



## تحلیل و بررسی عددی اثر نسبت ارتفاع و زاویه کلکتور و وجود مانع در یک دودکش خورشیدی با ورودی دو طبقه

مهدی مهدی زاده بالانی<sup>۱</sup>، سیدامین حسینی<sup>۲</sup> \* محمدرضا نگهداری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، ایران.

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، ایران.

<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی دریا، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، ایران.

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲

### چکیده

از بین انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی به دلیل دسترسی آسان، یکی از بهترین منابع انرژی محسوب می‌شود. در این پژوهش، شکل و ابعاد نیروگاه دودکش خورشیدی به‌عنوان یکی از روش‌های تبدیل انرژی خورشید به الکتریسیته بررسی شده است. با توجه به توجه اخیر به دودکش‌های خورشیدی با ورودی دو طبقه، این بهینه‌سازی به‌صورت عددی و در دو مرحله با استفاده از نرم‌افزار آنسیس فلونت روی یک نیروگاه با کلکتور دو طبقه انجام شده است. در فاز اول، نوع جریان در دو طبقه کلکتور (موافق یا مخالف) و نسبت ارتفاع طبقات بهینه شد و در فاز دوم، زاویه سقف کلکتورها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در حالت جریان موافق، توان تولیدی نیروگاه بیشتر است و هنگامی که نسبت ارتفاع طبقه اول به کل کلکتور ۸۰ درصد باشد، بیشترین راندمان و توان تولیدی به ترتیب برابر با ۲۲/۱ و ۳۹/۵ کیلووات حاصل می‌شود. همچنین بررسی زاویه سقف‌ها نشان داد که سقف افقی برای طبقه اول و زاویه یک درجه برای طبقه دوم، بهترین عملکرد را ایجاد کرده و توان خروجی با ۸ درصد افزایش به ۴۲/۶ کیلووات می‌رسد.

**کلمات کلیدی:** نیروگاه دودکش خورشیدی؛ توان تولیدی نیروگاه؛ راندمان کلی نیروگاه؛ شبیه‌سازی عددی.

## Numerical Investigation of the Effect of Height Ratio, Collector Angle, and Obstacle Presence in a Solar Chimney with a Two-Level Inlet

Mahdi Mahdizadeh Balani<sup>1</sup>, Seyed Amin Hosseini<sup>2</sup>\*, Mohammad Reza Negahdari<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Student, Mechanical Engineering Department, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran.

<sup>2</sup> Assist. Prof., Mechanical Engineering Department, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran.

<sup>3</sup> Assist. Prof., Marine Engineering Department, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran.

### Abstract

In this study, solar energy, as one of the most accessible and clean renewable energy sources, is investigated through the optimization of solar chimney power plants with a two-story collector. Numerical simulations were performed in two phases using ANSYS Fluent to optimize the geometry and operating conditions of the system. In the first phase, the type of airflow within the two collector stories—either co-flow or counter-flow—along with the height ratio of the first story to the total collector height, was optimized. The results demonstrated that co-flow conditions significantly enhance the power output and efficiency of the power plant. Furthermore, the maximum efficiency and power output were achieved when the height ratio of the first story was set to 80%, resulting in an efficiency of 1.22 and a power output of 39.5 kW. In the second phase, the effect of the collector roof angles was examined. The findings revealed that a horizontal roof for the first story combined with a one-degree inclination for the second story roof leads to optimal performance. Under these conditions, the power output increased by approximately 8%, reaching a maximum value of 42.6 kW. Overall, the study highlights that careful optimization of airflow patterns, geometric dimensions, and roof angles in two-story solar chimney collectors can substantially improve system efficiency and power generation, making this technology a promising solution for sustainable energy production.

**Keywords:** Solar chimney power plant; Power plant output power; Power plant efficiency; Numerical simulations.

\* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۵۴۳۱۲۷۲۱۳۳

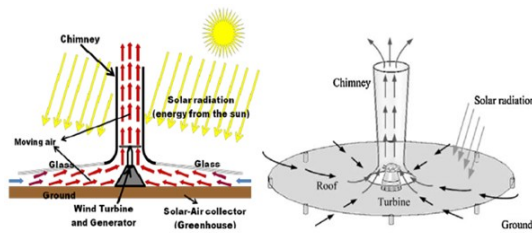
آدرس پست الکترونیک: [amin.hoss@gmail.com](mailto:amin.hoss@gmail.com)

## ۱- مقدمه

افزایش نیاز به برق در دنیای امروز و کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و دیگر انرژی‌های غیرقابل تجدید، محققان را به سمت یافتن راه‌حل‌های جایگزین و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده است. در میان انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی به دلیل دسترسی آسان در بسیاری از مناطق جهان به عنوان یکی از مناسب‌ترین منابع انرژی شناخته می‌شود.

با پیشرفت علم و تکنولوژی که منجر به نمایان شدن اثرات منفی و مضرات سوخت‌های فسیلی شده‌است، توجه جوامع بشری به انرژی‌های نو مانند انرژی خورشیدی، باد، آب و ... جلب شده و به شکل روزافزونی در حال افزایش است. نه تنها این انرژی‌ها آلودگی ایجاد نمی‌کنند و از این رو برای محیط زیست بسیار مفید هستند، بلکه منابع آن‌ها تقریباً تمام ناشدنی و به اصطلاح تجدید پذیر است. با توجه به روندی که کشورهای توسعه یافته و جهان در پیش گرفته‌اند، استفاده از این انرژی‌ها در آینده‌ای نه چندان بسیار فراگیر شده و کشور ما نیز بایستی به جمع کشورهای استفاده کننده از این انرژی‌ها بپیوندد تا نه تنها مشکل آلودگی در کشور حل شود، بلکه وابستگی کشورمان به سوخت‌های فسیلی که در سال‌های آینده به اتمام خواهند رسید کم شود. امروزه استفاده از انرژی خورشیدی به دو روش مختلف انجام می‌شود. در روش اول که روش مستقیم نام دارد انرژی خورشید توسط سیستم‌های مربوطه مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود مانند استفاده از پنل‌های خورشیدی؛ اما در روش دوم از انرژی خورشیدی برای گرم کردن مواد دیگر استفاده می‌شود. لازم به ذکر است در این روش نیز می‌توان از انرژی خورشیدی برق تولید کرد اما این تولید به صورت مستقیم نبوده و توسط واسطه انجام می‌شود. جهت ارائه مثال‌هایی از استفاده این روش می‌توان به آب شیرین کن‌ها یا خشک‌کن‌ها اشاره کرد که در آن‌ها از انرژی خورشیدی برای گرم کردن آب یا مواد غذایی استفاده می‌شود. با توجه به بررسی‌های انجام شده در صورتی که نیروگاه‌های دودکش خورشیدی در مقیاس‌های بزرگ‌تر از ۱۰۰ مگاوات که مقیاس بزرگی تلقی می‌شود، ساخته شوند، هزینه تولید برق آن‌ها با برق تولیدی در نیروگاه‌های حرارتی قابل مقایسه است و مقرون به صرفه

هستند. دودکش خورشیدی دارای سه جز اصلی به نام‌های کلکتور، دودکش و توربین بادی است. مطابق شکل ۱ هوا در اثر تابش خورشید در زیر یک مسیر که با استفاده از سقف شفاف از جنس شیشه (کلکتور) ساخته شده است، گرم شده و به سمت مرکز که محل قرارگیری دودکش و توربین باد است هدایت می‌شود. یک دودکش خورشیدی براساس دو اصل ساده به نام‌های جابه جایی آزاد و مکش فشاری عمل می‌کند.



شکل ۱- نمای شماتیک از نحوه عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی

پاستور و همکاران [۱] اولین بررسی‌های عددی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی را بر روی یک دودکش خورشیدی انجام دادند. ایشان به شبیه‌سازی دودکش خورشیدی مازانارس به صورت دو بعدی متقارن در نرم افزار انسیس فلوئنت<sup>۱</sup> پرداختند و تابش خورشید را به عنوان یک چشمه گرمایی جامد در ناحیه کوچکی بر روی زمین در نظر گرفتند و به صورت مستقیم آن را مدل‌سازی نکردند. نتایج نشان داد، افزایش تابش خورشید که به معنای ورود انرژی بیشتر به سیستم است سبب افزایش سرعت هوای عبوری از دودکش و در نتیجه افزایش توان تولیدی توربین می‌شود. مینگ و همکاران [۲] با بررسی عددی یک دودکش خورشیدی برای اولین بار زمین را به صورت ماده‌ای متخلخل در نظر گرفتند. نتایج ایشان نشان داد در صورتی که زمین از موادی که دارای ضریب هدایت حرارتی بالا هستند مانند شن تشکیل شده باشد، میزان ذخیره سازی انرژی در طول روز افزایش یافته و در نتیجه توان کلی نیروگاه دودکش خورشیدی افزایش می‌یابد. همچنین با بررسی اثر تابش خورشیدی به اثر افزایش شار حرارتی خورشید در افزایش دما و در نتیجه سرعت هوای جریان یافته درون دودکش خورشیدی پی بردند. مایا و

