

# مطالعه اثر استفاده از پره های ایجاد کننده اغتشاش در دودکش یک آبگرمکن گازسوز دیواری بر هیدرو دینامیک جریان و بهبود انتقال حرارت

سید هادی پورحسینی\* دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

مجتبی باغبان استادیار، گروه مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیک: hadipoorhoseini@gonabad.ac.ir

## چکیده

در تحقیق حاضر تاثیر استفاده از تولیدکننده های گردابه به شکل صفحات نیمدایره ای با زاویه و فواصل طولی مختلف بر هیدرو دینامیک جریان و آهنگ انتقال حرارت از محصولات احتراق به دیواره دودکش یک آبگرمکن گازسوز دیواری به شیوه آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر تعداد و زاویه پره ها بر آهنگ انتقال حرارت به دیواره تعیین شده است. به منظور شبیه سازی مناسب فرآیند، مدل سه بعدی هندسه شامل پره های تولیدکننده گردابه و محفظه میانی دودکش در نرم افزار Gambit تهیه و در مدل سازی فرآیند توسط نرم افزار Fluent استفاده شده است. معادلات حاکم بر جریان محصولات احتراق ورودی به دودکش و عبوری از روی پره های تولید کننده گردابه شامل معادلات بقا، جرم، اندازه حرکت، انرژی و انرژی جنبشی اغتشاش و اتلاف آن است. همچنین برای مدل سازی تلاطم (اغتشاش) از مدل k-ε استاندارد به عنوان یکی از ساده ترین و در عین حال دقیق ترین و پرکاربردترین مدل های اغتشاش در شبیه سازی جریان های مغشوش استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که قرار دادن پره های ایجاد کننده اغتشاش (تولید کننده گردابه) در دودکش، ضمن کاهش سرعت در ناحیه مرکزی دودکش و افزایش زمان ماند محصولات احتراق، با مغشوش کردن و هدایت جریان به سمت لایه مرزی مجاور دیواره، باعث افزایش انتقال حرارت به دیواره دودکش می شود. همچنین آرایش ۷ پره تولید کننده گردابه با زاویه ۵۵ درجه نسبت به راستای طولی حالت بهینه ای است که علاوه بر افزایش آهنگ انتقال حرارت به دیواره برگشت جریان محصولات احتراق نیز رخ نمی دهد و غلظت منوکسیدکربن مطابق استاندارد آزمون ایمنی عملکردی آبگرمکن های گازی مخزن دار کمتر از حد مجاز است. نتایج به دست آمده همچنین نشان می دهد که در آرایش پره بهینه، با تغییر دبی گاز در محدوده ۰/۵ تا ۰/۷۵ متر مکعب بر ساعت، انتقال حرارت به دیواره دودکش به طور متوسط ۲۱٪ افزایش می یابد.

واژه های کلیدی: پره تولید کننده گردابه، محصولات احتراق، بهبود انتقال حرارت، زاویه پره، تعداد پره ها.

## Investigation on the effect of using vortex generator in the flow path of combustion product in the chimney of a natural gas wall-mounted water heater on flow hydrodynamics and improving heat transfer

Seyed Hadi Pourhoseini\*  
Mojtaba Baghban

Department of Mechanical Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran  
Department of Mechanical Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran

## Abstract

In this study, the effect of using vortex generators in the form of semicircular plates with different angles and at different longitudinal distances in the chimney of a laboratory furnace with natural gas fuel on the hydrodynamics of the flow and the rate of heat transfer from combustion products has been investigated experimentally and numerically. The investigated parameters were angles for blades and the number of blades. In order to properly simulate the process, the three-dimensional model of the geometry, including the blades producing the vortex and the middle chamber of the chimney, has been prepared in the Gambit software and used in the modeling of the process by the Fluent software. The governing equations for the flow of combustion products entered the chimney and passed over the blades include the equations of conservation of mass, momentum, energy and kinetic energy of turbulence and its dissipation. To model the turbulence, the standard k-ε model is used as one of the simplest yet most accurate and widely used turbulence models in the simulation of turbulent flows. The results show that vortex generators with reducing the speed in the central area of the chimney and increasing the residence time of the combustion products and also by directing the flow towards the boundary layer adjacent to the wall, increases the heat transfer to the chimney. The angle of 55° and the number of blades 7 was the optimum condition that prevents the flow of exhaust gases from returning and the concentration of carbon monoxide was lower than standard level. The results revealed that in optimum case, by changing the gas flow rate in the range of 0.5 to 0.75 m<sup>3</sup>/hr, the heat transfer to the chimney wall increases by 21% on average.

**Keywords:** Vortex generator, Combustion products, Heat transfer enhancement, Blade angle, Number of blades.

انرژی حرارتی یکی از مهمترین شکل های انرژی است که کاربرد فراوانی در صنعت و مصارف خانگی دارد. علی‌رغم توسعه استفاده از انرژی های تجدید پذیر، تولید انرژی حرارتی به وسیله احتراق سوخت های فسیلی مهم ترین منبع تولید انرژی حرارتی بوده و محدود بودن و کاهش سریع منابع سوخت های فسیلی لزوم بهبود کارایی تجهیزات احتراقی به منظور کاهش مصرف سوخت را ضروری می‌کند [۱-۳]. وجود منابع عظیم گازی در کشور و سازگاری سوخت گاز طبیعی با محیط زیست (به دلیل تولید آلاینده های کمتر در فرآیند احتراق) باعث شده تا استفاده از سوخت گاز طبیعی به عنوان پاکترین سوخت فسیلی برای تولید انرژی حرارتی در صنعت و مصارف خانگی رو به گسترش باشد [۴]. این درحالی است که بسیاری از این سیستم‌های حرارتی برپایه سوخت‌های مایع (گازوئیل، مازوت) و جامد (ذغال سنگ) طراحی شده و جایگزین کردن سوخت گاز طبیعی به جای سوخت‌های فسیلی مایع و جامد باعث کاهش شدید راندمان حرارتی این تجهیزات شده است که این موضوع ضرورت پژوهش در مورد روش‌هایی که بهبود راندمان حرارتی و در نتیجه کاهش مصرف گاز طبیعی در سیستم‌های حرارتی گازسوز را تبیین می‌نماید، مشخص می‌کند. [۷-۱۵]. به دلیل خصوصیات انتقال حرارت تابشی ضعیف شعله گاز طبیعی راندمان انتقال حرارتی شعله پایین بوده و محصولات احتراق در دودکش دارای دمای بالایی هستند و بازیابی حرارت از جریان گازهای عبوری از دودکش باعث جلوگیری از اتلاف حرارتی در سیستم های احتراقی گاز سوز خواهد شد. استفاده از نوارهای پیچ خورده و سطوح تولید کننده گردابه متداول ترین روش ها برای بهبود انتقال گرما در جریان‌های داخلی است [۸]. نوارهای پیچ خورده با ایجاد چرخش در جریان و حرکت چرخشی جریان بر روی سطح باعث افزایش سطح تماس و افزایش زمان تماس سیال و سطح می‌شوند که این عوامل باعث افزایش انتقال حرارت خواهند شد. پارامترهای هندسی نظیر طول، عرض، ضخامت، زاویه و جهت پیچش سطح نسبت به راستای جریان عبوری از روی آن متغیرهایی هستند که تاثیر آنها بر بهبود انتقال حرارت جابجایی در پژوهش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. ساها و همکاران [۹] اثر نسبت پیچش نوار و عرض نوار را بر بهبود انتقال حرارت در یک لوله حلقوی بررسی کرده و دریافتند که کاهش عرض نوار نرخ بهبود انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. ایاسما و همکاران [۱۰] نیز در تحقیقات خود دریافتند که کاهش نسبت پیچش باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. در پژوهشی دیگر ایامسا و همکاران [۱۱] اثر نسبت طول را بر بهبود ضریب انتقال حرارت بررسی و دریافتند که نوارهای با نسبت طول کوچک با ثابت نگه داشتن نسبت پیچش در مقایسه با نوارهای با نسبت طول بزرگ باعث افزایش چرخش جریان و بهبود ضریب انتقال حرارت در ناحیه ورودی و ابتدایی لوله می‌شوند و این در حالی است که نوارهای با نسبت طول بزرگ، چرخش جریان در تمام طول لوله را بهبود می‌بخشند. سارادا و همکاران [۱۲] در تحقیق خود مشاهده کردند که عرض نوار پیچ خورده به طور موثری بر نرخ انتقال حرارت موثر است بطوریکه افزایش عرض نوار نرخ انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد.

