

## ارزیابی تغییرات سرعت در یک دودکش خورشیدی

<sup>۱</sup> سید حمید میر سالاری، <sup>۲</sup> حسین مهدوی مقدم \*

### چکیده

افزایش روز افزون مصرف انرژی حاصل از سوخت های فسیلی از یک سو و آلودگی های تولید شده توسط آن از سوی دیگر همواره دغدغه ی جایگزینی انرژی های پاک و تجدید پذیر به جای سوخت های فسیلی را در ذهن بشر ایجاد کرده است. تولید الکتریسیته از طریق انرژی پاک می تواند راه حلی مناسب برای کاهش انتشار آلاینده ها و جلوگیری از گرمایش روز افزون زمین باشد. از در دسترس ترین انواع انرژی های تجدید پذیر می توان به انرژی خورشیدی اشاره کرد که می توان از آن در تولید الکتریسیته در نیروگاه های دودکش خورشیدی استفاده کرد. هدف از این پژوهش ، تلاش برای تشخیص روند تغییرات سرعت جریان در طول دودکش در اثر تغییرات ایجاد شده بر روی هندسه ی دودکش به منظور یافتن هندسه ی بهینه بوده است. برای این منظور از نرم افزار انسیس فلونت بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی جهت حل مدل های ارائه شده استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که تغییر هندسه تاثیر قابل توجهی بر سرعت جریان و در نتیجه توان نیروگاه خواهد داشت. همچنین با در نظر گرفتن رابطه ای متناسب میان هندسه و شرایط محیطی از جمله ارتفاع محل نیروگاه می توان به توان مطلوب تری دست یافت.

### تاریخ دریافت:

۱۳۹۹ / ۹ / ۳۰

### تاریخ پذیرش:

۱۳۹۹ / ۱۱ / ۱۳

### کلمات کلیدی:

دودکش خورشیدی،  
تغییرات سرعت،  
انرژی خورشیدی.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی،

hamid.mirsalari@yahoo.com

واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

mahdavy@kntu.ac.ir

۲. استادیار دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی ، تهران (نویسنده مسئول)

## ۱. مقدمه

بی‌تردید تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر یکی از مهم‌ترین دیدگاه‌ها در چشم‌اندازهای آینده است و در این زمینه نیروگاه‌های دودکش خورشیدی یکی از سیستم‌های جدید در تولید برق از انرژی خورشید است. امروزه افزایش تقاضا برای انرژی از یک‌سو و کاهش منابع فسیلی از سوی دیگر اهمیت استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر را بیش‌ازپیش نمایان می‌کند. افزایش روز افزون استفاده از انرژی‌های حاصل از سوخت‌های فسیلی و چشم‌انداز نامناسب ذخایر موجود برای نسل‌های آینده همواره چالش جایگزین کردن انرژی‌هایی پایدار و تمام نشدنی به جای سوخت‌های مرسوم کنونی را در پیش روی بشر قرار داده است. تولید الکتریسیته با استفاده از سوخت‌های فسیلی موجب انتشار آلاینده‌ها در اتمسفر و اثرات گلخانه‌ای می‌شود، بنابراین جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند راه حل مناسبی جهت کاهش این اثرات مخرب باشد.

دودکش خورشیدی به‌عنوان یکی از راه‌های استفاده از انرژی خورشیدی برای تولید برق است. بر این اساس یکی از بهترین روش‌ها جهت دستیابی به راه‌هایی جهت کاستن از میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است و در این راستا می‌توان فناوری «دودکش خورشیدی» را معرفی کرد. اگر بخواهیم انرژی‌های تجدیدپذیر از کاربرد وسیعی برخوردار شوند باید که فناوری‌های ارائه‌شده ساده و قابل‌اعتماد بوده و برای کشورهای کمتر توسعه‌یافته نیز مشکلات فنی به همراه نداشته باشد و بتوان از منابع محدود مواد خام آن‌ها نیز استفاده کرد. در مرحله بعدی نیز باید به آب زیاد نیاز نداشته باشد. فناوری دودکش دارای این شرایط است.

بررسی‌های اقتصادی نشان داده است که اگر این نیروگاه‌ها در مقیاس بزرگ (بزرگ‌تر یا مساوی ۱۰۰ مگاوات) ساخته شوند، قیمت برق تولیدی آن‌ها قابل‌مقایسه با برق نیروگاه‌های متداول است. برای این موضوع کافی است که بتوان انرژی خورشیدی را در مقیاس‌های بزرگ نیز به خدمت گرفت. بر این اساس می‌توان انتظار داشت که دودکش‌های خورشیدی بتوانند در زمینه‌ی تولید برق برای مناطق پر آفتاب نقش مهمی را ایفا کنند. فناوری دودکش خورشیدی در واقع از سه عنصر اصلی تشکیل شده است که اولی جمع‌کننده هوا و عنصر بعدی برج یا همان دودکش و قسمت آخر نیز توربین‌های باد آن است. تحقیقاتی در این زمینه انجام شده است.

