰۶	۴۰/۰۰
۲۰	.	۱۰/۰۰	۳۰/۰۰	.	۴۰/۰۰
۲۱	.	۰	۳۰/۰۰	.	۴۰/۰۰
۲۲	.	۲/۰۰	۳۰/۰۰	.	۴۰/۰۰
۲۳	.	۸/۸۰	.	.	۱۱/۲۰
۲۴	.	۰	۰	.	۲۲/۰۰

جدول (۸) میزان تبادل ریز شبکه با شبکه برق سراسری را در مطلوب‌ترین جواب کارا بیان می‌دارد.

جدول ۸. مقدار بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری در مطلوب‌ترین جواب کارا
(تبادل ریز شبکه با شبکه برق سراسری)

Time (h)	x _{2g(r,t)}					x _{g(t)}
	p	w	f	m	b	
۱	.	.	.	.	.	۳۰/۰۰
۲	.	.	.	.	.	۳۰/۰۰
۳	.	.	.	.	.	۳۰/۰۰
۴	.	.	.	.	.	۳۰/۰۰
۵	.	.	.	.	.	۳۰/۰۰
۶	.	.	.	.	.	۳۰/۰۰
۷	۵/۴۰	۴/۲۴	.	.	۱۹/۰۰	۳۰/۰۰
۸	۱۱/۳۰	۱/۷۵	۴/۰۰	.	۱۲/۹۵	۲۹/۹۵
۹	۱۶/۶۰	۱۳/۴۰	.	.	.	۳۰/۰۰
۱۰	۲۰/۹۰	۹/۱۰	.	.	.	۲۷/۸۰
۱۱	۲۳/۹۰	۱/۸۴	.	.	.	.
۱۲	۲۰/۸۰	۱۱/۱۰	.	.	.	.
۱۳	۲۴/۹۰	۲/۷۰	.	.	.	.
۱۴	۲۳/۴۰	۱۵/۰۴	.	.	.	.
۱۵	۲۰/۲۰	۹/۸۰	.	.	.	۵/۷۸
۱۶	۱۴/۵۰	۱۵/۵۰	.	.	.	۳۰/۰۰
۱۷	۷/۱۱	۱۷/۲۴	۵/۶۵	.	.	۳۰/۰۰
۱۸	۴/۱۲	۱۱/۸۴	۹/۰۴	.	۵/۰۰	۳۰/۰۰
۱۹	.	۳/۲۰	۲/۰۶	.	.	.
۲۰	.	۲/۶۰	.	.	.	.
۲۱	.	۱۳/۱۰	.	.	.	.
۲۲	.	۶/۶۰۰	.	.	.	.
۲۳	.	.	.	.	.	۳۰/۰۰
۲۴	.	.	.	.	.	۳۰/۰۰

$$\sum_r x_2 c(r, t) + x g(t) = \text{load}(t) \quad \forall t \in T \quad (16)$$

جدول (۹) خروجی مدل را به ازای محدودیت توازن بار نمایش می دهد.

