

طراحی مدل بهینه‌سازی چندهدفه سبب تولید برق پاک ایران

اشکان نیوشا^۱، عادل آذر^۲، هاشم معزز^۳، کیومرث حیدری^۴

۱- دانشجوی دکتری مدیریت تولید و عملیات، گروه مدیریت صنعتی و مالی، دانشکده مدیریت و حسابداری، پردیس فارابی دانشگاه تهران، قم، ایران.

۲- استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۳- استادیار، گروه مدیریت صنعتی و مالی، دانشکده مدیریت و حسابداری، پردیس فارابی دانشگاه تهران، قم، ایران.

۴- هیأت‌علمی، رئیس گروه پژوهشی اقتصاد برق و انرژی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۹/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۷

چکیده

چشم‌انداز پایان سوخت‌های فسیلی، گرمایش آب و هوایی و تغییرات اقلیمی ناشی از آن و سیاست‌های تنوع‌بخشی به منابع تأمین انرژی از علت‌های استقبال بسیاری از کشورها از انرژی‌های تجدیدپذیر هستند. در همین راستا کشورهای تولیدکننده نفت و گاز برنامه‌ریزی‌هایی را برای افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سبب تولید برق خود کرده‌اند. تنوع انرژی‌های اولیه تجدیدپذیر، وجود فناوری‌های مختلف تبدیل آن‌ها به برق و ویژگی‌های مختلف هر یک و همچنین انتظارات فنی، مالی و زیست‌محیطی گوناگون، تصمیم‌گیری درباره این‌که برق پاک مورد نظر از چه منابعی تولید شود را پیچیده می‌کند. این پژوهش به دنبال ارائه و حل یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی برای به دست آوردن سهم به نسبت بهینه توان (ظرفیت نصبی) هر یک از انرژی‌های تجدیدپذیر خورشیدی (فتوولتائیک)، بادی، برق‌آبی کوچک، زمین‌گرمایی و زیست‌توده در تولید برق پاک ایران است به گونه‌ای که هزینه‌ها، اشتغال‌زایی، دانش فنی، بازده فنی و پیامدهای اجتماعی آن بهینه باشد. مدل در چهارچوب برنامه ششم توسعه ایران و بودجه‌های مصوب مجلس شورای اسلامی حل شده است.

کلیدواژگان: استاندارد پرتقوی تجدیدپذیر، بهینه‌سازی چندهدفه، برق پاک، برنامه‌ریزی انرژی، انرژی تجدیدپذیر.

۱- مقدمه

چشم‌انداز پایان منابع انرژی فسیلی در سده میلادی جاری، گرمایش آب و هوایی و تغییرات اقلیمی ناشی از آن و سیاست‌های تنوع‌بخشی به سبد انرژی از علت‌های استقبال بسیاری از کشورها از انرژی‌های تجدیدپذیر است.

براساس اطلاعات بانک جهانی تولید ناخالص داخلی ایران در سال ۲۰۱۷ میلادی رتبه ۲۳ را در میان کشورهای جهان داشته است. در حالی که رتبه ایران در انتشار گازهای گلخانه‌ای^۱ هفتم بوده است که علت اصلی گرمایش آب و هوا دانسته می‌شوند [۱]. دی‌اکسیدکربن و متان از گازهای گلخانه‌ای مهم هستند که در فرآیند سوختن منابع هیدروکربنی آزاد می‌شوند. اکسیدهای نیتروژن، اکسیدهای گوگرد، ذرات معلق و ترکیبات آلی فرار از دیگر آلاینده‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی هستند. ذیل ساز و کارهای «چارچوب پیمان‌نامه سازمان ملل در تغییر اقلیم»^۲ و پیرو توافق‌نامه پاریس نیز کشورهای عضو سازمان ملل موظف شده‌اند که برنامه را خود برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ارائه کنند. هیأت وزیران ایران کاهش غیرمشروط چهار درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۳۰ میلادی در ایران را تصویب کرده‌است. بخش تولید برق بزرگ‌ترین مصرف‌کننده سوخت‌های فسیلی در ایران است و تخمین زده می‌شود که ایران در نزدیک به ۳۰٪ گازهای گلخانه‌ای انتشاری سهم دارد [۲]. گستردگی و تنوع نسبی جغرافیایی سبب پتانسیل مناسب انواع انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران از جمله خورشیدی، بادی، برق‌آبی کوچک^۳ و زیست‌توده (انواع زیاله و ضایعات) شده است.

این پژوهش به دنبال یافتن این پاسخ است که برای تحقق تعهدات بین‌المللی ایران در زمینه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و در قالب تولید میزان معینی برق از انرژی‌های تجدیدپذیر برای هر منبع انرژی اولیه^۴ تجدیدپذیر چه مقدار ظرفیت (برحسب مگاوات) نصب شود، به گونه‌ای هزینه‌های آن کمینه و اشتغال‌زایی آن بیشینه باشد. توجه به این نکته ضروری است که معیارهای این تصمیم‌گیری نه مرتبط به خود انرژی‌ها که مرتبط با فناوری‌های غالب تبدیل آن انرژی‌ها به برق است. مفهوم سبد مورد نظر در این پژوهش نزدیکی زیادی با مفهوم «استاندارد پورتفوی تجدیدپذیر»^۵ دارد. استاندارد پورتفوی تجدیدپذیر به معنای الزام شرکت‌های تولیدکننده برق به تخصیص سهمی از تولید از منابع تجدیدپذیر است. بعضی کشورها این سبد را تنها به صورت یک

عدد کلی و بعضی دیگر به تفکیک منابع انرژی تجدیدپذیر اعلام کرده‌اند.

