ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2021;21(9):575-587

Modeling Thermal Loading Effects for Three New Designs of Radiant Tube Burner

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Farahmand M.J.[1],
Hassani A.*[2],
Goudarzi A.M.[2]

How to cite this article
Farahmand M J, Hassani A, Goudarzi A M. Modeling Thermal Loading Effects for Three New Designs of Radiant Tube Burner. Modares Mechanical Engineering. 2021; 21(9):575-587.

[1]Department of Solid Design, Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
[2]Department of Solid Design, Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Correspondence
Address: Department of Solid Design, Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran. P.O.B. 484, 47148 – 71167
Phone: -
Fax: -
Hassani@nit.ac.ir

Article History
Received: December 30, 2019
Accepted: May 05, 2021
ePublished: July 18, 2021

ABSTRACT

In the present study, the stress and strain distributions due to the radiant gradient in some radiant tube burners have been investigated. In the design of the burner, several outlet valves are mounted on the wall of the burner tube, and the combustion-produced fluid is discharged by the outlets into the furnace. For this purpose, three cylindrical radiant tubes with the same length, diameter, thickness, and material and differences in the design of fluid outlets are modeled. To simulate the mechanical behavior of the pipes, after the geometric modeling and considering the pipe material and boundary conditions, ANSYS commercial software has been used. The boundary conditions for a numerical solution are extracted from the results of the experimental tests. Due to the average fluid velocity within the radial tube, the fluid flow falls into the turbulent range. In order to obtain the stress-strain diagram of the tested alloy, the Ramberg-Osgood equation is used. Due to the solution of the fluid-solid interaction by ANSYS, the best design is concluded through the Von-Mises stress minimum values. Also, by removing the thermal load from the next load step, the residual stresses generated in the samples are calculated. To illustrate the accuracy of the solution, some specimens of the burner have been made and evaluated to verify the numerical solution.

Keywords Thermal Stress and Strain; Modeling of the Fluid-Solid Interaction; Radiant Tube Burner; Experimental Tests

CITATION LINKS

[1] Investigation of natural gas consumption for different pieces of bread to optimize energy consumption. [2] Study of a new type of radiant tube based on the traditional M-type structure. [3] Analysis of nozzle designs on zoned and staged double P-type gas-fired radiant tube. [4] Burner design for an industrial furnace for thermal post-combustion. [5] Heat transfer and thermal stresses in a circular tube with a non-uniform heat flux. [6] Thermal stresses in radiant tubes due to axial, circumferential and radial temperature distributions. [7] Thermal stresses in radiant tubes: A comparison between recuperative and regenerative systems. [8] Computational and experimental failure analysis of continuous-annealing furnace radiant tubes exposed to excessive temperature. [9] Thermally induced stresses on radiant heating tubes including the effect of fluid–structure interaction. [10] Radiant tubes lifetime prediction in steel processing lines using fluid–structure interaction modelling. [11] Analysis of the K-Epsilon Turbulence Model. [12] Methods for generating rough surfaces in ANSYS. [13] Algebraic mesh quality metrics [14] Description of stress-strain curves by three parameters [15] Materials science and engineering

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

مدل‌سازی اثرات بارگذاری حرارتی در سه طرح جدید از مشعل با لوله تابشی

محمدجواد فرحمند حبیبی
گروه طراحی جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
علی حسنی*
گروه طراحی جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
علی معظمی‌گودرزی
گروه طراحی جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