جدول ۹. توازن بار

Time (h)	x ₂ c(r,t)					Xg (t)	Load (t)
	p	w	f	m	b		
۱	۰	۱۴/۷۶	۰	۰	۲۲/۲۴	۳۰/۰۰	۹۷
۲	۰	۲/۱۲	۰	۰	۳۷/۸۸	۳۰/۰۰	۷۰
۳	۰	۰	۰	۰	۲۳/۰۰	۳۰/۰۰	۵۳
۴	۰	۰	۰	۰	۲۳/۰۰	۳۰/۰۰	۵۳
۵	۰	۰	۰	۰	۲۷/۰۰	۳۰/۰۰	۵۷
۶	۰	۰	۰	۰	۲۹/۰۰	۳۰/۰۰	۵۹
۷	۰	۰	۰	۰	۲۱/۰۰	۳۰/۰۰	۵۱
۸	۰	۰	۰	۰	۲۷/۰۵	۲۹/۹۵	۵۷
۹	۰	۸/۷۴	۹/۲۶	۰	۴۰/۰۰	۳۰/۰۰	۸۸
۱۰	۰	۱۷/۲۰	۰	۰	۴۰/۰۰	۲۷/۸۰	۸۵
۱۱	۰	۲۰/۰۰	۳۰/۰۰	۰	۴۰/۰۰	۰	۹۰
۱۲	۰	۸/۰۰	۳۰/۰۰	۰	۴۰/۰۰	۰	۷۸
۱۳	۰	۱۷/۰۰	۳۰/۰۰	۰	۴۰/۰۰	۰	۸۷
۱۴	۰	۶/۰۰	۳۰/۰۰	۰	۴۰/۰۰	۰	۷۶
۱۵	۰	۱۴/۹۷	۰	۰	۳۱/۲۵	۵/۷۸	۵۲
۱۶	۰	۷/۹۰	۰	۰	۳۵/۴۰	۳۰/۰۰	۷۳
۱۷	۰	۰	۱۵/۰۰	۰	۴۰/۰۰	۳۰/۰۰	۸۵
۱۸	۰	۰	۰	۰	۳۵/۰۰	۳۰/۰۰	۹۵
۱۹	۰	۰	۲۷/۹۴	۱۸/۰۶	۴۰/۰۰	۰	۸۶
۲۰	۰	۱۰/۰۰	۳۰/۰۰	۰	۴۰/۰۰	۰	۸۰
۲۱	۰	۰	۳۰/۰۰	۰	۴۰/۰۰	۰	۷۰
۲۲	۰	۲/۰۰	۳۰/۰۰	۰	۴۰/۰۰	۰	۷۲
۲۳	۰	۸/۸۰	۰	۰	۱۱/۲۰	۳۰/۰۰	۵۰
۲۴	۰	۰	۰	۰	۲۲/۰۰	۳۰/۰۰	۵۲

میزان درآمد حاصل از فروش مالیات کربن و یا جریمه ناشی از انتشار (بیش از حد مجاز) به شرح زیر می‌باشد:

$$cEmiss = ۰/۰۰۰۰$$

$$rEmiss = ۶۸/۰۶۰۴ (۱۰^۳ R)$$

۱-۵. تحلیل نتایج خروجی شبیه‌سازی

همان‌طور که بیان شد، این کار پژوهشی، بهینه‌سازی عملیات زمان‌بندی منابع در یک ریز شبکه با منابع متنوع فسیلی و تجدیدپذیر را دنبال می‌کند و مدل پیشنهادی سعی دارد با درنظر گرفتن مصالحه بین سه تابع هدف مفروض و همچنین ملاحظات زیست‌محیطی (مطابق با پیمان کیوتو) بهترین تخصیص ممکن را از بین همه منابع موجود ریز شبکه تعیین نماید. جداول فوق نشان می‌دهد کل سهم انرژی خورشیدی با بیشترین قیمت فروش جهت عرضه به شبکه برق سراسری اختصاص می‌یابد و انرژی باد نیز به عنوان یک منبع پایدار و در رتبه دوم از لحاظ قیمت فروش، هم در بخش تامین بار مشترکین و هم در عرضه به بازار برق، حضور دارد. از بین منابع فسیلی به دلیل اهمیت عامل انتشار، تخصیص منابع از کم آلاینده‌ترین منبع (باتری) به آلاینده‌ترین (میکروتوربین) خواهد بود و همان‌طور که خروجی مدل نشان می‌دهد، در بیشترین ساعت‌ها از مولد باتری استفاده می‌شود و در ارتباط با میکروتوربین و پیل سوختی با وجود اینکه ظرفیت تولید بیشتری از میکروتوربین در دسترس قرار دارد، به علت آلایندگی بیشتر میکروتوربین، استفاده از پیل سوختی بیشتر از آن می‌باشد و جز در ساعت‌ها محدودی که ریز شبکه می‌خواهد سهم فروش خود را حفظ نماید از این منبع استفاده نمی‌شود. این ترکیب از منابع نشان می‌دهد ریز شبکه با در دست داشتن ظرفیت مناسب از منابع تولید متعدد و با درنظر گیری ملاک‌های اقتصادی و زیست‌محیطی توانسته بهترین تخصیص از منابع موجود را با اراضی سه هدف تعیین شده ارائه نماید.

