کنترل نیروگاه‌های خورشیدی سهموی خطی با کنترل کننده مدل پیش‌بین

محمد ذبیحی لهارمی [۱]، زهرا رحمانی [۲] ، بهروز رضایی [۳]

تاریخ دریافت مقاله:
۹۳/۸/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله:
۹۴/۱/۲۰

چکیده:

این مقاله یک ساختار کنترل سلسله مراتبی برای کنترل دمای روغن خروجی کلکتورها در نیروگاه خورشیدی سهموی خطی پیشنهاد کرده است. از جمله چالش های مهم این سیستم می توان غیرقابل دستکاری بودن منبع انرژی، محدودیت های فیزیکی موجود در سیستم و وجود اغتشاشات ورودی نظیر تابش خورشید و دمای روغن ورودی را نام برد. همچنین این عوامل در پارامترهای مدل سیستم نیز وجود دارند که به طور دائم در حال تغییرند. از همین رو، این سیستم با گذشت زمان تغییر می کند. لذا در لایه پایین کنترل جهت کنترل دما در این سیستم با توجه به مشکلات موجود در آن، ابتدا مدل ریاضی سیستم به کمک معادلات دیفرانسیل حاصل می شود و سپس به کمک این معادلات مدل سیستم به صورت تکه ای خطی می گردد و در نهایت، مدل خطی شده گسسته می‌شود و از مدل خطی شده حاصل برای کنترل دما در کلکتورهای خورشیدی بر اساس روش کنترل مدل پیش بین بهره برده می‌شود. یکی دیگر از چالش های مهم در نیروگاه های خورشیدی تنظیم دمای مرجع مناسب با توجه به عوامل موثر بر سیستم می‌باشد که موجب افزایش راندمان و کاهش خطای انسانی می گردد. از همین رو، در لایه بالای کنترل از منطق فازی برای نیل به این هدف بهره برده شده است. الگوریتم کنترل با داده‌های گرفته شده از ایستگاه آلیس اسپرینگز استرالیا اعتبارسنجی شده است. نتایج شبیه‌سازی عملکرد مناسب منطق فازی در ایجاد دمای مرجع مناسب و کنترل کننده مدل پیش بین را در کنترل دمای این سیستم نشان می دهد.

کلمات کلیدی:

نیروگاه حرارتی سهموی خطی، کنترل مدل پیش بین، انرژی خورشیدی، منطق فازی

۱) کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق وکامپیوتر دانشگاه صنعتی بابل (نویسنده مسئول) mohammad.zabihi2@gmail.com
۲) استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی بابل zrahmani@nit.ac.ir
۳) استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی بابل brezaie@nit.ac.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-21]

مقدمه

در تمامی ادوار بشریت از نور خورشید برای گرم کردن و روشنایی بهره برده می شد، اما امروزه از آن به منظور تامین اهداف دیگری نظیر سردسازی، سم زدایی و شیرین سازی آب استفاده می شود. همچنین بعد از تحریم نفتی اعراب در ۱۹۷۳ و افزایش قیمت نفت در جهان، علاقه مندی شدیدی نسبت به استفاده از انرژی های نو بویژه انرژی خورشیدی برای تولید برق به وجود آمد [۱] و این امر منجر به ساخت انواع نیروگاه های خورشیدی در جهان گردید. از ویژگی های این انرژی که باعث استفاده روزافزون از آن گردیده می‌توان دسترسی آسان و گسترده، ارزان بودن، بدون آلودگی بودن و پایدار بودن این منبع انرژی را نام برد.

تولید برق با انرژی خورشید به دو شیوه صورت می‌گیرد: تولید مستقیم برق از نور خورشید با استفاده از سلول های فوتوولتائیک(PV[۱]) و به صورت غیر مستقیم با جمع آوری و متمرکز کردن انرژی خورشیدی(CSP[۲]) و انتقال آن به صورت انرژی حرارتی توسط مایع انتقال دهنده گرما(HTF[۳]) و تولید بخار موردنیاز توربین ها توسط HTF. سیستم های CSP از ادوات نوری که معمولا آینه ها می باشند و سیستم دنبال یابی خورشید به منظور متمرکز کردن میزان بیشتری از تابش خورشیدی برخوردی با آینه ها در ناحیه دریافتی بهره می برند. دسته وسیعی از انواع نیروگاه هایی که از فناوری CSP بهره می‌برند، وجود دارد نظیر نیروگاه سهموی خطی(PTC[۴])، نیروگاه دریافت کننده مرکزی(CRS[۵])، نیروگاه های با کلکتورهای فرنل و نیروگاه های کلکتورهای بشقابی(dish). نیروگاه های حرارتی سهموی خطی رایج ترین شکل از این فناوری می‌باشند. دو کشور آمریکا و اسپانیا از کشورهای پیشرو در ساخت این نیروگاه ها می باشند. از جمله این نیروگاه‌ها سهموی خطی می توان نیروگاه سولانا در ایالات آریزونا آمریکا با تولید ۲۸۰ مگاوات و نیروگاه سولنوا در ایالت سویل اسپانیا با ۱۵۰ مگاوات را نام برد. نیروگاه خورشیدی PTC دارای آینه های سهموی است که نور خورشید را در مرکز کانونی خود منعکس می کنند. در مرکز آینه ها لوله هایی حاوی HTF تعبیه شده است که گرمای ناشی از تابش نور را جذب می کند و گرم می گردد. از HTF گرم شده برای تولید بخار مورد نیاز توربین ها برای تولید برق استفاده می‌شود. مزیت اصلی این نیروگاه ها امکان ذخیره این انرژی به صورت انرژی حرارتی می باشد که به این نیروگاه‌ها امکان می‌دهد در طول شب نیز امکان تولید برق داشته باشند. امروزه برای ترویج استفاده از نیروگاه ها خورشیدی سعی در افزایش راندمان

1) Photo Voltaics
2) Concentrating Solar Power
3) Heat Transfer Fluid
4) Parabolic Trough Collector
5) Central Receiver System

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-21]

این نیروگاه‌ها دارند تا نصب این نیروگاه ها از نظر اقتصادی به علت هزینه اولیه بالای آنها، مقرون به صرفه گردد. افزایش راندمان در این نیروگاه ها به طرق مختلف از قبیل بهبود میزان انعکاس تابش خورشید با افزایش کیفیت آینه ها در انعکاس نور، بهبود ردیابی خورشید در طول روز، بهبود کنترل دمای HTF به کمک روش های کنترلی مختلف با تنظیم دبی HTF و به کار بردن HTF با ویژگی های دمایی بهتر صورت می گیرد. در این مقاله از روش کنترل مدل پیش‌بین به منظور کنترل دمای HTF برای بهبود راندمان این سیستم استفاده شده است. در نتیجه، هدف کنترلی ردیابی دمای خروجی سیستم در دمای مرجع به وسیله تنظیم میزان دبی حجمی HTF می‌باشد [۱۱].

