نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۳، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۹، صفحه ۱۵۴ – ۱۳۵

ارزیابی تغییرات سرعت در یک دودکش خورشیدی

[۱] سید حمید میر سالاری، [۲] حسین مهدوی مقدم *

تاریخ دریافت:
۱۳۹۹ / ۹ / ۳۰

تاریخ پذیرش:
۱۳۹۹ / ۱۱ / ۱۳

کلمات کلیدی:
دودکش خورشیدی،
تغییرات سرعت،
انرژی خورشیدی.

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 برروی هندسه ی دودکش به منظور یافتن هندسه ی بهینه بوده است. برای این منظور از نرم افزار انسیس فلوئنت 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.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران hamid.mirsalari@yahoo.com
۲. استادیار دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی ، تهران (نویسنده مسئول) mahdavy@kntu.ac.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

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 انرژهای 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 آلایندگی‌ها 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 راه های 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 تجدید پذیر از کاربرد وسیعی برخوردار شوند باید که فنّاوری‌های 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 درواقع از سه عنصر اصلی تشکیل‌شده 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

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 قرارگرفته و در مجلات معتبر منتشر گردید[۱۲]. سینگ و همکاران(۲۰۰۰) بر اساس دیدگاه‌های انرژی و اگزروژی نیروگاه سیکل رنکین را مورد ارزیابی قرار دادند[۱۶]. پرتوریوس و کروگر(۲۰۰۲) در پژوهشی اثر به‌کارگیری یک معادله انتقال حرارت جدید، ضرایب افت دقیق‌تر ورودی توربین و انواع زمین‌ها را روی عملکرد یک نیروگاه خورشیدی مقیاس بزرگ بررسی نمودند[۱۳]. روپرت 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]. پیتر شوآرزبوزل(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 چیتسومبونگ(۲۰۰۹) مدل‌سازی عددی را روی پنج نوع دودکش خورشیدی انجام دادند. این دودکش‌ها در هندسه و درگرفتن 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 ترمواکونومیک نیروگاه سیکل ترکیبی خورشیدی یزد را مطالعه نموده اند. 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 قرارگرفت[۱۲]. فخاری و حیدری(۱۳۹۲) در تحقیقی نشان دادند که کوچک و بزرگی شعاع کلکتور و ارتفاع تأثیراتی بر روی سرعت ورودی و خروجی هوا و عملکرد دودکش دارد[۴].

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

کاظمیان 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 ایجادشده را مورد بررسی قراردادند. در این پژوهش متوجه شدند با تعداد ثابتی پره، افزایش سرعت دورانی سبب کاهش دبی جرمی هوا، افزایش گشتاور و درنتیجه 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 بهینه سازی دودکش خورشیدی برای رسیدن به بالاترین توان پرداختند و مقادیر بهینه ای 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 اگزرژی در پیل سوختی و محفظه احتراق به‌دلیل انجام واکنش‌های شیمیای 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، توقرایی 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 به‌روش 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 متغییرهای 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

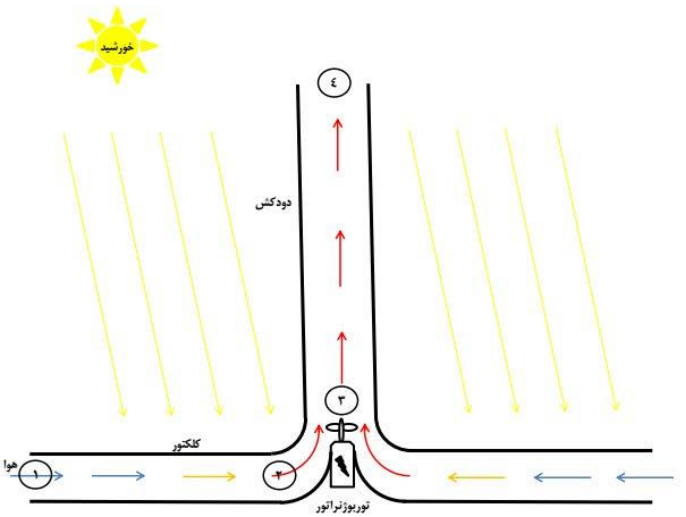
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

مساله 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 تغیرات سرعت در طول دودکش خورشیدی در سطح مقطع های مختلف(دایره، بیضوی، مستطیل، همگرا) می‌باشد. همچنین فرضیه‌هایی به‌صورت 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 حالت‌پایا 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 ۱/۸۵متر از سطح زمین از جنس شیشه تشکیل شده است. هندسه برج دودکش خورشیدی در مختصات استوانه‌ای به‌صورت یک حفره که از پایین به کلکتور و از بالا به جو راه دارد ، مدل شده است. همچنین در جدول های یک و دو ابعاد هندسی به کار برده شده برای هر حالت بیان شده است.