## ۲. مروری بر پژوهش‌های پیشین

در سال ۱۹۸۲ یک نمونه آزمایشگاهی بزرگ دودکش خورشیدی در ۱۵۰ کیلومتری جنوب مادرید اسپانیا در منطقه مانزاناراس ساخته شد که در بین سال‌های ۱۹۸۲ تا ۱۹۸۳ نتایج و ویژگی‌های ساختاری حاصل از این نمونه تجربی توسط هاف و همکاران مورد ارزیابی قرار گرفته و در مجلات معتبر منتشر گردید [۱۲]. سینگ و همکاران (۲۰۰۰) بر اساس دیدگاه‌های انرژی و آگزروژی نیروگاه سیکل رنکین را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۶]. پرتویوس و کروگر (۲۰۰۲) در پژوهشی اثر به‌کارگیری یک معادله انتقال حرارت جدید، ضرایب افت دقیق تر ورودی توربین و انواع زمین‌ها را روی عملکرد یک نیروگاه خورشیدی مقیاس بزرگ بررسی نمودند [۱۳]. روبرت و همکارانش (۲۰۰۳) گزارش‌هایی در خصوص نتایج حاصل از محاسبات دینامیک سیالات را به دست آوردند و توربین بهینه برای یک نیروگاه ۲۰۰ مگاواتی را منتشر کردند [۱۴]. دای و همکاران (۲۰۰۳) عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی در منطقه شمال شرق چین را مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع برج باعث بهبود عملکرد دودکش خورشیدی شده است و همچنین افزایش سطح کلکتور باعث افزایش توان خروجی در دودکش خورشیدی شده است [۸]. پیترو شوآرزبول (۲۰۰۶) به طراحی و تحلیل یک نیروگاه خورشیدی مجهز به برج خورشیدی پرداخت و اثر استفاده از انرژی خورشیدی در بالا بردن بازده سیکل و همچنین از لحاظ اقتصادی بررسی نمود [۱۵]. کونسریسوک و چیتسومونگ (۲۰۰۹) مدل‌سازی عددی را روی پنج نوع دودکش خورشیدی انجام دادند. این دودکش‌ها در هندسه و در گرفتن میزان تابش از خورشید باهم تفاوت داشتند. از طرفی دیگر آنان روی این ۵ نوع دودکش خورشیدی تحلیل سیالاتی محاسباتی انجام دادند و با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی مقایسه کردند [۱۱]. باقرنژاد و یعقوبی (۱۳۸۸) بهینه‌سازی ترموآکونومیک نیروگاه سیکل ترکیبی خورشیدی یزد را مطالعه نموده‌اند. آنها با مدل‌سازی روش بهینه‌سازی چندمتغیره به روش الگوریتم ژنیتک، بهترین شرایط کاری برای داشتن کمترین اتلاف انرژی و کمترین هزینه را برای بخش‌های مختلف سیکل تعیین نموده‌اند و نتیجه این بررسی کاهش هزینه تولید برق می‌باشد [۲]. سنگی و همکاران (۱۳۹۰) در پژوهشی مدل ترکیبی جدیدی از دودکش خورشیدی و آب‌شیرین‌کن جهت تولید هم‌زمان توان و آب شیرین معرفی کردند. در این پژوهش رطوبت زنی بعد از عبور هوا از کلکتور، قبل و بعد از توربین مورد بررسی قرار گرفت [۱۲]. فخاری و حیدری (۱۳۹۲) در تحقیقی نشان دادند که کوچک و بزرگی شعاع کلکتور و ارتفاع تأییراتی بر روی سرعت ورودی و خروجی هوا و عملکرد دودکش دارد [۴].

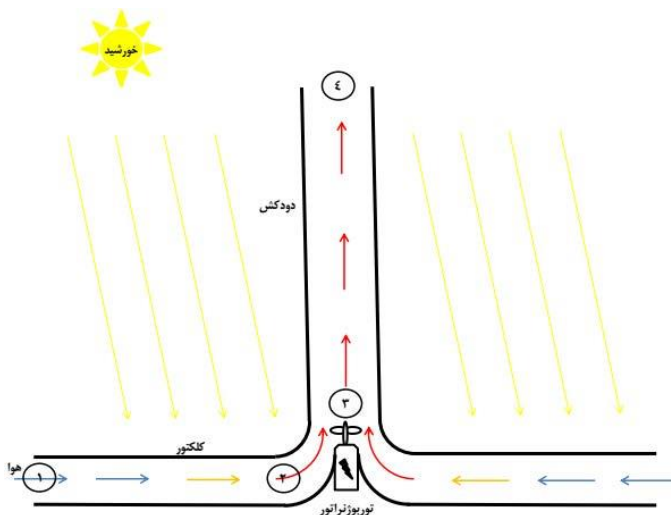
کازلمیان و همکارانش (۲۰۱۲) در پژوهشی جابجایی طبیعی درون یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده با دماهای متفاوت در بالا و پایین بررسی کردند [۹]. سامرتی و همکارانش (۲۰۱۵) مدل‌سازی یک میکروتوربین گاز که از انرژی خورشیدی استفاده می‌کند، انجام دادند و اثر استفاده از انرژی خورشید را روی عملکرد محفظه احتراق و مصرف سوخت آن بررسی نمودند [۷]. کسائیان و همکاران (۲۰۱۷) شبیه‌سازی سه‌بعدی از دودکش‌های خورشیدی با در نظر گرفتن تعداد پره‌ها و سرعت‌های متفاوت در ۱۲ هندسه متفاوت ایجاد شده را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش متوجه شدند با تعداد ثابتی پره، افزایش سرعت دورانی سبب کاهش دبی جرمی هوا، افزایش گشتاور و در نتیجه افزایش توان خروجی می‌شود. همچنین افزایش ارتفاع دودکش و افزایش شعاع کلکتور باعث تقویت نرخ دبی جرمی و توان خروجی شده است [۹]. در سال ۱۳۹۵ کسائیان و همکاران [6] به بررسی تئوری بهینه‌سازی دودکش خورشیدی برای رسیدن به بالاترین توان پرداختند و مقادیر بهینه‌ای برای ارتفاع و شعاع کلکتور، ارتفاع و شعاع دودکش و فاصله توربین از زمین ارائه کردند. رجبی پور و همکارانش (۱۳۹۶) آنالیز سیستم ترکیبی شامل کلکتور خورشیدی سهموی، توربین گاز و پیل سوختی را انجام دادند. آنها دریافتند که بیشترین میزان تخریب انرژی در پیل سوختی و محفظه احتراق به دلیل انجام واکنش‌های شیمیایی رخ می‌دهد [۳]. در سال ۱۳۹۷ افشون و همکاران [1] به بررسی عملکرد تلفیق بادگیر و دودکش خورشیدی برای صرفه جویی در مصرف انرژی و کاهش مشکلات زیست محیطی پرداختند. در سال ۲۰۱۸ میلادی، توقرای و همکاران [۱۷] به بررسی تاثیر پارامترهای هندسی بر روی بازدهی نیروگاه دودکش خورشیدی پرداختند. آنها برای مدل‌سازی جریان آشفته از مدل کا-اپسیلون استفاده کردند. آنها معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی را در حالت سه بعدی و به روش حجم محدود در داخل دودکش خورشیدی حل نمودند. متغیرهای مورد بررسی توسط آنها شامل شعاع کلکتور، ارتفاع کلکتور، ارتفاع دودکش، شعاع دودکش و شار حرارتی بود. آنها تاثیر تغییر متغیرهای نام برده بر روی توزیع دما، سرعت، فشار و بازدهی و توان تولیدی خروجی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج خروجی آنها نشان می‌دهد که توان خروجی و بازدهی نیروگاه دودکش خورشیدی رابطه مستقیم با ارتفاع و شعاع کلکتور خورشیدی دارد اما با ارتفاع کلکتور رابطه معکوس دارد. در سال ۲۰۱۹ میلادی، هو و همکاران [۱۸] به بررسی تجربی و تئوری دودکش خورشیدی در ساختمان با شار حرارتی دیواره ثابت پرداختند. آنها عنوان نمودند که استفاده از دودکش خورشیدی در ساختمان‌ها اغلب با هدف بهبود تهویه طبیعی استفاده می‌شود. آنها به دو صورت عددی و تجربی

مسئله را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها توزیع دمای هوا، توزیع سرعت هوا، پدیده جریان برگشتی را مورد بررسی قرار دادند.

