

## بررسی عددی پارامترهای مؤثر بر سرعت هوا در دودکش خورشیدی

واناند عیسی جان<sup>۱</sup>، رضا رزاقی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند، دماوند، ایران

vanandissadjan@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرمسار، گرمسار، ایران

r.razaghi@iau-garmsar.ac.ir

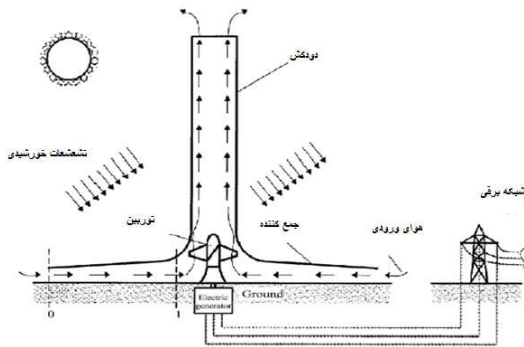
چکیده: بحران آلودگی محیط زیست بر اثر استفاده بیش از حد سوخت های فسیلی و خطر از بین رفتن ذخایر و منابع طبیعی و همچنین تولید بیش از حد گازهای گلخانه ای و در نتیجه گرم شدن زمین بسیاری از محققان حوزه انرژی را به فکر استفاده از انرژی های تجدیدپذیر به عنوان انرژی جایگزین فسیلی انداخته است. نیروگاه های دودکش خورشیدی یکی از انواع انرژی های تجدیدپذیر می باشد که در دهه گذشته، مورد توجه محققان قرار گرفته است. نیروگاه های دودکش خورشیدی از جمله نیروگاه هایی هستند که ساختار آن ها را جمع کننده های خورشیدی، دودکش و توربین هایی که در ابتدای دودکش قرار داده می شوند، تشکیل می دهند. هدف از این بررسی، مدل سازی عددی یک نمونه دودکش خورشیدی ساخته شده در دانشگاه تهران و بررسی پارامترهای هندسی مؤثر بر افزایش سرعت جریان هوا درون آن است. مدل سازی عددی به صورت دوبعدی و بر مبنای روش حجم محدود و مدل آشفتگی کا-اِپسیلون استاندارد در شبکه بهینه در نرم افزار انسیس فلونت انجام شده است. نتایج عددی تطابق خوبی را با حداکثر اختلاف ۶٪ نسبت به نتایج تجربی نشان می دهد. تفاوت تحقیق حاضر در مقایسه با تحقیق های پیشین انجام شده، مدل سازی نیروگاه بدون استفاده از خواص ذخیره سازی انرژی توسط زمین و با استفاده از شار حرارتی ثابت روی جمع کننده بدون در نظر گرفتن شرایط تشعشعی محیطی است. نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع دودکش، ارتفاع جمع کننده، شعاع جمع کننده و کاهش شعاع دودکش باعث می شود سرعت جریان هوا داخل برج در حدود ۷۶٪ افزایش یابد (از ۱/۷ متر بر ثانیه در مدل تجربی تا ۳ متر بر ثانیه) که نتیجه آن بهبود کارایی این مدل نیروگاه است. همچنین، از میان پارامترهای مورد بررسی، افزایش شعاع جمع کننده و کاهش شعاع دودکش نقش بیشتری را در افزایش سرعت جریان هوا داخل برج دودکش خورشیدی ایفا می کنند. نتایج این تحقیق می تواند در بهینه سازی قسمت های مختلف نیروگاه نظیر توربین، جمع کننده و برج تأثیر بسزایی را داشته باشد.

واژه های کلیدی: دودکش خورشیدی، مدل سازی عددی، انتقال حرارت جابه جایی آزاد.

\* نویسنده مسئول

۱. مقدمه

قابل توجه به سمت بالای برج می‌شود. توربین نیز وظیفه دریافت انرژی جنبشی جریان و تولید کار مکانیکی و در نهایت تولید برق را بر عهده دارد.



شکل (۱): شماتیک یک دودکش خورشیدی

اشلاخ [۶] اولین کسی بود که از دودکش خورشیدی به عنوان ابزاری برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی برای تولید برق استفاده کرد. اولین مدل دودکش خورشیدی را هاف و همکاران [۷] در مانزاراس اسپانیا در سال ۱۹۸۳ ساختند که در آن به موضوعات مهمی از جمله تعادل انرژی، معیارهای طراحی و تجزیه و تحلیل هزینه‌ها پرداخته شد. در سال ۱۹۸۵، کولونگ [۸] یک نیروگاه الکتریکی ۰/۱۴ مگاواتی را در از میر ترکیه ساخت. پس از آن سمپایو [۹] در سال ۱۹۸۶ به منظور بالا بردن سرعت عملکرد دودکش خورشیدی از منتشرکننده چندمخروطه در بالای دودکش استفاده کرد.