شکل ۱. هندسه مساله [6]

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

جدول۱. ابعاد و پارامترهای هندسی برج خورشیدی

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

جدول۲. ابعاد و پارامترهای هندسی برج خورشیدی

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

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 به‌صورت عایق در نظر گرفته شده است و کل مسئله به‌صورت سه بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش حاضر برای شبیه‌سازی تابش خوشید 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 به‌صورت ثابت و ۴۸/۵ درصد کل تابش در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

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 شدو همچنین اثرات تراکم پذیری ناچیز در نظرگرفته شد. فرمول‌های تأثیر باد ناچیز فرض شده است و جریان به‌صورت حالت پایا در نظر گرفته شد که با تغییر دما تغییری در پارامترهای جریان حاصل نمی‌شود. تابش تشعشعی به‌صورت عمود بر کلکتور در نظرگرفته شده است. همچنین دیواره دودکش حرارتی به‌صورت 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 به‌صورت سه بعدی در دستگاه مختصات دکارتی به‌صورت زیر نوشته می‌شود.

معادله پیوستگی:

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \quad (۲-۱)$$

معادله ناویر استوکس:

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

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

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

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

معادله انرژی:

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

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

$$Ra = Gr \times Pr \quad (۱)$$

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

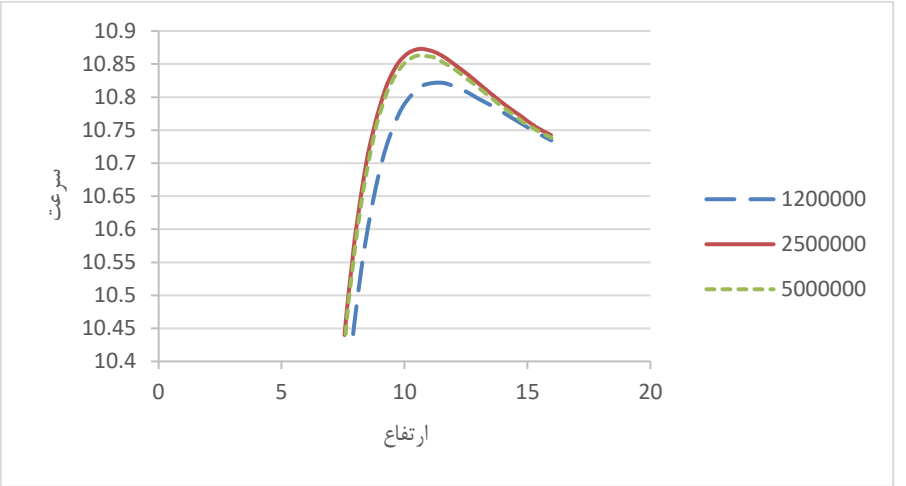
$$Pr=\frac{\rho c_p}{k} \quad (۳)$$

محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که این اعداد همگی از $۱۰^{۱۰}$ شروع می‌شوند که می‌توان جریان سیال را در تمامی حالات به‌صورت آشفته در نظر گرفت. همچنین به‌منظور 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 درنظر گرفته‌ایم تا بتوانیم به تحلیل بهتری از نتایج دست یابیم. به‌منظور رسم هندسه مدل موردنظر 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 بازه‌ای نزدیک به ۲۵۰۰۰۰۰ سلول گسسته تشخیص داده شد تا علاوه‌بر 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]



