

## ارائه روشی جدید به منظور بهینه‌سازی چندهدفه سیستم ترکیبی مستقل از شبکه فتوولتائیک/دیزل ژنراتور با در نظر گرفتن عدم قطعیت و رزرو

زهرا موحدیان<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ علیرضا اسکرزاده<sup>۲</sup>، دانشیار

۱- پژوهشگاه انرژی - پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته - کرمان - ایران - z.movahediyani43@gmail.com

۲- پژوهشگاه انرژی - پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته - کرمان - ایران - a.askarzadeh@kgut.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، یک چارچوب برای بهینه‌سازی چندهدفه سیستم ترکیبی فتوولتائیک/دیزل ژنراتور (PV/DG) ارائه شده است. این مطالعه طراحی سیستم PV/DG را با اهداف کاهش هزینه، کاهش آلاینده‌گی و افزایش قابلیت اطمینان دنبال می‌کند. هزینه خالص فعلی (TNPC)، آلاینده‌گی دی‌اکسیدکربن و احتمال از دست دادن منبع تغذیه (LPSP) به عنوان توابع هدف مسئله انتخاب شده‌اند. این سیستم در سه وضعیت ۱- بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت و رزرو، ۲- با در نظر گرفتن عدم قطعیت و ۳- با در نظر گرفتن عدم قطعیت و رزرو بررسی شده است. به منظور حل مؤثر این مسئله بهینه‌سازی، نسخه چندهدفه الگوریتم جستجوی کلاغ (MO-CSA) توسعه داده شده و نتایج شبیه‌سازی با نتایج حاصل از الگوریتم پرطرفدار ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب II (NSGA-II) مقایسه شده است. کدنویسی مسئله در محیط نرم‌افزار متلب انجام گرفته و مرزهای پارتو حاصل از بررسی سیستم در هر یک از سه وضعیت مذکور با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که ترکیب دیزل ژنراتور و سیستم فتوولتائیک گزینه مناسبی برای تحقق اهداف در نظر گرفته شده و تأمین توان الکتریکی مناطق مستقل از شبکه است. ضمن آن که الگوریتم جستجوی کلاغ چندهدفه نتایج بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب II پیدا می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** سیستم ترکیبی فتوولتائیک/دیزل ژنراتور، بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم جستجوی کلاغ

## A novel approach for multi-objective optimization of standalone PV/DG hybrid system with considering uncertainty and operating reserve

Z. Movahediyani<sup>1</sup>, MSc Student; A. Askarzadeh<sup>2</sup>, Associate Professor

1- Department of Energy Management and Optimization, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran, Email: z.movahediyani43@gmail.com

2- Department of Energy Management and Optimization, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran, Email: a.askarzadeh@kgut.ac.ir

**Abstract:** In this paper, a framework for multi-objective optimization of a hybrid photovoltaic/diesel generator (PV/DG) system has been presented. This study follows the design of the PV/DG system at the lowest cost, lowest emission and highest reliability. The total net present cost (TNPC), CO<sub>2</sub> emissions and the loss of power supply probability (LPSP) are selected as the problem objectives. This system has been designed in three scenarios: 1- without considering uncertainty and operating reserve, 2- with considering uncertainties of the system and 3- with considering uncertainties of the system and using DG as operating reserve. In order to effectively solve this problem, multi-objective version of crow search algorithm (MO-CSA) has been developed and the results are compared with the results obtained by well-known non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II). The coding of the problem has been done in MATLAB environment and the Pareto fronts have been compared. Simulation results indicate that combination of DG and PV is a promising alternative for supplying the electrical demand of stand-alone areas. Moreover, the results obtained by MO-CSA outperform the results obtained by NSGA-II.

**Keywords:** hybrid photovoltaic/diesel system, multi-objective optimization, crow search algorithm.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۱۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۳۰

نام نویسنده مسئول: علیرضا اسکرزاده

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کرمان - انتهای اتوبان هفت باغ علوی - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته - پژوهشگاه انرژی

## فهرست علائم

توان خروجی پانل‌های فتوولتائیک (kW)	$P_{pv}$
بازده اینورتر	$\eta_{inv}$
بازده سیستم فتوولتائیک	$\eta_{pv}$
بازده مرجع	$\eta_r$
بازده واحد اصلاح توان	$\eta_t$
ضریب دمایی بازده پانل فتوولتائیک	$\gamma$
دمای سلول خورشیدی ( $^{\circ}C$ )	$T_j$
دمای سلول مرجع ( $^{\circ}C$ )	$T_{ref}$
دمای محیط ( $^{\circ}C$ )	$T_{amb}$
دمای سلول در شرایط عملکرد نامی ( $^{\circ}C$ )	$NOCT$
هزینه اولیه پانل‌های فتوولتائیک ( $\$/m^2$ )	$\alpha_{pv}$
طول عمر پروژه	$N$
نرخ سود	$r$
نرخ افزایش قیمت مربوط به تجهیز $i$	$\beta_i$
نرخ تورم	$\delta$
انحراف توان تولیدی سیستم فتوولتائیک	$dP_{PV}$
توان تولیدی سیستم فتوولتائیک با عدم قطعیت	$P_{pv,um}$
آلاینده‌گی سیستم فتوولتائیک	$E_{pv}$
هزینه اولیه دیزل ژنراتور ( $\$/kW$ )	$\alpha_{dg}$
ساعات کارکرد دیزل ژنراتور	$N_{nun}$
توان نامی دیزل ژنراتور	$P_{dgn}$
انحراف بار الکتریکی	$dP_l$
بار الکتریکی با در نظر گرفتن عدم قطعیت	$P_{L,um}$

## ۱- مقدمه

در چند سال اخیر، با توجه به کاهش سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های محیطی ناشی از آن‌ها، منابع انرژی تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. در مناطق دور از شبکه، تأمین برق به‌طور عمده توسط دیزل ژنراتورها صورت می‌گیرد. با این حال، استفاده از دیزل ژنراتورها مشکلاتی از قبیل انتشار  $CO_2$ ، نوسانات قیمت سوخت و هزینه‌های نگهداری بالا را به همراه خواهد داشت. در نتیجه، دیزل ژنراتور بهترین راه‌حل ممکن برای تأمین برق مناطق دور از شبکه نیست.

در اکثر موارد، استفاده از یک سیستم ترکیبی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید انرژی برق کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت اطمینان را به دنبال خواهد داشت. در چنین سیستمی، ترکیب بهینه اجزای سیستم یک مسئله مهم است. در میان سیستم‌های ترکیبی، ترکیب پانل‌های فتوولتائیک ( $PV$ ) و دیزل ژنراتور ( $DG$ ) یک انتخاب پورطرفدار است. سیستم ترکیبی فتوولتائیک/دیزل می‌تواند قابلیت اطمینان و صرفه اقتصادی بیشتری نسبت به سیستم فتوولتائیک تنها و یا دیزل تنها داشته باشد مشروط بر این که طراحی سیستم ترکیبی و

مدیریت آن در مرحله عملیاتی بهینه باشد [۱، ۲]. این مطالعه بر روی بهینه‌سازی چندهدفه سیستم ترکیبی فتوولتائیک/دیزل با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری تمرکز کرده است. بهینه‌سازی چندهدفه سیستم ترکیبی به تصمیم‌گیرنده اجازه می‌دهد تا یک وضعیت تعادلی را بین منافع مختلف سیستم تجسم کند. بهینه‌سازی چندهدفه مجموعه‌ای از جواب‌ها را ارائه می‌دهد که همگی معیارهای سنجش مسئله را برآورده می‌کنند و این تفاوت کلیدی بهینه‌سازی چندهدفه با بهینه‌سازی تک‌هدفه است. مهم‌ترین چالش‌های سیستم ترکیبی فتوولتائیک/دیزل یعنی هزینه، قابلیت اطمینان و آلاینده‌گی به‌عنوان اهداف مسئله در نظر گرفته شده‌اند. این مطالعه اندازه‌یابی سیستم ترکیبی را از طریق بهینه‌سازی هم‌زمان اهداف مسئله دنبال کرده است.

امکان استفاده از سیستم‌های ترکیبی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر در تحقیقات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۳]، نویسنده اندازه بهینه یک سیستم فتوولتائیک/باد/باتری/جزر و مد را به‌وسیله الگوریتم جستجوی کلاغ ( $CSA$ ) تعیین کرده است (با در نظر گرفتن هزینه به‌عنوان تابع هدف). این تحقیق نشان‌دهنده تأثیر مثبت انرژی جزر و مد در تأمین اقتصادی‌تر انرژی الکتریکی است. علاوه بر این نتایج بیانگر کارایی امیدوارکننده  $CSA$  در مقایسه با الگوریتم ژنتیک ( $GA$ ) و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ( $PSO$ ) است. در مرجع [۴]، ابتدا یک سیستم فتوولتائیک/باد با استفاده از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب II ( $NSGA-II$ ) به‌صورت چندهدفه بهینه‌سازی شده و سپس با به‌کارگیری ضرایب وزنی برای اهداف سیستم، مسئله به‌صورت تک‌هدفه در دو سناریو حل شده است. یک سناریو عدم قطعیت منابع انرژی خورشیدی و بادی را در نظر گرفته و سناریو دیگر این عدم قطعیت‌ها را در نظر نگرفته است. در مرجع [۵]، الگوریتم بهینه‌سازی بهبودیافته مگس میوه ( $IFOA$ ) برای کمینه‌سازی هم‌زمان کل هزینه سالانه ( $TAC$ ) و آلاینده‌گی سیستم ترکیبی فتوولتائیک/باد/دیزل/باتری به‌کاررفته است. در مرجع [۶]، سیستم ترکیبی فتوولتائیک/دیزل/باتری با استفاده از الگوریتم  $PSO$  بهینه‌سازی شده است. در مرجع [۷]، الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای کمینه‌سازی هم‌زمان هزینه چرخه زندگی ( $LCC$ ) و آلاینده‌گی دی‌اکسیدکربن یک سیستم ترکیبی مورد استفاده قرار گرفته است. در مرجع [۸]، سیستم فتوولتائیک/دیزل بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز باتری بهینه‌سازی شده است. تابع هدف این مسئله بر اساس هزینه انرژی تراز شده ( $LCOE$ ) تعریف شده و بر طبق گزارش نویسندگان این مقاله استفاده از سیستم فتوولتائیک/دیزل بدون در نظر گرفتن باتری از به‌کارگیری دیزل ژنراتور تنها مقرون‌به‌صرفه‌تر بوده است. در مرجع [۹]، یک سیستم فتوولتائیک/باد/دیزل/باتری به‌عنوان بهترین سیستم ترکیبی برای تأمین برق یک مرکز پرتراکم در مالزی مورد استفاده قرار گرفته است. بهینه‌سازی سیستم با استفاده از نرم‌افزار HOMER<sup>11</sup> انجام شده و در نهایت آلاینده‌گی، هزینه انرژی ( $COE$ ) و