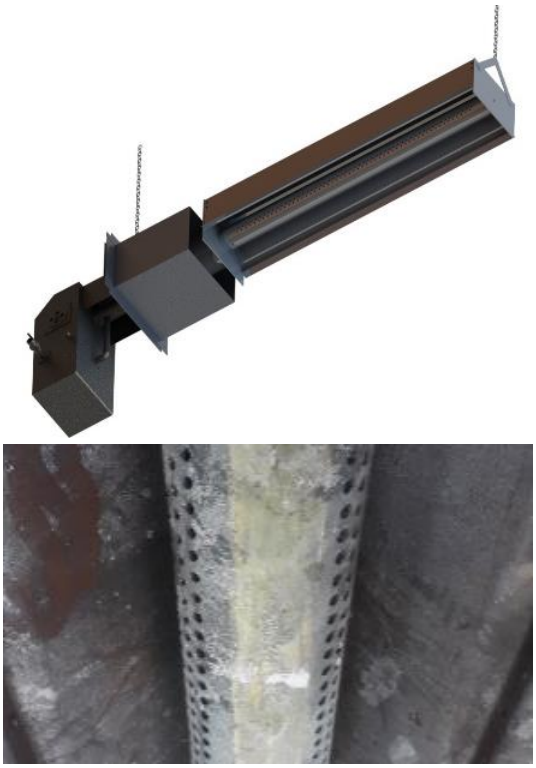
چکیده
در پژوهش حاضر، به بررسی توزیع تنش و کرنش ناشی از گرادیان حرارتی در لوله تابنده از یک نمونه مشعل تابشی پرداخته می‌شود. در طرح این مشعل، دریچه‌های خروجی متعددی در جداره لوله تابنده تعبیه‌شده است و سیال حاصل از احتراق در کوره از این دریچه‌ها تخلیه می‌شود. برای این مشعل سه نمونه لوله تابنده استوانه‌ای با طول، قطر، ضخامت و جنس یکسان که در هر کدام طرح دریچه‌های خروج سیال متفاوت است، مدل‌سازی شده است. به منظور شبیه‌سازی رفتار مکانیکی لوله‌های تابنده مورد مطالعه، پس از مدل‌سازی هندسی و با لحاظ کردن جنس لوله و شرایط مرزی، از مجموعه نرم‌افزار تجاری انسیس (ANSYS) بهره گرفته‌شده است. شرایط مرزی جهت حل عددی از نتایج آزمون‌های تجربی استخراج‌شده است. با توجه به میانگین سرعت سیال درون لوله تابنده، جریان در محدوده آشفته قرار می‌گیرد. به منظور به دست آوردن نمودار تنش-کرنش آلیاژ مورد آزمون از حل روابط رامبرگ-ازگود بهره گرفته‌شده است. از حل برهمکنش سیال-جامد توسط نرم‌افزار تجاری انسیس، بهترین طرح از نظر حداقل بودن مقادیر تنش فون میزز نتیجه‌گیری شده است. همچنین با حذف بار حرارتی از قطعه در گام بعدی، تنش‌های پسماند پدید آمده در نمونه‌ها توسط نرم‌افزار محاسبه می‌گردد. به منظور نشان دادن صحت حل، چند نمونه از این مشعل ساخته و مورد بررسی قرارگرفته تا نتایج حاصل از آن‌ها تأییدکننده حل عددی باشد.

کلیدواژه‌ها: تنش و کرنش حرارتی؛ شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال-جامد؛ مشعل لوله تابشی؛ آزمون آزمایشگاهی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۰
*نویسنده مسئول: Hassani@nit.ac.ir

۱- مقدمه
مبدل‌های حرارتی و مشعل‌ها، ازجمله آسیب‌پذیرترین قطعات در بارگذاری حرارتی می‌باشند. از بخش‌های پرمصرف در زمینهٔ انرژی گاز، می‌توان به بخش صنعت و علی‌الخصوص صنایع تولیدی نان اشاره داشت. این صنایع به دلیل ارزان بودن سوخت مصرفی، از ساختاری بسیار ابتدایی در کوره‌های خود استفاده می‌کنند که سبب اتلاف قابل‌توجه انرژی می‌باشد[1]. یک جایگزین مناسب جهت استفاده در کوره پخت مواد غذایی، استفاده از مشعل‌های تابشی با سوخت مصرفی گاز طبیعی می‌باشد. این مشعل‌ها ضمن ایجاد حرارت یکنواخت‌تر در کوره، با متمرکز کردن بیشینه دمای شعله در یک محدوده خاص جهت پخت، راندمان بالاتری نسبت به مشعل‌های معمولی دارند. همچنین به دلیل عدم برخورد مستقیم شعله به ماده‌ای که در کوره پخت می‌شود و به تبع آن عدم ایجاد واکنش‌های شیمیایی ناخواسته، محصول پخته‌شده از کیفیت و سلامت بهتری برخوردار خواهد شد. جایگزینی مشعل‌های سنتی رایج با مشعل‌های تابشی مرسوم، نیاز به باز طراحی کوره و افزایش هزینه قابل‌توجه برای مصرف‌کننده می‌گردد. اخیراً به منظور رفع این مشکل، مشعل تابشی جدیدی معرفی‌شده است که ضمن کاهش هزینه‌های جایگزینی، افزایش راندمان قابل‌توجهی نسبت به مشعل‌های مرسوم دارد. این مشعل در شکل ۱ نشان داده‌شده است.