۶. تحلیل حساسیت بر مدل پیشنهادی

در این قسمت، مدل پیشنهادی در ۳ دسته مالیات کربن (fEm)، تغییر ظرفیت مجاز انتشار (maxEm) و تغییر ظرفیت تولید منابع فسیلی و تجدید پذیر (با هدف افزایش تولید از منابع پایدار و کاهش منابع فسیلی) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۶-۱. بررسی نتایج زمان بندی عملیات با تحلیل حساسیت بر مالیات کربن

در این سناریو، بهترین جواب‌های ممکن به ازای مقادیر مختلف از مالیات کربن (از میزان صفر تا ۵ برابر) آن مطابق با جدول (۱۰) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

جدول ۱۰. بررسی خروجی حاصل از پیاده سازی سناریوهای مختلف بر مالیات کربن

ردیف	مقادیر مختلف fEM (۱۰ ^{-۳} R)	مقادیر توابع هدف در بهترین جواب ممکن			مقدار جریمه یا درآمد نااشی از انتشار (۱۰ ^{-۳} R)
		Rev (۱۰ ^{-۳} R)	Emiss (Kg)	Cost (۱۰ ^{-۳} R)	
۱	fEM=۰	۳۱۰۶/۱۳	۲۵۶/۲۵	۶۳۶/۷۷	rEmiss=cEmiss=0
۲	fEM=۰/۷	۳۲۵۴/۷۹	۱۸۶/۳۶	۷۴۳/۳۵	rEmiss=۹/۵۵
۳	fEM=۱/۴	۳۰۴۴/۳۲	۱۵۱/۳۹	۷۶۳/۲۸	rEmiss=۶۸/۰۶
۴	fEM=۲/۸	۳۰۵۷/۳	۱۴۲/۶۸	۷۹۹/۲۵	rEmiss=۱۶۰/۴۹
۵	fEM=۷	۳۱۰۱/۲۶	۱۰۷/۷۴	۸۲۳/۶۷	rEmiss=۶۴۵/۸۱

تحلیل نتایج: در حالت اول، بهینه‌سازی بدون تاثیر متقابل میزان انتشار بر درآمد و هزینه انجام می‌گیرد و به ترتیب هر سه هدف بهینه سازی در مسیر مستقل خود، جواب‌های بهینه و نهایی را ارائه می‌نماید. بدین ترتیب، تولیدات ریزشبکه به گونه‌ای خواهد بود که علاوه بر تامین بار ریزشبکه با کمترین هزینه و کمترین میزان آلایندگی، درآمد حاصل از فروش برق نیز بیشینه گردد.

در حالت دوم، جریمه اندکی بر میزان انتشار آلاینده‌ها تخصیص داده می‌شود. این جریمه نسبت به هزینه تولیدات ریزشبکه محدود می‌باشد، لذا تابع هزینه را آنچنان تحت تاثیر قرار نمی‌دهد و

ریز شبکه حتی با این میزان جریمه نیز به منظور درآمد زایی، تا حد بیشینه ظرفیت خود تولید می‌نماید. در این حالت، فرآیند مدل‌سازی به سمت افزایش استفاده از همه منابع خود (اعم از فسیلی و تجدیدپذیر) متمایل می‌گردد، این مساله متعاقباً باعث می‌شود میزان انتشار آلاندده‌ها نیز به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. تابع هزینه نیز متاثر از افزایش ظرفیت تولید نسبت به حالت قبل افزایش می‌یابد و تابع درآمد با وجود بدتر شدن دو تابع هزینه و انتشار افزایش می‌یابد.

در حالت سوم، به دلیل اعمال جریمه انتشار بیشتر، مدل سعی در انتخاب منابع با آلاندگی کمتر می‌کند تا میزان انتشار و همچنین جریمه ناشی از آن در تابع هزینه حداقل گردد. به این ترتیب، سطح تابع هزینه با تولید بیشتر از منابع پایدار اندکی افزایش می‌یابد و به این ترتیب همچنان که مشاهده می‌شود، سطح تابع انتشار نیز به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و مطابق با رابطه $rEmiss \propto (\max Em - em(r,t)) \times P(r,t)$ ، در این حالت با کاهش هرچه بیشتر از میزان انتشار، افزایش این اختلاف سبب افزایش $rEmiss$ و به تبع آن، افزایش تابع هدف درآمد خواهد شد که این روند در حالت‌های چهارم و پنجم نیز قابل مشاهده می‌باشد.

