



## شبیه‌سازی عددی جوشش در سیستم تولید مستقیم بخار در یک کلکتور خورشیدی سه‌موی با بهره‌گیری از مدل دوفازی همگن

روح‌اله مانی<sup>۱</sup>، رامین مهدی‌پور<sup>۲\*</sup>، ناصر حاضری محمل<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

۳- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج

\* تفرش، ۷۹۶۱۱-۳۹۵۱۸، mehdi@tafreshu.ac.ir

### چکیده

نقطه‌ی عطف در نیروگاه‌های خورشیدی از نوع سه‌موی خطی، استفاده از سیستم‌های تولید مستقیم بخار می‌باشد. در این نوع سیستم‌ها به‌علت وجود سیال آب به‌عنوان سیال انتقال حرارت، شاهد افزایش دمای کاری می‌باشیم. در نیروگاه با تکنولوژی تولید مستقیم بخار (DSG)، انرژی خورشید مستقیماً به لوله که سیال آب در آن جریان دارد، برخورد می‌کند. عدم کنترل جریان سیال در بخش جوشش منجر به رسیدن شار حرارتی سیال به شار حرارتی بحرانی می‌شود. نکته مهم طراحی در این نوع نیروگاه‌ها، نقطه بحرانی (یا شار حرارتی بحرانی) می‌باشد که موجب وقوع مشکلات عدیده‌ای از جمله تنش‌های حرارتی در جاذب‌های خورشیدی می‌شود. بنابراین بررسی فرآیند جوشش در جاذب این نیروگاه‌ها دارای اهمیت فراوانی می‌باشد. در این تحقیق برای شبیه‌سازی عددی جوشش، مدل دوفازی همگن معرفی شده است. در مرحله اول یک مدل اپتیکی برای بازتابنده مدل‌سازی شده است. در مرحله‌ی بعد معادلات انتقال حرارت برای جذب‌کننده‌ی تابش به‌دست آمده و انتقال حرارت داخل لوله شبیه‌سازی شده است و در نهایت تغییرات دمای دیواره و آب در امتداد لوله مورد بررسی قرار گرفته است. برای تعیین مکان و مقدار شار بحرانی از روش LUT بهره گرفته شده است. در مدل‌سازی انجام‌شده‌ی کیفیت بخار، دمای دیواره و سیال و نقطه شار حرارتی بحرانی برای مقادیر مختلف فشار و دبی جرمی به‌دست آمده است و راندمان سیستم تعیین شده است. در ادامه عملکرد سیستم برای تابش‌های مختلف (که معادل شرایط اقلیمی متفاوت می‌باشد) مورد بررسی قرار گرفته است.

کلیدواژه‌گان: کلکتور خورشیدی سه‌موی، تولید بخار مستقیم، شار حرارتی بحرانی، انتقال حرارت.

## Numerical simulation of boiling in a direct steam generation system in a parabolic solar collector using a homogeneous two-phase model

Ruhollah Mani<sup>1</sup>, Ramin Mehdipour<sup>2\*</sup>, Naser Hazeri-Mahmel<sup>3</sup>

1- Tafresh University, Department of Mechanical Engineering, Tafresh, Iran

2- Tafresh University, Department of Mechanical Engineering, Tafresh, Iran

\* P.O.B. 3951879611 Markazi, Iran, mehdi@tafreshu.ac.ir

3- M.S.c of Mechanical Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

Received: 31 January 2019 Accepted: 13 May 2019

### Abstract

A milestone in linear parabolic solar power plants is the use of direct steam production systems. In these systems, due to the presence of water as a heat transfer fluid, we witness an increase in the working temperature. In a direct-production steam generator (DSG), the Sun's energy hits the tube where the water flows. Failure to control the flow of fluid in the boiling section leads to the arrival of the thermal flux of the fluid to the critical heat flux. The important point in designing these types of power plants is the critical point (with critical heat flux), which causes many problems, including thermal stresses in solar absorber. Therefore, the study of the boiling process in the absorber of these power plants is important. In this research, a homogeneous two-phase model is introduced for numerical simulation. In the first stage, an optical model for the reflector is simulated. In the next step, the heat transfer equations are simulated for radiation absorbent and heat transfer inside the pipe. Finally, the changes in the tube's wall and water temperature are investigated. The LUT method has been used to determine the location and amount of critical heat flux. In modeling, steam quality, wall



temperature and fluid temperature and critical thermal flux point are obtained for different values of pressure and mass flow and the system efficiency is determined. The system's continuous function for different radiations (which is equivalent to different climatic conditions) has been examined.

**Keywords:** solar parabolic trough collectors, direct steam generation, critical heat flux, heat transfer.



۱- مقدمه

پیش‌بینی کند. مدل المان محدود گسسته‌شده در حقیقت یک مدل اطلاعات پراکنده می‌باشد و از ضریب انتقال حرارت محلی استفاده می‌کند و ضریب مربوط به جریان دوفازی درون لوله را ثابت در نظر می‌گیرد.

جریان دوفاز در یک کلکتور DSG، دارای الگوهای مختلف جریان مانند لایه‌ای، موجی، حبابی، لخته‌ای، کف‌آلود، حلقوی و قطره‌ای است [۹]. پیش‌بینی چگونگی توزیع جریان مایع و گاز اهمیت به‌سزایی دارد؛ زیرا توزیع بر میزان انتقال حرارت، تغییرات دما، سرعت جرم و ثبات سیستم تأثیر می‌گذارد. استفان و گرین [۱۰] نشان داده‌اند که در طیف گسترده‌ای از شرایط شار جرم، حداکثر ضریب انتقال حرارت در جریان دوفاز در کیفیت بخار ۰/۸ رخ می‌دهد. بنابراین، افزایش عملکرد مطلوب برای حالت ورودی و خروجی جمع‌کننده، نزدیک به شرایط اشباع ایجاد می‌گردد. السفی [۱۱] یک نقشه کلی را پیشنهاد کرد که از مطالعه‌ی وتجان و همکاران [۱۲] اقتباس شده بود. این نقشه مختصات راحت‌تر (شار جرم نسبت به کیفیت را فراهم می‌کند) و انتقال بهتر بین رژیم‌های جریان را پیش‌بینی می‌کند. اثرات تابش مستقیم پرتو، ورودی فشار و دمای ورودی در الگوهای جریان در این مطالعه نشان داده شده است.

از سویی دیگر، یک استراتژی عملیاتی عمومی برای در نظر گرفتن هر دو جنبه عملکرد و ایمنی در یک حلقه DSG توسط سان و همکاران [۱۳] پیشنهاد شده است. براساس یافته‌های این پژوهش، لازم است که سیستم DSG برای رسیدن به یک عملکرد مناسب با کیفیت بالا (در محدوده ۰/۷ - ۰/۸) و در پرتوی تشعشع مستقیم بالا (۴۰۰ الی ۱۰۰۰ وات بر متر مربع) کار کند. آنها مشاهده نمودند که در کیفیت پایین (بین ۰/۲ تا ۰/۴) و در پرتوی تشعشع مستقیم پایین (۲۰۰ الی ۴۰۰ وات بر متر مربع)، الگوی جریان لایه‌ای ایجاد می‌شود.

الگوی جریان بر گرادیان درجه حرارت محیط اطراف لوله‌ی جاذب نیز تأثیر می‌گذارد. در نتیجه کاهش گرادیان درجه حرارت، تنش‌های حرارتی را در عناصر جمع‌آوری حرارتی (HCE) کاهش می‌دهد. به همین علت بهتر است که از کلکتورهای سهموی خطی در منطقه‌ی حلقوی استفاده شود، چون گرادیان حدود ۳ کلوین است اما می‌تواند تا ۵۰ کلوین در جریان حلقوی برسد [۱۴]. هی‌دمان و همکاران [۱۵] به این نتیجه رسیدند که در نتیجه جریان‌های لایه‌ای در کسره‌های حجمی بالا (نسبت حجمی بخار به آب) با استفاده از روش حل عددی حجم محدود دوبعدی، یک دمای پیک حاصل می‌شود. در این پژوهش، مشاهده گردید که دمای پیک با استفاده از مواد موجود در لوله جاذب که دارای هدایت گرمایی بالا هستند، کاهش می‌یابند. به این ترتیب، گسترش حرارتی نامتقارن لوله جاذب می‌تواند پس از آن به حداقل برسد.

