طراحی مدل زنجیره تأمین برق با رویکرد مدیریت شبکه هوشمند

فرشته پزشکی نجف آبادی[1*]، مسعود ربیعه[2]، مهدی بهمنی[3]

شرکت برق منطقه‌ای فارس دانشگاه اصفهان شرکت توزیع برق شهرستان اصفهان

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۲/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۳/۲۵

چکیده

وجود تلفات بسیار در زنجیره تأمین برق کنونی ایران باعث هدررفت بخش مهمی از سرمایه‌های ملی و اثرات سوء زیست محیطی می‌گردد. توسعه به‌کارگیری انرژی‌های سبز به‌عنوان منابع جدید انرژی و تجدید ساختار شبکه‌های برق می‌تواند زمینه مناسبی را جهت کاهش عمده تلفات و بهینه‌سازی زنجیره تأمین برق فراهم آورد. این مقاله بر شبکه هوشمند مابین خانه‌هایی که با سیستم برق خورشیدی متمرکز است و توانایی این سیستم را از حیث کاهش عمده تلفات با سیستم فعلی انتقال برق از منظر تحقیق در عملیات در قالب مدل‌های ریاضی مورد مقایسه قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: زنجیره تأمین برق، شبکه هوشمند، مدل ریاضی، انرژی سبز، کاهش تلفات

۱- مقدمه

تأمین برق مطمئن و اقتصادی از ضروریات شکوفایی اقتصادی جامعه و رشد صنعتی هر کشور می‌باشد و برای تحقق این امر تجدید ساختار صنعت برق و استفاده از منابع جدید انرژی ضروری به نظر می‌رسد. در سال‌های اخیر بازسازی زنجیره تأمین برق به موضوعی مهم در بیشتر کشورها و از جمله ایران تبدیل شده است[۱]. از جمله دلایل این مسئله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱-۱- توسعه کاربرد انرژی‌های سبز در جهان

به‌منظور رشد باثبات اقتصادی بدون اثرات مخرب زیست محیطی، توسعه انرژی‌های سبز (انرژی خورشیدی، انرژی باد، انرژی‌های داخل زمین و ...) به یک استراتژی مهم در جهان تبدیل شده است. انرژی‌های سبز از آن جهت که قابل تجدید هستند، دولت‌ها را از نیاز به منابع تمام شدنی سوخت‌های فسیلی بی نیاز می‌سازند. در عین حال بحران-های سیاسی، اقتصادی و مسائلی نظیر محدودیت دوام ذخایر فسیلی، نگرانی‌های زیست محیطی، ازدحام جمعیت، رشد اقتصادی و ضریب مصرف، همگی مباحث جهان‌شمولی هستند که با گستردگی تمام، فکر اندیشمندان را در یافتن راهکارهای مناسب برای حل مناسب معضلات انرژی در جهان به خود مشغول داشته است[۲]. در کشور ما نیز، با توجه به نیاز روز افزون به منابع انرژی و کم شدن منابع انرژی فسیلی، ضرورت سالم نگه داشتن محیط زیست، کاهش آلودگی هوا، محدودیت‌های برق‌رسانی و تأمین سوخت برای

۱*- کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی ، نویسنده پاسخگو، پست‌الکترونیکی: pezeshkee@gmail.com ، نشانی: شیراز، خیابان زند، شرکت برق منطقه ای فارس، معاونت منابع انسانی

۲- دکترای مدیریت گرایش تحقیق در عملیات، پست‌الکترونیکی: masood.rabieh@gmail.com

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد برق، پست‌الکترونیکی: mhdbahmani@gmail.com

نقاط و روستاهای دورافتاده، استفاده از انرژی‌های نو به‌ویژه انرژی خورشیدی جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است.

۱-۲- آزادسازی قیمت برق

از مهم‌ترین دلایل و انگیزه‌های تجدید ساختار و راه‌اندازی بازار برق در ایران، ایجاد فضای رقابتی در بخش‌های تولید و توزیع برق، تأمین منابع مورد نیاز از طریق حضور بخش غیردولتی در سرمایه‌گذاری، افزایش بهره‌وری اقتصادی و شفافیت هزینه‌ها در بخش‌های تولید، انتقال و توزیع است[۱]. شفافیت هزینه‌ها معضل تلفات را در زنجیره برق با وضوح بیشتری به سیاست‌گذاران نمایش می‌دهد و همین امر لزوم تجدید نظر در ساختار زنجیره تأمین برق را با جدیت بیشتر نمایان می‌سازد.