بر این اساس در پژوهش حاضر هدف بررسی تغییرات سرعت در طول دودکش خورشیدی در سطح مقطع‌های مختلف (دایره، بیضی، مستطیل، همگرا) می‌باشد. همچنین فرضیه‌هایی به صورت پیش فرض در نظر گرفته شده‌اند. تمام داده‌ها و متغیرهای استفاده شده که شامل دما، فشار، ابعاد هندسی کلکتور، ارتفاع از سطح دریا طبق نمونه مانزاس اسپانیا می‌باشد. جریان ۳ بعدی بوده و جریان به صورت حالت پایا در نظر گرفته شده است.

### ۳. شبیه‌سازی عددی و بررسی عملکرد دودکش خورشیدی

در شکل یک می‌توان یک هندسه دو بعدی از مطالعه حاضر را مشاهده کرد که از یک دودکش به ارتفاع ۱۹۴ متر و شعاع ۵/۰۸ متر و کلکتور به شعاع ۱۲۲ متر و ارتفاع ۱/۸۵ متر از سطح زمین از جنس شیشه تشکیل شده است. هندسه برج دودکش خورشیدی در مختصات استوانه‌ای به صورت یک حفره که از پایین به کلکتور و از بالا به جو راه دارد، مدل شده است. همچنین در جدول‌های یک و دو ابعاد هندسی به کار برده شده برای هر حالت بیان شده است.



شکل ۱. هندسه مسئله [6]

جدول ۱. ابعاد و پارامترهای هندسی برج خورشیدی

ابعاد [m]	پارامتر هندسی
۱۹۴	ارتفاع دودکش (HT)
۵/۰۸	شعاع دودکش (R T)
۱/۸۵	ارتفاع کلکتور (Hc)
۱۲۲	شعاع کلکتور (R c)
۰/۰۶	ضخامت شیشه (t g)

جدول ۲. ابعاد و پارامترهای هندسی برج خورشیدی

ابعاد [m]		شکل
طول: ۱۲/۵	عرض: ۶/۵	مستطیل
شعاع بزرگ: ۱۳	شعاع کوچک: ۸	بیضی
شعاع بزرگ: ۶۰	شعاع کوچک: ۵	همگرا

### شرایط مرزی

سیال عامل مورد استفاده به عنوان جریان آزاد هوا با دمای ورودی ۲۹۸ درجه کلوین در نظر گرفته شده است. همچنین شرایط ورودی کلکتور با فشار ۱ اتمسفر برابر فشار سطح دریای آزاد اعمال شده است. به منظور شبیه‌سازی سقف کلکتور از شیشه نیمه شفاف استفاده شده است. همچنین دیوارهای دودکش نیز به صورت عایق در نظر گرفته شده است و کل مسئله به صورت سه بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش حاضر برای شبیه‌سازی تابش خورشید از مدل SOLAR RAY TRACING استفاده شده است. میزان تابش مستقیم از گزینه SOLAR COLCLATOR و بر حسب طول و عرض جغرافیایی محل نیروگاه مانزاس و میزان تابش پخشی به صورت ثابت و ۴۸/۵ درصد کل تابش در نظر گرفته شده است.

### معادلات حاکم

نیروگاه دودکش خورشیدی شامل یک کلکتور خورشیدی و دودکش می‌باشد که سطح انرژی هوا را توسط اثرات گلخانه‌ای افزایش می‌دهد. همچنین باید در نظر داشت که جریان هوا توسط اثر بویانسی در سطح دودکش خورشیدی به حرکت در می‌آید.

حرکت جریان بر طبق معادلات مدل ریاضی متقارن مورد بررسی قرار گرفت. در همه روابط ویژگی‌های سیال ثابت در نظر گرفته شد و همچنین اثرات تراکم پذیری ناچیز در نظر گرفته شد. فرمول‌های تأثیر باد ناچیز فرض شده است و جریان به صورت حالت پایا در نظر گرفته شد که با تغییر دما تغییری در پارامترهای جریان حاصل نمی‌شود. تابش تشعشعی به صورت عمود بر کلکتور در نظر گرفته شده است. همچنین دیواره دودکش حرارتی به صورت آدیاباتیک در نظر گرفته شده و انتقال حرارتی بین دیواره دودکش و هوای محیط بیرون وجود ندارد. فرمول‌های اساسی حاکم بر جریان سیال تراکم‌پذیر برای حالت پایا و با در نظر گرفتن جریان آشفته به صورت سه بعدی در دستگاه مختصات دکارتی به صورت زیر نوشته می‌شود.

معادله پیوستگی:

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \quad (2-1)$$

معادله ناویر استوکس:

معادله اندازه حرکت برای سیال با خواص ترموفیزیکی ثابت به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned}$$

معادله انرژی:

$$\begin{aligned} \rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ = \rho \dot{q}_g + k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \\ + 2 \mu \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] \\ + \mu \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

عدد بی بعدی که حاکم بر این مسئله است، عدد رایلی است. عدد رایلی عبارت است از :

$$Ra = Gr \times Pr \quad (۱)$$

$$Gr = g \beta \Delta T \frac{H^3}{\nu^2} \quad (۲)$$

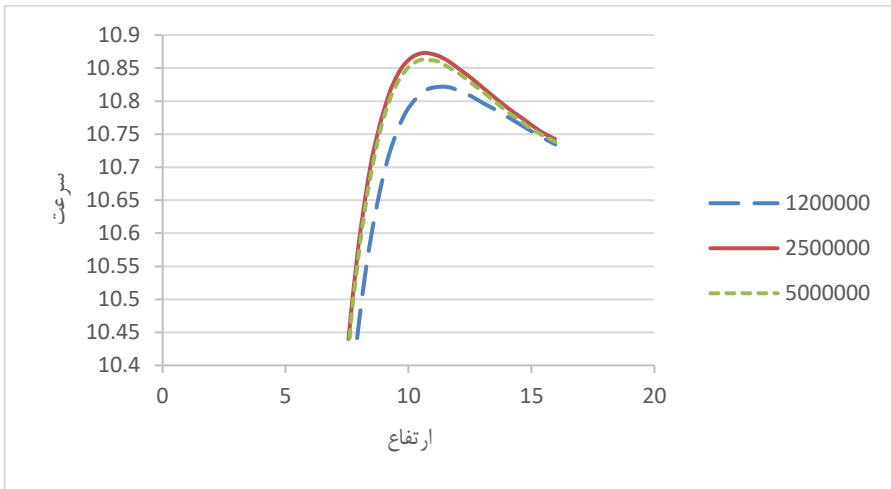
$$Pr = \frac{\rho c_p}{k} \quad (۳)$$

محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که این اعداد همگی از  $10^{10}$  شروع می‌شوند که می‌توان جریان سیال را در تمامی حالات به صورت آشفتنه در نظر گرفت. همچنین به منظور شبیه‌سازی بهتر از حالت RNG مدل (کا - افسیلن) استفاده شده است چرا که این مدل توانایی خوبی در شبیه‌سازی جریان‌های فشار معکوس و جریان چرخشی دارد.