با توجه به اینکه نیروگاه دودکش خورشیدی می‌تواند در تأمین انرژی نقش مهمی داشته باشد، دانشمندان و محققان مطالعات بسیاری در این زمینه انجام دادند. گانن و بکستروم [۱۰] و [۱۱] مدل ریاضی را برای نیروگاه دودکش خورشیدی به همراه یک توربین توسعه دادند و در تحقیق دیگر تأثیر تعداد پره‌های توربین و تعداد استیج<sup>۲</sup> را روی بازده نیروگاه بررسی کردند. روابط و معادلات حاکم بر جریان هوا توسط پالکی و شرفیتو [۱۲] در سال ۱۹۸۸ برای تحلیل عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی ارائه شد. یکی از پارامترهای مهم که روی توان خروجی سیستم تأثیر بسزایی دارد، افت فشار در توربین است. ضریب افت فشار در توربین را اولین بار هاف در سال ۱۹۸۴ بررسی کرد. به دلیل اهمیت این موضوع دانشمندان دیگر از جمله اشلاخ در سال ۱۹۹۵ و بکستروم و فلوری [۱۳] در سال ۲۰۰۶ تلاش بر بهبود این ضریب نمودند. دابا [۱۴] یک مدل‌سازی عددی را برای مقایسه بین دودکش خورشیدی با سیستم ذخیره‌ساز و بدون سیستم ذخیره‌ساز انرژی انجام داد و تأثیر موقعیت‌های مختلف امکان‌پذیر برای نصب

با توجه به محدودیت منابع انرژی‌های تجدیدناپذیر و همچنین مشکلات زیست‌محیطی مصرف بی‌رویه آن‌ها، استفاده از انرژی‌های نو از جمله انرژی خورشیدی از ضرورت‌های انرژی امروزی محسوب می‌شود [۱]. تابش خورشید بزرگ‌ترین منبع تجدیدپذیر انرژی روی کره زمین است [۲]. مطالعات نشان می‌دهد در صورتی که صرفاً ۱٪ از صحراهای جهان با نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی به کار گرفته شوند، همین مقدار برای تولید برق سالانه مورد تقاضای جهان کافی خواهد بود [۳]. به طور کلی به منظور استفاده از انرژی خورشیدی دو راه وجود دارد. اول استفاده مستقیم از انرژی خورشیدی و تبدیل آن به انواع انرژی‌های دیگر و دوم استفاده غیرمستقیم از آن به صورت کاربردهای نیروگاهی و غیر نیروگاهی. یک نیروگاه خورشیدی شامل تأسیساتی است که انرژی تابشی خورشید را جمع کرده و از طریق مبدل‌های حرارتی، توربین، ژنراتورها و یا موتورهای بخار انرژی الکتریکی تولید می‌کند [۴]. به منظور استفاده و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر می‌بایست تکنولوژی‌های ارائه‌شده، ساده و قابل اعتماد بوده و برای کشورهای کمتر توسعه‌یافته نیز مشکلات فنی به همراه نداشته و بتوان از منابع محدود مواد خام آن‌ها استفاده کرد. در مرحله بعدی نیز نباید به آب فراوان نیاز داشته باشند. تکنولوژی دودکش خورشیدی دارای این شرایط است. بررسی‌های اقتصادی نشان داده اگر این نیروگاه‌ها در مقیاس بزرگ (بزرگ‌تر یا مساوی ۱۰۰ مگاوات) ساخته شوند، قیمت برق تولیدی آن‌ها قابل مقایسه با برق نیروگاه‌های متداول است [۵]. این موضوع کافی است تا بتوان از انرژی خورشیدی در مقیاس‌های بزرگ بهره جست. بر این اساس می‌توان انتظار داشت که دودکش‌های خورشیدی در زمینه تولید برق در مناطق پرافتاب نقش مهمی ایفا کنند. به طور کلی، تکنولوژی دودکش خورشیدی از سه عنصر اصلی تشکیل شده است که اولی جمع‌کننده‌های هوا<sup>۱</sup>، دومی دودکش و در آخر توربین بادی آن است. شکل (۱) نشان‌دهنده شماتیک یک نیروگاه دودکش خورشیدی است. جمع‌کننده به عنوان یک سقف شیشه‌ای یا پلاستیکی شفاف است که در ارتفاع معینی از سطح زمین قرار گرفته که از یک طرف به دودکش متصل شده و از طرف دیگر با هوای آزاد در ارتباط بوده تا بتواند هوای اطراف را به سمت داخل هدایت کند. وظیفه جمع‌کننده، محبوس و گرم کردن هوای اطراف زمین و هدایت جریان هوا به سمت دودکش است. افزایش دمای قابل توجه هوا در نتیجه تشعشع خورشید داخل جمع‌کننده، موجب کاهش چگالی آن و در نتیجه حرکت هوا با سرعت

دودکش خورشیدی از مدل‌های تشعشعی برای شبیه‌سازی انتقال حرارت و تأثیر آن روی سیال درون دودکش انجام گرفته و در بعضی موارد از زمین به‌عنوان منبع ذخیره‌ساز انرژی استفاده شده ولی در تحقیق حاضر، تشعشعات خورشیدی به‌صورت شرط مرزی شار حرارتی ثابت بر روی کلکتور و از زمین به‌عنوان شرط مرزی دما ثابت استفاده شده است. در تحقیق حاضر سعی شده تا با تأثیر تغییر هندسه این مدل نیروگاه بر سرعت هوای ورودی کلکتور نقش آن روی راندمان و کارایی نیروگاه بررسی گردد؛ این امر می‌تواند بر طراحی و بهینه‌سازی اجزای مختلف نیروگاه تأثیر قابل توجهی داشته باشد.