شبکه هوشمند یکی از جدیدترین مدل‌های زنجیره تأمین برق به‌شمار می‌آید که عملکرد مؤثرتر آن از لحاظ کاهش تلفات نسبت به شبکه‌های سنتی از نظر فنی به اثبات رسیده است. شبکه هوشمند، اجتماعی از زیرساخت‌های شبکه قدرت با شبکه گسترده مخابراتی است. این نوع شبکه امکان ارتباط دو طرفه را به‌منظور بهبود کارایی و قابلیت اطمینان سیستم و کاهش تلفات توان را فراهم می‌کند. این مقاله بر آن است تا از منظر تحقیق در عملیات و در قالب مدل‌های ریاضی به بررسی عملکرد این شبکه پرداخته و توانمندی آن را از جهت تأمین اثربخش انرژی برق صحه-گذاری نماید. بدین منظور شبکه‌ای فرضی متشکل از ۱۵ خانه مرتبط با هم که تعدادی از آنها از سیستم تولید برق خورشیدی برخوردار بوده و قادر به ارسال برق مازاد خود به سایر خانه‌ها هستند مورد بررسی قرار گرفته، ساختار مبادله انرژی بین این خانه‌ها از طریق حل مدل در نرم‌افزار لینگو مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در بخش ۲، وضعیت تولید و انتقال برق در کشور ایران مطرح شده و بخش‌های ۳ و ۴ به روش تحقیق و مدل-سازی ریاضی می‌پردازد. بخش ۵ در قالب تشریح پارامترهای مدل و حل مدل بیان شده و در بخش آخر نتیجه‌گیری آورده شده است.

۲- وضعیت تولید و انتقال انرژی برق در ایران

امروزه صنعت برق در ایران با مشکلات زیادی مواجه است، به‌عنوان مثال در حال حاضر در بخش تولید برق تنها ۴۰٪ از انرژی سوخت مورد استفاده در نیروگاه‌ها به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود و گرمای تلف شده نیز بازیابی نمی‌گردد. این روند تولید باعث به هدر رفتن بخش مهمی از سرمایه‌های ملی و آلودگی بسیار در محیط زیست می‌گردد. برای حل مشکلات اتلاف انرژی و آلودگی محیط زیست، بهره‌برداری از منابع جدید انرژی در دستور کار صنعت برق قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین این منابع انرژی خورشید است، خورشید به‌عنوان یک منبع بی‌پایان انرژی می‌تواند حل کننده مشکلات موجود در زمینه انرژی و محیط زیست باشد. کشور ایران از مناطق بسیار مستعد برای بهره‌گیری از انرژی خورشیدی می‌باشد. به‌طوری که میزان تابش متوسط روزانه آفتاب به ۴ کیلووات ساعت بر متر مربع می‌رسد و متوسط ساعات آفتابی از ۲۸۰۰ ساعت در سال بیشتر است[۳]. با وجود این موهبت طبیعی و با توجه به مزایای آشکار سیستم‌های فتوولتاییک[1] در مقایسه با مولدهای فسیلی، تولید انرژی از سلول‌های خورشیدی را می‌توان در فهرست گزینه‌های مناسب برای جایگزینی روش‌های سنتی قرار داد.