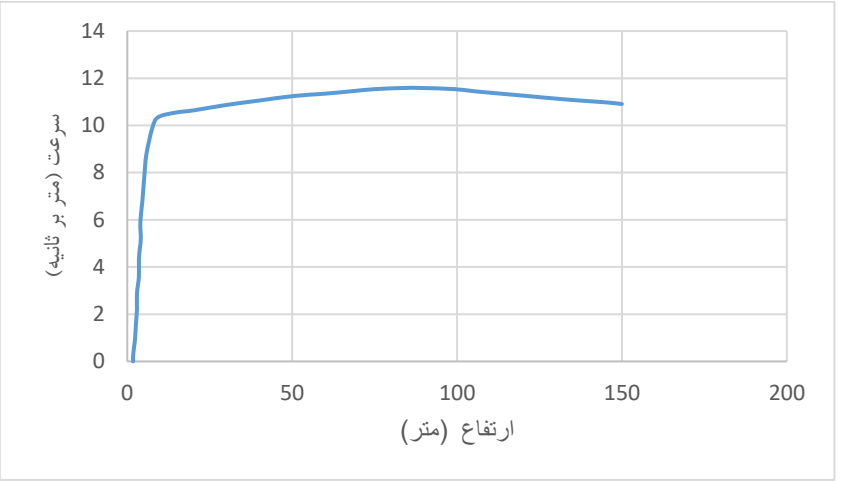
شکل۲. تاثیر ابعاد دامنه محاسباتی بر سرعت

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.

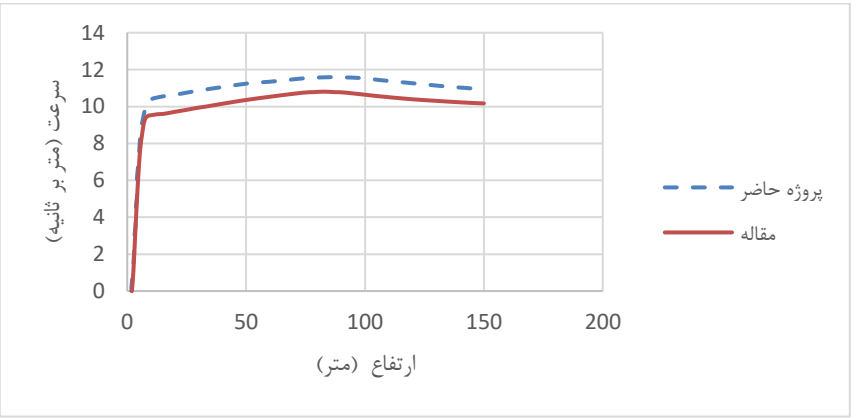
از آنجایی که نتایج به دست آمده توسط امیری و همکاران تا ارتفاع ۱۵۰ متر بوده در نتیجه ابتدا برای صحت سنجی نتایج به دست آمده ارتفاع دودکش را ۱۵۰ متر در نظر گرفته که تغییرات سرعت در این حالت در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]



شکل ۳: تغییرات سرعت Vy 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. همان‌طورکه 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.



شکل۴- مقایسه تغییرات سرعت جریان هوا در ارتفاعات مختلف

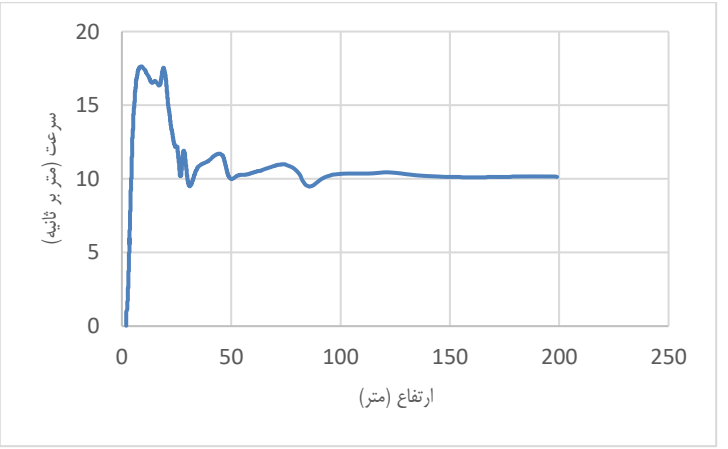
همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود نمودار حاصل از حل عددی و امیری بجز در پیک سرعت در سایر نقاط با دقت قابل قبولی روندی یکسان را نشان می‌دهد و در هر دو مدل با حرکت به سمت