با توجه به کاربردهاي گوناگون لوله‌هاى تابشي به عنوان منبع گرما در سيستم هاي گرمايش و كوره‌ها،كيفيت مكانيكي لوله‌ها موضوع تحقيقات گوناگوني قرار گرفته است. براي مثال، شو و فنگ[2] به بررسی اثرات ناشی از عبور جریان سیال در خطوط انتقال گرما پرداختند. آن‌ها با مدل‌سازی یک لوله با اتصال L شکل و تحلیل سیال جامد و در نظر گرفتن اثرات ناشی از تغییر دمای سیال، تأثیرپذیری مقادیر تغییر شکل را نسبت به دما در لوله مذکور محاسبه نمودند. همچنین در انتها با معرفی تجهیزات آزمایشگاهی به آزمون مدل معرفی‌شده پرداختند و حل عددی را با نتایج به دست آمده از آزمون عملی مورد مقایسه قراردادند. همچنین شو و همکاران[3] در پژوهشی دیگر به بررسی چند نمونه از لوله‌های



شکل ۱) نمایی از مشعل گازسوز تابشی با خروجی‌های سیال تعبیه‌شده در جداره

تابشی جدید نظیر شکل‌های M پرداختند. ضمن در نظر گرفتن جنس لوله به صورت کِشسان خالص، با مدل‌سازی و انجام تحلیل‌های گوناگون بر این‌گونه لوله‌های تابنده، اثرات ناشی از توزیع دما در سرتاسر لوله را به دست آوردند. در این تحلیل از حل عددی و نیز ساخت قطعه به منظور اعتبارسنجی استفاده شد. دنو و همکاران[4] به معرفی یک مشعل قدرتمند در یک مبدل حرارتی پرداختند. به این منظور ضمن تحلیل سیال جامد ساختار مبدل حرارتی با مشعل مورد نظر، ضمن معرفی یک شعله پخش کن جدید در مشعل، عملکرد آن را مورد بررسی قراردادند. در تحلیل مورد نظر گرادیان حرارتی در قسمت‌های مختلف از مشعل عنوان‌شده به دست آمد. این پژوهشگران در تحقیقات خود توزیع دما در لوله‌های تابشی را با تحلیل‌های عددی سیالاتی به دست آوردند.

ماروگان کروز[5] تنش حرارتی برای لوله‌های تابشی جدار ضخیم با فرض توزیع جریان‌های گرمایی غیریکنواخت در لوله را مورد بررسی قراردادند. ایرفان و چیمن[6] با استناد به فرمول‌های ارائه‌شده برای توزیع دما در لوله تابشی ، تنش‌های گرمایی ایجادشده در یک لوله U شکل را با استفاده روش اجزای محدود محاسبه کردند. در این تحقیقات از المان پوسته برای محاسبه تنش‌های حرارتی استفاده شده است. با توجه به محدودیت‌های فرمول‌های ارائه‌شده برای دما، ایرفان و چیمن[7] در پژوهش بعدی خود از روش شبیه‌سازی عددی همراه با کالیبره کردن مدل توزیع حرارتی با استفاده از داده‌های میدانی استفاده کردند. در این پژوهش توزیع دماي سطح یک لوله W شکل با نصب 134 ترموکوپل در نقاط مختلف آن در شرایط پایای دمایی اندازه‌گیری شده است و از این داده‌های دمایی در مدل اجزای محدود تحلیل مکانیکی استفاده‌شده تا تنش گرمایی محاسبه گردد. در این تحلیل تنش‌های حرارتی در دو لوله تابشی با پیش گرمایش و بدون پیش گرمایش را باهم مقایسه کردند. این روش مدل‌سازی می‌تواند به نتایج دقیقی در مورد شرایط تنش گرمایی در یک سازه منجر شود. ولیکن در مراحل اولیه طراحی و بهینه‌سازی محصول این روش مدل‌سازی بسیار زمان‌بر است.

روش دیگری که برای محاسبه تنش‌های حرارتی در لوله‌های تابشی استفاده می‌شود، روش کوپل کردن دینامیک سیال و جامد است. در این روش می‌توان داده‌های حاصل از دینامیک سیال محاسباتی (CFD) را به نرم‌افزار اجزای محدود (FEM) وارد نموده و تنش‌های گرمایی را محاسبه کرد. دینی و همکاران[8] با استفاده از کوپل سیال-جامد و شبیه‌سازی عددی به تحلیل تنش‌ها و تغییر شکل لوله تابش U شکل تحت بارگذاری حرارتی و اثر وزن خود لوله پرداختند. در این تحلیل از خروجی‌های دمایی حاصل از مدل CFD برای محاسبه تنش‌های حرارتی لوله تابشی در مدل اجزای محدود با خواص مواد کِشسان استفاده شد. هلنکامپ و فایفر [9] با روش مشابهی، به بررسی توزیع تنش در یک لوله تابشی P شکل نصب‌شده در یک کوره در شرایط پایا پرداختند. کایلات و همکاران[10] با روش مشابه و با در نظر گرفتن قانون خزش نورتن توزیع تنش و خزش در یک لوله تابشی M شکل را بررسی کردند.