جدید مناسب و بهره‌وری به توانایی الگوریتم برای مورد بهره‌برداری قراردادن نقاط مناسب یافته‌شده، اطلاق می‌شود. در این الگوریتم، هر کلاغی که برای رسیدن به نقطه جدید به صورت تصادفی یکی از کلاغ‌های دارای موقعیت خوب (که جایگاه آن در حافظه ثبت شده است) را انتخاب می‌کند، در نزدیک شدن به جایگاه این کلاغ با یک ریسک مواجه است که در این الگوریتم، احتمال آگاهی کلاغ مورد تعقیب نامیده می‌شود. مقدار آگاهی در این الگوریتم میزان اهمیت به کاوش و بهره‌وری را تعیین می‌کند. علاوه بر این، CSA ویژگی‌های دیگری نظیر پیاده‌سازی ساده و سرعت همگرایی مناسب را نیز دارا است.

## ۲-۴ مدل‌سازی ریاضی سیستم ترکیبی فتوولتائیک/دیزل

در این تحقیق، سیستم ترکیبی از جنبه‌های اقتصادی، قابلیت اطمینان و آلاینده‌گی مورد بررسی قرار می‌گیرد. توابع هدف مطالعه حاضر هزینه خالص فعلی، احتمال از دست دادن منبع تغذیه و میزان آلاینده‌گی گاز CO<sub>2</sub> هستند. برای تعریف توابع هدف فرمول‌بندی ریاضی اجزای سیستم مورد نیاز است.

### ۲-۴-۱ مدل‌سازی سیستم فتوولتائیک

#### ۲-۴-۱-۱ توان خروجی

توان تولیدی پانل‌های فتوولتائیک در هر ساعت (t) به وسیله سه عامل که عبارت‌اند از مساحت پانل‌های فتوولتائیک (A<sub>pv</sub>), بازده پانل‌های فتوولتائیک (η<sub>pv</sub>) و شدت تابش خورشید (R<sub>a</sub>(t)) با استفاده از معادله (۱) به دست می‌آید. بازده فتوولتائیک تابعی از دما است و به وسیله معادله (۲) محاسبه می‌شود؛ بنابراین، در محاسبه توان خروجی سیستم فتوولتائیک معادلات زیر حاکم هستند:

$$P_{pv}(t) = R_a(t) \times \eta_{pv} \times A_{pv} \quad (1)$$

$$\eta_{pv} = \eta_r \times \eta_t \times [1 - \gamma \times (T_j - T_{ref})] \quad (2)$$

$$T_j = T_{amb}(t) + \frac{R_a(t)}{800} \times (NOCT - 20) \quad (3)$$

#### ۲-۴-۲ عدم قطعیت

شدت تابش خورشید غیر قابل پیش‌بینی بوده و بنابراین، توان خروجی پانل‌های فتوولتائیک دارای عدم قطعیت است. با توجه به این‌که شدت تابش خورشید دارای عدم قطعیت است، یک میزان انحراف از مقادیر پیش‌بینی شده وجود خواهد داشت. یکی از روش‌های رایج برای محاسبه میزان انحراف توان سیستم فتوولتائیک از مقدار پیش‌بینی شده، استفاده از معادله (۴) است [۱۸]:

$$dP_{pv}(t) = 0.6 \times \sqrt{P_{pv}(t)} \quad (4)$$

$$P_{pv,un}(t) = dP_{pv}(t) \times noise + P_{pv}(t) \quad (5)$$

در روابط فوق noise با استفاده از توزیع نرمال استاندارد مدل‌سازی شده است.

NPC سیستم بهینه ترکیبی با سیستمی که تنها متشکل از دیزل ژنراتور است، مقایسه شده است. در مرجع [۱۰]، یک سیستم فتوولتائیک/باد/دیزل مستقل برای تأمین توان مورد نیاز با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار، ارائه شده است. این مطالعه هزینه و قابلیت اطمینان را به عنوان توابع هدف در نظر گرفته است. در مرجع [۱۱]، LCOE و آلاینده‌گی دی‌اکسید کربن برای سه آرایش از سیستم‌های ترکیبی شامل دیزل/چرخ طیار، فتوولتائیک/دیزل/چرخ طیار، فتوولتائیک/دیزل/باتری/چرخ طیار برای شهر مکه در کشور عربستان سعودی بررسی شده است. در مرجع [۱۲]، بهینه‌سازی چندهدفه یک سیستم انرژی فتوولتائیک/باد/دیزل/هیدروژن/باتری مطالعه شده است. در مرجع [۱۳]، بهینه‌سازی چندهدفه یک سیستم ترکیبی مستقل از شبکه فتوولتائیک/دیزل مطالعه شده است. این مقاله یک شاخص قابلیت اطمینان جدید به نام حداکثر انرژی تأمین‌نشده مورد انتظار (maxENS<sup>۱</sup>) ارائه کرده است. متغیرهای تصمیم این مسئله تعداد توربین‌های بادی، پانل‌های فتوولتائیک و باتری‌ها هستند. در مرجع [۱۴]، نویسندگان روش‌های بهینه‌سازی سیستم‌های ترکیبی مستقل از شبکه را ارزیابی کرده‌اند. در مرجع [۱۵]، از الگوریتم جستجوی هارمونی به منظور بررسی یک آرایش ترکیبی بهینه متشکل از واحدهای تولیدی حرارتی و منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی در یک دوره روزانه استفاده شده است. در مرجع [۱۶]، بهینه‌سازی یک سیستم ترکیبی مستقل از شبکه، متشکل از آرایه فتوولتائیک و توربین بادی با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز بررسی شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در یک سیستم ترکیبی مستقل از شبکه علاوه بر کاهش آلاینده‌گی، هزینه را نیز کاهش می‌دهد.

مطالعه مراجع موجود حاکی از آن است که اندازه‌یابی بهینه سیستم‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر غالباً به صورت تک‌هدفه حل شده است و تعداد اندکی از مراجع نیز این مسئله را به صورت دوهدفه حل کرده‌اند. در این مقاله، هدف اصلی ارائه یک چارچوب مناسب برای بهینه‌سازی چندهدفه یک سیستم ترکیبی متشکل از فتوولتائیک و دیزل ژنراتور است. اهداف مورد نظر هزینه، آلاینده‌گی و قابلیت اطمینان بوده و متغیرهای تصمیم مسئله عبارت‌اند از توان نامی دیزل ژنراتور و مساحت پانل‌های فتوولتائیک. به منظور حل مؤثر این مسئله بهینه‌سازی، نسخه چندهدفه CSA توسعه داده شده است. CSA یک الگوریتم بهینه‌سازی فرا ابتکاری جدید است که نسخه تک‌هدفه آن در سال ۲۰۱۶ ارائه شده است [۱۷]. یکی از ویژگی‌هایی که در CSA مورد توجه قرار گرفته، احتمال آگاهی کلاغ از تعقیب شدن است. این ویژگی نقش مهمی در برقراری تعادلی سازنده بین کاوش و بهره‌وری که دو اصل حائز اهمیت در الگوریتم‌های بهینه‌سازی هستند، ایفا می‌کند. در تئوری بهینه‌سازی گفته می‌شود یک الگوریتم بهینه‌سازی توانمند است اگر بتواند تعادل مناسبی بین دو مقوله کاوش و بهره‌وری برقرار کند. کاوش به توانایی یک الگوریتم در یافتن نقاط

$$IC_{dg} = \alpha_{dg} \times P_{dgn} \quad (15)$$

$$OMC_{dg,npv} = OMC_{dg} \times N_{run} \times \sum_{l=1}^N \left( \frac{1 + \beta_{dg}}{1 + r} \right)^l \quad (16)$$

$$RC_{dg,npv} = RC_{dg} \times P_{dgn} \times \sum_{l=7,14,21,28} \left( \frac{1 + \delta}{1 + r} \right)^l \quad (17)$$

$$FC_{dg,npv} = FC_{dg} \times \sum_{l=1}^N \left( \frac{1 + \delta}{1 + r} \right)^l \quad (18)$$

#### ۴-۴-۲- آلاینده‌گی

آلاینده‌گی دی‌اکسیدکربن ناشی از مصرف سوخت دیزل ژنراتور از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۴]:

$$E_{dg} = e_2 \times \sum_{t=1}^{8760} f_c(t) \quad (19)$$

در رابطه فوق ضریب عددی  $e_2$  برابر با  $2/4 \text{ kg CO}_2 / \text{l}$  در نظر گرفته شده است. این عدد به مشخصه دیزل ژنراتور و نوع سوخت آن وابسته بوده و معمولاً در محدوده  $2/4$  تا  $2/8$  کیلوگرم بر لیتر قرار می‌گیرد [۱۲].