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

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

٤. نتایج و بحث

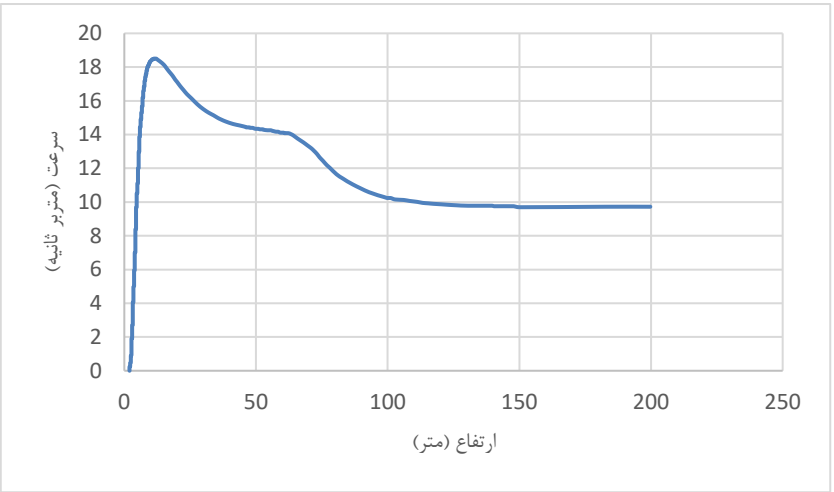
شکل ۵ کانتور سرعت در هندسه بیضی شکل برای دودکش در ابعاد نیروگاه مانزاس را نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که تغییرات سرعت ابتدای دودکش بیشتر بوده و به بیشترین مقدار خود در ابتدای دودکش رسیده و با افزایش ارتفاع رفته رفته تغییرات و مقدار سرعت کاهش یافته و به مقدار ثابتی در انتها و خروجی دودکش می‌رسد. با توجه به این که تقریباً بیست متر اول دودکش دارای هندسه همگرا می‌باشد تا به گلویی برسیم که توربین در آن‌جا قرار می‌گیرد بدیهی است که به خاطر کاهش سطح مقطع سرعت در این بخش افزایش یابد اما بعد از گلویی هندسه سطح مقطع تقریبا ثابت می‌باشد و دارای یک زاویه ملایم واگرایی است که این زاویه بسیار ناچیز است. از طرفی به‌دلیل 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 تقریبا 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 به‌ذکر است که بیشینه سرعت در این حالت که در گلویی حاصل می‌شود در حدود ۱۷/۸ متر بر ثانیه می‌باشد.



شکل۵. تغییرات سرعت در طول دودکش در حالت بیضی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

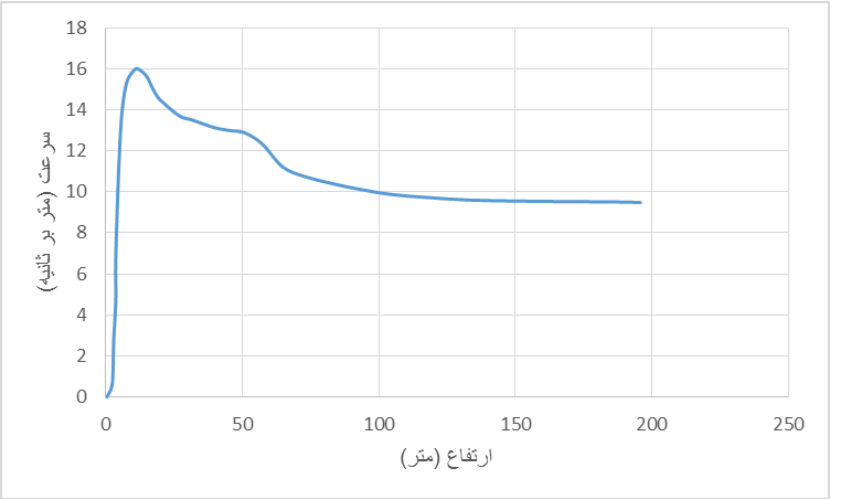
شکل ۶ کانتور سرعت سیال درون دودکش دایره‌ای شکل را نشان می‌دهد که در ابتدای برج سرعت با شیب زیادی افزایش داشته و پس از رسیدن به بالاترین حد با شیبی ملایم کاهش یافته تا به مقداری ثابت در خروجی دودکش برسد که علت آن پیشتر عنوان شد. در این حالت بیشینه سرعت در حدود ۱۸/۵ متر برثانیه می‌باشد که چیزی در حدود ۰/۷ متر برثانیه بیش از سرعت بیشینه برای مقطع بیضوی می‌باشد. باتوجه به این‌که 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.