<sup>۱</sup> ANSYS Fluent

پرداختند. نتایج ایشان اثرگذاری ابعاد دودکش خورشیدی بر راندمان آن را تایید کرد و همچنین ایشان گزارش کردند، وجود ناپایداری در جریان باعث افزایش راندمان کلی دودکش خورشیدی می‌شود. عیادی و همکاران [۹] به بررسی عددی اثر تغییر زاویه سقف کلکتور روی عملکرد یک نیروگاه دودکش خورشیدی پرداختند. ایشان توزیع دما، سرعت و فشار را با در نظر گرفتن چهار زاویه برای سقف کلکتور بررسی کردند. نتایج نشان داد در زاویه‌های منفی سقف کلکتور، دودکش خورشیدی عملکرد بهتری دارد؛ زیرا سرعت جریان افزایش می‌یابد. نجم و شبان [۱۰] به صورت عددی به بررسی یک دودکش خورشیدی در نرم افزار انسیس فلونت پرداختند. نتایج نشان داد، شعاع دودکش خورشیدی با توجه به تابش خورشید دارای مقدار بهینه ای است؛ همچنین میزان افت فشار توربین اثر قابل توجه بر عملکرد کلی دودکش خورشیدی دارد. عبدالموحدین و الگرنی [۱۱] به بررسی عددی سه بعدی نیروگاه دودکش خورشیدی ساخته شده در اسپانیا پرداختند. نتایج نشان داد، تولید متوسط سالانه کل انرژی از شش دودکش خورشیدی بین ۵۵ تا ۶۳ کیلووات خواهد بود. ناصرائویی و همکاران [۱۲] به بررسی عددی و شبیه‌سازی دودکش خورشیدی با ورودی با سقف انحنا دار پرداختند. سقف ورودی دودکش خورشیدی خود را به صورت مقعر با شعاع‌ها و نسبت‌های تقعر مختلف در نظر گرفتند و اثر آن را بر توان خروجی و کارایی دودکش خورشیدی بررسی کردند. نتایج نشان داد، مقعر در نظر گرفتن سقف ورودی کلکتور می‌تواند کارایی دودکش خورشیدی را بهبود بخشد. صدیقی و همکاران [۱۳] به صورت عددی به بررسی عملکرد یک نیروگاه دودکش خورشیدی در حضور توربین، تشعشع خورشید و با در نظر گرفتن زمین به صورت ماده متخلخل پرداختند. ایشان اثر تخلخل زمین را روی قدرت خروجی نیروگاه دودکش خورشیدی در نرم افزار انسیس فلونت شبیه‌سازی کردند. نتایج ایشان نشان داد، قدرت خروجی نیروگاه دودکش خورشیدی با توجه به مقدار تخلخل زمین و تابش خورشید در مقادیر متفاوتی از افت فشار توربین دارای مقدار بهینه است. همچنین راندمان نیروگاه دودکش خورشیدی و قدرت خروجی آن با افزایش تشعشع خورشید به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند، اما میزان کاهش راندمان در مقابل افزایش توان خروجی قابل چشم پوشی است؛ همچنین ناصرائویی و همکاران [۱۴]

همکاران [۳] به صورت تحلیلی و عددی (به روش حجم محدود) به بررسی جریان ناپایای داخل یک نیروگاه دودکش خورشیدی پرداختند. ایشان نتایج حل عددی خود را با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی کرده و مدل خود را روی شکل‌های مختلف از دودکش‌های خورشیدی اعمال کردند. نتایج ایشان نشان داد، ارتفاع و قطر دودکش تاثیر زیادی بر روی عملکرد دودکش خورشیدی دارد. چرگویی و همکاران [۴] به صورت عددی به بررسی جریان هوا در یک دودکش خورشیدی پرداختند. هدف ایشان بررسی اثر انتقال حرارت هدایتی روی حرکت هوا در دودکش بود و بنابراین انتقال حرارت هدایتی را درون دودکش بدون توربین مدل‌سازی کردند و از شرط مرزی های آدیاباتیک و دما ثابت برای دودکش و زمین استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد سرعت جریان هوا در دودکش با افزایش عدد رایلی افزایش می‌یابد؛ همچنین جریان هوای توسعه یافته در حالت آشفته تنها در اعداد رایلی بزرگتر از ۱۰۰ میلیون ایجاد می‌شود. سانگی و همکاران [۵] به بررسی تحلیلی و شبیه سازی عددی عملکرد نیروگاه مانزانارس پرداختند و نتایج به دست آمده را با یکدیگر مقایسه کردند. ایشان با بررسی نتایج به دست آمده از دو پارامتر دما و فشار گزارش کردند مدل ریاضی تحلیلی خود از تطابق بسیار خوبی با مدل شبیه سازی شده توسط نرم افزار انسیس فلونت برخوردار است. زو و همکاران [۶] به کمک نرم افزار انسیس فلونت به بررسی عددی نیروگاه دودکش خورشیدی مانزانارس پرداختند. تفاوت مدل‌سازی ایشان با شبیه‌سازی پاستور و همکاران این بود که ایشان به جای جامد در نظر گرفتن چشمه حرارتی، آن را به صورت ماده متخلخل در نظر گرفتند و یک توربین (افت فشار) در دودکش اضافه نمودند. در نتایج میزان قدرت خروجی توربین رابطه مستقیمی با تابش خورشید داشت. حمدان [۷] به کمک معادله برنولی ضمن ارائه یک مدل ریاضی برای حل جریان هوا در نیروگاه دودکش خورشیدی دریافت که هد توربین پارامتر تاثیر گذاری در میزان قدرت تولیدی نیروگاه است. فاسل و همکاران [۸] به بررسی عددی ابعاد یک دودکش خورشیدی پرداختند. با توجه به این‌که تا قبل از تحقیقات ایشان اکثر بررسی‌هایی که توسط محققین انجام شده بود بر روی دودکش خورشیدی با ابعاد دودکش خورشیدی مانزانارس بود، ایشان ابعاد مختلفی را برای دودکش خورشیدی خود در نظر گرفتند و به بررسی راندمان نیروگاه

است؛ همچنین در مورد جنس جاذب نیز دریافتند که جاذب آلومینیومی نسبت به جاذب آهنی عملکرد بهتری دارد و دمای هوای داخل دودکش را بیشتر گرم می‌کند. بوعبیدی و همکاران [۱۹] یک مدل نیروگاه دودکش خورشیدی ساخته و مدل خود را به صورت عددی و به کمک نرم‌افزار انسیس فلونت شبیه‌سازی کرده و نتایج را با مدل آزمایشگاهی خود مقایسه کردند. نتایج نشان داد، مدل‌هایی که دارای دودکش واگرا یا همگرا واگرا هستند، عملکرد بهتری را نسبت به مدل ساده و مدلی که دارای دودکش همگرا هست، از خود نشان می‌دهند و بیشینه سرعت در مدل‌های دارای دودکش واگرا و همگرا واگرا به ترتیب برابر با  $3/5$  و  $2/7$  متر بر ثانیه است. مندال و همکاران [۲۰] به صورت تجربی و عددی به بررسی یک دودکش خورشیدی پرداختند. ایشان پس از آن که مدل عددی خود را به کمک آزمایش خود اعتبارسنجی کردند در حل عددی به بررسی اثر افزایش ارتفاع ورودی بر روی توان خروجی نیروگاه پرداختند. رضایی و همکاران [۲۱] به صورت عددی و تجربی به بررسی اثر اضافه کردن لوله‌های متالیک بر روی بهبود کارایی نیروگاه دودکش خورشیدی پرداختند. مندال و همکاران [۲۲] به بررسی شکل‌های مختلف دودکش در یک نیروگاه دودکش خورشیدی به صورت عددی پرداختند و دودکش‌های دارای انقباض و انبساط ناگهانی را مورد بررسی قرار دادند.

با توجه به مطالعات صورت گرفته، این پژوهش به بررسی و بهینه‌سازی شکل و ابعاد نیروگاه دودکش خورشیدی با توجه به این که استفاده از دودکش‌های خورشیدی با ورودی دو طبقه اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته، می‌پردازد. این بهینه‌سازی بر روی یک نیروگاه دودکش خورشیدی با کلکتور دو طبقه در دو مرحله به صورت عددی در نرم‌افزار انسیس فلونت انجام شده‌است. به عنوان نوآوری در این پروژه نسبت ارتفاع طبقه اول کلکتور به کل کلکتور در پنج حالت در شرایطی که جریان در دو طبقه کلکتور موافق و مخالف باید بررسی شده و پس از به دست آوردن حالت بهینه نوبت به مرحله دوم بهبود هندسه دودکش خورشیدی می‌رسد. در مرحله دوم با توجه به این که اثر زاویه سقف کلکتور در دودکش‌های خورشیدی دو طبقه تا کنون بررسی نشده است، ۹ حالت مختلف برای زاویه سقف دو طبقه کلکتور در نظر گرفته شده و هندسه‌ای انتخاب شده‌است که بهترین عملکرد را دارد.

در پژوهش دیگری ورودی دودکش را به صورت دو طبقه با ورودی‌های با ارتفاع برابر در نظر گرفتند. نتایج نشان داد وجود سقف دوم در قسمت ورودی نیروگاه دودکش خورشیدی بازده نیروگاه را به اندازه ۲۸ درصد افزایش می‌دهد. داس و همکاران [۱۵] به روش عددی به بررسی اثر واگرایی دودکش، دمای محیط، کارایی توربین و شار حرارتی خورشید بر عملکرد یک نیروگاه دودکش خورشیدی پرداختند. ایشان مدل خود را به صورت کامل و سه بعدی در نظر گرفتند و زاویه خروجی دودکش را از یک تا پنج درجه تغییر دادند. نتایج نشان داد در حالتی که دودکش دارای زاویه واگرایی ۲ درجه باشد بهترین عملکرد را خواهد داشت. با افزایش شار حرارتی خورشید میزان گرمای جذب شده توسط جاذب افزایش یافته و سرعت جریان هوا در دودکش خورشیدی بیشتر می‌شود؛ همچنین دمای محیط به مقدار زیادی روی عملکرد کلی سیستم اثر گذار است و با افزایش دمای محیط توان خروجی توربین نیز افزایش می‌یابد. کبابسا و همکاران [۱۶] به بررسی عددی اثر شیب ورودی دودکش خورشیدی بر روی عملکرد آن پرداختند. ایشان شیب‌های مختلفی برای سقف ورودی دودکش خورشیدی و همچنین طول‌های مختلف برای قسمت شیب دار در نظر گرفتند. نتایج نشان داد، شیب دار کردن سقف ورودی کلکتور اثر قابل توجهی بر افزایش کارایی کلکتور خورشیدی دارد. سینگ و همکاران [۱۷] شکل ورودی نیروگاه دودکش خورشیدی را تغییر داده و اثر آن را روی توان خروجی دودکش خورشیدی بررسی کردند. ایشان در پژوهش خود دو نوع ورودی را برای دودکش خورشیدی در نظر گرفتند که به صورت دیفیوزر و شیبور مانند است. در نوع اول ورودی دودکش خورشیدی دیفیوزر مانند افقی بوده و در نوع دوم با افزایش شعاع دودکش خورشیدی ورودی دیفیوزری آن عمودی می‌باشد. نتایج ایشان نشان داد، دودکش خورشیدی آن‌ها قادر است توانی برابر با ۱۷۳۸ کیلووات را تولید کند.