#### ۴-۴-۲- محدودیت

مقدار توان خروجی دیزل ژنراتور در هر ساعت در یک محدوده مشخص می‌تواند تغییر کند. رابطه زیر بیانگر این محدودیت است:

$$P_{dg,\min} \leq P_{dg}(t) \leq P_{dgn} \quad (20)$$

#### ۴-۲- مدل‌سازی اینورتر

##### ۴-۴-۲- هزینه

توان DC خروجی سیستم فتوولتائیک با عبور از اینورتر به توان AC تبدیل می‌شود. در این تحقیق، ظرفیت اینورتر برابر با بیشترین توان خروجی سیستم فتوولتائیک انتخاب می‌شود. از آنجایی که طول عمر اینورتر با طول عمر پروژه برابر است، نیازی به محاسبه هزینه تعویض اینورتر نیست و هزینه خالص فعلی اینورتر ( $NPC_{inv}$ ) با در نظر گرفتن هزینه سرمایه‌گذاری اولیه ( $IC_{inv}$ ) و هزینه تعمیر و نگهداری ( $OMC_{inv}$ ) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$NPC_{inv} = IC_{inv} + OMC_{inv,npv} \quad (21)$$

$$P_{inv} = \max(P_{pv,\min}) \quad (22)$$

$$IC_{inv} = \alpha_{inv} \times P_{inv} \quad (23)$$

$$OMC_{inv,npv} = OMC_{inv} \times \sum_{l=1}^N \left( \frac{1 + \beta_{inv}}{1 + r} \right)^l \quad (24)$$

#### ۴-۲- مدل‌سازی بار الکتریکی

هدف نهایی این مطالعه، تأمین یک بار الکتریکی خانگی به بهترین شکل ممکن است. در بخشی از این مطالعه به منظور مدل‌سازی دقیق تقاضا، عدم قطعیت بار الکتریکی به صورت زیر محاسبه شده است [۱۸]:

#### ۴-۲- آلاینده‌گی

تکنولوژی ساخت پانل‌های فتوولتائیک و انتقال پانل‌های ساخته شده از کارخانه به محل نصب، آلاینده‌گی به همراه دارد. رابطه زیر مفهوم عددی از این آلاینده‌گی‌ها ارائه می‌دهد [۱۹]:

$$E_{pv} = P_{pv,\max} \times e_1 \quad (6)$$

در رابطه فوق، ضریب عددی  $e_1$  برابر با  $1392 \text{ kg CO}_2 / \text{kWp}$  در نظر گرفته شده است [۱۹]. یکی از عوامل عمده تأثیرگذار در مقدار ثابت  $e_1$ ، تکنولوژی ساخت پانل‌های خورشیدی مورد استفاده است.

#### ۴-۲- هزینه

هزینه خالص فعلی پانل‌های فتوولتائیک ( $NPC_{pv}$ ) از هزینه اولیه ( $IC_{pv}$ ) و ارزش فعلی هزینه تعمیر و نگهداری ( $OMC_{pv,npv}$ ) تشکیل شده است. به علت طول عمر زیاد پانل‌های فتوولتائیک، هزینه تعویض در نظر گرفته نشده است؛ بنابراین، در طول عمر پروژه، هزینه خالص فعلی پانل‌های فتوولتائیک از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$NPC_{pv} = IC_{pv} + OMC_{pv,npv} \quad (7)$$

$$IC_{pv} = \alpha_{pv} \times A_{pv} \quad (8)$$

$$OMC_{pv,npv} = OMC_{pv} \times A_{pv} \times \sum_{l=1}^N \left( \frac{1 + \beta_{pv}}{1 + r} \right)^l \quad (9)$$

#### ۴-۲- محدودیت

سطح سیستم فتوولتائیک همواره باید در رابطه زیر صدق کند:

$$0 \leq A_{pv} \leq A_{pv,\max} \quad (10)$$

#### ۴-۲- مدل‌سازی دیزل ژنراتور

##### ۴-۴-۲- هزینه

مصرف سوخت دیزل ژنراتور تابعی از توان خروجی آن است و در هر ساعت به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۰]:

$$f_c(t) = 3.2516e^{-6} P_{dg}(t)^3 - 0.0010074 P_{dg}(t)^2 + 3.9095 P_{dg}(t) + 2.2353 \quad (11)$$

در هر ساعت، هزینه سوخت دیزل ژنراتور با استفاده از تابع مصرف سوخت دیزل و قیمت سوخت ( $p_f$ ) و به کمک معادلات زیر به دست می‌آید:

$$C_f(t) = p_f \times f_c(t) \quad (12)$$

در نهایت، هزینه سالانه سوخت به وسیله رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$FC_{dg} = \sum_{t=1}^{8760} C_f(t) \quad (13)$$

هزینه خالص فعلی دیزل ژنراتور ( $NPC_{dg}$ ) شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه ( $IC_{dg}$ )، هزینه سوخت ( $FC_{dg}$ )، هزینه تعمیر و نگهداری ( $OMC_{dg}$ ) و هزینه تعویض ( $RC_{dg}$ ) است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$NPC_{dg} = IC_{dg} + OMC_{dg,npv} + RC_{dg,npv} + FC_{dg,npv} \quad (14)$$

$$\text{Min. } LPS(A_{pv}, P_{dgn}) = \frac{\sum_{t=1}^{8760} LPS(t)}{\frac{t=1}{8760}} \quad (30)$$

$$\text{Min. } TNPC(A_{pv}, P_{dgn}) = NPC_{pv} + NPC_{dg} + NPC_{inv} \quad (31)$$

$$\text{Min. } TE_{CO_2} = E_{pv} + E_{dg} \quad (32)$$

همان‌گونه که از رابطه (۳۰) مشخص است، قابلیت اطمینان از طریق شاخص احتمال ازدست‌دادن منبع تغذیه (مقدار انرژی تأمین نشده تقسیم بر کل انرژی موردنیاز بار) محاسبه شده است. طبق راهبرد مدیریت انرژی اتخاذشده که در بخش ۲-۶ توضیح داده شده است، مقدار کمبود انرژی در هر ساعت از سال محاسبه می‌شود (مطابق رابطه (۲۸)). درنهایت، مجموع این مقادیر در طول یک سال انرژی تأمین نشده سالانه را به دست می‌دهد. نسبت انرژی تأمین نشده سالانه بر کل انرژی سالانه موردنیاز بار، احتمال ازدست‌دادن منبع تغذیه را مشخص می‌کند.

### ۳- الگوریتم جستجوی کلاغ چندهدفه

یک مرز پارتو بهینه در فضای هدف و یک مجموعه پارتو بهینه در فضای پارامتر بیانگر نتایج بهینه‌سازی چندهدفه هستند. الگوریتم CSA توانایی بالای خود را در بهینه‌سازی تک‌هدفه سیستم‌های ترکیبی [۳] و سایر مسائل بهینه‌سازی نشان داده است [۱۷، ۲۲]. از این رو برای بهینه‌سازی چندهدفه سیستم ترکیبی فتوولتائیک/دیزل از نسخه چندهدفه الگوریتم CSA (MO-CSA) استفاده شده است. مراحل الگوریتم MO-CSA به شرح زیر است:

گام اول: مقداردهی اولیه مسئله و پارامترهای قابل تنظیم. در اولین گام، طول پرواز ( $fl$ )، احتمال آگاهی ( $AP$ )، تعداد کلاغ‌ها ( $N_c$ ) و بیشترین تعداد تکرارها ( $iter_{max}$ ) تنظیم می‌شوند.

گام دوم: یک جمعیت اولیه از کلاغ‌ها در فضای جستجو مقداردهی اولیه می‌شوند. موقعیت هر کلاغ در فضای جستجو با یک بردار  $x = [P_{dgn} A_{pv}]$  نشان داده می‌شود. در اولین تکرار، از آنجایی که کلاغ‌ها هیچ تجربه‌ای ندارند، حافظه آن‌ها به وسیله موقعیت اولیه‌شان مقداردهی اولیه می‌شود.

گام سوم: برای هر کلاغ مقادیر توابع هدف محاسبه می‌شوند.

گام چهارم: آرشو خارجی ( $EA$ ) مقداردهی اولیه می‌شود. MO-CSA دارای یک آرشو خارجی است. در اولین تکرار، جواب‌های نامغلوب حافظه در آرشو خارجی ذخیره می‌شوند.

گام پنجم: موقعیت هر کلاغ به روزرسانی می‌شود. در تکرار  $i$ ، کلاغ  $i$  ( $i=1,2,\dots,N_c$ ) به طور تصادفی یکی از کلاغ‌های جمعیت (کلاغ  $j$ ) را انتخاب می‌کند و برای یافتن مخفیگاهش او را دنبال می‌کند. موقعیت جدید کلاغ  $i$  به صورت زیر به روزرسانی می‌شود:

$$dP_i(t) = 0.6 \times \sqrt{P_L(t)} \quad (25)$$

$$P_{L,un}(t) = dP_i(t) \times noise + P_L(t) \quad (26)$$

$noise$  در رابطه فوق مشابه معادله (۵) با استفاده از یک توزیع نرمال استاندارد مدل‌سازی شده است.

### ۲-۵ رزرو

از آنجایی که تابش خورشید و بار الکتریکی ممکن است به طور ناگهانی تغییر کنند، برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم ترکیبی از رزرو استفاده شده است. با در نظر گرفتن رزرو در این سیستم اگر بار الکتریکی ساعتی تا ۱۰ درصد افزایش یابد و توان تولیدی سیستم فتوولتائیک تا ۲۵ درصد کاهش یابد، بایستی سیستم طراحی شده امکان تأمین مطمئن تقاضا را داشته باشد [۲۱].