## ۲. معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان سیال در دودکش خورشیدی به‌ترتیب معادلات مربوط به جریان آرام شامل معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی به شرح زیر است:

معادله پیوستگی

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) = 0 \quad (1)$$

که در آن  $u$  و  $v$  به‌ترتیب سرعت جریان در جهت  $x$  و  $y$  می‌باشد. معادله انرژی در جابه‌جایی آزاد به‌صورت زیر است:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (2)$$

معادله مومنتوم در جابه‌جایی آزاد به‌صورت زیر است:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g\beta(T - T_{\infty}) + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3)$$

همچنین، معادلات پیوستگی و مومنتم و انرژی برای جریان آشفته برابر است با:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v}) = 0 \quad (4)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\bar{p}}{dx} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left[ \nu \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) - \overline{u'v'} \right] \quad (5)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} = \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} - \rho c_p \overline{v'T'} \right) \quad (6)$$

$$K = \frac{1}{2} \overline{u'_1 u'_1} \quad (7)$$

$$\varepsilon = \left( \frac{\mu}{\rho} \right) \overline{u'_1 u'_1} \quad (8)$$

در معادلات فوق  $\alpha, \beta, T, \rho, \nu, p, c_p, g, \varepsilon, K$  به‌ترتیب برابر شتاب گرانش، ظرفیت حرارتی در فشار ثابت، فشار، ویسکوزیته سینماتیکی، چگالی، ضریب نفوذ حرارتی، دمای سیال، ضریب انبساط، انرژی جنبشی جریان آشفته، نرخ اضمحلال ویسکوز جریان آشفته،  $\bar{u}$  و  $\bar{v}$  سرعت متوسط سیال و  $u' v'$  سرعت لحظه‌ای سیال در جریان آشفته در جهت  $x$  و  $y$  هستند. به‌منظور حل معادلات آشفته‌گی از

توربین بر روی عملکرد نیروگاه را بررسی کرد. نتایج نشان داد که بازده دودکش خورشیدی با استفاده از مخزن ذخیره‌ساز انرژی افزایش و قیمت توان خروجی به‌ازای کیلووات ساعت کاهش پیدا می‌کند. مدل‌سازی عددی روی یک دودکش خورشیدی با توربین سه‌پره‌ای توسط تینگژن و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۰۷ انجام گرفت. بررسی و مدل‌سازی آن‌ها روی مدل ساخته‌شده در اسپانیا انجام شد و اثرات سرعت زاویه‌ای شافت توربین روی پارامترهای خروجی دودکش خورشیدی تحلیل گردید. نتایج به‌گونه‌ای بود که با افزایش سرعت دورانی شافت توربین، سرعت و دبی هوای خروجی از دودکش کاهش یافته و متوسط دمای خروجی از دودکش و افت فشار افزایش می‌یابد.

قلمچی و همکاران [۱۶ و ۱۷] در سال ۲۰۱۵ به‌منظور بررسی اثرات هندسی و محیطی مطالعه تجربی را روی یک مدل دودکش خورشیدی کوچک با قطر جمع‌کننده ۳ متر و ارتفاع دودکش ۲ متر در دانشگاه تهران انجام دادند. توزیع دما و سرعت هوا در داخل برج به‌صورت تجربی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که کاهش اندازه ورودی دودکش باعث اثرات مثبت روی راندمان دودکش خورشیدی شد. همچنین، بیشینه سرعت هوا در دودکش معادل ۱/۳ متر بر ثانیه گزارش شد.

ایادی و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۸ با مدل‌سازی دوبعدی یک مدل نیروگاه دودکش خورشیدی، تأثیر کاهش ارتفاع ورودی جمع‌کننده بر افزایش سرعت جریان و راندمان نیروگاه را بررسی کردند. کرمی و همکاران [۱۹] طی یک مدل‌سازی سه‌بعدی نیروگاه دودکش خورشیدی به این نتیجه رسیدند که افزایش ارتفاع دودکش و افزایش شعاع جمع‌کننده تا مقدار بهینه باعث افزایش راندمان نیروگاه خواهد شد. نجم و شبان [۲۰] تأثیر شعاع جمع‌کننده، دمای محیط، ارتفاع دودکش و افت فشار توربین و تابش بر راندمان نیروگاه را بررسی کردند. نتایج این بررسی نشان داد که ابعاد بهینه به‌شدت متأثر از تابش خورشید است و ماکزیمم دبی جرمی از افزایش قطر جمع‌کننده حاصل می‌شود و افزایش افت فشار توربین باعث کاهش راندمان جمع‌کننده می‌گردد. محمد و اتروشی [۲۱] طی یک تحقیق به‌وسیله مدل‌سازی عددی یک نمونه نیروگاه دودکش خورشیدی متناسب بودن ابعاد قسمت‌های مختلف نیروگاه را بررسی کردند. ایادی و همکاران [۲۲ و ۲۳]، تأثیر هندسه‌های مختلف دودکش بر نیروگاه را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که واگرا بودن دودکش سبب افزایش سرعت خواهد شد.

در مطالعات انجام‌شده پیشین به‌منظور مدل‌سازی نیروگاه‌های

جدول (۱): مشخصات هندسی مدل دودکش خورشیدی ساخته شده در

دانشگاه تهران

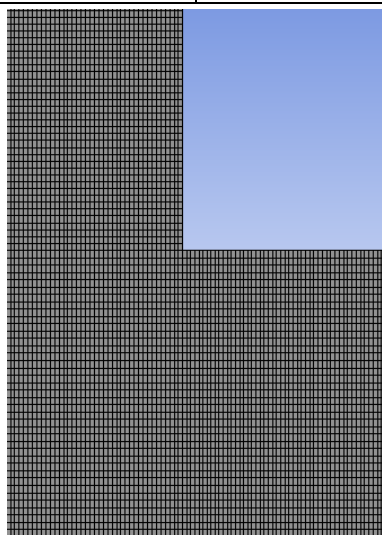
ردیف	پارامتر	ابعاد (m)
۱	شعاع دودکش ( $R_{ch}$ )	۰/۱
۲	شعاع جمع کننده ( $R_{col}$ )	۱/۵
۳	ارتفاع جمع کننده ( $H_{col}$ )	۰/۰۶
۴	ارتفاع دودکش ( $H_{ch}$ )	۳

### ۳.۲. شبکه بندی بهینه

شبکه بندی در مدل سازی عددی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. به منظور دریافت جواب دقیق و درست شبکه بندی در دامنه محاسباتی باید به اندازه کافی، ریز دقیق و منظم باشد. به دلیل ایجاد لایه مرزی در نزدیکی دیواره ها، شبکه در کل دامنه به اندازه کافی ریز در نظر گرفته شده تا به خوبی بتوان تغییرات دما و سرعت را به دست آورد. جدول (۳) نشان دهنده مقادیر مختلف شبکه بندی و سرعت ماکزیمم در دودکش است. با توجه به مقادیر این جدول، شبکه بندی بهینه به صورت منظم و مستطیلی و به تعداد ۶۵۶۰۰ سلول انتخاب شده است. این شبکه بندی بهینه نهایی در شکل (۳) نشان داده شده است.