۶-۲. بررسی نتایج حاصل از تغییر ظرفیت مجاز انتشار

در این سناریو، بهترین جواب‌های ممکن به ازای مقادیر مختلف از حد مجاز انتشار (100 ± 10 کیلوگرم از مقدار در نظر گرفته شده برای آن) مطابق با جدول (۱۱) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

جدول ۱۱. بررسی خروجی حاصل از پیاده سازی سناریوهای مختلف بر میزان مجاز انتشار

ردیف	مقادیر مختلف maxEm (Kg)	مقادیر نوابع هدف در بهترین جواب ممکن				مقدار جریمه یا درآمد ناشی از انتشار (R ^{۱۰})
		Rev (10 ^۳ R)	Emiss (Kg)	Cost (10 ^۳ R)	cEmiss = ۷۱/۹۴	
۱	maxEm=۱۰۰	۲۹۷۲/۶۲	۱۵۱/۳۹	۸۱۹/۲۸	rEmiss= ۶۸/۰۶	
۲	maxEm =۲۰۰	۳۰۴۴/۳۲	۱۵۱/۳۹	۷۶۳/۲۸		
۳	maxEm =۳۰۰	۳۳۶۳/۲۴	۱۷۷/۶۷	۷۹۵/۰۴	rEmiss= ۱۷۱/۲۷	

تحلیل نتایج: هنگامی که ظرفیت مجاز انتشار از 200 kg به 100 kg (به ازای هر کیلووات ساعت تولید برق) کاهش می‌یابد، جریمه ناشی از انتشار حتی در سطوح پایین از انتشار نیز در تابع هزینه لحاظ می‌گردد. لذا رویه حل، رویکردی را اتخاذ می‌کند تا با کمینه‌سازی انتشار از افزوده شدن جریمه انتشار به تابع هزینه جلوگیری نماید. برنامه زمانبندی ارائه شده در این میزان انتشار، نشان می‌دهد تابع هدف انتشار نسبت به کاهش در حد مجاز انتشار، حساسیت نشان نمی‌دهد و ریز شبکه تولیدات خود را با همان مقدار بهینه از انتشار در حالت قبل ($151/39 \text{ Kg}$) تولید و عرضه می‌نماید، اما در نتیجه اختلاف با حد مجاز انتشار (100 Kg) جریمه ناشی از آن بر تابع هدف هزینه افزوده می‌شود. همچنین ریز شبکه برای جلوگیری از افزایش بیشتر هزینه‌ها از تولید انرژی‌های پایدار (به علت هزینه تولید بالای آنها) در ساعات کم‌باری صرف نظر می‌کند، اما با وجود افزوده شدن جریمه انتشار در این حالت، تابع هزینه (با میزان انتشاری مانند حالت قبل)، افزایش قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد.

در حالت دوم، هنگامی که ظرفیت مجاز انتشار از سقف 200 Kg به 300 Kg (به ازای هر کیلووات ساعت تولید برق) افزایش می‌یابد، ریز شبکه از آزادی انتخاب بیشتری در انتخاب منابع تولید (با وجود آلایندگی آنها) برخوردار خواهد بود. بدین ترتیب، در ساعات مختلف شبانه روز، برنامه زمانبندی تا حد امکان از منابع فسیلی بیشتری جهت تامین بار خود استفاده می‌کند تا سهم قابل ملاحظه‌ای از منابع پایدار را جهت درآمدزایی بیشتر خود محفوظ نگاه دارد. به این ترتیب است که در این سناریو، کاهش اندکی در هزینه تولید به چشم می‌خورد (به دلیل استفاده بیشتر از منابع فسیلی و با صرف هزینه کمتر به جای خرید از شبکه سراسری) که این امر افزایش در مقدار تابع هدف انتشار را به همراه خواهد داشت، اما از آنجا که این میزان انتشار ($177/67 \text{ Kg}$) تا حد مجاز انتشار $\text{maxEm} = 300 \text{ Kg}$ هنوز فاصله قابل توجهی دارد، لذا درآمد حاصل از فروش مالیات کریں به درآمد ریز شبکه افزوده می‌شود و افزایش در تابع هدف درآمد در این حالت را می‌توان از

دو جنبه افزایش سهم فروش منابع پایدار (به دلیل استفاده بیشتر از منابع فسیلی) و افزایش درآمد حاصل از عدم تعدی از حد مجاز انتشار و فروش مالیات کربن دانست.