در بخش انتقال برق، ۱۵ درصد از خروجی توان نیروگاه‌ها در حین انتقال به مراکز مصرف در خطوط انتقال و توزیع برق تلف می‌شود. آمار بالای تلفات در شبکه‌های توزیع نیز نشان از هدررفت بخش مهمی از سرمایه‌های ملی است و باعث ایجاد هزینه‌های گزافی می‌گردد[۴]. شبکه برق فعلی ذاتاً دارای ارتباط یک طرفه می‌باشد و همین امر محدودیت‌های زیادی را برای کاهش تلفات در آن سبب گردیده است. در راستای بهینه‌سازی شبکه‌های فعلی نسلی جدید از شبکه‌ها با نام شبکه‌های هوشمند به‌وجود آمدند. در یک تعریف ساده می‌توان شبکه هوشمند را به‌صورت اجتماع زیرساخت‌های شبکه قدرت با شبکه گسترده مخابراتی بیان کرد. این نوع شبکه امکان ارتباط دو طرفه را به‌منظور بهبود کارایی و قابلیت اطمینان سیستم و کاهش تلفات توان را فراهم می‌کند. اصلی‌ترین هدف این شبکه‌ها تأمین برق مطمئن با کمترین خسارت به محیط زیست و در عین حال بهبود اتلاف انرژی می‌باشد[۵]. با استفاده از مولدهای خورشیدی در شبکه هوشمند می‌توان تلفات انرژی که ناشی از تلفات خطوط انتقال می‌باشد را به‌میزان قابل ملاحظه‌ای کم کرد. مبحث کاهش تلفات یکی از مباحث مهم در جلوگیری از اتلاف انرژی در کشور است، بر این اساس در برنامه‌های مختلف دولت (قانون پنجم توسعه

1- photovoltaic systems

و قانون هدفمند کردن یارانه‌ها) کاهش تلفات از الزامات وزارت نیرو بوده است.

۳- مورد مطالعه و روش تحقیق

طرح مورد بررسی در این مقاله دربرگیرنده ۳ عنصر است:

الف) خانه مشترک

ب) تجهیزات تولید برق در هر خانه

ج) اتصالات برق بین خانه‌ها.

شبکه‌ای فرضی متشکل از ۱۵ خانه در روستای رامشه از توابع بخش جرقویه علیا در استان اصفهان مورد نظر می‌باشد. مسافت زیاد روستای مذکور از نیروگاه (حدود۳۰۰کیلومتر خط انتقال) باعث ایجاد تلفات انرژی فراوان در این مسیر شده و از سوی دیگر قرار گرفتن روستا در حاشیه کویر مرکزی ایران منجر به برخورداری آن از میزان بسیار بالای تابش‌های خورشیدی در سطح کشور می‌گردد. خانه‌ها همگی بهم مرتبط بوده و تعدادی از آنها از سیستم تولید برق خورشیدی برخوردارند. فرض بر این است که تولید خانه‌های برخوردار از سیستم تولید خورشیدی، یکسان و مصرف کلیه خانه‌ها متفاوت از یکدیگر باشد. روش تحقیق در این مدل از نوع تحلیلی- مقایسه‌ای و به‌طور خاص از نوع مدل‌سازی ریاضی می‌باشد.

۴- مدل‌سازی ریاضی

چگونگی تأمین برق خانه‌ها با هدف حداقل کردن تلفات شبکه در دو مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل‌ها به مسئله حمل و نقل شبیه هستند. در مسائل حمل و نقل چگونگی تحویل کالا از هر کارخانه به هر مشتری با حداقل نمودن تابع هدف‌هایی چون مسافت کل تحویل، هزینه کل تحویل و... جستجو می‌شود. این مدل‌های ریاضی اقتباسی از مدل‌های مطرح شده توسط موتارا و کاتایاما می‌باشند[۶]. مدل اول شبکه سنتی (رایج) انتقال برق و مدل دوم شبکه پیشنهادی را جهت ۱۵خانه مطرح می‌نمایند.

۴-۱- مدل سنتی تولید و انتقال برق

به‌دلیل بالا بودن ریسک حوادث ناخواسته در نیروگاه‌ها؛ این مراکز تولید در فاصله دور از شهرها احداث می‌گردند و متعاقباً این بعد مسافت باعث بروز تلفات در شبکه‌های انتقال می‌گردد. یکی از راهکارهای کاهش تلفات در این حالت، انتقال برق با ولتاژهای بالا در مسیر است که با کاهش پله‌ای ولتاژ در ایستگاه‌های بین راه، برق با ولتاژ مناسب در اختیار مصرف کننده نهایی قرار می‌گیرد. در این مدل ۱۵ خانه مورد نظر تنها از منبع نیروگاه تغذیه و فاقد هرگونه سیستم تولید برق می‌باشند. قبل از تشریح مدل در جدول (۱) تعریف اندیس، متغیرها و پارامترهای مدل آمده است.