### استقلال از شبکه

مدل‌های ارائه شده در این پژوهش را در مقیاس نمونه ساخته شده در مانزاس اسپانیا در نظر گرفته‌ایم تا بتوانیم به تحلیل بهتری از نتایج دست یابیم. به منظور رسم هندسه مدل مورد نظر از نرم‌افزار فلوئنت استفاده کرده‌ایم. بدیهی است که هرگونه حل عددی و شبیه‌سازی موفق نیازمند استفاده از یک شبکه‌بندی منظم و یکپارچه جهت تحلیل صحیح از وضعیت اعمال شده بر هندسه مورد نظر می‌باشد. برای شبکه‌بندی استفاده شده در این پروژه از حالت چهار ضلعی استفاده شده که پس از بررسی‌های انجام شده تعداد مش‌های مطلوب هندسه در بازه‌های نزدیک به ۲۵۰۰۰۰۰ سلول گسسته تشخیص داده شد تا علاوه بر کاهش حجم محاسبات دقت کافی را نیز داشته باشیم. به منظور دستیابی به تعداد مش بهینه و استقلال از شبکه تعداد مختلف شبکه‌بندی در بازه ۱۰۰۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفت.

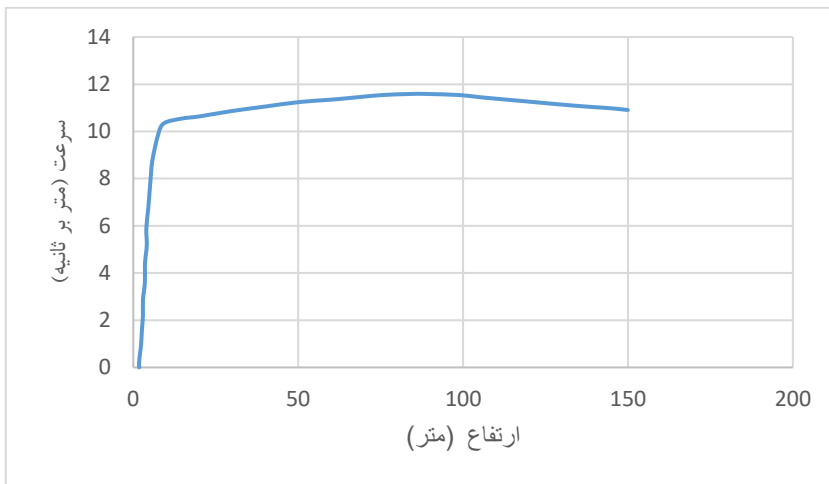




شکل ۲. تاثیر ابعاد دامنه محاسباتی بر سرعت

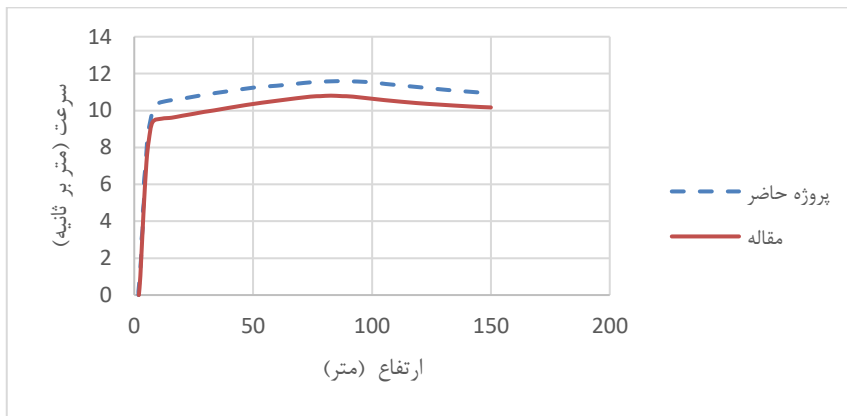
### اعتبار سنجی

برای اثبات درستی پژوهش، نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از نیروگاه مانزاس اسپانیا و نتایج تحقیق امیری و احمدی [۱] که آنها نیز نتایج خود را با سنگی و همکاران [۱۲] مقایسه کرده اند، سنجیده شد. از آنجایی که نتایج به دست آمده توسط امیری و همکاران تا ارتفاع ۱۵۰ متر بوده در نتیجه ابتدا برای صحت سنجی نتایج به دست آمده ارتفاع دودکش را ۱۵۰ متر در نظر گرفته که تغییرات سرعت در این حالت در شکل ۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۳: تغییرات سرعت  $V_y$  جریان هوا در مرکز دودکش

در شکل ۴ پروفیل سرعت در داخل برج به دست آمده از حل عددی حاضر با نتایج حاصل از امیری مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۴ قابل رویت می‌باشد نمودار حاصل از حل عددی و امیری مطابقت قابل قبولی را دارا می‌باشند. در هر دو مدل جریان در ابتدا با شیب تندی افزایش سرعت یافته تا به بیشینه خود رسیده و پس از افتی ناچیز به شرایط پایداری می‌رسد.



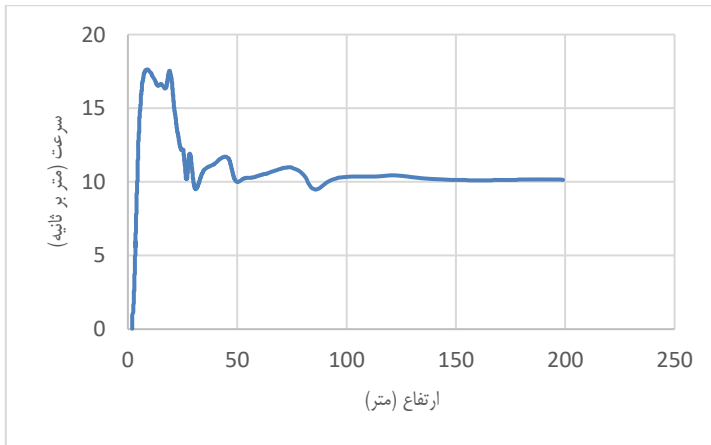
شکل ۴- مقایسه تغییرات سرعت جریان هوا در ارتفاعات مختلف

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود نمودار حاصل از حل عددی و امیری بجز در پیک سرعت در سایر نقاط با دقت قابل قبولی روندی یکسان را نشان می‌دهد و در هر دو مدل با حرکت به سمت

بالای برج سرعت افزایش می‌یابد و همزمان با افزایش ارتفاع روند افزایشی سرعت کاهش می‌یابد. حداکثر میزان خطا نیز چیزی حدود ۱۰٪ می‌باشد.