۶-۳. تغییرات در ظرفیت منابع تولید انرژی‌های فسیلی و تجدیدپذیر

در این سنتاریو، بهترین جواب‌های ممکن به ازای مقادیر مختلف در افزایش سهم تولیدات انرژی‌های نو و کاهشی به همان میزان در منابع سوخت‌های فسیلی مطابق با جدول (۱۲) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

جدول ۱۲. بررسی خروجی حاصل از پیاده سازی سناریوهای مختلف بر ظرفیت منابع تولید انرژی‌های فسیلی و تجدیدپذیر

ردیف	تغییر در ظرفیت منابع فسیلی و تجدیدپذیر	مقادیر توابع هدف در بهترین جواب ممکن			مقادیر جریمه یا درآمد ناشی از انتشار (R ^{۱۰})
		Rev (R ^{۱۰})	Emiss (Kg)	Cost (R ^{۱۰})	
۱	ظرفیت فعلی	۳۰۴۴/۳۲	۱۵۱/۳۹	۷۶۳/۲۸	rEmiss=۶۸/۰۶
۲	$\Delta P_{RR} = +10\text{ KW}$	۳۴۹۱/۷۶	۱۳۷/۴۲	۸۲۵/۴۹	rEmiss=۶۰/۸۷
	$\Delta P_{NR} = -10\text{ KW}$				
۳	$\Delta P_{RR} = +20\text{ KW}$	۳۵۶۸/۸۲	۱۱۰/۴۳	۹۰۰/۱۳	rEmiss=۱۲۵۰/۴۰
	$\Delta P_{NR} = -20\text{ KW}$				

تحلیل نتایج: هنگامی که با هدف توسعه انرژی‌های پایدار، بر ظرفیت منابع تجدیدپذیر افزوده و از ظرفیت منابع فسیلی کاسته می‌شود، ریز شبکه به منظور تامین بار و درآمدزایی خود می‌بایست از منابع تجدیدپذیر بیشتری که در اختیار دارد، استفاده نماید. این مساله به دلیل هزینه بهره‌برداری بالاتر انرژی‌های پایدار نسبت به انرژی‌های فسیلی، سبب افزایش در هزینه تولید می‌شود و در مقابل از آنجا که سهم منابع فسیلی با انرژی‌های پایدار جایگزین شده است، این مساله کاهش قابل توجهی در میزان انتشار را به همراه خواهد داشت (بهبود تابع هدف انتشار). همچنین افزایش تابع درآمد در این

حالت از دو جنبه خواهد بود: اول آنکه، سهم بیشتری از تولیدی که جهت فروش عرضه می‌شود، از منابع گران قیمت تجدیدپذیر خواهد بود و دوم اینکه، در این حالت، به دلیل کاهش میزان انتشار، میزان $(P(r,t) \times rEmiss^\infty - maxEm - em(r,t))$ افزایش یافته و سبب افزایش تابع هدف درآمد خواهد شد. این مساله مطابق با جدول (۱۲) در هر دو سناریو صادق است.

۷. دستاوردهای کلی تحقیق

در تحقیق حاضر، یک مدل ریاضی به منظور بهینه سازی برنامه زمانبندی و مدیریت تامین بار در یک ریز شبکه ارائه گردید و با استفاده از روش حل مورد نظر که ترکیبی از روش‌های اپسیلون محدودیت تکامل یافته و بهینه سازی لکسیکوگراف می‌باشد، در یک روز معیار و در افق زمانی ۲۴ ساعته پیاده سازی و نتایج تفصیلی آن شامل تولید توان ریز شبکه، تبادلات توان با شبکه برق سراسری، تامین بار ریز شبکه در ساعات مختلف شبانه روز به همراه وضعیت تولید ریز شبکه از بعد پایداری (پیمان کیوتو) تشریح گردید. مدل پیشنهادی در تحقیق حاضر، به توسعه در ابعاد اقتصادی و زیست محیطی مدل‌های پیشین (رضوانی و همکاران، ۲۰۱۵) در این حوزه پرداخت: از بعد مسائل اقتصادی، افزودن تابع هدف درآمد به چارچوب مساله چند هدفه که پیش از این، تنها هزینه عملیاتی ریز شبکه را شامل می‌شد و از بعد مسائل زیست محیطی، مدل‌سازی دقیق یکی از پیمان‌های بین‌المللی نظیر پیمان کیوتو، از جمله مواردی هستند که به مدل‌های پیشین افزوده شده و ضمن بهبود آنها، ساختار مدل زمانبندی تامین بار را به اهداف توسعه و تامین انرژی پایدار نزدیک‌تر می‌گرداند. نکته حائز اهمیتی که در پیاده سازی مدل پیشنهادی به چشم می‌خورد، این است که در نظر گرفتن مالیات کریم در قیود مساله و توابع هدف مدل زمانبندی پیشنهادی، به صورت جدی تولیدات ریز شبکه را تحت کنترل قرار می‌دهد و همان طور که خروجی‌های مدل نشان داد، با وجود دسترسی بالای تعریف شده از منابع فسیلی و قیمت عرضه پایین آنها، مدل در برآورد توان تولیدی آخرین اولویت را به استفاده از آنها اختصاص می‌دهد تا به این وسیله هزینه‌های ناشی از انتشار را به حداقل