جدول (۱): تعریف اندیس، متغیرها و پارامترهای مدل ۱

اندیس	i: خانه
متغیرها	s_i: انرژی تأمین شده از نیروگاه برای خانه i r_i: انرژی دریافتی خانه i از نیروگاه l_i: تلفات انتقال از نیروگاه به خانه i
پارامترها	c_i: انرژی مصرفی هر خانه d_i: فاصله بین نیروگاه و خانه i R_i: مقاومت الکتریکی خطوط بین نیروگاه و خانه i V: ولتاژ انرژی تأمین شده از نیروگاه N: تعداد خطوط الکتریکی

تابع هدف: حداقل کردن مقدار کل انرژی تولید شده و مقدار کل مسافت بین نیروگاه و مشترک خانگی

$$\min Z = \sum_i^n s_i d_i (i=1,\ldots,n) \quad (۱)$$

- معادله میزان انرژی مصرفی

$$C_i = f(t) \quad (۲)$$

- معادلات مربوط به انرژی تأمین شده و انرژی دریافت شده: انرژی دریافتی برابر است با تفاوت بین انرژی تأمین شده و تلفات انتقال

$$r_i = s_i - l_i \quad (۳)$$

جمع انرژی تأمین شده توسط نیروگاه برای کلیه خانه‌ها کمتر است از کل انرژی تولیدی نیروگاه

$$\sum_i^n s_i \le p \quad (۴)$$

انرژی مصرفی هر خانه کمتر است از انرژی دریافتی آن خانه

$$r_i \ge c_i \quad (۵)$$

معادله مربوط به تلفات انتقال

$$l_i = \frac{NR_i d_i s_i^2}{V^2} \quad (۶)$$

۴-۲- مدل پیشنهادی تولید و انتقال برق

در این مدل خانه‌ها دارای تجهیزات تولید برق هستند. در صورتی‌که خانه‌ای اضافه تولید داشته باشد، آن را به خانه‌های

دارای کمبود عرضه می‌کند. هم‌چنین در صورتی‌که مقدار کل تولید خانه‌ها از مقدار کل مصرف آنها کمتر باشد، میزان کمبود از طرف نیروگاه جبران می‌شود. قبل از تشریح مدل در جدول (۲) تعریف اندیس، متغیرها و پارامترهای مدل آمده است.

جدول (۲): تعریف اندیس،متغیرها و پارامترهای مدل ۲

اندیس	j,i: تجهیز
متغیرها	s_{ij}: انرژی تأمین شده از تجهیز i به تجهیز j r_{ij}: انرژی دریافتی تجهیز i از تجهیز j l_{ij}: تلفات انتقال از تجهیز i به تجهیز j
پارامترها	c_i: انرژی مصرفی تجهیز i p_i: انرژی تولیدی تجهیز i p_0: انرژی تولیدی نیروگاه d_{ij}: فاصله بین تجهیز i و تجهیز j R_{ij}: مقاومت الکتریکی خطوط بین تجهیز i و تجهیز j V_i: ولتاژ انرژی تأمین شده از تجهیز i C_i: ظرفیت سیستم برق خورشیدی خانه i S: میزان تشعشع خورشیدی T_b: تعداد روزها در ماه b N: تعداد خطوط الکتریکی

- تابع هدف: حداقل کردن مقدار کل انرژی تولید شده و مقدار کل مسافت بین تجهیزات

$$\min Z' = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=1}^{n} s_{ij}d_{ij} \quad (۷)$$

- معادلات میزان انرژی مصرفی

$$C_0 = 0 \qquad (۸)$$
$$C_i = f(t)(i = 1, \dots, \mathrm{n})$$

مدل ۱:

$$\min Z = \sum_{i}^{\mathrm{n}} s_i d_i$$
$$C_i = f(t)$$
$$r_i = s_i - l_i$$
$$\sum_{i}^{\mathrm{n}} s_i \le \mathrm{p}$$
$$r_i \ge c_i$$
$$l_i = \frac{NR_i d_i s_i^2}{v^2}$$