اسماعیلزاده و همکاران [۱۳] اثر ضخامت نوار پیچ خورده را بر بهبود انتقال حرارت در حضور نانو سیال بررسی و دریافتند که افزایش ضخامت نوار باعث افزایش آهنگ انتقال حرارت و فاکتور عملکرد حرارتی می‌شود. ایامسا و پرومونگ [۱۴] اثر استفاده از آرایه‌های متناوب نوارهای پیچ خورده به صورت ساعتگرد و پادساعتگرد و با زاویه پیچش‌های مختلف را بر آهنگ انتقال حرارت در یک لوله بررسی و دریافتند که استفاده از این آرایش نواری در مقایسه با نوار پیچ خورده معمولی باعث افزایش آهنگ انتقال حرارت می‌شود. آنها همچنین مشاهده کردند که افزایش زاویه پیچش باعث بهبود نرخ انتقال حرارت خواهد شد. پاتیل و ویجایابو [۱۵-۱۶] آزمایش‌هایی را برای درک اثر نسبت پیچش بر بهبود نرخ انتقال حرارت انجام داده و مشاهده کردند که کاهش نسبت پیچش باعث افزایش آهنگ انتقال حرارت می‌شود. آنها همچنین نوارهای پیچ خورده با نسبت پیچش افزایشی-کاهشی و کاهشی-افزایشی را نیز آزمایش کرده و دریافتند که نوار پیچ خورده با نسبت پیچش افزایشی-کاهشی بیشترین فاکتور عملکرد حرارتی را دارد. همچنین تحقیقات آنها نشان می‌دهد که نوار پیچ خورده ذخیره انرژی را نیز افزایش می‌دهد. سیواشانموگام و همکاران [۱۷-۱۸] اثر استفاده از نوارهای پیچ خورده مارپیچی با نسبت پیچش مختلف را بر بهبود نرخ انتقال حرارت در لوله‌های ساده بررسی و بیان داشتند که این نوارها باعث بهبود نرخ انتقال حرارت و افزایش فاکتور عملکرد انتقال حرارت می‌شوند. رحیمی و همکاران [۱۹] تحقیقاتی را بر روی عملکرد حرارتی نوارهای پیچ خورده بهبود یافته شامل نوار پیچ خورده سوراخ دار، بریده شده و دنداندار انجام داده و دریافتند که نوارهای پیچ خورده دنداندار به دلیل ایجاد تلاطم بیشتر در جریان در نزدیک دیواره لوله بهترین عملکرد حرارتی را در مقایسه با دیگر نوارها دارند. شبانیان و همکاران [۲۰] به تحلیل بهبود نرخ انتقال حرارت با استفاده از سه نوع المان داخل شونده در لوله با عنوان نوار پیچ خورده ساده، نوار پیچ خورده دنداندار و المان پروانه‌ای پرداخته و مشاهده نمودند که المان پروانه‌ای در مقایسه با نوار پیچ خورده دنداندار و نوار پیچ خورده ساده بهترین عملکرد حرارتی را دارد. دشموخ و ودولا [۲۱] استفاده از تولید کننده گردابه برای افزایش اغتشاش در جریان داخل لوله و افزایش آهنگ انتقال حرارت به دیواره لوله را به جای استفاده از نوار پیچ خورده پیشنهاد داده و گزارش نمودند که استفاده از تولید کننده گردابه باعث افزایش قابل توجه عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی بر روی دیواره لوله و در نتیجه افزایش آهنگ انتقال حرارت به دیواره لوله می‌شود. یانگ و چن [۲۲] اثر استفاده از صفحات شیاردار (راه راه) به شکل V و با زاویه‌های مختلف را به عنوان تولید کننده گردابه بر بهبود انتقال حرارت بررسی کرده و دریافتند که با افزایش زاویه صفحه (جمع شدن شیارها) نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. کالیسکان [۲۳] به مقایسه تولید کننده گردابه به شکل لبه‌های مستطیلی و مثلثی که در امتداد طولی بر روی یک صفحه پانچ شده بودند و تاثیر آن بر بهبود انتقال حرارت در یک کانال مکعب مستطیلی شکل پرداخت. او همچنین اثر زاویه لبه‌های مستطیلی و مثلثی با صفحه را نیز بر بهبود عملکرد حرارتی مورد بررسی قرار داد. نتایج به دست آمده نشان داد که هر دو تولید کننده گردابه ضریب انتقال حرارت جابجایی جریان عبوری در کانال را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهند و باعث افزایش نرخ انتقال حرارت به میزان ۲۳ تا

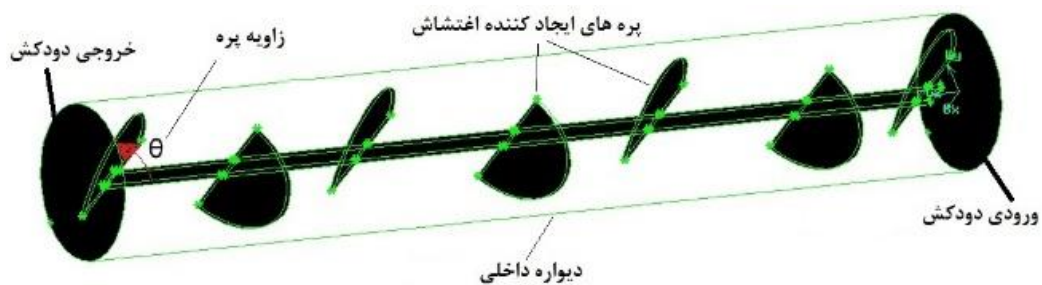
۵۵ درصد می شوند. فاکتور عملکرد حرارتی برای تولید کننده‌های گردابه به شکل لبه‌های مثلثی در زاویه ۴۵ درجه ۲/۹۲ بود و این مقدار برای تولید کننده‌های گردابه به شکل لبه‌های مستطیلی ۲/۸۵ به دست آمد. اگرچه هر دو تولید کننده گردابه به دلیل انسداد جریان و ایجاد جریان برگشتی باعث افزایش تلفات (افت فشار) جریان عبوری می‌شوند ولی تولید کننده‌های گردابه به شکل لبه‌های مستطیلی افت فشار و تلفات بسیار بیشتری را نسبت به تولید کننده‌های گردابه به شکل لبه مثلثی ایجاد می‌کنند. همچنین با افزایش عدد رینولدز جریان میزان افت فشار افزایش می‌یابد. مین و همکاران [۲۴] با بریدن گوشه‌های تولید کننده گردابه با لبه مستطیلی به آرایش بهینه‌ای رسیدند که باعث کاهش افت فشار و بهبود انتقال حرارت در مقایسه با تولید کننده گردابه با لبه مستطیلی می‌شد. اسکولانگ و همکاران [۲۵] تاثیر استفاده از تولید کننده‌های گردابه به شکل مثلثی از نوع پیش رو و پس رو و با زاویه های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه را بر بهبود نرخ انتقال حرارت در یک گرمکن خورشیدی بررسی کرده و دریافتند که عملکرد حرارتی پره‌های نوع پیش رو نسبت به پس رو بهتر بوده و همچنین در هر دو حالت زاویه ۴۵ درجه بیشترین فاکتور عملکرد حرارتی را به دست می‌دهد.

