

برنامه‌ریزی انرژی الکتریکی شهری با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی (مطالعه موردی کلان‌شهرهای تهران و اصفهان)

بابک صفاری^{۱*}، بهار سالاروند^۲، نعمت‌الله اکبری^۳، ناصر یارمحمدیان^۴

۱. استادیار گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان، b_saffari@ase.ui.ac.ir

۲. کارشناسی ارشد، گروه اقتصاد شهری دانشگاه هنر اصفهان، bahar.salarvand@gmail.com

۳. استاد گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان، n.akbari@ase.ui.ac.ir

۴. استادیار گروه اقتصاد شهری، دانشکده اقتصاد و کارآفرینی، دانشگاه هنر اصفهان،

naser.yarmohamadian@yahoo.com

نوع مقاله: علمی پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۵

چکیده

این مقاله، یک روش برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر کاپولا ارائه می‌کند که قادر به تعیین مقادیر بهینه استفاده از منابع اولیه انرژی و فناوری‌های مختلف در تأمین انرژی الکتریکی موردنیاز می‌باشد. در این مدل عدم قطعیت ناشی از متغیرهای تصادفی در قالب سناریوهای مختلف ارائه و تعاملات بین متغیرهای تصادفی با استفاده از توابع کاپولا با توزیع احتمالات مختلف نشان داده شده و سپس، براساس رویکرد توسعه یافته‌ی روش مذکور، برنامه‌ریزی سیستم انرژی شهری برای کلان‌شهرهای تهران و اصفهان پیشنهاد گردیده است. نتایج به دست آمده از حل مدل حاکی از عدم انطباق روند فعلی استفاده از فناوری‌ها با نتایج بهینه‌سازی می‌باشد و نشان می‌دهد در هر دو شهر فناوری خورشیدی در مقایسه با فناوری‌های سیکل ترکیبی، گازی و بخاری در تأمین بخشی از تقاضای برق از لحاظ اقتصادی و زیست محیطی مقرون به صرفه‌تر می‌باشد و می‌بایست در سیاست‌های سرمایه‌گذاری در اولویت قرار گیرد. به‌منظور جبران کمبود عرضه، باقیمانده انرژی الکتریکی نیز می‌بایست توسط شبکه برق تأمین گردد که در مقایسه با وضعیت موجود با همان هزینه سرمایه‌ای، میزان آلاینده‌گی کاهش خواهد یافت.

طبقه‌بندی JEL: C02, L11, Q40, R00

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی انرژی، برنامه‌ریزی تصادفی، کاپولا

۱- مقدمه

در دهه‌های گذشته، جهان با افزایش تقاضای انرژی مواجه بوده است. مصرف انرژی جهانی در سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۰۰ به میزان ۲,۳ درصد افزایش یافته و پیش‌بینی می‌شود که در سال‌های ۲۰۵۰-۲۰۳۵ به ۰,۹ درصد کاهش یابد. با این وجود بیش از ۷۵ درصد کل منابع انرژی هنوز وابسته به سوخت‌های فسیلی (زغال سنگ، گاز و نفت) می‌باشد (چشم‌انداز انرژی^۱، ۲۰۱۷). در همین حال، سرمایه‌گذاری‌های زیربنایی و انتشار آلاینده‌ها در ارتباط با صنعت برق اثرات نامطلوبی بر محیط‌زیست دارد. به‌عنوان مثال، طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)^۲، حدود ۶,۵ میلیون مرگ و میر سالانه به کیفیت پایین هوا نسبت داده می‌شود و این امر چهارمین عامل خطرناک برای سلامت انسان در سراسر جهان، پس از فشار خون بالا، خطرات رژیم غذایی و سیگار کشیدن به‌شمار می‌رود (آژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۱۶). بخش انرژی، یک موتور پیشرفت اقتصادی و اجتماعی است، اما در عین حال بزرگ‌ترین منبع آلودگی هوا ناشی از فعالیت‌های انسانی، احتراق سوخت‌های فسیلی و انرژی زیستی می‌باشد. بر این اساس، بخش انرژی باید در خط مقدم هر گونه استراتژی برای بهبود کیفیت هوا باشد و در حقیقت، چنین ملاحظاتی به‌طور فزاینده‌ای سبب توجه به سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی در بسیاری از کشورها می‌شود؛ بنابراین، چگونگی به تعادل رسیدن این تناقض بین قابلیت اطمینان عرضه-تقاضای انرژی و بهبود کیفیت هوا به‌طور مؤثر، همچنان چالش بزرگی است که با تصمیم‌گیری‌ها مواجه می‌شود (یو^۳ و همکاران، ۲۰۱۷). از سویی طبق گزارش وضعیت محیط‌زیست ایران، کیفیت هوای شهرهای تهران و اصفهان، طی دوره ۱۳۹۲-۱۳۸۶ بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ روز در یکی از شرایط ناسالم و یا خطرناک قرار داشته که مصرف انرژی بیشترین سهم از انتشار گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص داده و این امر موجب شده است کلان‌شهرهای تهران و اصفهان در ردیف آلوده‌ترین شهرهای ایران قرار بگیرند، بنابراین سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی در حوزه انرژی شهری امری مهم و غیرقابل اجتناب است (گزارش ملی وضعیت محیط‌زیست ایران، ۱۳۹۴).

1. Bp Energy Outlook
2. International Energy Agency
3. Yu

۲- ادبیات و پیشینه تحقیق

توجه جدی و گسترده به برنامه‌ریزی انرژی در جهان را می‌توان به افزایش قیمت نفت در دهه ۱۹۷۰ میلادی نسبت داد. بحران نفتی و وابستگی زیاد کشورها به‌ویژه کشورهای توسعه‌یافته به سوخت‌های فسیلی نظیر نفت و گاز طبیعی، توجه به سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی را دوجندان کرده است. هم‌چنین توجه به امنیت انرژی کشورها، شکل‌گیری بازارهای انرژی و تبادلات منطقه‌ای انرژی، متنوع‌سازی منابع انرژی به‌ویژه استفاده از منابع تجدیدپذیر و نو و چالش‌های جهانی ناشی از انتشار آلاینده‌های محیط‌زیست و گازهای گلخانه‌ای در جهان، متخصصان و سیاست‌گذاران حوزه انرژی را به این مهم واداشته است که با دقت و اهمیت بیشتری به مسئله برنامه‌ریزی انرژی بپردازند. با گذشت زمان و مطرح شدن مفاهیم مربوط به توسعه‌ی پایدار، برنامه‌ریزی انرژی در سطوح ملی و بین‌المللی، جایگاه و اهداف خود را در راستای توسعه‌ی پایدار، یعنی ابعاد اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و نهادی قرار داده است (گلایل، ۱۹۹۸).