از چالش های موجود در این سیستم غیردستکاری بودن منبع انرژی اولیه برخلاف نیروگاه های فسیلی، متغیر بودن انرژی خورشیدی در طول روز، با تغییر فصول و بسته به شرایط جوی همچون ابری بودن هوا، رطوبت هوا و آلودگی، وجود عوامل اغتشاشات دیگری همچون دمای HTF ورودی و دمای محیط در سیستم، متغیر بودن دینامیک سیستم به علت ظاهر شدن عوامل اغتشاشی و ورودی کنترلی در پارامترهای مدل فضای حالت سیستم، وجود تاخیر متغیر با زمان و محدودیت‌های موجود در سیستم است که موجب می‌گردند کنترل کننده‌های متداول همچون PID دارای پاسخ بسیار کند و با نوسانات زیادی باشند. به همین دلایل، این کنترل‌کننده‌ها انتخاب مناسبی برای این سیستم ها نمی‌باشند و در صورت استفاده از آنها در این‌سیستم‌ها باید با کنترل‌کننده‌های دیگر ترکیب شوند. برای مثال، در [۲] از یک کنترل کننده PI خودتنظیم بر پایه روش جایابی قطبها استفاده شده است که این خود تنظیم بودن کنترل کننده تا حدودی امکان به عهده گرفتن تغییرات شرایط عملکردی را می‌دهد. تمام عوامل گفته شده موجب می گردد که از روش های کنترلی پیشرفته برای کنترل دمای این نیروگاه ها استفاده گردد. در سال های اخیر از روش های پیشرفته مختلفی نظیر کنترل مدل پیش‌بین، کنترل تطبیقی و شبکه عصبی استفاده شده است [۴]. در [۱،۴] خلاصه ای از انواع روش های مدل کردن، شناسایی و روش‌های کنترل کلاسیک و پیشرفته برای کنترل دمای خروجی نیروگاه حرارتی خورشیدی توضیح داده شده است. در [۳] یک کنترل‌کننده مدل پیش بین تطبیقی با مدل غیرخطی با پارامترهای متمرکز پیشنهاد شده است که به منظور جبران متغیر با زمان بودن سیستم و خطای مدل‌سازی، پارامترها به صورت آنلاین تخمین زده می شوند. در [۵] از یک کنترل کننده مدل پیش بین غیرخطی از یک تابع لیاپانوف در تابع هزینه کنترل‌کننده برای پایداری مقاوم بودن آن در برابر عدم قطعیت بهره می‌برد. در بعضی دیگر از مراجع بعد از خطی سازی مسائل کنترل غیرخطی از روش های کنترلی بهره می‌برند. از جمله در [۶] برای شبیه سازی این نیروگاه‌ها از یک معادله دیفرانسیل جزئی ساده که از قانون تعادل انرژی به دست آمده، استفاده شده است که در آن از تلفات حرارتی سیستم و اثرات محیطی همانند دمای محیط صرفنظر و با تغییر مقیاس زمانی خطی سازی شده و از کنترل‌کننده مدل پیش‌بین تطبیقی به منظور کنترل استفاده شده است که با این کار

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-21]

قادر به پذیرفتن تغییرات ناگهانی متغیر مرجع شده است. در [۷] نیز از یک کنترل کننده مدل پیش بین تطبیقی بعد تخمین میزان تابش خورشید و دمای ورودی سیستم و خطی سازی مدل سیستم برای کنترل دمای نیروگاه خورشیدی استفاده شده است. در [۱۳] با استفاده از مدل فضای حالت غیرخطی که دینامیک‌های سیستم با استفاده از شبکه عصبی معادلات حالت تقریب زده شده و با بکارگیری روش کنترل مدل پیش‌بین تطبیقی، سیگنال‌های کنترلی با حل مساله بهینه‌سازی به صورت حلقه باز و با اعمال محدودیت‌ها به صورت نامعادله به دست آورده شده‌اند.

در این کار از مدلی از فضای حالت غیرخطی متغیر با زمان استفاده شده که عوامل اغتشاشی موثر بر دمای خروجی یعنی دمای ورودی HTF، میزان تابش خورشید و دمای محیط در آن لحاظ شده و بعد خطی سازی آن برای کنترل دمای خروجی کلکتورها در دمای مرجع از ترکیبی از کنترل کننده مدل پیش بین و منطق فازی استفاده می شود. در این روش، پارامترهای سیستم به صورت برخط تغییر کرده تا سیستم بتواند اثرات ناشی از متغیر بودن سیستم با زمان و خطای مدل‌سازی را جبران کند. سیگنال‌های کنترلی سیستم با حل مساله بهینه سازی در هر گام و با اعمال محدودیت‌های ورودی و خروجی سیستم و با توجه به ورودی مرجع به دست آورده می‌شود. این روش برخلاف روش کنترل پیش‌بین غیرخطی ساده بوده و با سرعت پاسخ خوبی برای محاسبات برخط کارایی دارد. همچنین به منظور کاهش نوسانات سیستم، تغییرات تدریجی سیگنال کنترلی و کاهش خطای انسانی از منطق فازی بهره برده شده است که کاهش خسارات ناشی از تغییرات سریع ورودی مرجع و افزایش راندمان سیستم را در پی خواهد داشت. بنابراین، فرایند کنترل در دو سطح صورت می گیرد. در اولین سطح، با استفاده از منطق فازی سعی در به دست آوردن دمای مرجع مناسب برای داشتن بالاترین راندمان نسبت به شرایط محیطی موجود می‌گردد که در بخش ۳ توضیح داده می‌شود. در سطح بعدی با توجه به ورودی مرجعی که با منطق فازی ایجاد می‌گردد، سعی در کنترل دمای HTF خروجی در دمای مرجع داده شده توسط منطق فازی با تنظیم دبی حجمی ورودی می گردد که در این مرحله از کنترل کننده مدل پیش بین به این منظور استفاده می‌گردد. در بخش ۲ طریقه مدل کردن این نیروگاه و در بخش ۳ طریقه خطی سازی مدل غیر خطی سیستم و روش کنترل کننده پیش بین بر این سیستم توضیح داده شده است.

کلکتورهای خورشیدی

در این قسمت، نیروگاه تحقیقاتی خورشیدی آلمریا اسپانیا مورد بررسی قرار می گیرد که عمده تحقیقات در زمینه انرژی خورشیدی در جهان در این نیروگاه تحقیقاتی آزمایش می‌شوند. این مرکز مطالعاتی دارای ۴۸۰ کلکتور خورشیدی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-21]

سهموی خطی(شکل ۱) است که در ۱۰ حلقه قرار دارند. مجموع طول هر حلقه ۱۷۲ متر و هر حلقه از چهار قسمت تشکیل شده که هر قسمت دارای ۱۲ کلکتور می‌باشد و به صورت سری به هم متصل شده اند.

