# طراحی و توسعه یک محیط شبیه ساز جهت نیروگاه ۲۵۰kw خورشیدی شیراز بر پایه مدل‌سازی ترکیبی

مصطفی زمانی محی آبادی[۱]، سید علی اکبر صفوی[۲]، سید وحید نقوی[۳]، سید محمد حسام محمدی[۴]

**تاریخ دریافت مقاله:**

۱۳۹۱/۳/۸

**تاریخ پذیرش مقاله:**

۱۳۹۱/۶/۱۴

**کلمات کلیدی:**

MATLAB، محیط شبیه ساز، مدل‌سازی ترکیبی، نیروگاه خورشیدی شیراز

**چکیده:**

در این مقاله به طراحی و توسعه یک محیط شبیه ساز جهت سیکل روغن نیروگاه ۲۵۰kw خورشیدی شیراز بر پایه مدل‌سازی ترکیبی پرداخته می‌شود. به این ترتیب، قسمت‌های مختلفی که در کنترل فرایند تاثیر گذار هستند، در محیط نرم‌افزاری MATLAB مدل سازی می‌شوند. جهت تحقق این مدل‌سازی از یک روش ترکیبی استفاده می‌گردد. از این‌رو، جهت مدل‌سازی بخش‌هایی که با استفاده از روابط استاتیکی و دینامیکی قابل توصیف می‌باشند، از معادلات مربوطه و برای بخش‌های دیگر از یک مدل‌سازی فازی بر اساس تعریف یک فاکتور تصحیح استفاده می‌گردد. همچنین اعتبارسنجی مدل توسعه یافته با استفاده از داده‌های فعلی نیروگاه خورشیدی شیراز و بر مبنای شاخص‌های RMSE و RMSE نرمال شده صورت می‌پذیرد.

۱) کارشناسی ارشد ابزار دقیق و اتوماسیون، دانشگاه شیراز (نویسنده مسئول) Mostafa_zamani_۲@yahoo.com
۲) استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه شیراز Safavi@shirazu.ac.ir
۳) دانشجوی دکتری کنترل دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه شیراز Naghavi@shirazu.ac.ir
۴) کارشناسی ارشد ابزاردقیق و اتوماسیون، دانشگاه شیراز Hesammohammady@yahoo.com

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-15 ]

**مقدمه**

طراحی، ساخت و بهره‌برداری از نیروگاه‌های خورشیدی طی دو دهه گذشته رشد قابل ملاحظه‌ای داشته است. مسائل مختلف زیست محیطی، تأمین منابع انرژی و توسعه پایدار و سایر پارامترهای اجتماعی و اقتصادی سبب گردیده است تا به انرژی‌های تجدیدپذیر به خصوص انرژی خورشیدی توجه بیشتری گردد. استفاده از انرژی خورشیدی به ویژه برای تولید برق نیاز به طراحی و مدل‌سازی دارد تا بتوان در بهینه‌سازی در هزینه تولید از یک سو و ارزیابی و پیش‌بینی عملکرد سیستم در آینده را از سوی دیگر برخوردار بود. مطالعات و طراحی مدل‌های نرم افزاری و نظری برای مشابه سازی ترمودینامیکی، اقتصادی و عملکردی نیروگاه‌های گرمایی خورشیدی با استفاده از کلکتورهای سهموی خطی در چند سال اخیر مورد توجه محققین صنعت و دانشگاه بوده است.

برای بیان پدیده‌های غیر قطعی و نامشخص معمولا از سیستم‌های فازی استفاده می‌شود. اولین بار پروفسور لطفی زاده مفاهیم فازی را در ریاضیات پایه‌گذاری کرد[۲]. در نظریه فازی سعی می‌شود متغییرهای زبانی به متغییرهای ریاضی (اعداد) به کمک منطق فازی، قوانین اگر–آنگاه را به الگوریتم‌هایی برای استفاده در ریزپردازنده‌ها تبدیل نمود. پس یک طراح می‌تواند هر فرایند را تنها با استفاده از تجربیات و قوانین اگر–آنگاه مدل‌سازی نماید. در ادامه، بعضی از مدل‌سازی‌های صورت گرفته در زمینه نیروگاه‌های خورشیدی سرتاسر دنیا شرح داده شده است.

یانگ و همکاران در سال ۲۰۰۱ [۱۵] به بررسی عملکرد یک مجموعه هیبرید متشکل از ۳ سیکل پرداختند؛ سیکل‌های انتخاب شده از انواع مزرعه کلکتورها، تولید قدرت رانکین و یک سیکل جدید که ذخیره برق تولیدی اضافی را انجام می‌داد. ذخیره برق با انجام الکترولیز آب به تولید هیدروژن می‌انجامید و در نهایت، هیدروژن تولید شده را در یک مخزن ذخیره می‌کرد. در پایان روز و نیز مواقعی که میزان تابش خورشیدی افت می‌کرد، با استفاده از هیدروژن ذخیره شده، بخار با دمای بالا تولید شده و توربین حرکت می‌کرد. اک و همکاران در سال ۲۰۰۳ [۷] کاربرد و عملکرد یک نیروگاه خورشیدی را در شرایط واقعی تابش بررسی نموده اند. در مدل‌سازی، آنها لوله های جاذب را به وسیله یک کد زمانمند توسط زبان برنامه نویسی فرترن انجام داده اند. آنها روشهای مختلفی را برای کنترل عملکرد مجموعه مورد نظرشان بررسی نمودند. پرایس در سال ۲۰۰۳ [۱۰] یک نیروگاه سهموی خورشیدی را مدل کرد. هدف از این مدل‌سازی بهینه‌سازی اقتصادی و عملکردی نیروگاه و کاهش هزینه‌های تحقیق و توسعه بود که در مرکز مطالعات انرژی‌های تجدیدپذیر کلرادوی آمریکا انجام شده است. ایشان مدل‌سازی رایانه‌ای خود را معتبرسازی کرده و نیز از آن برای بهینه سازی سیستم ذخیره انرژی یک نیروگاه سهموی خطی استفاده کرده است. یبرا و همکاران در سال ۲۰۰۵ [۱۶] نیروگاه CESA I اسپانیا را به صورت دینامیکی بررسی کردند. مدل‌سازی آنها در نرم افزار (Thermo – fluid) صورت گرفت. هدف این پروژه، مدل‌سازی دینامیکی نیروگاه بمنظور طراحی سیستم کنترلی برای نیروگاه بوده است. رولیم و همکاران در