در این راستا یو^۱ و همکاران (۲۰۱۸)، در مطالعه‌ی خود یک روش برنامه‌ریزی تصادفی انعطاف‌پذیر مبتنی بر کاپولا برای برنامه‌ریزی سیستم انرژی منطقه‌ای را طراحی کردند که می‌توانست با عدم اطمینان چندگانه‌ای که به‌صورت مقادیر بازه‌ای، متغیرهای تصادفی و مجموعه‌های فازی و هم‌چنین ترکیبات آنها بیان شده است، مقابله کند. ادتایو^۲ و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از برنامه‌ریزی محدودیت‌شانس یک روش یکپارچه برای برنامه‌ریزی سیستم‌های توزیع برق و گاز طبیعی، برای دستیابی به قابلیت اطمینان از تأمین گاز طبیعی برای تولید برق ارائه کرده‌اند. نتایج نشان داده است که رویکرد برنامه‌ریزی یکپارچه در مقایسه با یک رویکرد برنامه‌ریزی سنتی، یک سیستم ارزان‌تر و قابل اطمینان‌تر است. در مطالعه‌ی دیگر لی^۳ و همکاران (۲۰۱۰)، یک مدل برنامه‌ریزی انرژی تصادفی فازی دومرحله‌ای تحت شرایط عدم قطعیت چندگانه برای سیستم‌های انرژی و محیط‌زیست پیشنهاد کرده‌اند. نتایج این پژوهش حاکی از تطابق میان الگوهای تخصیص منابع انرژی، تحلیل توازن هزینه‌های سیستمی، فرموله‌کردن سیاست‌های محلی با توجه به مصرف انرژی و درجه رضایت و ملزومات زیست‌محیطی

1. Yu

2. Odetayo

3. Li

تحت شرایط عدم قطعیت چندگانه می‌باشد. اکبری^۱ و همکاران (۲۰۱۱)، به بیان یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای برای برنامه‌ریزی سیستم‌های انرژی پرداخته‌اند که قادر به تسهیل پیچیدگی‌های مؤثر بر برنامه‌ریزی از جمله تعادل بین کاهش آلاینده‌های زیست محیطی و هم‌چنین کاهش هزینه‌ها بوده است. در این تحقیق از روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای تولید سناریوهای مختلف استفاده شده است. براکتر^۲ و همکاران (۱۹۹۷)، یک مدل بهینه‌سازی پویای انرژی را برای آنالیز رقابت و ترکیبی بهینه از فناوری‌های تبدیل انرژی، جهت استفاده منطقی انرژی و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به کار برده‌اند. مدل، یک ابزار انعطاف‌پذیر را فراهم می‌کند که می‌تواند از تصمیمات سرمایه‌گذاری در هنگام ساخت و ساز مجدد سیستم‌های شهری پشتیبانی کند. صفاری و همکاران (۱۳۹۵)، در پژوهش خود با عنوان "برنامه‌ریزی عرضه بهینه انرژی پایدار با استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی"، موضوع تداوم عرضه انرژی، امکان دسترسی بلندمدت به منابع و کاهش انتشار آلاینده‌ها از بعد محلی را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که سهم تولید فناوری‌های خورشیدی و بادی باید در بازه زمانی ۱۰ سال آینده به ۸ درصد مصرف کل برسد و از توان شبکه برق سراسری برای جبران کمبود تولید برق استفاده شود. صفاری و همکاران (۱۳۹۱)، به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی بازه‌ای چند مرحله‌ای که توانایی مشخص کردن مقادیر بهینه استفاده شده از منابع اولیه انرژی و فناوری‌های مختلف در تأمین انرژی الکتریکی موردنیاز در کشور ایران را دارد، پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد در بیشتر موارد، روند استفاده از فناوری‌های تولید توان الکتریکی در کشور ایران از بازه‌های بهینه به دست آمده، منطبق با روند بهینه نیست و با مقادیر بهینه در سناریوهای مختلف فاصله داشته است. بخرد و همکاران (۱۳۹۰)، یک مدل بهینه عرضه انرژی برای کشور ایران با استفاده از برنامه‌ریزی دومرحله‌ای پویا و رویکرد برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را ارائه کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، می‌تواند یک راه‌حل متناسب با محیط‌زیست تلقی شود و برای توسعه تولید برق در میان سوخت‌های فسیلی، گاز طبیعی بهترین گزینه می‌باشد.

1. Akbari
2. Bruckner

۳- روش تحقیق

۳-۱- مدل برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر کاپولا (CSP)

کاپولا اولین بار توسط اسکالر در سال ۱۹۵۹ مورد استفاده قرار گرفته است. این رویکرد مبتنی بر ارتباط و وابستگی غیرخطی بین متغیرها بوده و با اتصال مجموعه‌ای از توابع احتمال تجمعی حاشیه‌ای تک متغیره به یکدیگر، یک تابع احتمال تجمعی چند متغیره را تولید می‌کند. براساس مدل ارائه شده توسط نلسون، چارنز و همکاران، اینفنگر و موتن^۱، یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر کاپولا (CSP) را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\text{Min} E = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (1)$$

Subject to:

$$\text{pr}\{\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i^n, i = 1, 2, \dots, k\} \geq 1 - p \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i, i = k + 1, k + 2, \dots, m \quad (3)$$

$$x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

که E یک تابع هدف خطی است، x_j متغیرهای تصمیم هستند، $b_i^n, i = 1, 2, \dots, k$ متغیرهای تصادفی با توزیع احتمالی ناشناخته هستند، a_{ij} و b ضرایب محدودیت هستند، $1 - p$ یک سطح احتمالی مشترک است که در آن همه محدودیت‌های احتمالی اعمال شده است.

بر اساس مدلی که توسط چن و همکاران پیشنهاد شده، محدودیت شانس مشترک می‌تواند به محدودیت‌های شانس فردی تبدیل شود که به شرح زیر می‌باشد:

$$\text{pr}\{\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i^n\} \geq 1 - p, i = 1, 2, \dots, k \quad (5)$$

$$C(1 - p_1, 1 - p_2, \dots, 1 - p_k) = 1 - p \quad (6)$$

C بهترین کاپولا می‌باشد که از قبل تعیین شده است؛ و $p_i = (i = 1, 2, \dots, k)$

سطوح نقض احتمالی برای محدودیت شانس فردی هستند؛

با توجه به مدل توسعه داده شده توسط چارنز و کوپر، محدودیت (۵) را می‌توان

به صورت زیر تبدیل کرد:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i^{p_i}, i = 1, 2, \dots, k \quad (7)$$

بنابراین، روش CSP تعریف شده در مدل (a1) را می‌توان به صورت ذیل تغییر داد:

$$\text{Min} E = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (۸)$$

Subject to:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i^n, i = 1, 2, \dots, k \quad (۹)$$

$$C(1 - p_1, 1 - p_2, \dots, 1 - p_k) = 1 - p \quad (۱۰)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i, i = k + 1, k + 2, \dots, m \quad (۱۱)$$

$$x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (۱۲)$$

که $b_i^{p_i} = F_i^{-1}(p_i)$ از تابع توزیع تجمعی b_i (i.e. $F_i(b_i)$) و احتمال نقض محدودیت i (i.e. p_i) گرفته شده است، بنابراین یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر کاپولا (CSP) می‌تواند به شرح زیر باشد:

$$\text{Min} E = \sum_{j=1}^k c_j x_j + \sum_{j=k+1}^n c_j x_j + \sum_{j=1}^k f_j y_j + \sum_{j=k+1}^n f_j y_j \quad (۱۳)$$

Subject to:

$$\sum_{j=1}^k a_{ij} x_j + \sum_{j=k+1}^n a_{ij} x_j \geq (d_i^{p_i}), i = 1, 2, \dots, k \quad (۱۴)$$

$$C(1 - p_1, 1 - p_2, \dots, 1 - p_k) = 1 - p \quad (۱۵)$$

$$\sum_{j=1}^k a_{ij} x_j + \sum_{j=k+1}^n a_{ij} x_j \geq d_i, i = k + 1, k + 2, \dots, m \quad (۱۶)$$

$$B x_j = 0 \quad (۱۷)$$

$$S x_j \leq N \quad (۱۸)$$

$$T y \leq 1 \quad (۱۹)$$

$$y \in \{0, 1\}, x \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (۲۰)$$

که x متغیر پیوسته و y متغیر دوتایی؛ f هزینه ثابت و c هزینه متغیر؛ d میزان تقاضا و ماتریس‌های A و B و S و T و N ضرایب محدودیت هستند که N نشان‌دهنده ظرفیت امکانات می‌باشد.