شکل۱) کلکتورهای سهموی خطی در نیروگاه خورشیدی تحقیقاتی آلمریا اسپانیا

برای شبیه سازی کلکتورهای خورشیدی از مدل پارامتر توزیع شده استفاده شده است. این مدل از معادلات دیفرانسیل جزئی از تعادل انرژی بین روغن و محیط به دست می آید که به شکل معادله (۱) می باشد.

$$\rho_m C_m A_m \frac{\partial T_m}{\partial t}(t,l) = \eta_{col} G I(t) - G H_l (T_m(t,l) - T_a(t)) - \delta_p H_t (T_m - T_f) \qquad (۱)$$

$$\rho_f C_f A_f \frac{\partial T_f}{\partial t}(t,l) + \rho_f C_f q(t) \frac{\partial T_f}{\partial l}(t,l) = \delta_p H_t (T_m(t,l) - T_f(t,l))$$

که اندیس m به فلز و اندیس f به مایع اشاره دارد. سایر پارامترهای مدل در جدول (۱) نشان داده شده اند. ظرفیت گرمایی ویژه، چگالی روغن و ضریب تلفات گرمایی وابسته به دمای روغن می باشند. ضریب انتقال حرارت از فلز به روغن علاوه بر دما به نرخ حجمی روغن نیز وابسته می باشد. راندمان هندسی کلکتور به ابعاد کلکتور، زاویه تابش خورشید، زمان ، مکان جغرافیایی محل نصب کلکتورها وابسته می باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-21]

جدول ۱) توصیف پارامترها

پارامترها	تعاریف	واحدها
T	زمان	s
L	مکان	m
A	سطح مقطع لوله	m^2
C	ظرفیت گرمایی ویژه	$J/(kg\ K)$
ρ	چگالی	kg/m^3
T	دما	K,C
η_{col}	راندمان کلی کلکتور	-
$\eta_{K_{opt}}$	راندمان نوری کلکتور	-
η_o	راندمان هندسی کلکتور	-
I	تابش خورشید	W/m^2
G	اندازه دهانه کلکتور	m
H_l	ضریب تلفات گرمایی	$W/(K\ m^2)$
H_t	ضریب انتقال حرارت از فلز به روغن	$W/(K\ m^2)$
$H_{\delta p}$	محیط مرطوب	m
T_a	دمای محیط	K,C
Q	نرخ حجمی پمپ روغن	m^3/s

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-21]

مدل فضای حالت کنترل پیش بین

در این بخش، روشی که برای کنترل مدل پیش بین استفاده می شود، توصیف می شود. در دو دهه گذشته از کنترل‌کننده‌های مدل پیش بین مختلفی برای کنترل دمای کلکتورها استفاده شده از آن جمله استفاده از کنترل‌کننده مدل پیش بین بر پایه رویتگر که در [۸] پیشنهاد شده است. در [۹] از کنترل کننده مدل پیش بین غیرخطی با جبران‌کننده DTC[1] استفاده شده است.

در این کار از مدل خطی سازی شده فضای حالت کلکتورها برای کنترل مدل پیش بین استفاده می شود که در آن هر کلکتور به ۷ قسمت تقسیم شده و در هر نمونه برداری ماتریس های خطی سازی شده مدل فضای حالت با استفاده از داده‌های سیستم (نرخ حجمی روغن، دمای ورودی، میزان تابش خورشید و دمای محیط) محاسبه می گردد و منطق فازی نیز با استفاده از داده های تابش و دمای ورودی دمای مرجع را تولید می کند.

هدف از کنترل رشته کلکتورهای سهموی

هدف از کنترل کلکتورهای خورشیدی تنظیم دمای خروجی کلکتورها تا حد امکان در دمای مرجع می باشد. اما به علت غیر قابل دستکاری بودن تابش خورشید از نرخ حجمی روغن q به عنوان متغیر کنترلی استفاده می گردد. دمای مرجع طی عملکرد سیستم دائما به علت تغییر در میزان تابش خورشید و تقاضای تولید انرژی تغییر می کند. دستیابی به دمای مرجع به علت دینامیک های پیچیده و وجود عوامل اغتشاشی موثر بر دمای خروجی دشوار می باشد. تاخیرهای انتقالی وابسته به سیگنال کنترلی می باشند و با کاهش سیگنال کنترلی تاخیر انتقالی افزایش می یابد که کنترل سیستم را مشکل‌تر می کند.

خطی سازی مدل کلکتورهای سهموی خطی

از معادله (۱) برای به دست آوردن معادله خطی استفاده می شود. به منظور کاهش ابعاد ماتریس خطی سازی شده و کاهش بار محاسباتی، دمای فلز و مایع یکسان در نظر گرفته می شود که این فرض به علت ضریب انتقال حرارت بالای لوله فلزی منطقی می باشد. با توجه به این ساده سازی مدل پارامتر توزیع شده در معادله (۱) به صورت معادله (۲) در می‌آید.

$$\frac{\partial T_f}{\partial t}(t,l)+\frac{q(t)}{A_f}\frac{\partial T_f}{\partial l}(t,l)=\frac{\eta_{col}GI(t)-GH_l(T_m(t,l)-T_a(t))}{\rho_f C_f A_f} \quad (۲)$$

1) Dead-Time Compensator

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-21]

یکی از روشهای حل معادلات این سیستم، تقسیم کردن مولفه طولی سیستم به n قسمت و ثابت فرض کردن متغیر دما در هر قسمت می باشد. این روش برای سیستم‌هایی به کار برده می شود که متغیر موردنظر نسبت به آن مولفه تغییرات آرامی داشته باشد. حال با توجه به تغییرات آرام دمای روغن در طول لوله می توان کلکتور را به n قسمت تقسیم کرد و دما را در هر قسمت ثابت در نظر گرفت. در نتیجه به جای $\frac{\partial T_f}{\partial l}$ می توان عبارت (۳) را به کار برد.

$$\frac{\partial T_f}{\partial l} \approx \frac{T_{f_i}-T_{f_{i-1}}}{l} \quad , \quad i = 1, \dots, n \tag{۳}$$

در معادله فوق، n تعداد قسمتها و l طول هر قسمت و T_{f_i} دمای روغن در قسمت i می باشد. طول هر قسمت از رابطه $L = nl$ به دست می آید که L طول کلکتور می باشد. با انجام گسسته سازی معادله (۲) در مکان هر قسمت دارای معادله ای به شکل (۴) خواهد بود.

$$\frac{\partial T_{f_i}(t)}{\partial t} = -\frac{q(t)}{A_f}\frac{T_{f_i}-T_{f_{i-1}}}{l} + \gamma I_{eff}(t) - \alpha(T_{f_i} - T_a) \tag{۴}$$

که $\gamma = \frac{G}{\rho_f C_f A_f}$ ، $\alpha = \frac{H_l G}{\rho_f C_f A_f}$ و I_{eff} میزان تابش موثر خورشید می باشد که از حاصلضرب تابش خورشید در راندمان کلکتورها حاصل می گردد($I_{eff} = \eta_{col} I$). در معادله (۴)، $T_{f_0} = T_{in}$ که دمای ورودی روغن به کلکتورها می‌باشد[۱۰].