از جمله کارهای تجربی انجام شده نیز می‌توان به این موارد اشاره نمود: قلمچی و همکاران [۱۸] به بررسی تجربی عملکرد یک دودکش خورشیدی در ابعاد آزمایشگاهی پرداختند. بررسی اصلی ایشان روی تحلیل اثر ابعاد هندسی و جنس جاذب به کار رفته در کف دودکش خورشیدی بود. نتایج نشان داد بهترین عملکرد را دودکش خورشیدی با شعاع ورودی ۶ متر، ارتفاع دودکش ۳ متر و قطر دودکش ۱۰ سانتی متر دارا

۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم مطابق با پژوهش کبابسا و همکاران [۱۶] مورد بررسی قرار گرفته اند. معادله بقای جرم:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v)}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

در این معادله  $u$  و  $v$  سرعت در راستای  $X$  و  $r$  هستند. معادله بقای ممنتوم در جهت  $X$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho u v)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \\ 2 \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + (\rho - \rho_0) g \quad (2) \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ (\mu + \mu_t) r \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} \right) \right] + \end{aligned}$$

در این معادله  $p$  فشار استاتیک سیال،  $g$  شتاب جاذبه،  $\mu$  ویسکوزیته سیال و  $\mu_t$  ویسکوزیته توربولانس است. معادله بقای ممنتوم در جهت  $r$  [۱۶]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v v)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\mu + \mu_t) r \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] + \quad (3) \\ \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ (\mu + \mu_t) r \frac{\partial v}{\partial r} \right] - \frac{2(\mu + \mu_t) v}{r^2} \end{aligned}$$

معادله بقای انرژی [۱۶]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rvT)}{\partial r} = \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \quad (4) \\ \frac{1}{\rho r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) r \frac{\partial T}{\partial r} \right] \end{aligned}$$

در این رابطه  $T$  دمای سیال و  $Pr$  عدد پرنتل سیال است.

معادله انرژی جنبشی توربولانس [۱۶]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k u)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho k v)}{\partial r} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \quad (5) \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial r} \right] \\ + G_k + \beta g \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x} - \rho \varepsilon \end{aligned}$$

معادله استهلاک انرژی جنبشی توربولانس [۱۶]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon u)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho \varepsilon v)}{\partial r} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right] + G_k C_{1\varepsilon} \left( \frac{\varepsilon}{k} \right) \quad (6) \\ - \rho C_{2\varepsilon} \left( \frac{\varepsilon^2}{k} \right) \end{aligned}$$

در روابط فوق  $k$  انرژی جنبشی توربولانس،  $\varepsilon$  اضمحلال انرژی جنبشی توربولانس،  $G_k$  تولید انرژی جنبشی توربولانس،  $\sigma_t$  عدد پرنتل برای دما،  $\sigma_k$  عدد پرنتل برای انرژی جنبشی توربولانس،  $\sigma_\varepsilon$  عدد پرنتل برای اضمحلال و مابقی ضرایب ثابت هستند.

۲-۱- محاسبه بازده نیروگاه دودکش خورشیدی

نیروگاه دودکش خورشیدی از سه قسمت اصلی کلکتور، دودکش و توربین تشکیل شده است. هر کدام از این سه عضو دارای بازده مخصوص به خود می باشد که بازده کل نیروگاه به بازده هر کدام از این سه بخش وابسته است؛ بنابراین بازده کلی نیروگاه دودکش خورشیدی مطابق پژوهش نجم و شبان [۱۰] مطابق رابطه ۷ از حاصل ضرب بازده این سه بخش محاسبه می شود.

$$\eta_{tot} = \eta_c \eta_{tur} \eta_{ch} \quad (7)$$

## ۲-۲- محاسبه توان تولیدی نیروگاه دودکش

### خورشیدی

توان تولیدی نیروگاه دودکش خورشیدی طبق پژوهش نجم و شبان [۱۰] از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

$$P_T = \eta_{tur} Q_{tur} \Delta p_{tur} \quad (11)$$

در این رابطه  $P_T$  توان تولیدی توربین یا نیروگاه بوده،  $\eta_{tur}$  بازده توربین،  $Q_{tur}$  دبی حجمی گذرنده از توربین و  $\Delta p_{tur}$  افت فشار توربین است؛ بنابراین پس از هر شبیه‌سازی پارامترهای ذکر شده از نرم افزار آنسیس فلوئنت استخراج شده و توان خروجی نیروگاه که همان توان تولیدی توربین است، محاسبه خواهد شد

## ۳- فرضیات و روش حل

### ۳-۱- هندسه مورد مطالعه

هندسه مورد استفاده در این پژوهش یک دودکش خورشیدی مشابه با پژوهش پاستور و همکاران در نظر گرفته شده است. این مدل که در شکل ۲ نشان داده شده است، دارای بخش‌های زمین، دودکش و کلکتور است. با این تفاوت که در پژوهش حاضر کلکتور ورودی دارای دو طبقه است.

با توجه به این که هندسه و جریان در این مطالعه متقارن محوری هستند، این طرح به صورت تقارن محوری شبیه سازی شده است. جهت شبیه سازی تحقیق حاضر، هندسه مورد نظر در نرم‌افزار دیزاین مدلر که یکی از ماژول‌های آنسیس ورکبنچ<sup>۱</sup> است، رسم شده است. هندسه رسم شده در شکل ۳ نشان داده است. جهت رسم هندسه‌های متقارن محوری، محور هندسه بایستی بر روی محور افقی قرار گیرد. مطابق آن چه در شکل ۲ نشان داده شده است، زمین در زیر کلکتور رسم شده، دودکش در قسمت بالای هندسه رسم شده که توسط یک قوس به کلکتور متصل شده است. توربین نیز مطابق پژوهش‌های پیشین، در ابتدای دودکش قرار گرفته است. شایان ذکر است در مراحل مختلف تحقیق هندسه تغییر خواهد کرد و هندسه نشان داده شده در شکل ۲ هندسه اولیه است. در گام اول نسبت ارتفاع دو طبقه کلکتور و در گام دوم زاویه سقف دو طبقه کلکتور تغییر خواهد کرد.

در رابطه فوق  $\eta_{tot}$  بازده کلی نیروگاه خورشیدی،  $\eta_c$  بازده کلکتور،  $\eta_{tur}$  بیانگر بازده توربین و  $\eta_{ch}$  نشان‌دهنده بازده دودکش می‌باشد. بازده دودکش مطابق پژوهش نجم و شبان [۱۰] مطابق رابطه ۸ محاسبه می‌شود:

$$\eta_{ch} = \frac{gH_c}{C_p T_{air}} \quad (8)$$

در این رابطه  $H_c$  ارتفاع دودکش،  $g$  شتاب گرانش،  $C_p$  گرمای ویژه هوا و  $T_{air}$  دمای هوا است. مشاهده می‌شود بازده توربین با ارتفاع آن رابطه مستقیم داشته و با دمای هوا رابطه عکس دارد. با توجه به این که در این پژوهش ارتفاع دودکش ثابت و برابر با ۱۳۵ متر است و همچنین دمای هوا نیز برابر با ۳۰۰ کلوین فرض شده است بازده دودکش در تمامی حالات برابر با ۴۴ درصد است.

بازده کلکتور مطابق پژوهش نجم و شبان [۱۰] مطابق رابطه ۹ برابر است با نسبت میزان گرمای انتقال یافته به هوا در کلکتور به کل گرمای دریافت شده توسط زمین است.

$$\eta_c = \frac{\dot{m} (T_{out} - T_{in})}{A_c G} \quad (9)$$

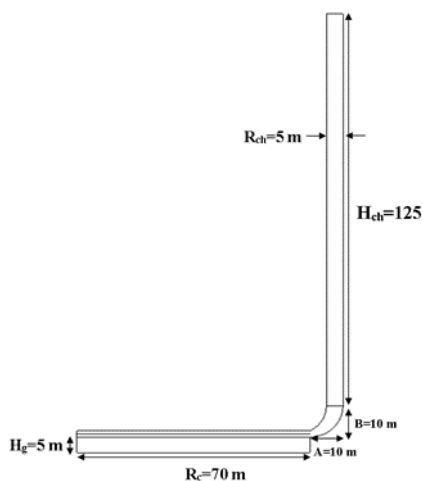
در رابطه فوق  $\dot{m}$  دبی جرمی خروجی از کلکتور و ورودی به توربین،  $T_{out}$  دمای هوا در مقطع خروجی کلکتور،  $T_{in}$  دمای هوا در مقطع ورودی کلکتور،  $G$  شار تشعشعی وارد شده به کلکتور از خورشید و  $A_c$  مساحت کف کلکتور است که مطابق ابعاد در نظر گرفته شده برای کلکتور از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$A_c = \pi(R_c^2 - 10^2) \quad (10)$$

در این رابطه عدد ۱۰ به علت قوسی است که کلکتور را به دودکش متصل می‌کند.

لازم به ذکر است بازده توربین مطابق پژوهش پاستور و همکاران [۱] برابر با ۸۰ درصد در نظر گرفته شده است؛ بنابراین اکنون با محاسبه بازده سه بخش اصلی نیروگاه دودکش خورشیدی می‌توان بازده کلی نیروگاه دودکش خورشیدی را مطابق رابطه ۷ محاسبه کرد.

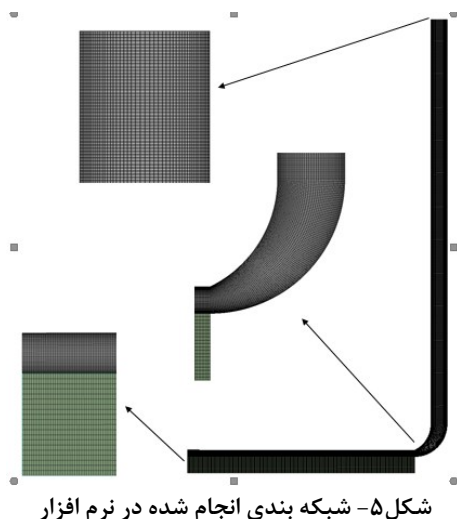
<sup>۱</sup> ANSYS Workbench



شکل ۴- ابعاد هندسه دودکش خورشیدی

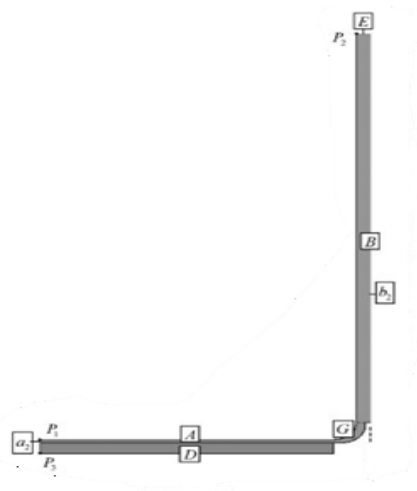
### ۳-۲- شبکه بندی

برای شبکه بندی این مدل از نرم افزار انسیس مشینگ استفاده شده است. به جهت ایجاد شبکه منظم و با کیفیت در دامین محاسباتی ابتدا هندسه در نرم افزار دیزاین مدلر تقسیم بندی یا بلوک بندی شده است. سپس هندسه تقسیم بندی شده در نرم افزار انسیس مشینگ شبکه بندی شده است. نمایی از یکی از شبکه های ایجاد شده روی هندسه ای که در آن ارتفاع ورودی دو طبقه کلکتور برابر با یکدیگر بوده و سقف کلکتور دارای شیب نیست در شکل ۵ نشان داده شده است.