۳-۲- معرفی اندیس‌های متغیر

c نشان‌دهنده شهرهای مورد مطالعه، J نشان‌دهنده انواع منابع اولیه انرژی، k انواع فناوری‌های تبدیل انرژی الکتریکی، q انواع آلاینده‌ی ناشی از مصرف انرژی و t نشان‌دهنده افق زمانی مورد مطالعه می‌باشد.

۳-۳- معرفی پارامترها

واحد	توضیحات	پارامترها
(tonne/GWh)	ضریب انتشار آلاینده فناوری k برای آلاینده نوع q	$AMR_{k,q}$
($10^3\$/GWh$)	هزینه انتقال برق در دوره زمانی t	CU_t
(Gwh)	تقاضای انرژی الکتریکی شهر c در دوره زمانی t	$D_{c,t}$
(GW)	میزان توسعه ظرفیت فناوری شهر c توسط فناوری k در سال t	$EC_{c,k,t}$
(10^3tonne)	میزان انتشار آلاینده مجاز در دوره t برای آلاینده نوع q	$ES_{t,q}$
(TJ/GWh)	ضریب مصرف فناوری k ام در دوره زمانی t	$FE_{k,t}$
($10^3\$/GW$)	هزینه سرمایه برای توسعه ظرفیت فناوری k	FEC_k
($10^3\$/GW$)	هزینه ثابت عملیات و نگهداری برای فناوری k	FGC_k
($10^3\$/TJ$)	هزینه تأمین منبع نوع z در دوره زمانی t	$PEC_{z,t}$
($10^3\$/GWh$)	هزینه واردات برق در دوره زمانی t	PEJ_t
(GW)	ظرفیت موجود فناوری در شهر C ام برای فناوری k ام در سال t	$RC_{c,k,t}$
(h)	زمان خدمات برای شهر C ام توسط فناوری k ام در دوره زمانی t	$ST_{c,k,t}$
($10^3\$/GWh$)	هزینه اجتماعی آلاینده نوع q	SC_q
($10^3\$/GWh$)	هزینه متغیر عملیات و نگهداری فناوری k	VGC_k
(%)	مصرف داخلی نیروگاه‌ها برای شهر C ام توسط فناوری k در سال t	$ZL_{c,k,t}$
(%)	بازده تبدیل انرژی الکتریکی برای شهر C ام توسط فناوری k در سال t	$TE_{c,k,t}$

۳-۴- معرفی متغیرها

واحد	توضیحات	متغیرها
(TJ)	میزان خرید منابع برای شهر c ام از منبع نوع z در دوره زمانی t	$NYL_{c,z,t}$
(Gwh)	میزان تولید برق برای شهر c ام توسط فناوری k ام در سال t	$EGA_{c,k,t}$
(GW)	متغیر ۰ و ۱ برای تولید برق شهر c ام توسط فناوری k در سال t	$YC_{c,k,t}$
(Gwh)	میزان واردات برق شهر c ام در دوره زمانی t	$PE_{c,t}$

۳-۵- تابع هدف مدل

هدف از این پژوهش، تخصیص الگوی عرضه برق و برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت فناوری‌های تبدیل انرژی برای دستیابی به حداقل هزینه سیستم است.

Minimize Costtotal

(۲۱)

$$\text{Cost}_{\text{total}} = \text{cost}_{\text{resource}} + \text{cost}_{\text{import}} + \text{cost}_{\text{fixed}} + \text{cost}_{\text{variable}} + \text{cost}_{\text{capital}} + \text{cost}_{\text{transport}} + \text{cost}_{\text{social}}$$

که در آن:

$\text{cost}_{\text{resource}}$: هزینه تأمین منابع اولیه انرژی (\$1000\$);

$\text{cost}_{\text{import}}$: هزینه واردات برق (\$1000\$);

$\text{cost}_{\text{fixed}}$: هزینه ثابت تبدیل انرژی الکتریکی (\$1000\$);

$\text{cost}_{\text{variable}}$: هزینه متغیر تبدیل انرژی الکتریکی (\$1000\$);

$\text{cost}_{\text{capital}}$: هزینه سرمایه برای توسعه ظرفیت فناوری‌های تبدیل انرژی

(\$1000\$);

$\text{cost}_{\text{transport}}$: هزینه انتقال برق (\$1000\$);

$\text{cost}_{\text{social}}$: هزینه اجتماعی ناشی از تولید انرژی الکتریکی (\$1000\$).

$$\text{cost}_{\text{resource}} = \sum_{c=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{t=1}^5 \text{PEC}_{j,t} \times \text{NYL}_{c,j,t} \quad (22)$$

$$\text{cost}_{\text{import}} = \sum_{c=1}^2 \sum_{t=1}^5 \text{PEJ}_t \times \text{PE}_{c,t} \quad (23)$$

$$\text{cost}_{\text{fixed}} = \sum_{c=1}^2 \sum_{k=1}^4 \sum_{t=1}^5 \text{FGC}_k \times (\text{RC}_{c,k,t=0} + \text{EC}_{c,k,t} \times \text{YC}_{c,k,t}) \quad (24)$$

$$\text{cost}_{\text{variable}} = \sum_{c=1}^2 \sum_{k=1}^4 \sum_{t=1}^5 \text{VGC}_k \times (\text{EGA}_{c,k,t} + \text{EC}_{c,k,t} \times \text{YC}_{c,k,t} \times \text{ST}_{c,k,t}) \quad (25)$$

$$\text{cost}_{\text{capital}} = \sum_{c=1}^2 \sum_{k=1}^4 \sum_{t=1}^5 \text{FEC}_k \times \text{EC}_{c,k,t} \times \text{YC}_{c,k,t} \quad (26)$$

$$\text{cost}_{\text{transport}} = \sum_{c=1}^2 \sum_{k=1}^4 \sum_{t=1}^5 (\text{EGA}_{c,k,t} + \text{EC}_{c,k,t} \times \text{YC}_{c,k,t} \times \text{ST}_{c,k,t}) \times \text{CU}_t \quad (27)$$

$$\text{cost}_{\text{social}} = \sum_{c=1}^2 \sum_{k=1}^4 \sum_{t=1}^5 \sum_{q=1}^3 \text{EGA}_{c,k,t} \times \text{SC}_q \times \text{AMR}_{k,q} \quad (28)$$

۳-۶- قیود مدل

- محدودیت تعادل عرضه و تقاضای منابع اولیه: این محدودیت نشان‌دهنده توازن

بین عرضه و تقاضای گاز طبیعی و نفت کوره می‌باشد.