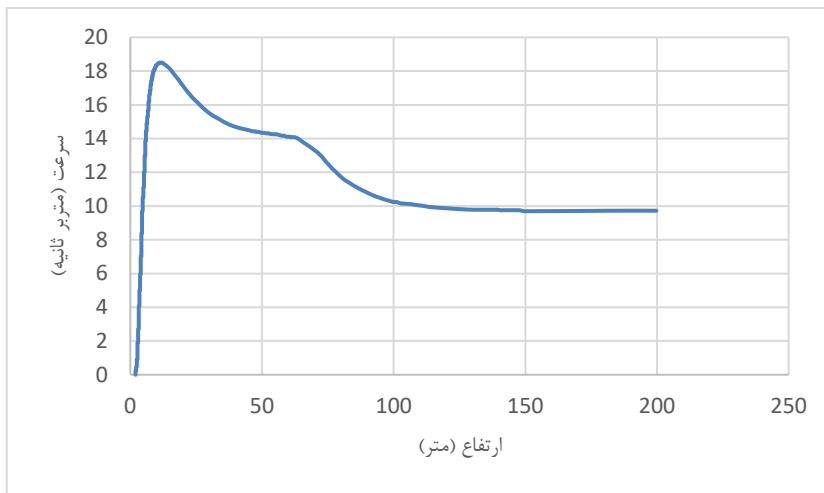
#### ۴. نتایج و بحث

شکل ۵ کانتور سرعت در هندسه بیضی شکل برای دودکش در ابعاد نیروگاه مانزاس را نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که تغییرات سرعت ابتدای دودکش بیشتر بوده و به بیشترین مقدار خود در ابتدای دودکش رسیده و با افزایش ارتفاع رفته رفته تغییرات و مقدار سرعت کاهش یافته و به مقدار ثابتی در انتها و خروجی دودکش می‌رسد. با توجه به این که تقریباً بیست متر اول دودکش دارای هندسه همگرا می‌باشد تا به گلویی برسیم که توربین در آن جا قرار می‌گیرد بدیهی است که به خاطر کاهش سطح مقطع سرعت در این بخش افزایش یابد اما بعد از گلویی هندسه سطح مقطع تقریباً ثابت می‌باشد و دارای یک زاویه ملایم واگرایی است که این زاویه بسیار ناچیز است. از طرفی به دلیل کاهش دمای هوا و در نتیجه کاهش چگالی و همچنین افزایش تلفات اصطکاکی در جریان سرعت کاهش می‌یابد تا جریان به یک شرایط پایا و توسعه یافته برسد که در این حالت تقریباً مقدار سرعت ثابت باقی می‌ماند. بنابراین در شکل ۴ قله اول نشان دهنده جریان در گلویی می‌باشد که بعد از عبور از این قله به دلیل افت دمای جریان و همچنین شکل گیری لایه مرزی سرعت و همچنین تلفات اصطکاکی سرعت کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که بیشینه سرعت در این حالت که در گلویی حاصل می‌شود در حدود ۱۷/۸ متر بر ثانیه می‌باشد.



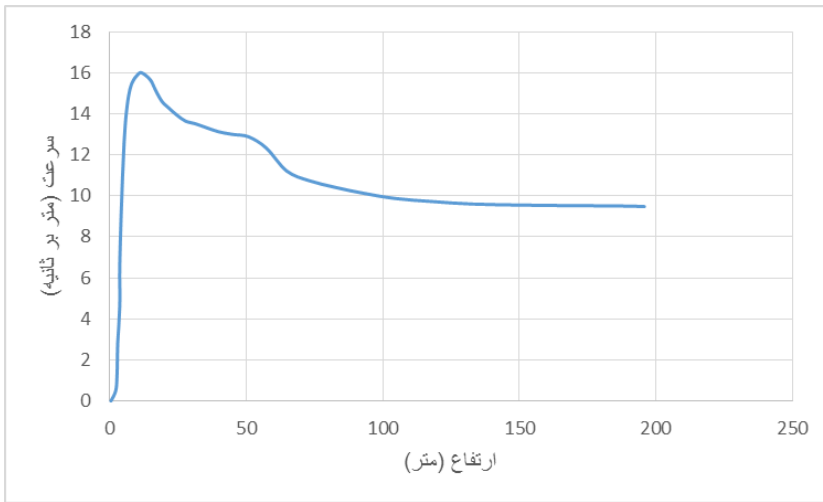
شکل ۵. تغییرات سرعت در طول دودکش در حالت بیضی

شکل ۶ کانتور سرعت سیال درون دودکش دایره‌ای شکل را نشان می‌دهد که در ابتدای برج سرعت با شیب زیادی افزایش داشته و پس از رسیدن به بالاترین حد با شیبی ملایم کاهش یافته تا به مقداری ثابت در خروجی دودکش برسد که علت آن بیشتر عنوان شد. در این حالت بیشینه سرعت در حدود  $18/5$  متر بر ثانیه می‌باشد که چیزی در حدود  $0/7$  متر بر ثانیه بیش از سرعت بیشینه برای مقطع بیضوی می‌باشد. باتوجه به این که توان تولیدی را بطه مستقیم با سرعت جریان هوا دارد بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تولید توان نیروگاه دودکش خورشیدی با مقطع دایروی بهتر از مقطع بیضی عمل می‌کند.



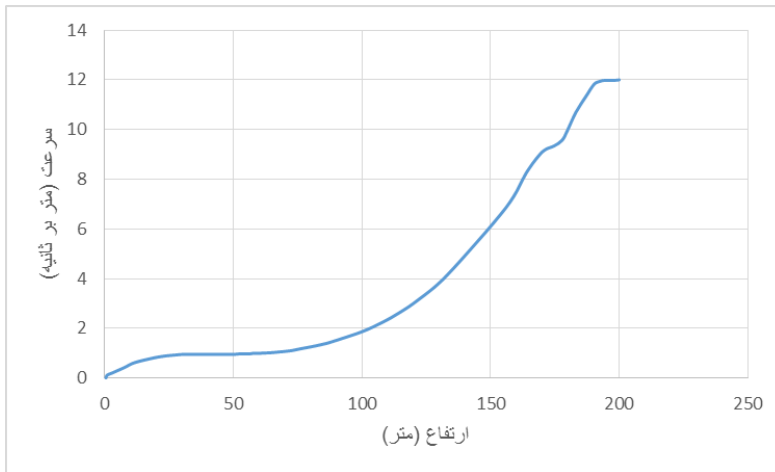
شکل ۶. تغییرات سرعت در طول دودکش در حالت دایره

در شکل ۷ حالت مستطیل مشاهده می‌شود که در این حالت نیز به مانند حالات پیشین سرعت در ابتدای دودکش افزایشی و پس از آن به تدریج کاهش یافته و به مقدار ثابتی می‌رسد. همان طور که مشاهده می‌شود شیب صعودی پروفیل سرعت تا قبل از گلوئی در این حالت نسبت به دو حالت دیگر کمتر است و در نتیجه مقدار بیشینه سرعت نیز کمتر می‌باشد که علت آن را می‌توان در قطر هیدرولیکی سطح مقطع و همچنین شکل گیری جریان‌های سکون و افزایش تلفات اصطکاکی جست و جو کرد.