جدول (۲): مقادیر مختلف شبکه بندی و سرعت ماکزیمم در دودکش

سرعت ماکزیمم در دودکش	تعداد شبکه
۱/۳۳	۲۹۷۰۰
۱/۴۲	۴۵۲۰۰
۱/۶۸	۶۵۶۰۰
۱/۹۸	۷۷۸۰۰
۲/۱۱	۱۳۰۰۰۰



شکل (۳): شبکه بندی داخل دودکش خورشیدی

### ۳.۳. شرایط مرزی

مسئله با فرض جریان پایا به صورت حل متقارن با مدل آشفتگی کا-

رهیافت رنس<sup>۱</sup> استفاده شده است. در معادله مومتم برای جریان آشفته به عبارت  $\overline{\rho u_i u_j}$  تنش آشفتگی یا تنش رینولدز گفته می شود که باعث باز شدن معادلات می شود. در رهیافت رنس، به منظور بستن معادلات حاکم از مدل های آشفتگی استفاده می شود. در این تحقیق، از مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  به دلیل کم هزینه بودن، مناسب بودن برای مدل سازی جریان های داخلی با گرادیان های فشاری کم و نشان دادن بهترین نتایج و هماهنگی با نتایج تجربی استفاده شده است [۲۲].

### ۳. مدل سازی عددی

#### ۱.۳. مدل سازی هندسی

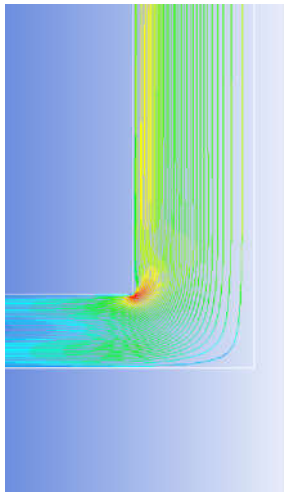
در این بررسی، مدل دودکش خورشیدی ساخته شده در دانشگاه تهران به عنوان مدل مرجع انتخاب شد [۱۶ و ۱۷]. این مدل نیروگاه خورشیدی در شکل (۲) نشان داده شده است. مشخصات هندسی نمونه مطابق با جدول (۱) است. مدل عددی در نرم افزار به صورت دوبعدی با فرض حل متقارن مدل سازی شد، به طوری که مطابق با شکل (۱) ورودی هوا از سمت چپ جمع کننده و خروجی از قسمت فوقانی در نظر گرفته شده است. نرم افزار انسیس فلونت یک نرم افزار مهندسی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است که از طریق روش حجم محدود انواع جریانات را با شرایط مرزی مختلف می توان در آن به صورت عددی حل کرد.

جریان هوا از ورودی جمع کننده وارد شده و از طریق تابش حرارت خورشید افزایش دما پیدا می کند. مطابق انتقال حرارت جابه جایی آزاد با کاهش چگالی به سمت بالا حرکت کرده و در نهایت از خروجی دودکش به فضای بیرون انتقال پیدا می کند. شایان ذکر است که توربین در این مسئله به صورت فیزیکی مدل نشده است.

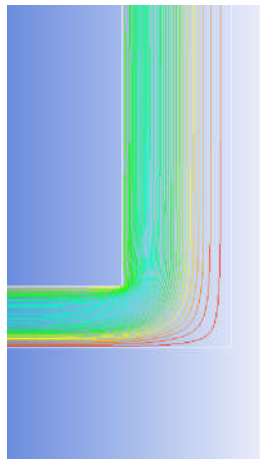


شکل (۲): مدل دودکش خورشیدی ساخته شده در دانشگاه تهران [۱۶]

شکل های (۵) و (۶) به ترتیب نشان دهنده خطوط سرعت و هم دماست.



شکل (۵): خطوط سرعت جریان



شکل (۶): خطوط هم دما

#### ۴. نتایج و بحث

##### ۱.۴. تعیین محل بیشینه سرعت جریان در مقطع برج

شکل (۷) محل بیشینه سرعت را در سطح مقطع برج نشان می دهد. این نمودار مقادیر مختلف گرفته شده سرعت را در محل های مختلف که مبنای آن ها از سطح زمین بوده، نشان می دهد. نمودارهای سرعت به ترتیب از ۲۰ سانتی متر تا ۷۰ سانتی متر از سطح زمین درون دودکش به دست آمده و با هم مقایسه شده اند. آشکارا می توان نتیجه گرفت که محل بیشینه سرعت در فاصله ۲۰ سانتی متر از سطح زمین در دودکش است. تمامی نمودارهای مربوط به نتایج این تحقیق بر اساس سرعت بیشینه و شعاع جمع کننده بی بعد شده است. همچنین نمودارهای مربوط به مدل پایه توسط خطوط توپیر نمایش داده شده است.