### ۲-۶ راهبرد مدیریت انرژی سیستم (EMS)

در هر ساعت، با مقایسه توان تولیدی سیستم فتوولتائیک و تقاضای بار الکتریکی، یک راهبرد مناسب انتخاب می‌شود. اگر رابطه

$$P_{pv}(t) \geq \frac{P_L}{\eta_{inv}}$$

تأمین می‌کند. در غیر این صورت، میزان کمبود توان ( $P_D$ ) توسط دیزل ژنراتور تأمین می‌شود. به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_D(t) = P_L(t) - \eta_{inv} \times P_{pv}(t) \quad (27)$$

اگر رابطه  $P_D > P_{dgn}$  برقرار باشد، مقدار  $P_{dg}(t)$  برابر با  $P_{dgn}$  انتخاب می‌شود. در این صورت مقدار ازدست‌دادن منبع تغذیه ( $LPS$ ) به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$LPS(t) = P_L(t) - \eta_{inv} \times P_{pv}(t) - P_{dg}(t) \quad (28)$$

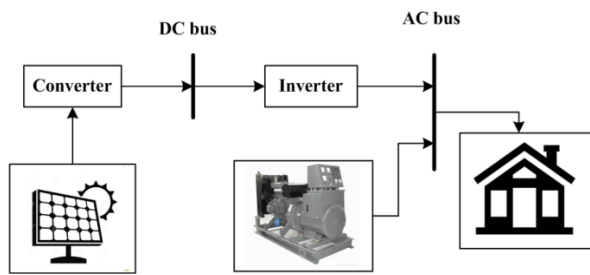
اگر روابط  $P_{dg, min} \leq P_D < P_{dg}(t-1)$  یا  $P_{dg}(t-1) < P_D < P_{dgn}$  برقرار باشند، دیزل ژنراتور می‌تواند کل کمبود توان را جبران کند و مقدار  $P_{dg}(t)$  برابر با  $P_D$  انتخاب می‌شود.

اگر  $P_D < P_{dg, min}$  برقرار باشد، مقدار  $P_{dg}(t)$  برابر با  $P_{dg, min}$  انتخاب می‌شود. در این صورت، توان تولیدی اضافی ( $P_{dl}$ ) به صورت زیر قابل محاسبه است:

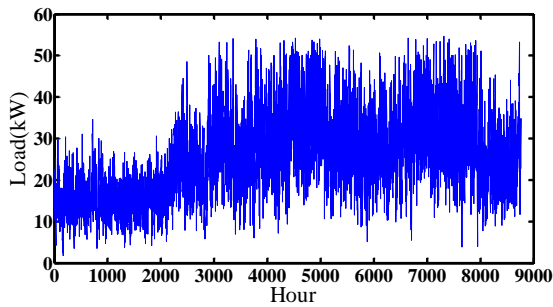
$$P_{dl}(t) = \eta_{inv} \times P_{pv,un}(t) + P_{dg}(t) - P_{L,un}(t) \quad (29)$$

### ۲-۴ مدل‌سازی توابع هدف

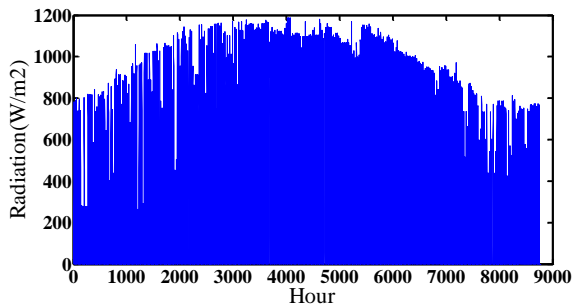
سیستم ترکیبی فتوولتائیک/دیزل از جنبه‌های اقتصادی، قابلیت اطمینان و آلاینده‌گی مورد مطالعه قرار گرفته است. متغیرهای تصمیم مسئله، مساحت پانل‌های فتوولتائیک و توان نامی دیزل ژنراتور است. کمینه‌سازی هم‌زمان اهداف مسئله، اندازه بهینه سیستم ترکیبی را نتیجه می‌دهد. به این منظور هزینه با استفاده از تابع کل هزینه خالص فعلی ( $TNPC$ )، قابلیت اطمینان با استفاده از شاخص احتمال ازدست‌دادن منبع تغذیه ( $LPS$ ) و آلاینده‌گی با استفاده از تابع کل آلاینده‌گی دی‌اکسیدکربن به صورت زیر بیان می‌شوند:



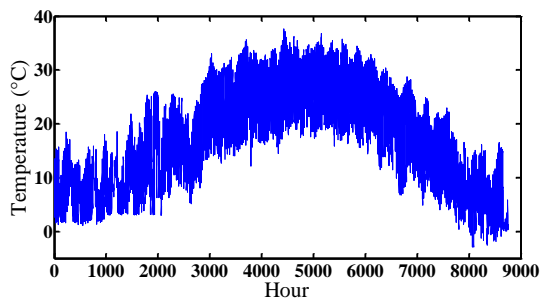
شکل ۱: بلوک دیاگرام سیستم ترکیبی مورد مطالعه



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲: (الف) پروفایل بار الکتریکی، (ب) شدت تابش و (ج) دمای محیط در طول یک سال

جدول ۱: مقادیر پارامترهای اقتصادی سیستم ترکیبی

$\beta$	٪۱۲
$r$	٪۱۲
$\delta$	٪۸

جدول ۲: مقادیر پارامترهای سیستم فتوولتائیک

$PV\ lifetime$	۳۰ سال
$\eta_r$	۰/۱۵

$$x^{i, iter+1} = \begin{cases} x^{i, iter} + r_i \times fl^{i, iter} \times \\ (m^{j, iter} - x^{i, iter}) & r_j \geq AP^{j, iter} \\ \text{a random position} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (33)$$

در رابطه فوق  $m^{j, iter}$  بهترین تجربه کلاغ  $j$  در تکرار  $i$  و  $iter$  یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه [0 1] است. گام ششم: مقبولیت موقعیت‌های جدید کلاغ‌ها بررسی می‌شود. در این مرحله اگر موقعیت جدید هر کلاغ محدودیت‌های مسئله را برآورده کند موقعیت کلاغ به‌روزرسانی می‌شود. در غیر این صورت، کلاغ در موقعیت فعلی خود باقی می‌ماند. گام هفتم: مقادیر توابع هدف برای موقعیت‌های جدید کلاغ‌ها محاسبه می‌شوند. گام هشتم: حافظه هر کلاغ به‌روزرسانی می‌شود. اگر جواب حافظه مغلوب موقعیت جدید شود و یا نسبت به یکدیگر نامغلوب باشند، حافظه به‌وسیله موقعیت جدید به‌روزرسانی می‌شود. گام نهم: آرشيو خارجی به‌روزرسانی می‌شود. در این مرحله جواب‌های نامغلوب از میان اعضای فعلی آرشيو خارجی و حافظه به‌عنوان اعضای جدید آرشيو انتخاب می‌شوند. چالشی که با افزایش تعداد تکرارها پیش می‌آید، افزایش بیش‌ازحد اندازه آرشيو خارجی است. برای حل این مشکل فاصله ازدحامی اعضای به‌روز شده آرشيو خارجی محاسبه می‌شود؛ بنابراین اگر اندازه آرشيو از حد معینی بزرگ‌تر شود، جواب‌هایی با بیشترین فاصله ازدحامی در آرشيو باقی می‌مانند. گام دهم: شرط توقف بررسی می‌شود. در صورت برآورده شدن شرط توقف، اعضای آرشيو خارجی به‌عنوان جواب‌های نهایی مسئله ارائه می‌شوند.

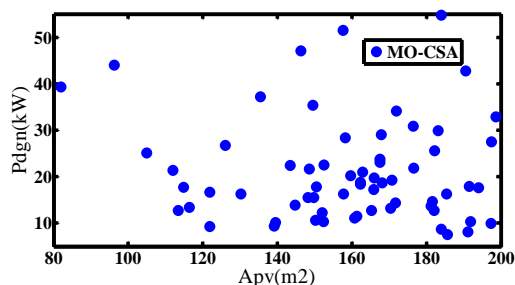
#### ۴- نتایج و بحث

به‌منظور بررسی چارچوب پیشنهادی، یک مطالعه موردی در استان کرمان انجام شده است. شکل ۱ نمایی از سیستم ترکیبی فتوولتائیک/دیزل را نشان می‌دهد. مشخصات بار و شرایط محیطی (شدت تابش خورشید و دمای محیط) در شکل ۲ نشان داده شده است. جداول ۱-۴ مقادیر پارامترهای مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل فنی- اقتصادی سیستم ترکیبی را نشان می‌دهد. برای بهینه‌سازی سیستم ترکیبی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II و MO-CSA در محیط نرم‌افزار متلب استفاده شده است. تنظیم پارامتر این الگوریتم‌ها به‌صورت زیر انجام شده است: MO-CSA: اندازه جمعیت=۲۰، حداکثر تعداد تکرارها = ۲۰۰، طول پرواز=۲ و احتمال آگاهی= ۰/۱ NSGA-II: اندازه جمعیت=۲۰، بیشترین تعداد تولید نسل = ۲۰۰، احتمال همبری= ۰/۷۵، احتمال جهش= ۰/۰۱۵ و همبری محدب

می‌کند. این ویژگی باعث توزیع خوب جواب‌ها در این الگوریتم شده است. با بررسی شکل ۵ مشاهده می‌شود که به‌ازای LPSP برابر، مرز پارتو به‌دست‌آمده به‌وسیله MO-CSA قرار گرفته است؛ بنابراین MO-CSA نقاطی با قابلیت اطمینان مشابه را با هزینه و آلاینده‌گی کمتری به‌دست آورده است. به‌طور مثال در LPSP=۰ هزینه و آلاینده‌گی به‌دست‌آمده به‌وسیله MO-CSA برابر با ۳۶۹۶۲۰ دلار و ۲۳۲۲۹۸ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن است؛ اما مقادیر به‌دست آمده برای هزینه و آلاینده‌گی با NSGA-II در LPSP=۰ برابر ۳۷۱۱۰۲ دلار و ۲۳۴۴۹۵ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن است. همچنین، MO-CSA نقطه‌ای با LPSP=۰/۱۸۲ را با هزینه ۲۹۰۹۶۰ دلار و آلاینده‌گی ۱۹۹۹۳۸ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن به‌دست آورده درحالی‌که NSGA-II نقطه‌ای با LPSP=۰/۱۸۶ را با هزینه ۲۹۳۶۹۸ دلار و آلاینده‌گی ۲۰۲۹۸۴ کیلوگرم دی‌اکسید کربن به‌دست آورده است. در LPSP=۰/۵ نیز MO-CSA به هزینه ۲۰۱۱۸۷ دلار و آلاینده‌گی ۱۳۸۱۷۶ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن رسیده و NSGA-II هزینه ۲۰۶۳۳۰ دلار و آلاینده‌گی ۱۴۲۶۲۶ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن را به‌دست آورده است.