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-15 ]

سال ۲۰۰۹[۱۱] با انجام یک آنالیز تحلیلی، عملکرد نیروگاه خورشیدی موجود در صحرای موحاوه آمریکا با ظرفیت ۳۵۴ مگاوات را بررسی کردند. ایشان بر روی مدل‌هایی که انرژی حرارتی تابشی را به توان گرمایی تبدیل می‌کند، پرداخته‌اند. نتایج تحقیقات فوق الذکر میزان اهمیت و تاثیرگذاری این مدل‌ها برای اهداف مورد نظر را نشان می‌دهد.

در این تحقیق، هدف تهیه یک مدل مناسب عملکرد سیکل روغن نیروگاه خورشیدی شیراز برای اهداف پیاده سازی و کنترل دمای روغن خروجی در محیط نرم افزاری قوی و انعطاف‌پذیر مثل MATLAB می‌باشد.

در ادامه این مقاله و در بخش بعد به اهداف طراحی محیط شبیه ساز مربوطه پرداخته شده و در بخش‌های آتی، مدل‌سازی ترکیبی نیروگاه خورشیدی شیراز و نتایج مربوط به محیط شبیه ساز طراحی شده نیروگاه تشریح و در نهایت، نتیجه‌گیری آورده شده است.

## اهداف طراحی محیط شبیه ساز

نرم افزارهای مختلفی جهت بررسی و مدل‌سازی نیروگاه‌های خورشیدی طراحی گردیده است. این نرم افزارها یا در دسترس نبوده و یا قابل خریداری نمی‌باشند و یا به صورت تخصصی و موردی طراحی شده‌اند. برای مدل‌سازی نیروگاه خورشیدی شیراز، نیازمند یک مدل‌سازی کاملا" قابل‌انعطاف، براساس اجزای دستگاه‌های نصب شده در این نیروگاه می‌باشیم. جهت دست یابی به این هدف، محیط نرم افزار MATLAB انتخاب گردید که قابلیت و توانایی‌های زیادی از نظر محاسباتی دارد. با استفاده از محیط MATLAB [۱۲] نه تنها بخوبی می‌توان نیروگاه خورشیدی شیراز و دیگر فرایندهای صنعتی را مدل‌سازی کرد، بلکه این امکان وجود دارد تا از قابلیت‌های پیشرفته این نرم‌افزار بخصوص از کنترلرهای پیشرفته و ماژول‌های تعریف شده (PID,… Fuzzy, Neural Network) در این نرم افزار جهت شبیه‌سازی استفاده کرد. مدل‌سازی در محیط MATLAB به این صورت انجام گردید که قسمت‌های مختلف نیروگاه اعم از مزرعه کلکتور، لوله‌های رابط، مجموعه مبدل‌های حرارتی، مخزن و ..... به صورت عملکردهایی (Function) کد نویسی گردیدند، سپس یک عملکرد اصلی تعریف شد که هر قسمت از نیروگاه براساس دیاگرام جریان فرایند (PFD شکل(۴)) در مسیر کد اصلی قرار می‌گیرد و روابط به صورت زمانمند حل می‌گردند. این گونه کد نویسی این مزیت را دارا می‌باشد که اگر در آینده قسمت‌های دیگری به نیروگاه اضافه گردد، براحتی می‌توان آنها را به مدل اصلی در محیط MATLAB اضافه کرد.

## مدل‌سازی ترکیبی نیروگاه خورشیدی شیراز

نیروگاه خورشیدی مورد مطالعه در شیراز واقع شده و شامل یک مزرعه کلکتور است که در مرکز آینه‌ها یک لوله حاوی روغن عبور داده شده است شکل‌های ۱ و ۲. روغن داغ پس از عبور از لوله‌های رابط، وارد مبدلهای حرارتی شده و بخار مافوق داغ برای تولید انرژی الکتریکی مورد استفاده تولید می‌کند شکل ۳.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-15 ]