$$\text{EGA}_{c,k=1,t} \times \text{FE}_{k=1,t} \leq \text{NYL}_{c,j=1,t}; \forall c, t \quad (29)$$

$$\text{EGA}_{c,k=2,t} \times \text{FE}_{k=2,t} \leq \text{NYL}_{c,j=1,t}; \forall c, t \quad (30)$$

$$\text{EGA}_{c,k=3,t} \times \text{FE}_{k=3,t} \leq \text{NYL}_{c,j,t}; \forall c, j, t \quad (31)$$

مقدار خروجی خالص هریک از فناوری‌ها نمی‌تواند از توان ظرفیت تخصیص یافته

تجاوز کند.

$$EGA_{c,k,t} \leq RC_{c,k,t} + EC_{c,k,t}^{\pm} \times YC_{c,k,t} \times ST_{c,k,t}; \forall c, k, \quad (32)$$

- محدودیت تقاضای برق: مجموع انرژی الکتریکی حاصل شده از فناوری‌ها از تمام ظرفیت‌ها و انرژی الکتریکی وارداتی باید به‌گونه‌ای معین شوند که تقاضای انرژی را پوشش دهند.

$$\sum_{k=1}^4 EGA_{c=1,k,t} \times (1 - ZL_{c=1,k,t}) \times TE_{c=1,k,t} + PE_{c=1,t} \geq D_{c=1,t}; \forall t \quad (33)$$

$$\sum_{k=1}^4 EGA_{c=2,k,t} \times (1 - ZL_{c=2,k,t}) \times TE_{c=2,k,t} + PE_{c=2,t} \geq D_{c=2,t}; \forall t \quad (34)$$

- محدودیت انتشار آلاینده: میزان انتشار آلاینده‌ها باید از مقدار مجاز تعیین شده کمتر باشد.

$$\sum_{k=1}^4 EGA_{c,k,t} \times AMR_{k,q} \leq ES_{t,q}; \forall c, t, q \quad (35)$$

محدودیت توسعه ظرفیت: این محدودیت نشان‌دهنده این است که آیا یک فناوری تبدیل انرژی الکتریکی

۷-۳- روش کاپولا جهت تعیین عدم قطعیت موجود در متغیرهای تصادفی

در این مطالعه، نرخ رشد سالانه مصرف برق برای شهرهای تهران و اصفهان در سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵، برای تعیین تابع توزیع تجمعی حاشیه‌ای متغیرهای تصادفی و تابع توزیع تجمعی هم‌زمان مورد استفاده قرار گرفته است. برای تعیین میزان همبستگی بین دو متغیر تصادفی، از آزمون همبستگی خطی پیرسون استفاده شده است. علاوه بر این از آزمون نکویی برازش برای بررسی توزیع آماری با استفاده از آزمون کولموگروف اسمیرنوف استفاده شده است که تأیید می‌کند داده‌ها به‌طور نرمال توزیع می‌شوند در نتیجه نرخ رشد سالانه مصرف برق دو شهر دارای توزیع حاشیه‌ای از توابع توزیع نرمال است. اینکه تابع توزیع تجمعی هم‌زمان به توسعه ظرفیت نیاز دارد یا خیر این‌طور مشخص می‌شود اگر YC برابر یک شود به معنای نیاز به توسعه ظرفیت و اگر برابر صفر شود به معنای عدم نیاز به توسعه می‌باشد.

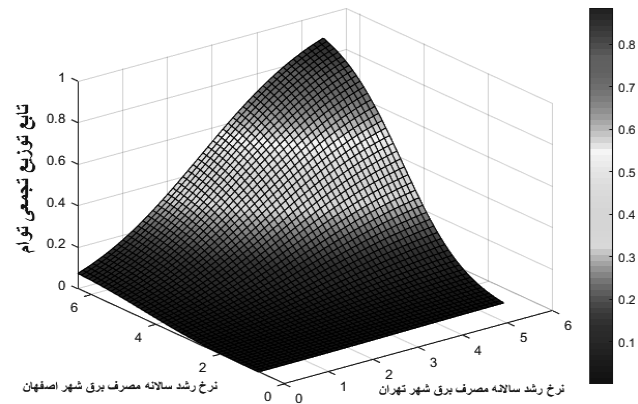
$$YC_{c,k,t} \begin{cases} =1 \\ =0; \forall c, k, t \end{cases} \quad (36)$$

محدودیت‌های ضمنی: در آخر محدودیت ضمنی و یا به عبارت دیگر محدودیت غیرمنفی بودن متغیرهای تصمیم مدل بیان شده است.

$$NYL_{c,j,t}, PE_{c,t}, EGA_{c,k,t} \geq 0; \forall c, k, j, t \quad (37)$$

نرخ رشد سالانه مصرف برق با استفاده از کاپولای گامبل^۱ در شکل (۱) آمده است:

1 Gumbel Copula



منبع: یافته‌های پژوهش

شکل ۱. تابع تجمعی توأم نرخ رشد سالانه مصرف برق شهرهای تهران و اصفهان

جدول ۱، نیز مقادیر انتخاب شده توزیع تجمعی توأم $H_{x,y}(x,y) = \Pr(X \leq x, Y \leq y)$ ، توزیع تجمعی حاشیه‌ای $F_x(x)$ و $G_y(y)$ مقادیر مربوط به متغیرهای تصادفی x و y تحت سناریو را نشان می‌دهد:

جدول ۱. مقادیر انتخاب شده توزیع هم‌زمان تجمعی و توزیع تجمعی حاشیه‌ای و مقادیر مربوط به متغیرهای تصادفی

$(p, p1, p2)$	$y(\%)$	$x(\%)$	$G_y(y)$	$F_x(x)$	$H_{x,y}(x,y)$	سناریو
$(0, 2850, 2290, 124)$	۵,۸۷۲	۵,۴۷۸	۰,۸۷۶	۰,۷۷۱	۰,۷۱۵	سناریو اول
$(0, 2850, 2590, 113)$	۶,۳۹۵	۳,۸۱۷	۰,۸۸۷	۰,۷۴۱	۰,۷۱۵	سناریو دوم
$(0, 3350, 2390, 179)$	۴,۶۷۱	۴,۶۹۱	۰,۸۲۱	۰,۷۶۱	۰,۶۶۵	سناریو سوم
$(0, 3350, 2790, 168)$	۴,۸۹۱	۳,۲۵۱	۰,۸۳۲	۰,۷۲۱	۰,۶۶۵	سناریو چهارم
$(0, 4350, 2290, 307)$	۳,۱۰۹	۵,۴۷۸	۰,۶۹۳	۰,۷۷۱	۰,۵۶۵	سناریو پنجم
$(0, 4350, 3190, 220)$	۲,۲۲۳	۲,۶۳۴	۰,۷۸۰	۰,۶۸۱	۰,۵۶۵	سناریو ششم
$(0, 4350, 4090, 199)$	۴,۲۴۳	۱,۴۰۷	۰,۸۰۱	۰,۵۹۱	۰,۵۶۵	سناریو هفتم