#### ۴-۴ بهینه‌سازی چندهدفه سیستم ترکیبی فتولتائیک/دیزل با در نظر گرفتن عدم قطعیت

در دومین سناریو از این مطالعه، تأثیر عدم قطعیت بار الکتریکی و انرژی خورشیدی در عملکرد سیستم ترکیبی، مورد بررسی قرار گرفته است. شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب مجموعه پارتو بهینه این سناریو را با استفاده از MO-CSA و NSGA-II نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ دیده می‌شود اضافه شدن عدم قطعیت به سیستم بیشینه توان نامی به‌دست‌آمده برای دیزل ژنراتور را افزایش داده است. طبق نتایج این سناریو، در LPSP=۰ استفاده بیشتری از دیزل ژنراتور شده و بیشینه توان نامی به‌دست‌آمده برای دیزل که مربوط به LPSP=۰ بوده نسبت به سناریو قبلی افزایش یافته است. مرزهای پارتو بهینه دو الگوریتم در این سناریو در شکل ۸ مقایسه شده است. در این سناریو هم بیشتر نقاط به‌دست‌آمده در مرز پارتو الگوریتم NSGA-II با LPSP برابر بالای مرز پارتو MO-CSA قرار گرفته‌اند.



شکل ۳: مجموعه پارتو بهینه MO-CSA برای سیستم ترکیبی بدون در نظر گرفتن رزرو و عدم قطعیت

$\eta$	۱
$\gamma$	۰/۰۰۴۵ بر درجه سلسیوس
$T_{ref}$	۲۵ درجه سلسیوس
$NOCT$	۴۵/۵ درجه سلسیوس
$\alpha_{pv}$	۹ دلار بر مترمربع
$OMC_{pv}$	۵/۲ دلار بر مترمربع
$A_{pv,max}$	۲۰۰ مترمربع

جدول ۳: مقادیر پارامترهای دیزل ژنراتور

DG lifetime	۷ سال
$\alpha_{dg}$	۳۳۶ دلار بر کیلووات
$OMC_{dg}$	۰/۰۵ دلار بر ساعت
$RC_{dg}$	۳۳۶ دلار بر کیلووات
$Pf$	۰/۱۶۷۳ دلار بر کیلووات
$P_{dgn,max}$	۶۰ کیلووات

جدول ۴: مقادیر پارامترهای اینورتر

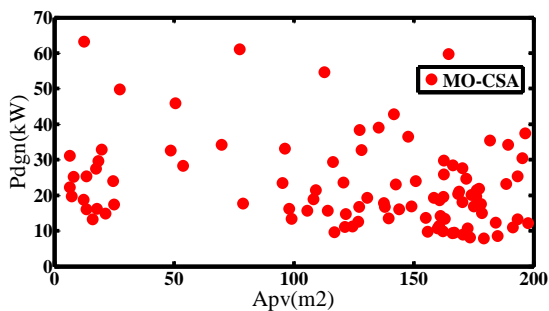
Inverter lifetime	۳۰ سال
$\eta_{inv}$	۰/۰۹
$\alpha_{inv}$	۴۰۰ دلار بر مترمربع
$OMC_{inv}$	۲۰ دلار بر سال

#### ۴-۴ بهینه‌سازی چندهدفه سیستم ترکیبی فتولتائیک/دیزل بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت و رزرو

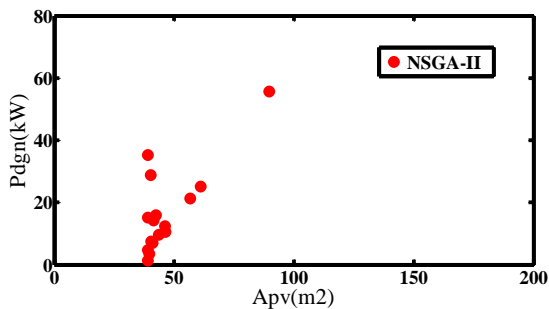
در اولین سناریو از این مطالعه، سیستم ترکیبی بدون در نظر گرفتن رزرو و عدم قطعیت بررسی شده است. شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب نشان‌دهنده مجموعه پارتو بهینه این سناریو در LPSP کمتر از ۰/۵ با استفاده از MO-CSA و NSGA-II هستند. نقاط به‌دست‌آمده در مجموعه پارتو بهینه جواب‌های مسئله را در فضای پارامتر ارائه می‌دهند. هر یک از این نقاط مقادیر متغیرهای تصمیم (مساحت پانل و توان نامی دیزل) را برای طراحی بهینه سیستم ترکیبی با قابلیت اطمینان، هزینه و آلاینده‌گی مشخصی بیان می‌کند. هیچ‌یک از نقاط مجموعه پارتو بهینه، مغلوب دیگری نمی‌شود. متناظر با نقاط مجموعه پارتو، مرزهای پارتو بهینه بیانگر جواب‌های مسئله در فضای هدف هستند. شکل ۵ مرزهای پارتو بهینه دو الگوریتم را مقایسه می‌کند. مقایسه نتایج، عملکرد بهتر الگوریتم MO-CSA را نسبت به NSGA-II از لحاظ دقت و توزیع جواب‌ها نشان می‌دهد. در نسخه چندهدفه‌ای که برای CSA ارائه شده است، از یک آرشیو خارجی برای حفظ جواب‌های برتر در طول تمام تکرارها می‌شود، درحالی‌که NSGA-II فاقد آرشیو خارجی است؛ بنابراین، تعداد جواب‌های یافته‌شده توسط MO-CSA بیشتر است. ازسوی دیگر، کنترل اندازه آرشیو خارجی با استفاده از محاسبه فاصله ازدحامی صورت گرفته است که باعث کنترل تنوع جواب‌ها شده و از تجمع بیش‌ازحد جواب‌ها در یک قسمت جلوگیری

ژنراتور از ۷۰ کیلووات فراتر رفته است و رسیدن به  $LPSP = 0$  مستلزم استفاده بیشتر از دیزل ژنراتور نسبت به دو سناریو قبلی است. شکل ۱۱ مرزهای پارتو حاصل از دو الگوریتم را در سناریو سوم مقایسه می‌کند. در این سناریو نیز، الگوریتم پیشنهادی عملکرد مناسبی را در مقایسه با NSGA-II از خود نشان می‌دهد.

به منظور مقایسه بهتر مرزهای پارتو، نحوه توزیع جواب‌ها در دو الگوریتم، با استفاده از شاخص توزیع مقایسه شده‌اند. طبق ارزیابی‌های انجام شده شاخص  $\Delta$  از میان شاخص‌های توزیع مطرح در زمینه مطالعات چندهدفه، اطلاعات دقیق‌تری از توزیع جواب‌ها ارائه می‌دهد [۲۳]. این شاخص به کمک رابطه (۳۴) تعیین می‌شود.



شکل ۶: مجموعه پارتو بهینه برای سیستم ترکیبی با در نظر گرفتن عدم قطعیت



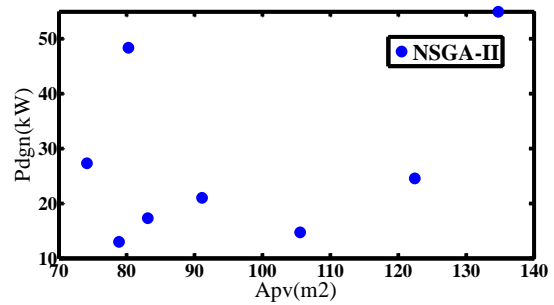
شکل ۷: مجموعه پارتو بهینه برای سیستم ترکیبی با در نظر گرفتن عدم قطعیت

$$\Delta(S) = \sum_{i=1}^{|S|-1} \frac{|d_i - \bar{d}|}{|S|-1} \quad (34)$$

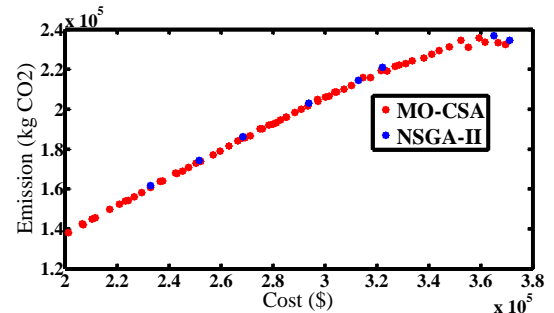
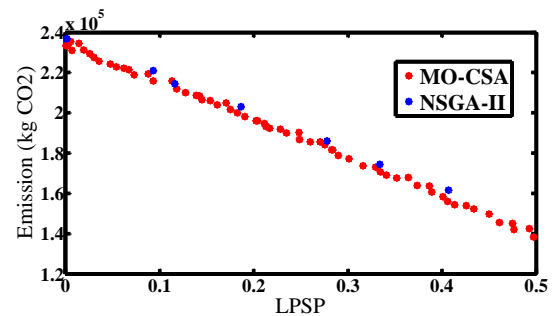
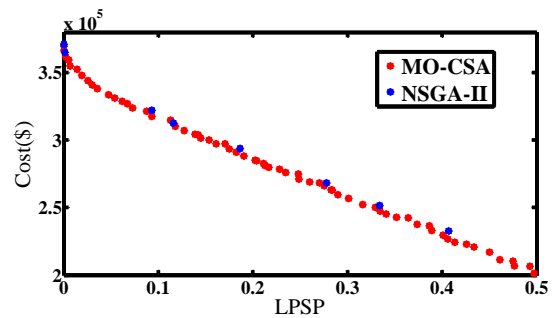
که  $d$  فاصله اقلیدسی بین جواب‌های متوالی در  $S$  (مجموعه جواب) و  $\bar{d}$  نشان‌دهنده متوسط فاصله است. مقادیر کوچک‌تر  $\Delta$  نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم هستند. با توجه به این که استفاده از این شاخص در بیش از دو بعد با ابهام و پیچیدگی همراه است؛ بنابراین، برای هر یک از ابعاد (هزینه- $LPSP$ )، (آلاینده- $LPSP$ ) و (هزینه-آلاینده) این شاخص به طور جداگانه محاسبه شده است.