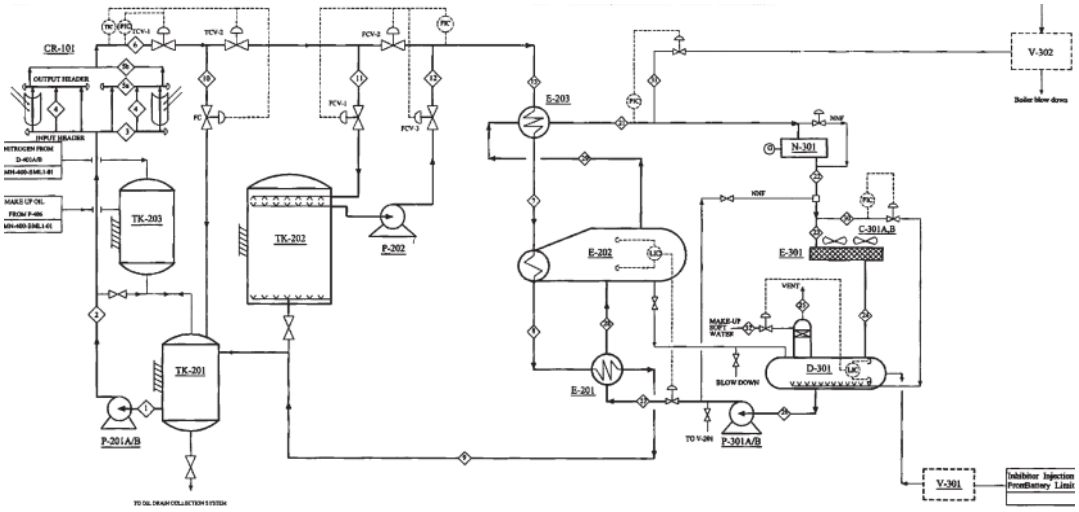
**شکل ۱: نیروگاه خورشیدی شیراز از نمای بالا [۱۳]**

**شکل ۲ : مزرعه کلکتور نیروگاه خورشیدی شیراز [۱۳]**

**شکل ۳ : نمایی از مبدلهای موجود در نیروگاه خورشیدی شیراز [۱۳]**

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-15 ]

شکل ۴ دیاگرام جریان فرایند (PFD) را برای این نیروگاه نشان می‌دهد.

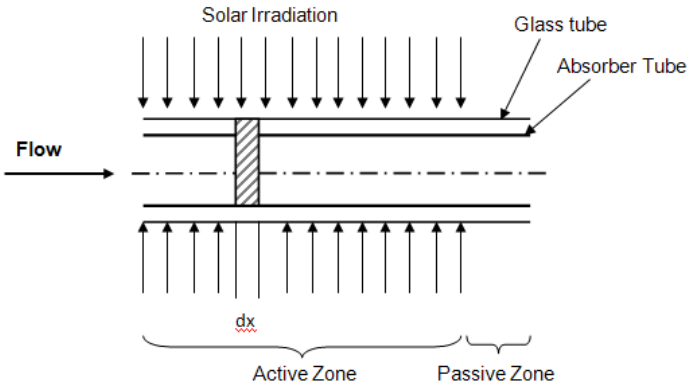



**شکل ٤ : *PFD* نیروگاه خورشیدی شیراز**

این نیروگاه از دو سیکل روغن و بخار تشکیل شده است. سیکل روغن شامل مزرعه کلکتور بوده که از ۴۸ عدد کلکتورکه در ۸ ردیف ۶تایی چیده شده‌اند، تشکیل یافته است. بمنظور مدل‌سازی مزرعه کلکتور نیروگاه خورشیدی شیراز، از یک مدل پارامتر گسترده استفاده شده است. در این مدل، دمای روغن و دیواره‌های لوله به طور جداگانه مدل شده‌اند. مدل همچنین موقعیت خورشید، وضعیت هندسی مزرعه، عملکرد نوری کلکتور، تابش خورشید و دمای روغن در دهانه ورودی مزرعه را در نظر گرفته است.

جهت مدل‌سازی مزرعه کلکتور با در نظر گرفتن یک المان از لوله مزرعه کلکتور (شکل ۵) و به کار بردن موازنه انرژی همزمان برای دیواره لوله و روغن در طی زمان مشخص، معادلات (۱) و (۲) به دست می‌آیند[۳و۱] :

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-15 ]




**شکل ۵ : مقطعی از لوله کلکتورها**

برای روغن (fluid):

$$\rho_f C_f A_f \left\{ \frac{dT_f}{dt} + V_f \frac{dT_f}{dx} \right\} = U_c \pi d_{ri} (T_m - T_f) \quad (۱)$$

برای دیواره لوله (metal):

$$\rho_m C_m A_m \left\{ \frac{dT_m}{dt} \right\} = \eta_0 G I_b - U_L \pi d_{ro} (T_m - T_a) - U_c \pi d_{ri} (T_m - T_f) \quad (۲)$$

در روابط بالا $\rho$ چگالی، C ظرفیت حرارتی، A سطح مقطع، زیر نویس f مربوط به روغن و زیر نویس m مربوط به لوله فلزی می‌باشند. $U_C$ ضریب انتقال حرارت بین روغن و فلز و $U_L$ ضریب انتقال حرارت بین فلز و محیط است $d_{ri}$ قطر داخلی لوله و $d_{ro}$ قطر خارجی لوله و G دهانه کلکتور می‌باشند.

