

## مدل سازی نیروگاه دودکش خورشیدی و مقایسه کارایی آن در شهرهای مختلف ایران

عباس پوررضاییان<sup>۱</sup>، حجت مهدی یار<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی شیمی دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز

apoorrezaeiyan@yahoo.com

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز

mahdiyar@shirazu.ac.ir

**چکیده:** نیروگاه دودکش خورشیدی که از فناوری ساده‌ای برای تولید برق استفاده می‌کند، از سه قسمت اصلی کلکتور، برج و توربین تشکیل شده است. این نیروگاه با بهره‌مندی از خاصیت دودکشی، انرژی خورشیدی را به انرژی جنبشی هوا و سپس، در قسمت توربین متصل به ژنراتور، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. با آنکه این نوع نیروگاه هزینه اولیه هنگفتی دارد، دارای مزایای ویژه‌ای از قبیل استهلاک کم و عدم نیاز به آب است. به همین دلیل مطالعات زیادی در راستای شبیه‌سازی و طراحی آن انجام شده است. یکی از موضوعات مهم در این حوزه، که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته، بهینه‌یابی مکان احداث نیروگاه است. به این منظور یک شبیه‌ساز که به صورت یک پارچه و در حالت ناپایا نیروگاه را مدل و شبیه‌سازی می‌کند، تهیه شده است. برای اعتبارسنجی مدل، نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی نیروگاه مانزانارس اسپانیا مقایسه شد و تفاوت ناچیز بین نتایج، دقت مدل را تأیید نمود. سپس به منظور بهینه‌یابی محل احداث نیروگاه در ایران، نیروگاهی با ابعاد و مشخصات نیروگاه اسپانیا در پنج شهر مختلف ایران (شیراز، بوشهر، کرمان، تهران و مشهد) در طول سال مدل گردید. نتایج نشان‌دهنده آن است که از میان پنج شهر منتخب، احداث این نیروگاه در شیراز بیشترین راندمان را در پی خواهد داشت.

**واژه‌های کلیدی:** نیروگاه دودکش خورشیدی، توان خروجی، بهینه‌یابی، انرژی خورشیدی، مکان‌یابی، انرژی‌های تجدیدپذیر.

شعاعی توسعه‌یافته بین دو دیسک موازی در نظر گرفتند. در این مطالعه، روابط تحلیلی مورد نیاز جهت برآورد ضرایب انتقال حرارت و افت فشار حاصل از اصطکاک ارائه شد [۶]. گنون و ون بکستروم عملکرد توربین استفاده‌شده در نیروگاه دودکش خورشیدی را مورد مطالعه قرار دادند [۷].

برای پیش‌بینی عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی، بسیاری از محققان از دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> استفاده کرده‌اند. برای نمونه، پاستور و همکاران با استفاده از همین وسیله یک مدل عددی دو بُعدی جهت برآورد توزیع دمای هوای درون کلکتور نیروگاه ارائه دادند [۸]. در ادامه، زو و همکاران عملکرد توربین را شبیه‌سازی کردند [۹].

عملکرد تحلیلی نیروگاه دودکش خورشیدی در نقاط مختلف جهان از قبیل ایران، چین، مصر و الجزایر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی در ناحیه جنوب غربی الجزایر توسط لاری و همکاران مورد تحلیل قرار گرفت [۱۰]. در این تحلیل، از مدل ریاضی توسعه داده شده (معادلات موازنه انرژی و حرکت در کلکتور و دودکش) توسط اشلاش و همکاران استفاده گردید.

گوو و همکاران مدل نظری جامعی با در نظر گرفتن تغییرات ساعتی تابش خورشیدی توسعه دادند و تأثیر پارامترهای هندسی مختلف نیروگاه را بر روی توان خروجی، مورد بررسی قرار دادند [۱۱]. نیزتیک و همکاران امکان‌پذیری اجرایی کردن نیروگاه‌های دودکش خورشیدی در نواحی مدیترانه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند [۱۲].

همدان و اصنقی عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی و کمیت تولید انرژی الکتریکی را به ترتیب در مناطق خلیج فارس و ایران بررسی کردند [۱۳ و ۱۴]. اصنقی و همکاران با ارائه مدل ریاضی پایا برای پیش‌بینی توان الکتریکی دودکش خورشیدی، تأثیر عوامل مختلفی از قبیل شدت تابش خورشید، دمای محیط و ابعاد نیروگاه را بر روی توان تولیدی در شهرهای مختلف ایران بررسی کردند [۱۶]. اما در اکثر مطالعات انجام‌شده، پدیده‌های انتقال در نیروگاه در حالت پایا مدل شده است [۱۵-۱۸]. این در حالی است که اغماض از تجمع، به‌خصوص تجمع حرارت در لایه‌های سطحی زمین و دیواره دودکش می‌تواند خطای قابل ملاحظه‌ای در نتایج شبیه‌سازی ایجاد کند [۱۵].

در این مطالعه، مدل‌سازی همه قسمت‌های نیروگاه به‌صورت یک‌پارچه و در شرایط ناپایا انجام شده است. استفاده از مدل ناپایا

امروزه اهمیت استفاده از انرژی‌های پاک و جایگزینی آن با سوخت‌های فسیلی به‌عنوان راهکار اساسی برای حفظ محیط زیست بر کسی پوشیده نیست. همچنین مزایای استفاده از انرژی خورشیدی به‌عنوان یک منبع انرژی پاک به‌خصوص در ایران واضح و روشن است. یک فناوری ساده که از انرژی خورشیدی برای تولید برق استفاده می‌کند، نیروگاه دودکش خورشیدی است. این نوع نیروگاه علاوه بر استفاده از تکنولوژی ساده، دارای مزایای خاصی از قبیل عدم نیاز به آب و امکان تولید برق در طول شبانه‌روز است.