۲- مرور پیشینه پژوهش

تاکنون محاسبه سهم بهینه تک‌تک منابع تجدیدپذیر در تولید برق به صورت چندهدفه^۱ در ایران انجام نشده است. مشابه مدل تصمیم‌گیری چندهدفه پیشنهادی در ادبیات پژوهشی جهان نیز مشاهده نشد. البته برنامه‌ریزی تک‌هدفه پیرامون کاهش هزینه کل برای سیستم انرژی (گرمایش، برق و ترابری) هم برای ایران و هم برای کشورهای مختلف جهان انجام شده است [۳]؛ برنامه‌ریزی سیستم‌های انرژی سابقه‌ای طولانی و گسترده دارد. در برنامه‌ریزی سیستم‌های انرژی، گرما، برق و ترابری در یک مجموعه مدل‌سازی می‌شوند. چون محدوده این برنامه‌ریزی‌ها کل سیستم انرژی بوده است، طبیعاً محدودیت‌های خاص تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر (از جمله محدودیت‌های فنی) را مدل‌سازی نکرده‌اند. مدل‌های برنامه‌ریزی خطی تک‌هدفه خاص منابع انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان نیز به شدت محدود هستند [۴]؛ بنابراین جای خالی یک مدل تصمیم‌گیری چندهدفه برای تولید برق از منابع تجدیدپذیر در جهان و ایران به شدت احساس می‌شود.

جدول ۱ مطالعات پژوهشی در زمینه برنامه‌ریزی سیستم‌های انرژی و برق

نویسنده	منبع	کشور	حوزه	نام روش
Büyüközkan & Güleriyüz, 2017	[۵]	ترکیه	برق‌های پاک	DEMATEL-ANP-TOPSIS
Troldborg, et. El., 2014	[۶]	انگلستان		PROMETHEE
Evans et al., 2009	[۷]	استرالیا		Delphi
Amer, et al., 2011	[۸]	پاکستان		AHP
Ren, et. al, 2015	[۹]	چین		AHP
Al Grani, 2016	[۱۰]	عربستان		AHP
Park, et. El., 2016	[۱۱]	کره جنوبی		بهینه‌سازی هزینه
فرآمد و همکاران	[۳]	ایران	انرژی	بهینه‌سازی هزینه
عمیدپور و کجویی، ۱۳۹۵	[۱۲]	ایران	برق	بهینه‌سازی انتشار

۲-۱- چهارچوب نظری مدل‌سازی تولید برق پاک

پارامترهای استخراج شده از ادبیات پژوهشی تولید برق از منابع اولیه انرژی تجدید که براساس فراوانی آن‌ها تحلیل شده و مهم‌ترین آن‌ها که برای ساختن مدل انتخاب شده‌اند در جدول ۲ صورت‌بندی شده است.

جدول ۲ پارامترهای استخراج شده و تحلیل شده از مرور ادبیات پژوهشی تصمیم‌گیری درباره تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر

نام معیار	فراوانی در ادبیات	منبع
انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG)	۶۰	[۱۵-۱۳، ۱۰، ۸-۵]
پیامدهای جانبی (غیر GHG)	۴۰	[۱۶، ۱۴، ۱۳، ۱۰، ۸، ۶، ۵]
ضریب ظرفیت (قابلیت اطمینان منبع)	۳۱	[۱۷، ۱۶، ۱۳، ۱۰، ۸، ۵، ۴]
هزینه سرمایه‌گذاری	۲۹	[۱۵، ۱۳، ۱۰، ۸، ۶-۴]
هزینه بهره‌برداری و نگهداری	۲۲	[۱۵، ۱۳، ۱۰، ۸، ۶-۴]
اشتغال‌زایی	۱۷	[۱۷، ۱۶، ۱۳، ۱۰، ۸، ۶، ۵]
دانش فنی (امکان بومی‌سازی)	۱۷	[۱۸، ۱۳، ۱۰-۷، ۵]
دسترسی به منبع انرژی	۱۳	[۱۵، ۱۳، ۷، ۵]
بازده فنی	۱۰	[۱۵، ۱۳، ۱۰، ۵، ۴]
طول عمر خدمت‌دهی	۴	[۱۷، ۱۵، ۱۳، ۴]

۲-۲- برنامه‌ریزی آرمانی

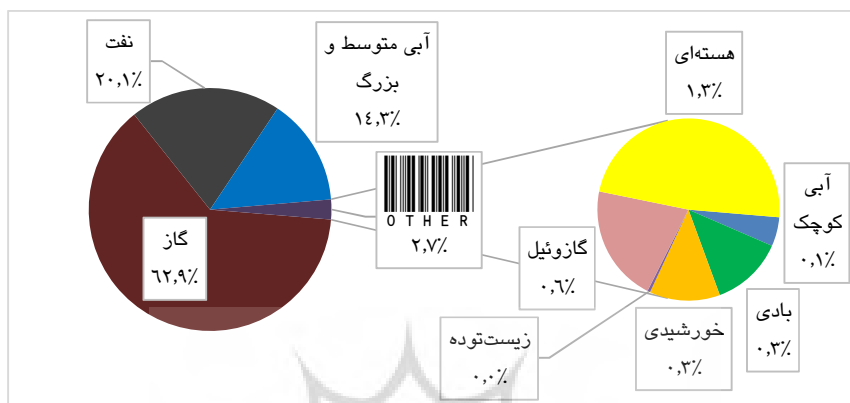
از برنامه‌ریزی چندهدفه در انواع مسائل انتخاب تأمین‌کنندگان و زنجیره تأمین از جمله برای انتخاب تأمین‌کنندگان سبز [۱۹] و بهینه‌سازی دوهدفه شبکه تأمین خون [۲۰] استفاده شده است. برنامه‌ریزی آرمانی^۷ را اولین بار چارنیز و کوپر^۸ سال ۱۹۶۱ برای تصمیم‌گیری‌های چندهدفه^۹ ابداع کردند و ایگنیزو^{۱۰} در دهه ۱۹۷۰ میلادی روش آن‌ها را گسترش داد. اهداف مسأله در مدل برنامه‌ریزی آرمانی رسیدن به سطوحی مناسب یا آرمانی از تابع هدف است؛