شکل ۷. تغییرات سرعت در طول دودکش در حالت مستطیل

شکل ۸ تغییرات سرعت جریان در دودکش همگرا در نیروگاه دودکش خورشیدی را نشان می‌دهد. مجدداً مشاهده می‌شود که تغییرات سرعت در دودکش همگرا به صورت صعودی تا انتهای دودکش می‌باشد که با توجه به هندسه برج طبیعی به نظر می‌رسد. نکته حایز اهمیت بیشینه سرعت جریان هوا می‌باشد که در نقطه خروجی از برج حاصل می‌شود و برابر با ۱۲ متر بر ثانیه می‌باشد. این سرعت در مقایسه با بیشینه سرعت خروجی برج با سطح مقطع دایروی، بیضوی و حتی مستطیلی بسیار کمتر می‌باشد. علت این امر را این گونه می‌توان عنوان کرد که در این حالت تغییرات فشار استاتیک در طول دودکش زیاد است علاوه بر این در ارتفاع ۲۰۰ متری از سطح زمین چگالی هوا به صورت تقریباً محسوسی کاهش می‌یابد که این موضوع نیز خود تاثیر منفی بر روی شکل گیری نیروهای شناوری دارد. همچنین در دودکش‌های قبلی توربین در ارتفاع حدود ۲۰ متری نصب می‌شد که در حالت همگرا باید دشواری نصب و تعمیرات توربینی که باید در ارتفاع ۲۰۰ متری نصب شود را نیز در نظر گرفت. همگی این مطالب از معایب این هندسه به شمار می‌روند.

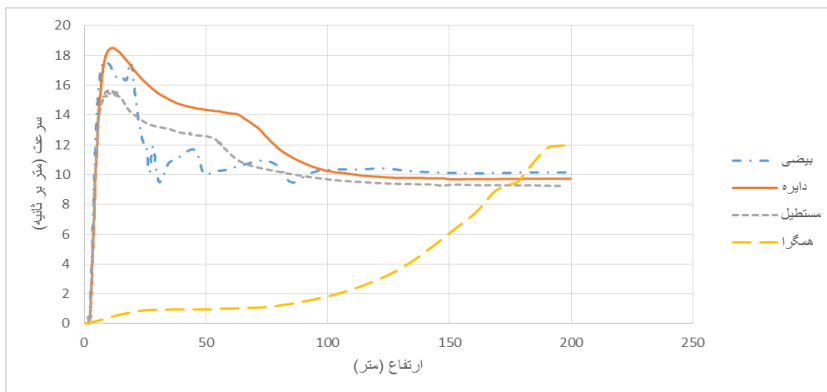


شکل ۸. نمودار تغییرات سرعت در طول دودکش در حالت همگرا

شکل ۹ مقایسه نمودار سرعت برای چهار حالت دودکش را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد که در این حالت بررسی شده حالت بیضی و دایره بازدهی بهتری را دارا می‌باشند. زیرا قادر هستند با ارتفاع یکسان سرعت جریان بیشتری را تولید نمایند.

مشاهده می‌شود در این دو حالت (دایره و بیضی) ابتدا هوا تا سرعت نزدیک به ۱۸ متر بر ثانیه افزایش یافته و پس از اندکی افت به مقدار ثابتی تا انتهای برج می‌رسد. دلیل این کاهش نسبی هم مانند دلایلی که در بالا ذکر شده است کاهش دما و فشار در بالای برج می‌باشد.

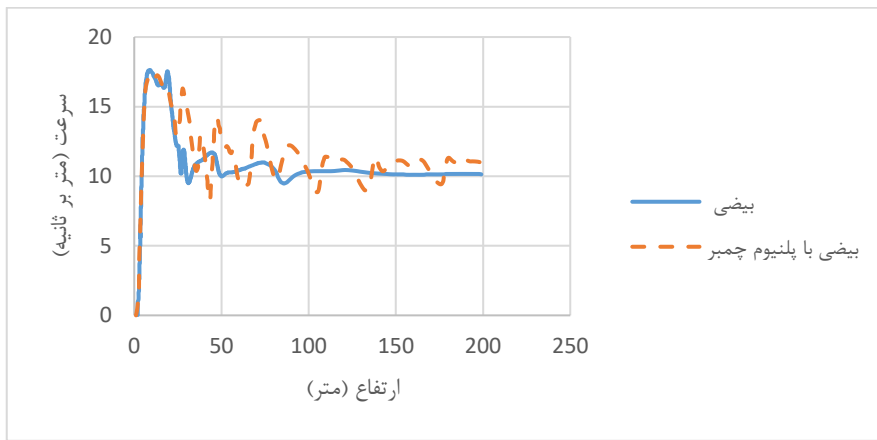
علت این که هندسه دایروی و بیضوی بهتر از مستطیلی می‌باشد پیش تر مورد بررسی قرار گرفت و وجود گوشه‌های نوک تیز که محل شکل‌گیری جریان‌های گردابی می‌باشد به عنوان دلیل آن معرفی شد. در بین چهار هندسه مطرح شده هندسه دودکش همگرا به هیچ عنوان توجیح علمی ندارد و از بین گزینه‌های مورد بررسی ضعیف‌ترین می‌باشد. از همین رو است که در نیروگاه‌های دودکش خورشیدی که امروزه در کشورهای مختلف نصب شده و استفاده می‌شود از این نوع برج استفاده نشده است. هندسه دایروی هم از جهت ساخت و هزینه‌های ساخت مطلوب می‌باشد و هم از نظر بازدهی.



شکل ۹. مقایسه تغییرات سرعت در چهار حالت مورد نظر

یک نقطه ضعف در حالت بیضی وجود دارد که آن هم انحنای زیاد و سقوط با شیب نسبتاً تندتر سرعت می‌باشد. برای رفع این مشکل و جلوگیری از افت شدید و ناگهانی سرعت سعی کردیم تا با ایجاد هندسه‌ای کوچک در نقطه پیک نمودار از این افت ناگهانی جلوگیری کرده و به حالت بهینه دست یابیم. زیرا ممکن است به دلیل برخی عوامل خارجی از جمله وزش باد و طوفان جریان ورودی ما دچار تغییرات و آشفته‌گی شود و باعث جابه جایی پیک نمودار شده و جریان وارد شده به توربین را دچار اختلال کند. برای این منظور با ایجاد یک هندسه اضافی به صورت پلنیوم چمبر (افزایش سطح ناگهانی) درون دودکش اصلی سعی کردیم که دامنه تغییرات سرعت را کمتر کنیم. وجود دو قله پیک در نمودار تغییرات سرعت برج با سطح مقطع بیضوی نیز به همین دلیل رخ می‌دهد. در واقع افت ناگهانی در قله دوم ناشی از همین موضوع می‌باشد.