بازدهی حرارتی پایین تجهیزات گازسوز تولیدی در کشور از جمله آبرگرمکن‌های گازسوز دیواری مخزنی لزوم بهینه‌سازی این تجهیزات برای صرفه‌جویی در مصرف گاز طبیعی به عنوان پاکترین منبع سوخت فسیلی را تبیین می‌کند. همانطور که اشاره شد استفاده از پره‌های تولیدکننده گردابه یکی از بهینه‌ترین راه‌های افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و آهنگ انتقال حرارت به دیواره در جریان های داخلی است و با توجه به اینکه در آبرگرمکن‌های گازسوز دیواری مخزنی محصولات احتراق حاصل از سوختن گاز طبیعی در حین عبور از دودکش میانی آبرگرمکن با دیواره مخزن تبادل حرارت نموده و از این طریق باعث افزایش دمای آب داخل مخزن می‌شوند، بنابراین استفاده از این پره‌های تولیدکننده گردابه در مسیر جریان محصولات احتراق عبوری از دودکش می‌تواند از طریق ایجاد اغتشاش و کاهش سرعت جریان در ناحیه مرکزی دودکش و افزایش سرعت جریان در لایه مرزی مجاور دیواره دودکش باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی محصولات احتراق و افزایش نرخ انتقال حرارت به دیواره آبرگرمکن شود. بر این اساس، در تحقیق حاضر تاثیر استفاده از تولید کننده‌های گردابه به شکل صفحات نیم‌دایره‌ای با زاویه‌های مختلف و در فواصل طولی مختلف در دودکش یک آبرگرمکن گازسوز دیواری مخزنی بر هیدرودینامیک جریان و آهنگ انتقال حرارت از محصولات احتراق مورد بررسی قرار گرفته و با ترکیب نتایج با داده‌های آزمایشگاهی آرایش بهینه برای پره‌های تولید کننده گردابه از نظر تعداد و زاویه پره‌ها به دست آمده است.

## ۲- شبیه سازی عددی

به منظور شبیه‌سازی تاثیر استفاده از پره‌های تولید کننده گردابه در دودکش میانی آبرگرمکن، یک مدل سه بعدی شامل پره‌های تولیدکننده گردابه و محفظه میانی دودکش آبرگرمکن در نرم افزار Gambit تهیه و در مدل‌سازی فرآیند توسط نرم افزار

Fluent استفاده شده است. برای شبکه‌بندی هندسه کوره از شبکه‌بندی نوع (Tet/TGrid) استفاده شده است. شکل ۱ هندسه مسئله متشکل از دودکش و پره‌های تولید کننده گردابه و جدول ۱ کمیت‌های هندسی و ابعاد مسئله را نشان می‌دهد.

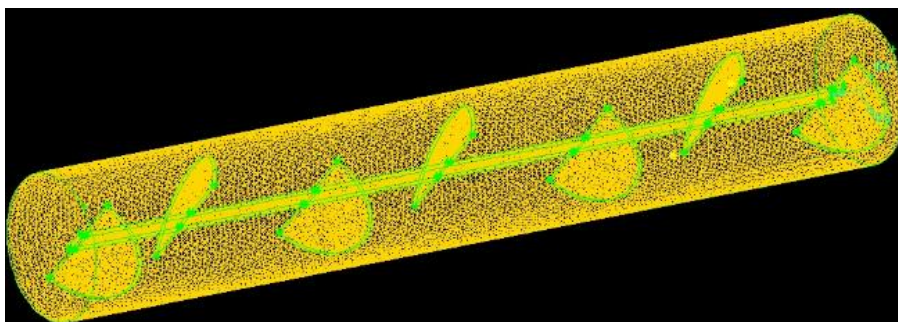


شکل ۱- هندسه مسئله شامل دودکش و پره‌های تولید کننده گردابه

جدول ۱- کمیت های هندسی مسئله

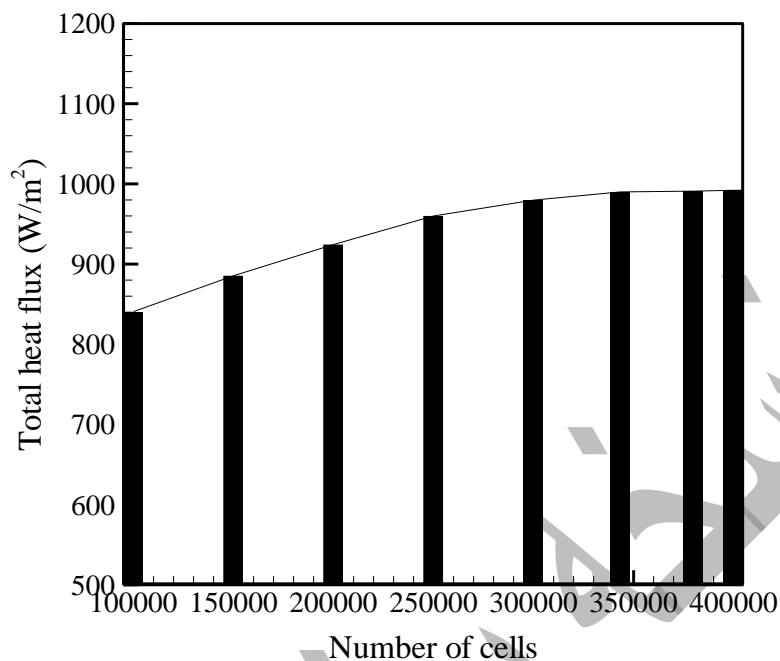
طول دودکش	720 mm
قطر دودکش	110 mm
شعاع پره‌ها	50 mm
تعداد پره‌ها	3-4-7
زاویه پره‌ها	30°-45°-55°
ضخامت پره‌ها	3 mm

شکل ۲ تصویری از شبکه‌بندی هندسه مسئله شامل پره‌های تولیدکننده گردابه به شکل نیم‌دایره را در درون محفظه استوانه‌ای شکل دودکش نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که به منظور بررسی اثر تعداد و زاویه پره‌ها بر آهنگ انتقال حرارت به دیواره دودکش و رسیدن به نرخ انتقال حرارت حداکثری، شبیه‌سازی جریان با پره‌های با زاویه و تعداد مختلف صورت گرفته است. زوایای مورد بررسی برای پره‌ها نسبت به راستای طولی ۳۰، ۴۵ و ۵۵ درجه و تعداد پره‌ها نیز ۳، ۴ و ۷ عدد در نظر گرفته شده و آهنگ انتقال حرارت به دیواره دودکش در هر حالت به دست آمده است. لازم به ذکر است که انتخاب زاویه و تعداد پره‌ها بر اساس زوایای پیشنهاد شده در تحقیقات قبلی [۲۵] و تعداد حداکثر نیز بر اساس عامل افت فشار کل که تعیین کننده برگشت یا پس زدن جریان محصولات احتراق است انتخاب شده است.