$\eta_\circ$ بازده نوری است که تابعی از زمان و خواص اپتیکی بوده و در رابطه (۳) بیان شده است:

$$\eta_0 = \left[ k(\theta) \right] \left[ \rho (\tau\alpha)_n \right] \gamma \quad (۳)$$

$\rho$ بازتاب‌پذیری آینه، $(\tau\alpha)_n$ فاکتور قابلیت انتقال–جذب طبیعی و $\gamma$ ضریب دریافت است و برای $k(\theta)$ که ضریب اصلاح‌گر زاویه تابش است از رابطه (۴) استفاده شد[۹]، مشخصات کلکتورهای نیروگاه خورشیدی شیراز در جدول ۱ نشان داده شده است.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-15 ]

**جدول ۱ : مشخصات کلکتورهای نیروگاه خورشیدی شیراز**

| | | | |
|---|---|---|---|
| طول | ۲۵ m | نسبت تمرکز | ۱٤ |
| عرض دهانه | ۳.٤ m | زاویه دور | ۹۰ |
| عرض معادل | ۳.۱ m | بازتاب پذیری آینه ها | ۰.۸۷۳ |
| فاصله کانونی | ۸۸ cm | ضریب عبور لوله شیشه ای | ۰.۹٦ |
| قطر خارجی لوله گیرنده | ۷ cm | ضریب جذب لوله گیرنده | ۰.۹٤ |
| قطر خارجی لوله شیشه ای | ۱۲.۵ cm | ضریب صدور لوله گیرنده | ۰.۱۵ |

$$k(\theta) = \cos(\theta) - 0.0006586291\theta - 0.0007581241\theta^2 \quad (۴)$$

$\theta$ زاویه برخورد است که توسط معادله (۵) بیان می‌گردد[۵و۱].

$$\cos(\theta) = \sqrt{\cos^2(\theta_z) + \sin^2(w) * \cos^2(\delta)} \quad (۵)$$

$\theta_Z$ زاویه Zenith و $\delta$ زاویه انحراف و $\omega$ زاویه ساعت است. زاویه Zenith توسط معادله (۶) به دست می‌آید[۵]:

$$\cos\theta_z = \sin(\delta) * \sin(\phi) + \cos(\delta) * \cos(\phi) * \cos(w) \quad (۶)$$

$\varphi$ عرض جغرافیایی مزرعه کلکتورها می‌باشد. $\delta, \omega$ به صورت معادلات زیر بیان می‌شوند[۵و۱]:

$$\delta = 23.45 \sin(360 * \frac{284 + N}{365}) \quad (۷)$$

$$w = 15(t - 12) \quad (۸)$$

این معادلات برای $1 \le N \le 365$ به کار می‌رود که N عدد روز و t زمان بر حسب ساعت است. برای مدل‌سازی تابش مستقیم خورشید، معادله (۹) توسط Daneshyar [۶] برای شهرهای ایران بیان شده است:

$$I_b = I_0 * (1 - C_{fa}) \left\{ 1 - \exp\left[ -0.075(\frac{\pi}{2} - \theta_z) \right] \right\} \quad (۹)$$

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-15 ]

برای شهر شیراز $I_0 = 960(\frac{W}{m^2})$ است و فاکتور میانگین ابر $(C_{fa})$ برای هر ماه توسط Daneshyar محاسبه شده است [۶].

در طی عبور سیال از داخل لوله‌های عایق شده و در مجاورت محیط، دمای سیال با گذر زمان کاهش و یا افزایش می‌یابد. لوله‌های اتصال دهنده در مسیرهای مختلف نیروگاه طول‌های مختلفی دارند. در این مدل‌سازی، لوله‌هایی با پوشش حرارتی بمنظور عایق سازی در نظر گرفته شده‌اند. بمنظور در نظر گرفتن افت‌های حرارتی گذرای روغن در لوله‌های اتصال دهنده، معادله بالانس انرژی گرمایی برای یک مقطع از لوله بطول $dx$ به صورت معادله (۱۰) به دست می‌آید:

$$\dot{m}_f C_f \frac{dT_f}{dx} = U * P_p (T_f - T_a) + \rho_f A_f C_f \frac{dT_f}{dt} \quad (۱۰)$$

معادله مذکور براساس روش تفاضل محدود (Finite Difference) و حل عددی صریح (Explicit Method) حل گردید. در روش صریح باید محدوده همگرایی $\frac{\alpha * \Delta x}{\Delta t^2} \leq 0.1$ [۱۴] در نظر گرفته شود. به این ترتیب، طول لوله‌ها را به تقسیمات ۱ متری و step های زمانی نیز هر ۵ دقیقه در نظر گرفته شد.

بمنظور مدل‌سازی مبدل‌های حرارتی از مدل دسته‌بندی مبدل‌های حرارتی استفاده شده است. در این روش، از دو معادله تعادل انرژی به صورت زیر استفاده شده است[۱۴]:

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (۱۱)$$

$$Q = UAF\Delta T_{LMTD} \quad (۱۲)$$

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_h - \Delta T_c}{\ln(\Delta T_h - \Delta T_c)} \quad (۱۳)$$

که در آن $\Delta T_{LMTD}$ اختلاف دمای متوسط لگاریتمی، F فاکتور تصحیح، U ضریب انتقال حرارت کلی و A سطح انتقال حرارت است.