شکل۶. 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 گلویی 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.

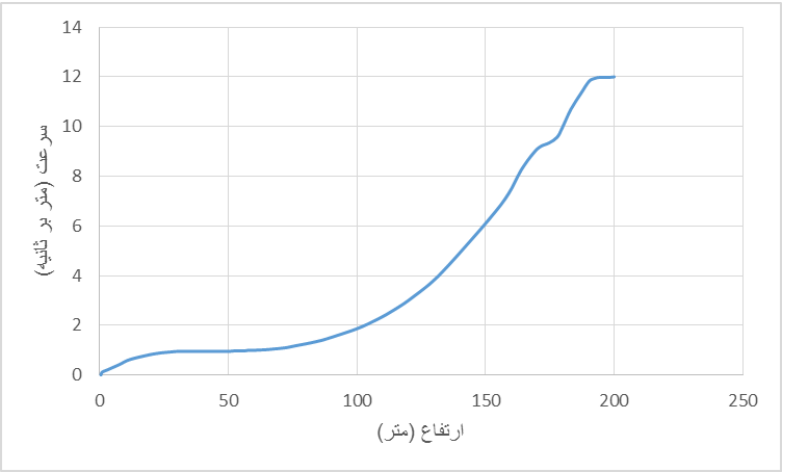
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]



شکل۷. 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 به‌صورت 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 به‌صورت تقریبا 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]



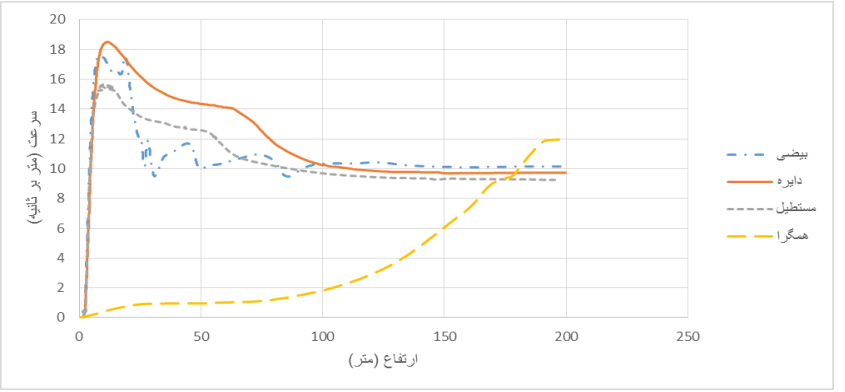
شکل۸. نمودار تغییرات سرعت در طول دودکش در حالت همگرا

شکل ۹ مقایسه نمودار سرعت برای چهار حالت دودکش را نشان می‌دهد.به نظر می‌رسد که در این ۴ 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 شکل گیری 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 ضعیف ترین 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

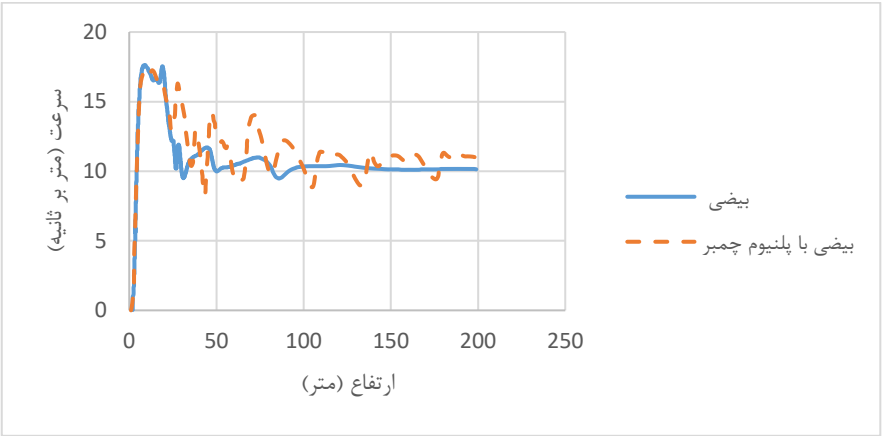


شکل۹. مقایسه تغییرات سرعت در چهار حالت مورد نظر

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 به‌حالت بهینه دست یابیم. زیرا ممکن است به‌دلیل برخی عوامل خارجی از جمله وزش باد و طوفان جریان ورودی ما دچار تغییرات و آشفتگی 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 به‌صورت 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 به‌سوی مقدار ثابتی در انتهای دودکش هدایت می‌شود. تاثیر پلنیوم چمبر بر روی کاهش دامنه ی نوسان سرعت در برج به‌خوبی مشهود می‌باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]