- معادلات انرژی تولید شده

$$p_i \le p_0 \qquad (۹)$$
$$p_{ib} = C_i ST_b(1-l_1)..(1-l_a)\dots(1-l_{\mathrm{m}}) \qquad (۱۰)$$
$$p_i = \sum_{b=1}^{12} p_{ib} \ (i = 1, \dots, \mathrm{n}) \qquad (۱۱)$$

- معادلات مربوط به انرژی تأمین شده و انرژی دریافت شده انرژی دریافتی برابر است با تفاوت بین انرژی تأمین شده و تلفات انتقال

$$r_{ij} = s_{ij} - l_{ij} \qquad (۱۲)$$

جمع انرژی تأمین شده توسط خانه i برای سایر خانه‌ها کمتر است از تفاضل انرژی تولیدی و مصرفی خانه i

$$\sum_{j\in\{j|p_i-c_i\le 0\}}^{\mathrm{n}} s_{ij} \le p_i - c_i \ (i \in \{i|p_i - c_i \ge 0\}) \qquad (۱۳)$$

جمع انرژی دریافت شده توسط خانه j از سایر خانه‌ها بیشتر است از تفاضل انرژی تولیدی و مصرفی خانه j

$$\sum_{i\in\{i|p_i-c_i\ge 0\}}^{\mathrm{n}} r_{ij} \le c_j - p_j \ (j \in \{j|p_i - c_i \le 0\}) \qquad (۱۴)$$

- معادله مربوط به تلفات انتقال

$$l_{ij} = NR_{ij}d_{ij}\left(\frac{s_{ij}}{v_i}\right)^2 \qquad (۱۵)$$

مدل ۲:

$$\min Z' = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=1}^{n} s_{ij}d_{ij}$$

$$p_i \le p_0$$
$$p_i = \sum_{b=1}^{12} p_{ib} (i = 1, \dots, \mathrm{n})$$
$$p_{ib} = C_i ST_b(1-l_1)..(1-l_a)\dots(1-l_{\mathrm{m}})$$

$$C_i = f(t)$$
$$C_0 = 0$$
$$r_{ij} = s_{ij} - l_{ij}$$

$$\sum_{j\in\{j|p_i-c_i\le 0\}}^{\mathrm{n}} s_{ij} \le p_i - c_i \ (i \in \{i|p_i - c_i \ge 0\})$$

$$\sum_{i\in\{i|p_i-c_i\ge 0\}}^{\mathrm{n}} r_{ij} \le c_j - p_j \ (j \in \{j|p_i - c_i \le 0\})$$
$$l_{ij} = NR_{ij}d_{ij}\left(\frac{s_{ij}}{v_i}\right)^2$$

جدول (۳): شرایط انتقال برق از نیروگاه به خانه‌ها

تجهیز	ولتاژ V	مقاومت Ω/km	مسافت km
نیروگاه زواره			
	۲۳۰۰۰۰	۰,۰۳۰۴	۹۰
پست نایین			
	۶۳۰۰۰	۰,۱۵۹	۱۰۰
پست ورزنه			
	۲۰۰۰۰	۰,۳۳۵	۱۱۰
پست توزیع			
	۲۲۰	۱,۳	۰,۵
خانه‌ها			

جدول (۴): انرژی تولیدی ماهانه هر خانه

ماه شمسی	تعداد روزهای ماه	میانگین انرژی دریافتی از خورشید kWh/ m^2 / day	ظرفیت سیستم برق خورشیدی (kWh)	تلفات (درصد)	انرژی تولیدی سیستم در ماه (kWh)
فروردین	۳۱	۵,۶۵	۵	۱۵	۶۷۰
اردیبهشت	۳۱	۵,۹۵	۵	۱۵	۷۰۵,۵
خرداد	۳۱	۶,۲۱	۵	۱۵	۷۳۶,۳۵
تیر	۳۱	۵,۹۸	۵	۱۵	۷۰۹,۰۸
مرداد	۳۱	۶,۱۸	۵	۱۵	۷۳۲,۸
شهریور	۳۱	۶,۲۲	۵	۱۵	۷۳۷,۵
مهر	۳۰	۵,۶۷	۵	۱۵	۶۵۰,۶
آبان	۳۰	۴,۷۱	۵	۱۵	۵۴۰,۴۷
آذر	۳۰	۴,۳۷	۵	۱۵	۵۰۱,۴۶
دی	۳۰	۴,۵۴	۵	۱۵	۵۲۱
بهمن	۳۰	۵,۶۲	۵	۱۵	۶۴۵
اسفند	۲۹	۵,۵۳	۵	۱۵	۶۱۳,۴۲