بعضی از پارامترهای موجود در نیروگاه تحت تاثیر شرایط محیطی قرار دارند که از جمله این پارامترها می‌توان به ضریب انعکاس آینه‌ها (بازتاب‌پذیری) و نیز ضریب عبور لوله شیشه‌ای (پوشش شیشه‌ای) اشاره کرد. در صورت گرد و غبار بودن محیط اطراف (بخصوص در چند روز متوالی) و کثیف شدن لوله‌های شیشه ای و آینه‌ها، ضرایب نامبرده بشدت کاهش می‌یابند و باعث می‌شود انرژی خورشیدی دریافتی توسط سیال کاهش شدید داشته باشد. به بیان دیگر، کثیف بودن

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-15 ]

آینه‌ها و لوله‌های شیشه‌ای باعث می‌گردد که مدل‌سازی با اندازه‌گیری میدانی نیروگاه تفاوت داشته باشد. شکل ۶ لوله‌های شیشه‌ای و آینه‌های یکی از کلکتورهای مزرعه نیروگاه خورشیدی شیراز که کثیف گزارش شده را نشان می‌دهد. از این‌رو، بایستی اثر این بخش‌ها به شکل مناسبی در مدل‌سازی صورت پذیرفته لحاظ گردد.

**شکل٦ : لولهٔ شیشه‌ای و آینه‌های کثیف کلکتور نیروگاه خورشیدی شیراز**

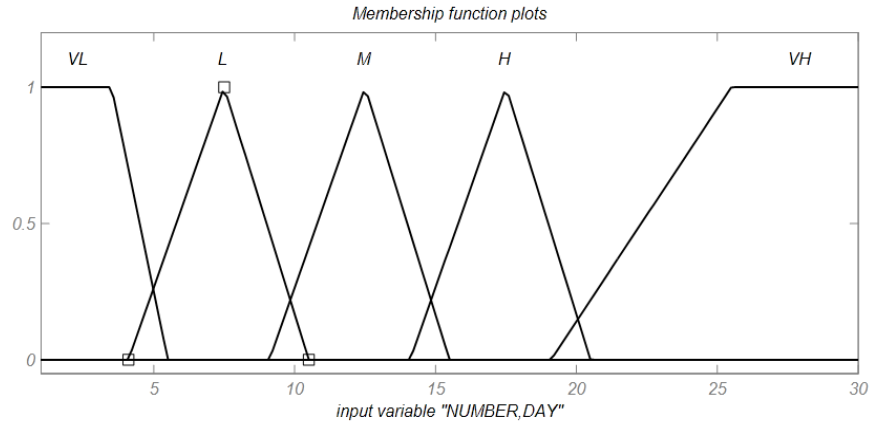
به این ترتیب، در این مقاله یک فاکتور اصلاحی (Correction Factor(CF)) به دلیل کثیفی آینه‌ها و لوله‌های شیشه‌ای مزرعه تعریف شده که میزان درصد کاهش عملکرد مزرعه را نشان می‌دهد. این پارامتر با نام CF در معادله (۱۴) وارد شده که در میزان انرژی دریافتی از خورشید تأثیر دارد.

$$\rho_m C_m A_m \left\{\frac{dT_m}{dt}\right\} = (1-CF)*\eta_0 G I_b - U_L \pi d_{ro} (T_m - T_a) - U_c \pi d_{ri} (T_m - T_f) \quad (۱۴)$$

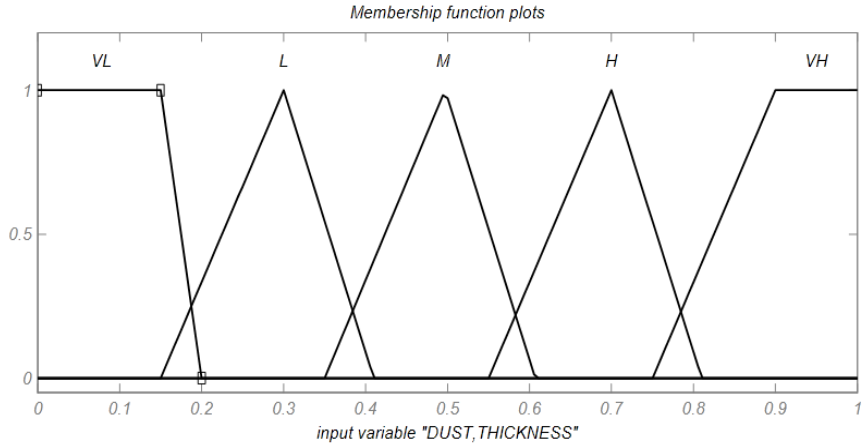
جهت محاسبه CF از یک مدل فازی استفاده می‌گردد که دو ورودی و یک خروجی برای سیستم فازی در نظر گرفته شده است. ورودی اول تعداد روزهایی است که از آخرین شستن کلکتورها (NUMBER,DAY) گذشته است و دومین ورودی نیز ضخامت گرد و غبار (DUST,THICKNESS) بوده و خروجی مورد نظر نیز مقدار CF می‌باشد. برای هر یک از ورودی‌های سیستم فازی تابع تعلق‌های Very Low(VL), Low (L), Medium(M), High(H), Very High(VH) درنظر گرفته

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-15 ]

شده و برای خروجی CF نیز توابع تعلق به صورت Small(S), Almost Small(AS), Medium(M), Large(L), Very Large(VL) می‌باشد. در شکل‌های ۷ و ۸ و ۹ توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی موردنظر نشان داده شده است. در این راستا از روش استنتاج فازی میدانی و استنباط max-min و نیز برای غیرفازی سازی از روش مرکز ثقل استفاده شده است. همچنین جهت شبیه سازی این مدل، اطلاعات اندازه‌گیری و گزارش‌های ثبت شده نیروگاه، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. روزهایی که اقدام به تمیز کردن کلکتورها و لوله‌های شیشه‌ای مزرعه می‌شود، در گزارش‌ها ثبت می‌گردد و یکی از سنسورهای نیروگاه، میزان ضخامت گرد و غباری نشسته بر روی کلکتورها را اندازه می‌گیرد [۴و۸].