در نمودار ۱۰ تغییرات سرعت در هر دو حالت بیضی با اعمال پلنیوم چمبر و بدون پلنیوم چمبر را مشاهده می‌کنیم که نشان داده می‌شود که دامنه تغییرات سرعت با پلنیوم چمبر کمتر شده است و سرعت با شدت کمتری به سوی مقدار ثابتی در انتهای دودکش هدایت می‌شود. تاثیر پلنیوم چمبر بر روی کاهش دامنه ی نوسان سرعت در برج به‌خوبی مشهود می‌باشد.



شکل ۱۰. مقایسه سرعت در دو حالت بیضی

برای امکان سنجی استفاده از این سیستم در جغرافیای ایران گرم‌ترین نقطه ایران را انتخاب کرده (استان کرمان، شهرستان شهداد) و با استفاده از داده‌های هواشناسی و جغرافیایی منطقه به بررسی امکان استفاده از سیستم دودکش خورشیدی در این منطقه پرداخته شده است. از آن جایی که برج در حالت‌های دایره و بیضی بهترین بازدهی را داشت برای این منظور این دو حالت را برای ایران نیز مورد بررسی قرار دادیم. برای بررسی این حالت تمام ابعاد هندسی به صورت ابعاد مرجع بوده و تنها دمای ورودی و ارتفاع شهر در آن اعمال گردیده است. مشخصات موقعیت جغرافیایی استفاده شده در جدول سه آورده شده است.

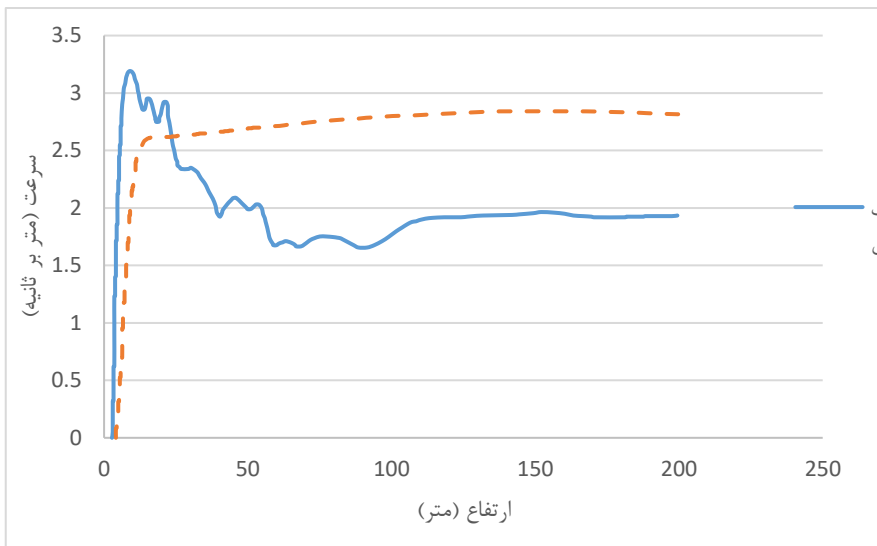
جدول ۳: مشخصات شهر شهداد

شهر	ارتفاع (متر)	دمای میانگین (کلوین)
شهداد (کرمان)	۴۸۲	۳۱۳

شکل ۱۱ نمودار تغییرات سرعت در دو حالت برج دایره‌ای و بیضی شکل با اعمال شرایط شهر شهداد را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که برای این منطقه از کشور حالت بیضی راندمان بهتری را از خود نشان می‌دهد و دارای بیشینه سرعت بالاتری نسبت به حالت دایره می‌باشد. البته این نکته حائز اهمیت است که بیشینه سرعت در هر دو حالت نسبت به نمونه ساخته شده در مانزاس اسپانیا مقدار



کمتری است که علت آن می‌تواند به‌خاطر ارتفاع بالاتر شهر شهداد نسبت به منطقه مانزاس اسپانیا و پایین بودن فشار در این منطقه باشد. در واقع هرچه قدر فشار پایین‌تر باشد چگالی کمتر است و در نتیجه نیروی شناوری شکل گرفته کاهش می‌یابد و به‌دنبال آن بیشینه سرعت جریان هوا در گلویی نیز کاهش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بعد از گلویی افت سرعت محسوسی در مقطع بیضوی مشاهده می‌شود که ناشی از شکل‌گیری جریان‌های چرخشی در راس‌های آن می‌باشد در صورتی که این مورد در مقطع دایره‌ای دیده نمی‌شود.



شکل ۱۱. نمودار مقایسه سرعت‌ها در شهرستان شهداد

## ۵. نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که تغییر هندسه دودکش تاثیر محسوسی بر پارامتر موردنظر که سرعت جریان است در یک نیروگاه دودکش خورشیدی گذاشته و می‌تواند توان تولیدی این نوع نیروگاه را تغییر دهد. آن‌چه که مسلم است، هندسه و شرایط محیطی تاثیر مستقیم بر توان تولیدی نیروگاه دودکش خورشیدی خواهند داشت.

نتایج هر بخش در قالب نمودارها ارائه گردید تا تفاوت‌ها به‌صورت واضح بیان گردد. تحلیل نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که هندسه و شرایط محیطی از جمله ارتفاع عامل بسیار مهمی در شکل‌گیری

الگوی جریان و در نتیجه میزان سرعت جریان در گذر از توربین می‌باشد که تاثیر خود را در میزان تولید توان به‌طور مستقیم نشان می‌دهد. باتوجه به این که هندسه مقطع دودکش در کنار شرایط محیطی بر روی عملکرد برج تاثیر می‌گذارد، لذا بسته به شرایط جغرافیایی ممکن است هندسه بهینه نیز دچار تغییر شود. برای مثال برای شرایط آب و هوایی مانزاس دودکش با مقطع دایری‌ای به‌عنوان بهینه‌ترین هندسه انتخاب شد در صورتی که برای شرایط آب و هوایی شهداد دودکش با مقطع بیضوی عملکرد بهتری را نشان داد. بنابراین موقعیت جغرافیایی شامل میزان شدت تابش خورشیدی، دما، فشار هوا و غیره به‌شدت بر روی هندسه بهینه تاثیرگذار می‌باشند. به عنوان جمع بندی نتایج می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

- هندسه همگرا در هیچ شرایطی عملکرد قابل قبولی را ارائه نمی‌دهد.
- تغییر هندسه برج تاثیر مستقیم در سرعت جریان عبوری از توربین خواهد داشت که می‌تواند اثر خود را در بازدهی نیروگاه نشان دهد.
- حالت‌های دایره و بیضی دارای عملکرد بهتری در افزایش سرعت جریان هوای عبوری از توربین بودند.
- اعمال یک سطح اضافی در برج بیضی شکل باعث بهبود عملکرد این نوع برج شده است. علت این امر کاهش نوسانات سرعت و رسیدن جریانی یکنواخت به‌توربین است.
- گرم‌ترین نقطه نمی‌تواند مکان مناسبی برای استفاده از این نوع نیروگاه باشد و دما و ارتفاع همزمان باید مورد توجه قرار گرفته شوند.