شکل (۱) به‌صورت طرح‌واره، یک نیروگاه دودکش خورشیدی را نشان می‌دهد. این نیروگاه شامل یک کلکتور شفاف و یک دودکش استوانه‌ای در مرکز آن است. همچنین یک یا چند توربین نیز در نزدیک پایه دودکش نصب شده که به یک ژنراتور متصل است. نحوه عملکرد این نیروگاه بدین گونه است که تابش خورشید بعد از عبور از سقف کلکتور (که جداری شفاف مانند دلق یا شیشه است) عمدتاً جذب سطح زمین می‌شود. این امر منجر به گرمایش سطح زمین و به تبع آن هوای مجاور زمین می‌گردد. دمای بیشتر هوای درون ستون دودکش نسبت به هوای بیرون باعث ایجاد تأثیر دودکشی شده که منجر به مکش هوای محیط به درون کلکتور و سپس دودکش می‌گردد. هوای جریان یافته به داخل دودکش، توربین یا توربین‌ها را به حرکت درآورده و باعث تولید برق می‌شود.

شروع عمده‌ترین مطالعات انجام‌شده در این باره برمی‌گردد به سال ۱۹۳۱ که مبانی اساسی و توصیف نیروگاه دودکش خورشیدی توسط گونتر گزارش شد [۱]. نمونه اولیه نیروگاه دودکش خورشیدی با توان خروجی ۵۰ کیلووات توسط هاف در سال ۱۹۸۳ در فاصله ۱۵۰ کیلومتری جنوب مادرید، مانرانارس، اسپانیا طراحی شد [۲ و ۳]. هاف و همکاران بحث مختصری از موازنه انرژی، قواعد طراحی، توان تولیدی و آنالیز هزینه‌های نیروگاه ارائه کردند [۲]. در مطالعه بعدی، هاف نتایج اولیه آزمایش نیروگاه ساخته‌شده در اسپانیا را گزارش داد [۳]. مالت در سال ۱۹۸۷، تحلیلی برای تعیین بازده کل نیروگاه ارائه داد. او دریافت که با وجود اینکه یک دودکش خورشیدی بازده کمی دارد، ساخت یک نیروگاه در مقیاس بزرگ تنها گزینه اقتصادی قابل دوام است [۴]. پاسومارتی و شریف، مدلی تقریبی برای بررسی اثرات پارامترهای مختلف روی توزیع دما و سرعت جریان هوا از طریق سیستم ارائه کردند [۵].

کروگر و بایز برای به‌دست‌آوردن ضریب انتقال حرارت کلکتور نیروگاه دودکش خورشیدی، جریان هوا درون کلکتور را جریان

### ۱.۲. کلکتور

معادلات حاکم در کلکتور با فرض اینکه جریان شعاعی و کاملاً توسعه یافته باشد عبارت اند از:

معادله پیوستگی:

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho u) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن،  $\rho$  و  $u$  به ترتیب چگالی و سرعت جریان هوای درون کلکتور،  $r$  شعاع کلکتور و  $t$  زمان است.

معادله حرکت:

این معادله از موازنهٔ ممتوم حاصل می‌شود:

$$-\frac{\partial P}{\partial r} - \rho u \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{\tau_r}{H_r} - \frac{\tau_g}{H_r} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

در اینجا  $P$  و  $H_r$  به ترتیب نشانه فشار هوای درون کلکتور و ارتفاع پوشش کلکتور از سطح زمین است. همچنین  $\tau_r$  و  $\tau_g$ ، به ترتیب تنش برشی در سقف کلکتور و سطح زمین هستند.

با اغماض از زبری سقف کلکتور، در جریان آشفته کاملاً توسعه یافته، مقدار  $\tau_r$  را می‌توان از رابطهٔ زیر به دست آورد:

$$\tau_r = 0.023 \frac{\rho u^2}{\text{Re}^{0.2}} \quad (3)$$

که عدد رینولدز به شکل زیر تعریف و محاسبه می‌شود:

$$\text{Re} = \frac{\rho u d_h}{\mu} \quad (4)$$

$\mu$  ویسکوزیتهٔ دینامیکی و  $d_h$  قطر هیدرولیکی است. این کمیت برای جریان بین صفحات موازی دو برابر فاصلهٔ بین صفحات است. تنش برشی ناشی از جریان شعاعی روی سطح زمین را می‌توان توسط رابطهٔ کروگر و بایز محاسبه کرد [۶].

$$\tau_g = \frac{1}{2} f \rho u^2 \quad (5)$$

که  $f$  ضریب اصطکاک بوده و به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$f = 0.02975 \left( \frac{\varepsilon_g}{d_h} \right)^{0.254} \left[ 1.75 \left( \frac{\mu}{\rho u \varepsilon_g} \right)^{0.51} + 1 \right] \quad (6)$$

در اینجا  $\varepsilon_g$  زبری زمین است. از ترکیب دو معادلهٔ فوق می‌توان گفت:

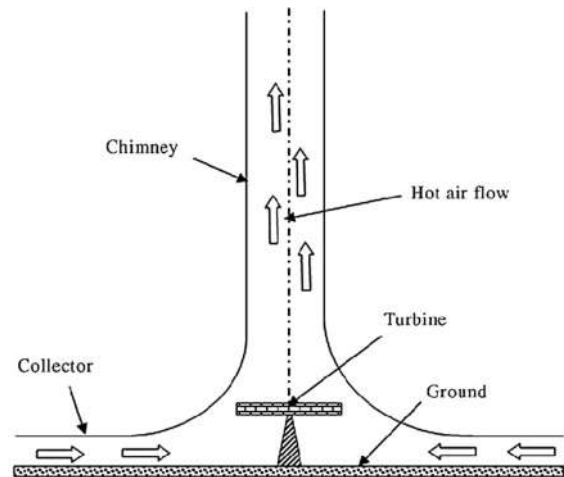
$$\tau_g = 0.014875 \rho u_r^2 \left( \frac{\varepsilon_g}{2H_r} \right)^{0.254} \left[ 1.75 \left( \frac{\mu}{\rho u_r \varepsilon_g} \right)^{0.51} + 1 \right] \quad (7)$$

معادلهٔ انرژی هوای درون کلکتور:

موازنهٔ انرژی بر روی یک المان سیال که از پایین با زمین و از بالا با کلکتور در تماس است، به شکل رابطهٔ (۸) نوشته می‌شود.