۵- تحلیل مدل‌ها

در این بخش مدل سنتی به‌عنوان مدل (۱) و مدل پیشنهادی به‌عنوان مدل (۲) مطرح می‌شود. صورت کلی هر مدل در زیر آمده است. از طریق نرم‌افزار لینگو، این دو مدل حل شده و توانایی آنها از حیث کاهش تلفات با یکدیگر مقایسه می‌شود[۷].

۵-۱- پارامترها

در این بخش مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل‌ها ارائه می‌شود.

۵-۱-۱- شرایط انتقال برق از نیروگاه به خانه‌ها

نیروگاه مورد نظر نیروگاه زواره در حومه شهر زواره از توابع شهرستان اردستان است. ساختار ارسال برق از نیروگاه به گروه خانه‌ها در جدول (3) آمده است. برق از ایستگاه‌های انتقال گذشته و در نهایت از ایستگاه توزیع به سمت خانه‌ها فرستاده می‌شود.

۵-۱-۲- انرژی تولیدی و مصرفی خانه‌ها

مهم‌ترین پارامتری که در شرایط مختلف جغرافیایی بر روی ظرفیت پانل‌های برق خورشیدی تأثیر می‌گذارد متوسط تابش روزانه آفتاب در یک منطقه بر حسب ساعت

است. خوشبختانه از این لحاظ ایران کشوری است که بیشتر روزهای سال را آفتابی می‌گذراند و متوسط سالانه روزهای آفتابی در ایران به خصوص مناطق مرکزی بسیار بالاست. پانل‌ها بایستی در جهت جنوب غربی جغرافیایی با زاویه‌ای در حدود ۵۷ درجه نسبت به افق نصب گردند. میزان راندمان پانل‌های فتوولتائیک بستگی به مکان، جهت‌یابی و شرایط آب و هوایی دارد. البته تجهیزات سیستم تولید برق خورشیدی نیز دارای تلفات می‌باشند که این تلفات ناشی از باطری‌ها و اینورترهای این سیستم می‌باشند. تلفات تجهیزات فعلی در حدود ۱۵درصد می‌باشد. در جدول (۴) میانگین انرژی دریافتی در زاویه نصب ۵۷ درجه در جهت جغرافیایی جنوب غرب شهر اصفهان آمده است[۸]. انرژی تولیدی ماهیانه هر خانه بر مبنای داده‌های جدول براساس معادله ۱۰ محاسبه شده است.

انرژی مصرفی خانه‌ها از توزیع یکنواخت بر مبنای ۵۰± درصد میانگین سالانه مصرف برق خانوارهای ایرانی در سال ۸۹ به میزان ۲۸۹۴ کیلو وات ساعت به‌دست آمده است[۹]. برق تولیدی سالیانه نیز از جمع کل ستون آخر جدول (۴) به‌دست آمده است. ارتباط بین تولید و مصرف خانه‌ها در جدول (۵) آورده شده است. با توجه به اینکه تنها ۵ خانه از مجموع ۱۵ خانه مورد نظر امکان تولید برق خورشیدی را دارند و میزان تولید هر یک نیز از میزان مصرف خودش بیشتر است هر ۵ خانه به‌عنوان عرضه کننده برق به سایر خانه‌ها در نظر گرفته می‌شوند.