بنابراین پاسخ مسأله مناسب‌ترین گزینه است. در این مدل هدف با آرمان تفاوت دارد. هدف بازتاب‌دهنده خواسته‌های تصمیم‌گیرنده است، ولی آرمان هدفی متناسب و مرتبط با یک سطح تمایل است [۲۱]. هدف کلی مدل دستیابی به سطح مورد تمایل از هدف است که این خود به امکانات، منابع و محدودیت‌ها بستگی دارد. در برنامه‌ریزی آرمانی ابتدا مقدار مطلوب برای هر هدف تعیین می‌شود. سپس این اهداف براساس اهمیت‌شان رتبه‌بندی می‌شوند و تلاش می‌شود مقدار هر پاسخ تا حد امکان به مقدار آرمان (مطلوب) نزدیک باشد. بعضی از این اهداف تنها به بهای خروج دیگر اهداف از حالت بهینه بهینه می‌شوند. برنامه‌ریزی آرمانی در واقع می‌کوشد انحراف پاسخ از آرمان را کمینه کند. در این صورت‌بندی با اهداف مثل محدودیت‌ها رفتار می‌شود؛ اگرچه قیود اولیه الزاماً باید ارضا شوند، اهداف را تا حد امکان می‌خواهیم ارضا شوند [۲۲]. برنامه‌ریزی آرمانی بهره‌گیری نظام‌مند از نظرات ذی‌نفعانی با علایق مختلف را در مسأله تصمیم‌گیری ممکن می‌کند و می‌توان ساختار اولویت‌ها و تقدم را در آن به سادگی مدل‌سازی کرد، به طوری که در بهینه‌سازی اهداف چندگانه و یا متضاد، ابتدا اهداف سطح بالا و سپس اهداف سطح پایین در نظر گرفته می‌شوند.

۳- مدل ریاضی پیشنهادی

۳-۱- شرح مسأله

در قانون برنامه ششم توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی جمهوری اسلامی ایران تصویب شده است که ۵٪ ظرفیت نصب شده برق تا پایان سال ۱۴۰۰ خورشیدی از منابع تجدیدپذیر باشد. این سهم براساس پیش‌بینی‌ها و برنامه‌ریزی‌های کلان وزارت نیرو برابر ۵،۰۰۰ مگاوات خواهد بود. براساس قانون حمایت از صنعت برق نیز، منابع حاصل از عوارض فروش برق برای تحقق این هدف تصویب شده است. این عوارض براساس قانون بودجه سال ۱۳۹۷ خورشیدی برابر ۸٪ قیمت فروش برق و حداکثر برابر ۱۲،۸۰۰ میلیارد ریال تصویب شده است. توسعه به کارگیری برق پاک نیز از سوی قانون‌گذار به عهده «سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری برق ایران» گذاشته شده است. محدودیت‌های کمیته توان (ظرفیت) نصب شده برق پاک، میانگین مدت زمان ساختن نیروگاه‌ها، بودجه و کمیته توان هر منبع انرژی از موارد پیش‌گفته ناشی می‌شوند.



شکل ۱ ظرفیت نیروگاهی ایران در شهریور ۱۳۹۷ [۲۳]

افزون بر بالا بودن نسبی هزینه‌های اولیه انرژی‌های تجدیدپذیر که به تازگی کاهش یافته است، چالش مهم دیگر طبیعت متغیر مقدار انرژی تولید شده از بسیاری از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر است. مثلاً انرژی تولیدی یک توربین بادی براساس تغییرات سرعت و جهت وزش باد نوسان می‌کند یا انرژی تولیدی یک پانل خورشیدی بسته به زاویه تابش خورشیدی و شرایط جوی تغییر می‌کند. در نیروگاه‌های فسیلی، کنترل برق تولیدی با کنترل سوخت ورودی به توربین انجام می‌شود، اما در نیروگاه‌های تجدیدپذیر این امکان بسیار محدودتر است. این چالش به ویژه اگر سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در برق تولیدی شبکه زیاد باشد، محدودیت فنی بزرگی ایجاد می‌کند، زیرا میزان تولید و مصرف در شبکه برق همواره و همه‌جا باید برابر باشد؛ بنابراین پیش‌بینی‌پذیری تولید و امکان تولید طبق اراده مدیریت شبکه برق در برنامه‌ریزی راهبردی سیستم‌های برق بسیار مهم است. براساس نظر کارشناسان، با زیرساخت‌های فنی و ساختار کنونی مدیریت شبکه برق، شبکه سراسری برق کشور تا سهم ۲۰٪ تجدیدپذیر امکان حفظ پایایی را دارد [۲۴]. محدودیت بیشینه توان (ظرفیت) نصب شده برق پاک از این چالش فنی ناشی می‌شود.

قابلیت اطمینان منبع انرژی از دیگر پارامترهای مهم در تصمیم‌گیری درباره سبد برق پاک است.

نیروگاه‌های فسیلی عموماً بالای ۷۰٪ مواقع آماده تولید هستند، اما مثلاً نیروگاه‌های فتوولتاییک خورشیدی حتی در صورت آمادگی فنی به علت غروب آفتاب و شرایط جوی فقط نزدیک ۳۰٪ مواقع برق تولید می‌کنند [۳، ص ۴۲]. این پارامتر ضریب ظرفیت^{۱۱} نامیده می‌شود. برای محاسبه ضریب ظرفیت هر نیروگاه میزان انرژی تولیدی آن، مثلاً در یک سال، به ظرفیت (انرژی) اسمی آن تقسیم می‌شود. این پارامتر از این لحاظ مهم است که گرچه قانون‌گذار میزان معینی توان تجدیدپذیر را تکلیف کرده است، این توان نصب شده در مورد انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی سالانه بسیار کمتری را تحویل شرکت مادر تخصصی توانیر می‌دهد. محدودیت حداقل ضریب ظرفیت قابل پذیرش از این استدلال ناشی می‌شود. در همین راستا بازده فنی تبدیل انرژی اولیه^{۱۲} به برق نیز مهم است [۲۴، ص ۳۰۹، ۳۵۶ و ۳۹۱]؛ گرچه به دلیل رایگان بودن انرژی اولیه تجدیدپذیر (معادل سوخت) برای برق پاک (غیر از زیست‌توده) اهمیت کمتری پیدا می‌کند. هدف افزایش بازده فنی از این موضوع ناشی می‌شود.