این امکان را فراهم می‌سازد که در کنار لحاظ نمودن تغییرات دمای محیط و میزان تابش خورشید در طول شبانه‌روز، ذخیرهٔ حرارت در محیط‌های مختلف نیروگاه از جمله در لایه‌های سطحی زمین و دیوارهٔ دودکش در محاسبات وارد شود. علاوه بر این، تابش لحظه‌ای خورشید برای شهرهای ایران با استفاده از معادلات دانشیار، که بر اساس شرایط اقلیمی ایران توسعه یافته است، محاسبه می‌شود. ضمن آنکه اطلاعات مربوط به دمای محیط در طول شبانه‌روز از داده‌های هواشناسی استخراج و مورد استفاده قرار گرفته است.

بعد از تأیید صحت مدل ارائه شده از طریق مقایسهٔ نتایج آن با داده‌های تجربی موجود، شبیه‌سازی نیروگاهی با ابعاد و هم‌جنس نیروگاه احداث شده در مانزانارس اسپانیا (ظرفیت ۵۰ کیلووات)، در ۵ شهر مختلف ایران (شیراز، بوشهر، کرمان، تهران و مشهد) انجام شده و توان متوسط سالیانهٔ آن محاسبه شده است. نتایج مدل‌سازی ضمن آنکه تأکید بر بالاتر بودن راندمان این نیروگاه در ایران نسبت به اسپانیا دارد، بیانگر تفاوت قابل ملاحظهٔ عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی در شهرهای مختلف ایران است. بر این اساس، احداث نیروگاه در شیراز، در میان پنج شهر منتخب، بیشترین راندمان را خواهد داشت.



شکل (۱): طرح‌وارهٔ یک نیروگاه دودکش خورشیدی [۱۶]

### ۲. معادلات حاکم

در این قسمت، معادلات حاکم بر پدیده‌های انتقال در قسمت‌های مختلف نیروگاه که شامل کلکتور، توربین و برج دودکش است، ارائه می‌شود. به منظور دقت بیشتر محاسبات، در مدل‌سازی تمامی قسمت‌های کلکتور و دودکش، عبارت تجمع<sup>۱</sup> برای معادلات پیوستگی، حرکت و انرژی در نظر گرفته شده است.

جذب مؤثر پراکنده و  $T_a$  دمای هوای محیط است. همچنین  $C_{pr}$  و  $\delta_r$  به ترتیب چگالی، ظرفیت حرارتی ویژه و ضخامت پوشش کلکتور هستند. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین سطح پوشش کلکتور و هوای بیرون ( $h_{ra}$ ) که متأثر از وزش باد بر روی سطح مسطح است، به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$h_{ra} = 2.8 + 3u_w \quad (13)$$

در اینجا  $u_w$  سرعت باد محیط است. همچنین  $h_{rs}$  و  $h_{gr}$  که به ترتیب ضریب انتقال حرارت تشعشعی بین دو سطح زمین و پوشش و همچنین ضریب انتقال حرارت تشعشعی بین زمین و آسمان هستند، از روابط زیر قابل محاسبه است [۱۹]:

$$h_{gr} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{1}{\varepsilon_r} - 1} (T_g^2 + T_r^2)(T_g + T_r) \quad (14)$$

$$h_{rs} = \sigma \varepsilon_r (T_s^2 + T_r^2)(T_s + T_r) \quad (15)$$

که  $\sigma$ ،  $\varepsilon_g$  و  $\varepsilon_r$  به ترتیب ثابت استفان بولتزمن، ضریب نشر زمین و ضریب نشر پوشش کلکتور و  $T_s$  دمای آسمان است که مقدار آن، برحسب کلونین، از رابطه زیر برآورد می‌شود [۲۰]:

$$T_s = 0.0552 T_a^{1.5} \quad (16)$$

#### معادله انرژی زمین:

در این قسمت می‌توان زمین را به‌عنوان یک جسم نیمه بی‌نهایت در نظر گرفت. از این رو معادله دمای زمین به صورت زیر است:

$$\frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} = \frac{\rho_g c_{pg}}{k_g} \frac{\partial T_g}{\partial t} \quad (17)$$

که  $\rho_g$ ،  $c_{pg}$  و  $k_g$  به ترتیب چگالی، ظرفیت حرارتی ویژه و ضریب هدایت حرارتی زمین هستند.

شرط مرزی اول این معادله با استفاده از موازنه انرژی در سطح زمین به شکل زیر به دست می‌آید:

$$I_b(\tau_r \alpha_g)_b + I_d(\tau_r \alpha_g)_d = h_{gr}(T_g - T_r) + h_{gf}(T_g - T_f) - k_g \frac{\partial T_g}{\partial z}$$

با توجه به بی‌نهایت بودن شعاع زمین و ضریب هدایت حرارتی کم آن شرط مرزی دوم به صورت زیر است.

$$z \rightarrow \infty: \quad \frac{\partial T_g}{\partial z} = 0$$

$$-\rho C_p H_r u_r \frac{\partial T_f}{\partial r} + h_{gf}(T_g - T_f) + h_{rf}(T_r - T_f) = \rho C_p H_r \frac{\partial T_f}{\partial t} \quad (8)$$

در این معادله،  $C_p$  ظرفیت حرارتی ویژه و  $T_g$ ،  $T_f$  و  $T_r$  به ترتیب دمای سطح زمین، دمای جریان هوای درون کلکتور و دمای سقف پوشش کلکتور هستند.

به دلیل سرعت کم هوا، مکانیزم جابه‌جایی ترکیبی از جابه‌جایی آزاد و اجباری است. در این حالت، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین جریان هوا و زمین ( $h_{gf}$ ) را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد [۸]:

$$h_{gf} = \left( \left( Nu_{force} \frac{k_f}{2H_r} \right)^4 + \left( Nu_{free} \frac{k_f}{H_r} \right)^4 \right)^{1/4} \quad (9)$$

که  $k_f$  ضریب هدایت حرارتی هوای درون کلکتور است. همچنین اعداد بدون بعد ناسلت<sup>۱</sup> بر اساس روابط زیر به دست می‌آیند:

$$Nu_{free} = 0.15 (Gr Pr)^{1/3} \quad (10)$$

$$Gr = \frac{g \beta (T_{g,l} - T_f) H^3}{\nu^2}$$

$$Nu_{force} = 0.024 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (11)$$

$$Re = \frac{2uH_r}{\nu}$$

که  $Gr$  و  $Pr$  به ترتیب اعداد بدون بُعد گراشف<sup>۲</sup> و پراندتل<sup>۳</sup>،  $g$  شتاب جاذبه زمین،  $\beta$  ضریب انبساط‌پذیری حجمی،  $\nu$  ویسکوزیته سیناماتیکی و  $T_{g,l}$  دمای سطح زمین است.