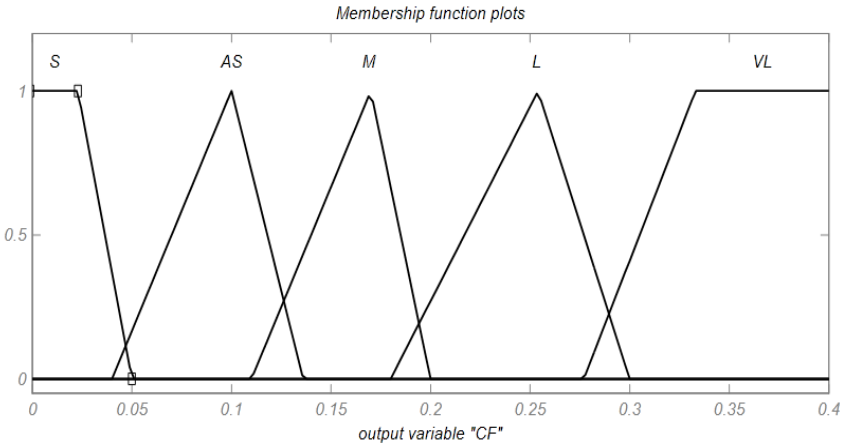



**شکل ۷ : توابع عضویت ورودی تعداد روزهای گذشته از شستن کلکتورها**




**شکل ۸ : توابع عضویت ورودی ضخامت گرد و غبار**

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-15 ]




**شکل ۹ : توابع عضویت خروجی *CF***

در جدول ۲ نحوه اجرای قوانین پایگاه قواعد فازی بیان گردیده است.

**جدول ۲ : قوانین پایگاه قواعد فازی جهت مدل‌سازی ضریب CF در نیروگاه خورشیدی شیراز**

| DUST,THICKNESS / NUMBER,DAY | VL | L | M | H | VH |
|---|---|---|---|---|---|
| VL | S | S | AS | M | L |
| L | S | AS | M | L | L |
| M | AS | M | M | L | VL |
| H | AS | M | L | L | VL |
| VH | M | M | L | VL | VL |

## نتایج

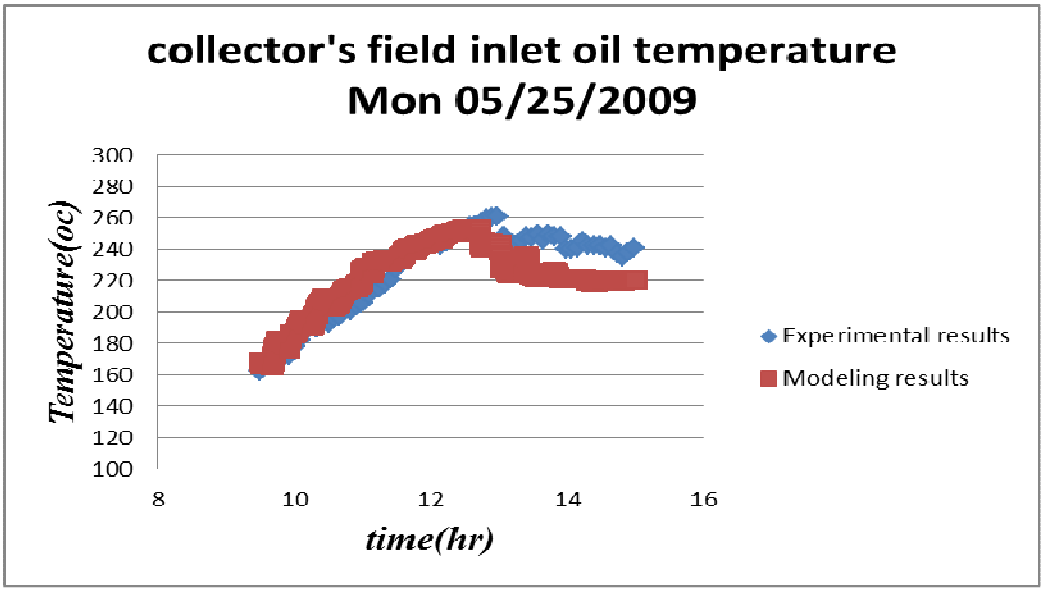
پس از اینکه سیکل روغن نیروگاه در محیط MATLAB مدل‌سازی گردید، نیازمند اعتبارسنجی مدل مربوطه هستیم. در ادامه، به منظور اعتبارسنجی، نتایج مدل‌سازی با اندازه گیری میدانی مقایسه گردیده است.

در ادامه، نتایج اعتبارسنجی برای روز ۴ خرداد ۸۸ (۲۰۰۹/۰۵/۲۵) آورده شده است.