منبع: یافته‌های پژوهش

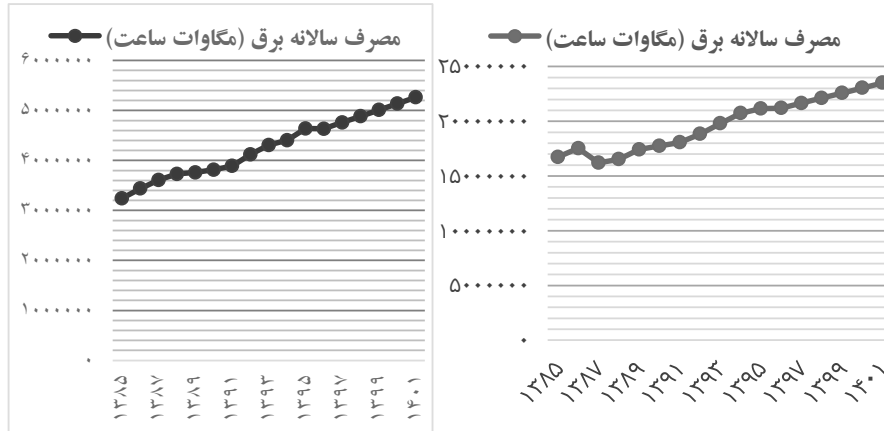
در جدول ۱، x و y متغیرهای تصادفی هستند که به ترتیب نشان‌دهنده نرخ رشد سالانه مصرف برق شهر تهران و شهر اصفهان می‌باشند. این γ سناریو به‌عنوان سناریوهای سطوح نقض محدودیت p, p_1, p_2 که نااطمینانی تقاضای برق را نشان می‌دهند، معرفی می‌شوند؛ که P نشان‌دهنده سطح احتمال توأم است و P_1 و P_2 به ترتیب نشان‌دهنده سطوح احتمال حاشیه‌ای متغیرهای تصادفی X و Y می‌باشند. به‌طور دقیق، ما سه سطح احتمالی توأم $0,715$ و $0,665$ و $0,565$ را انتخاب کرده‌ایم، که دو مجموعه از سطوح احتمال حاشیه‌ای در سطح احتمال مشترک $0,715$ و دو مجموعه از سطوح احتمال حاشیه‌ای در سطح احتمال مشترک $0,665$ و سه مجموعه از سطوح احتمال حاشیه‌ای در سطح احتمال مشترک $0,565$ بوده است.

۴- داده‌ها

به‌منظور برنامه‌ریزی عرضه انرژی برای شهرهای تهران و اصفهان، چهار فناوری تبدیل انرژی الکتریکی شامل سیکل ترکیبی، گازی، بخاری و خورشیدی در نظر گرفته شده است که شامل نیروگاه‌های شهید منتظری، زواره، جنوب و اصفهان برای شهر اصفهان و نیروگاه‌های دماوند، پرند، ری و بعثت برای شهر تهران می‌باشد. در این پژوهش داده‌های مربوط به مقادیر تولید، مصرف، بازده تبدیل انرژی، قیمت حامل‌های انرژی، قدرت عملی و مصرف داخلی نیروگاه‌های مورد مطالعه از داده‌های داخل کشور تهیه شده است. افزون بر این داده‌ها و اطلاعات مربوط به هزینه‌ها از وزارت نیرو و تخمین‌های انجام شده در مطالعات مختلف به‌دست آمده است.

۴-۱- مصرف انرژی الکتریکی

میزان تقاضای برق در سال‌های آتی، یکی از پارامترهایی می‌باشد که در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است و برنامه‌ریزی‌های لازم براساس آن صورت می‌پذیرد. در مدل قطعی، پیش‌بینی تقاضا با استفاده از داده‌های ۱۰ سال به دست آمده که در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده است:



شکل ۲. پیش بینی تقاضای انرژی الکتریکی شهر تهران

شکل ۳. پیش بینی تقاضای انرژی الکتریکی شهر اصفهان

در شکل‌های ۲ و ۳ پیش‌بینی تقاضای انرژی الکتریکی شهرهای تهران و اصفهان در حالت قطعی نشان داده شده است که همان‌گونه که مشاهده می‌شود این مقادیر در هردو شهر در حال افزایش می‌باشد.

در مدل تصادفی، عدم قطعیتی که در مقادیر پیش‌بینی شده تقاضای انرژی الکتریکی وجود دارد به صورت یک کمیت غیرقطعی در نظر گرفته شده است، از این رو برای مدل‌سازی عدم قطعیت موجود در تقاضای انرژی الکتریکی، سناریوهای مختلفی برای آن لحاظ شده است. در ادامه با در نظر گرفتن توزیع احتمالی برای کمیت‌های دارای عدم قطعیت در مسئله، مقادیر تصادفی بر اساس تابع توزیع احتمال مربوطه محاسبه می‌شود. در این مطالعه از نرخ رشد سالانه مصرف برق شهرهای تهران و اصفهان در سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵، برای تعیین تابع توزیع تجمعی حاشیه‌ای متغیرهای تصادفی استفاده شده و سپس تابع توزیع تجمعی توأم برای این داده‌ها از طریق استفاده از کاپولای گامبل- هوگارد به دست آمده است که براساس احتمال توأم، احتمال‌های حاشیه‌ای مختلفی مورد نظر قرار گرفته و مقادیر تصادفی براساس احتمال‌های مربوطه برآورد شده است. جدول ۲ و ۳، تقاضای برق شهرهای تهران و اصفهان را تحت سناریوهای مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۲. پیش‌بینی تقاضای برق شهر تهران تحت سناریوهای مختلف (مگاوات ساعت)

سناریو / سال	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۹	۱۴۰۰	۱۴۰۱
سناریو اول	۲۲۶۷۰۶۴,۵۶	۲۳۱۴۱۶۲,۵۹	۲۳۶۱۲۶۰,۶۱	۲۴۰۸۳۵۸,۶۳	۲۴۵۵۴۵۶,۶۵
سناریو دوم	۲۲۳۱۳۶۴,۲۸	۲۲۷۷۷۲۰,۶۴	۲۳۲۴۰۷۶,۹۹	۲۳۷۰۴۳۳,۳۴	۲۴۱۶۷۸۹,۶۹
سناریو سوم	۲۲۵۰۱۴۹,۳۸	۲۲۹۶۸۹۵,۹۹	۲۳۴۳۶۴۲,۶۰	۲۳۹۰۳۸۹,۲۱	۲۴۳۷۱۳۵,۸۲
سناریو چهارم	۲۲۱۹۱۹۹,۱۱	۲۲۶۵۳۰۲,۷۳	۲۳۱۱۴۰۶,۳۵	۲۳۵۷۵۰۹,۹۷	۲۴۰۳۶۱۳,۶۰
سناریو پنجم	۲۲۶۷۰۶۴,۵۶	۲۳۱۴۱۶۲,۵۹	۲۳۶۱۲۶۰,۶۱	۲۴۰۸۳۵۸,۶۳	۲۴۵۵۴۵۶,۶۵
سناریو ششم	۲۲۰۵۹۳۷,۷۷	۲۲۵۱۷۶۵,۸۹	۲۲۹۷۵۹۴,۰۱	۲۳۴۳۴۲۲,۱۳	۲۳۸۹۲۵۰,۲۵
سناریو هفتم	۲۱۷۹۵۶۵,۵۶	۲۲۲۴۸۴۵,۸۰	۲۲۷۰۱۲۶,۰۴	۲۳۱۵۴۰۶,۲۸	۲۳۶۰۶۸۶,۵۲