۲-۳- متغیرهای تصمیم و اندیس‌ها و مجموعه‌های مدل

X_i : توان (ظرفیت) نصب شده تولید برق از منبع اولیه انرژی تجدیدپذیر $i \in I$

۳-۳- پارامترهای مدل

tps_min : کمینه توان (ظرفیت) نصب شده برق پاک، در انتهای مدت زمان حل‌شده مدل (برحسب مگاوات)

inv_cost_i : هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای نصب تجهیزات تولید برق از منبع انرژی تجدیدپذیر i (برحسب دلار آمریکا بر مگاوات)

om_cost_i : هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری از تجهیزات تولید برق از منبع انرژی تجدیدپذیر i (برحسب دلار آمریکا بر مگاوات)

mci_job_i : تعداد شغل ایجاد شده در مرحله تولید، ساخت و نصب تجهیزات تولید برق منبع انرژی تجدیدپذیر i (نفر بر مگاوات، برای کل دوره تولید تجهیزات تا راه‌اندازی)

om_job_i: تعداد شغل ایجاد شده در مرحله بهره‌برداری و نگهداری از تجهیزات تولید برق
منبع انرژی تجدیدپذیر *i* (نفر بر مگاوات، برای کل طول عمر خدمت‌دهی نیروگاه)
saved_ghg: حداقل جرم گازهای گلخانه‌ای جلوگیری شده توسط تولید برق پاک سبد
ghg_rdc_i: صرفه‌جویی در انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط تولید برق از منبع انرژی
تجدیدپذیر *i* (تن دی‌اکسیدکربن-معادل^{۱۳} بر مگاوات-ساعت)
tps_max: بیشینه توان (ظرفیت) نصب شده برق پاک، در انتهای مدت زمان حل شده مدل
(برحسب مگاوات)
res_cap_i: حداکثر ظرفیت (توان) منبع انرژی تجدیدپذیر *i*
duration_i: مدت زمان ساختن نیروگاه‌های تولید برق از منبع انرژی تجدیدپذیر *i*
dur_max: حداکثر زمان دستیابی میانگین وزنی سبد برق پاک به ظرفیت (توان) مورد نظر
budget: حداکثر بودجه تخمینی خرید برق تجدیدپذیر برای کل مدت زمان اجرای مدل
(ریال)
tariff_i: تعرفه خرید توان تولید شده از منبع انرژی تجدیدپذیر *i* (ریال بر مگاوات)
tech_eff_i: بازده فرآیند تبدیل انرژی تجدیدپذیر *i* به برق
knowledge_i: امکان بومی‌سازی دانش فنی فناوری‌های تبدیل انرژی تجدیدپذیر *i* به برق
social_i: پیامدهای اجتماعی به‌کارگیری فناوری‌های تبدیل انرژی تجدیدپذیر *i* به برق
cf_min: حداقل قابلیت اطمینان منابع (ضریب ظرفیت) میانگین وزنی سبد برق پاک مورد
پذیرش مدیران صنعت برق ایران
cf_i: ضریب ظرفیت (قابلیت اطمینان منبع) نیروگاه تولید برق از منبع انرژی تجدیدپذیر *i*
life_min: حداقل طول عمر میانگین وزنی سبد برق پاک مطلوب مدیران صنعت برق ایران
life_i: طول عمر خدمت‌دهی تجهیزات تبدیل انرژی از منبع تجدیدپذیر *i* به برق
current_i: ظرفیت نصب شده کنونی تولید برق از منبع انرژی تجدیدپذیر *i*

۳-۴- تابع‌های هدف و محدودیت‌ها

هدف شماره (۱) هزینه‌های اولیه و هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری سبد برق پاک کمینه می‌کند. هدف (۲) اشتغال‌زایی سبد برق پاک را در کل چرخه عمر آن شامل تولید تجهیزات، نصب و راه‌اندازی نیروگاه، بهره‌برداری (شامل تأمین سوخت برای زیست توده) و نگهداری بیشینه می‌کند. هدف (۳) میانگین وزنی بازده فنی سبد برق پاک را بیشینه می‌کند. هدف (۴) امکان بومی‌سازی دانش فنی را بیشینه می‌کند. هدف (۵) پیامدهای اجتماعی تولید برق پاک را کمینه می‌کند. محدودیت (۶) حداقل ظرفیت (توان) برق پاک در انتهای برنامه است. محدودیت (۷) حداکثر توان برق پاک قابل‌مدیریت در شبکه برق کنونی است. محدودیت (۸) حداکثر توان در دسترس است. محدودیت (۹) میانگین وزنی مدت‌زمان دستیابی به برنامه را تنظیم می‌کند. محدودیت (۱۰) حداکثر بودجه خرید تضمینی برق است. محدودیت (۱۱) بخشی از تعهد کشور به پیشگیری از انتشار کربن است. محدودیت (۱۲) حداقل میانگین وزنی ضریب ظرفیت (قابلیت اطمینان منبع) قابل‌قبول را تنظیم می‌کند. محدودیت (۱۳) حداقل میانگین وزنی عمر خدمت‌دهی سبد برق را تنظیم می‌کند. محدودیت (۱۴) توان نصب شده کنونی وارد مدل می‌کند. محدودیت (۱۵) غیرمنفی بودن پاسخها را تضمین می‌کند.