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین جریان هوای درون و پوشش کلکتور ( $h_{rf}$ ) نیز مشابه با روش محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین جریان هوا و زمین به دست می‌آید. البته با این تفاوت که در رابطه گراشف، باید دمای سطح کلکتور به جای دمای سطح زمین قرار گیرد.

#### معادله انرژی سقف کلکتور:

موازنه انرژی بر روی سقف کلکتور عبارت است از:

$$I_b \alpha_b + I_d \alpha_d + h_{gr}(T_g - T_r) - h_{ra}(T_r - T_a) - h_{rf}(T_r - T_f) + h_{rs}(T_r - T_s) = \rho_r C_{pr} \delta_r \frac{\partial T_r}{\partial t} \quad (12)$$

در این معادله،  $I_b$  و  $I_d$  به ترتیب شدت تابش خورشیدی مستقیم و شدت تابش خورشیدی پراکنده بوده که توسط معادلات دانشیار محاسبه می‌شوند [۱۷].  $\alpha_b$  ضریب جذب مؤثر مستقیم،  $\alpha_d$  ضریب

1. Nusselt
2. Grashof
3. Prandtl

### ۲.۲. توربین

ورودی به دودکش با دمای هوای خروجی از کلکتور به دست می‌آید. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین هوای درون برج و دیواره داخلی برج از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$h_f = \frac{Nu_f k_{air}}{d_{ch}} \quad (25)$$

$$Nu_f = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad (26)$$

$$Re = \frac{\rho u d_{ch}}{\mu} \quad (27)$$

#### معادله انرژی دیواره دودکش:

چون ضخامت دودکش در مقایسه با ارتفاع آن ناچیز است می‌توان هدایت حرارت را در راستای شعاع (یک بُعدی) و ناپایا فرض نمود.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r k_w \frac{\partial T_w}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left( \rho_w C_{p_w} T_w \right) \quad (28)$$

شرایط مرزی در سطوح داخلی و خارجی از اعمال موازنه انرژی بر آن سطوح، به شکل زیر به دست می‌آید:

سطح داخلی:

$$k_w \frac{\partial T_w}{\partial r} \Big|_{r=R_i} = h_f \left( T_w \Big|_{r=R_i} - T \right)$$

سطح خارجی:

$$q_T - k_w \frac{\partial T_w}{\partial r} \Big|_{r=R_{out}} + h_a (T_a - T_w \Big|_{r=R_{out}}) = 0$$

در این رابطه،  $q_T$  مجموع تابش مستقیم و نفوذی خورشید هستند که جذب سطح خارجی دودکش می‌شوند. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین هوای محیط و دیواره خارجی برج نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۹]:

$$h_a = 11.4 + 1.4 u_{wind} \quad (29)$$

### ۴.۲. روش انجام محاسبات

برای شبیه‌سازی عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی لازم است همه معادلات حاکم به صورت یکپارچه حل گردد. در شبیه‌سازی تهیه‌شده، این معادلات با بهره‌گیری از روش عددی تفاضل محدود حل می‌شوند.

محاسبات شبیه‌سازی در دو حلقه سعی و خطا انجام می‌شود. در حلقه بیرونی، مقادیر دمای اولیه سیال و اجزای نیروگاه (از قبیل هوای درون کلکتور و دودکش، لایه‌های سطحی زمین، سطح پوشش و دمای دیواره دودکش) در زمان صفر حدس زده می‌شود. همه این دماها بایستی برابر با مقادیر محاسباتی برای دما در انتهای شبانه‌روز (ساعت ۲۴) باشند.

افت فشار توربین با استفاده از قانون توان بتز<sup>۱</sup> قابل محاسبه است [۸]:

$$\Delta p_t = \frac{8}{27} \rho u_t^2 \quad (18)$$

که در آن،  $u_t$  سرعت هوا در خروجی توربین است. همچنین توان خروجی نیروگاه به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۲]:

$$Power = \frac{m \eta_t \Delta p_t}{\rho} \quad (19)$$

$\eta_t$  بازده توربین، با استفاده از رقم تجربه‌شده در نیروگاه اسپانیا مقدار ۰/۸۳ در نظر گرفته شده است [۲].

### ۳.۲. دودکش

با اغماض از تغییرات سرعت هوا در راستای شعاع معادلات حاکم درون دودکش به شکل زیر نوشته می‌شود.

#### معادله پیوستگی:

$$-\frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (20)$$

#### معادله حرکت:

$$-\frac{\partial P}{\partial z} - \rho u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} - \frac{2\tau_{ch}}{R_{ch}} - \rho g = \rho \frac{\partial u_z}{\partial t} \quad (21)$$

تنش برشی روی دیواره دودکش از رابطه زیر قابل محاسبه است [۲۱]:

$$\tau_{ch} = \frac{1}{8} f \rho u_z^2 \quad (22)$$

به دلیل بزرگی قطر دودکش تأثیر زبری سطح آن قابل صرف‌نظر بوده و ضریب اصطکاک دیواره دودکش ( $f$ ) از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۲]:

$$f = (1.82 \log Re - 1.64)^{-2} \quad (23)$$

#### معادله انرژی هوای درون دودکش:

با اغماض از تغییرات دمای هوا در راستای شعاع و علاوه بر آن صرف‌نظر کردن از هدایت حرارتی در مقایسه با جابه‌جایی، معادله توزیع دمای هوای درون دودکش به شرح زیر نوشته می‌شود.

$$-\rho u_z C_p \frac{\partial T_z}{\partial z} - \frac{2h_f}{R_{ch}} (T_z - T_{wi}) = \rho C_p \frac{\partial T_z}{\partial t} \quad (24)$$