تبخیر آب در لوله جاذب شامل مدل‌سازی جریان دوفازی است که نیاز به فرآیندهای پیچیده‌تر از جریان تک‌فاز دارد. در مطالعه اوده و همکاران [۱۶]، تغییر ضریب انتقال حرارت با دمای حجمی، کارایی مقادیر مختلف فاز در برابر سطح تابش، افت حرارتی کلکتور، تغییر راندمان کلکتور با سطح تابش و دمای ورودی، توزیع دما در طول لوله جذبی، تغییر راندمان جمع‌کننده با سطح تابش و دمای اشباع آب و راندمان کلکتور برای تغییر اندازه جذب‌شده مورد بررسی قرار گرفت. زوارسکی و همکاران [۱۷] یک مدل دقیق‌تر را با استفاده از نرم‌افزار

نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی متمرکز یکی از گزینه‌های تجدیدپذیر و سالم برای تولید برق محسوب می‌شوند. یکی از سیستم‌ها برای مهار انرژی خورشید، استفاده از کلکتورهای سهموی خطی (PTC) می‌باشد که به دلیل مزیت‌های اقتصادی و دست‌آوردهای فنی، مورد توجه محققین می‌باشد. بیشتر نیروگاه‌های PTC در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد با استفاده از روغن داغ، به‌عنوان سیال انتقال حرارت (HTF) مستقر می‌شوند [۱].

بیشتر مطالعات منتشرشده در مورد کلکتورهای سهموی خطی مربوط به کلکتورهای شرکت Lutz است که در سیستم‌های تولید انرژی الکتریکی (SEGS) در جنوب کالیفرنیا مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. سیستم SEGS دارای یک طراحی کامل می‌باشد؛ اما دارای ضعف‌هایی نیز به دلیل کاربرد روغن داغ به‌عنوان سیال هست. به‌کار بردن روغن به‌عنوان سیال کاری باعث می‌شود که نیاز به یک مبدل حرارتی برای تولید بخار آب به منظور راه‌اندازی توربین‌ها وجود داشته باشد. همچنین، مبدل‌های حرارتی روغنی که در این سیستم استفاده می‌شوند نیاز به تعویض دوره‌ای روغن دارند تا روغنی که به دلیل تغییرات دمایی کارایی خود را از دست داده عوض شود که این خود باعث افزایش هزینه‌های عملیاتی سیستم خواهد شد [۳].

مشکلات متوالی کاربرد روغن باعث شده است تا کمپانی Lutz که این سیستم را طراحی کرده است به فکر ساختن نیروگاه تولید بخار مستقیم بیفتد [۴]. فرآیند تولید بخار مستقیم (DSG)، فرآیندی است که در آن بخار به‌صورت مستقیم از آب به‌دست می‌آید و نیاز به سیال واسطه برای انتقال حرارت ندارد. از بین رفتن خطر آتش‌سوزی و آلودگی ناشی از روغن حرارتی، عدم نیاز به کنترل حد بالایی دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد روغن که باعث تجزیه روغن داغ می‌شود و از بین بردن هزینه‌های تعویض روغن و کاهش نیاز به یخ‌زدایی، از جمله مزایای سیستم DSG در مقایسه با SEGS می‌باشد [۵]. تا به امروز، سه حالت برای عملیات سیستم‌های DSG معرفی شده است. اولین حالت، حالت گردشی آب می‌باشد. در حالت گردشی، آب در یک قسمت مخصوص گرم و بخار می‌شود، سپس بخار در قسمت دیگری به حالت فوق گرم در می‌آید. حالت حرکت یکباره آب دومین حالت این سیستم است. در این حالت فرآیندهای گرم‌سازی مقدماتی، تبخیر و فوق گرم‌سازی مخلوط بخار/آب در یک قسمت و بدون جداسازی انجام می‌گردد. به‌عبارت دیگر تمام سیال وارد جاذب می‌شود. آخرین نوع سیستم‌های DSG، حالت اضافه کردن چند مرحله‌ای آب است. در این حالت چندین ورودی آب در طول مسیر جاذب تعبیه و آب در مقادیر کم به جاذب وارد می‌شود. این حالت نیز مانند حرکت یکباره، فرآیندهای گرم‌سازی مقدماتی، تبخیر و فوق گرم‌سازی در جاذب و بدون جداسازی انجام می‌گردد [۶-۷].

کم هزینه‌ترین سیستم DSG، استفاده از حالت حرکت یکباره آب می‌باشد؛ اما این روش دارای مشکلات عمده بوده که از مهمترین آنها به عدم اطلاع و به تبع آن، کنترل دقیق بر روی سیال و نوع دوفازی آن در درون لوله می‌باشد؛ از این‌رو برای حل این مشکل محققان به انجام تحقیقاتی برای بررسی رفتار دوگانه سیال درون لوله پرداخته‌اند. فلدهوف و همکاران [۸] برای آنالیز رفتار سیستم DSG حرکت یکباره آب، یک مدل المان محدود گسسته‌شده و یک مدل مرز متحرک ارائه نمودند. مدل مرز متحرک یک مدل توزیع پارامتری بوده که با اطلاعات پراکنده ترکیب شده است تا بتواند حالت‌های پایه‌ای سیستم را

<sup>1</sup>Direct Steam Generation  
<sup>2</sup>Heat Collector Element

<sup>3</sup>Parabolic Trough Collectors  
<sup>4</sup>Heat Transfer Fluid  
<sup>5</sup>Solar Electric Generating System



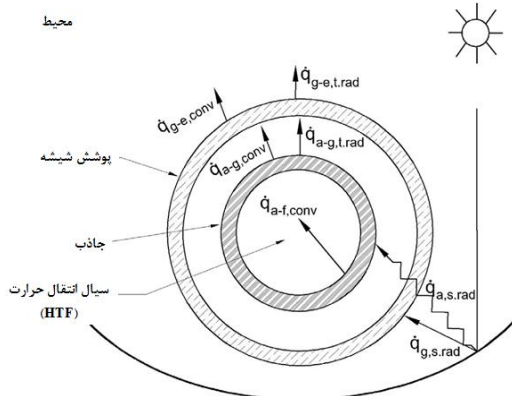
شبیه‌سازی ترمودینامیکی IPSEpro توسعه دادند و تجزیه و تحلیل میزان تلفات گرما و افت فشار را با توجه به طول جمع‌کننده مورد تحلیل قرار دادند. نولته و همکاران [۱۸] یک HCE برای DSG را از منظر قانون دوم ترمودینامیک بررسی کردند. در این مطالعه، حجم جریان جرمی، فشار عملیاتی، قطر لوله و نسبت غلظت برای کمینه شدن تولید آنتروپی بهینه شدند. هاچیچا و همکاران [۱۹] یک مدل جامع ترموهیدرولیکی را برای پیش‌بینی عملکرد سیستم DSG در شرایط عملیاتی واقعی معرفی کردند. رفتار حرارتی و هیدرولیکی بخش‌های مختلف DSG، یعنی پیش گرم شدن، تبخیر و سوپرهیت تحت شرایط عملیاتی مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این مطالعه، همچنین مقایسه‌ای بین اثر پارامترهای مختلف بر روی گرادیان حرارتی اطراف لوله جاذب را ارائه داده است. نتایج نشان می‌دهد که این مدل قادر به ارزیابی کارایی یک سیستم DSG برای شرایط مختلف و کمک به اتخاذ استراتژی‌های کنترل مناسب برای جلوگیری از ناپایداری جریان در ردیف‌های DSG می‌باشد.

## ۲- معادلات حاکم

روش مدل‌سازی کلی براساس تعادل انرژی با استفاده از عناصر جمع‌آوری حرارتی انجام می‌گیرد که عملکرد یک کلکتور DSG با استفاده از بخار آب به‌عنوان مایع انتقال حرارت را پیش‌بینی می‌کند. رویکرد مدل‌سازی عمومی براساس روش حجم محدود صورت می‌گیرد که در آن یک تعادل انرژی بر روی هر حجم کنترل HCE اعمال می‌شود.