شکل ۲- پره‌های تولیدکننده گردابه به شکل نیم‌دایره درون دودکش

ابعاد شبکه محاسباتی بر دقت نتایج محاسبات عددی و زمان حل مؤثرند. شکل ۳ داده‌های بررسی استقلال از تعداد مش در فرآیند مدل‌سازی مسئله را نشان می‌دهد.



شکل ۳- داده‌های بررسی استقلال از مش (تاثیر تعداد مش بر شار انتقال حرارت به دیواره دودکش)

بر اساس شکل ۳ شبکه‌بندی با تعداد ۳۴۳۲۵۹ سلول برای حل عددی استفاده شده است. شرایط مرزی استفاده شده در شبیه‌سازی شامل شرط مرزی Velocity inlet در ورودی محصولات احتراق به دودکش، شرط مرزی Out flow در خروجی دودکش و شرط مرزی Wall برای پره‌ها و دیواره دودکش است. لازم به ذکر است که به دلیل عدم داشتن شرایط مرزی در خروجی دودکش از شرط مرزی Out flow استفاده شده است. این مرز در شبیه‌سازی جریان‌های توسعه‌یافته بیشتر مورد استفاده قرار گیرد و توسعه یافتگی جریان با توجه به هندسه مسئله و رژیم درهم جریان ناشی از پره‌های تولیدکننده گردابه قابل قبول است. همچنین از شرط مرزی حرارتی از نوع انتقال حرارت جابجایی بر روی دیواره خارجی دودکش استفاده شده و ضریب انتقال حرارت جابجایی  $h$  از رابطه چرچیل و چو محاسبه و جایگزین شده است [۲۶].

$$Nu = \left[ 0.825 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{\left[ 1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \quad (1)$$

$$h = \frac{Nu.k}{L} \quad (2)$$

که در این رابطه  $h$  ضریب انتقال حرارت جابجایی جریان آب روی دیواره داخلی آبگرمکن (دودکش)،  $L = 720mm$  طول دیواره داخلی، و  $Ra$  و  $Pr$  اعداد رایلی و پراتل هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\alpha\nu} \quad (3)$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (4)$$

در این روابط  $T_s$  دمای سطح خارجی مخزن آبگرمکن و مجاور آب درون مخزن،  $T_\infty$  دمای متوسط آب مخزن،  $\beta$  و  $\nu$  ضریب انبساط حرارتی و ویسکوزیته سینماتیکی آب هستند.

همچنین با توجه به ساختار لوله‌ای شکل دودکش میانی آبگرمکن، عدد رینولدز جریان گازهای عبوری از دودکش برای تعیین رژیم جریان به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (5)$$

در این رابطه  $\rho$  چگالی گازهای عبوری از دودکش،  $V$  سرعت متوسط جریان،  $D$  قطر داخلی داخلی دودکش و  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی گازهاست.

معادلات حاکم بر جریان محصولات احتراق ورودی به دودکش و عبوری از روی پره‌های تولید کننده گردابه شامل معادلات بقاء جرم، اندازه حرکت، انرژی و انرژی جنبشی اغتشاش و اتلاف آن است. فرضیات اصلی حاکم بر معادلات پایدار بودن جریان، جریان تراکم ناپذیر و خواص ترموفیزیکی ثابت در نظر گرفته شده است. شکل کلی معادلات بقاء جرم، اندازه حرکت و انرژی برای جریان سیال تراکم ناپذیر در حالت پایدار به صورت زیر می‌باشد:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (6)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \right) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} \quad (7)$$

$$\rho C_p \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \nabla^2 T + (\vec{\tau} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} \quad (8)$$

در این روابط  $\rho$ ،  $C_p$  و  $k$  خواص ترموفیزیکی چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب هدایت حرارتی سیال بوده و  $\vec{V}$  بردار سرعت جریان سیال است. همچنین  $\vec{\tau}$  تانسور تنش برشی است.

برای مدل‌سازی تلاطم (اغتشاش) از مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد استفاده شده است. این مدل یکی از ساده‌ترین و در عین حال پر-کاربردترین مدل‌های اغتشاش در شبیه‌سازی بسیاری از جریان‌های مغشوش است. مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد یک مدل دو معادله‌ای نیمه تجربی است، که بر پایه معادلات مدل شده برای انرژی جنبشی تلاطم  $k$  و اتلاف آن  $\varepsilon$  بیان شده است. به دلیل دقت و سرعت رضایت بخش، مدل‌های دو معادله‌ای بیشتر از سایر مدل‌های جریان متلاطم مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد برای جریان‌های مغشوش بسیار مناسب بوده و دقت آن مورد تأیید بسیاری از پژوهش‌گران قرار گرفته است [۲۷]. دقت و سرعت رضایت بخش (هزینه محاسباتی کمتر) از یکسو و نیز کاربرد فراوان و تأیید دقت آن در جریان‌های مغشوش سبب شده است تا در این پژوهش نیز از همین مدل استفاده شود. همچنین برای مدل‌سازی رفتار نزدیک دیوار، از روش بهبودیافته استفاده شده است که این روش نیازمند مقدار  $\gamma^+$  کمتر از یک در شبکه نزدیک دیوار است. در فضاهایی که دارای

مناطق با دماهای متفاوت مانند کوره‌ها و محفظه‌های احتراقی که شامل سطوح و گازهای مختلف نشرکننده، پخش‌کننده و جذب‌کننده شارهای حرارتی تابشی می‌باشد؛ نیاز به مدلی است که انتقال حرارت تابشی را با دقت کافی تقریب بزند. مدل‌های تابش، شار حرارت را بین سطوح و گازهای مختلف محاسبه و امکان پیش‌بینی دقیق‌تر توزیع دما و شار انتقال حرارت در نقاط مختلف را فراهم می‌کنند. برای مسائل از نظر نوری نازک، فقط مدل‌های DO و DTRM مناسب می‌باشند [۲۷-۲۸]. در این پژوهش قطر دودکش میانی ۱۱۰ میلی‌متر بوده و بنابراین مسئله از لحاظ نوری نازک است. علاوه بر این فقط مدل‌های P-1 و DO می‌توانند تبادل تابش بین گازهای دی‌اکسیدکربن و بخار آب را در نظر بگیرند. همچنین فقط مدل‌های P-1 و DO می‌توانند پراکندگی و نشر را به خوبی محاسبه کنند. از اجتماع شرایط فوق مدل تابش به کار گرفته شده در این پژوهش مدل تشعشع انتقالی گسسته (DO) انتخاب شده است [۲۹]. کوپلینگ بین فشار و سرعت به کمک الگوریتم سیمپل انجام شده است. همچنین گسسته‌سازی فشار به کمک روش پرستو انجام پذیرفته است. گسسته‌سازی سایر معادلات در ابتدا با استفاده از روش بالادست مرتبه اول و سپس با استفاده از روش بالادست مرتبه دوم انجام شده است. ضرایب زیر تخفیف برای انرژی و لزجت گردابی به ترتیب ۰/۵ و ۰/۸ اعمال شده است. شرط همگرایی  $10^{-6}$  برای همه معادلات بجز معادله انرژی در نظر گرفته شد. این مقدار برای معادله انرژی  $10^{-6}$  می‌باشد. برای اطمینان از صحت شبیه‌سازی و اعتبار سنجی نتایج به دست آمده از مدل سازی، نمونه آزمایشگاهی از پره‌های شبیه‌سازی شده با کمیت‌های هندسی ذکر شده در جدول ۱ ساخته شده و در داخل دودکش میانی یک آبگرمکن گازسوز دیواری مخزنی نصب گردید و شار انتقال حرارت بر روی دیواره دودکش (دیواره مخزن) در حالت استفاده از پره‌های تولیدکننده گردابه تعیین و با نتایج مدل سازی متناظر آن مقایسه گردید. به منظور اندازه‌گیری آزمایشگاهی شار انتقال حرارت بر روی دیواره دودکش (دیواره مخزن)، پس از قراردادن پره‌های تولیدکننده گردابه در دودکش میانی آبگرمکن، آبگرمکن روشن شده و دبی گاز ورودی به آبگرمکن به گونه‌ای تنظیم گردید که دمای محصولات احتراق در بالای برنر و ورودی به دودکش میانی آبگرمکن با دمای شبیه‌سازی برابر شود. این کار با نصب یک ترموکوپل نوع K در بالای برنر و ورودی دودکش میانی آبگرمکن انجام گردید. این ترموکوپل قادر به اندازه‌گیری دماهای کمتر از ۱۲۶۰ درجه سانتی‌گراد بوده و دقت اندازه‌گیری آن  $\pm 0.75\%$  دمای اندازه‌گیری شده است. پس از رسیدن به حالت پایدار دمای آب ورودی و خروجی به آبگرمکن اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری دمای آب ورودی و خروجی از دو دماسنج جیوه‌ای با محدوده اندازه‌گیری ۱۰- تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد و دقت  $\pm 2$  درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. همچنین دبی جرمی آب نیز با استفاده از یک ظرف مدرج و با روش پیمانه‌ای تعیین گردید. با توجه به ضخامت کوچک دیواره دودکش، آهنگ انتقال حرارت ورودی به دیواره دودکش از گازهای عبوری از دودکش، در حالت پایدار با آهنگ حرارت منتقل شده از دیواره به جریان آب داخل مخزن آبگرمکن برابر است. با داشتن دبی جرمی و دمای آب ورودی و خروجی می‌توان آهنگ حرارت منتقل شده به جریان آب داخل مخزن آبگرمکن را از رابطه زیر محاسبه نمود:



$$\dot{Q} = mc\Delta T$$

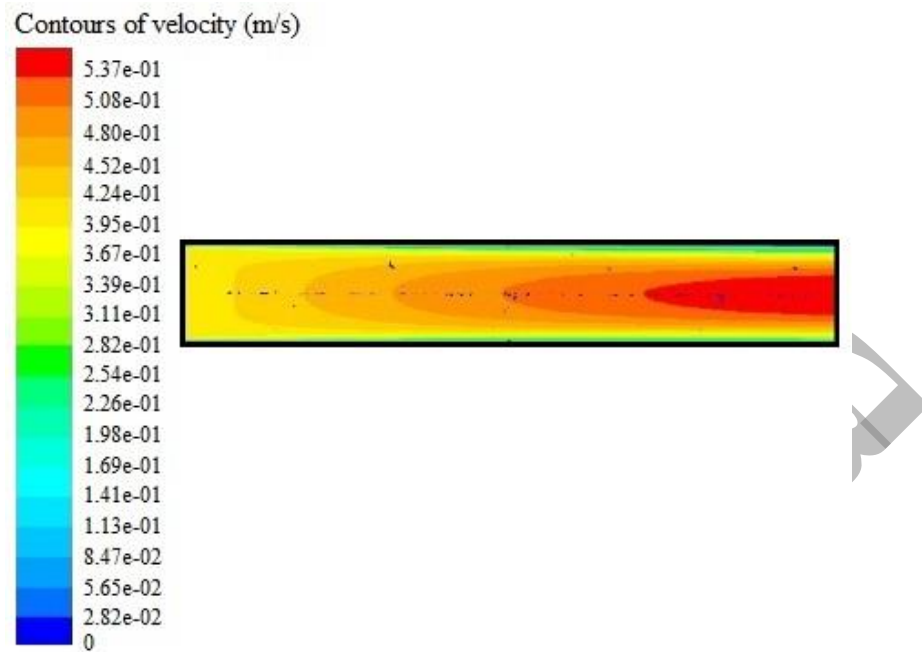
(۹)

که در این رابطه  $\dot{Q}$  آهنگ حرارت منتقل شده به جریان آب،  $m$  دبی جرمی جریان آب عبوری،  $\Delta T$  اختلاف دمای آب ورودی و خروجی و  $c$  ظرفیت گرمایی ویژه آب است. همانطور که بیان شد با توجه به ضخامت کوچک دیواره دودکش، آهنگ انتقال حرارت ورودی به دیواره دودکش از گازهای عبوری از دودکش، در حالت پایدار با آهنگ حرارت منتقل شده از دیواره به جریان آب داخل مخزن آبگرمکن برابر است و بنابراین با تقسیم  $\dot{Q}$  بر مساحت جانبی دیواره دودکش، شار حرارت ورودی به دیواره دودکش از گازهای عبوری از آن محاسبه گردید. همچنین برای اطمینان از صحت نتایج آزمایش دو بار تکرار و عدم قطعیت آزمایش ناشی از دقت تجهیزات و تکرار آزمایش به دست آمد. برگشت محصولات احتراق (پس زدن) باعث افزایش غلظت منوکسیدکربن در محیط نصب آن می شود. بنابراین به این منظور با استفاده از یک دستگاه گاز آنالایزر KIGAS 310 غلظت محصولات احتراق به ویژه منوکسیدکربن که باعث خفگی می شود در محیط نصب آبگرمکن اندازه گیری شده (این روش، روش استاندارد آزمون ایمنی عملکردی آبگرمکن های گازی مخزن دار مطابق استاندارد ۱۲۱۹ می باشد). با در نظر گرفتن شرایط بیشترین شار انتقال حرارت و عدم تجاوز غلظت منوکسیدکربن در محیط از حد استاندارد ناشی از برگشت یا پس زدن جریان محصولات احتراق به محیط، آرایش ۷ پره تولیدکننده گردابه با زاویه ۵۵ درجه نسبت به راستای طولی حالت بهینه ای بود که علاوه بر افزایش آهنگ انتقال حرارت به دیواره، برگشت جریان محصولات احتراق نیز به میزانی بود که غلظت منوکسیدکربن کمتر از حد مجاز بود. شار انتقال حرارت برای آرایش بهینه (آرایش ۷ پره با زاویه ۵۵ درجه) در حالت آزمایشگاهی و مدل سازی به ترتیب  $18 \pm 900$  و  $950$  وات بر متر مربع به دست آمدند که نشان دهنده دقت مناسب فرآیند مدل سازی است.