با خطی سازی سیستم نسبت به دمای روغن در هر قسمت و چهار ورودی، مدل فضای حالت زمان پیوسته آن به فرم (۵) در می‌آید.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_d d(t)$$
$$y(t) = Cx(t) \tag{۵}$$

که در آن:

$$u = q \quad , \quad d = [T_{in} \;\; I_{eff} \;\; T_a]^T$$
$$x = [T_1 \; T_2 \; \cdots \; T_7]^T$$

انواع خروجی‌ها و ورودی های سیستم و محدودیت ها و محدوده کار آنها به صورت زیر می باشد:

ورودی کنترلی: تنها متغیر کنترلی سیستم نرخ حجمی روغن می باشد. محدوده عملکرد آن $۲\frac{l}{s} < q < ۱۲\frac{l}{s}$ می باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-21]

خروجی سیستم: دمای روغن خروجی از قسمت هفتم کلکتور خروجی سیستم $T_{out} = T_{f_7}$ می باشد. محدوده عملکرد آن ۱۵۰°C < T_{out} <۳۰۰°C می باشد.

ورودی های اغتشاشی: در این سیستم اثر سه ورودی اغتشاشی تاثیرگذار بر پاسخ خروجی لحاظ شده است شامل:

۱. تابش خورشید: میزان تابش خورشید در طول روز و با تغییر شرایط جوی و آلودگی تغییر می کند. در اینجا با I_{eff} نشان داده شده و به طور معمول در بازه ۶۰۰ W/m^2 تا ۱۰۰۰ W/m^2 تغییر می کند.

۲. دمای روغن ورودی: این عامل اغتشاشی با T_{in} نشان داده شده است و مقدار آن بسته به دمای خروجی و دمای محیط تغییر می کند.

۳. دمای محیط: به علت در تماس بودن لوله انتقال دهنده روغن با هوا، همواره این عامل اغتشاشی بر روی دمای خروجی کلکتورها تاثیر می گذارد و آن با T_a نشان داده شده است.

پارامترهای معادلات حالت و خروجی معادله (۵) در (۶) آمده است :

$$A = \begin{pmatrix} \frac{-q}{A_f l} + M_1 & 0 & 0 & & 0 \\ \frac{q}{A_f l} & \frac{-q}{A_f l} + M_2 & 0 & & 0 \\ 0 & \frac{q}{A_f l} & \frac{-q}{A_f l} + M_3 & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \frac{q}{A_f l} & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & & \frac{-q}{A_f l} + M_7 \end{pmatrix}_{7\times7}$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{A_f l} & -\frac{1}{A_f l} & \cdots & -\frac{1}{A_f l} \end{bmatrix}^T_{1\times7}$$

$$B_d = \begin{pmatrix} \frac{q}{A_f l} & \frac{G}{A_f \rho_{f_1} C_{f_1}} & \frac{G(2H_{l_1} + 0.06133)}{A_f \rho_{f_1} C_{f_1}} \\ 0 & \frac{G}{A_f \rho_{f_2} C_{f_2}} & \frac{G(2H_{l_2} + 0.06133)}{A_f \rho_{f_2} C_{f_2}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \frac{G}{A_f \rho_{f_7} C_{f_7}} & \frac{G(2H_{l_7} + 0.06133)}{A_f \rho_{f_7} C_{f_7}} \end{pmatrix}_{7\times3}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}_{1\times7}$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-21]

$$M_i = \frac{-G}{A_f \rho_{f_i}^2 C_{f_i}^2}\left(\rho_{f_i} C_{f_i}\left(2H_{l_i} + 0.06133\right) + (1917.6 - 4.6744 T_{f_{i_n}})(I_{eff} - H_{l_i}(T_{f_{i_n}} - T_a))\right) \qquad (۶)$$

همان طور که مشاهده می‌شود، ماتریس B_d به متغیرهای حالتهای سیستم و نرخ حجمی روغن و ماتریس A علاوه بر آنها، به تابش موثر خورشید و دمای محیط نیز وابسته می باشد. پارامترهای A_f ، l و G ثابت می باشند.

سیستم دارای دو تاخیر تاثیرگذار بر پاسخ سیستم می باشد که اولی به علت وجود فاصله بین حسگر دما که در انتهای مسیر هر کلکتور واقع شده و پمپ که توسط آن دبی لازم تامین می‌گردد، می‌باشد و دیگری تاخیر انتقالی ناشی از انتقال دمای ورودی به دمای خروجی کلکتورها است که متغیر با زمان می باشد که در عمل وابسته به دبی حجمی روغن می باشد. تاخیر اول که ناشی از انتقال اطلاعات از حسگر به پمپ و پاسخ پمپ است، از رابطه (۷) به دست می آید:

$$t_d = \frac{A_f * \sum_{i=1}^{n} l_i \rho_{f_i}}{q\, \rho_f} \qquad (۷)$$

همان طور که در رابطه (۷) مشاهده می‌شود، این تاخیر با t_d نشان داده شده و وابسته به نرخ حجمی روغن می باشد. حدود تغییرات این تاخیر بین ۰ تا ۶۰ ثانیه می باشد که به طور معمول ۳۰ ثانیه لحاظ می شود که معادل با یک ثابت زمانی می‌باشد. اما تاخیر انتقالی دمای ورودی به خروجی که با t_r نشان داده شده، محدوده تغییراتش وسیع می باشد که ناشی از وابستگی شدید آن به نرخ دبی حجمی روغن می باشد. در هر نمونه برداری با توجه به ثابت بودن نرخ حجمی روغن می توان از معادله (۸) که تقریب مناسبی برای این تاخیر می باشد، استفاده کرد.

$$t_r = A_1 e^{-\left(\frac{q(t-t_d)}{q_1}\right)} + y_0 \qquad (۸)$$

در معادله (۸) ضرایب A_1, q_1, y_0 بسته به حلقه کلکتوری که دمایش در حال کنترل شدن می‌باشد، تغییر می‌کنند[۷]. در بخش بعدی، روش کنترل پیش بین توضیح داده می شود که از معادلات گسسته در آن استفاده می گردد. لذا برای گسسته سازی معادلات حالت این سیستم تاخیردار از روش ZOH[1] استفاده می‌گردد. زمان نمونه برداری این سیستم به گونه‌ای انتخاب شده است که هم سیستم قادر به حذف اغتشاش و ردیابی سیگنال مرجع باشد و هم تاخیر موجود در سیستم با دقت بیشتری تخمین زده شود. همچنین فرکانس نمونه‌برداری باید از فرکانس قضیه نمونه برداری کمتر باشد. در مراجع مختلف از ۱۵ تا ۶۰ ثانیه انتخاب شده است، در اینجا از زمان ۳۰ ثانیه استفاده شده است.