منبع: یافته‌های پژوهش

جدول ۳. پیش‌بینی تقاضای برق شهر اصفهان تحت سناریوهای مختلف (مگاوات ساعت)

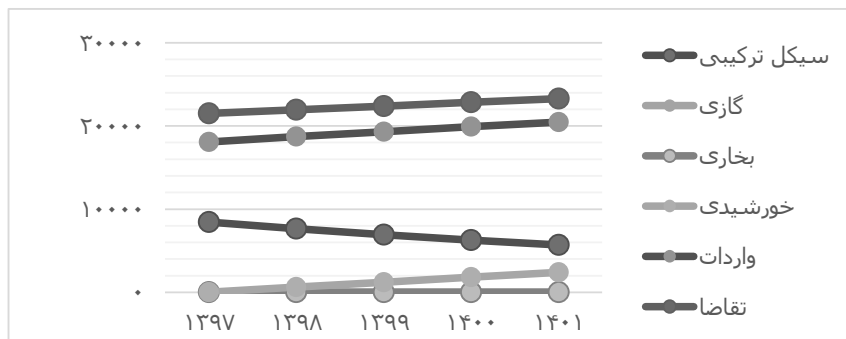
سناریو / سال	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۹	۱۴۰۰	۱۴۰۱
سناریو اول	۵۷۶۱۵۳,۴۱	۵۹۱۴۵۲,۸۵	۶۰۶۷۵۲,۲۸	۶۲۲۰۵۱,۷۱	۶۳۷۳۵۱,۱۴
سناریو دوم	۵۷۸۹۹۹,۵۷	۵۹۴۳۷۴,۵۸	۶۰۹۷۴۹,۵۹	۶۲۵۱۲۴,۶۰	۶۴۰۴۹۹,۶۱
سناریو سوم	۵۶۹۶۱۷,۵۹	۵۸۴۷۴۳,۴۷	۵۹۹۸۶۹,۳۵	۶۱۴۹۹۵,۲۳	۶۳۰۱۲۱,۱۰
سناریو چهارم	۵۷۰۸۱۴,۸۳	۵۸۵۹۷۲,۵۰	۶۰۱۱۳۰,۱۷	۶۱۶۲۸۷,۸۴	۶۳۱۴۴۵,۵۱
سناریو پنجم	۵۶۱۱۱۷,۲۲	۵۷۶۰۱۷,۳۷	۵۹۰۹۱۷,۵۳	۶۰۵۸۱۷,۶۸	۶۲۰۷۱۷,۸۴
سناریو ششم	۵۶۱۷۳۷,۶۱	۵۷۶۶۵۴,۲۳	۵۹۱۵۷۰,۸۶	۶۰۶۴۸۷,۴۹	۶۲۱۴۰۴,۱۲
سناریو هفتم	۵۶۷۲۸۸,۴۳	۵۸۲۳۵۲,۴۵	۵۹۷۴۱۶,۴۸	۶۱۲۴۸۰,۵۱	۶۲۷۵۴۴,۵۴

منبع: یافته‌های پژوهش

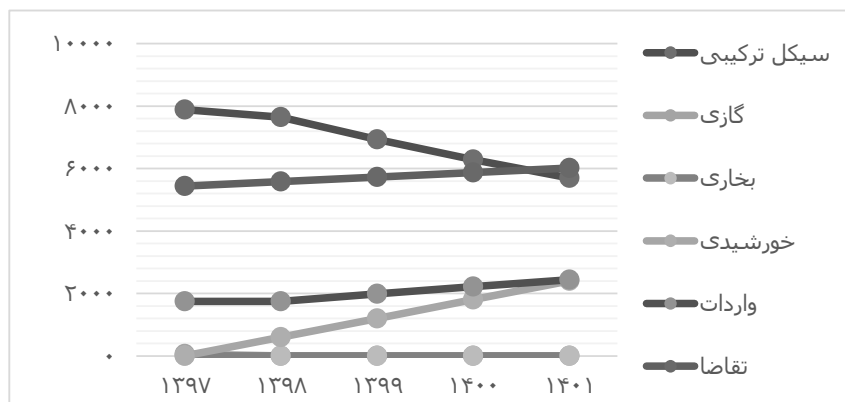
۵- نتایج حاصل از اجرای مدل

۵-۱- نتایج بهینه‌سازی مدل

در مقاله حاضر ابتدا مدل در حالت قطعی بررسی می‌شود که در این مرحله همه پارامترها، شناخته شده و قطعی فرض می‌شوند و سپس در گام بعدی با فرض کردن تقاضای انرژی الکتریکی شهرهای تهران و اصفهان به صورت تصادفی، یک توزیع احتمال توأم برای آنها در نظر گرفته می‌شود که در قالب سناریوهای مختلف ارائه شده است.



شکل ۴. نتایج بهینه‌سازی شهر تهران (گیگاوات ساعت)



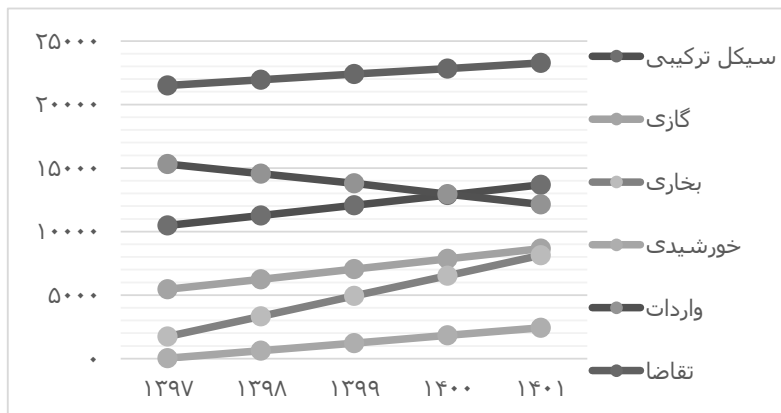
شکل ۵. نتایج بهینه‌سازی شهر اصفهان (گیگاوات ساعت)

شکل‌های ۴ و ۵، نتایج مدل را با لحاظ محدودیت انتشار آلاینده منعکس می‌کند. نتایج به دست آمده از حل مدل نشان می‌دهد با در نظر گرفتن محدودیت‌های زیست‌محیطی، می‌توان گفت به‌منظور جبران کمبود عرضه انرژی الکتریکی در هر دوره، میزان ظرفیت نیروگاه‌های خورشیدی در حال افزایش و میزان استفاده از نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در حال کاهش می‌باشد و نیروگاه‌های گازی و بخاری نیز سهمی در تولید برق ندارند. افزون بر این، برق وارداتی نیز روند افزایشی در پیش گرفته است و این نشان می‌دهد که تأمین تقاضای انرژی برق در شهرهای تهران و اصفهان توسط

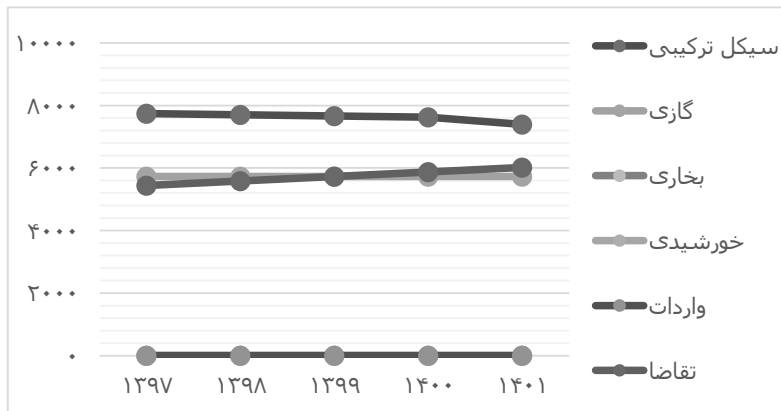
نیروگاه‌های خورشیدی از لحاظ اقتصادی و زیست محیطی مقرون به صرفه است و می‌بایست در سیاست‌های سرمایه‌گذاری در اولویت قرار گیرد.