جدول (۵): رابطه بین تولید و مصرف هر خانه در طول سال

شماره خانه	(۱) انرژی مصرفی	(۲) انرژی تولیدی	(۳) (۲)-(۱)	اضافه یا کمبود
۱	۱۷۳۸,۰۴	۰	-۱۷۳۸,۰۴	کمبود
۲	۳۵۶۷,۲۷	۷۷۶۳,۲۵	۴۱۹۵,۹۸	اضافه
۳	۲۰۹۹,۳۴	۰	-۲۰۹۹,۳۴	کمبود
۴	۲۰۸۷,۷۹	۰	-۲۰۸۷,۷۹	کمبود
۵	۳۲۱۲,۶	۰	-۳۲۱۲,۶	کمبود
۶	۴۲۰۷,۷۸	۷۷۶۳,۲۵	۳۵۵۵,۴۷	اضافه
۷	۲۱۳۲,۵۹	۷۷۶۳,۲۵	۵۶۳۰,۶۶	اضافه
۸	۲۴۲۶,۶۷	۰	-۲۴۲۶,۶۷	کمبود
۹	۳۴۵۱,۵۴	۰	-۳۴۵۱,۵۴	کمبود
۱۰	۳۵۸۳,۷۷	۷۷۶۳,۲۵	۴۱۷۹,۴۸	اضافه
۱۱	۳۴۰۲,۹۷	۰	-۳۴۰۲,۹۷	کمبود
۱۲	۱۷۳۵,۱۲	۰	-۱۷۳۵,۱۲	کمبود
۱۳	۳۹۵۵,۴۹	۷۷۶۳,۲۵	۳۸۰۷,۷۶	اضافه
۱۴	۲۴۶۳,۴۶	۰	-۲۴۶۳,۴۶	کمبود
۱۵	۱۹۹۱,۱۳	۰	-۱۹۹۱,۱۳	کمبود

جدول (۶): مسافت (فرضی) بین خانه‌ها (m)

به / از	۱	۳	۴	۵	۸	۹	۱۱	۱۲	۱۴	۱۵
۲	۱۰	۱۰	۲۰	۳۰	۳۰	۲۰	۴۰	۵۰	۷۰	۸۰
۶	۵۰	۳۰	۲۰	۱۰	۷۰	۶۰	۴۰	۳۰	۳۰	۴۰
۷	۶۰	۴۰	۳۰	۲۰	۸۰	۷۰	۵۰	۴۰	۲۰	۳۰
۱۰	۴۰	۲۰	۳۰	۴۰	۲۰	۱۰	۱۰	۲۰	۴۰	۵۰
۱۳	۷۰	۵۰	۴۰	۳۰	۵۰	۴۰	۲۰	۱۰	۱۰	۲۰

جدول (۷): نتایج به‌دست آمده از مدل‌ها(kWh)

مدل	(۱) انرژی تأمین شده	(۲) انرژی دریافتی	تلفات انتقال برق (۲)-(۱)
۱	۴۶۵۲۰	۴۲۰۵۵	۴۴۶۵
۲	۲۴۸۴۰	۲۴۶۰۵	۲۳۵

جدول (۸): طرح انتقال برق به‌دست آمده از حل مدل۲($\times 10^3 kWh$)

به / از	۱	۳	۴	۵	۸	۹	۱۱	۱۲	۱۴	۱۵	جمع کل
۲	۰,۸۴	۰,۸۲	۰,۴۸	۰,۲۷	۰,۴۷	۰,۵۳	۰,۳۸	۰,۱۲	۰,۱۴	۰,۱۵	۴,۱۹
۶	۰,۱۳	۰,۲۰	۰,۵۰	۱,۱۶	۰,۲۳	۰,۱۷	۰,۳۹	۰,۲۰	۰,۲۵	۰,۳۳	۳,۵۵
۷	۰,۳۱	۰,۴۷	۰,۵۲	۱,۱۲	۰,۳۶	۰,۲۶	۰,۴۴	۰,۴۷	۱,۰۶	۰,۶۱	۵,۶۳
۱۰	۰,۱۱	۰,۲۵	۰,۱۶	۰,۱۹	۰,۸۱	۰,۸۰	۱,۳۱	۰,۲۵	۰,۱۶	۰,۱۶	۴,۱۸
۱۳	۰,۰۳	۰,۰۴	۰,۱۱	۰,۱۵	۰,۲۳	۱,۳۷	۰,۵۶	۰,۳۶	۰,۵۴	۰,۴۳	۳,۸۰
نیروگاه	۰,۳۴	۰,۳۶	۰,۳۵	۰,۳۶	۰,۳۳	۰,۳۵	۰,۳۶	۰,۳۳	۰,۳۶	۰,۳۴	۳,۴۹
جمع کل	۱,۷۵	۲,۱۳	۲,۱۱	۳,۲۵	۲,۴۳	۳,۴۸	۳,۴۴	۱,۷۴	۲,۵۰	۲,۰۱	۲۴,۸۴