جدول ۵: مقادیر شاخص  $\Delta$  در سناریو اول

الگوریتم	بعد هزینه- $LPSP$	بعد $LPSP$	بعد هزینه-آلاینده
	آلاینده- $LPSP$	آلاینده- $LPSP$	آلاینده- $LPSP$



شکل ۴: مجموعه پارتو بهینه NSGA-II برای سیستم ترکیبی بدون در نظر گرفتن رزرو و عدم قطعیت

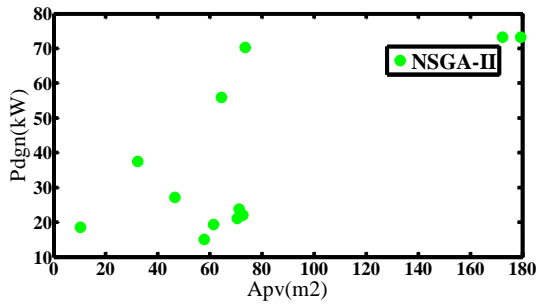


شکل ۵: مقایسه مرزهای پارتو بهینه حاصل از دو الگوریتم برای سیستم ترکیبی بدون در نظر گرفتن رزرو و عدم قطعیت

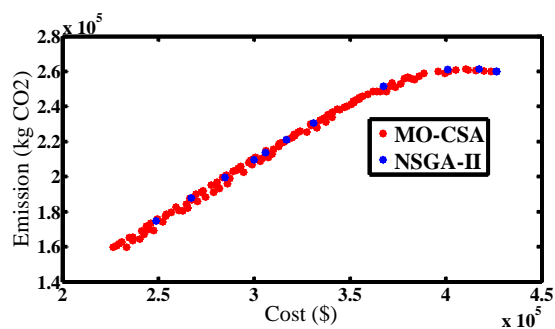
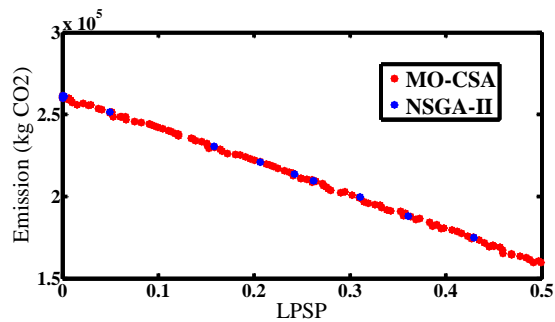
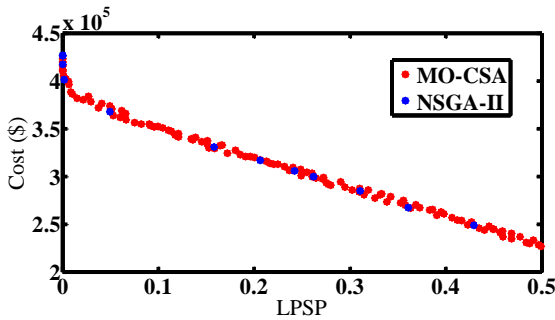
#### ۴۴ بهینه‌سازی چندهدفه سیستم ترکیبی فتوولتائیک/دیزل با در نظر گرفتن عدم قطعیت و رزرو

در سومین سناریو این مطالعه، تأثیر عدم قطعیت و رزرو به طور هم‌زمان بررسی شده است. در این سناریو، علاوه بر عدم قطعیت انرژی خورشیدی و بار الکتریکی، امکان افزایش بار الکتریکی تا ۱۰ درصد مقدار ساعتی و کاهش انرژی خورشیدی تا ۲۵ درصد مقدار ساعتی نیز در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۹ و ۱۰ دیده می‌شود، در این سناریو نیز پیشینه توان نامی به دست آمده برای دیزل





شکل ۱۰: مجموعه پارتو بهینه NSGA-II برای سیستم ترکیبی با در نظر گرفتن رزرو و عدم قطعیت



شکل ۱۱: مقایسه مرزهای پارتو بهینه برای سیستم ترکیبی با در نظر گرفتن عدم قطعیت و رزرو (سناریو سوم)

همان‌طور که مشاهده می‌شود MO-CSA در هر سه سناریو از توزیع بهتری برخوردار بوده و به مقدار کمتری برای شاخص  $\Delta$  رسیده است. به‌منظور مشاهده تأثیر سناریوهای در نظر گرفته شده بر روی مرزهای پارتو، نتایج حاصل از هر الگوریتم در هر سناریو بر روی یک شکل رسم شده است. به‌منظور مقایسه بهتر عملکرد الگوریتم پیشنهادی، نتایج حاصل از MO-CSA با نتایج حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی تجمعی

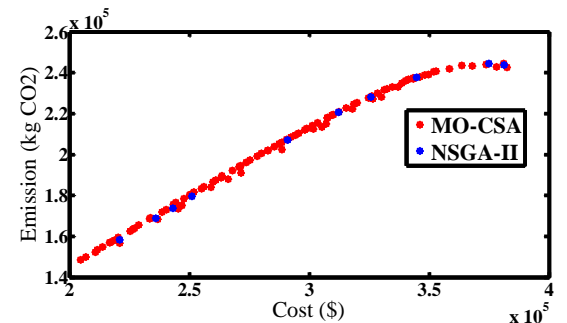
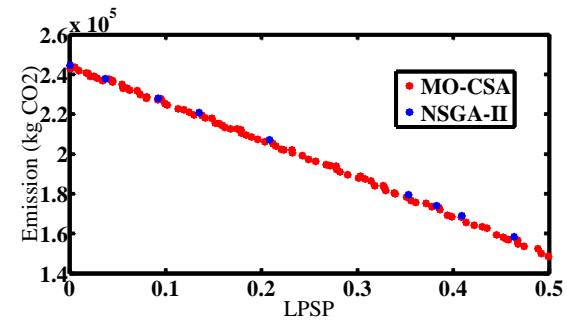
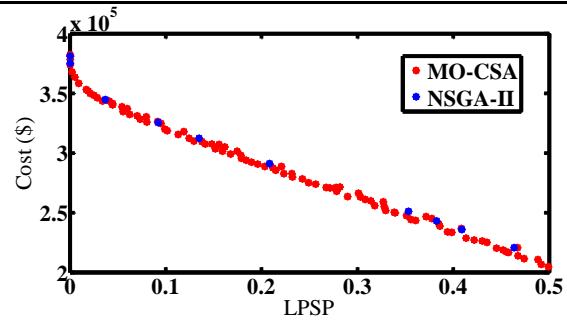
۱۴۴۲/۹	۹۴۲/۷	۱۰۷۰/۹	MO-CSA
۱۲۲۱۳	۶۱۵۱/۲	۸۹۴۵/۷	NSGA-II

جدول ۶: مقادیر شاخص  $\Delta$  در سناریو دوم

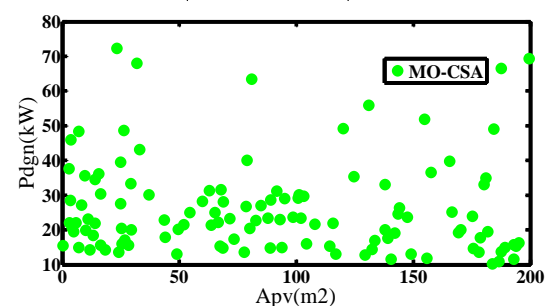
الگوریتم	بعد هزینه-LPSP	بعد آلاینده‌گی-LPSP	بعد هزینه-آلاینده‌گی
MO-CSA	۱۴۰۲/۷	۶۰۵/۷	۱۴۱۳/۹
NSGA-II	۸۸۰۳/۹	۵۳۸۹/۲	۱۰۳۷۹

جدول ۷: مقادیر شاخص  $\Delta$  در سناریو سوم

الگوریتم	بعد هزینه-LPSP	بعد آلاینده‌گی-LPSP	بعد هزینه-آلاینده‌گی
MO-CSA	۱۵۱۰/۸	۶۷۵/۳	۱۳۳۶/۶
NSGA-II	۱۰۵۶۰	۶۶۱۸/۸	۱۲۲۹۴



شکل ۸: مقایسه مرزهای پارتو بهینه حاصل از دو الگوریتم با در نظر گرفتن عدم قطعیت (سناریو دوم)