$$\text{Min } Z_c = \left(\sum_i \text{inv_cost}_i X_i + \sum_i \text{inv_cost}_i X_i \right) \quad (1)$$

$$\text{Max } Z_j = \left(\sum_i \text{mci_job}_i X_i + \sum_i \text{om_job}_i X_i \right) \quad (2)$$

$$\text{Max } Z_l = \sum_i \text{tech_eff}_i X_i \quad (3)$$

$$\text{Max } Z_k = \sum_i \text{knowledge}_i X_i \quad (4)$$

$$\text{Min } Z_s = \sum_i \text{social}_i X_i \quad (5)$$

Subjected to:

$$\sum_i X_i \geq rps_min \quad (6)$$

$$\sum_i X_i \leq rps_max \quad (7)$$

$$X_i \leq res_cap_i, \forall i \quad (8)$$

$$\sum_i duration_i X_i \leq dur_max \sum_i X_i \quad (9)$$

$$\sum_i tariff_i X_i \leq budget \quad (10)$$

$$\sum_i ghg_rdc_i X_i \geq saved_ghg \quad (11)$$

$$\sum_i cf_i X_i \geq cf_min \sum_i X_i \quad (12)$$

$$\sum_i life_i X_i \geq life_min \sum_i X_i, \forall i \quad (13)$$

$$\sum_i X_i \geq current_{ik}, \forall i \quad (14)$$

$$X_{ijk} \geq 0, \forall i \quad (15)$$

۴- حل مدل

تابع هدف تلفیقی (۱۶) و محدودیت‌های مربوطه (۱۷) به صورت کلی زیر خواهد بود.

$$Min Z = \sum_{r=1}^R \frac{w_r(d_r^+, d_r^-)}{G_r} \quad (16)$$

$$S.t: \sum_i C_i X_i + d_r^- - d_r^+ = G_r, \forall i \in I, r \in R \quad (17)$$

که در آن d انحراف از آرمان، w وزن انحراف، G مقدار آرمان، R مجموعه توابع هدف و I مجموعه انرژی‌های اولیه تجدیدپذیر است.

برای نرمال‌سازی انحراف‌ها از نرمال‌سازی درصدی استفاده شده است که هر انحراف بر سطح هدف خود تقسیم می‌شود و به این ترتیب همه آن‌ها هم‌واحد می‌شوند. برای به دست آوردن وزن

آرمان‌ها و همچنین شاخص‌های امکان بومی‌سازی دانش فنی و پیامدهای اجتماعی تولید برق از انرژی اولیه تجدیدپذیر از تحلیل سلسله‌مراتبی^{۱۴} استفاده شده است [۲۵]. مدیران سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری ایران، کارشناسان پژوهشگاه نیرو و دیگر خبرگان وزارت نیرو جامعه نمونه بوده‌اند و برای به دست آوردن وزن نهایی از امتیازهای آن‌ها میانگین هندسی وزنی گرفته شده است. وزن انحراف‌های مثبت و منفی برابر فرض شده‌اند. مدل با موتور Solver Simplex LP نرم‌افزار اکسل نسخه ۱۶/۰ حل شده است. این موتور می‌تواند برنامه‌ریزی‌های خطی تا ۲۵۰ متغیر را حل نماید. داده‌های حل مدل در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

جدول ۳ داده‌ها و پاسخ‌های حل مدل آرمانی سبب برق پاک ایران [۳، ۲۶-۲۹]

پارامتر	نماد	یکا	خورشیدی	برق بادی	برق آبی	زمین‌گرمایی	زیست‌توده	محدودیت
هزینه‌های سرمایه‌گذاری	inv_cost	USD / MW	۱,۳۸۸,۰۰۰	۱,۴۷۷,۰۰۰	۱,۶۳۵,۰۰۰	۲,۸۵۹,۰۰۰	۲,۶۶۸,۰۰۰	G1= ۷,۵۰۷,۸۰۹,۲۸۷ ۰,۱۱۰,۲۰۰,۷۷۱d1=
هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری	om_cost		۵۰,۰۰۰	۴۸,۰۰۰	۱۴,۰۰۰	۸۴,۰۰۰	۱۶۰,۰۸۰	
اشتغال‌زایی مستقیم تولید تجهیزات و ساخت نیروگاه، در ایران	mci_job	Job-Year / MW	۲۰۰۲	۳۷۰۹	۸۹۰۳	۳۱۰۶	۳۹۰۰	۵۲۴,۹۱۹ G2= d2= ۰,۲۴۳۲۷۲۶۸۱
اشتغال‌زایی مستقیم بهره‌برداری و نگهداری، در چرخه عمر، در خاورمیانه	om_job		۴۵۰۴	۵۱۰۹	۲۹۰۰۹	۵۶۰۸	۲۶۵۰۲	

ادامه جدول ۳

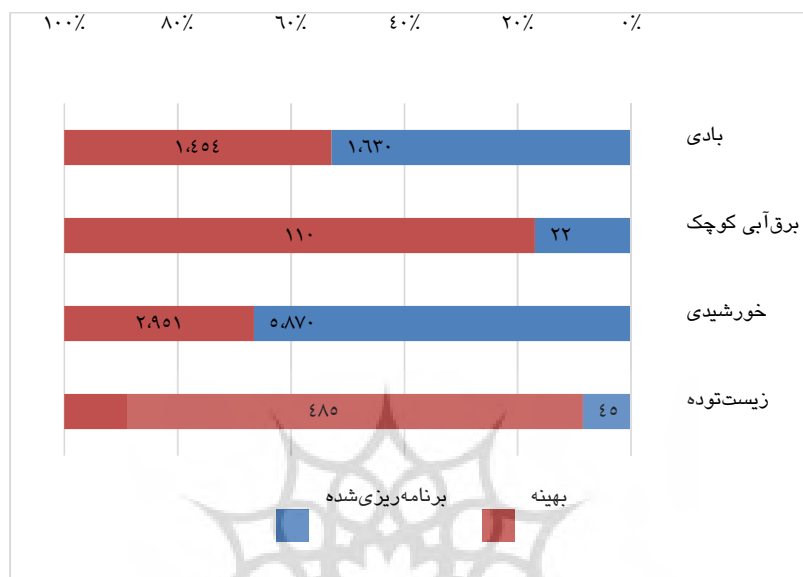
پارامتر	نماد	یکا	خورشیدی	برق بادی	برق آبی	زمین‌گرمایی	زیست‌توده	محدودیت
پیش‌گیری از گازهای گلخانه‌ای، در چرخه عمر	ghg_rdc	Ton Co ₂ -eq / MW	۱۰۰۵۶	۱۳۵۷	۲۲۹۷	۳۳۸۷	۳۰۷۷	۴×۱۶۶۰۰۰۰۰
تعرفه خرید تضمینی (میانگین)	tariff	میلیون ریال بر MW	۸۸۳۳	۹۹۸۶۰۴	۱۵۰۴۳۹۰۵	۳۴۳۳۹۰۲	۲۵۰۲۲۸۰۸	۵۴۰۵۱۶۸۶۵
ضریب ظرفیت (قابلیت اطمینان منع)	cf	(ضریب)	۰۰۲۵	۰۰۳۰	۰۰۵۰	۰۰۸۰	۰۰۸۰	۰۰۳۰
بازده فنی (تبدیل)	tech_eff	(ضریب)	۰۰۱۸	۰۰۴۰	۰۰۳۴	۰۰۳۰	۰۰۳۶	۱۰۳۲۷G3= d3= ۰۰۰۳۹۲۰۷۶۲
عمر خدمت‌دهی	life	سال	۳۰	۲۵	۳۰	۳۰	۴۵	۳۰
مدت‌زمان ساختن و راه‌اندازی	duration	سال	۱	۳	۱	۶	۴	۴