### ۲-۱- مدل حرارتی

مقاومت گرمایی در یک سطح مقطع کلکتور خورشیدی سهموی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل ملاحظه می‌شود که در طول یک روز آفتابی، تابش خورشیدی توسط آینه‌ها منعکس شده و در HCE متمرکز شده است. مقدار کمی از این انرژی توسط جداره‌ی شیشه‌ای ( $\dot{q}_{g,s,rad}$ ) و باقی‌مانده از طریق پوشش انتخابی ( $\dot{q}_{a,s,rad}$ ) جذب می‌شود. بخشی از انرژی جذب‌شده توسط جابجایی اجباری ( $\dot{q}_{a-f,conv}$ ) به HTF منتقل می‌شوند و بخش دیگر از طریق جریان طبیعی ( $\dot{q}_{a-g,conv}$ ) و تابش حرارتی ( $\dot{q}_{a-g,t,rad}$ ) به جداره‌ی شیشه‌ای بازگردانده می‌شوند. انرژی جذب‌شده (جابجایی و تابش حرارتی) از طریق جداره‌ی شیشه‌ای عبور می‌کند و همراه با انرژی جذب‌شده توسط جداره‌ی شیشه‌ای از طریق جابجایی محیط ( $\dot{q}_{g-e,conv}$ ) و تابش حرارتی محیط ( $\dot{q}_{g-e,t,rad}$ ) از بین می‌رود.



شکل ۱ مدل حرارتی و مقاومت گرمایی برای یک برش از دریافت‌کننده‌ی کلکتور خورشیدی سهموی.

در این مدل انتقال حرارت، تعادل انرژی بر روی هر جزء HCE اعمال می‌شود. معادله انرژی در حالت انتگرالی، به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Q - W = \int \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right) (\rho \vec{v} dA) + \frac{\partial}{\partial t} \int \left( u + \frac{v^2}{2} + gz \right) (\rho dV) \quad (1)$$

فونچانگ و همکاران [۲۰] جهت بهبود انتقال حرارت و مشخصه‌های تغییرشکل گرمایی از دریافت‌کننده‌های سهموی با لوله‌های موج‌دار استفاده کرده‌اند. آنها مشاهده کرده‌اند که در صورت استفاده از این نوع لوله‌ها، ضریب انتقال حرارت مؤثر نزدیک به ۸/۴٪ افزایش پیدا می‌کند، اما کرنش گرمایی حداکثر لوله تا ۱۳/۱٪ کاهش را تجربه می‌نماید. لی و همکاران [۲۱] به بررسی مشخصه‌های جریان گذارا در فرآیندهای تولید بخار مستقیم پرداخته‌اند. در این پژوهش مشخص گردیده است که افزایش اسمی تابش نور سبب گسترش ناحیه‌ی سوپرهیت و کاهش ناحیه‌ی پیش گرم شدن می‌شود. فنگ و همکاران [۲۲] به‌منظور از بین بردن جریان دوفازی در لوله‌های کلکتور خورشیدی حاوی سیستم DSG، یک روش ارائه داده‌اند. این محققین با قرار دادن یک فلش تانک در سیستم SAPG، توانستند مشکل ناپایدار بودن جریان دوفازی در این لوله‌ها را به‌صورت مؤثر حل نمایند. لودیس و همکاران [۲۳] به بهینه‌سازی دمای محیط در نیروگاه خورشیدی DSG پرداخته‌اند. در این تحقیق برای بهینه‌سازی دما یک مدل ریاضی ارائه شده است و تغییرات کارایی انرژی گرمایی خورشیدی به‌دست آمده است.

جهت درک فیزیکی پدیده‌ی جوشش، پیشرفت‌های قابل توجهی صورت گرفته است. با مشاهده‌ی فرآیند جوشش به کمک عکس‌برداری سریع معلوم شده که جوشش در نواحی مختلف دارای رفتار جداگانه و مستقیمی باشد که تعیین انتقال حرارت آنها اساساً با هم فرق دارد. یکی از این ناحیه‌ها، جوشش فیلمی می‌باشد که در انتقال حرارت موجود در سیستم‌های تولید مستقیم بخار این ناحیه وجود دارد. نکته مهم در این ناحیه محدوده‌ای تحت عنوان شار حرارتی بحرانی (CHF) می‌باشد که موجب وقوع مشکلات عدیده‌ای از جمله تنش‌های گرمایی در جاذب‌های خورشیدی می‌شود. شار حرارتی بحرانی یک محدوده‌ی انتقال حرارت بوده که موجب افزایش ناگهانی در دمای سطح گرم‌کننده تحت شرایط کنترل‌شده‌ی شار حرارتی می‌شود، بطوری‌که این شرایط کنترل‌شده توسط کاهش ناگهانی انتقال حرارت با خشک شدن سطح صورت می‌گیرد. این محدوده، عملیات انتقال حرارت یک سیستم انتقال حرارت را محدود می‌کند و به این ترتیب افزایش شار حرارتی به‌طور مستقیم به نحوه اجرا و عملکرد سیستم وابسته است [۲۴-۲۵].

با مروری بر تحقیقات صورت گرفته مشخص می‌شود که تاکنون پدیده‌ی جوشش در سیستم‌های تولید بخار مستقیم مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا در این تحقیق از مدل دوفازی همگن برای شبیه‌سازی پدیده‌ی جوشش در

Critical Heat Flux



فصلنامه علمی - ترویجی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو-سال ششم، شماره دوم، زمستان ۱۳۹۸

$$\dot{q}_{\alpha-g,conv} = \left( \frac{\tau k_{eff}}{D_{\alpha,ex} \ln \left( \frac{D_{g,in}}{D_{\alpha,ex}} \right)} \right) \pi D_{\alpha,ex} (T_{g,in} - T_{\alpha,ex}) \quad (9)$$

همچنین شار حرارتی جابجایی از شیشه به جاذب ( $\dot{q}_{g-\alpha,conv}$ ) نیز با استفاده از رابطه‌ی زیر به‌دست خواهد آمد [۱۹]:

$$\dot{q}_{g-\alpha,conv} = \left( \frac{\tau k_{eff}}{D_{g,ex} \ln \left( \frac{D_{\alpha,in}}{D_{g,ex}} \right)} \right) \pi D_{g,ex} (T_{\alpha,in} - T_{g,ex}) \quad (10)$$

که در روابط فوق، رسانایی گرمایی مؤثر و عدد رایلی از طریق روابط زیر حاصل خواهند شد [۲۷]:

$$k_{eff} = 0.386 k_c \left( \frac{Pr_c}{0.861 + Pr_c} \right)^{0.25} (Ra_c)^{0.25} \quad (11)$$

$$Ra_c = \frac{\ln \left( \frac{D_{g,in}}{D_{g,ex}} \right)^4}{L^3 (D_{\alpha,ex}^{-0.6} + D_{\alpha,in}^{-0.6})^{\Delta}} \left( \frac{(D_{g,in} - D_{\alpha,ex})}{\tau} \right) \quad (12)$$

بعد از دو انتقال گرما از جاذب به شیشه، انرژی گرمایی از شیشه عبور کرده و طی فرآیند انتقال گرمای جابجایی از شیشه به محیط ( $\dot{q}_{g-e,conv}$ ) منتقل می‌گردد. در این مرحله در حالت اصلی دو جریان طبیعی و اجباری وجود دارد که در مدل‌سازی شرایط جویبی آرام در نظر گرفته شده است. پس خواهیم داشت [۲۸]:

$$\dot{q}_{g-e,conv} = \left( \frac{Nu_e k_e}{l} \right) \pi D_{g,ex} (T_{g,ex} - T_{amb}) \quad (13)$$

$$Nu_e = \left( 0.6 + 0.387 \left( \frac{Ra}{\left( 1 + \left( \frac{0.559}{Pr_e} \right)^{\frac{4}{9}} \right)^{\frac{1}{4}}} \right) \right)^{\frac{1}{4}} \quad (14)$$

شار حرارتی تابشی از جاذب به شیشه ( $\dot{q}_{g-t,rad}$ ) از طریق رابطه‌ی زیر بیان خواهد شد [۲۶]:

$$\dot{q}_{g-t,rad} = \left( \frac{D_{\alpha,ex}}{D_{g,in}} \right) \sigma \pi D_{\alpha,ex} (T_{g,in}^4 - T_{\alpha,ex}^4) \quad (15)$$

به‌طور مشابه، شار حرارتی تابشی از شیشه به جاذب ( $\dot{q}_{g-\alpha,t,rad}$ ) نیز از طریق رابطه‌ی زیر به‌دست خواهد آمد [۲۶]:

$$\dot{q}_{g-\alpha,t,rad} = \left( \frac{D_{g,ex}}{D_{\alpha,in}} \right) \sigma \pi D_{g,ex} (T_{\alpha,in}^4 - T_{g,ex}^4) \quad (16)$$