مقدار ممکن بر ساند. همچنین نکته قابل توجه دیگر، استفاده از انرژی پایدار خورشیدی است که به لحاظ پاک بودن و حداکثر قیمت فروش، سهم تولید آن در اولویت اول جهت فروش و عرضه به بازار برق سراسری قرار دارد و این نتایجی است که در کنار سایر نتایج، بر کیفیت مدل پیشنهادی با گنجاندن تابع هدف درآمد و مدل‌سازی بیمان کیوتو نسبت به مدل‌های ارائه شده در ادبیات موضوع دلالت دارد. در کنار موارد فوق، دو مورد اساسی که این تحقیق را نسبت به تحقیقات پیشین متمایز می‌سازد، استفاده از داده‌ها و اطلاعات واقعی به جای استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده در پیاده‌سازی مدل پیشنهادی است. بهره‌گیری از اطلاعات واقعی ملزمات و تجهیزات فنی در ریز شبکه مفروض و همچنین استفاده از تعریف‌های برق دولتی، مطابق با تعریف‌ها و مصوبه‌های وازت نیرو، قابلیت کاربرد و بهره برداری مدل پیشنهادی را دریک ریز شبکه فعال ممکن می‌سازد. همچنین داده‌های مورد استفاده در بخش تولید انرژی‌های تجدیدپذیر خورشیدی و بادی، بر خلاف مقالات پیشین، داده‌های واقعی و گردآوری شده از منطقه مورد مطالعه (منطقه بفرادرد از توابع استان اردبیل) می‌باشند که این امر نیز بر کاربردی بودن این پژوهش دلالت دارد. مجموعه موارد فوق در کنار ملاحظه نتایج خروجی‌های مدل، ضمن اثبات همراستایی مدل با مدل‌های پیشین و گامی در جهت توسعه آنها، از جمله نوآوری‌های این تحقیق می‌باشند که آن را به هدف کاربردی نمودن پژوهش نزدیک‌تر می‌گرداند، اما به لحاظ تغییراتی که در کیفیت و ساختار مدل پیشنهادی ایجاد شده است، امکان مقایسه عددی بین این تحقیق و تحقیقات موجود در ادبیات موضوع، وجود ندارد. با وجود این، جهت اثبات اصلت مدل پیشنهادی، همانطور که ملاحظه گردید، نتایج تحلیل حساسیت بر سه عامل بیان شده در بخش پایانی این تحقیق، بر صحت مدل پیشنهادی در ارائه نتایجی دقیق دلالت دارند.