ادامه جدول ۳

پارامتر	نماد	یکا	خورشیدی	برق بادی	برق آبی	زمین‌گرمایی	زیست‌توده	محدودیت
منابع در دسترس	res_cap	MW	۶۰,۰۰۰	۴۰,۰۰۰	۱,۰۳۰	۵,۰۰۰	۲,۰۰۰	[محدودیت]
ظرفیت کنونی	current	MW	۲۶۶	۲۷۲	۱۱۰	۰	۱۱	[محدودیت]
دانش فنی - پژوهش اولیه	knowledge	(ضریب)	۰,۱۱۸	۰,۳۷۵	۰,۱۶۶	۰,۰۵۹	۰,۰۵۳	G4=۹۳۰; d4=۰,۰۵۴۶۹۷۴۱۳۳
پیامدهای اجتماعی - پژوهش اولیه	social	(ضریب)	۰,۱۲۵	۰,۰۹۵	۰,۱۴۳	۰,۰۸۶	۰,۱۰۸	d5=۴۹۷G5=۰,۰۰۶۰۳۴۴۷۹۵
پاسخ: ظرفیت (توان) برق پاک	X	MW	۲,۹۵۰,۰۹۶	۱,۴۵۴,۴۰	۱۰۹,۰۸۵	۰,۰۰۰	۴۸۴,۸۰	[۱۰,۰۰۰-۵,۰۰۰]

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

کشور ایران براساس حل مدل برنامه‌ریزی آرمانی پیشنهادی می‌تواند با نصب ۲,۹۵۱ مگاوات تجهیزات فتوولتاییک خورشیدی، ۱,۴۵۴ برق بادی در خشکی، ۱۱۰ مگاوات برق آبی کوچک (زیر ۱۰ مگاوات) و ۴۸۵ مگاوات تجهیزات تولید برق از زیست‌توده (زباله، زائدات کشاورزی و فاضلاب) در قالب بودجه سالانه کنونی خود (با فرض ثابت نگه داشتن قدرت خرید آن) به اهداف تولید برق تجدیدپذیر خود در چهارچوب برنامه ششم توسعه دست یابد.



شکل ۲ مقایسه انحراف پروانه‌های احداث نیروگاه‌های تجدیدپذیر ایران [۳۰] از پاسخ بهینه حل مدل پیشنهادی

در شکل ۲ انحراف سهم بهینه ناشی از حل مدل پیشنهادی با سهم پروانه‌های احداث نیروگاه‌های تجدیدپذیر ارائه شده از سوی سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری برق ایران در آبان‌ماه سال ۱۳۹۷ خورشیدی مقایسه شده است. هرچه مقدار تعادلی به ۵۰٪ نزدیک‌تر باشد، انحراف برنامه‌ریزی کنونی از برنامه‌ریزی بهینه پیشنهادی کم‌تر است. لازم به توضیح است که پروانه‌های ارائه شده برای ظرفیت کل ۷,۵۰۰ مگاوات بوده است [۳۰]، اما مدل پیشنهادی برای توان حداقل در برنامه ششم توسعه ایران حل شده است. علت این تفاوت ظرفیت می‌تواند این فرض مدیران سائب باشد که ممکن است تا ۵۰٪ پروانه‌های ارائه شده تا پایان برنامه ششم توسعه به بهره‌برداری نرسند؛ بنابراین گزاره‌های نمودار درباره مقادیر انحراف تنها با فرض برابر بودن حاشیه اطمینان موفقیت طرح‌ها برای همه انواع نیروگاه‌های خورشیدی، بادی، زیست‌توده و برق آبی کوچک معتبر است.