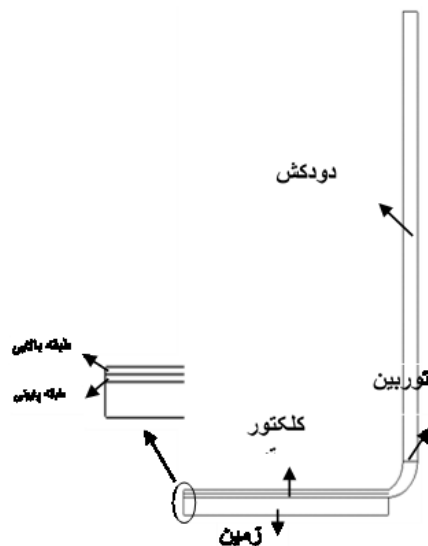


شکل ۵- شبکه بندی انجام شده در نرم افزار

ابعاد در نظر گرفته شده در این پژوهش در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق شکل، شعاع کلکتور ۸۰ متر، ارتفاع دودکش ۱۳۵ متر، ارتفاع ورودی کلکتور که به دو طبقه تقسیم شده است ۲ متر، شعاع دودکش ۵ متر و عمق زمین زیر کلکتور برابر با ۵ متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۶- نمایی از هندسه در نظر گرفته شده در پژوهش پاستور و همکاران [۱]



شکل ۷- هندسه رسم شده در دیزاین مدلر

### ۳-۳- شرایط مرزی

شرایط مرزی در نظر گرفته شده مطابق پژوهش نجم و شبان [۱۰] است، اما نظر به اینکه در این پژوهش دو نوع نیروگاه خورشیدی با جریان ورودی موازی و مخالف مورد بررسی قرار گرفته‌اند، برای این دو حالت شرایط مرزی و جزئیات آن در جدول ۱ آورده شده است. در ورودی کلکتور شرط مرزی فشار ورودی با فشار اتمسفر و دمای محیط برابر با ۳۰۰ کلوین و در خروجی شرط مرزی فشار خروجی با فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است. خط مرکزی دودکش به عنوان محور دامین در نظر گرفته شده است. دیواره پایینی زمین با دمای ثابت ۳۰۰ کلوین و دیواره‌های جانبی آن همانند دیواره دودکش با عایق در نظر گرفته شده است؛ اما دو شرط مرزی دارای اهمیت و پیچیده در این پژوهش شرط مرزی شیشه‌های کلکتور و توربین می‌باشند.

جدول ۱- شرایط مرزی در نظر گرفته شده

شرط مرزی	تنظیمات در نرم افزار فلوئنت
محور	axis
ورودی	Pressure inlet , T=300 K , P <sub>t</sub> =0
خروجی	Pressure outlet , P=0
شیشه کلکتور	Wall , Semi-transparent , h=8 (W/m <sup>2</sup> K) , T <sub>in</sub> =300 K Radiation= 1000 (W/m <sup>2</sup> )
دیواره دودکش	Wall , Adiabatic
دیواره زمین	Wall , T=302 K
دیواره جانبی	Wall , Adiabatic
زمین	Coupled wall
دیواره مشترک	
توربین	Reversed fan , Pressure Loss, efficiency =80%

جهت مدل سازی توربین از مدل فن معکوس با افت فشار مطابق پژوهش پاستور و همکاران [۱] استفاده شده است. همچنین بازده توربین نیز ۸۰ درصد در نظر گرفته شده است.

شیشه‌های کلکتور به صورت دیواره نیمه شفاف بدون لغزش مدل سازی شده و شار تابشی خورشید بر روی شیشه خارجی کلکتور اعمال شده است. شیشه خارجی کلکتور از بیرون با هوای محیط در تماس بوده و در نتیجه بایستی انتقال حرارت جابجایی که با هوای محیط دارد در شبیه سازی اعمال شود. از این رو مطابق پژوهش نجم و شبان [۱۰] شرط مرزی جابجایی با هوا با دمای ۳۰۰ کلوین و ضریب انتقال حرارت جابجایی برابر با ۸ وات بر مترمربع کلوین بر روی این دیواره اعمال شده است.

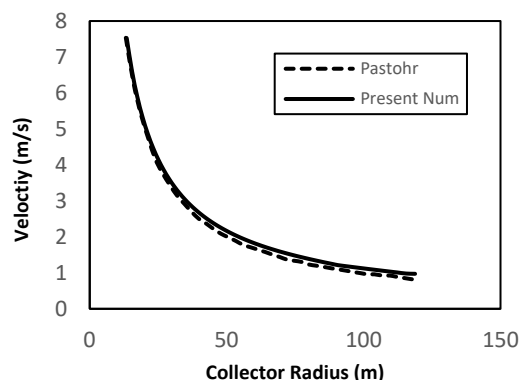
### ۴- استقلال از شبکه و اعتبارسنجی

به جهت حصول اطمینان از روند شبیه‌سازی در نرم افزار فلوئنت، پژوهش پاستور و همکاران از اعتبار بسیار بالایی برخوردار بوده و از این رو توسط پژوهشگران بسیاری برای اعتبارسنجی انتخاب شده است؛ بنابراین هندسه نیروگاه خورشیدی ایشان در نرم افزار دیزاین مدلر<sup>۱</sup> در محیط نرم افزار انسیس ورکبنچ<sup>۲</sup> رسم شده، در نرم افزار انسیس مشینگ<sup>۳</sup> شبکه بندی شده و پس از بررسی فرآیند استقلال حل از شبکه به بررسی نتایج به دست آمده از شبیه سازی پرداخته خواهد شد. پس از ایجاد چهار شبکه بندی، شبیه سازی با شرایط ذکر شده انجام شده و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه شده است. از این رو بر روی یک خط در طول کلکتور در فاصله ۸۵ سانتی متری از سطح زمین توزیع سرعت و دما از نرم افزار استخراج شده و به ترتیب در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده است. مشاهده می شود نتایج به دست آمده برای توزیع سرعت و دما بر روی مقطع ذکر شده از شبکه بندی سوم و چهارم دقیقاً مشابه یکدیگر بوده است؛ بنابراین ریزتر کردن بیشتر شبکه بندی اثری بر روی نتایج نخواهد داشت. شرط قبول استقلال حل از شبکه اختلاف کمتر از ۳ درصد در نظر گرفته شده است که با توجه به حاصل شدن این شرط شبکه بندی سوم که دارای ۱۲۵ هزار سلول هست جهت شبکه بندی نهایی برای اعتبارسنجی انتخاب شده است.

<sup>3</sup> ANSYS Meshing

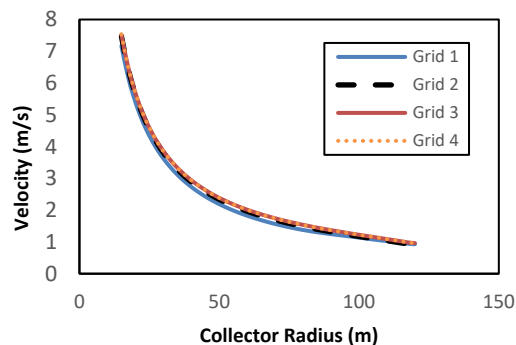
<sup>1</sup> Designmodeler

<sup>2</sup> ANSYS Workbench

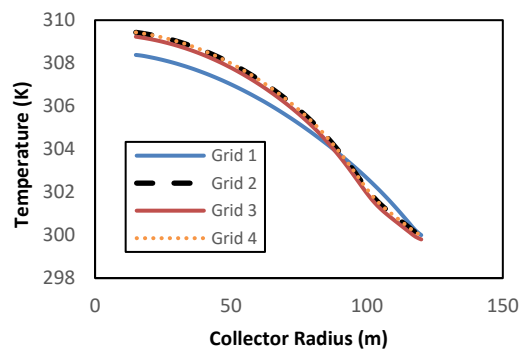


شکل ۸- مقایسه توزیع سرعت بدست آمده از شبیه‌سازی با نتیجه پژوهش پاستور و همکاران [۱]

به جهت بررسی نتایج حرارتی نیز توزیع دمای هوا نیز بر روی خط ذکر شده در شکل ۹ رسم شده است. مطابق شکل مشاهده می‌شود، این نمودار نیز از تطابق بسیار خوب و مناسبی با نتایج پاستور و همکاران [۱] برخوردار است؛ بنابراین در این جا می‌توان از صحت نتایج شبیه‌سازی عددی اطمینان حاصل کرد. لازم به ذکر است اندک خطایی که بین نتایج به دست آمده با پژوهش پاستور است می‌تواند به علت خطای محاسباتی دینامیک سیالات محاسباتی یا مدل‌های استفاده شده در شبیه‌سازی عددی باشد. به عنوان مثال در پژوهش پاستور تابش خورشید به صورت مستقیم مدل سازی نشده است، در صورتی که در این پروژه تشعشع به صورت کامل در نظر گرفته شده است.