1) Zero Order Holding

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-21]

روش کنترل مدل پیش بین

الگوریتم کنترل مدل پیش بین روش کنترلی است که مبتنی بر مدل فرایند می‌باشد. انواع مختلف این روش از مدل‌های مختلفی نظیر پاسخ ضربه، پاسخ پله، مدل فضای حالت و مدل های غیرخطی برای پیش بینی خروجی استفاده می نمایند اما تمامی آنها در سه گام اساسی زیر مشترک می باشند:

۱. استفاده از مدلی دقیق برای پیش بینی مقادیر خروجی فرایند در لحظه های آینده (افق) که وابسته به دنباله ای از متغیرهای کنترلی با طول از پیش تعیین شده (افق کنترل) می باشد.

۲. محاسبه دنباله متغیرهای کنترلی با بهینه سازی تابع هزینه به همراه لحاظ نمودن محدودیت های عملکردی سیستم و مسیرهای مرجع مطلوب برای خروجی فرایند

۳. اعمال تنها اولین مقدار از دنباله متغیرهای کنترلی و محاسبه مجدد دنباله متغیرهای کنترلی برای افق های بعدی

این ویژگی ها به کنترل پیش بین قابلیت اعمال آن به سیستم های چندمتغیره، نامینیمم فاز، ناپایدار حلقه باز، فرایندهای غیرخطی، سیستم های با تاخیرهای طولانی و دارای محدودیت بر ورودی کنترلی و متغیرهای کنترل شده را می دهد.

در اینجا از مدل فضای حالت خطی سازی شده در کنترل مدل پیش بین استفاده می شود که به علت پیچیدگی کمتر این مدل سیستم نسبت به مدل غیرخطی بار محاسباتی مساله بهینه سازی کمتر و کوتاه تر می گردد و امکان استفاده از روش های کنترل خطی را بر روی سیستم فراهم می سازد.

دنباله متغیرهای کنترلی با مینیمم کردن تابع هزینه محاسبه می گردد. این تابع، خطای بین خروجی پیش بینی شده $y(k+j|k)$ و ورودی مرجع $y^{ref}(k+j|k)$ را محاسبه می کند. از طرفی می توان آن را بر حسب ورودی کنترلی u یا تغییرات آن Δu بیان نمود که در اینجا از تغییرات ورودی کنترلی بهره برده شده است. مقادیر ورودی های سیستم در طول افق پیش بینی ثابت نگه داشته می شوند و نرخ جریان حجمی روغن با حل کردن مساله بهینه سازی (۹) در هر نمونه زمانی k به دست می آید.

$$min\ J(\Delta u, y) = min \sum_{j=1}^{N_p} (y^{ref}(k+j) - y(k+j|k))^T Q\, (y^{ref}(k+j) - y(k+j|k)) + \sum_{j=0}^{N_c-1} \Delta u(k+j|k)^T R\, \Delta u(+j|k)$$

$$x(k+j+1|k) = Ax(k+j|k) + Bu(K+j|k) + B_d d(k)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-21]

$$u(k+j|k) = u(k+j-1) + \Delta u(k+j)$$
$$y(k+j|k) = Cx(k+j|k) \quad (۹)$$

که Q ماتریس وزن دهی خطای بین خروجی و ورودی مرجع، R ماتریس وزن دهی سیگنال کنترلی، N_p افق پیش بینی و N_c افق کنترل می باشد. از طرفی علاوه بر بهینه سازی، محدودیت های موجود بر روی متغیر کنترلی و متغیرهای کنترل شده به صورت معادله (۱۰) لحاظ می شود.

$$y_{min} \le y(k+j|k) \le y_{max} \qquad j = 1, \dots, N_p$$
$$u_{min} \le u(k+j|k) \le u_{max} \qquad j = 0, \dots, N_c - 1$$
$$\Delta u_{min} \le \Delta u(k+j|k) \le \Delta u_{max} \qquad j = 0, \dots, N_c - 1 \quad (۱۰)$$

جواب کلی سیستم در فرم برداری به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$Y = F + G\Delta u \quad (۱۱)$$

در اینجا F پاسخ آزاد و G پاسخ اجباری می باشد. بنابراین، Δu با مینیمم کردن تابع هزینه به دست آورده می شود. با استفاده از معادله (۱۱) تابع هزینه به فرم برداری زیر تبدیل می گردد.

$$J = \left(F + G\Delta u - y^{\mathrm{ref}}\right)^T Q\left(F + G\Delta u - y^{\mathrm{ref}}\right) + \Delta u^T R\, \Delta u \quad (۱۲)$$

که با توجه به خواص ماتریس ها، معادله (۱۲) به صورت معادله (۱۳) در می آید که شکل یک مساله QP می باشد و جواب چنین مسائلی تضمین شده می باشد.

$$J = \Delta u^T (G^T Q G + R)\Delta u + (G^T Q(F - y^{\mathrm{ref}}))^T \Delta u \quad (۱۳)$$

در بخش بعد، چگونگی استفاده از منطق فازی برای ایجاد دمای مرجع مناسب y^{ref} توضیح داده می شود.

منطق فازی در ترکیب با کنترل کننده پیش بین

همانطور که گفته شد، هدف از کنترل در نیروگاه های خورشیدی سهموی خطی کنترل دمای خروجی کلکتورها در دمای تعیین شده با تغییر نرخ حجمی روغن می باشد. اگر میزان دمای تعیین شده طوری انتخاب گردد که غیرقابل دسترسی باشد، منجر به اشباع رفتن عملگرها(پمپ)، کاهش طول عمر مواد نیروگاه و سبب ایجاد نوسانات نامطلوب و در نتیجه تخریب عملکرد سیستم می گردد. از طرفی دیگر، اگر کوچک انتخاب گردد، سبب افزایش تلفات در سیستم و کاهش

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-21]