۵-۱-۳- فاصله بین خانه‌ها

جدول (۶) فاصله بین خانه‌های عرضه کننده برق و خانه‌های متقاضی برق را نشان می‌دهد.

۵-۲- حل مدل‌ها

جدول (۷) نتایج هر مدل را نشان می‌دهد. تلفات به‌دست آمده در مدل (۲)؛ ۹۵ درصد کمتر از تلفات مدل (۱) می‌باشد. علت آن است که کل فاصله ارسال برق از طریق کاهش میزان کل برق تأمین شده از نیروگاه کوتاه‌تر شده است. جدول (۸) طرح انتقال برق بین نیروگاه و خانه‌ها و مابین خود خانه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تبادل برق بین خانه‌های نزدیک بهم صورت گرفته و عمده تأمین برق خانه‌های متقاضی انرژی از طریق خانه‌های عرضه کننده به‌جای نیروگاه صورت گرفته است.

۶- نتیجه گیری

با به‌کارگیری مدل شبکه هوشمند (مدل پیشنهادی) برنامه‌ریزی مسیریابی جزئی بین خانه‌ها امکان‌پذیر گشته و اتلاف انرژی در شبکه انتقال به میزان بسیار زیادی کاسته شده است. قابل ذکر است که میزان تلفات به‌دست آمده در این مدل‌ها صرفاً مربوط به شبکه انتقال بوده و داده‌های مربوط به کاهش تلفات در بخش تولید ارائه نشده است. شبکه هوشمند به‌عنوان یکی از سیستم‌های جدید مدیریت زنجیره تأمین برق، لازم است با تأکید بیشتری در دستور کار

سیاست‌گذاران صنعت برق ایران قرار گرفته و سرمایه‌گذاری در آن با حمایت و جدیت بیشتری مورد پیگیری قرار گیرد.

منابع

[1] www.sabainfo.ir

[2] Lund, H., "***Renewable energy strategies for sustainable development***" , International Journal of Energy, Vol. 32, No. 6, pp. 912-919, 2007.

[۳]. معینی، س.، جوادی، ش.، کوکبی، م.، "***برآورد تابش کلی خورشیدی در ایران با استفاده از یک مدل بهینه***" ، نشریه انرژی ایران،دوره ۱۳، شماره ۲، صفحات ۱۲-۳، سال ۱۳۸۹.

[۴]. وزارت نیرو، معاونت امور برق و انرژی، "***ترازنامه انرژی سال ۱۳۸۹***" ، زمستان ۱۳۹۰.

[5] Potter,C.W., Westrick, K., "***Building a smarter smart grid through better renewable energy***" , Proceeding of IEEE International Conference on Power Systems,pp.1-5,2009.

[6] Murata, K., Katayama, H., "***Design of Effective Electric Power Supply Chain for Smart Grid Management***", Proceeding of International Conference on SCM, March 8-10, 2012, Tokyo, Japan.

[7]. LINDO System, (ed.), A User Manual for Lingo Ver.7.0, LINDO System Inc. Chicago, 2001.

[۸] بیرژندی، م.، سرجویی، ع.، شمس سولاری ا.، "***امکان‌سنجی و توجیه اقتصادی استفاده از سیستم فتوولتاییک در شهر اصفهان***"، هفدهمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق، ۱۲ و ۱۳ اردیبهشت۱۳۹۱.

[۹].شرکت توانیر، "***آمار تفصیلی صنعت برق ایران ویژه توزیع نیروی برق در سال ۱۳۸۹***"، شهریور ۱۳۹۰.