۲-۵- نتایج مدل بدون اعمال محدودیت انتشار آلاینده

شکل‌های ۶ و ۷، نتایج مدل را بدون اعمال انتشار آلاینده به تصویر می‌کشد.



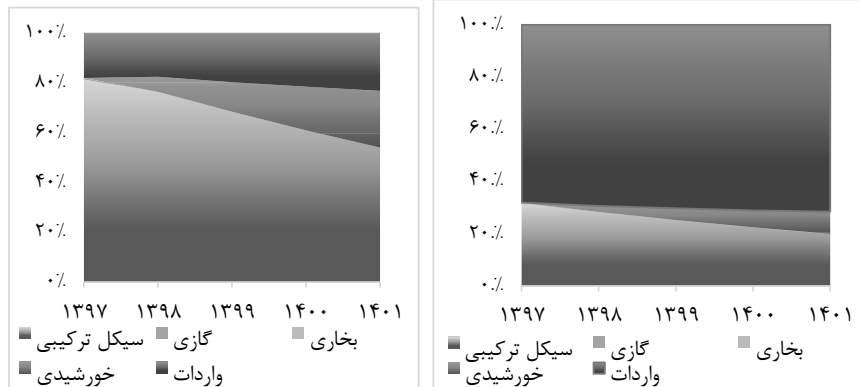
شکل ۶. نتایج بدون اعمال محدودیت آلاینده‌ها در شهر تهران (گیگاوات ساعت)



شکل ۷. نتایج بدون اعمال محدودیت آلاینده‌ها در شهر اصفهان (گیگاوات ساعت)

با توجه به اینکه تولید انرژی برق توسط سوخت‌های فسیلی بدون در نظر گرفتن محدودیت انتشار آلاینده، در طول زمان در حال افزایش می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که محدودیت‌های زیست محیطی نقش مهم و اساسی در الگوی بهینه دارند و لحاظ نکردن آن در مدل تأثیر قابل توجهی بر نتایج مدل خواهد داشت، بنابراین موضوع انتشار آلاینده‌ها از مهم‌ترین ملاحظات است که می‌بایست در سیاست‌گذاری‌ها به آن پرداخته شود. هم‌چنین با مقایسه نتایج مدل بدون در نظر گرفتن انتشار آلاینده با نتایجی که محدودیت انتشار آلاینده در آن لحاظ شده است، می‌توان دریافت که این نتایج به وضعیت موجود شباهت بیشتری دارد.

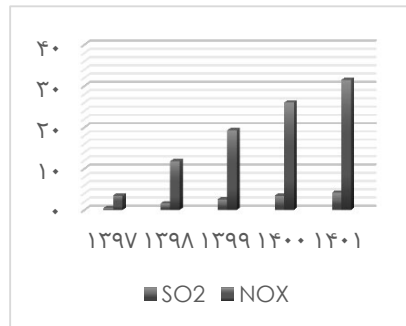
۵-۳- سهم منابع اولیه در تأمین انرژی الکتریکی



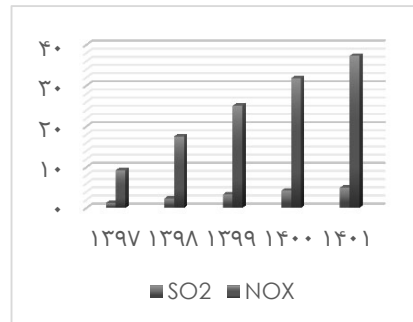
شکل ۸. سهم بهینه تکنولوژی‌های مختلف شهر تهران / شکل ۹. سهم بهینه تکنولوژی‌های مختلف شهر اصفهان

ساختار بهینه سیستم انرژی در شهرهای تهران و اصفهان و میزان سهم هر یک از نیروگاه‌ها در ۵ سال آتی در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است که بر اساس آن می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سهم منابع تجدیدپذیر در تأمین انرژی برق و کاهش انتشار آلاینده‌ها ناشی از آن می‌توان به یک سیستم عرضه بهینه دست یافت که انتشار آلاینده‌ها ناشی از تولید انرژی برق را می‌توان با همان میزان هزینه سرمایه در وضعیت موجود، کاهش داد.

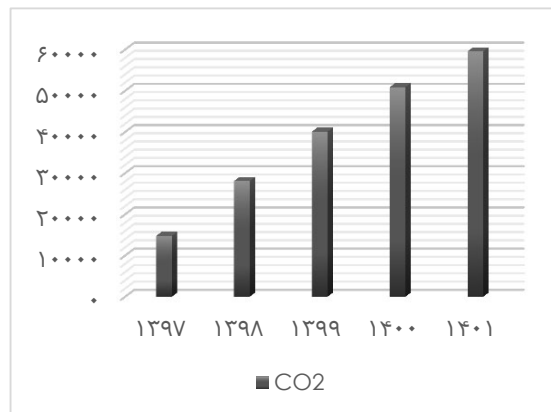
۵-۴- میزان کاهش انتشار آلاینده‌ها



شکل ۱۱. میزان کاهش انتشار آلاینده‌ها در شهر اصفهان (هزار تن)



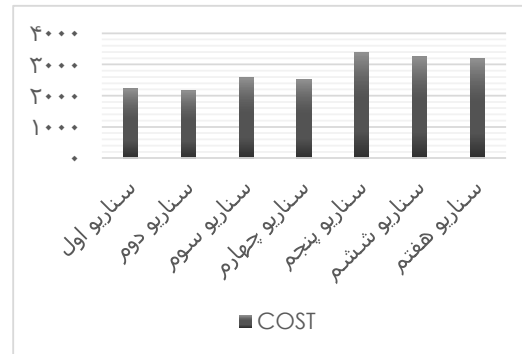
شکل ۱۰. میزان کاهش انتشار آلاینده‌ها در شهر تهران (هزار تن)



شکل ۱۲. میزان کاهش انتشار گاز دی اکسید کربن در شهرهای تهران و اصفهان (هزار تن)

همان‌گونه که از شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ مشخص می‌باشد، میزان کاهش انتشار آلاینده‌های دی اکسید کربن و گازهای نیتروژن دار و دی اکسید گوگرد در هر سال رو به افزایش است که ناشی از افزایش ظرفیت‌های نیروگاه‌های خورشیدی و افزایش سهم شبکه برق برای تأمین انرژی الکتریکی می‌باشد.