شکل ۶- توزیع سرعت در طول کلکتور در ارتفاع ۸۵ سانتی‌متر از سطح زمین در شبکه‌های مختلف

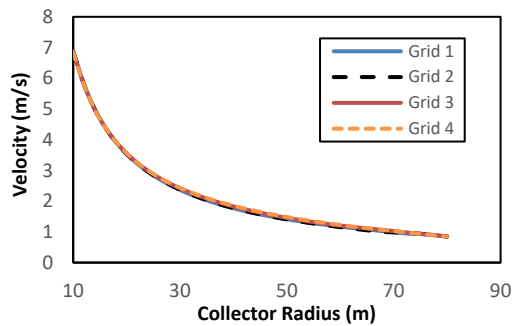


شکل ۷- توزیع دما در طول کلکتور در ارتفاع ۸۵ سانتی‌متر از سطح زمین در شبکه‌های مختلف

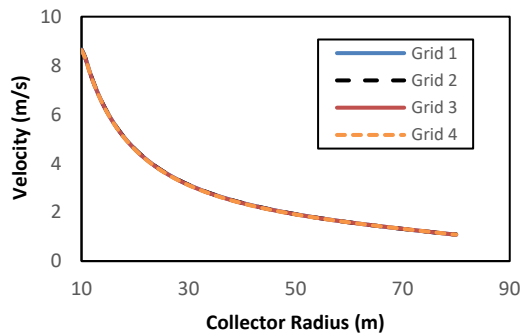
پس از انجام شبیه‌سازی پژوهش پاستور و همکاران [۱] نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی (با شبکه بندی سوم) با نتایج ایشان مقایسه شده است. در شکل ۸ توزیع سرعت بر روی یک خط در ارتفاع ۰/۸۵ متری از سطح زمین در طول کلکتور رسم شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، سرعت حاصل شده از شبیه‌سازی عددی تطابق بسیار خوبی با نتایج پاستور و همکاران [۱] مخصوصاً در ناحیه نزدیک دودکش دارد؛ بنابراین از نظر هیدرودینامیکی مدل عددی به خوبی می‌تواند نتایج را پیش‌بینی کند.

۶۰۰	۱۰۰۰	۹۷۰۰۰	۳
۸۴۰	۱۴۰۰	۱۹۸۰۰۰	۴

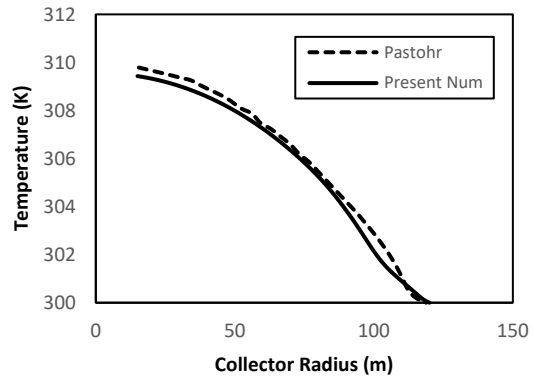
در شکل ۱۰ تا ۱۳ بر روی دو خط در طول کلکتور به ارتفاع ۵۰ و ۱۵۰ سانتی‌متر (در میانه هر طبقه کلکتور نیروگاه دودکش خورشیدی) از سطح زمین، توزیع سرعت و دما به دست آورده شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل ۱۰ - توزیع سرعت بر روی خط ۱ در شبکه‌های مختلف



شکل ۱۱ - توزیع سرعت بر روی خط ۲ در شبکه‌های مختلف



شکل ۹ - مقایسه توزیع دما بدست آمده از شبیه‌سازی با نتیجه پژوهش پاستور و همکاران [۱]

## ۵- استقلال حل از شبکه

پس از بررسی اعتبارسنجی و صحت روش انجام پژوهش، به بررسی کیفیت شبکه و استقلال حل از شبکه پرداخته می‌شود. در قسمت‌های پیشین نمایی از شبکه بندی ایجاد شده بر روی دامین در نرم افزار انسیس مشینگ<sup>۱</sup> نشان داده شد. جهت بررسی استقلال حل از شبکه، نمونه اولیه و اصلی این پژوهش که یک نیروگاه خورشیدی با ورودی کلکتور دو طبقه با جریان موازی است در نظر گرفته شده‌است. در گام بعد، چهار شبکه بندی با سایز مختلف بر روی دامین محاسباتی ایجاد شده و شبیه سازی با توجه به تنظیماتی که ذکر شد، انجام شده‌است. پس از آن نتایج حاصل از چهار شبکه بندی با یکدیگر مقایسه شده‌است تا شبکه بندی مناسب به دست آید. لازم به ذکر است شبکه بندی مناسب شبکه‌ای است که ریزتر شدن سایز سلول‌های آن تاثیر زیادی بر روی پاسخ و نتایج به دست آمده نداشته باشد. تعداد سلول‌های این چهار شبکه بندی ایجاد شده در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- تعداد سلول در شبکه‌های مختلف ایجاد شده

شبکه بندی	تعداد سلول	تعداد نود در طول دودکش	تعداد نود در طول کلکتور
۱	۲۵۰۰۰	۵۱۰	۳۰۵
۲	۴۹۰۰۰	۷۱۵	۴۳۰

<sup>۱</sup> ANSYS Meshing

۹۰ درجه نزدیک باشد، مقداری نزدیک به صفر خواهد داشت و بنابراین هر چه این پارامتر به صفر نزدیکتر باشد، نشان دهنده کیفیت بالاتری است. تعامد نشان دهنده عمود بودن سلول‌های مجاور بر همدیگر است که هر چه قرارگیری عمود بر یکدیگر سلول‌ها بیشتر باشد، مقدار این پارامتر به یک نزدیکتر بوده که نشان دهنده کیفیت شبکه بالاتری است. نسبت منطقی نیز میزان کشیدگی سلول‌ها را نشان می‌دهد که در بهترین حالت هر چه به یک نزدیکتر باشد، نشان دهنده کیفیت شبکه بالاتری است.

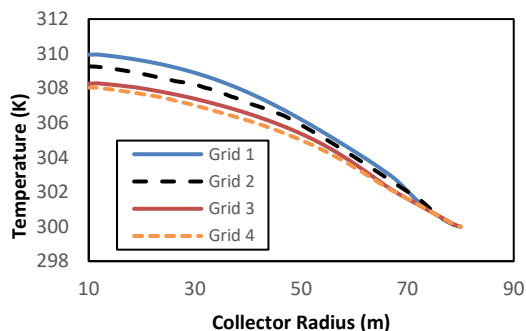
### ۶- تحلیل نتایج

نتایج شبیه‌سازی در سه مرحله به ترتیب بررسی خواهند شد. در مرحله اول نتایج بررسی نوع کلکتور و نسبت ارتفاع دو طبقه کلکتور مورد بررسی خواهند گرفت تا هندسه بهینه برای گام بعدی به دست آید که یافتن زاویه بهینه است. پیش از بررسی نتایج به دست آمده لازم است روابطی را مرور کنیم که در محاسبه توان خروجی نیروگاه دودکش خورشیدی و راندمان آن استفاده شده است.

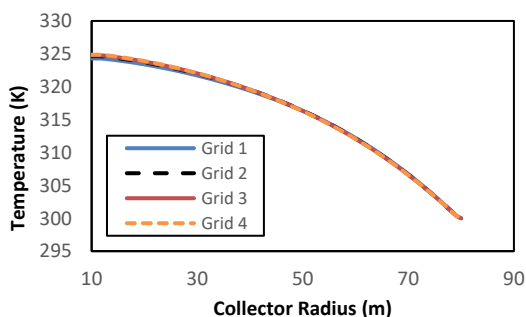
#### ۶-۱- بررسی اثر نسبت ارتفاع دو طبقه کلکتور

در مرحله اول که در این بخش مورد بررسی قرار خواهد گرفت به بررسی اثر نسبت ارتفاع دو طبقه کلکتور در نیروگاه خورشیدی پرداخته شده است. به این ترتیب مطابق آنچه در جدول شماره ۳ نشان داده شده است، برای نیروگاه دودکش خورشیدی در هر دو حالتی که جریان ورودی موافق یا مخالف باشد در نسبت ارتفاع‌های مختلف کلکتور شبیه‌سازی انجام شده و نتایج بدست آمده با یکدیگر مقایسه شده است. در جدول نام برده شماره نمونه‌های در نظر گرفته شده مشخص شده است. به عنوان مثال در نمونه شماره ۱ جریان از نوع موافق بوده و نسبت ارتفاع طبقه اول به طبقه دوم برابر با ۲۰ درصد است.

پس از انجام شبیه‌سازی‌ها در ۱۰ حالت ذکر شده، به بررسی نتایج به دست آمده از جمله راندمان کلی نیروگاه و توان تولیدی آن پرداخته شده است. نتایج به دست آمده در جدول ۴ و شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- توزیع دما بر روی خط ۱ در شبکه‌های مختلف



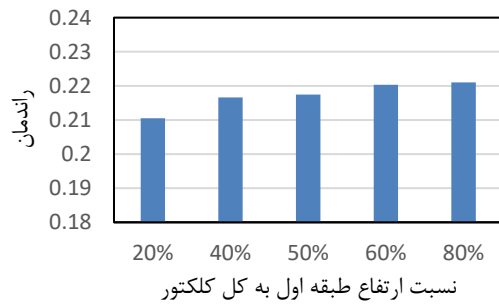
شکل ۱۳- توزیع دما بر روی خط ۲ در شبکه‌های مختلف

با توجه به شکل‌های فوق مشاهده می‌شود نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی در شبکه بندی سوم و چهارم نزدیک به یکدیگر بوده و می‌توان نتایج آن دو را مطابق بر یکدیگر دانست لازم به ذکر است میانگین اختلاف نتایج بین شبکه بندی‌ها در جدول زیر آورده شده است.

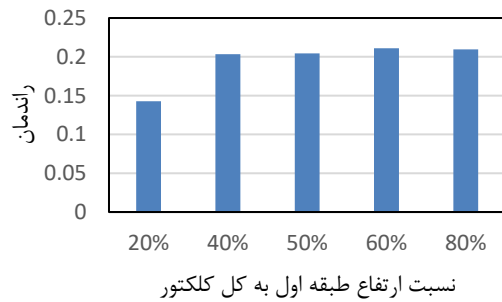
جدول ۳- بررسی خطای فرآیند استقلال حل از شبکه

مقایسه شبکه بندی‌های	خطای سرعت	خطای دما
۱ و ۲	۱/۵ درصد	۴/۲ درصد
۲ و ۳	۱/۱ درصد	۴/۹ درصد
۳ و ۴	۰/۵ درصد	۱/۹ درصد

بنابراین شبکه بندی سوم که دارای تقریباً ۱۰۰۰۰۰ سلول است، به عنوان شبکه بندی نهایی انتخاب می‌شود. شبکه نهایی مطابق شکلی است که در بخش شبکه بندی نشان داده شد. در صورتی که زوایای داخلی سلول‌های چهار ضلعی به



(الف)



(ب)

شکل ۱۴- نمودار مقایسه راندمان کلی نیروگاه بین نمونه‌های ۱ تا ۱۰ (الف) جریان موافق (ب) جریان مخالف