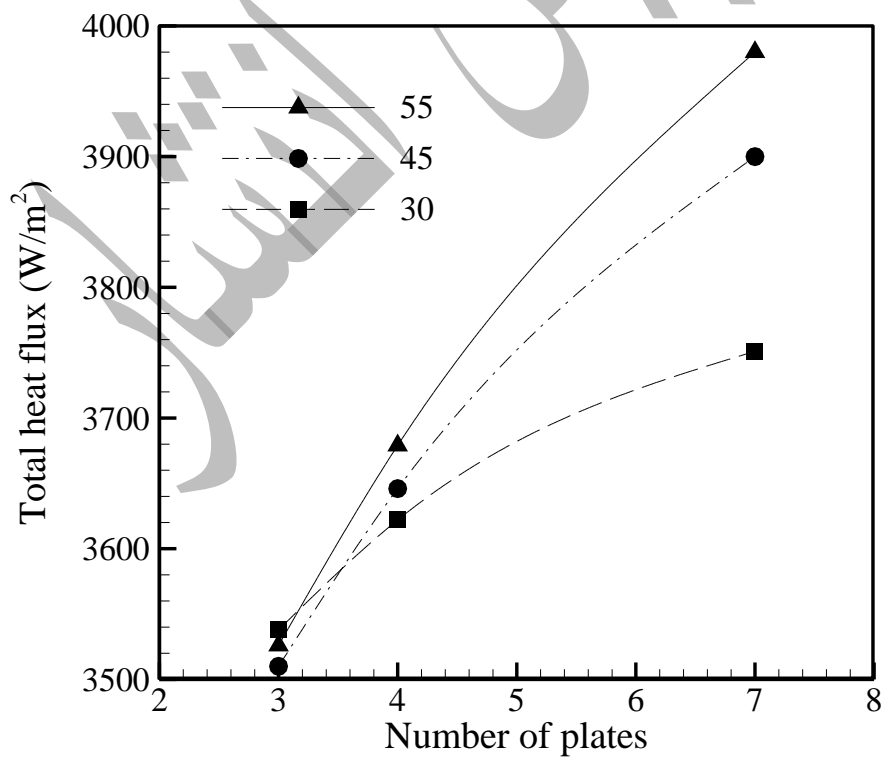
### ۳- نتایج

شکل ۴ توزیع سرعت جریان محصولات احتراق در دودکش را در حالت بدون استفاده از پره های تولیدکننده گردابه و ایجادکننده اغتشاش نشان می دهد. با توجه به ساختار لوله ای شکل دودکش، عدد رینولدز گذار برای تبدیل جریان از حالت آرام به درهم در محدوده  $2300$  بوده و با محاسبه عدد رینولدز جریان محصولات احتراق ورودی به دودکش می توان دریافت که رژیم جریان از نوع آرام است. همانطور که مشاهده می شود به دلیل کوچک بودن طول دودکش، جریان توسعه یافته نبوده و با حرکت به سمت خروجی دودکش سرعت جریان گازها در ناحیه مرکزی دودکش و خارج از لایه مرزی ایجاد شده بر روی دیواره دودکش افزایش می یابد؛ که با کاهش زمان ماند محصولات احتراق باعث اتلاف انرژی حرارتی خواهد شد. بنابراین انتظار می رود که قرار دادن تولید کننده گردابه ضمن کاهش سرعت در ناحیه مرکزی دودکش و افزایش زمان ماند محصولات احتراق،

با مغشوش کردن و هدایت جریان به سمت لایه مرزی مجاور دیواره، باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و در نتیجه افزایش انتقال حرارت به دیواره دودکش شود.

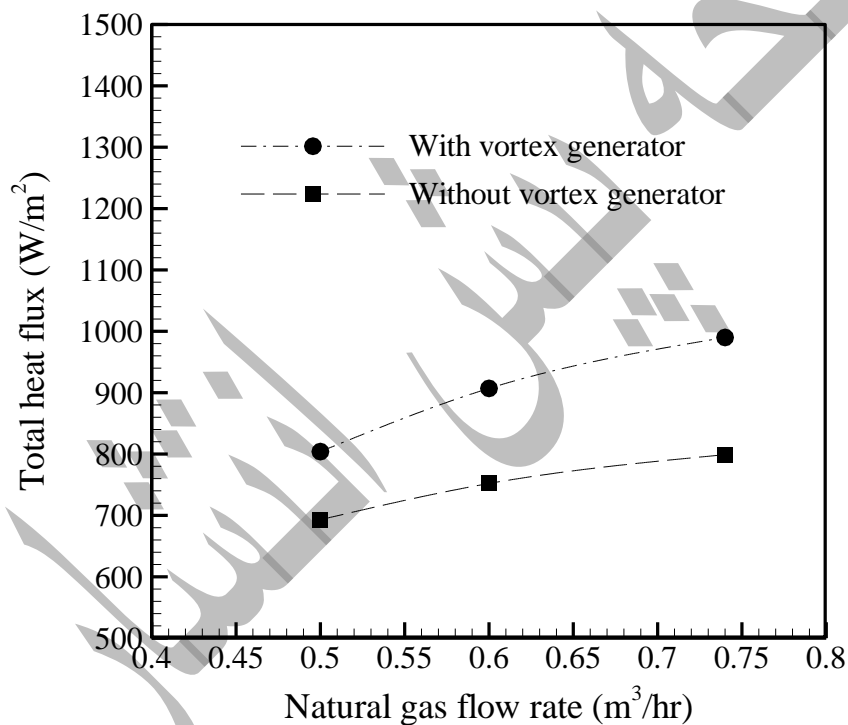


شکل ۴- توزیع سرعت جریان محصولات احتراق در دودکش بدون استفاده از پره‌های تولید کننده گردابه



شکل ۵: تاثیر تعداد و زاویه پره‌های تولید کننده گردابه بر آهنگ انتقال حرارت به دیواره دودکش

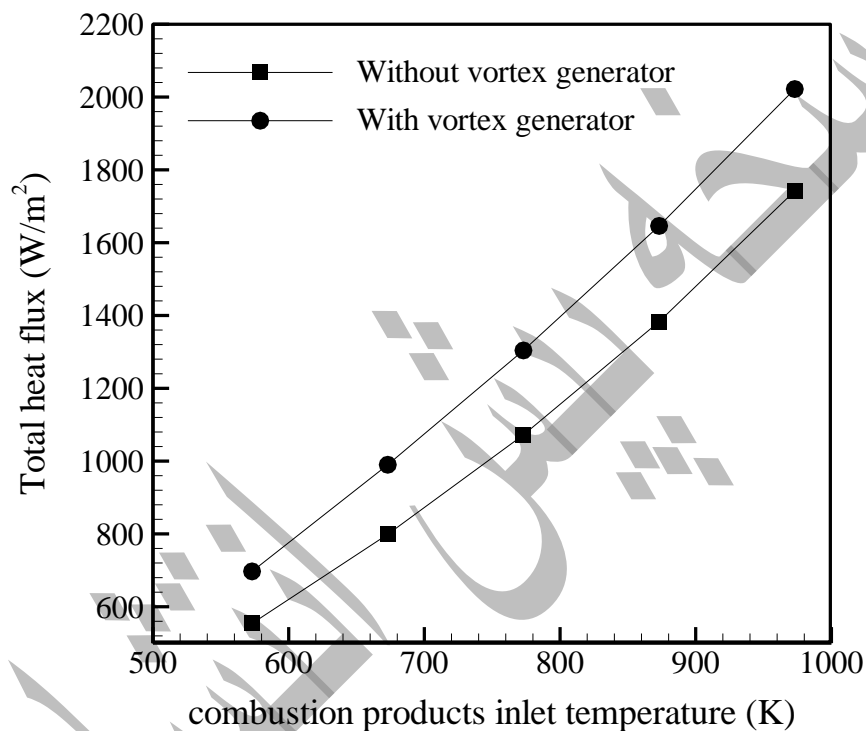
شکل ۵ تاثیر تعداد و زاویه پره‌های تولیدکننده گردابه را بر آهنگ انتقال حرارت به دیواره دودکش نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود به طور کلی با افزایش تعداد پره‌ها، آهنگ انتقال حرارت به دیواره افزایش می‌یابد. افزایش زاویه پره‌ها نیز باعث افزایش آهنگ انتقال حرارت به دیواره دودکش می‌شود. بطوریکه در حالت استفاده از پره با زاویه ۵۵ درجه، افزایش تعداد پره‌ها از ۳ به ۷ عدد، آهنگ انتقال حرارت به دیواره را به میزان ۱۳ درصد افزایش می‌دهد. همچنین افزایش زاویه پره از ۳۰ به ۵۵ درجه در آرایش ۷ پره، افزایش انتقال حرارت به دیواره را به میزان ۶/۱ درصد به دنبال دارد. همچنین با افزایش تعداد پره‌ها تاثیر زاویه پره بر بهبود آهنگ انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد. نکته حائز اهمیت این است که با افزایش تعداد پره‌ها و زاویه پره‌ها، میزان افت فشار افزایش یافته که احتمال برگشت جریان گازهای دودکش را تقویت می‌کند و همانطور که قبلاً اشاره شد زاویه ۵۵ و تعداد پره‌های تولید کننده گردابه با بیشترین تعداد ۷ بهینه‌ترین حالتی است که مانع برگشت جریان گازهای خروجی می‌شود.