شرط مرزی مورد نیاز این قسمت از مساوی قرار دادن دمای

### ۳. نتایج و بحث

به منظور اعتبارسنجی مدل تهیه شده و روش عددی حل معادلات نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی نیروگاه دودکش خورشیدی مانزانارس اسپانیا مقایسه می‌شود. این نیروگاه از یک کلکتور به قطر ۲۲۴ متر و برجی به قطر ۱۰ متر و ارتفاع ۲۰۰ متر ساخته شده است. همچنین ارتفاع متوسط کلکتور از سطح زمین ۱/۸۵ متر در نظر گرفته شده است. سایر ابعاد و خواص ترموفیزیکی قسمت‌های مختلف نیروگاه در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): خواص ترموفیزیکی و ابعاد نیروگاه

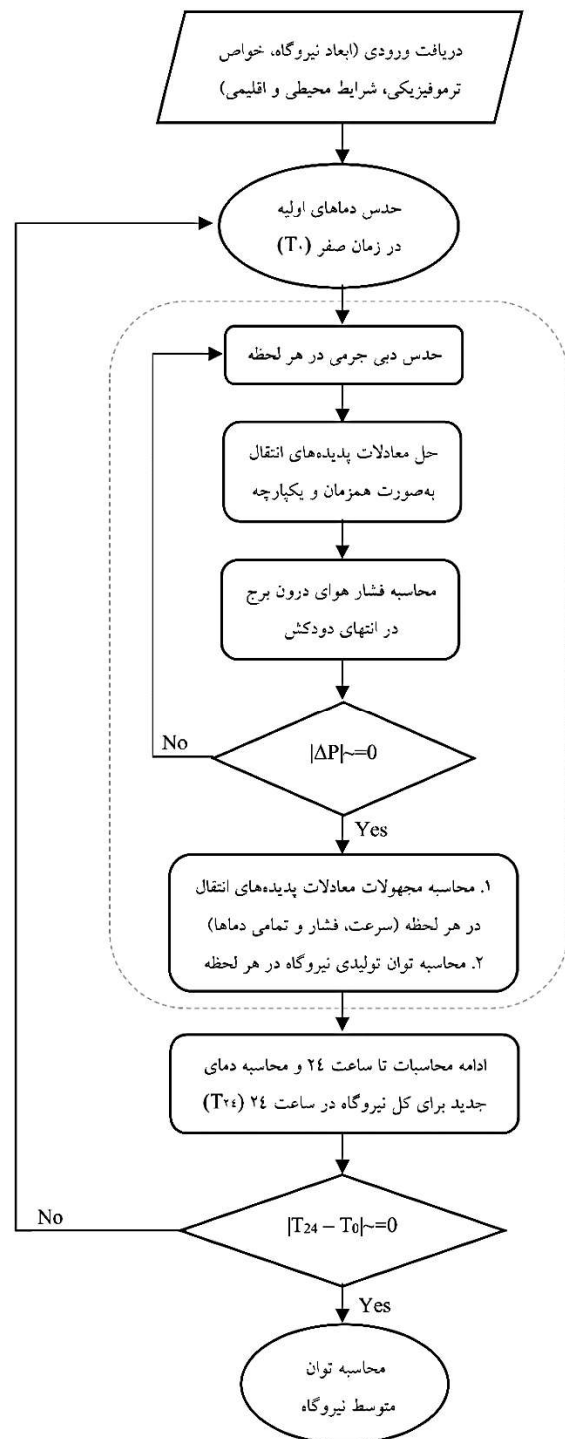
سقف کلکتور (شیشه)	
ضریب نشر شیشه	۰/۸۷
زبری شیشه	۰ متر
ضخامت شیشه	۰/۰۰۴ متر
شعاع بیرونی	۱۱۲ متر
شعاع داخلی	۱۲ متر
ارتفاع متوسط از سطح زمین	۱/۸۵ متر
زمین (خاک)	
ضریب نشر	۰/۹
ضریب جذب	۰/۹۱
چگالی	۱۹۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب
ظرفیت حرارتی ویژه	۸۴۰ ژول بر کیلوگرم درجه سانتی‌گراد
زبری	۰/۰۵ متر
توربین	
بازده	۰/۸۳
دودکش (سیمان)	
ارتفاع	۲۰۰ متر
قطر داخلی	۱۰ متر
ضخامت	۰/۱ متر
زبری داخل سطح	۰/۰۰۲ متر
ضریب نشر	۰/۸۴ متر

شکل (۳) توان خروجی نیروگاه شهر مانزانارس را که با شبیه‌سازی برآورده شده است با داده‌های تجربی مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی تطابق بسیار خوبی با داده‌های تجربی دارد که مؤید دقت انجام محاسبات است.

شکل (۴) تغییرات دمای محیط و تابش خورشیدی شهرهای شیراز و مانزانارس را نشان می‌دهد. مقایسه توان خروجی نیروگاه شهر شیراز نسبت به پایلوت اسپانیا در شکل (۵) نشان داده شده است. جدول (۲) متوسط توان و انرژی روزانه تولیدی در روز ۲ سپتامبر مربوط به دو نیروگاه را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، این نیروگاه در

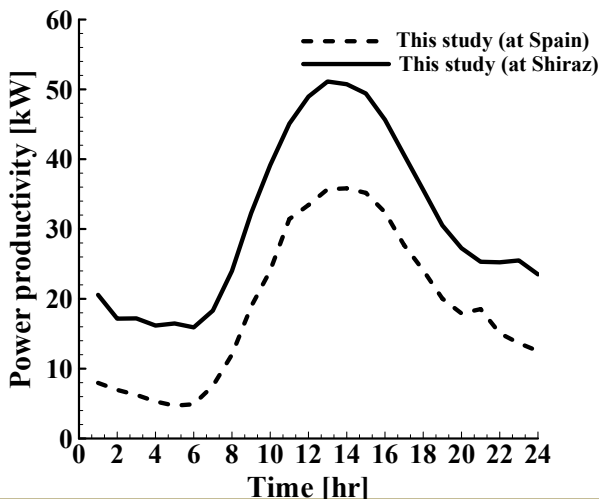
در حلقه داخلی در هر مرحله زمانی، دبی جرمی هوا درون نیروگاه حدس زده می‌شود. شرط صحیح بودن این حدس برابر بودن مقدار محاسبه شده برای فشار هوای رسیده به انتهای دودکش با فشار هوای بیرون در آن ارتفاع است.