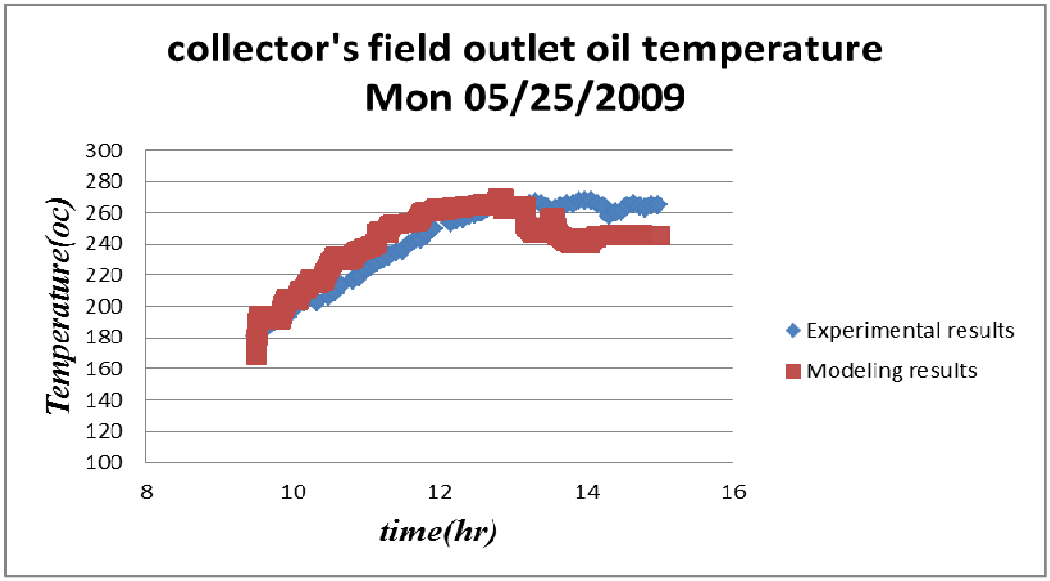
جهت ارزیابی، اطلاعات مربوط به تابش، دبی اندازه‌گیری شده، تعداد روزهای گذشته از شستشوی کلکتورها و میزان گرد و غبار آینه‌ها به مدل وارد گردید و دمای ورودی و خروجی مزرعه کلکتور (شکل‌های۱۰و۱۱) بدست آمده از مدل با اطلاعات واقعی مورد مقایسه قرار گرفتند.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-15 ]

در جدول ۳ شرایط آزمایش برای تاریخ ۸۸/۰۳/۰۴ نشان داده شده است.




**شکل ۱۰ : مقایسه دمای روغن ورودی به مزرعه، بین محیط MATLAB (مدل‌سازی) با داده‌های واقعی نیروگاه جهت ارزیابی مدل‌سازی**




**شکل ۱۱ : مقایسه دمای روغن خروجی از مزرعه، بین محیط MATLAB (مدل‌سازی) با داده‌های واقعی نیروگاه جهت ارزیابی مدل‌سازی**

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-15 ]

**جدول ۳ : شرایط آزمایش برای تاریخ ۸۸/۳/٤ (اطلاعات ثبت شده در نیروگاه خورشیدی شیراز)**

| عنوان | مقدار |
|---|---|
| ساعت شروع ردیابی | ۹:۳۰ |
| ساعت پایان ردیابی | ۱۵ |
| دمای روغن در آغاز ردیابی | ۱۶۸ درجه سانتیگراد |
| دبی روغن در آغاز ردیابی | ۱۰ کیلوگرم بر ثانیه |
| تعداد حلقه های در حال ردیابی | ۷ حلقه از ۸ حلقه |
| تعداد کلکتورهای در حال ردیابی | ۴۰ |
| وضعیت هوا در روز آزمایش | صاف با کمی ابر پراکنده |

جهت ارزیابی آماری مدل‌سازی صورت گرفته از شاخص‌های آماری RMSE و RMSE نرمال شده (معادله‌های ۱۵و۱۶) استفاده شده است:

$$RMSE = \left( \sum_{i=1}^{n} (P_i - O_i)^2 / n \right)^{0.5} \quad (۱۵)$$

$$RMSE_Normalised = 100 \left( \sum_{i=1}^{n} (P_i - O_i)^2 / n \right)^{0.5} / \overline{O} \quad (۱۶)$$

در روابط بالا Pi: مقدار شبیه سازی شده مدل، Oi: مقدار اندازه‌گیری شده واقعی، n: تعداد اندازه‌گیری واقعی، $\overline{O}$: میانگین مقدار اندازه‌گیری شده واقعی، RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا و RMSE_Normalised: ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده می‌باشند.

مقدار ریشه میانگین مربعات خطا و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده در حالت مطلوب یا حالتی که مقادیر شبیه سازی شده و اندازه‌گیری شده مساوی باشد، برابر با صفر می‌باشد. جهت ارزیابی آماری روزهای مختلفی از عملکرد نیروگاه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت که در جدول ۴ مقایسه نتایج آماری بر روی ۲ پارامتر دمای روغن خروجی از مزرعه کلکتور و دمای روغن ورودی به آن نشان داده شده است. از مشاهده مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده که حدود ۵ درصد می‌باشد، می توان نتیجه گرفت که مقادیر شبیه سازی(مدل‌سازی) پارامترهای مربوطه در سطح اطمینان ۹۵ درصد می باشند. به بیان دیگر، اختلاف معنی داری با مقادیر اندازه‌گیری شده وجود ندارد.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-15 ]

**جدول ٤: مقایسه نتایج آماری بر روی ۲ پارامتر دمای خروجی از مزرعه کلکتور و دمای ورودی به آن**

| | RMSE | RMSE Normalised(%) |
|---|---|---|
| دمای ورودی به مزرعه کلکتور | ۱۰.۷٦٥۹ | ٥.۱۲ |
| دمای خروجی از مزرعه کلکتور | ۱۱.٤۱٥۳ | ٥.٤٤ |

همانطور که از مقایسه شکل‌های ۱۰و۱۱ و نتایج جدول ۴ مشاهده می‌شود، مدل مربوطه با داده‌های واقعی تطابق خوبی داشته و از قابلیت اطمینان کافی برخوردار می‌باشد.