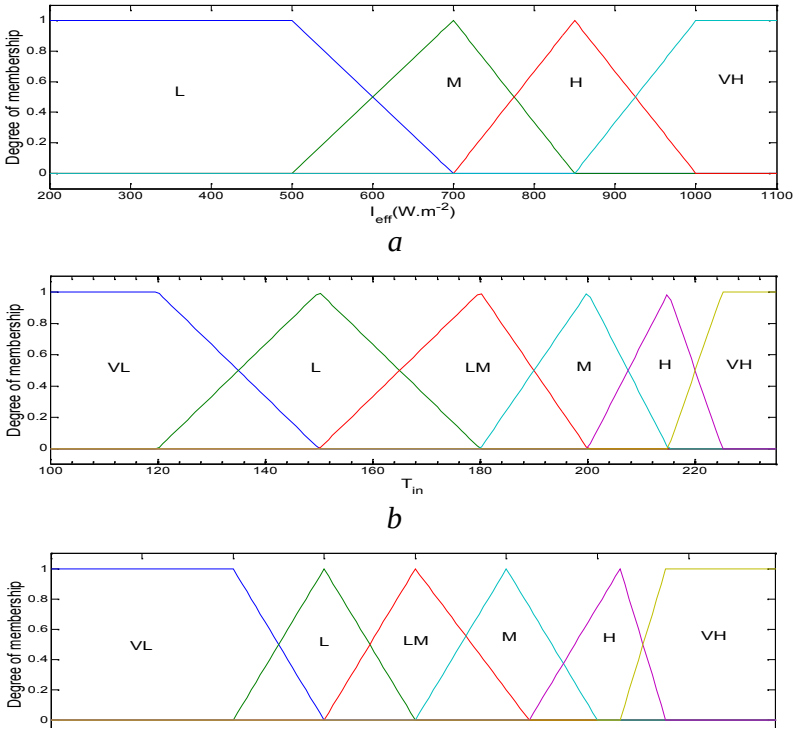
راندمان آن می‌گردد. به همین دلایل، انتخاب دمای مناسب نقش مهمی در افزایش راندمان نیروگاه ها ایجاد می کند که این کار در نیروگاه‌های خورشیدی توسط اپراتورها صورت می‌گیرد. اما استفاده از نیروی انسانی همواره با خطا همراه می باشد. در اینجا برای افزایش راندمان و کاهش خطا از منطق فازی برای تعیین دمای مرجع بهینه استفاده می گردد و پس از تعیین به تابع هزینه پیش بین اعمال می‌گردد. بنابراین، مساله کنترل دما در این نیروگاه ها به مساله کنترل سلسله مرتبه ای دو لایه تبدیل می گردد. در لایه بالاتر از منطق فازی که هدفش تولید دمای مناسب برای لایه پایین‌تر است، استفاده می شود و در لایه پایین تر از کنترل کننده مدل پیش بین به منظور ردیابی دمای تولید شده توسط لایه بالاتر با وجود اغتشاشات موجود در سیستم استفاده می شود.

منطق فازی با ارائه متغیرهای زبانی درکی از متغیرهای فرایند را ایجاد می کند که موجبات استفاده از دانش انسان‌های خبره و درک بهتر مساله را فراهم می‌سازد که از سه بخش اساسی فازی ساز، موتور استنتاج و فازی زدا تشکیل شده است. عوامل اصلی تاثیرگذار در تعیین دمای مرجع میزان تابش خورشید و دمای ورودی روغن به کلکتورها می‌باشد. بنابراین، از این دو عامل به عنوان ورودی های فازی استفاده شده است. برای تابش خورشید از ۴ تابع عضویت استفاده شده که استفاده بیش از این تعداد توابع عضویت موجب حساسیت بیشتر دمای مرجع با تغییر تابش می گردد و بشدت بر روی خروجی سیستم تاثیرگذار خواهد بود. با انجام سعی و خطا برای دمای ورودی و دمای مرجع هر کدام با ۶ تابع عضویت نشان داده شده اند که با این توابع عضویت فرایند فازی می‌گردد که در شکل (۲) نمایش داده شده است. موتور استنتاج فازی با استفاده از قواعد اگر و آنگاه فازی و بر اساس استنتاج مبتنی بر ترکیب و استنتاج مبتنی بر قواعد جداگانه نتیجه‌گیری می‌کند. در اینجا از موتور استنتاج ممدانی و قوانین فازی که در جدول (۲) نشان داده شده، استفاده شده است.

جدول ۲) توصیف قوانین فازی بین ورودی ها و خروجی

	VL	*L*	*LM*	*M*	*H*	*VH*
L	*VL*	*L*	*L*	*LM*	*M*	*H*
M	*L*	*L*	*L*	*LM*	*M*	*VH*
H	*L*	*L*	*LM*	*LM*	*M*	*VH*
VH	*L*	*LM*	*LM*	*M*	*H*	*VH*

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-21]



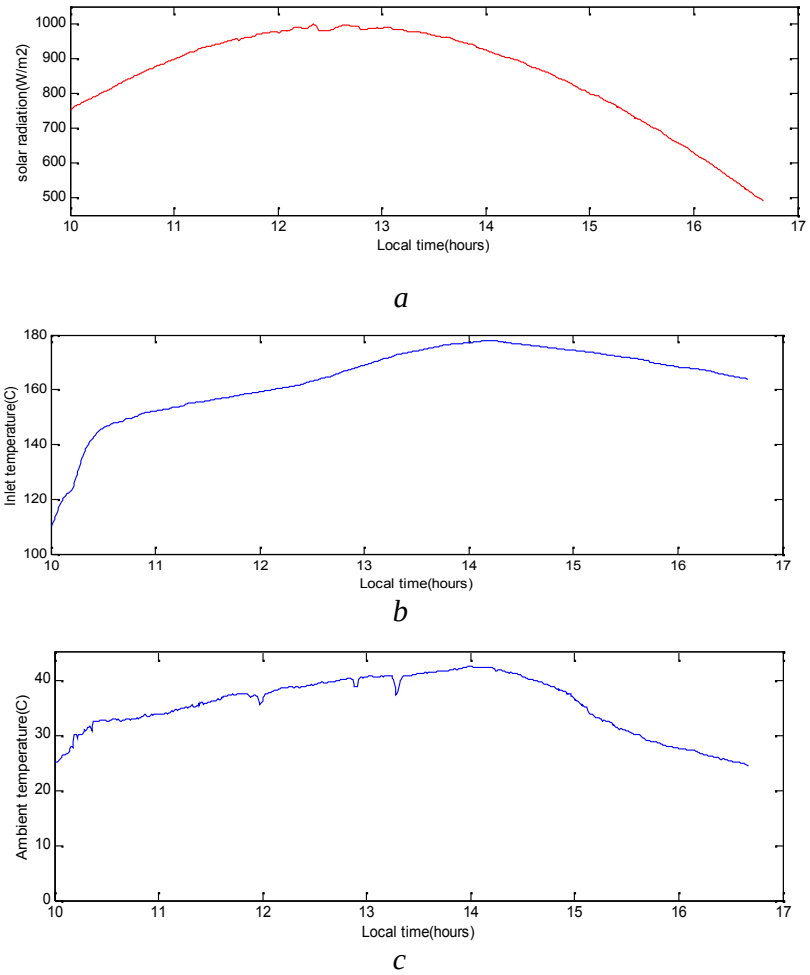
شکل ۲) توابع عضویت: a. تابع عضویت مربوط به میزان تابش خورشید،

b. تابع عضویت دمای روغن ورودی به کلکتور ها، c. تابع عضویت دمای مرجع

شبیه سازی

در این بخش، نتایج شبیه سازی به منظور سنجش کنترل کننده و روش تعیین ورودی مرجع پیشنهاد شده ارائه شده است. شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار متلب و استفاده از جعبه ابزار کنترل مدل پیش بین انجام شده است. در شبیه سازی از مدل فضای حالت خطی سازی شده (۴) استفاده و ورودی های اغتشاشی به آن اعمال شده است. این داده ها مربوط به ایستگاه شهر آلیس اسپرینگز استرالیا می باشد که در شکل (۳) نشان داده شده است. زمان نمونه برداری معمولا بین ۱۵ تا ۳۹ ثانیه لحاظ می شود که در اینجا ۳۰ ثانیه لحاظ شده است.