انتقال گرمای تابشی وارد بر سطح جاذب ( $\dot{q}_{\alpha,s,rad}$ ) از طریق رابطه‌ی زیر حاصل خواهد شد [۲۶]:

$$\dot{q}_{\alpha,s,rad} = I_{sun} \beta W C \tau_{\alpha} (1 - a_g) a_{\alpha} \quad (17)$$

شار حرارتی تشعشعی وارد بر شیشه ( $\dot{q}_{g,s,rad}$ ) نیز به‌صورت زیر خواهد بود [۲۶]:

$$\dot{q}_{g,s,rad} = I_{sun} \beta W C r_g a_g \quad (18)$$

که در روابط (۱۷) و (۱۸)،  $C r_g$  و  $C r_{\alpha}$  به ترتیب ضریب تمرکز جذب و ضریب تمرکز شیشه (مدل اپتیکی) می‌باشند. این مدل تنها به تمرکز تابش کلی پرداخته است و دارای دقت خوبی می‌باشد و تأثیرات تابش در هر زاویه شعاعی را در نظر نمی‌گیرد. این روابط یک ضریب تمرکز را بیان می‌کنند که

روش حجم محدود برای گسسته‌سازی دامنه‌ها و استفاده از انرژی پایستار در هر حجم کنترل (CV) در شرایط حالت پایا استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن دو حجم کنترل اختیاری، می‌توان موازنه‌ی گرمایی را برای لوله و جداره شیشه‌ای نوشت.

موازنه گرمایی در حجم کنترل لوله به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\sum_{CV} \dot{q} = \dot{q}_{\alpha,cond} + \dot{q}_{\alpha,s,rad} - \dot{q}_{\alpha-g,conv} - \dot{q}_{\alpha-g,t,rad} - \dot{q}_{\alpha-f,conv} = 0 \quad (2)$$

موازنه گرمایی در حجم کنترل جداره شیشه‌ای به‌صورت رابطه‌ی زیر است:

$$\sum_{CV} \dot{q} = \dot{q}_{g,cond} + \dot{q}_{g-\alpha,conv} - \dot{q}_{g-\alpha,t,rad} - \dot{q}_{g-e,t,rad} + \dot{q}_{g,s,rad} = 0 \quad (3)$$

شار همرفتی از لوله به سیال ( $\dot{q}_{\alpha-f,conv}$ ) زمانی برقرار خواهد شد که جریان نوع جریان داخلی باشد. سیال در جریان داخلی به‌وسیله دیواره لوله محصور شده است. بعد از عبور گرما از جداره جاذب طی انتقال گرمای رسانایی، گرما به سیال موجود داخل لوله منتقل می‌گردد. این انتقال از نوع جابجایی بوده و با توجه به محصور بودن سیال توسط لوله، از قوانین و اعداد ثابت مربوط به جریان داخلی استفاده می‌شود. لذا می‌توان نوشت [۲۶]:

$$\dot{q}_{\alpha-f,conv} = \left( \frac{Nu_f k_f}{D_{\alpha,in}} \right) \pi D_{\alpha,in} (T_{\alpha,in} - T_m) \quad (4)$$

که عدد ناسلت سیال و دمای میانگین به ترتیب از روابط زیر حاصل خواهند شد [۲۶]:

$$Nu_f = 0.023 \left( \frac{\rho V_f D_{\alpha,in}}{\mu} \right)^{0.8} Pr^{0.4} \quad (5)$$

$$T_m = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (6)$$

شار حرارتی هدایتی در جاذب ( $\dot{q}_{\alpha,cond}$ ) زمانی ایجاد خواهد شد که انرژی گرمایی به جاذب طی انتقال گرمای تابشی، گرما جذب کند و از طریق فرآیند انتقال گرمای رسانایی از جداره جاذب عبور نماید. در این صورت می‌توان از طریق رابطه‌ی زیر آن را به‌دست آورد [۱۹]:

$$\dot{q}_{\alpha,cond} = \frac{\tau \pi k_{\alpha} (T_{\alpha,ex} - T_{\alpha,in})}{\ln \left( \frac{D_{\alpha,ex}}{D_{\alpha,in}} \right)} \quad (7)$$

بعد از رسیدن انرژی گرمایی به شیشه از طریق تابش، گرما طی یک انتقال گرمای رسانایی از جداره شیشه عبور می‌کند، که برای محفظه شیشه‌ای لوله‌ای، شار حرارتی هدایتی در شیشه ( $\dot{q}_{g,cond}$ ) به شکل زیر در خواهد آمد:

$$\dot{q}_{g,cond} = \frac{\tau \pi k_g (T_{g,ex} - T_{g,in})}{\ln \left( \frac{D_{g,ex}}{D_{g,in}} \right)} \quad (8)$$

بنا به اصول انتقال گرما، انرژی گرمایی بعد از رسیدن به جاذب، با توجه به ضریب جذب آن، مقداری جذب لوله شده که توسط مکانیزم انتقال گرمای رسانایی از جداره عبور کرده و به سیال منتقل می‌گردد. بعد از جذب این مقدار گرما، مقداری نیز با توجه به ضریب بازتاب جاذب (لوله) طی دو فرآیند انتقال گرمای جابجایی از نوع آزاد و تابشی به سمت شیشه بازتاب می‌گردد. در این حالت شار حرارتی همرفتی از جاذب به شیشه ( $\dot{q}_{\alpha-g,conv}$ ) منتقل می‌گردد، بنابراین دمای سطح لوله بیشتر از شیشه خواهد بود. معادلات انتقال حرارت همرفتی برای دو لوله هم محور به‌صورت زیر قابل بیان است [۱۹]:



که در رابطه‌ی فوق؛  $G$  شار جرمی و  $D$  قطر لوله و  $\sigma$  تنش سطحی می‌باشد که از IAPWS به‌دست می‌آید.

### ۳- معرفی مسئله و روش حل عددی

مدل دریافت‌کننده که شامل یک مجموعه مؤلفه‌های دریافت‌کننده حرارت می‌باشد، در شکل ۱ نشان داده شده است و در بخش قبلی، حالت‌های تفکیک شار حرارتی به داخل لوله‌ی جاذب توضیح داده شده است. محفظه جاذب در این نیروگاه، به‌صورت دو لوله هم مرکز در نظر گرفته شده است. لوله داخلی که جاذب می‌باشد از جنس فولاد می‌باشد و لوله خارجی از جنس پیرکس بوده و محفظه به‌صورت یک لوله شیشه‌ای هم مرکز با لوله جاذب است. جهت ایجاد کاهش اتلاف حرارتی، بین دو لوله خلاء نسبی وجود دارد. از حالت یکبارہ آب برای سیستم DSG استفاده شده است. در کلکتور خورشیدی مورد نظر، جریان به‌صورت پایا در نظر گرفته شده است و انرژی جذبی توسط کلکتور متناسب با تمرکز تابش می‌باشد. شدت تابش ورودی خورشید ثابت ( $I_{sun} = 1000 \text{ W/m}^2$ ) و دمای محیط برابر با ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است. در جدول ۱، مقدار پارامترهای اولیه که برای شبیه‌سازی به‌کار برده شده است، بیان گردیده است.

جدول ۱ مقدار پارامترهای اولیه‌ی کلکتور خورشیدی برای شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
طول جاذب ( $L$ )	۶ متر
پهنای آینه ( $W$ )	۵ متر
قطر کلکتور ( $D_c$ )	۵ متر
قطر داخلی جاذب ( $D_{a,in}$ )	۰/۰۵ متر
قطر خارجی جاذب ( $D_{a,ex}$ )	۰/۰۴۳ متر
قطر داخلی شیشه ( $D_{g,in}$ )	۰/۱۰۹ متر
قطر خارجی شیشه ( $D_{g,ex}$ )	۰/۱۱۵ متر
ضریب جذب جاذب ( $a_\alpha$ )	۰/۹۶
ضریب جذب شیشه ( $a_g$ )	۰/۰۵
ضریب جذب آینه ( $\beta$ )	۰/۰۰۳۳۷۹

در این پژوهش، محیط پیرامونی به‌صورت ایده‌آل در نظر گرفته شده است. همچنین، آسمان به‌صورت بدون ابر و صاف در نظر گرفته خواهد شد که شرایط محیطی در بیشتر مناطق ایران می‌باشد. البته تأثیر تغییرات شدت تابش بررسی شده است. شرایط باد آهسته فرض شده است؛ زیرا در شرایط کاری واقعی در شرایط باد شدید معمولاً سیستم خاموش می‌شود تا به سیستم آسیبی نرسد. با جمع‌آوری داده‌های آب و هوایی برای یک منطقه خاص به منظور اجرایی کردن این سیستم می‌توان تخمین خوبی از میزان توان تولیدی این سیستم خورشیدی به‌دست آورد. خواص ترموفیزیکی سیال و محیط در جدول ۲ درج گردیده است.