۸. نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف مدل سازی و بهینه سازی برنامه تامین بار کوتاه مدت یک ریز شبکه متصل به شبکه، به ارائه یک مدل ریاضی MINLP می‌پردازد که به منظور دست‌یابی به جواب‌های بهینه سراسری با استفاده از شیوه‌های غیرخطی سازی، تبدیل به یک مدل ریاضی MILP شده است. این مدل را می‌توان مدل توسعه یافته تحقیقات پیشین در نظر گرفت. مجموعه نوآوری‌های بکار گرفته شده در این تحقیق ضمن استفاده از اطلاعات فنی و اقتصادی تجهیزات واقعی و همچنین دسترسی به میزان واقعی از منابع تجدیدپذیر در منطقه مورد بررسی (بفرارج در توابع استان اردبیل) در کنار استفاده از تعریفهای برق جاری، قابلیت این مدل را جهت پیاده‌سازی و بهره برداری در یک ریز شبکه فعال نمایان می‌سازد. در راستای توسعه مدل ارائه شده، پیشنهاد می‌شود تحقیقات پیش رو، مساله تحقیقی حاضر را با درنظر گرفتن عدم قطعیت در توان‌های خورشیدی و بادی و بار ریز شبکه، عدم قطعیت در خروجی ریز شبکه و خاموشی‌های شبکه برق سراسری، دسترسی به قیمت برق لحظه‌ای به جای استفاده از تعریفهای برق سنتی و همچنین تبدیل مساله استاتیکی مطرح شده به یک مساله دینامیکی، مساله را آنچنان مدل سازی نمایند تا بتوانند با استفاده از مقادیر پیش‌بینی شده بار روز بعد و ترجیحات مصرف کنندگان، هر دو سمت عرضه انرژی و تقاضای آن را به صورت بهینه مدیریت، بهبود و کنترل نمایند.

منابع

سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) <http://privatesectors.suna.org.ir> گزارش "تعرفه خرید تضمینی برق از نیروگاههای تجدیدپذیر و پاک".

وزارت نیرو <http://moe.gov.ir> ، گزارش "تعرفه های برق و شرایط عمومی آنها" ۱۳۹۵.

Aghaei, J; Amjadi, N. and H. A. Shayanfar (2011), "Multi-Objective Electricity Market Clearing Considering Dynamic Security by Lexicographic Optimization And Augmented Epsilon Constraint Method", *Applied Soft Computing*, 11(4), pp.3846-3588.

Alarcon-Rodriguez, A. D. and G. W. Ault (2010)," Multi-Objective Planning of Distributed Energy Resources with Probabilistic Constraints", Paper presented at the Power and Energy Society General Meeting 2010 IEEE.

Amjadi, N; Aghaei, J. and H. A. Shayanfar (2009), " Stochastic Multiobjective Market Clearing of Joint Energy And Reserves Auctions Ensuring Power System Security", *Power Systems, IEEE Transactions on*, 24(4), pp.1841-1854.

Arnette, A. and C. W. Zobel (2012)," An Optimization Model for Regional Renewable Energy Development", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 16(7),pp. 4606-4615.

Bansal, M; Khatod, D. K. and R. P. Saini (2014), "Modeling And Optimization of Integrated Renewable Energy System for A Rural Site", Paper presented at the Optimization, Reliability, and Information Technology (ICROIT), 2014 International Conference on.

Belfkira, R; Zhang, L. and G. Barakat (2011), "Optimal Sizing Study of Hybrid Wind/PV/Diesel Power Generation Unit" , *Solar Energy*, 85(1), pp.100-110.

Bhowmik, C; Bhowmik, S; Ray, A. and K. M. Pandey (2016), Optimal Green Energy Planning for Sustainable Development: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Brown, P. D; Lopes, J. and M. A. Matos (2008), "Optimization of Pumped Storage Capacity in An Isolated Power System with Large Renewable Penetration" , *Power Systems, IEEE Transactions on*, 23(2),pp. 523-531.

Dondi, P; Bayoumi, D; Haederli, C; Julian, D. and M. Suter (2002)," Network Integration of Distributed Power Generation" , *Journal of power sources*, 106.

Hafez, O. and K. Bhattacharya (2012), Optimal Planning And Design of A Renewable Energy Based Supply System for Microgrids, *Renewable Energy*, 45(0), pp. 7-15.