شکل (۲) طرح‌واره انجام محاسبات در شبیه‌سازی تهیه شده را نشان می‌دهد.



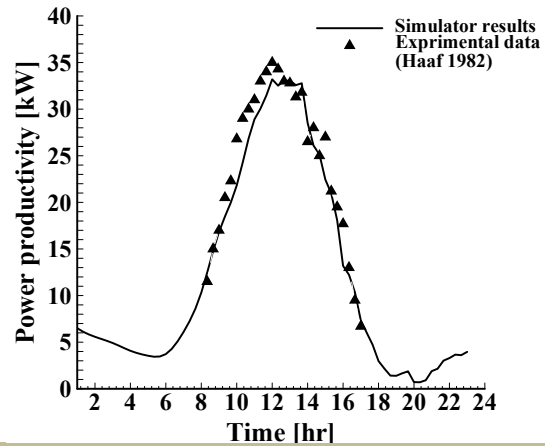
شکل (۲): طرح‌واره انجام محاسبات

شیراز تقریباً ۹۲٪ توان تولیدی بیشتری نسبت به پایلوت اسپانیا دارد. این موضوع، اهمیت بررسی و امکان ساخت چنین نیروگاه‌هایی در ایران به خصوص شهر شیراز را بیان می‌کند.



شکل (۵): مقایسه توان تولیدی شهرهای شیراز و مازانارس اسپانیا در طول روز ۲ سپتامبر

در این تحقیق، برای بررسی تأثیر موقعیت جغرافیایی و عوامل محیطی بر عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی و بهینه‌یابی مکان ساخت آن در ایران، ۵ شهر ایران (شیراز، بوشهر، کرمان، تهران و مشهد) که وضعیت اقلیمی و محیطی متفاوتی دارند و از مقدار تابش خورشیدی بالایی نیز برخوردارند، انتخاب شده‌اند. شرایط اقلیمی و جوی شهرهای منتخب در جدول (۳) ذکر شده است.



شکل (۳): محاسبه توان خروجی نیروگاه مازانارس اسپانیا و مقایسه آن با داده‌های تجربی

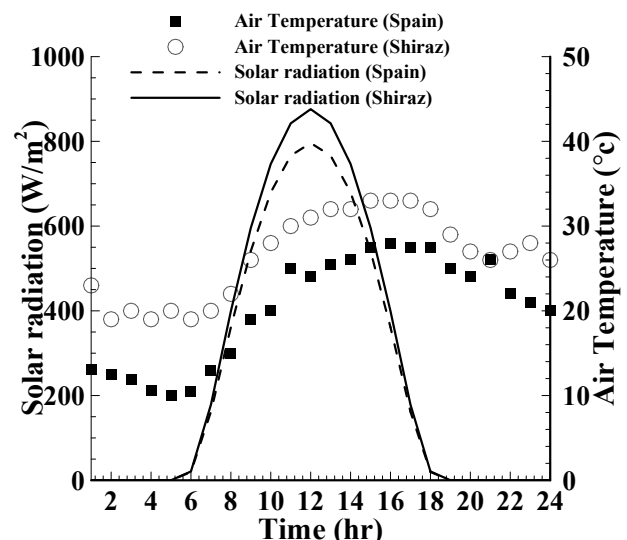
جدول (۲): مقایسه توان تولیدی و انرژی تولیدی در روز ۲ سپتامبر

انرژی تولیدی در طول شبانه‌روز MJ	توان متوسط تولیدی در یک روز (kW)	
۲۶۷۱/۴۹	۳۰/۹۲	شیراز
۱۳۹۰/۱۸	۱۶/۰۹	اسپانیا

جدول (۳): وضعیت جوی و اقلیمی شهرهای انتخاب شده [۱۷]

شهر	عرض جغرافیایی	متوسط رطوبت نسبی سالیانه (%)	متوسط سالیانه اختلاف دمای شبانه‌روز	تابش خورشیدی سالیانه (MJ/m <sup>2</sup> )
شیراز	۲۹/۵۳	۲۸/۴	۱۴/۵۸	۷۶۷۵/۵۱
بوشهر	۲۸/۲۹	۶۲/۷	۸/۴۹	۷۳۳۷/۱۸
کرمان	۳۰/۲۵	۱۲/۵	۱۸/۵۵	۷۰۷۱/۱۹
تهران	۳۵/۶۸	۲۳/۴	۸/۵۴	۶۶۷۸/۴۸
مشهد	۳۶/۲۶	۲۴/۳	۱۱/۰۲	۶۵۷۱/۶۶

شکل (۶) انرژی خورشیدی تاییده‌شده بر واحد سطح افق در روز میانه ماه را در ۵ شهر منتخب، برآورده شده با استفاده از معادلات دانشیار نشان می‌دهد [۱۷]. همان‌طور که دیده می‌شود، شیراز بیشترین (۷۶۷۵/۵۱ MJ/m<sup>2</sup>/year) و مشهد کمترین تابش خورشیدی (۶۵۷۱/۶۶ MJ/m<sup>2</sup>/year) را دارند. همچنین دمای ماهیانه متوسط در ۵ شهر منتخب در شکل (۷) نشان داده شده است.

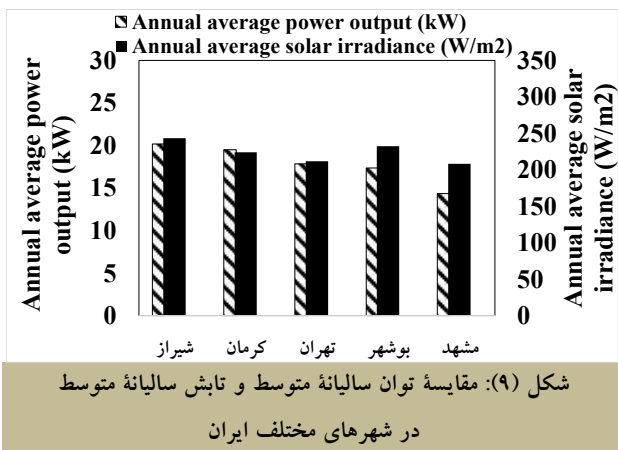


شکل (۴): مقایسه دمای محیط و تابش خورشیدی بین شهرهای شیراز و مازانارس اسپانیا در روز ۲ سپتامبر

شکل (۸) توان تولیدی متوسط ماهیانه نیروگاه مدل شده را در ۵ شهر ایران (شیراز، بوشهر، کرمان، تهران و مشهد) نشان می دهد. همان طور که دیده می شود، در میان این ۵ شهر منتخب، احداث نیروگاه در شیراز بیشترین راندمان را داشته و نسبت به مشهد، تهران، کرمان و بوشهر به ترتیب ۴۰٪، ۱۳٪، ۳٪ و ۱۶٪ توان تولید بیشتری دارد.