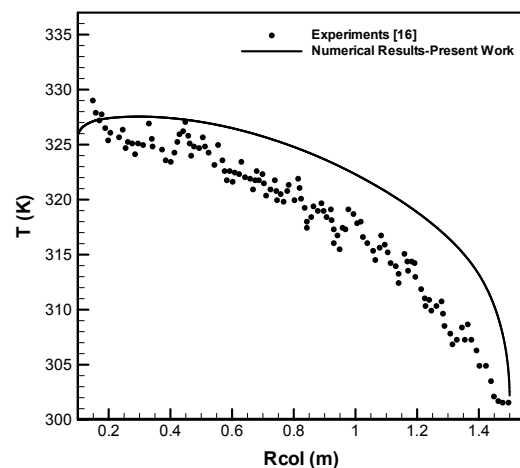
اپسیلون بهبود یافته و شرایط مرزی طبق جدول (۲) شار حرارتی ثابت روی جمع کننده و دمای ثابت روی زمین و دمای هوای اطراف ۳۰۰ درجه کلوین و دیوار دودکش به صورت شرط مرزی دیوار در نظر گرفته شد. الگوریتم حل سیمپل<sup>۱</sup> و برای تمام معادلات مرتبه همگرایی در نظر گرفته شد. مرتبه باقی مانده ها تا  $10^{-6}$  در نظر گرفته شد.

جدول (۳): شرایط مرزی [۱۶]

ردیف	شرایط مرزی	مقادیر
۱	ورودی فشار	kpa۰
۲	خروجی فشار	kpa۰
۳	جمع کننده (شار حرارتی ثابت)	$\frac{w}{m^2} 25$
۴	زمین (دما ثابت)	k۳۱۵
۵	دودکش (شرط مرزی دیوار)	-

##### ۳.۴. صحت سنجی مدل عددی

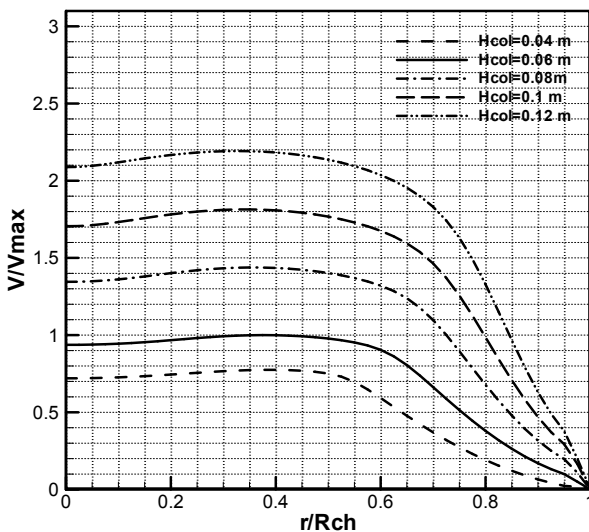
حل عددی با استفاده از نمودار توزیع دمای سیال در داخل جمع کننده که به وسیله سنسورهای دمایی در مدل ساخته شده دانشگاه تهران [۱۶] اندازه گیری شده، مقایسه گردیده و با حداکثر ۶٪ خطا با نتایج تجربی صحت سنجی گردید. همچنین با توجه به جدول (۳) با تعداد ۶۵۶۰۰ سلول، سرعت ۱/۶۸ متر بر ثانیه درون دودکش حاصل شد که با مدل دانشگاه تهران [۱۶] که در آن سرعت ماکزیمم در دودکش ۱/۷ متر بر ثانیه به دست آمده بود دارای ۲٪ خطاست. شکل (۴) نشان دهنده مقایسه نتایج عددی و تجربی مربوط به توزیع دما روی جمع کننده دودکش خورشیدی است. مقایسه نتایج تطابق خوبی را بین کار عددی و تجربی نشان می دهد.



شکل (۴): نمودار صحت سنجی مقایسه نتایج عددی و تجربی، نمودار دما روی جمع کننده

### ۳.۴. تأثیر ارتفاع جمع‌کننده بر سرعت هوا

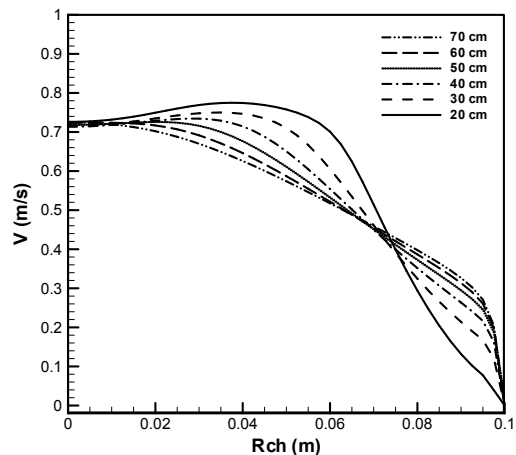
شکل (۹) نشان‌دهنده نمودار سرعت بی‌بعد شده جریان در دودکش در ارتفاع‌های مختلف جمع‌کننده است. همان‌طور که از شکل (۹) قابل مشاهده است، با افزایش ارتفاع جمع‌کننده از سطح زمین سرعت هوا نیز در دودکش افزایش پیدا می‌کند. ارتفاع ۶ سانتی‌متر ارتفاع مدل آزمایشی ساخته شده بوده و مابقی مقادیر روی مدل پایه حل شده و با هم مقایسه گردیده‌اند. در واقع می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که افزایش ارتفاع جمع‌کننده باعث افزایش جریان جرمی هوا داخل جمع‌کننده و افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد داخل جمع‌کننده و در نتیجه افزایش سرعت هوا داخل دودکش می‌گردد.