شکل ۶: مقایسه شار انتقال حرارت منتقل شده به دیواره با و بدون استفاده از پره‌های تولید کننده گردابه و در دبی‌های مختلف گاز ورودی

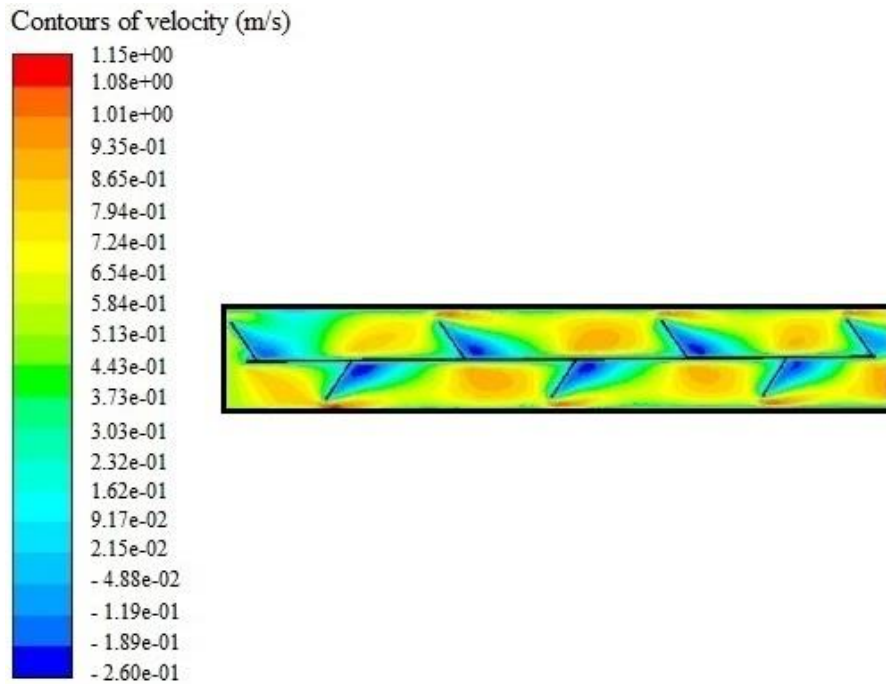
شکل ۶ شار گرمای منتقل شده به دیواره دودکش را با و بدون استفاده از پره‌های تولیدکننده گردابه و برای دبی‌های مختلف جریان گاز نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود استفاده از پره‌های تولیدکننده گردابه در مسیر محصولات احتراق عبوری از دودکش باعث می‌شود تا انتقال حرارت به دیواره دودکش به طور متوسط ۲۱٪ افزایش یابد. با افزایش دبی حجمی گاز ورودی به محفظه احتراق، دبی حجمی محصولات احتراق و دمای آنها افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر افزایش دبی گاز

ورودی باعث افزایش انرژی حرارتی حاصل از واکنش احتراق شده و سبب افزایش آهنگ انتقال حرارت به دیواره دودکش می-شود. همچنین با افزایش دبی گاز تاثیر استفاده از پره‌ها بر افزایش انتقال حرارت به دیواره دودکش بیشتر می‌شود. در شکل ۷ اثر شار گرمای منتقل شده به دیواره داخلی دودکش با و بدون استفاده از پره‌های تولیدکننده گردابه و در دماهای مختلف جریان محصولات احتراق ورودی به دودکش نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش دمای محصولات احتراق نیز باعث افزایش انتقال حرارت به دیواره دودکش خواهد شد و استفاده از پره‌های تولیدکننده گردابه افزایش شار انتقال حرارت به دیواره داخلی دودکش در دماهای مختلف را به دنبال دارد.



شکل ۷: مقایسه شار انتقال حرارت منتقل شده به دیواره دودکش در دماهای ورودی مختلف محصولات احتراق با و بدون پره‌های تولید کننده گردابه

شکل ۸ توزیع سرعت جریان محصولات احتراق در دودکش را در حالت استفاده از پره‌های تولید کننده گردابه و ایجاد کننده اغتشاش نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود قرار دادن تولید کننده گردابه ضمن کاهش سرعت در ناحیه مرکزی دودکش با مغشوش کردن و هدایت جریان به سمت لایه مرزی مجاور دیواره دودکش و افزایش سرعت جریان در مجاورت دیواره، باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و در نتیجه افزایش انتقال حرارت به دیواره دودکش مطابق نتایج شکل‌های ۶ و ۷ می‌شود.



شکل ۸: توزیع سرعت جریان محصولات احتراق در دودکش با استفاده از پره‌های تولید کننده گردابه بهینه

#### ۴- نتیجه‌گیری

تاثیر استفاده از تولیدکننده‌های گردابه به شکل صفحات نیمدایره‌ای با زاویه‌های مختلف و در فواصل طولی مختلف در دودکش یک آبگرمکن گازسوز دیواری بر هیدرودینامیک جریان و آهنگ انتقال حرارت از محصولات احتراق به دیواره به شیوه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت:

۱- قرار دادن تولیدکننده گردابه ضمن کاهش سرعت در ناحیه مرکزی دودکش و افزایش زمان ماند محصولات احتراق، با مغشوش کردن و هدایت جریان به سمت لایه مرزی مجاور دیواره، باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و در نتیجه افزایش انتقال حرارت به دیواره دودکش می‌شود.

۲- به طور کلی با افزایش تعداد پره‌های تولید کننده گردابه، آهنگ انتقال حرارت به دیواره افزایش می‌یابد. همچنین افزایش زاویه پره‌های تولید کننده گردابه نیز باعث افزایش آهنگ انتقال حرارت به دیواره دودکش می‌شود و با افزایش تعداد پره‌ها تاثیر زاویه پره بر بهبود آهنگ انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد.

۳- با افزایش تعداد پره‌ها و زاویه پره‌ها، میزان افت فشار افزایش یافته که احتمال برگشت جریان گازهای دودکش را تقویت می‌کند و بر این اساس زاویه ۵۵ و تعداد پره‌های تولید کننده گردابه ۷ عدد ماکزیمم حالتی است که مانع برگشت جریان گازهای خروجی می‌شود.

۴- با تغییر دبی گاز در محدوده ۰/۵ تا ۰/۷۵ متر مکعب بر ساعت انتقال حرارت به دیواره دودکش به طور متوسط ۲۱٪ افزایش می‌یابد.

## ۵- سپاسگزاری

نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از واحد پژوهش شرکت گاز استان خراسان رضوی به عنوان حامی مالی این پژوهش، آقای دکتر افشون رئیس محترم واحد پژوهش شرکت گاز استان خراسان رضوی، ناظر محترم طرح آقای مهندس محمدیان و همچنین همکار آزمایشگاهی آقای انتظاری اعلام می‌دارند.