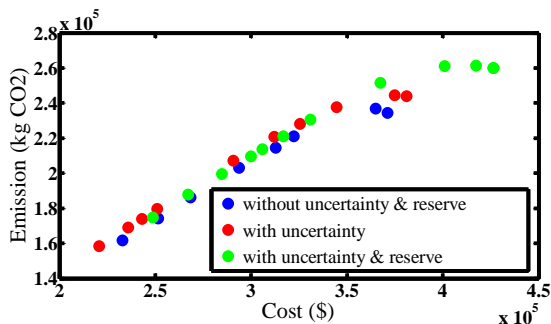
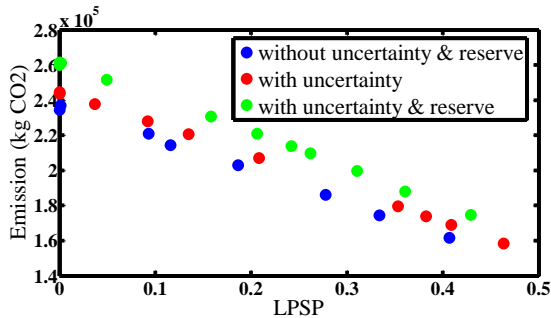
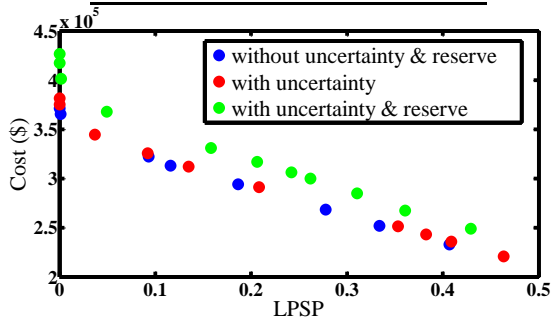
شکل ۹: مجموعه پارتو بهینه MO-CSA برای سیستم ترکیبی با در نظر گرفتن رزرو و عدم قطعیت

۲۳۲۴۴۲	۳۷۰۰۴۳	۵۵/۲	۱۷۸/۷	MO-PSO
۲۳۴۴۹۵	۳۷۱۱۰۲	۵۵	۱۳۴/۸	NSGA-II

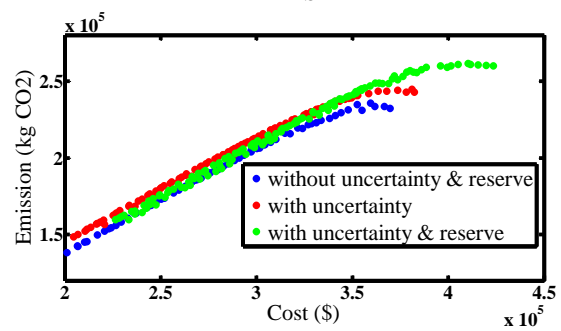
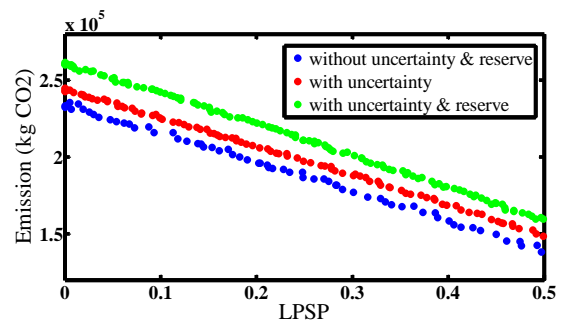
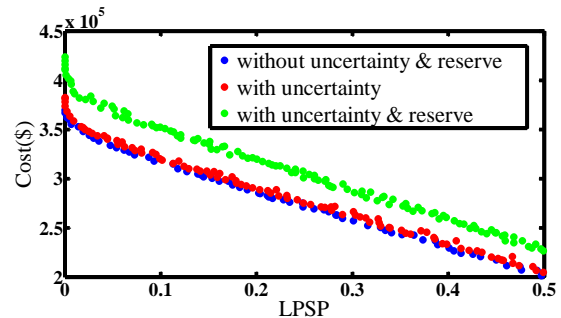
ذرات (MO-PSO) نیز مقایسه شده است. شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ به ترتیب مرزهای پارتو سه سناریو مطرح شده را برای الگوریتم‌های MO-CSA، MO-PSO و NSGA-II مقایسه کرده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌ازای تمام مقادیر LPSP، در سناریو سوم نسبت به دو سناریو قبلی، هزینه و آلاینده‌گی به طرز چشم‌گیری افزایش یافته است. همچنین، وارد کردن عدم قطعیت در سناریو دوم باعث بالارفتن مرزهای پارتو نسبت به سناریو اول شده است. با مقایسه شکل‌ها می‌توان دریافت که الگوریتم MO-CSA آرایش منظم‌تر و دقیق‌تری از مرزهای پارتو در هر سه سناریو ارائه داده است.

جدول ۹: میزان مشارکت اجزای سیستم در LPSP=0 سناریو اول

الگوریتم	$\frac{E_{PV}}{E_{load}}$ (%)	$\frac{E_{diesel}}{E_{load}}$ (%)
MO-CSA	۲۴/۴	۷۶/۷
MO-PSO	۲۳/۷	۷۷/۳
NSGA-II	۱۷/۹	۸۲/۴



شکل ۱۳: مقایسه مرزهای پارتو بهینه NSGA-II در سه سناریو



شکل ۱۲: مقایسه مرزهای پارتو بهینه MO-CSA در سه سناریو

نتایج حاصل از جدول ۸ در سناریو اول، بیانگر عملکرد بهتر MO-CSA در نقطه LPSP=0، از نظر هزینه و آلاینده‌گی است. جداول ۱۰ و ۱۱ به ترتیب بیانگر نتایج و میزان مشارکت اجزای سیستم در سناریو دوم برای نقطه LPSP=0 هستند. همان‌گونه که از جدول ۱۰ مشخص است، الگوریتم MO-PSO دو جواب را متناظر با مقدار صفر برای LPSP یافته است که نسبت به هم نامغلوب هستند.

جدول ۱۰: نتایج سناریو دوم در LPSP=0

الگوریتم	$A_{pv}$ (m <sup>2</sup> )	$P_{dgn}$ (kW)	TNPC (\$) )	$TE_{CO_2}$ (kg)
MO-CSA	۱۲/۵	۶۲/۳	۳۸۲۳۹۳	۲۴۲۷۱۳
MO-PSO	۱۵۴/۸	۶۵/۳	۳۸۴۵۶۸	۲۴۳۵۹۶
MO-PSO	۱۹۴/۵	۷۳	۳۹۲۵۲۴	۲۴۳۰۷۶

از آنجایی که نقطه LPSP=0 به علت داشتن بیشترین قابلیت اطمینان یکی از نقاط حائز اهمیت برای سیستم ترکیبی است. سه الگوریتم MO-CSA، MO-PSO و NSGA-II در این نقطه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. جداول ۸ و ۹ به ترتیب بیانگر نتایج و میزان مشارکت اجزای سیستم در سناریو اول برای نقطه LPSP=0 هستند. در سیستم ترکیبی اگر انرژی مازاد بر مصرف بار تولید شود، در جعبه تخلیه در نظر گرفته شده تلف خواهد شد.

جدول ۸: نتایج سناریو اول در LPSP=0

الگوریتم	$A_{pv}$ (m <sup>2</sup> )	$P_{dgn}$ (kW)	TNPC (\$) )	$TE_{CO_2}$ (kg)
MO-CSA	۱۸۴	۵۴/۸	۳۶۹۶۲۱	۲۳۲۲۹۹

۲۵۹۹۰۰	۴۲۶۶۲۳	۷۳/۲	۱۷۹/۴	NSGA-II
۲۶۰۰۳۴	۴۲۶۲۹۳	۷۳/۲	۱۷۲/۴	NSGA-II

جدول ۱۳: میزان مشارکت اجزای سیستم در  $LPSP=0$  سناریو سوم

الگوریتم	$\frac{E_{PV}}{E_{load}}$ (%)	$\frac{E_{diesel}}{E_{load}}$ (%)
MO-CSA	۲/۱	۹۷/۹
MO-CSA	۱۸/۱	۸۲/۴
MO-PSO	۹/۵	۹۰/۵
NSGA-II	۱۶/۲۳	۸۴
NSGA-II	۱۵/۶	۸۴/۶

مقایسه جواب‌های به‌دست‌آمده در جدول ۱۲ نشان می‌دهد که اولین نقطه به‌دست‌آمده توسط MO-CSA بر جواب حاصل از MO-PSO غالب است و دومین جواب MO-CSA بر جواب‌های حاصل از NSGA-II غلبه دارد و به هزینه و آلاینده‌گی کمتری رسیده است.

### ۵- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه نشان‌دهنده تأثیر به‌سزای تغییرات شدت تابش خورشید و بار الکتریکی بر عملکرد سیستم ترکیبی فتوولتائیک/دیزل ژنراتور است. این امر بیانگر اهمیت اتخاذ یک راهبرد مدیریت انرژی صحیح با توجه به الگوی بار منطقه و شرایط جوی است. نتایج این مطالعه در هر سه سناریو، نقش تکمیلی مثبت دیزل ژنراتور را در کنار پانل‌های فتوولتائیک برای افزایش قابلیت اطمینان مسئله بیان می‌کند. بهینه‌سازی چندهدفه مسئله امکان اتخاذ بهترین تصمیم را با در نظر گرفتن جنبه‌های مختلف سیستم فراهم می‌کند. در همین راستا استفاده مناسب از الگوریتم‌های فرا ابتکاری چندهدفه با توجه به ساختار مسئله حائز اهمیت است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی نشان می‌دهند که (۱) ترکیب بهینه سیستم‌های دیزل ژنراتور و فتوولتائیک می‌تواند منجر به داشتن یک سیستم مقرون‌به‌صرفه همراه با آلاینده‌گی پایین و قابلیت اطمینان بالا شود، (۲) در نظر گرفتن عدم قطعیت شدت تابش خورشید و بار الکتریکی، اندازه (و بالطبع آن هزینه) سیستم را افزایش خواهد داد، (۳) در نظر گرفتن رزرو، قابلیت اطمینان سیستم را بالا برده و افزایش هزینه را در پی خواهد داشت و (۴) الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی کلاخ در مقایسه با الگوریتم پرطرفدار ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب، نتایج بهتری را تولید می‌کند. ضمن این‌که پارتوهای به‌دست‌آمده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جستجوی کلاخ، تعداد جواب بیشتر و توزیع بهتری را به همراه دارند.