هزینه‌ها و اشتغال‌زایی مستقیم ساخت و بهره‌برداری و نگهداری نیروگاه‌های سبب برق پاک ایران در جدول ۴ آورده شده است. این هزینه‌ها در مدل کنونی توسعه برق‌های پاک ایران از سوی مالک خصوصی نیروگاه تأمین می‌شود و سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق ایران هزینه کلی انرژی تولید شده را به وی می‌پردازد. با این حال این هزینه‌ها در دید کلان از بازارهای سرمایه و تسهیلات کشور تأمین می‌شود. اشتغال‌زایی مستقیم براساس داده‌های بین‌المللی تعدیل شده برای خاورمیانه محاسبه شده است. گرچه اشتغال‌زایی غیرمستقیم می‌تواند بسیار بیش از این مقدار باشد، به علت عدم وجود داده‌های معتبر در محاسبات آورده نشده است. با این همه ممکن است اشتغال‌زایی القایی^{۱۰} به کارگیری برق‌های پاک در کشورهای تولیدکننده سوخت‌های فسیلی منفی باشد. برای محاسبه اشتغال‌زایی القایی تنها روش ایجاد جدول داده-ستانده اقتصاد کلان با محوریت انرژی‌های تجدیدپذیر است که داده‌های آن برای ایران برای همه برق‌های پاک موجود نیست. این محدودیت البته لزوم پژوهش را مخدوش نمی‌کند، زیرا همچنان‌که پیشتر بیان شد، مسأله پژوهش جاری با این پیش‌فرض تعریف شده است که کشورهای نفت‌خیز می‌خواهند سهم مشخصی از سبب انرژی خود را از منابع تجدیدپذیر تأمین کنند و فرض بر این است که با دستیابی به آن اهداف کلان بلند مدت آن کشور به نسبت بهینه تأمین می‌شوند [۳]. نکته دیگر این‌که برای واقع‌بینانه‌تر شدن منافع حاصل از اشتغال‌زایی و صرفه‌جویی انتشار گازهای گلخانه‌ای پیرو تولید برق پاک از داده‌های کل چرخه عمر (و زنجیره ارزش شامل تحقیق و توسعه، تولید تجهیزات، ساخت نیروگاه و بهره‌برداری و نگهداری) فناوری‌های تبدیل انرژی‌های تجدیدپذیر به برق استفاده شده است، اما متناسب با داده‌های دانش فنی (خروجی پژوهش اولیه نویسندگان)، سهم حلقه‌هایی مانند تحقیق و توسعه و تولید تجهیزات برای شرایط کنونی ایران تعدیل شده‌اند. به این ترتیب اطمینان حاصل شده است که این منافع حاصل از سبب برق پاک، دست‌کم با بخشی از زنجیره ارزش حاصل می‌شوند.

جدول ۴ هزینه‌ها و اشتغال‌زایی سبب بهینه برق پاک ایران

برق پاک	توان بهینه (مگاوات)	هزینه سرمایه‌گذاری (دلار)	هزینه بهره‌برداری و نگهداری (سالانه دلار)	اشتغال‌زایی مستقیم سالانه	اشتغال‌زایی مستقیم بهره‌بردار سالانه	پیش‌گیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای (تن دی‌اکسید کربن-معادل)
خورشیدی فتولتاییک	۲،۹۵۱	۴،۰۹۵،۹۳۰،۵۵۹	۱۴۷،۵۴۷،۹۳۱	۴۲،۹۸۹	۲،۴۷۹	۱،۴۲۳،۴۲۴
بادی (خشکی)	۱،۴۵۴	۲،۱۴۸،۱۴۲،۵۷۹	۶۹،۸۱۰،۹۹۸	۳۰،۳۱۰	۸۱۴	۷۵۰،۹۹۲
برق‌آبی کوچک	۱۱۰	۱۷۹،۵۹۹،۸۴۵	۱،۵۳۷،۸۵۸	۹۰،۵۷	۷۳۸	۵۷،۵۹۹
زیست‌توده	۴۸۵	۱،۲۹۳،۴۴۲،۶۵۴	۷۷،۶۰۶،۵۵۹	۱۸،۳۴۴	۲،۴۲۸	۲۴۷،۴۲۲
جمع	۵،۰۰۰	۷،۷۱۷،۱۱۵،۶۳۷	۲۹۶،۵۰۳،۳۴۶	۱۰۰،۷۰۱	۶،۴۵۹	۲،۴۷۹،۴۳۷

به نظر می‌رسد که توسعه ظرفیت برق زیست‌توده (زباله، زائدات کشاورزی و فاضلاب) نیازمند توجه جدی سیاست‌گذاران باشد، زیرا تاکنون ظرفیت کنونی برق زیست‌توده تنها ۱۰ مگاوات است و برای دستیابی به توان بهینه ظرفیت آن باید ۵۰ برابر شود. دلیل این شکاف بزرگ می‌تواند میان‌دستگاهی بودن توسعه برق زیست‌توده باشد، زیرا برعکس فتولتاییک خورشیدی، برق بادی و برق‌آبی که کاملاً در حوزه مدیریتی وزارت نیرو قرار دارد، در توسعه و بهره‌برداری از زیست‌توده، شهرداری‌ها و وزارت جهاد کشاورزی نیز باید همکاری داشته باشند. توجه به این نکته ضروری است که حتی در صورت نصب این ظرفیت، تنها شش دهم درصد توان برق ایران از این زیست‌توده تأمین خواهد شد.

۶- قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب سپاس‌گزاری را خود را از مدیران و کارشناسان محترم سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق ایران، آقایان دکتر امیر دودابی‌نژاد، محمد ساتکین، رضا صمدی، کیان نجف‌زاده، محمدعلی رضانی، اکبر شعبانی‌کیا و مهندس علی نظری و غلامرضا کبریایی طبری و خانم مهندس شیرین بهار، آقایان دکتر محمد صادق قاضی‌زاده و حمیدرضا لاری از پژوهشگاه نیرو، دکتر حبیب قراگوزلو از شرکت مدیریت شبکه برق ایران، دکتر ناصر باقری‌مقدم از مرکز تحقیقات سیاست علمی کشور، دکتر مجتبی فرخ از دانشگاه خوارزمی، دکتر سیروس وطن‌خواه از معاونت علمی- فناوری ریاست جمهوری اسلامی ایران اعلام می‌دارند. لازم به ذکر است این مشارکت‌کنندگان هیچ مسئولیتی در قبال یافته‌ها و نتایج این پژوهش ندارند و تمام مسئولیت آن بر عهده نویسندگان است.