مقایسه توان سالیانه متوسط و تابش سالیانه متوسط برای ۵ شهر ایران (شیراز، بوشهر، کرمان، تهران و مشهد) در شکل (۹) نشان داده شده است. همان طور که از این نمودار دیده می شود، به جز در مورد بوشهر، توان خروجی متوسط با تابش متوسط خورشیدی رابطه مستقیم دارد.

دلیل اینکه بوشهر به رغم تابش قوی تر دارای راندمانی کمتر از شیراز می باشد، رطوبت هوا و علاوه بر آن، دامنه تغییرات دما در طول شبانه روز است.



#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله، معادلات حاکم شبیه ساز دودکش خورشیدی ارائه و نشان داده شد که شبیه ساز خانگی تهیه شده دارای دقت مطلوبی است.

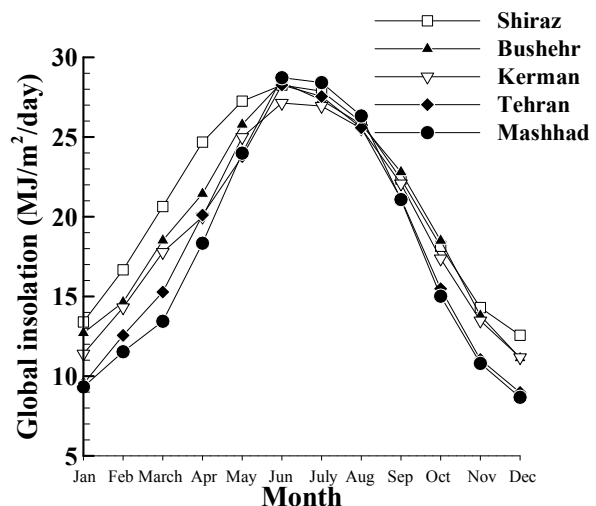
با استفاده از شبیه ساز یک نیروگاه خورشیدی در ابعاد نیروگاه اسپانیا، برای ۵ شهر مختلف ایران (شیراز، بوشهر، کرمان، تهران و مشهد) مدل و نتایج زیر مشاهده شد.

۱. در صورت احداث این نیروگاه در شیراز، انرژی تولیدی در ماه سپتامبر ۹۲٪ بیشتر از مقدار مشابه در اسپانیاست.

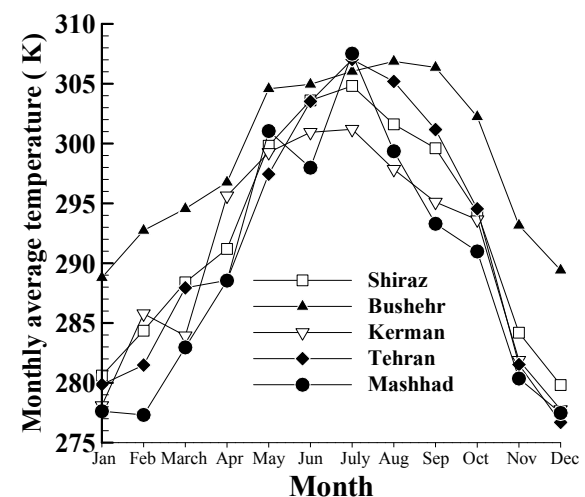
۲. از میان ۵ شهر انتخاب شده، شیراز دارای بیشترین راندمان بوده و توان نیروگاه در شیراز ۱۴٪ بیش از متوسط توان آن در چهار شهر (بوشهر، کرمان، تهران و مشهد) برآورد می گردد.

۳. از میان ۵ شهر مورد بررسی، بعد از شیراز، اولویت احداث نیروگاه به ترتیب در شهرهای کرمان، تهران، بوشهر و مشهد است.

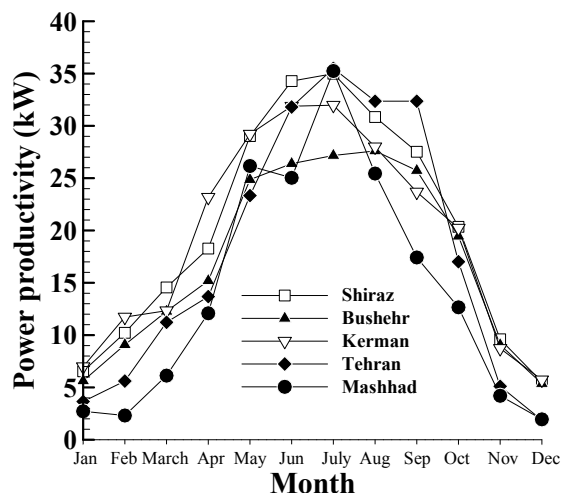
۴. دلیل کمتر بودن راندمان نیروگاه در شهر ساحلی بوشهر، میزان



شکل (۶): متوسط ماهانه تابش کل خورشیدی در یک روز در ماه های مختلف سال میلادی در شهرهای منتخب



شکل (۷): تغییرات دمای متوسط ماهیانه در ماه های مختلف سال برای شهرهای منتخب ایران



شکل (۸): تغییرات متوسط ماهیانه توان تولیدی نیروگاه در ماه های مختلف سال میلادی برای شهرهای منتخب



رطوبت بالای هوای این شهر و علاوه بر آن کمتر بودن دامنه تغییرات روزانه دمای این شهر به نظر می‌رسد.