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 آن‌جایی‌که 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 به‌صورت 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.

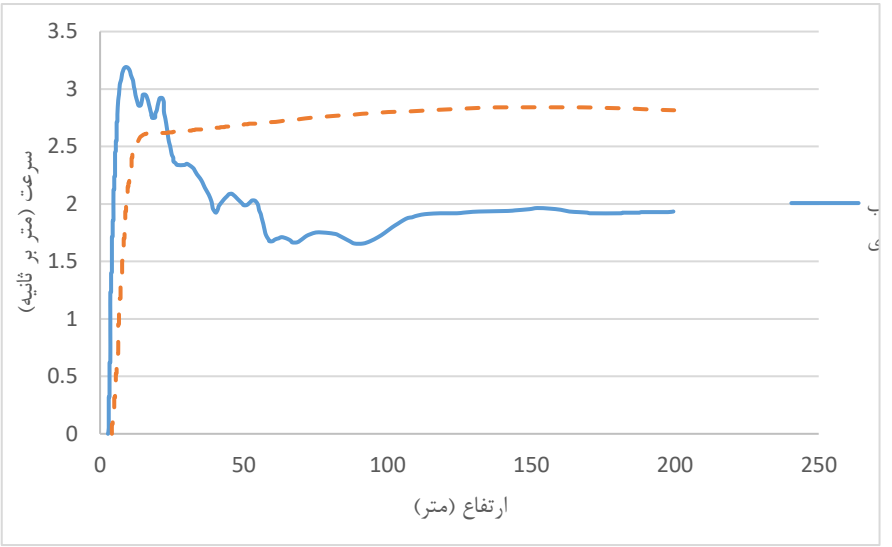
جدول۳: مشخصات شهر شهداد

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 بیضوی راندمان بهتری را از خود نشان می‌دهد و دارای بیشینه سرعت بالاتری نسبت به‌حالت دایره می‌باشد. البته این نکته حائز اهمیت است که بیشینه سرعت در هر دو حالت نسبت به نمونه ساخته شده در مانزاس اسپانیا مقدار

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

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 هرچقدر 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. همان‌طورکه مشاهده می‌شود بعداز گلویی افت سرعت محسوسی در مقطع بیضوی مشاهده می‌شود که ناشی‌از شکل‌گیری جریان‌های چرخشی در راس‌های آن می‌باشد درصورتی‌که 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 برتوان 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 ازجمله ارتفاع عامل بسیار مهمی در شکل‌گیری

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

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 این‌که هندسه مقطع دودکش در کنار شرایط محیطی برروی 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 درصورتی‌که 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 برروی هندسه بهینه تاثیرگذار می‌باشند. به عنوان جمع بندی نتایج می توان به نکات زیر اشاره کرد:

- هندسه همگرا در هیچ شرایطی عملکرد قابل قبولی را ارایه 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.
- گرم ترین 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. گلنشان، علی اکبر (۱۳۸۸). آنالیز اگزرژی اکونومیک سیکل ترکیبی خورشیدی. پایان‌نامه: وزارت علوم، تحقیقات و فناوری – دانشگاه شیراز.

[۴] رجبی‌پور، سعید. آنالیز اگزرژی 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

[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) . بهینه سازی 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. Keshavarzzadeh, 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 Astaraei, 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]

[19] Kreetz H., Theoretische Untersuchungen und Auslegung eins temporaren wasserspeichers fur 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., Stromung Stechnische Gestaltung eines Aufwin dkrafwerks (fluid dynamic design of a solar updraft power plant), Proceedings of the International Symposium uber Anwendungen der Informatik und Mathematik in.
[23] Schwazbozl, 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-25]