جدول ۴- جزییات هندسی نمونه‌های ۱ تا ۱۰

شماره نمونه	نوع کلکتور	نسبت ارتفاع طبقه اول به دوم
۱		٪۲۰
۲		٪۴۰
۳	جریان موافق	٪۵۰
۴		٪۶۰
۵		٪۸۰
۶		٪۲۰
۷		٪۴۰
۸	جریان مخالف	٪۵۰
۹		٪۶۰
۱۰		٪۸۰

جدول ۵- راندمان کلی و توان خروجی حاصل از نمونه‌های ۱ تا ۱۰

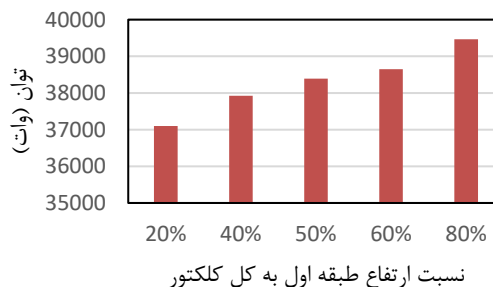
شماره نمونه	راندمان کلی (%)	توان خروجی (W)
۱	۲۱/۰۵	۳۷۰۹۸/۵
۲	۲۱/۶۶	۳۷۹۲۲/۹
۳	۲۱/۷۵	۳۸۳۹۱/۹
۴	۲۲/۰۲	۳۸۶۴۷/۸
۵	۲۲/۱۰	۳۹۴۶۶/۳
۶	۱۴/۲۷	۶۸۸۹/۱
۷	۲۰/۳۴	۲۰۷۵۷/۴
۸	۲۰/۴۳	۲۳۰۲۱/۷
۹	۲۱/۱۱	۲۲۱۹۳/۹
۱۰	۲۰/۹۷	۱۰۷۶۳/۸

جدول ۶- راندمان کلی و توان خروجی حاصل از نیروگاه دودکش خورشیدی با ورودی یک طبقه

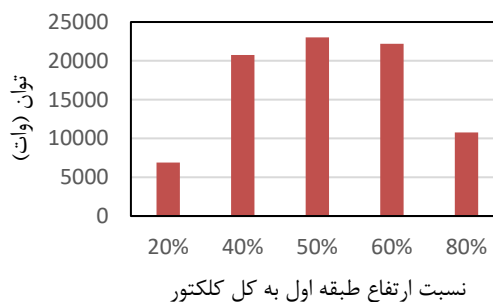
توان خروجی (W)	راندمان کلی (%)	کلکتور
۳۱۲۲۵/۹	۲۱/۷۶	یک طبقه

همانطور که مشاهده می شود با مقایسه نتایج به دست آمده برای کلکتور یک طبقه و نتایج به دست آمده برای کلکتور دو طبقه در حالت جریان موافق می توان دریافت در حالتی که کلکتور دارای یک طبقه است، اگر چه راندمان کلی نیروگاه سه نمونه از اول تا سوم بیشتر است، اما توان خروجی نیروگاه به شدت کمتر از حالتی است که کلکتور دو طبقه است. لازم به ذکر است با مقایسه نتایج به دست آمده برای کلکتور یک طبقه و نتایج به دست آمده برای کلکتور دو طبقه در حالت جریان مخالف می توان مشاهده کرد هم بازده کلی نیروگاه و هم توان خروجی آن در حالتی که کلکتور دو طبقه باشد، کمتر از حالتی است که کلکتور یک طبقه داشته باشد؛ بنابراین بهترین حالت برای ساخت کلکتور انتخاب کلکتور دو طبقه با جریان موافق در حالتی است که نسبت ارتفاع طبقه اول به طبقه دوم برابر با ۸۰ درصد باشد؛ بنابراین این هندسه به عنوان هندسه بهینه در مرحله اول انتخاب شده و در مراحل بعدی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. به جهت بررسی بیشتر و یافتن علت نتایج به دست آمده در جدول ۷ دبی خروجی از کلکتور، دمای هوای خروجی از کلکتور، بازده کلکتور، دبی حجمی توربین و افت فشار توربین در حالت های مورد بررسی قرار گرفته نشان داده شده است.

همان طور که مشاهده می شود، در حالتی که کلکتور دارای جریان مخالف است، دمای هوای خروجی از کلکتور بیشتر از حالتی است که کلکتور جریان موافق دارد، اما به دلیل آنکه دبی جرمی خروجی از کلکتور کمتر از حالت جریان موافق است بازده کلکتور کمتر است؛ بنابراین استفاده از حالت جریان مخالف باعث کاهش بازده کلکتور می شود؛ همچنین با بررسی دبی حجمی گذرنده توربین مشاهده می شود، به علت آنکه دبی خروجی از کلکتور در حالت جریان مخالف کمتر از جریان موافق و نیز حالت یک طبقه بود، دبی حجمی گذرنده از توربین نیز در این حالت کمتر است. این امر باعث می شود توان خروجی توربین در این حالت کمتر از حالتی باشد که



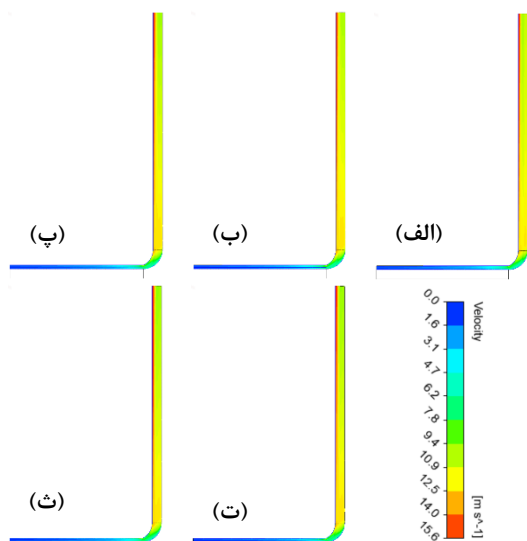
(الف)



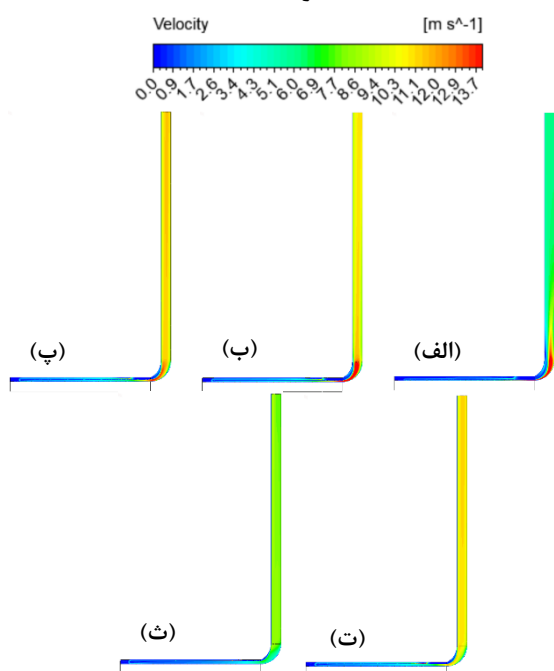
(ب)

شکل ۱۵- نمودار مقایسه توان خروجی نیروگاه بین نمونه های ۱ تا ۱۰ (الف) جریان موافق (ب) جریان مخالف

مطابق آنچه در جدول و شکل ها نشان داده شده است می توان دریافت در حالتی که کلکتور از نوع جریان موافق باشد، بازده کلی نیروگاه و قدرت تولیدی آن دارای روند مشخص می باشند. به این ترتیب که با افزایش نسبت ارتفاع طبقه اول به طبقه دوم کلکتور، بازده و توان تولیدی افزایش پیدا می کند؛ بنابراین هنگامی که نسبت ارتفاع طبقه اول به طبقه دوم کلکتور برابر با ۸۰ درصد است، بیشترین بازده و توان تولیدی کسب شده است که به ترتیب برابر با ۲۱/۸ درصد و ۳۹۴۶۶ وات می باشند. این روند افزایشی ممکن است این حس را القا کند، در صورتی که نسبت ارتفاع طبقه اول به طبقه دوم در حالتی که جریان موافق است به ۱۰۰ درصد برسد یا به عبارت دیگر کلکتور دارای یک طبقه ورودی باشد، راندمان و توان خروجی بیشتری ممکن است از نیروگاه به دست آید. به جهت بررسی، حالتی که نیروگاه دودکش خورشیدی معمولی داشته باشیم یعنی کلکتور یک طبقه باشد، نتایج آن در جدول ۶ نشان شده است.



شکل ۱۶- کانتور سرعت در نمونه های الف ۱ (ب ۲ پ ۳ ت) ۴ و ۵



شکل ۱۷- کانتور سرعت در نمونه های الف ۱ (ب ۲ پ ۳ ت) ۴ و ۵

نکته حائز اهمیت آن است که هنگامی که کلکتور دارای جریان مخالف است، به دلیل آن که جریان هوا از طبقه اول از کلکتور خارج می شود به دلیل انبساط ناگهانی مساحتی که در مسیر وجود دارد، سرعت جریان هوا به شدت کاهش می

جریان کلکتور موافق است. با بررسی نتایج به دست آمده برای حالتی که جریان در دو طبقه کلکتور موافق باشد، می توان دریافت عامل اصلی افزایش توان خروجی با افزایش نسبت ارتفاع طبقه اول به طبقه دوم، افزایش افت فشار توربین است.

جدول ۷- پارامترهای استخراج شده در نمونه های ۱ تا ۱۰

شماره نمونه	دبی خروجی کلکتور (kg/s)	دما خروجی کلکتور (K)	بازده کلکتور (%)	دبی حجمی توربین (m <sup>3</sup> /s)	افت فشار توربین (Pa)
۱	۱۱۶/۱	۳۲۰/۳۲	۶۰/۰	۹۴۷/۸۵	۴۸/۹۲
۲	۱۱۷۶/۸	۳۲۰/۶۳	۶۱/۷	۹۶۰/۶۲	۴۹/۳۴
۳	۱۱۷۹/۲	۳۲۰/۶۷	۶۱/۲	۹۶۲/۵۷	۴۹/۸۷
۴	۱۱۷۶/۸	۳۲۰/۹۸	۶۱/۹	۹۶۰/۷۷	۵۰/۲۸
۵	۱۱۷۱/۸	۳۲۱/۱۴	۶۳/۰	۹۵۶/۵۸	۵۱/۵۷
۶	۵۷۱/۷	۳۲۷/۹۸	۴۰/۷	۴۶۶/۶۹	۱۸/۴۵
۷	۹۶۴/۲۱	۳۲۳/۶۵	۵۸/۰	۷۸۷/۱۱	۳۲/۹۶
۸	۱۰۰۵/۱	۳۲۲/۷۹	۵۸/۲	۸۲۰/۵۰	۳۵/۰۷
۹	۹۹۵/۱۱	۳۲۳/۷۸	۶۰/۱	۸۱۲/۳۴	۳۴/۱۵
۱۰	۷۸۶/۱۸	۳۲۹/۸۹	۵۹/۷	۶۴۱/۷۸	۲۰/۹۶

در ادامه به بررسی پارامترهای جریان در قالب کانتورها پرداخته شده است. در ابتدا کانتور سرعت در نیروگاه دودکش خورشیدی در ۱۰ حالت بررسی شده در شکل های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است. با دقت در دو شکل مشاهده می شود، هنگامی که جریان هوا در دو طبقه کلکتور موافق است، سرعت جریان هوا در دودکش نیروگاه بیشتر از حالتی است که جریان کلکتور مخالف باشد. لازم به ذکر است، علیرغم اینکه ممکن است در نگاه اول به نظر برسد سرعت جریان خروجی از کلکتور در حالتی که کلکتور دارای جریان مخالف است، بیشتر از حالتی است که جریان در کلکتور موافق است، با دقت در کانتورها می توان دریافت که این برداشت صحیح نیست.