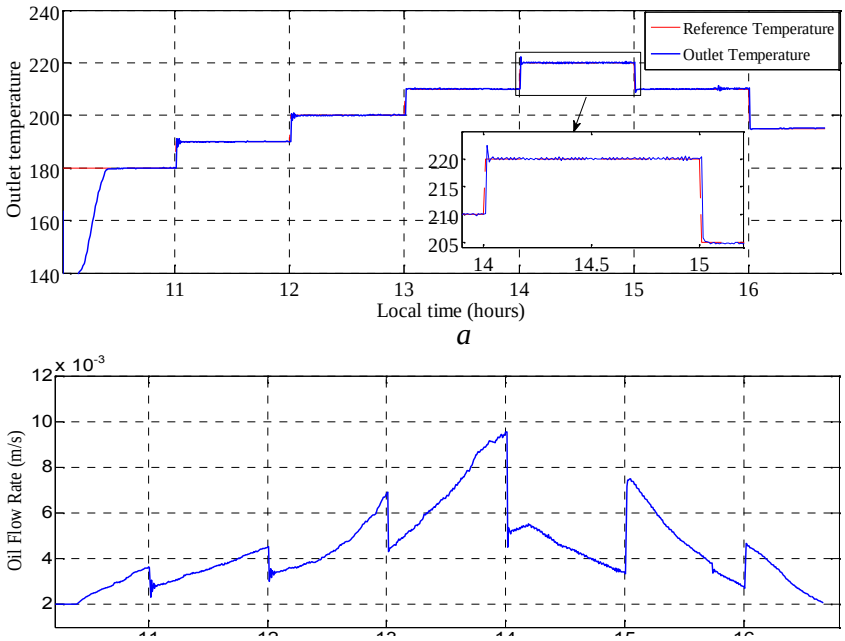
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-21]



شکل ۳) ورودی های اغتشاشی: a. میزان تابش خورشید، b.دمای روغن ورودی به کلکتور ها، c. دمای محیط

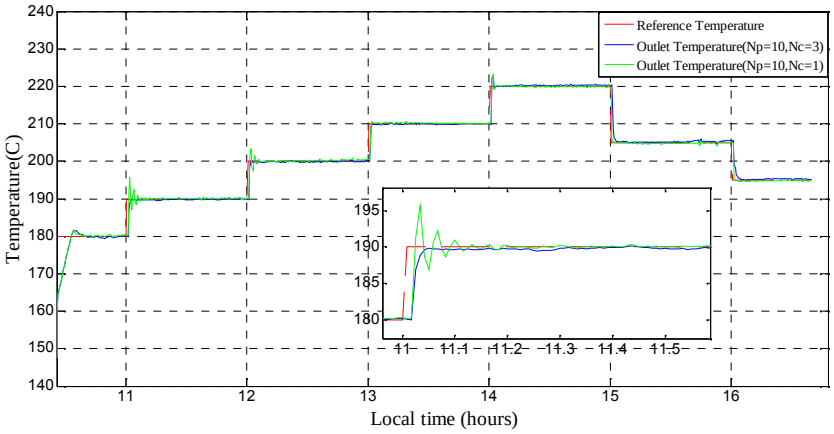
در شکل (۴) دمای خروجی کلکتورها و نرخ حجمی روغن ورودی نیروگاه حرارتی با استفاده از کنترل کننده مدل پیش‌بین نشان داده شده است. در نیروگاه ها دمای مرجع توسط اپراتورها بسته به میزان تابش خورشید و میزان تقاضای انرژی تعیین می شود. در اینجا برای سنجش کنترل کننده دمای مرجع هر یک ساعت به صورت پله ای بسته به میزان تابش خورشید و دمای روغن ورودی تغییر داده شده است. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، کنترل‌کننده قابلیت دفع اغتشاشات ناشی از تغییرات تابش و دمای ورودی و دمای محیط را داشته و بخوبی دمای مرجع را ردیابی می‌کند و میزان فراجهش و مدت زمان خیز در هر بار تغییر دمای مرجع بسیار ناچیز می‌باشد و فراجهش به ازای ۱۰ درجه تغییر دمای مرجع به حداکثر مقدار خود ۲٫۵ درجه سانتیگراد می رسد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-21]



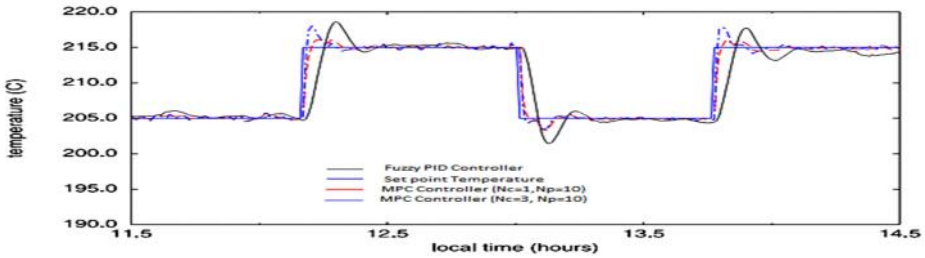
شکل ٤) a. دمای روغن خروجی، b.نرخ حجمی روغن

به منظور دستیابی به عملکرد بهتر کنترل کننده می‌توان افق کنترل و افق پیش بین آن را تغییر داد. در شکل (۵) تفاوت کنترل دما با تغییر این پارامترها مشاهده می‌گردد. خط آبی دمای روغن خروجی را به ازای $N_p =$ ۱۰ و $N_c =$ ۳ و خط قرمز دمای روغن خروجی را به ازای $N_p =$ ۱۰ و $N_c =$ ۱ نشان می دهد.