## نتیجه گیری

در این مقاله، چگونگی طراحی و توسعه یک محیط شبیه ساز برای نیروگاه خورشیدی شیراز در محیط نرم افزار MATLAB ارائه گردید. با توجه به مقایسه‌های انجام شده با داده های واقعی، محیط شبیه ساز طراحی شده از عملکرد قابل قبولی برخوردار بوده و به کمک این محیط شبیه ساز می توان درک بسیار بهتری از عملکرد واقعی نیروگاه به دست آورد. با توجه به اینکه کلیه نتایج در محیط نرم افزارهای MATLAB شبیه سازی شده اند، در آینده می‌توان مطالعات کنترلی جامعی را انجام داد و نتایج بدست آمده را بر روی فرایند واقعی نیز اجرا نمود.

## مراجع

[۱] عزیزیان کیان، ( تیرماه ۱۳۸۱) طراحی و ارزیابی بهینه کارایی سیکل روغن و بخار نیروگاه خورشیدی شیراز، پایانامه کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

[۲] لی‌وانگ، مترجمان: تشنه‌لب، محمد. صفارپور، نیما. افیونی، داریوش. (۱۳۸۸)، سیستم‌های فازی و کنترل فازی، تهران:انتشارات دانشگاه خواجه نصیرالدین توسی.

[۳] نوری محمد، یعقوبی محمود، (مردادماه ۱۳۷۹) تحلیل و ارزیابی غیر پایدار نیروگاه خورشیدی ۲۵۰ کیلووات شیراز، نشریه انرژی ایران، سال چهارم، شماره ۸،

[۴] نیکنیا، ایمان،(شهریور۱۳۹۰)، مطالعه تجربی و مدلسازی حرارتی ناپایدار نیروگاه هیبرید خورشیدی شیراز برای توسعه ظرفیت آن تا

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-15 ]

۵۰۰KW، پایان نامه کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

[۵] Duffie,J.A. Beckman ,W A. (۱۹۹۱)'Solar engineering of thermal processes John Wiley & Sons,

[۶] Daneshyar, M. (۱۹۷۸), 'Solar radiation statistics for Iran' Solar Energy ۲۱ , pp ۳۴۵-۳۴۹.

[۷] Eck, M., Zarza, E., Eickhoff, M., Rheinlander, J., Valenzuela, L.(۲۰۰۳)."Applied research concerning the direct steam generation in parabolic troughs." Solar Energy vol.۷۴,No.۳۴۱-۳۵۱

[۸] M. Yaghoubi, I. Niknia, P. Kanan,A.R. Mahmoodpur (۲۰۱۱) "Experimental Study Of Dust Deposition Effect On The Performances Of Parabolic Trough Solar Collector" Proc. Int. Conf. The Solarpaces ۲۰۱۱, Garanda, Spain

[۹] Mokhtari A, .YAghoubi M, .Kanan P, .Vadiee A, .Hessami R (۲۰۰۷) ,Thermal And Optical Study Of Parabolic Trough Collectors Of Shiraz Power Plant, Third International Conference On Thermal Engineering :Theory And Applications, Amman , Jordan.

[۱۰] Price,H.(۲۰۰۳). "A Parabolic Trough Solar power plant Simulation Model." In: International Solar energy conference, Hawaii Island,Hawaii.

[۱۱] Rolim, M.M. Fraidenraich,N., Tiba, C.(۲۰۰۹)."Analytic modeling of a solar power plant with parabolic linear collectors."Solar Energy. Vol ۸۳, No.۱۲۶-۱۳۳.

[۱۲] www.mathworks.com

[۱۳] www.Mehrniro.com

[۱۴] Yaghoubi, M., Azizian, K.,Shirazy, S., Kanan, P.(۲۰۰۴). "Shiraz solar power plant simulation with variable heat exchanger performance".In: ESDA ۲۰۰۴: Proceeding of vth Biennial conference on Engineering System Design and Analysis;۱۹-۲۲; Manchester,United kingdom.ASME,۲۰۰۴.P ۱۶۹-۷۸. DOI:۱۰.۱۱۱۵/esda۲۰۰۴-۵۵۳۷

[۱۵] Yang, W.,Kuo,C.,Aydin,O.(۲۰۰۱)."A hybrid power generation system:solar-driven Rankine engine, hydrogen storage." International Journal of energy Research,Vol.۲۵, No. ۱۱۰۷-۱۱۲۵.

[۱۶] Yebra,L.J., Berenguel, M., Dormido, S., Romero, M.(۲۰۰۵)."Modelling and Simulation of Central Receiver Solar Thermal Power Plants." In: ۴۴th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference Seville, Spain.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-15 ]