جدول ۲ خواص ترموفیزیکی سیال و محیط

خاصیت	مقدار
ضریب هدایت گرمایی جاذب ( $k_a$ )	۱۶/۲ ( $\text{w/m.K}$ )
ضریب هدایت گرمایی شیشه ( $k_g$ )	۱/۴ ( $\text{w/m.K}$ )
ضریب هدایت گرمایی سیال ( $k_f$ )	۰/۰۷۸ ( $\text{w/m.K}$ )
ضریب هدایت گرمایی محیط ( $k_e$ )	۰/۰۴۵۴ ( $\text{w/m.K}$ )
ویسکوزیته سیال ( $\mu$ )	۰/۰۰۰۱۵۲ ( $\text{kg/m.s}$ )
چگالی سیال ( $\rho$ )	۷۰۹ ( $\text{kg/m}^3$ )

براساس شعاع‌های رفلکتور و محفظه جاذب می‌باشد که از طریق روابط زیر تعیین خواهند شد [۱۹]:

$$Cr_\alpha = \frac{D_c}{D_{a,ex}} \quad (19)$$

$$Cr_g = \frac{D_c}{D_{g,ex}} \quad (20)$$

راندمان معمولاً به‌صورت نسبت انرژی که کار مفید انجام می‌دهد به کل انرژی دریافتی تعبیر می‌گردد و برای سیستم حال حاضر به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۲۶]:

$$\eta = \frac{\sum \dot{q}_{\alpha-f,conv}}{AI_{sun}} \quad (21)$$

### ۲-۲ مدل جریان تک‌فازی

مدل گرمایی بخار آب داخل لوله‌ی جاذب می‌تواند ضریب انتقال حرارت و گرادیان فشار را پیش‌بینی نماید. افت فشار در لوله‌ها برای جریان تک‌فاز از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است [۱۶]:

$$f = \frac{-\frac{\partial p}{\partial z} D}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (22)$$

در روابط فوق، ضریب اصطکاک به ترتیب برای جریان آرام و آشفته، از طریق روابط زیر به‌دست می‌آید [۱۶]:

$$f = \frac{64}{Re} \quad Re < 3000 \quad (23)$$

$$f = [0.79 \cdot \log(Re) - 1.64]^{-2} \quad Re > 3000 \quad (24)$$

### ۳-۲ مدل جریان دوفازی همگن

اگر سیال عبوری از جاذب در حالت دوفاز باشد، افت فشار از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید [۱۶]:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{TP} = \phi^2 \left(\frac{dp}{dz}\right)_{FO} \quad (25)$$

که در رابطه‌ی فوق،  $TP$  افت فشار دوفازی و  $FO$  افت فشار مایع اشباع یا همان دبی می‌باشد. ضریب  $\phi^2$  براساس آزمایشات به‌دست می‌آید که این ضریب توسط فریدل به‌صورت زیر بیان می‌شود [۱۶]:

$$\phi^2 = A + 3.43x^{0.695}(1-x)^{0.24} \left(\frac{\rho_f}{\rho_g}\right)^{0.8} \left(\frac{\mu_g}{\mu_f}\right)^{0.22} \left[1 - \frac{\mu_g}{\mu_f}\right]^{0.89} Fr_f^{-0.47} We_f^{-0.224} \quad (26)$$

که در آن  $x$  کیفیت بخار و  $\rho_f$  و  $\rho_g$  به ترتیب چگالی فاز مایع و بخار است. همچنین  $\mu_g$  و  $\mu_f$  مربوط به لزجت دینامیکی فاز مایع و گاز است.

$$A = (1-x)^2 + x^2 \left[\frac{\rho_f f_{go}}{\rho_g f_{fo}}\right] \quad (27)$$

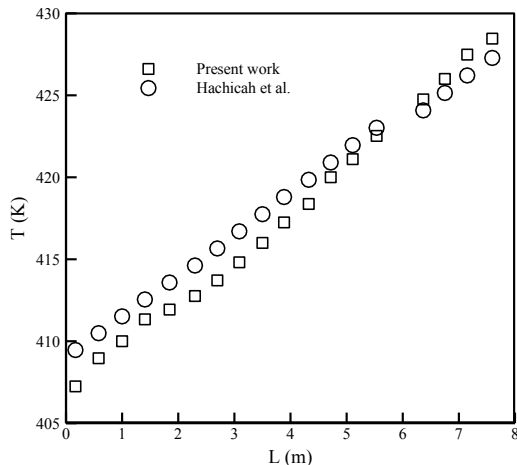
که در آن  $f_{fo}$  و  $f_{go}$  فاکتور اصطکاک برای فازهای گاز به تنهایی و مایع به تنهایی است. اعداد فرود و وبر، به ترتیب به‌صورت زیر بیان می‌گردند [۱۶]:

$$Fr_f = \frac{G^2}{gD\rho_f} \quad (28)$$

$$We_f = \frac{G^2 D}{\rho_f \sigma} \quad (29)$$

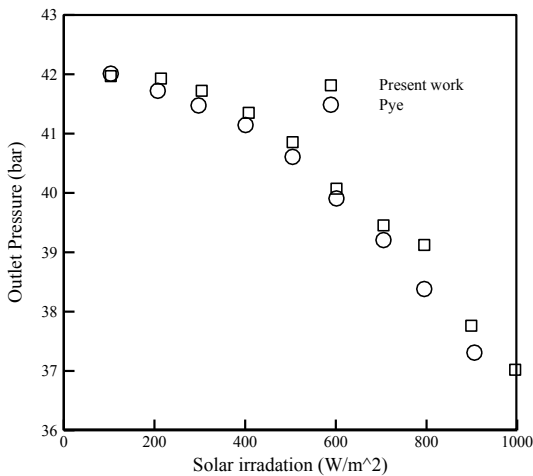


همکاران [۲۶]، شبیه‌سازی کلکتور خورشیدی سهموی، به‌صورت تک‌فاز مورد بررسی قرار گرفته است و تغییرات میزان تابش به‌صورت شعاعی را در نظر گرفته ولی در مورد این تحقیق تغییرات به‌صورت یک معادله مستقل از جهت تابش ساده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی تغییرات دمای مایع و جاذب در راستای طول لوله برای فشار ۱۰۰ بار در زاویه‌ی ۹۰ درجه در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل اپتیکی استفاده شده با مدل اپتیکی شعاعی بیان شده در پژوهش [۲۶] برای زاویه‌ی ۹۰ درجه مطابقت خوبی دارد و حداکثر اختلاف نتایج نزدیک به ۴/۷٪ و کمترین اختلاف نیز کمتر از ۱/۵٪ بوده است.



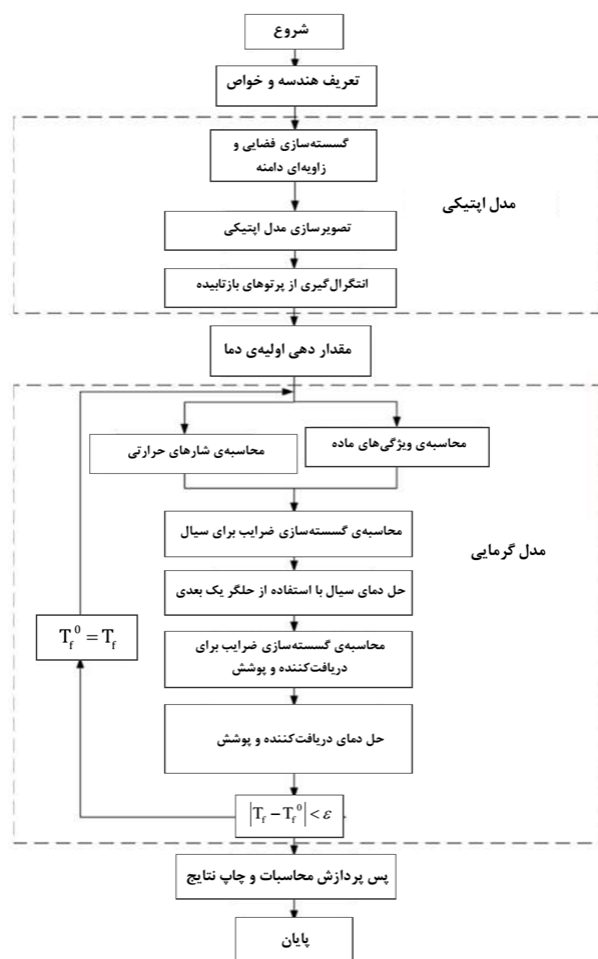
شکل ۳ مقایسه نتایج به‌دست آمده برای تغییرات دمای مایع و دمای جاذب در طول لوله برای زاویه‌ی ۹۰ درجه با نتایج هاجیچا و همکاران [۲۶].