۷- پی‌نوشت‌ها

1. Greenhouse Gas (GHG)
2. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)
۳. اگرچه امروزه سدهای برق‌آبی بزرگ پایدار محسوب نمی‌شوند، اما پای این سدها می‌تواند برق‌آبی کوچک^۱ (زیر ۱۰ مگاوات) ساخت.
4. prime energy
5. Renewable Portfolio Share (RPS)
6. Multi-objective Optimization
7. Goal Programming
8. Charnes and Cooper
9. Multi-objective Decision Making
10. Ignizio
11. capacity factor (CF)
12. prime energy
۱۳. دی‌اکسیدکربن-معادل یکای گازهای گلخانه‌ای است که از معادل کردن دیگر گازهای گلخانه‌ای با کربن منتشره (براساس الگوی هزینه) و جمع آن با میزان انتشار دی‌اکسیدکربن به دست می‌آید.
14. Analytical Hierarchical Process
15. Induced employment

۸- منابع

- [1] Le Quéré, C., Andrew, R.M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Pongratz, J., Manning, A.C., et al. Global carbon budget 2017. *Earth Syst Sci Data: Copernicus Publications*; 2018. p. 405-448.
- [2] Kachoee, M.S., Salimi, M., Amidpour, M. The long-term scenario and greenhouse gas effects cost-benefit analysis of iran's electricity sector. *Energy*. 2018;143:585-596.
- [3] Farmad, M., Shafiei, E., Aryanpur, V., Goodarzi Rad, R., Darab, S. Long-term planning of iran energy sector development. In: Ministry of Energy of Iran, editor.: Deputy for Planning and Economic Affairs; 2014.
- [4] Park, N.-B., Yun, S.-J., Jeon, E.-C. An analysis of long-term scenarios for the transition to renewable energy in the korean electricity sector. *Energy Policy*. 2013;52:288-296.
- [5] Büyüközkan, G., Gülerüz, S. Evaluation of renewable energy resources in turkey using an integrated medm approach with linguistic interval fuzzy preference relations. *Energy*. 2017;123:149-163.
- [6] Troldborg, M., Heslop, S., Hough, R.L. Assessing the sustainability of renewable energy technologies using multi-criteria analysis: Suitability of approach for national-scale assessments and associated uncertainties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;39:1173-1184.
- [7] Evans, A., Strezov, V., Evans, T.J. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009;13(5):1082-1088.
- [8] Amer, M., Daim, T.U. Selection of renewable energy technologies for a developing county: A case of pakistan. *Energy for Sustainable Development*. 2011;15(4):420-435.
- [9] Ren, J., Sovacool, B.K. Prioritizing low-carbon energy sources to enhance china's energy security. *Energy Conversion and Management*. 2015;92:129-136.

- [10] Al Garmi, H., Kassem, A., Awasthi, A., Komljenovic, D., Al-Haddad, K. A multicriteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2016;16:137-150.
- [11] Park, S.Y., Yun, B.-Y., Yun, C.Y., Lee, D.H., Choi, D.G. An analysis of the optimum renewable energy portfolio using the bottom-up model: Focusing on the electricity generation sector in South Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;53:319-329.
- [12] Kachoei, M.S., Amidpour, M. The scenario analysis on greenhouse gas emission mitigation potential in the Iranian electricity sector using LEAP model. *Iranian Journal of Energy*. 2016;19(3):101-116. (in Persian).
- [13] Wang, J.-J., Jing, Y.-Y., Zhang, C.-F., Zhao, J.-H. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009;13(9):2263-2278.
- [14] Ren, J., Dong, L. Evaluation of electricity supply sustainability and security: Multi-criteria decision analysis approach. *Journal of Cleaner Production*. 2018;172:438-453.
- [15] Tran, T.T.D., Smith, A.D. Incorporating performance-based global sensitivity and uncertainty analysis into LCOE calculations for emerging renewable energy technologies. *Applied Energy*. 2018;216:157-171.
- [16] Maxim, A. Sustainability assessment of electricity generation technologies using weighted multi-criteria decision analysis. *Energy Policy*. 2014;65:284-297.
- [17] Çolak, M., Kaya, İ. Prioritization of renewable energy alternatives by using an integrated fuzzy MCDM model: A real case application for Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;80:840-853.
- [18] Kaya, T., Kahraman, C. Multicriteria decision making in energy planning using a modified fuzzy TOPSIS methodology. *Expert Systems with Applications*. 2011;38(6):6577-6585.

- [19] Babaei, L., Rabieh, M., Nikbakhsh, E., Esmaili, M. Multi-objective mathematical model for green supplier selection (case study: Supply chain of iran khodro company). *Modern Researches in Decision Making*. 2017;2(۲):۸۳-۵۱. (in Persian).
- [20] Mansoori, S., Bozorgi-Amiri, A., Bayatloo, F. A bi-objective robust optimization model for emergency blood supply network design under uncertainty. *Modern Researches in Decision Making*. 2018;3(2):249-274. (in Persian).
- [21] Mehregan, M.R. Multiple objective decision making. Tehran: University of Tehran Press 2013. (in Persian).
- [22] Baumol, W.J. Management models and industrial applications of linear programming, volume i, by abraham charnes and william w. Cooper. John wiley and sons, new york, 1961. Xxiii + 467 pp. \$11.75. 1962;9(1):63-64.
- [23] Renewable Energy and Energy Efficiency Organization of Iran (SATBA). List of renewable and sustainable power plants of iran. Ministry of Energy of Iran; 2018 September. (in Persian).
- [24] Acevedo, M.F. Introduction to renewable power systems and the environment with r. 1st ed. Boca Raton, FL: CRC Press; 2018 July 19, 2018. 457 p.
- [25] Saaty, T.L. Decision making with the analytic hierarchy process. 2008;1(1):83-98.
- [26] International Renewable Energy Agency. Renewable power generation costs in 2017/2018 January 2018. 160 p.
- [27] Greenpeace International, GWEC, EREC. Energy [r]evolution 2012: A sustainable world energy outlook. Global Wind Energy Council; European Renewable Energy Council, 2012, 2013.
- [28] National Renewable Energy Laboratory. 2018 annual technology baseline (atb): Cost and performance data for electricity generation technologies. In: Laboratory NRE, editor. 2018.
- [29] Intergovernmental Panel on Climate Change. Special report on renewable energy

sources and climate change mitigation. United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2011.

- [30] Renewable Energy and Energy Efficiency Organization of Iran (SATBA). Issued renewable power plant permits (november 6 .(In: Ministry of Energy of Iran, editor. Tehran2018. (in Persian).