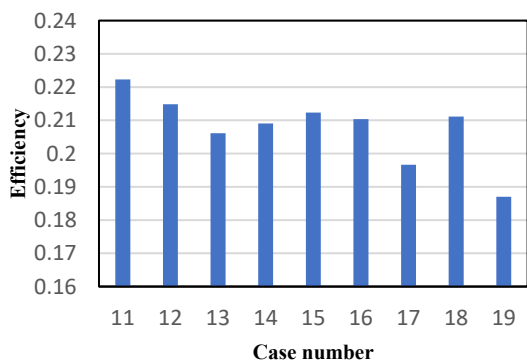
پس از انجام شبیه سازی‌ها در ۹ حالت ذکر شده، به بررسی نتایج به دست آمده از جمله راندمان کلی نیروگاه و توان تولیدی آن پرداخته شده است. نتایج به دست آمده در جدول ۷ و شکل های ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده اند. همچنین جهت بررسی بهتر اثر زاویه سقف کلکتور نتایج به دست آمده در این بخش با حالت بهینه بخش قبل مقایسه شده است.

جدول ۹- راندمان کلی و توان خروجی حاصل از نمونه های ۱۱ تا ۱۹

شماره نمونه	راندمان کلی (%)	توان خروجی (W)
۱۱	۲۲/۲۳	۴۲۶۱۷/۸
۱۲	۲۱/۴۸	۴۱۵۱۵/۱
۱۳	۲۰/۶۱	۳۹۶۱۹/۵
۱۴	۲۰/۹۱	۳۸۰۵۸/۴
۱۵	۲۱/۲۳	۳۷۵۱۸/۲
۱۶	۲۱/۰۴	۳۸۴۲۰/۲
۱۷	۱۹/۶۷	۳۵۰۲۳/۳
۱۸	۲۱/۱۱	۳۷۰۰۶/۸
۱۹	۱۸/۷۰	۳۲۷۶۶/۴
۵	۲۲/۱۰	۳۹۴۶۶/۳

یابد که این امر باعث می شود افت فشار توربین کاهش یافته و توان خروجی نیروگاه کاهش یابد. نکته دیگر آن است که هنگامی که کلکتور دارای جریان موافق است با تغییر نسبت ارتفاع طبقه اول به طبقه دوم تغییر محسوس در سرعت جریان هوا در خروجی کلکتور به وجود نمی آید؛ اما تغییر نسبت ارتفاع دو طبقه کلکتور هنگامی که جریان در کلکتور از نوع مخالف باشد، باعث تغییرات زیادی در سرعت خروجی از کلکتور می شود؛ همچنین با افزایش نسبت ارتفاع طبقه اول به طبقه دوم جریان درون دودکش و همچنین در ناحیه پس از کلکتور یکنواخت تر بوده و دارای سرعت کمتری است.

پس از یافتن بهترین حالت برای نوع ورودی و نسبت ارتفاع دو طبقه، به بررسی اثر زاویه سقف دو طبقه کلکتور پرداخته می شود. با توجه به اینکه شعاع کلکتور در حدود چند ده متر است، تغییر بسیار کوچکی در زاویه سقف کلکتور، به افزایش ارتفاع زیادی منجر می شود. به همین دلیل زوایایی که برای سقف کلکتور در نظر گرفته می شوند، معمولاً در حد چند درجه است. در این پروژه جهت بررسی اثر زاویه سقف دو طبقه کلکتور نیروگاه دودکش خورشیدی سه زاویه یک، دو و سه درجه در نظر گرفته شده است. این زاویه بر روی سقف هر دو طبقه کلکتور اعمال شده و اثر آن بر روی بازده کلی و توان خروجی نیروگاه دودکش خورشیدی بررسی شده است. به این ترتیب نمونه های انتخاب شده جهت بررسی در جدول زیر نشان داده شده است.



شکل ۱۸- نمودار مقایسه راندمان کلی نیروگاه بین نمونه های ۱۱ تا ۱۹

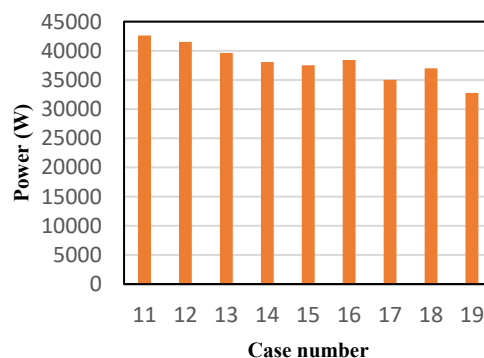
جدول ۸- جزییات هندسی نمونه های ۱۰ تا ۱۹

شماره نمونه	زاویه سقف طبقه	
	اول	دوم
۱۱	۰	۱
۱۲	۰	۲
۱۳	۰	۳
۱۴	۱	۱
۱۵	۱	۲
۱۶	۱	۳
۱۷	۲	۲
۱۸	۲	۳
۱۹	۳	۳

جدول ۹- پارامترهای مهم استخراج شده در نمونه‌های ۱۱ تا ۱۹

شماره نمونه	دبی خروجی کلکتور (kg/s)	دما خروجی کلکتور (K)	بازده کلکتور (%)	دبی حجمی توربین (m <sup>3</sup> /s)	افت فشار توربین (Pa)
۱۱	۱۱۸۳/۷	۳۲۱/۰۵	۶۳/۳۲	۹۶۶/۲۹	۵۵/۱۳
۱۲	۱۱۷۲/۹	۳۲۰/۵۳	۶۱/۲۰	۹۵۷/۴۷	۵۴/۲۰
۱۳	۱۱۵۴/۱	۳۲۰/۰۲	۵۸/۷۲	۹۴۲/۱۴	۵۲/۵۷
۱۴	۱۱۳۹/۸	۳۲۰/۵۶	۵۹/۵۶	۹۳۰/۴۸	۵۱/۱۳
۱۵	۱۱۳۳/۹	۳۲۰/۹۹	۶۰/۴۹	۹۲۵/۶۳	۵۰/۶۶
۱۶	۱۱۴۲/۳	۳۲۰/۶۴	۵۹/۹۲	۹۲۲/۴۶	۵۱/۵۰
۱۷	۱۱۰۸/۲	۳۱۹/۸۹	۵۶/۰۲	۹۰۴/۶۲	۴۸/۴۰
۱۸	۱۱۲۸/۰	۳۲۰/۹۸	۶۰/۱۴	۹۲۰/۸۲	۵۰/۲۷
۱۹	۱۰۷۴/۳	۳۱۹/۵۱	۵۳/۲۷	۸۷۶/۹۵	۴۶/۷۱
۱۰	۱۱۷۱/۸	۳۲۱/۱۴	۶۳/۰	۹۵۶/۵۸	۵۱/۵۷

با توجه به این جدول مشاهده می‌شود، دلیل آن که توان خروجی کل نیروگاه در سه نمونه اول بیشتر از نیروگاه با کلکتور یک طبقه است، عملکرد بهتر توربین است. افت فشار توربین در نمونه‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ به ترتیب ۷، ۵ و ۲ درصد بیشتر از نمونه شماره ۵ بوده که باعث شده است، توان کل خروجی نیروگاه در این سه حالت به ترتیب ۸، ۵/۲ و ۵/۴ درصد بیشتر از نمونه شماره ۵ باشد. اگر از نمونه شماره ۱۱ صرف نظر شود، مابقی نمونه‌ها عملکردی مشابه یا پایین‌تری در رابطه با دبی خروجی کلکتور، بازده کلکتور و دبی حجمی نسبت به نمونه ۵ دارند؛ بنابراین می‌توان دریافت علت آن که راندمان کلی نیروگاه در این نمونه‌ها (همه به جز نمونه ۱۱) کمتر از نمونه شماره ۵ است، آن است که در حالتی که کلکتور دو طبقه است با افزایش زاویه سقف‌های کلکتور خصوصاً سقف طبقه اول عملکرد کلکتور مختل می‌شود. به طور کلی واضح است که افزایش زاویه سقف کلکتور همواره به بهبود عملکرد منجر نمی‌شود (این امر در تحقیقات پیشین اثبات شده است) اما در اینجا به علت آن که کلکتور دو طبقه است، حساسیت عملکرد کلکتور به تغییر زاویه سقف کلکتور بیشتر شده است. در انتها نتیجه آن است، در صورتی که سقف طبقه دوم کلکتور دارای زاویه ۱ درجه باشد، عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی در مورد راندمان



شکل ۱۹- نمودار مقایسه توان خروجی نیروگاه بین نمونه های ۱۱ تا ۱۹

با دقت در جدول فوق و مقایسه نمونه‌های ۱۱ تا ۱۹ با نمونه ۵ که زاویه سقف هر دو طبقه کلکتور برابر با صفر درجه است، می‌توان در یافت توان خروجی نیروگاه تنها در ۳ نمونه و راندمان کلی نیروگاه تنها در یک نمونه (نمونه اول) بیشتر از حالتی است که سقف هر دو طبقه کلکتور زاویه دار نباشد. این نکته بسیار مهم است و نشان می‌دهد، تغییر کلکتور یک طبقه به دو طبقه تاثیر بسزایی بر روی جریان و عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی دارد؛ همچنین راندمان کلی نیروگاه در حالتی که زاویه سقف طبقه اول کلکتور برابر با صفر و زاویه سقف طبقه دوم برابر با یک درجه است بیشینه بوده و تنها نمونه‌ای است که راندمانی بیشتر از نمونه ۵ دارد. در مورد توان خروجی کل نیروگاه مشاهده می‌شود توان کل خروجی در سه نمونه ۱۱، ۱۲ و ۱۳ بیشتر از نمونه ۱۵ است که کلکتور یک طبقه است؛ همچنین مشاهده می‌شود در مابقی نمونه‌ها افزایش زاویه سقف دو طبقه کلکتور باعث کاهش توان کل خروجی نسبت به کلکتور یک طبقه شده است. جهت بررسی بیشتر بایستی به بررسی کمیت‌های مهم دیگر پرداخت. به این ترتیب دبی خروجی کلکتور، بازده کلکتور، دبی حجمی توربین و افت فشار توربین برای نمونه‌های مختلف در جدول ۹ آورده شده است.