شکل ۵) دمای روغن خروجی به ازای تغییر افق کنترل و پیش بین

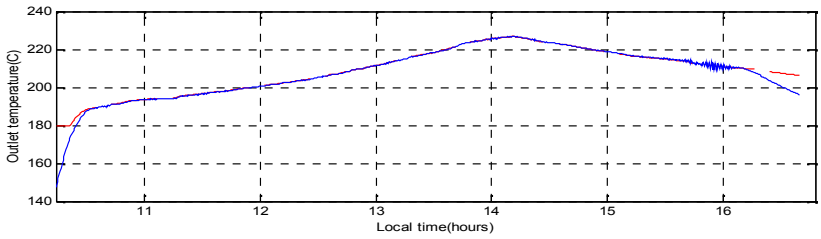
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-21]



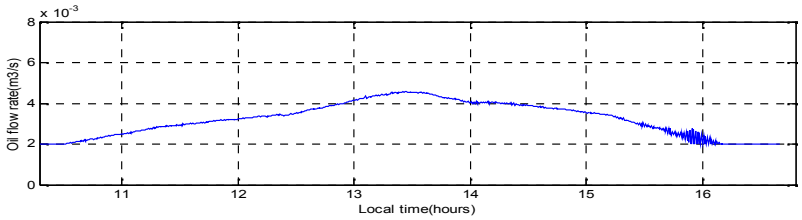
شکل ٦) دمای روغن خروجی به ازای تغییر افق کنترل و پیش بین و کنترل‌کننده PID فازی

درشکل (۶) دمای خروجی سیستم، با دو کنترل کننده مدل پیش‌بین(به ازای $N_p = ۱۰$ و $N_c = ۱$ با خطچین به رنگ قرمز و به ازای $N_p = ۱۰$ و $N_c = ۳$ با خطچین به رنگ آبی) و کنترل کننده PID فازی(به رنگ سیاه) به ازای تغییرات ۱۰ درجه سانتیگراد دمای مرجع نشان داده شده است[۱۲]. همانطور که مشاهده می‌گردد با وجود اینکه از فازی به منظور تنظیم برخط ضرایب PID استفاده شده است، سیستم همچنان دارای تاخیر قابل ملاحظه ای می باشد حال آنکه میزان این تاخیر در کنترل کننده پیش‌بین بسیار ناچیز و دارای نوسانات کمتری نیز می باشد.

از طرفی، مشاهده می شود که با هر بار تغییر دمای مرجع سیگنال کنترلی پرش ناگهانی دارد که این تغییرات ناگهانی سبب ایجاد نوسانات نامطلوب در سیستم می گردد و موجب کاهش طول عمر مواد نیروگاه بویژه پمپ ها می‌گردد. علاوه بر این، تعیین دمای مرجع توسط اپراتورها همواره با خطا همراه می‌باشد و همه این عوامل استفاده از منطق فازی را توجیه می‌کند. شکل (۷) عملکرد ترکیب کنترل کننده پیش بین و منطق فازی را نشان می دهد. همانطور که دیده می‌شود، کنترل‌کننده هم قادر به ردیابی دمای مرجع بوده و هم سیگنال کنترل به آرامی تغییر می کند و دیگر تغییرات ناگهانی در سیگنال کنترل دیده نمی شود .



a



b

شکل ۷) a.دمای روغن خروجی، b.نرخ حجمی روغن با ترکیب کنترل کننده پیش‌بین و منطق فازی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-21]

نتیجه‌گیری

در این مقاله از یک کنترل کننده پیش بین فازی برای کنترل دمای روغن خروجی کلکتورهای یک نیروگاه خورشیدی در حضور تابش خورشید ، اغتشاشات تابش خورشید، دمای ورودی،دمای محیط و تاخیرهای وابسته به دبی استفاده شده است. بدین منظور از یک ساختار غیرخطی تغییرپذیر در زمان که سازوکار انتقال را انعکاس می‌دهد بهره برده شده و پس از خطی سازی سیستم با زمان نمونه برداری ۳۰ ثانیه و اعمال تاخیرهای موجود از کنترل کننده پیش بین بهره برده شده است. مزیت این روش، قابلیت کنترل‌کننده پیش بین در اعمال محدودیت های سیستم و تاخیرهای طولانی در ساختار خود و اعمال تغییرات آرام سیگنال کنترلی به سبب استفاده از منطق فازی برای تعیین دمای مرجع می باشد و در نتیجه، دیگر فراجهشی ناشی از تغییرات ناگهانی دمای مرجع وجود نخواهد داشت و این هم سبب کاهش خطا و تلفات ادوات نیروگاه می گردد. نتایج شبیه‌سازی کنترل‌کننده پیش‌بین با کنترل‌کننده PID فازی، نشان دهنده قابلیت روش کنترل کننده پیش بین در کاهش تاخیر و اغتشاشات سیستم می باشد و عملکرد مناسب ترکیب این کنترل‌کننده با منطق فازی در کاهش فراجهش و تغییرات آرام سیگنال کنترل دما خروجی کلکتورها را نشان می دهد.

منابع

[1] Camacho, E.F., Rubio, F.R., Berenguel, M., Valenzuela, L., 2007. A survey on control schemes for distributed solar collector fields. Part I: Modeling and basic control approaches. Sol. Energy 81, 1240–1251.

[2] Camacho, E.F., Rubio, F.R. and Hughes, F., Feb. 1992. Self-tuning control of a solar power plant with distributed collector field. IEEE Control Syst. Mag., vol. 12, no. 2, pp. 72–78.

[3] Pickhardt, R., 2000. Nonlinear modeling and adaptive predictive control of a solar power plant. Control Eng. Pract.8(8), 937–947.

[4] Camacho, E.F., Rubio, F.R., Berenguel, M., Valenzuela, L., 2007. A survey on control schemes for distributed solar collector fields. Part II: Advanced control approaches. Sol. Energy81, 1252–1272.

[5] Andrade, G.A., Pagano, D.J., A´lvarez, J.D., Berenguel, M., 2013. A practical NMPC with robustness of stability applied to distributed solar power plants. Solar Energy 92 106–122.

[6] Silva, R.N., Rato, L.M., Lemos, J.M., 2003a. Time scaling internal state predictive control of a solar plant. Control Engineering Practice 11(12), 1459–1467.

[7] Gallego, A.J., Camacho, E.F., 2012. Adaptative state-space model predictive control of a parabolic-trough field. Control Engineering Practice 20 (9), 904–911.

[8] Gallego, A.J., Fele, F., Camacho, E.F., Yebra, L., 2013. Observer-based Model Predictive Control of a parabolic-trough field. Solar Energy 97 426–435.

[9] . Gálvez-Carrillo, M., De Keyser, R., Ionescu, C., 2009. Nonlinear predictive control with dead-time compensator: application to a solar power plant. Sol. Energy83, 743–752.

[10] Barão, M., Lemos, J.M., Silva, R.N, 2002. Reduced complexity adaptive nonlinear control of a distributed collector solar field. J. Process Control12(1), 131–141.

[11] Wettermark, G., 1988. Performance of the SSPS solar power plants at Almería. J. Sol. Energy Eng. 110, 235–246.

[12] Berenguel, M., Camacho, E.F., Rubio, F.R., Luk, P.C.K., 1997: Incremental fuzzy PI control of a solar power plant. IEE Proc. Part D144(6), 596–604.

[13] Gil, P., Henriques, J., Cardoso, A., Carvalho, P., Dourado, A., 2014. Affine Neural Network-Based Predictive Control Applied to a Distributed Solar Collector Field. IEEE Transactions on control systems technology, vol. 22, no. 2.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-21]