### ضمایم

#### فهرست علائم

$\sigma$	ثابت استفان بولتزمن	$P$	فشار
$\eta$	بازده	$T$	دما
$r$	شعاع نقطه مورد نظر	$u$	سرعت
$\Delta$	اختلاف بین دو متغیر	$t$	زمان
$I$	شدت تابش خورشیدی	$h$	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی
<b>فهرست زیرنویس‌ها</b>		$H$	ارتفاع
$r$	سقف کلکتور	$q$	شار انتقال حرارت
$g$	زمین	$g$	شتاب جاذبه زمین
$f$	جریان هوای درون کلکتور	$d$	قطر
$a$	محیط	$R$	شعاع
$s$	آسمان	$m$	دبی جرمی
$cond$	هدایت حرارتی	$k$	ضریب هدایت حرارتی
$b$	مستقیم	$Re$	عدد بدون بعد رینولدز
$d$	پراکنده	$Pr$	عدد بدون بعد پرانتل
$h$	افق و هیدرولیکی	$f$	ضریب اصطکاک
$ch$	دودکش	$\rho$	چگالی
$w$	دیواره	$C_p$	ظرفیت حرارتی ویژه
$dyn$	دینامیک	$\mu$	ویسکوزیته دینامیکی
$trans$	عبور	$\tau$	تنش برشی و ضریب عبور
$coll$	کلکتور	$\varepsilon$	زبری و ضریب نشر
$t$	توربین	$\delta$	ضخامت
$m$	میانگین	$\alpha$	ضریب نفوذ حرارتی و ضریب جذب مؤثر
$z$	راستای دودکش	$\xi$	ضریب افت
$wi$	دیواره داخلی دودکش		
$air$	هوای درون برج		
$T$	شیب		
$wind$	باد		

### مراجع

- [1] Günther, H., *In Hundred Years-Future Energy Supply of the World*, Stuttgart: Kosmos, Franckh'sche Verlagshandlung, 1931.
- [2] Haaf, W. and et al., "Solar Chimneys Part I: Principle and Construction of the Pilot plant in Manzanares", *International Journal of Solar Energy*, Vol. 2, No. 1, pp. 3-20, 1983.
- [3] Haaf, W., "Solar Chimneys: Part II: Preliminary Test Results from the Manzanares Pilot Plant", *International Journal of Sustainable Energy*, Vol. 2, No. 2, pp. 141-161, 1984.
- [4] Mullett, L., "The Solar Chimney—Overall Efficiency, Design and Performance", *International Journal of Ambient Energy*, Vol. 8, No. 1, pp. 35-40, 1987.
- [5] Pasumarthi, N. and Sherif, S., "Experimental and Theoretical Performance of a Demonstration Solar Chimney Model—Part I: Mathematical Model Development", *International Journal of Energy Research*, Vol. 22, No. 3, pp. 277-278, 1998.
- [6] Kröger, D. and Buys, J., "Radial Flow Boundary Layer Development Analysis", *South African Institution of Mechanical Engineering, R & D Journal*, Vol. 15, pp. 95-102, 1999.
- [7] Gannon, A.J. and T.W. von Backström, "Solar Chimney Turbine Performance", *Journal of Solar*

- Energy Engineering, Vol. 125, No. 1, pp. 101-106, 2003.
- [8] Pastohr, H., Kornadt, O. and Gürlebeck, K., "Numerical and Analytical Calculations of the Temperature and Flow Field in the Upwind Power Plant", International Journal of Energy Research, Vol. 28, No. 6, pp. 495-510, 2004.
- [9] Xu, G. and et al., "Numerical Analysis on the Performance of Solar Chimney Power Plant System", Energy Conversion and Management, Vol. 52, No. 2, pp. 876-883, 2011.
- [10] Larbi, S., Bouhdjar, A. and Chergui, T., "Performance Analysis of a Solar Chimney Power Plant in the Southwestern Region of Algeria", Renewable and Sustainable energy reviews, Vol. 14, No. 1, pp. 470-477, 2010.
- [11] Guo, P.h., Li, J.y. and Wang, Y., "Annual Performance Analysis of the Solar Chimney Power Plant in Sinkiang, China", Energy conversion and management, Vol. 87, pp. 392-399, 2014.
- [12] Nizetic, S., Ninic, N. and Klarin, B., "Analysis and Feasibility of Implementing Solar Chimney Power Plants in the Mediterranean region", Energy, Vol. 33, No. 11, pp. 1680-1690, 2008.
- [13] Hamdan, M.O., "Analysis of a Solar Chimney Power Plant in the Arabian Gulf region", Renewable Energy, Vol. 36, No. 10, pp. 2593-2598, 2011.
- [14] Asnaghi, A. and et al., "Solar Chimney Power Plant Performance Analysis in the Central Regions of Iran", Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 135, No. 1, pp. 011011-7, 2013.
- [15] Abdelmohimen, M.A. and Algarni, S.A., "Numerical Investigation of Solar Chimney Power Plants Performance for Saudi Arabia Weather Conditions", Sustainable Cities and Society, Vol. 38, pp. 1-8, 2018.
- [16] Asnaghi, A. and Ladjevardi, S., "Solar Chimney Power Plant Performance in Iran", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, No. 5, pp. 3383-3390, 2012.
- [17] Daneshyar, M., "Solar Radiation Statistics for Iran", Solar Energy, Vol. 21, No. 4, pp. 345-349, 1978.
- [18] Watmuff, J., Charters, W. and Proctor, D., "Solar and Wind Induced External Coefficients-Solar Collectors", Cooperation Mediterranee pour l'Energie Solaire, Vol. 1, pp. 56, 1977.
- [19] Holman, J., *Heat Transfer, Eighth SI Metric Edition*. McGraw-Hill Inc, 2001.
- [20] Swinbank, W.C., "Long-wave Radiation from Clear Skies", Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 89, No. 381, pp. 339-348, 1963.
- [21] White, F.M., *Fluid Mechanics*, Google Scholar, pp. 367-375, 1979.
- [22] Haaland, S.E., "Simple and Explicit Formulas for the Friction Factor in Turbulent Pipe Flow", Journal of Fluids Engineering, Vol. 105, No. 1, pp. 89-90, 1983.