به طبقه دوم باعث افزایش راندمان و توان کل تولیدی نیروگاه خواهد شد و به همین دلیل هندسه‌ای که نسبت ارتفاع طبقه اول به طبقه دوم آن برابر با ۸۰ درصد است به عنوان نمونه بهینه انتخاب شد.

۳- بررسی نسبت ارتفاع دو طبقه کلکتور در حالتی که جریان در کلکتور از نوع مخالف باشد نشان داد، راندمان کلی نیروگاه و توان کل خروجی از رابطه فوق پیروی نمی‌کند. در این حالت با افزایش این نسبت تا ۵۰ درصد راندمان و توان تولیدی کل افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد؛ بنابراین در صورتی که استفاده از این نوع نیروگاه دودکش خورشیدی مد نظر باشد، باید در طراحی ابعادی به این نکته دقت کرد.

۴- با بررسی اثر زاویه سقف دو طبقه کلکتور در هندسه بهینه مشاهده شد، راندمان کلی نیروگاه و همچنین توان تولیدی کل نیروگاه بسیار وابسته به زاویه سقف دو طبقه کلکتور است. هنگامی که زاویه سقف کلکتور از حدی بیشتر شود، راندمان کلی و توان خروجی نیروگاه نسبت به حالتی که سقف کلکتور افقی است کاهش می‌یابد؛ بنابراین بایستی در طراحی نیروگاه دودکش خورشیدی زاویه سقف دو طبقه کلکتور به دقت بررسی گردد. نتیجه شبیه سازی نشان داد، هنگامی که زاویه سقف طبقه اول صفر و طبقه دوم یک درجه است، نیروگاه در بهینه‌ترین حالت عملکردی بوده و توان خروجی نیروگاه بیشینه است.

## فهرست منابع

- [1] Pastohr, H., Kornadt, O., & Gürlebeck, K. (2004). Numerical and analytical calculations of the temperature and flow field in the upwind power plant. *Int. J. of Energy Research*, 28(6), 495-510.
- [2] Ming, T., Liu, W., Pan, Y., & Xu, G. (2008). Numerical analysis of flow and heat transfer characteristics in solar chimney power plants with energy storage layer. *Energy Conversion and Management*, 49(10), 2872-2879.
- [3] Maia, C. B., Ferreira, A. G., Valle, R. M., & Cortez, M. F. (2009). Theoretical evaluation of the influence of geometric parameters and materials on the behavior of the airflow in a solar chimney. *Computers & Fluids*, 38(3), 625-636.
- [4] Chergui, T., Larbi, S., & Bouhdjar, A. (2010). Thermo-hydrodynamic aspect analysis of flows in solar chimney power plants—A case study.

کلی نیروگاه و توان تولیدی خروجی بهینه‌ترین حالت بوده است.

## نتیجه گیری

در این پژوهش به صورت عددی در نرم افزار انسیس فلونت به بررسی عملکرد و بهینه‌سازی ابعادی بازده و توان تولیدی نیروگاه دودکش خورشیدی دارای کلکتور دو طبقه پرداخته شد. بهینه‌سازی نیروگاه در سه مرحله کلی انجام شده است. در فاز اول نوع کلکتور که می‌تواند جریان موازی یا مخالف باشد به همراه نسبت ارتفاع دو طبقه کلکتور مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور برای جریان موافق و مخالف ۵ هندسه با نسبت ارتفاع مختلف در نظر گرفته شد و جریان هوا در نیروگاه دودکش خورشیدی در آن‌ها بررسی شد تا حالتی به دست آید که بیشترین راندمان و توان تولیدی را دارد. پس از آن در فاز دوم پژوهش به بررسی اثر زاویه سقف هر دو طبقه کلکتور بر روی عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی پرداخته شد. ۹ نمونه مختلف که سقف دو طبقه کلکتور در آن‌ها زاویه صفر، یک، دو و سه درجه دارد انتخاب شد و حالت بهینه بین آن‌ها به دست آورده شد.

با توجه به این که هندسه و جریان در نیروگاه دودکش خورشیدی متقارن محوری می‌باشد، جهت کاهش میزان محاسبات به صورت دو بعدی متقارن محوری انجام شده‌اند. همچنین با توجه به این که هدف یافتن راندمان و توان تولیدی در حالت پایدار کارکرد نیروگاه بوده، جریان به صورت پایا مدل سازی شده است. جهت مدل سازی آشفتگی جریان از مدل توربولانسی  $k\epsilon$  Realizable با تابع دیواره Enhanced Wall Treatment استفاده شده است. با توجه به این که در این تحقیق محرک اصلی جریان تابش خورشید و گرم شدن هوا درون نیروگاه دودکش خورشیدی می‌باشد، از مدل تشعشعی DO جهت مدل سازی تشعشع استفاده شده است. نتایج پژوهش به طور خلاصه عبارتند از:

- ۱- با بررسی نیروگاه دودکش خورشیدی با کلکتور دو طبقه جریان موافق و مخالف نشان داده شده است که توان تولیدی نیروگاه دودکش خورشیدی در حالتی که جریان در دو طبقه کلکتور مخالف باشد، بسیار کمتر از حالتی است که جریان دو طبقه موافق باشد.
- ۲- با نسبت ارتفاع دو طبقه کلکتور در حالتی که جریان در کلکتور موافق باشد نتیجه شد افزایش نسبت ارتفاع طبقه اول

- [14] Nasraoui, H., Driss, Z., & Kchaou, H. (2020). Novel collector design for enhancing the performance of solar chimney power plant. *Renewable Energy*, 145, 1658-1671.
- [15] Das, P., & Chandramohan, V. P. (2020). 3D numerical study on estimating flow and performance parameters of solar updraft tower (SUT) plant: Impact of divergent angle of chimney, ambient temperature, solar flux and turbine efficiency. *J. Cleaner Production*, 256, 120353.
- [16] Kebabsa, H., Lounici, M. S., Lebbi, M., & Daimallah, A. (2020). Thermo-hydrodynamic behavior of an innovative solar chimney. *Renewable energy*, 145, 2074-2090.
- [17] Singh, A. P., Kumar, A., & Singh, O. P. (2021). A novel concept of integrating bell-mouth inlet in converging-diverging solar chimney power plant. *Renewable Energy*, 169, 318-334.
- [18] Ghalamchi, M., Kasaeian, A., Ghalamchi, M., & Mirzahosseini, A. H. (2016). An experimental study on the thermal performance of a solar chimney with different dimensional parameters. *Renewable Energy*, 91, 477-483.
- [19] Bouabidi, A., Ayadi, A., Nasraoui, H., Driss, Z., & Abid, M. S. (2018). Study of solar chimney in Tunisia: Effect of the chimney configurations on the local flow characteristics. *Energy and Buildings*, 169, 27-38.
- [20] Mandal, D. K., Pradhan, S., Chakraborty, R., Barman, A., & Biswas, N. (2022). Experimental investigation of a solar chimney power plant and its numerical verification for performance enhancement. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101786.
- [21] Rezaei, L., Saeidi, S., Sapi, A., Senoukesh, M. A., Grof, G., Chen, W. H., ... & Klemeš, J. J. (2023). Efficiency improvement of the solar chimneys by insertion of hanging metallic tubes in the collector: Experiment and computational fluid dynamics simulation. *J. Cleaner Production*, 415, 137692.
- [22] Mandal, D. K., Biswas, N., Manna, N. K., & Benim, A. C. (2024). Impact of chimney divergence and sloped absorber on energy efficacy of a solar chimney power plant (SCPP). *Ain Shams Eng. J.*, 15(2), 102390.
- [5] Sangi, R., Amidpour, M., & Hosseinizadeh, B. (2011). Modeling and numerical simulation of solar chimney power plants. *Solar energy*, 85(5), 829-838.
- [6] Xu, G., Ming, T., Pan, Y., Meng, F., & Zhou, C. (2011). Numerical analysis on the performance of solar chimney power plant system. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 876-883.
- [7] Hamdan, M. O. (2013). Analysis of solar chimney power plant utilizing chimney discrete model. *Renewable energy*, 56, 50-54.
- [8] Fasel, H. F., Meng, F., Shams, E., & Gross, A. (2013). CFD analysis for solar chimney power plants. *Solar energy*, 98, 12-22.
- [9] Ayadi, A., Driss, Z., Bouabidi, A., & Abid, M. S. (2017). Experimental and numerical study of the impact of the collector roof inclination on the performance of a solar chimney power plant. *Energy and Buildings*, 139, 263-276.
- [10] Ayadi, A., Driss, Z., & Abid, M. S. (2020). The impact of placing obstacles on the distribution of the airflow inside a solar chimney. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 39(3), e13379.
- [11] Najm, O. A., & Shaaban, S. (2018). Numerical investigation and optimization of the solar chimney collector performance and power density. *Energy conversion and management*, 168, 150-161.
- [12] Abdelmohimen, M. A., & Algarni, S. A. (2018). Numerical investigation of solar chimney power plants performance for Saudi Arabia weather conditions. *Sustainable Cities and Society*, 38, 1-8.
- [13] Nasraoui, H., Ayadi, A., Bouabidi, A., Driss, Z., & Kchaou, H. (2019). Influence of the collector concavity on the airflow behavior within solar chimney power plant. *Int. J. Green Energy*, 16(15), 1562-1570.
- [14] Sedighi, A. A., Deldoost, Z., & Karambasi, B. M. (2020). Effect of thermal energy storage layer porosity on performance of solar chimney power plant considering turbine pressure drop. *Energy*, 194, 116859.