شکل (۹): نمودار سرعت بی‌بعد شده جریان در دودکش تحت شرایط ارتفاع جمع‌کننده‌های متفاوت

### ۴.۴. تأثیر شعاع دودکش بر سرعت هوا

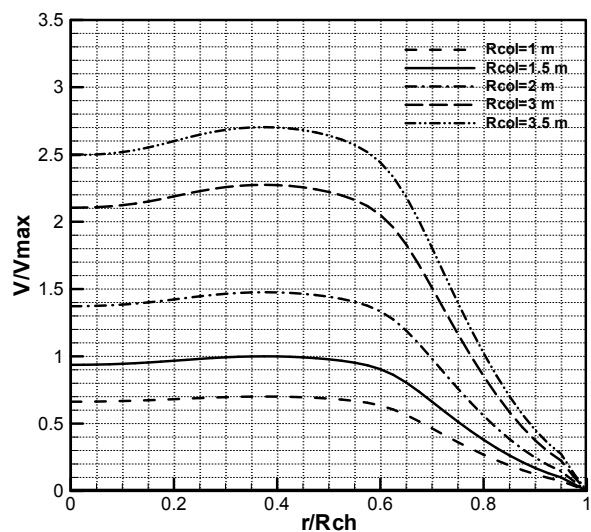
شکل (۱۰) نشان‌دهنده تأثیر شعاع دودکش بر سرعت جریان هوا در دودکش است. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش شعاع جمع‌کننده سرعت کاهش پیدا می‌کند و برعکس. شعاع دودکش نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان سرعت هوا و توان توربین دودکش خورشیدی دارد. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌گردد کاهش شعاع دودکش به نصف مقدار اولیه، سبب افزایش بیش از سه‌برابری در بیشینه سرعت هوا در دودکش می‌شود.



شکل (۷): نمودار مقادیر سرعت در سطح مقطع دودکش در فواصل متفاوت از زمین

### ۴.۲. تأثیر شعاع جمع‌کننده بر سرعت هوا

شکل (۸) نشان‌دهنده نمودار بی‌بعد شده سرعت جریان نسبت به شعاع دودکش بوده و تأثیر شعاع جمع‌کننده را بر سرعت جریان داخل برج نشان می‌دهد. لازم به یادآوری است که شعاع جمع‌کننده ۱/۵ متر شعاع پایه مدل ساخته شده در دانشگاه تهران است. از شکل (۸) می‌توان به‌خوبی دریافت که بیشترین سرعت جریان در شعاع جمع‌کننده ۳/۵ متر از این مدل به دست می‌آید. در نتیجه افزایش شعاع جمع‌کننده سبب افزایش سرعت در دودکش خورشیدی و در نتیجه افزایش توان توربین و راندمان نیروگاه می‌شود. همچنین، افزایش شعاع جمع‌کننده تأثیر بسزایی در افزایش سرعت جریان هوا دارد. همان‌طور که از شکل (۸) مشاهده می‌شود افزایش دوبرابری شعاع جمع‌کننده سبب افزایش حدود دوبرابری سرعت جریان هوا شده و در نتیجه باعث بهبود هرچه بیشتر راندمان نیروگاه می‌گردد.



شکل (۸): نمودار سرعت بی‌بعد شده در دودکش تحت شرایط شعاع جمع‌کننده‌های متفاوت

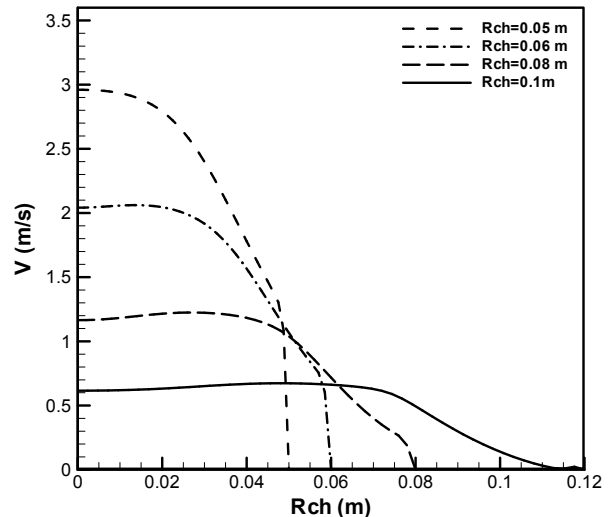
### ۵. نتیجه گیری

افزایش سرعت جریان هوا در مقطع برج دودکش خورشیدی، نقش عمده‌ای در افزایش کارایی و راندمان نیروگاه‌های دودکش خورشیدی دارد، زیرا افزایش سرعت منجر به افزایش سرعت دورانی توربین شده که خود باعث بالا رفتن توان تولیدی آن و به طور کلی ظرفیت نیروگاه خواهد شد. در این مطالعه، ضمن به دست آوردن محل وقوع سرعت ماکزیمم درون دودکش با تغییر در هندسه مدل ساخته شده، هدف اصلی تمرکز بر افزایش سرعت جریان هوا در دودکش بود. در این بررسی، مدل نیروگاه دودکش خورشیدی ساخته شده در دانشگاه تهران به کمک نرم افزار انسیس فلونت به صورت دوبعدی و بر مبنای روش حجم محدود با مدل توربولانسی کا-اِپسیلون استاندارد با تعداد ۶۵۶۰۰ سلول انجام گردید و پارامترهای هندسی مؤثر بر سرعت هوا از جمله ارتفاع دودکش، قطر دودکش، شعاع جمع کننده و ارتفاع جمع کننده مورد بحث و بررسی قرار گرفته شد. در ابتدا محل سرعت بیشینه در درون دودکش مورد مطالعه قرار گرفت که در فاصله ۲۰ سانتی متر از سطح زمین بود. سپس، با تغییر اندازه و ارتفاع جمع کننده، میزان تغییرات سرعت جریان در مقطع برج دودکش خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت و به صورت نمودار ارائه شد و با حالت اولیه مدل آزمایشگاهی مقایسه شد.