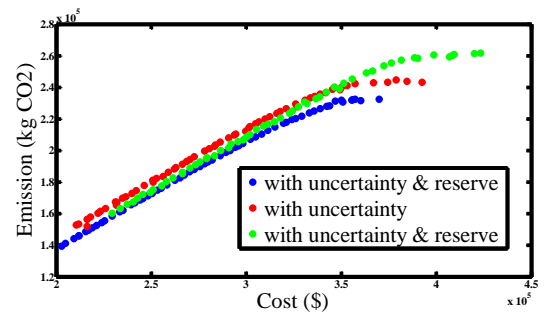
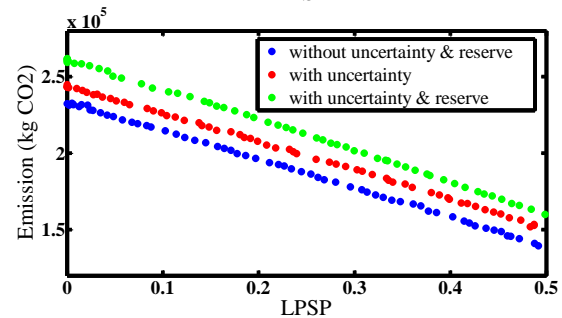
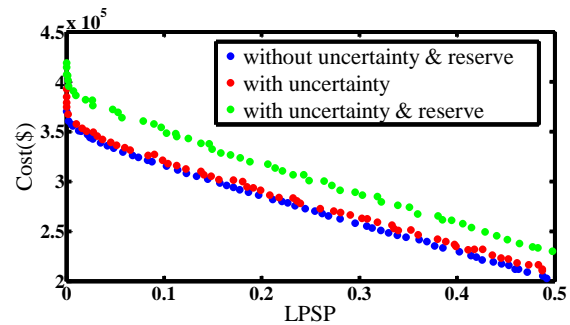
### مراجع

- [1] B. Wichert, M. Dymond, W. Lawrance and T. Friese, "Development of a test facility for photovoltaic- diesel hybrid energy systems," *Renew. Energy*, vol. 22, no. 1-3, pp. 311-319, 2001

۲۴۳۸۲۸	۳۸۱۱۵۱	۶۲/۵	۱۶۲/۳	NSGA-II
--------	--------	------	-------	---------

جدول ۱۱: میزان مشارکت اجزای سیستم در  $LPSP=0$  سناریو دوم

الگوریتم	$\frac{E_{PV}}{E_{load}}$ (%)	$\frac{E_{diesel}}{E_{load}}$ (%)
MO-CSA	۱/۷	۹۸/۳
MO-PSO	۲۰/۵	۸۰/۲
MO-PSO	۲۵/۸	۷۵/۹
NSGA-II	۲۱/۵	۷۹/۳



شکل ۱۴: مقایسه مرزهای پارتو بهینه MO-PSO در سه سناریو

همان‌طور که نتایج جدول ۱۰ نشان می‌دهد، الگوریتم MO-CSA از نظر هزینه و آلاینده‌گی عملکرد بهتری نسبت به MO-PSO داشته است اما مقایسه MO-CSA و NSGA-II نشان می‌دهد که نقاط به‌دست‌آمده در این دو الگوریتم نسبت به هم نامغلوب هستند و امکان مقایسه آن‌ها وجود ندارد. جداول ۱۲ و ۱۳ به ترتیب بیانگر نتایج و میزان مشارکت اجزای سیستم در سناریو سوم برای نقطه  $LPSP=0$  هستند.

جدول ۱۲: نتایج حالت سوم در  $LPSP=0$

الگوریتم	$TE_{CO_2}$ (kg)	$TNPC$ (\$)	$P_{dgn}$ (kW)	$A_{pv}$ (m <sup>2</sup> )
MO-CSA	۲۶۰۲۹۵	۴۱۵۶۳۵	۷۲/۳	۲۳/۳
MO-CSA	۲۵۹۸۹۱	۴۲۳۴۵۸	۶۹/۴	۱۹۹/۵
MO-PSO	۲۶۱۶۹۵	۴۲۳۲۵۲	۷۳/۴	۱۰۵/۲

- renewable energy systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 840-853, 2017.
- [۱۵] ح. شکری و س. نجفی روادانق، «حل مسئله مشارکت بهینه واحدهای نیروگاهی در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۵، شماره ۱، صفحه ۲۹-۴۲، بهار ۱۳۹۴.
- [۱۶] س. ج. سید شنوا و ن. افسری اردبیلی، «مدیریت بهینه تولید در یک سیستم تولید انرژی ترکیبی چندمنبعی جدا از شبکه با حضور سیستمهای ذخیره ساز انرژی به‌منظور کاهش هزینه تقاضا»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۷، شماره ۳، صفحه ۱۱۱۰-۱۰۹۹، پاییز ۱۳۹۶.
- [17] A. Askarzadeh, “A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm,” *Comput. Struct*, vol. 169, pp. 1–12, 2016.
- [18] X. Li, Y. J. Song, S. B. Han, “Frequency control in micro-grid power system combined with electrolyzer system and fuzzy PI controller,” *J. Power. Sources*, vol. 180, pp. 468-475, 2008.
- [19] R. Dufo-López, J. L. Bernal-Agustín, J. M. Yusta-Loyo, J. A. Domínguez-Navarro, I. J. Ramírez-Rosado, J. Lujano and I. Aso, “Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage,” *Appl. Energy*, vol. 88, pp. 4033-4041, 2011.
- [20] L. K. Gan, J. K. H. Shek and M. A. Mueller, “Hybrid wind-photovoltaic-diesel-battery system sizing tool development using empirical approach, life-cycle cost and performance analysis: A case study in Scotland,” *Energy Conversion and Management*, vol. 106, pp. 479–494, 2015.
- [21] K. Y. Lau, M. F. M. Yousof, S. N. M. Arshad, M. Anwari and A. H. M. Yatim, “Performance analysis of hybrid photovoltaic/diesel energy system under Malaysian conditions,” *Energy*, vol. 35, no. 8, pp. 3245-3255, 2010.
- [22] A. A. Askarzadeh, “Capacitor placement in distribution systems for power loss reduction and voltage improvement: a new methodology,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 14, pp. 3631–3638, 2016.
- [23] T. Okabe, Y. Jin, B. Sendhoff, “A critical survey of performance indexes for multi-objective optimization,” In: *Proceedings of the 2003 congress on evolutionary computation*, vol. 2, pp. 878–885, 2003.
- [2] M. Ashari and C. V. Nayar, “An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)-diesel-battery hybrid power system,” *Sol. Energy*, vol. 66, no. 1, pp. 1-9, 1999.
- [3] A. Askarzadeh, “Electrical power generation by an optimised autonomous PV/wind/tidal/battery system,” *IET Renew. Power Gener*, vol. 11, no. 1, pp. 152-164, 2017.
- [4] M. B. Shadmand and R. S. Balog, “Multi-objective optimization and design of photovoltaic-wind hybrid system for community smart DC microgrid,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 5, pp. 2635-2643, 2014.
- [5] J. Zhao and X. Yuan, “Multi-objective optimization of stand-alone hybrid PV-wind-diesel-battery system using improved fruit fly optimization algorithm,” *Soft Computing*, vol. 20, no. 7, pp. 2841-2853, 2016.
- [6] A. Yahiaoui, K. Benmansour and M. Tadjine, “Control, analysis and optimization of hybrid PV-Diesel-Battery systems for isolated rural city in Algeria,” *Sol. Energy*, vol. 137, pp. 1-10, 2016.
- [7] A. S. O. Ogunjuyigbe, T. R. Ayodele and O. A. Akinola, “Optimal allocation and sizing of PV/Wind/Split-diesel/Battery hybrid energy system for minimizing life cycle cost, carbon emission and dump energy of remote residential building,” *Appl. Energy*, vol. 171, pp. 153–171, 2016.
- [8] D. Tsuanyo, Y. Azoumah, D. Aussel and P. Neveu, “Modeling and optimization of batteryless hybrid PV (photovoltaic)/diesel systems for off-grid applications,” *Energy*, vol. 86, pp. 152–163, 2015.
- [9] M. Hossain, S. Mekhilef and L. Olatomiwa, “Performance evaluation of a stand-alone PV-wind-diesel-battery hybrid system feasible for a large resort center in South China sea, Malaysia,” *Sustain Cities Soc*, vol. 28, pp. 358–366, 2017.
- [10] A. Maheri, “Multi-objective design optimisation of standalone hybrid wind- PV-diesel systems under uncertainties,” *Renew. Energy*, vol. 66, pp. 650–661, 2014.
- [11] M. A. M. Ramli, A. Hiendro and S. Twaha, “Economic analysis of PV/diesel hybrid system with flywheel energy storage,” *Renew. Energy*, vol. 78, pp. 398–405, 2015.
- [12] R. D. Lopez and J. L. B. Agustin, “Multi-objective design of PV-wind-diesel- hydrogen-battery systems,” *Renew. Energy*, vol. 33, no. 12, pp. 2559–2572, 2008.
- [13] L. G. Acuña, R. V. Padilla and A. S. Mercado, “Measuring reliability of hybrid photovoltaic-wind energy systems: A new indicator,” *Renew. Energy*, 2017.
- [14] T. Tezer, R. Yaman, G. Yaman, “Evaluation of approaches used for optimization of stand-alone hybrid

<sup>1</sup> Photovoltaic panel

<sup>2</sup> Diesel generator

<sup>3</sup> Crow search algorithm

<sup>4</sup> Genetic algorithm

<sup>5</sup> Particle swarm optimization

<sup>6</sup> Non-dominated sorting genetic algorithm II

<sup>7</sup> Improved fruit fly optimization algorithm

<sup>8</sup> Total annual cost

<sup>9</sup> Life cycle cost

<sup>10</sup> Levelized cost of energy

<sup>11</sup> Hybrid Optimization Model for Electric Renewables

<sup>12</sup> Cost of energy

<sup>13</sup> Maximum energy expected not supplied