۵-۵- نتایج مدل تحت عدم قطعیت



شکل ۱۳. هزینه‌های کل سیستم تحت سناریوهای مختلف (میلیارد دلار)

همان‌گونه که از شکل ۱۳ مشخص است، هزینه‌های کل سیستم در سطح احتمال ۰,۷۱۵ (یعنی $P=0.285$) بالاتر از هزینه‌های کل سیستم در سطح احتمال ۰,۶۶۵ (یعنی $P=0.335$) و ۰,۵۶۵ (یعنی $P=0.435$) می‌باشد و هنگامی که سطح احتمال مشترک یکسان می‌باشد، تفاوت‌هایی بین هزینه‌های کل سیستم برای سطوح احتمال حاشیه‌ای وجود دارد. اگرچه افزایش هزینه‌های کل سیستم در سطوح احتمال مشترک بیشتر از سطوح احتمال حاشیه‌ای است، اما تأثیر سطوح احتمال حاشیه‌ای بر هزینه‌های کل سیستم قابل توجه می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با افزایش مصرف انرژی الکتریکی در بازه زمانی مورد مطالعه، سهم فناوری‌های مبتنی بر سوخت فسیلی که آلاینده محیط‌زیست می‌باشند، کاهش یافته و بر سهم انرژی‌های پاک افزوده می‌شود. علت آن است که فناوری‌های آلاینده محیط‌زیست تنها در سطوح پایین مصرف با ملاحظه استانداردهای محیط‌زیست پاسخگوی مصرف موجود می‌باشند، اما با افزایش تقاضای مصرفی، استفاده از این فناوری‌ها استانداردهای محیط‌زیست را نمی‌تواند برآورده سازد و بنابراین استفاده از فناوری‌هایی که از آلاینده‌گی کمتری برخوردار هستند و هزینه متغیر بالاتری دارند، در دستور کار قرار می‌گیرد. در نهایت با افزایش تقاضای مصرفی برق در برخی حالات، تنها برق وارداتی با وجود هزینه بسیار بالایی که دارد، می‌تواند تأمین کننده انرژی الکتریکی با ملاحظات زیست محیطی

باشد. از سویی نتایج نشان می‌دهد که میزان کاهش انتشار آلاینده‌های دی اکسید کربن و گازهای نیتروژن دار و دی اکسید گوگرد و همچنین میزان کاهش هزینه‌های اجتماعی ناشی از انتشار آنها در هر سال رو به افزایش می‌باشد که ناشی از کاهش میزان تولید آلاینده‌های زیست محیطی و افزایش ظرفیت‌های نیروگاه‌های خورشیدی و افزایش سهم شبکه برق برای تأمین انرژی الکتریکی می‌باشد.

افزون بر این، نتایج نشان می‌دهد که اثر سطح احتمال توأم بر هزینه‌های کل سیستم بیشتر از سطوح احتمال حاشیه‌ای می‌باشد و اثر سطوح احتمال حاشیه‌ای بر هزینه کل سیستم قابل توجه است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت بین هزینه کل سیستم و ریسک نقض محدودیت یک سازش وجود دارد.

بنابراین نتایج فوق را می‌توان در چارچوب اقدامات سیاستی زیر خلاصه کرد:

- میزان استفاده از فناوری‌های سیکل ترکیبی، گازی و بخاری در وضعیت موجود از مقدار بهینه بالاتر بوده و استفاده از نیروگاه‌ها می‌بایست کاهش یابد.
- سهم بهینه فناوری‌های خورشیدی از مقدار موجود بیشتر بوده و توسعه ظرفیت تولید برق برای این فناوری‌ها در هر دو شهر و متناسب با شرایط اقلیمی توصیه می‌شود.
- به‌منظور وارد نشدن به تأمین انرژی الکتریکی از روش واردات، سیاست‌های کاهش مصرف با روش‌های مختلف صرفه‌جویی توصیه می‌شود.

منابع

۱. بخرد، مرتضی (۱۳۹۰). بهینه‌سازی عرضه انرژی در ایران: مطالعه موردی عرضه الکتریسیته (با تأکید بر انتخاب فناوری تولید). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده مدیریت و اقتصاد.
۲. ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۴. (۱۳۹۵). معاونت امور برق و انرژی، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی.
۳. سالنامه آماری استان اصفهان ۱۳۹۵ (۱۳۹۶). سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان اصفهان، معاونت آمار و اطلاعات.
۴. سالنامه آماری استان تهران ۱۳۹۵ (۱۳۹۶). سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان اصفهان، معاونت آمار و اطلاعات.
۵. صفاری، بابک، منصوری، نسیم و نصرافصفهانی، رضا (۱۳۹۵). برنامه‌ریزی عرضه بهینه انرژی پایدار با استفاده از مدل برنامه‌ریزی آرمانی: مطالعه موردی شهرستان اصفهان. تحقیقات اقتصادی، دوره ۵۱، شماره ۲، صفحه ۴۳۵-۴۱۳.

۶. صفاری، بابک (۱۳۹۱). ارائه مدل عرضه بهینه انرژی الکتریکی با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی بازه‌ای چندمرحله‌ای (ایران). پایان‌نامه دکتری، دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم اداری و اقتصاد.
۷. گزارش وضعیت محیط‌زیست ایران ۱۳۹۲-۱۳۸۳ (۱۳۹۴). سازمان حفاظت محیط‌زیست. صفحه ۲۴-۱۹.
8. Akbari, T., Rahimian, A., & Kazemi, A. (2011). A multi-stage stochastic transmission expansion planning method. *Energy Conversion Management*, PP. 53-2844.
 9. Bp energy Outlook (2017). The role Africa will play in driving global energy demand. *Beyond 2035: Africa*.
 10. Bruckner, Th., Groscurth, H. -M., & Kummel, R. (1997). Competition and Synergy between Energy Technologies in Municipal Energy Systems. *Energy* 22, no. Vol. 10, PP.1005-1014.
 11. Charnes, A., & Cooper, W.W. (1989). Chance constrained programming. *Management science*, Vol. 6, PP. 73-79.
 12. Chen, F., Huang, GH., Fan, YR., & Chen, JP (2017). A copula-based fuzzy chance-constrained programming model and its application to electric power generation systems planning. *Apply Energy*, PP. 291-309.
 13. Health Organization (2016). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease: World (WHO/FWC/EPE/17.1). Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
 14. Infanger, G., & Morton, DP (1996). Cut sharing for multistage stochastic linear programs with interstage dependency. *Math Program*, Vol. 75, PP. 241-56.
 15. International energy Agency (IEA). *World Energy Outlook Special Report 2016: Energy and Air Pollution*; 2016. Available at: <<https://www.iea.org/publications/freepublication/publication/weo-2016-special-ewport-energy-and-air-pollution.html>>.
 16. Nelsen, RB (2006). *An introduction to copulas*. 2nd ed New York: Springer.
 17. Odetayo, B., MacCormack, J., Rosehart, WD., & Zareipour, H. (2017). A chance constrained programming approach to integrated planning of distributed power generation and natural gas network. *Electr Power Syst Res*, pp. 197-207.
 18. Yu, L., Li, Y.P., Huang, G.H., & Shan, B.G. (2017). An interval-possibilistic basic flexible programming method for air quality management of municipal energy system through introducing electric vehicles. *Sci Total Environ*, P.P. 593-594:29-418.
 19. Yu, L., Li, Y.P., Huang, G.H., Fan, Y.R., & Nie, S. (2018). A copula-based flexible-stochastic programming method for planning regional energy under multiple uncertainties: A case study of the urban agglomeration of Beijing and Tianjin. *Applied Energy*, PP. 60-74.