از میان پارامترهای مورد بررسی، افزایش شعاع جمع کننده و کاهش شعاع دودکش نقش بیشتری را در افزایش سرعت جریان هوا داخل دودکش دارند. به طوری که افزایش شعاع جمع کننده از ۱ متر تا ۳/۵ متر مورد بررسی قرار گرفت و سرعتی در بازه ۰/۷ متر بر ثانیه تا ۲/۵ متر بر ثانیه درون دودکش به وجود آورد. تغییرات شعاع دودکش بین بازه ۵ تا ۱۰ سانتی متر مورد بررسی قرار گرفت که سرعتی از ۰/۶ متر بر ثانیه برای قطر ۱۰ سانتی متر و ۳ متر بر ثانیه برای قطر ۵ سانتی متر به دست آمد. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع دودکش، ارتفاع جمع کننده، شعاع جمع کننده و کاهش شعاع دودکش، سرعت جریان هوا داخل برج در حدود ۷۶٪ افزایش یابد (از ۱/۷ متر بر ثانیه در مدل تجربی تا ۳ متر بر ثانیه). شایان ذکر است که شرایط اقلیمی از جمله موقعیت جغرافیایی، میزان تابش آفتاب، دمای محیط و همچنین طراحی توربین، جنس جمع کننده و بسیاری از پارامترهای مهم دیگر نیز نقش بسزایی در کارایی این نیروگاه خواهند داشت که در این تحقیق مورد بحث و بررسی قرار نگرفته است.

### فهرست علائم

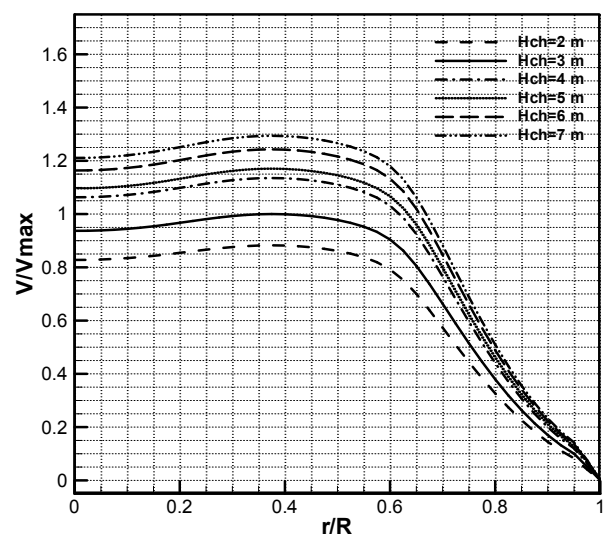
H	ارتفاع دودکش یا جمع کننده (m)
P	فشار ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )
R	شعاع دودکش یا جمع کننده (m)
t	زمان (s)



شکل (۱۰): نمودار سرعت در دودکش تحت شرایط شعاع دودکش های متفاوت

### ۵.۴. تأثیر ارتفاع دودکش بر سرعت هوا

شکل (۱۱) نشان دهنده تأثیر ارتفاع دودکش بر سرعت جریان هوا در دودکش است. همان طور که در شکل (۱۱) دیده می شود با افزایش ارتفاع دودکش سرعت هوا افزایش پیدا می کند. ارتفاع ۳ متر ارتفاع مدل آزمایشی است. همان طور که پیداست، افزایش ارتفاع برج دودکش خورشیدی تأثیر چندانی بر افزایش سرعت هوا داخل برج ندارد. چنان که مشاهده می گردد افزایش دوبرابری ارتفاع برج نهایتاً منجر به افزایش حدوداً ۳۰ درصدی سرعت هوا داخل دودکش می شود. با توجه به هزینه های مربوط به ساخت، نصب و بهره برداری برج های دودکش خورشیدی به نظر می رسد که افزایش ارتفاع دودکش به عنوان پارامتری برای افزایش راندمان نیروگاه چندان مقرون به صرفه نباشد.



شکل (۱۱): نمودار سرعت بی بعد شده در دودکش تحت مقادیر ارتفاع دودکش های متفاوت

$\rho$ چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )	عدد رینولدز Re
$\beta$ ضریب انبساط ( $K^{-1}$ )	T دما (K)
$\varepsilon$ نرخ اضمحلال جریان آشفته	u سرعت هوا در جهت x ( $\text{ms}^{-1}$ )
$\alpha$ ضریب نفوذ حرارتی ( $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ )	v سرعت هوا در جهت y ( $\text{ms}^{-1}$ )
زیرنویس‌ها	V برآیند سرعت هوا ( $\text{ms}^{-1}$ )
col جمع‌کننده	H ارتفاع دودکش یا جمع‌کننده (m)
ch دودکش	g شتاب گرانش ( $\text{ms}^{-2}$ )
$\infty$ مشخصات محیط	k ضریب هدایت حرارتی ( $\text{wm}^{-2}$ )
max مقدار بیشینه	$c_p$ گرمای ویژه در فشار ثابت ( $\text{jk}^{-1}\text{kg}^{-1}$ )
	علائم یونانی
	v لزجت سینماتیکی ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )

## مراجع

- [1] Fluri, T.P., and Von Backstrom, T. W., "Comparison of Modeling Approaches and Layouts for Solar Chimney Turbines", Solar Energy, Vol. 82, pp.239-246, 2008.
- [2] Schlaich, J., The Solar Chimney, Electricity from the Sun, Edition Axel Menges. Stuttgart, Germany, 1995.
- [3] Bansal, N.K., Mathur, R., and Bhandari, M.S., "A Study of Solar Chimney Assisted Wind Tower System for Natural Ventilation in Buildings", Building and Environment, Vol. 29, No. 4, pp. 495-500, 1994.
- [4] Schlaich, J., Bergemann, R., Schiel, W., and Weinrebe, G., "Design of Commercial Solar Updraft Tower Systems—Utilization of Solar Induced Convective Flows for Power Generation", Sol. Energy Eng., Vol. 127, No. 1, pp. 117-124, 2005.
- [5] Cao, F., Zhao, L. Li, H., and Guo, L., "Performance Analysis of Conventional and Sloped Solar Chimney Power Plants in China", Applied Thermal Engineering, Vol. 50, pp. 582-592, 2013.
- [6] Haaf, W., Friedrich, K., Mayr, G., and Schlaich, J., "Solar Chimneys, part I: Principle and Construction of the Pilot Plant in Manzanares", Int. Journal of Solar Energy, Vol. 2, pp. 3-20, 1983.
- [7] Haaf, W., "Solar Chimneys: Part II: Preliminary Test Results From The Manzanares Pilot Plant", Int. Journal of Solar Energy, Vol. 2, pp. 141-16, 1984.
- [8] Kulunk, H., "A Prototype Solar Convection Chimney Operated under Izmit Conditions", Proceedings of the 7th Miami Int. Conf. on Alternative Energy Sources, Veiroglu, TN, Vol. 162, 1985
- [9] Sampayo, E., Solar-Wind Power System, Spirit of Enterprise: the. 1986: 3-5.
- [10] Gannon, A.J. and Von Backström, T.W., "Controlling and Maximizing Solar Chimney Power Output", Proceedings of the 1st Int. Conf. on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Kruger Park, South, Africa, 2002.
- [11] Gannon, A.J. and Von Backström, T.W., "Solar Chimney Turbine Performance", J. Solar Energy Eng., Vol. 125, pp. 101-106, 2003.
- [12] Yan, M.Q., Sherif, S.A., Kridli, G.T., Lee, S.S., and Padki, M.M., "Thermo-Fluid Analysis of Solar Chimneys, Industrial Applications of Fluid Mechanics", Proceedings of the 112th ASME winter annual meeting, Atlanta, GA. Vol. 132, pp. 125-30, 1991.
- [13] Von Backström, T.W. and Fluri, T.P., "Maximum Fluid Power Condition in Solar Chimney Power Plants-An Analytical Approach", Solar Energy. Vol. 80, pp. 1417-1423, 2006.
- [14] Daba, R., Modeling and Simulation of Solar Chimney Power Plant with and without the Effect of Thermal Energy Storage Systems, Diss., Addis Abeba Institute of Technology, 2011.
- [15] Tingzhen, M., Wei, L., Guoling, X., Yanbin, X., Xuhu, G., and Yuan, P., "Numerical Simulation of the Solar Chimney Power Plant Systems Coupled with Turbine", Renewable Energy, Vol. 33, pp. 897-905, 2008.
- [16] Ghalamchi, M., Kasaeian A., and Ghalamchi, M., "Experimental Study of Geometrical and Climate Effects on the Performance of a Small Solar Chimney", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 43, pp. 425-431, 2015.
- [17] Ghalamchi, M., Kasaeian, A., Ghalamchi, M., Mirzahosseini, A.H., "An Experimental Study on the Thermal Performance of a Solar Chimney with Different Dimensional Parameters", Renewable energy, Vol.91, pp. 477-483, 2016.
- [18] Ayadi, A., Bouabidi, A., Driss, Z., Abid, M. S., "Experimental and Numerical Analysis of the Collector Roof Height Effect on the Solar Chimney Performance", Renewable energy, Vol.115, pp.649-662, 2018.
- [19] Toghraie, D., Karami, A., Afrand, M., Karimipour, A. "Effects of Geometric Parameters on the Performance of Solar Chimney Power Plants", Energy, Vol. 162, pp. 1052-1061, 2018.
- [20] Najm, O.A., Shaaban, S., "Numerical Investigation and Optimization of the Solar Chimney Collector Performance and Power Density", Energy Conversion and Management, Vol.168, pp. 150, 2018.
- [21] Muhammed, H.A., Atrooshi, S.A., Modeling Solar Chimney for Geometry Optimization. Renewable Energy, 2019.
- [22] Ayadi, A., Nasraoui, H., Bouabidi, A., Driss, Z., Bsis, M., Abid, M.S., "Effect of the Turbulence Model on the Simulation of the Air Flow in a Solar Chimney", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 130, pp. 423-434, 2018.
- [23] Ayadi, A., Driss, Z., Bouabidi, A., Nasraoui, H., Bsis, M., and Abid, M.S., "A computational and an Experimental Study on the Effect of the Chimney Height on the Thermal Characteristics of a Solar Chimney Power Plant", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, Vol 232, No. 4, pp. 503-516, 2018.
- [24] Sangi, R., Amidpour, M., Hosseinizadeh, B. "Modeling and Numerical Simulation of Solar Chimney Power Plants", Solar Energy, Vol. 85, No. 5, pp. 829-838, 2011.
- [25] Guo, P., Li, J., Wang, Y., Wang, Y., "Numerical Study on the Performance of a Solar Chimney Power Plant", Energy Conversion and Management, Vol. 105, pp. 197-205, 2015.