## ۶- واژه نامه و فهرست علائم

نوارهای پیچ خورده	Twisted tape
تولیدکننده گردابه	Vortex generator
ضریب انتقال حرارت جابجایی	$h$
عدد رایلی	$Ra$
عدد پرانتل	$Pr$
دمای سطح خارجی مخزن آبگرمکن	$T_s$
دمای متوسط آب مخزن	$T_\infty$
ضریب انبساط حرارتی	$\beta$
ویسکوزیته سینماتیکی	$\nu$
چگالی گازهای عبوری از دودکش	$\rho$
سرعت متوسط جریان	$V$
قطر داخلی داخلی دودکش	$D$
ظرفیت گرمایی ویژه	$C_p$
ضریب هدایت حرارتی	$k$
تانسور تنش برشی	$\bar{\tau}$
الگوریتم سیمپل	SIMPLE
روش گسسته سازی پرستو	PRESTO
آهنگ انتقال حرارت	$\dot{Q}$
دبی جرمی	$\dot{m}$
اختلاف دما	$\Delta T$

- [1] M. Anbarsooz, M. Pasandideh-Fard, and N. Shaleh, "Numerical simulation of Toos power plant boiler to improve its thermal efficiency," *Journal of Applied and Computational Science in Mechanics*, vol. 27, no. 1, pp. 117-134, (2016). (In Persian)
- [2] B. W. Bulter, M. K. Denison, and B. W. Webb, "Radiation heat transfer in a laboratory scale pulverized coal fired reactor," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 9, pp. 69-79, (1994).
- [3] A. J. Ahmadian Hosseini, S. H. Pourhoseini, M. Moghiman, and M. R. Mahpeykar, "Parametric assessment of changing inlet air swirl intensity on flow dynamic behavior, temperature and radiation heat flux of Harwell furnace," *Journal of Mechanical Engineering (University of Tabriz)*, vol. 47, no. 4, pp. 31-37, (201<sup>^</sup>). (In Persian)
- [4] M. Moghiman, and S. H. Pourhoseini, "Experimental study on the effect of coal particles injection on flame structure, radiation heat transfer, temperature distribution and thermal efficiency in natural gas diffusion flames," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 7, pp. 163-168, (2014). (In Persian)
- [5] S. H. Pourhoseini, I. Taghvaei, M. Moghiman, and M. Baghban, "Tangential Flue Gas Recirculation (TFGR) technique for enhancement of radiation characteristics and reduction of NOx emission in natural gas burners," *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, vol. 94, pp. 1-8, (2021).
- [6] S. H. Pourhoseini, and N. Naghizadeh, "A Comparative study of, luminous, and infrared radiation characteristics of natural gas flame in the presence of alkali, alkali-earth, and transition metallic solution additive," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 144, pp. 1-5, (2022).
- [7] S. H. Pourhoseini, "Enhancement of radiation characteristics and reduction of NOx emission in natural gas flame through silver-water nanofluid injection," *ENERGY*, vol. 194, pp. 1-7, (2020).
- [8] C. Maradiya, J. Vadher, and R. Agarwal, "The heat transfer enhancement techniques and their Thermal Performance Factor," *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 7, pp. 1-21, (2018).
- [9] S. K. Saha, A. Dutta, and S. K. Dhal, "Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through a circular tube fitted with regularly spaced twisted tape elements," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 44, pp. 4211-4223, (2001).
- [10] S. Eiamsa-ard, C. Tianpong, and P. Promvonge, "Experimental investigation of heat transfer and flow friction in a circular tube fitted with regularly spaced twisted tape elements," *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, vol. 33, pp. 1225-1233, (2006).
- [11] S. Eiamsa-ard, C. Tianpong, P. Eiamsa-ard, and P. Promvonge, "Convective heat transfer in a circular tube with short length twisted tape insert," *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, vol. 36, pp. 365-371, (2009).

- [12] S. N. Sarada, A.V. Sita Rama Raju, K. Kalyani Radha, and L. Shyam Sunder, "Enhancement of heat transfer using varying width twisted tape inserts," *Int. J. Eng., Sci. Technol.*, vol. 2, pp. 107-118, (2011).
- [13] E. Esmaeilzadeh, H. Almohammadi, A. Nokhosteen, and A. Motezaker, "Study on heat transfer and friction factor characteristics of c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water through circular tube with twisted tape inserts with different thicknesses," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 82, pp. 72-83, (2014).
- [14] S. Eiamsa-ard, and P. Promvonge, "Performance assessment in a heat exchanger tube with alternate clockwise and counter-clockwise twisted-tape inserts," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 53, pp. 1364-1372, (2010).
- [15] S. V. Patil, and P. V. Vijaybabu, "Heat transfer and pressure drop studies through a square duct fitted with increasing and decreasing order of twisted tape," *Heat Transfer Engineering*, vol. 35, pp. 1380-1387, (2104).
- [16] S. V. Patil, and P. V. Vijaybabu, "Heat transfer enhancement through a square duct fitted with twisted tape inserts," *Heat and Mass Transfer*, vol. 48, pp. 1803-1811, (2012).
- [17] P. Sivashanmugam, and P. K. Nagarajan, "Studies on heat transfer and friction factor characteristics of laminar flow through a circular tube fitted with right and left helical screw-tape inserts," *Exp. Thermal Fluid Sci.*, vol. 32, pp. 192-197, (2007).
- [18] P. Sivashanmugam, and S. Suresh, "Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of turbulent flow through a circular tube fitted with regularly spaced helical screw-tape inserts," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 27, pp. 1311-1319, (2007).
- [19] M. Rahimi, S. R. Shabaniyan, and A. A. Alsairafi, "Experimental and CFD studies on heat transfer and friction factor characteristics of a tube equipped with modified twisted tape inserts," *Chem. Eng. Process.*, vol. 48, pp. 762-770, (2009).
- [20] S. R. Shabaniyan, M. Rahimi, M. Shahhosseini, and A.A. Alsairafi, "CFD and experimental studies on heat transfer enhancement in an air cooler equipped with different tube inserts," *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, vol. 38, pp. 383-390, (2011).
- [21] P. W. Deshmukh, and R. P. Vedula, "Heat transfer and friction factor characteristics of turbulent flow through a circular tube fitted with vortex generator inserts," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 79, pp. 551-560, (2014).
- [22] Y. T. Yang, and C. H. Chen, "Numerical simulation of turbulent fluid flow and heat transfer characteristics of heated blocks in the channel with an oscillating cylinder," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 51, pp. 1603-1612, (2008).
- [23] S. Caliskan, "Experimental investigation of heat transfer in a channel with new winglet-type vortex generators," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 78, pp. 604-614, (2014).
- [24] C. Min, C. Qi, X. Kong, and J. Dong, "Experimental study of rectangular channel with modified rectangular longitudinal vortex generators," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 53, pp. 3023-3029, (2010).



[25] S. Skullong, P. Promvonge, C. Thianpong, and M. Pimsarn, "Thermal performance in solar air heater channel with combined wavy-groove and perforated-delta wing vortex generators," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 100, pp. 611-620, (2016).

[26] S. W. Churchill, and H. H. S. Chu, "Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 18, pp. 1323-1329, (1975).

[27] M. Moghiman, *Numerical heat transfer and fluid flow*. Ferdowsi University of Mashhad Press, (2003). (In Persian)

[28] M. F. Modest, *Radiative Heat Transfer*. Elsevier, (2013).

[29] T. F. Smith, Z. F. Shen, and J. N. Friedman, "Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gases model," *J. Heat Transfer*, vol. 104, pp. 602-608, (1982).