جای دی پای [۲۹]، تکنولوژی DSG را در نیروگاه‌های خورشیدی فرسول مورد بررسی قرار داده است و نتایج عددی خود را به‌صورت دوفازی به‌دست آورده است. لذا برای اعتبارسنجی نتایج افت فشار در جریان دوفازی از مرجع [۲۹] استفاده شده است. نتایج حاصل از تغییرات افت فشار خروجی برحسب تغییرات تابش با نتایج مرجع [۲۹] در شکل ۴ مقایسه شده است تا درستی و صحت نتایج مشخص گردد. در این شکل ملاحظه می‌گردد که نتایج حاصل با نتایج مرجع [۲۹] اختلاف بسیار نزدیکی دارد.



شکل ۴ مقایسه نتایج به‌دست آمده برای تغییرات افت فشار خروجی برحسب تغییرات تابش با پژوهش دی پای [۲۹].

گسسته‌سازی معادلات با استفاده از نیوتن پیشرو انجام شده است که پارامترهای مختلف مسئله را در هر بازه زمانی حساب می‌کند و در امتداد لوله به گسسته‌سازی پرداخته و مسئله را حل می‌نماید. برای حل مسئله از چندین حلقه‌ی درونی استفاده شده تا تأثیر تغییرات پارامترها بر مسئله مشخص شود. حل مسئله به روش نیوتن حل آن را بسیار ساده کرده و برای معادلات پیچیده محاسبات را کاهش می‌دهد و می‌توان با کوچک‌سازی اندازه‌های المان‌های زمانی و مکانی دقت مسئله را افزایش داد. ولی کوچک‌سازی المان‌ها به‌صورت بیش از حد ممکن است در مسائل کامپیوتری باعث ایجاد خطای محاسباتی گردد. در شکل ۲ فلوجارت کلی الگوریتم نشان داده شده است. شبکه‌ی تولیدی یک بعدی بوده و با تقسیم پارامترهای مکانی بر روی طول لوله، استقلال شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج استقلال از شبکه نشان می‌دهد که وقتی تعداد المان‌ها به بیش از ۱۰۰۰ عدد می‌رسد، نتایج به تعداد المان‌ها وابسته نمی‌باشد.



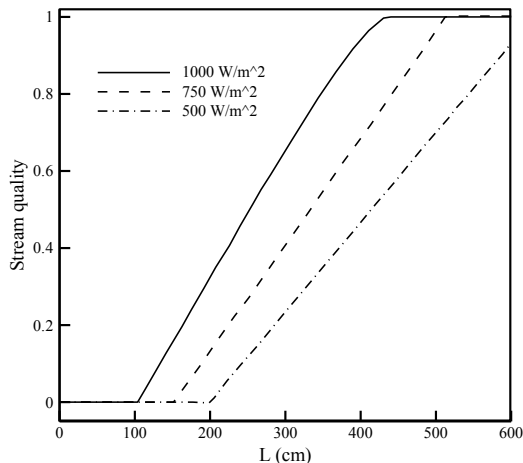
شکل ۲ فلوجارت کلی الگوریتم کلی.

#### ۴- اعتبارسنجی

در این تحقیق تغییرات دمای آب و فشار در طول لوله برای پارامترها و شرایط مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور اعتبارسنجی نتایج این تغییرات از دو پژوهش مختلف استفاده شده است. برای اعتبارسنجی تغییرات دما از پژوهش هاجیچا و همکاران [۲۶] استفاده شده است. به این منظور تمام پارامترهایی که در این پژوهش به کار رفته است، استفاده شده است. تنها تفاوت این شبیه‌سازی استفاده از مدل اپتیکی است. در مطالعه‌ی هاجیچا و

## ۵- نتایج

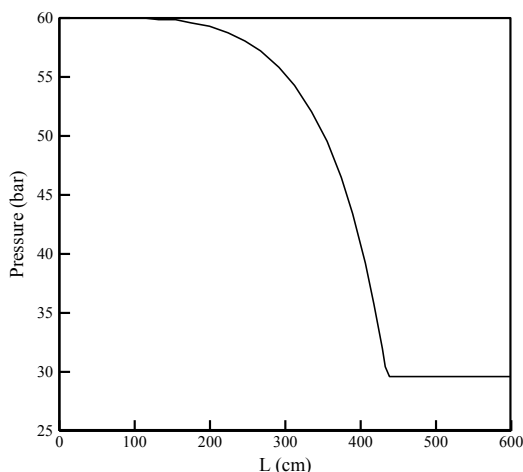
تغییرات ناگهانی فشار اتفاق می‌افتد و شیب این تغییرات با افزایش کیفیت بخار افزوده می‌شود. این تغییرات فاز در ناحیه دوفازی به وسیله رابطه فریدل که در قسمت قبل بیان شده محاسبه گردیده است. مشاهده می‌گردد که افت فشار در ناحیه دوفازی شدید می‌باشد و یکی از مشکلات اساسی در طراحی این نوع کلکتورهای خورشیدی، تغییرات فشاری است که در ناحیه دوفازی ایجاد می‌گردد.



شکل ۶ تغییرات کیفیت بخار در راستای طول لوله برای تابش‌های خورشیدی مختلف در دمای ورودی ۴۷۵ کلوین، فشار ورودی ۶۰ بار و دبی جرمی ۰/۵ کیلوگرم بر ثانیه.

جدول ۳ راندمان جاذب (%) برای مقادیر مختلف تابش خورشید و کیفیت بخار خروجی در دمای ورودی ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار خروجی ۴۳ بار.

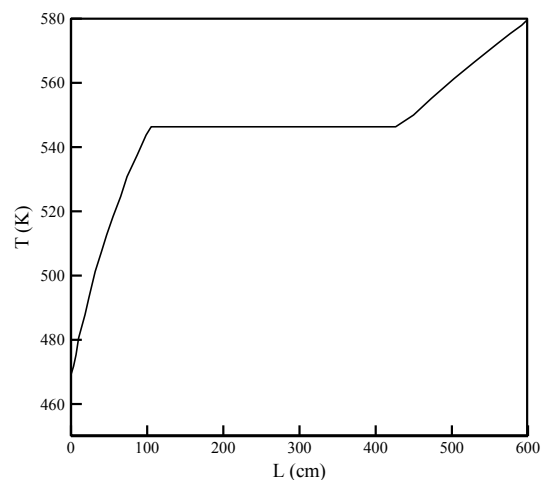
تابش خورشید (W/m <sup>2</sup> )	x=0.8	x=0.7	x=0.6	x=0.5
۱۰۰	۰/۵۲۸۷	۰/۵۲۷۵	۰/۵۲۶۳	۰/۵۲۵۱
۳۰۰	۰/۸۳۴۵	۰/۸۳۳۱	۰/۸۳۱۹	۰/۸۳۰۷
۶۰۰	۰/۸۹۷۴	۰/۸۹۵۹	۰/۸۹۴۳	۰/۸۹۲۷
۱۰۰۰	۰/۹۲۱۷	۰/۹۱۹۶	۰/۹۱۷۸	۰/۹۱۶۵



شکل ۷ پروفایل فشار در راستای طول لوله برای دمای ورودی ۴۷۵ کلوین، فشار ورودی ۶۰ بار و دبی جرمی ۰/۵ کیلوگرم بر ثانیه.