- Izadbakhsh, M; Gandomkar, M; Rezvani, A. and A. Ahmadi** (2015), " Short-Term Resource Scheduling of A Renewable Energy Based Micro Grid" , Renewable Energy, 75(0),pp. 598-606.
- Kempener, R. and P. K. a. A. Hoke** (2013), "Smart Grids And Renewables: A Guide for Effective Deployment" , Retrieved from http://www.irena.org/documentdownloads/publications/smart_grids.pdf.
- Korpaas, M; Holen, A. T. and R. Hildrum** (2003), "Operation And Sizing of Energy Storage for Wind Power Plants in A Market System" , International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 25(8), pp.599-606.
- Lei, J; Xin, H; Xie, J. and D. Gan** (2009), "Optimization of Distributed Energy Systems Taking into Account Energy Saving And Emission Reduction" , Paper presented at the Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN '09. International Conference on.
- Liao, G.-C.** (2012), " Solve Environmental Economic Dispatch of Smart Microgrid Containing Distributed Generation System – Using Chaotic Quantum Genetic Algorithm" , International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 43(1), pp.779-787.
- Marzband, M; Yousefnejad, E; Sumper, A. and J. L. Domínguez-García** (2016), "Real Time Experimental Implementation of Optimum Energy Management System in Standalone Microgrid by Using Multi-Layer Ant Colony Optimization" , International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 75,pp. 265-274.
- Moghaddam, A. A; Seifi, A. and T. Niknam** (2012), "Multi-Operation Management of A Typical Micro-Grids Using Particle Swarm Optimization: A Comparative Study" , Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(2), pp.1268-1281.
- Moghaddam, A. A; Seifi, A; Niknam, T. and M. R. Alizadeh Pahlavani** (2011) , "Multi-Objective Operation Management of A Renewable Micro-Grid with Back-up Micro-Turbine/Fuel Cell/Battery Hybrid Power Source",Energy,36(11),pp.6490-6507.
- Mohamed, F. A. and H. N. Koivo** (2007)," Online Management of Microgrid with Battery Storage Using Multiobjective Optimization" , Paper presented at the Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2007. POWERENG 2007. International Conference on.
- Norouzi, M. R; Ahmadi, A; Esmael Nezhad, A. and A. Ghaedi** (2014 b), "Mixed Integer Programming of Multi-Objective Security-Constrained Hydro/Thermal Unit Commitment" , Renewable and Sustainable Energy Reviews, 29, 911-923.
- Norouzi, M. R., Ahmadi, A., Sharaf, A. M., and A. Esmael Nezhad** (2014 a), "Short-Term Environmental/Economic Hydrothermal Scheduling ", Electric Power Systems Research, 116,pp. 117-127.

- Rezvani, A; Gandomkar, M; Izadbakhsh, M. and A. Ahmadi** (2015), "Environmental/Economic Scheduling of A Micro-Grid with Renewable Energy Resources" , Journal of Cleaner Production, 87(0), pp.216-226.
- Ricalde, L. J; Ordoñez, E; Gamez, M. and E. N. Sanchez** (2011), "Design of A Smartgrid Management System with Renewable Energy Generation" , Paper presented at the Computational Intelligence Applications In Smart Grid (CIASG 2011, (IEEE Symposium on.
- Sharafi, M. and T. Y. Elmekkawy** (2014), "Multi-objective Optimal Design of Hybrid Renewable Energy Systems Using PSO-simulation Based Approach", Renewable Energy, 68(0),pp. 67-79.
- Tayyar, S. G; Roy, D. and S. Ghaderi** (2013), "Economic, Environmental And Social Responsible Supply Chain Design Using Differential Evolution Multi-Objective Algorithm", Paper presented at the 2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management.
- Yang, Z; Wu, R; Yang, J; Long, K. and P. You** (2016), "Economical Operation of Microgrid with Various Devices Via Distributed Optimization", IEEE Transactions on smart grid, 7(2),pp. 857-867.
- Zhang, D; Evangelisti, S; Lettieri, P. and L. G. Papageorgiou** (2016), "Economic And Environmental Scheduling of Smart Homes with Microgrid: DER Operation And Electrical Tasks" , Energy Conversion and Management, 110, pp.113-124.
- Zhao, B; Shi, Y; Dong, X; Luan, W. and J. Bornemann** (2014), "Short-Term Operation Scheduling in Renewable-Powered Microgrids: A Duality-Based Approach" , IEEE Transactions on Sustainable Energy, 5(1),pp. 209-217.
- Zhao, B; Zhang, X; Li, P; Wang, K; Xue, M. and C. Wang** (2014), "Optimal Sizing, Operating Strategy And Operational Experience of A Stand-Alone Microgrid on Dongfushan Island" , Applied Energy, 113, pp.1656-1666.
- Zhe, S; Yonggang, P. and W. Wei** (2014, 6-11 July 2014), "Optimal Sizing of DGs And Storage for Microgrid with Interruptible Load Using Improved NSGA-II" , Paper presented at the Evolutionary Computation (CEC), 2014 IEEE Congress on.