## منابع

- [۱] افشون، علیرضا. برزگر، زهرا. (زمستان ۱۳۹۷)، سنجش عملکرد آسایش حرارتی در تلفیق بادگیر و دودکش خورشیدی (نمونه موردی: خانه رسولیان یزد). نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»، دوره ۲۱، شماره ۴، صفحه ۸۹-۱۰۸.
- [۲] امیری، علیرضا (۱۳۹۵) «بررسی تاثیرات تغییر ارتفاع دودکش، در عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی»، مجله مهندسی مکانیک
- [۳] باقرنژاد، علی. یعقوبی، محمود. گلشنان، علی اکبر (۱۳۸۸). آنالیز انرژی اگزوزی اکونومیک سیکل ترکیبی خورشیدی. پایان‌نامه: وزارت علوم، تحقیقات و فناوری - دانشگاه شیراز.
- [۴] رجبی‌پور، سعید. آنالیز انرژی سیستم هیبریدی شامل کلکتور خورشیدی، پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد. ۱۳۹۶، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته.

- [۵] فخاری، مریم. حیدری، شاهین. بهینه‌سازی دودکش خورشیدی و بررسی اثر آن بر تهویه ساختمان، دانشگاه تهران، ۱۳۹۲.
- [۶] کسائیان، علی بخش. یوسفی مقدم، فهیمه. محمدزاده، پرویز. راضی آستارایی، فاطمه. علائی، رضا (بهار ۱۳۹۶). بهینه‌سازی نیروگاه دودکش خورشیدی جهت حصول به ماکزیمم توان خروجی، نشریه انرژی ایران، دور ۲۰، شماره ۱.
- [7] Ahmed Bilal Awan, Muhammad Zubair, Kotturu V.V. Chandra Mouli , (2020) , Design, optimization and performance comparison of solar tower and photovoltaic power plants, *Energy*. 117450.
- [8] Amir H. Keshavarzadeh, Pouria Ahmadi, Marc A. Rosen, , (2020), Technoeconomic and environmental optimization of a solar tower integrated energy system for freshwater production, *Journal of Cleaner Production* (2020) *Journal of Cleaner Production* JCLP 121760 .
- [9] Cameretti, M.C., et al., Modeling of a Hybrid Solar Micro Gas-turbine Power plant. *Energy Procedia*, 2015. 82 : P. 833-840.
- [10] Chao Li, Rongrong Zhai, Bin Zhang, Wei Chen , (2020) , Applied Thermal Engineering , Thermodynamic performance of a novel solar tower aided coal-fired power system, *Applied Thermal Engineering* , ATE 115127.
- [11] Dai YJ, Huang HB, Wang RZ (2003) Case study of solar chimney power plants in Northwestern regions of China. *Renew Energy* 28: 1295–304.
- [12] Fatih Yilmaz , Murat Ozturk, Resat Selbas , (2019), Development and performance analysis of a new solar tower and high temperature steam, electrolyzer hybrid integrated plant . *ScienceDirect* .
- [13] Hou, Yicun, Huang Li, and Angui Li. "Experimental and theoretical study of solar chimneys in buildings with uniform wall heat flux. " *Solar Energy* 193(2019): 244-252.
- [14] Jose A. Carballo, Javier Bonilla, Manuel Berenguel, Jesús Fernández, Ginés García , (2020), Solar tower power mockup for the assessment of advanced control techniques, *Renewable Energy* (2020) , RENE 12784 .
- [15] Kasaeian, A.B., Mahmoudi, A.R., Razi Astaraci, F., Hejab, A. (2017), "3D simulation of solar chimney power plant considering turbine blades"; *Journal of Energy Conversion and Management*, 147: 55-65.
- [16] Kazemian, M.; Rahbar, N., Abolfazli, J. (2012), "Estimation of Heat conduction factor in a solar desalination system"; 2012.
- [17] Kun Wang, Ming-Jia Li, Zhen-Dong Zhang, Chun-Hua Min, Peiwen Li , (2021) , , Evaluation of alternative eutectic salt as heat transfer fluid for solar power tower coupling a supercritical CO2 Brayton cycle from the viewpoint of system-level analysis, *Journal of Cleaner Production*. 123472.
- [18] Koonsrisuk, A., Chitsomboon, T. (2010); "Theoretical turbine power yield in solar chimney power plants"; *Thermal Issues in Emerging Technologies Theory and Applications* (Theta), 3rd International Conference on; 339-46.

- [19] Kreetz H., Theoretische Untersuchungen und Auslegung eines temporären wasserspeichers für das Aufwindkraftwerk, diploma thesis, Technical University Berlin, Berlin, 1997.
- [20] Pretorius, J.P., Kroger, D.G., "Solar chimney power plant performance", Journal of Sol Energy Eng., 128 (3): 302-11.
- [21] R. Sangi, Performance evaluation of solar chimney power plants in Iran, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, pp. 704-710, 2012.
- [22] Ruprecht A., Strömungstechnische Gestaltung eines Aufwindkraftwerks (fluid dynamic design of a solar updraft power plant), Proceedings of the International Symposium über Anwendungen der Informatik und Mathematik in.
- [23] Schwabozl, P., et al., Solar gas turbine systems : Design, cost and perspectives. Solar energy, 2006. 80(10) : p.1231-1240.
- [24] Singh, et al., Exergetic analysis of a solar thermal power system. Renewable energy, 2000. 19: P. 135-143.
- [25] Tian Hu, Zehong Deng, Jiaming Tian, Yueshe Wang, (2020), A comprehensive mathematical approach and optimization principle for solar flux distribution and optical efficiency in a solar, Applied Thermal Engineering, ATE 115683.
- [26] Toghraie, Davood, et al. "Effects of geometric parameters on the performance of solar chimney power plants." *Energy* 162(2018): 1052-1061.