پیش‌بینی درست از مقدار شار حرارتی بحرانی یکی از مسائل مهم در طراحی سیستم تولید بخار مستقیم می‌باشد. با توجه به تنش‌های حرارتی ایجاد شده در جاذب خورشیدی، بایستی جوشش مدل‌سازی گردد تا با تغییر پارامترهای طراحی میزان تنش حرارتی کمتر و میزان تولید بخار و انتقال

برای بررسی عملکرد سیستم، هندسه معرفی شده در دبی جرمی و تشعشع‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل ۵ تغییرات دمای سیال نسبت به طول جاذب را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی دمای ورودی ۴۷۵ کلوین، فشار ورودی ۶۰ بار، دبی ۰/۵ کیلوگرم بر ثانیه و قطر لوله ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌گردد در طول لوله دمای سیال افزایش می‌یابد که دارای سه منطقه تغییرات دمایی است؛ در مرحله اول سیال به‌صورت تک‌فازی مایع می‌باشد که دمای آن به مرور افزایش یافته تا به دمای اشباع ۵۵۰ می‌رسد. در مرحله دوم سیال به‌صورت دوفازی وجود دارد و با انتقال گرما به آن طبق معادله‌ی گرمای نهان، تنها تغییر فاز روی می‌دهد و فاز مایع به تدریج به بخار تبدیل می‌شود و افزایش دمایی در مایع مشاهده نمی‌شود. در مرحله سوم سیال کاملاً به بخار تبدیل شده و با انتقال گرما به آن دوباره دمای آن رو به افزایش خواهد بود.



شکل ۵ تغییرات دمای سیال در راستای طول لوله برای دمای ورودی ۴۷۵ کلوین، فشار ورودی ۶۰ بار و دبی جرمی ۰/۵ کیلوگرم بر ثانیه.

در شکل ۶ تغییرات کیفیت بخار در طول لوله برای تشعشع‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که مشخص است با تغییر میزان دبی می‌توان کیفیت بخار خروجی را تغییر داد. در این شکل مشاهده می‌شود که برای تابش خورشیدی ۱۰۰۰ W/m<sup>2</sup> در امتداد لوله کیفیت بخار تا ۱۰۰ متر اول به‌صورت مایع است و پس از آن به تدریج، کیفیت آن افزوده شده و در طول ۴۰۰ متر به طور کامل به بخار تبدیل می‌گردد، اما برای تابش‌های خورشیدی کمتر نسبت به حالت قبلی، کیفیت بخار در طول بیشتری از لوله به‌صورت مایع بوده و در طول کمتری به بخار تبدیل می‌گردد. همانند شکل ۵ در این شکل نیز مشاهده می‌گردد که در طول ۱۰۰ تا ۴۰۰ متر لوله، سیال به‌صورت دوفازی وجود دارد. با توجه به اینکه سیستم DSG انتخاب شده در این تحقیق، سیستم حالت یکباره گذر آب می‌باشد، در این سیستم‌ها جداکننده بخار وجود ندارد و تمامی رژیم‌های دوفاز اتفاق می‌افتد.

در جدول ۳ راندمان جاذب برای مقادیر مختلف تابش خورشید و کیفیت بخار خروجی در انتهای جاذب مشخص داده شده است. همانگونه که در این جدول مشاهده می‌شود با افزایش تابش خورشید و کیفیت بخار خروجی، مقدار راندمان جاذب بالاتر می‌رود.

شکل ۷ تغییرات فشار را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که افت فشار در قسمت‌های تک‌فاز (فقط مایع از ۰ تا ۱۰۰) و مافوق گرم (از ۴۳۰ تا ۶۰۰) نسبت به ناحیه دو فاز خیلی کم می‌باشد؛ ولی در ناحیه دوفازی (۴۳۰-۱۰۰)،



در این پژوهش برای بررسی کلکتور خورشیدی سهموی، در مرحله اول یک مدل اپتیکی برای بازتابنده تعریف شده است. در مرحله بعد معادلات انتقال حرارت برای جذب‌کننده تابش به‌دست آورده شده است و تلفات حرارتی مورد نظر برای این پیکربندی جذب‌کننده تابشی در نظر گرفته شده است. سپس معادلات حل شده و تغییرات دمای آب در امتداد لوله مورد بررسی قرار گرفته است براساس معادلات تغییرات فشار در جریان‌های دوفازی میزان افت فشار محاسبه گردیده است. با توجه به راندمان سیستم یک کیفیت بخار بهینه تعیین شده است. با مشخص شدن کیفیت بخار، در مقادیر مختلف فشار و دبی جرمی، شار حرارتی بحرانی برای سیستم تولید بخار مستقیم به‌دست آورده شده است و جهت کاهش تنش حرارتی، یک فشار و دبی جرمی بهینه انتخاب گردیده است.

نتایج عددی این پژوهش نشان می‌دهد که سیال هرچه در طول لوله حرکت می‌کند، دمای آن افزایش پیدا می‌کند و به دلیل افزایش دمای اجزای کلکتور تبادل حرارتی آنها با محیط زیاد می‌شود. همچنین تغییرات فشار در ناحیه دوفازی معمولاً شدید است و این مسئله مشکلاتی را در زمینه طراحی این نوع تاسیسات فراهم می‌نماید. با تعیین کیفیت بخار، شار حرارتی بحرانی برای مقادیر مختلف فشار و دبی جرمی به‌دست آمده است.

#### ۷- فهرست علائم

A	مساحت، $m^2$
D	قطر، m
e	ضخامت لوله، m
g	گرانج، $m/s^2$
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی، $W/m^2.K$
Fr	عدد فرود
$I_b$	شدت تابش ورودی خورشید، $W/m^2$
k	هدایت گرمایی، $W/m.K$
$\dot{m}$	دبی جرمی، kg/s
Nu	عدد ناسلت
P	فشار، bar
Pr	عدد پرانتل
$\dot{q}$	نرخ شار گرمایی بر واحد طول، $W/m$
Ra	عدد رایلی
Re	عدد رینولدز
t	زمان، s
T	دما، K
v	سرعت، m/s
We	عدد وبر

#### علائم یونانی

$\alpha$	ضریب جذب
$\beta$	ضریب جذب آینه
$\mu$	ویسکوزیته دینامیکی، kg/m.s
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$

#### زیرنویس‌ها

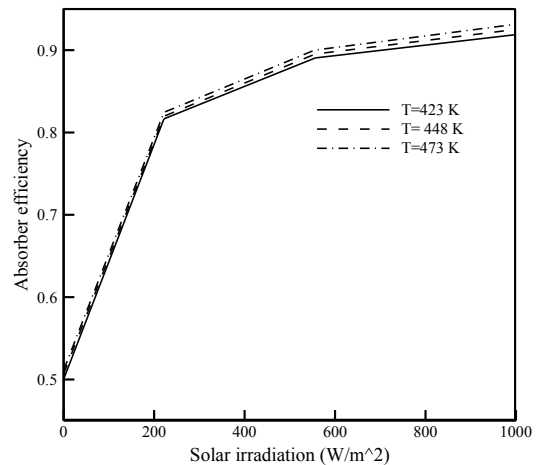
a	جاذب
c	کلکتور

حرارت افزایش پیدا کند. یکی از روش‌های تعیین CHF استفاده از جدول LUT (look-up table) [۳۰] می‌باشد. در این جدول با استفاده از فشار و شار حرارتی می‌توان مقدار شار حرارتی بحرانی CHF را برای هر کیفیت بخار به‌دست آورد. در جدول ۴ مقادیر شار حرارتی بحرانی برای مقادیر مختلف فشار و دبی جرمی با استفاده از جدول LUT تعیین شده است. در این جدول مشاهده می‌گردد که با افزایش دبی جرمی و فشار، شار حرارتی بحرانی کمتر می‌شود.

جدول ۴ شار حرارتی بحرانی ( $kW/m^2$ ) برای مقادیر مختلف فشار و دبی جرمی.

دبی جرمی (kg/s)	P=102 bar	P=63 bar	P=43 bar
۰/۵	۹۱۶	۱۶۳۹	۱۶۵۰
۱	۵۷۶	۱۵۸۵	۱۵۱۷

راندمان جاذب برای سه دمای کارکرد (یا دمای ورود به جاذب) ۱۷۵، ۲۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتیگراد مورد ارزیابی قرار گرفته و مقادیر آن برحسب تابش خورشیدی در شکل ۸ نشان داده شده است. در این شکل می‌توان مشاهده نمود که با افزایش دمای اجزای کلکتور، تبادل حرارتی آنها با محیط زیاد می‌شود و انرژی بیشتری تلف خواهد شد و بیشترین راندمان جاذب در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد حاصل خواهد شد. با توجه به شبه‌سازی‌های عددی صورت گرفته مشخص شده است که بیشترین راندمان جاذب در سیستم تولید بخار مستقیم زمانی حاصل خواهد شد.



شکل ۸ راندمان جاذب برحسب تابش خورشید برای مقادیر دمایی مختلف در فشار ۱۰۲ بار، دبی جرمی ۱ کیلوگرم بر ثانیه و کیفیت بخار ۰/۸.

#### ۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی پدیده‌ی جوشش در سیستم‌های تولید بخار مستقیم کلکتور سهموی خورشیدی پرداخته است. نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی از نوع سیستم کلکتور سهموی خطی شامل ردیف‌های موازی و طولانی از متمرکزکننده‌ها می‌باشند. بخش متمرکزکننده شامل سطوح انعکاسی سهموی است که از جنس آینه‌های شیشه‌ای تشکیل شده و روی یک ماده‌ی سازه نگهدارنده قرار می‌گیرند. دریافت‌کننده از لوله‌های جاذب با پوشش مخصوص تشکیل شده که بوسیله شیشه پیرکس پوشانده می‌شوند و در طول خط کانونی قرار می‌گیرند. بخش دریافت‌کننده در قسمت‌های انتهایی روی دو تکیه‌گاه قرار گرفته‌اند که این مجموعه روی تیرک‌های اصلی سازه سوار است. حذف سیال روغن موجود در این نیروگاه‌ها به دلیل مشکلات نگهداری و زیست محیطی، سبب ایجاد تکنولوژی بخار مستقیم شده است.



- [16] Odeh S, Morrison G, Behnia M, Modelling of parabolic through direct steam generation solar collectors, *Sol Energy*, Vol. 62, pp. 395-406, 1998.
- [17] Zaversky F, Bergmann S, Sanz W, Detailed modeling of parabolic trough collectors for the part load simulation of solar thermal power plants, In: *ASME Turbo Expo 2012: turbine technical conference and exposition*, ASME; p. 235-47, 2012.
- [18] Nolte HC, Bello-Ochende T, Meyer JP, Second law analysis and optimization of a parabolic trough receiver tube for direct steam generation, *Heat Mass Transf*, Vol. 51, pp. 875-87, 2015.
- [19] Hachicha AA, Rodríguez I, Ghenai C, Thermo-hydraulic analysis and numerical simulation of a parabolic trough solar collector for direct steam generation, *Appl Energy*, Vol. 214, pp. 152-65, 2018
- [20] Fuqiang, Wang, Lai Qingzhi, Han Huaizhi, Tan Jianyu, Parabolic trough receiver with corrugated tube for improving heat transfer and thermal deformation characteristics, *Applied energy*, Vol. 164, pp. 411-424, 2016.
- [21] Li, Lu, Jie Sun, Yinshi Li, Ya-Ling He, Haojie Xu, Transient characteristics of a parabolic through direct-steam-generation process, *Renewable Energy*, Vol. 135, pp. 800-810, 2019.
- [22] Feng, Lei, HaiYan Liao, Peng Wang, Jun Huang, Karn L. Schumacher, A technique to avoid two-phase flow in solar collector tubes of the direct steam generation system for a solar aided power generation plant, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 148, pp. 568-577, 2019.
- [23] Iodice, Paolo, Giuseppe Langella, Amedeo Amoresano, Raffaella Di Dona, Optimization of medium temperature direct steam generation solar plant, *Energy Procedia*, Vol. 148, pp. 122-129, 2018.
- [24] Ahn, Ho Seon, Hyungdae Kim, HangJin Jo, SoonHo Kang, WonPyo Chang, Moo Hwan Kim, Experimental study of critical heat flux enhancement during forced convective flow boiling of nanofluid on a short heated surface, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 36, No. 5, pp. 375-384, 2010.
- [25] Das, Sarit K., Nandy Putra, Wilfried Roetzel, Pool boiling characteristics of nano-fluids, *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 46, No. 5, pp. 851-862, 2003.
- [26] Hachicha, A. A., I. Rodríguez, R. Capdevila, A. Oliva, Heat transfer analysis and numerical simulation of a parabolic trough solar collector, *Applied energy*, Vol. 111, pp. 581-592, 2013.
- [27] Raithby, G. D., and K. G. T. Hollands, A general method of obtaining approximate solutions to laminar and turbulent free convection problems, *Advances in heat transfer*, Vol. 11, pp. 265-315, 1975.
- [28] Churchill, Stuart W., and Humbert HS Chu, Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder, *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 18, No. 9, pp. 1049-1053, 1975.
- [29] Pye, John D, "System modelling of the compact linear Fresnel reflector," PhD, University of New South Wales, Sydney, Australia, 2008.
- [30] Groeneveld, D. C., J. Q. Shan, A. Z. Vasić, L. K. H. Leung, A. Durmayaz, J. Yang, S. C. Cheng, A. Tanase, The 2006 CHF look-up table, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 237, No. 15-17, pp. 1909-1922, 2007

هدایت	cond
جابجایی	conv
محیط	e
مؤثر	eff
سیال	f
شیشه	g
ورودی	in
خروجی	out
آسمان	s
تابش خورشید	s.rad
تابش گرمایی	t.rad

## -۸ مراجع

- [1] Eck, Markus, and W. D. Steinmann, Dynamic behavior of the direct solar steam generation in parabolic trough collectors: A simulation study, In *Proc. of 10th Solar PACES Int. Symp. On Solar Thermal Concentrating Technologies*, pp. 101-106, 2000.
- [2] Cohen, G., D. Kearney, Improved parabolic trough solar electric systems based on the SEGS experience, In *Proceedings of the American Solar Energy Society Conference*, pp. 147-150, 1994.
- [3] M. Müller, Test loop for research on direct steam generation in parabolic trough power plants, *Sol Energy Mater*, Vol. 24, pp. 222-230, 1991.
- [4] Zarza, E., J. I. Ajona, K. Hennecke, Project DISS, development of a new generation of solar thermal power stations, In *Proceedings of the Eighth International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies*, pp. 397-415, 1996.
- [5] Eck, M., W-D. Steinmann, Direct steam generation in parabolic troughs: first results of the DISS project, *Journal of solar energy engineering*, Vol. 124, No. 2, pp. 134-139, 2002.
- [6] Arousseau, Antoine, Valéry Vuillerme, Jean-Jacques Beziau, Control systems for direct steam generation in linear concentrating solar power plants—A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 56, pp. 611-630, 2016.
- [7] Arasu, A. Valan, T. Sornakumar, Design, manufacture and testing of fiberglass reinforced parabola trough for parabolic trough solar collectors, *Solar Energy*, Vol. 81, No. 10, pp. 1273-1279, 2007.
- [8] Feldhoff, Jan Fabian, Kai Schmitz, Markus Eck, Lars Schnatbaum-Laumann, Doerte Laing, Francisco Ortiz-Vives, Jan Schulte-Fischedick, Comparative system analysis of direct steam generation and synthetic oil parabolic trough power plants with integrated thermal storage, In *ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability*, American Society of Mechanical Engineers, pp. 631-640, 2011.
- [9] Murphy LM May EK, Steam generation in line-focus solar collectors: a comparative assessment of thermal performance, operating stability, and cost issues, Golden (CO, USA): *Solar Energy Research Institute*; 1982.
- [10] Stephan K, Green CV. Heat transfer in condensation and boiling, Springer; 1992.
- [11] Elsafi AM, On thermo-hydraulic modeling of direct steam generation, *Sol Energy*, Vol. 120, pp. 636-50, 2015.
- [12] Wojtan L, Ursenbacher T, Thome JR, Investigation of flow boiling in horizontal tubes: part I—a new diabatic two-phase flow pattern map, *Int J Heat Mass Transf*, Vol. 48, pp. 2955-69, 2005.
- [13] Sun J, Liu Q, Hong H, Numerical study of parabolic-through direct steam generation loop in recirculation mode: characteristics, performance and general operation strategy, *Energy Convers Manage*, Vol. 96, pp. 287-302, 2015.
- [14] Ajona J, Herrmann U, Sperduto F, Farinha-Mendes J, Main achievements within ARDISS (advanced receiver for direct solar steam production in parabolic trough solar power plants) project; 1996.
- [15] Heidemann W, Spindler K, Hahne E, Steady-state and transient temperature field in the absorber tube of a direct steam generating solar collector, *Int J Heat Mass Transf*, Vol. 35, pp. 649-57, 1992.