در موارد بررسی‌شده در پژوهش‌های مورد استناد مسیر جریان هوای گرم در لوله باز است و هوای گرم با عبور از لوله از انتهای دیگر آن خارج می‌شود. در این شرایط کرنش‌های حرارتی بدنه لوله تأثیر ناچیزی بر سطح مقطع عبور هوا دارند. در طرح مورد مطالعه در پژوهش حاضر انتهای لوله تابنده بسته است و هوای داغ از طریق دریچه‌هایی که در بدنه لوله تعبیه شده است خارج می‌شود. در این طرح تغییرات ابعادی لوله هر چند هم ناچیز باشد، می‌تواند در مسیر جریان هوای داغ و تبع آن توزیع دما تأثیر بگذارد. از این رو بررسی جداگانه توزیع دما با استفاده از مدل های CFD و انتقال نتایج به مدل FEM می‌تواند منجر به پایین آمدن دقت شود.

۲- تعریف مسئله

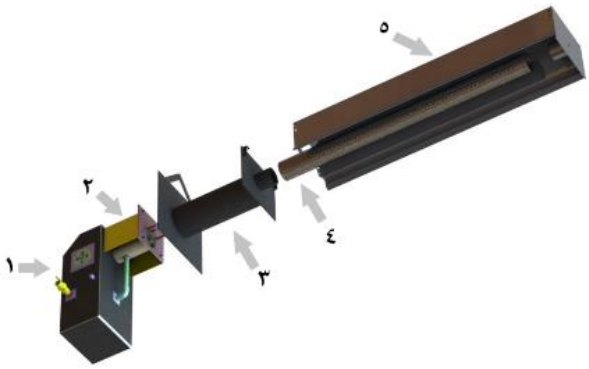
موضوع این پژوهش، مطالعه توزیع تنش حرارتی در یک مشعل گازسوز تابشی جدید است که در آن محصولات احتراق با عبور از یک لوله جدار نازک که یک انتهای آن بسته است از دریچه‌هایی که در جداره لوله تعبیه شده است خارج می‌شود. اجزا تشکیل‌دهنده مجموعه مشعل گازسوز تابشی و قطعات قرارگرفته در آن‌ها بر طبق شماره‌گذاری نشان داده‌شده در شکل (۲) عبارت‌اند از:

۱- محفظه اجزا الکترونیکی مشعل؛ که در آن قطعاتی نظیر شیر برقی، دمنده، ترانس جرقه و کنترل‌کننده‌های احتراق در آن قرار دارد.

۲- محفظه اختلاط سوخت و هوا؛ در انتهای این محفظه و در ورودی محفظه آتش دان اجزایی نظیر الکترود جرقه و شعله بین قرار دارد. لوله سوخت به صورت مستقیم در این محفظه واردشده و به همراه سیال هوا که توسط دمنده با سرعت مشخص در جریان است مخلوط می‌گردد و سپس مخلوط آن وارد محفظه آتش دان می‌گردد.

۳- محفظه آتش دان؛ در انتهای این محفظه شعله پخش کن قرار دارد. کاربرد این محفظه به منظور ایجاد شعله در این قسمت و خروج سیال با شرایط و دمای یکنواخت به لوله تابنده می‌باشد. ضمن اینکه به دلیل قرار گرفتن قسمت مذکور در دیواره کوره، جداره آن به طور کامل عایق‌بندی شده است.

٤- لوله تابنده؛ با ورود سیال از محفظه آتش دان به سبب جذب دمای سیال و تابش از طریق سطح خارجی آن سبب ایجاد گرمایش در کوره می‌گردد. همچنین خروجی‌های سیال حاصل از احتراق تعبیه‌شده در آن نیز ضمن جلوگیری از برخورد مستقیم شعله با ماده در حال پخت سبب افزایش نرخ انتقال حرارت می‌گردد. ۵- مجموعه بازتابنده یا رفلکتور؛ به هدف افزایش راندمان مشعل و استفاده کامل از ظرفیت تابشی لوله تابنده این قطعه بر روی لوله تابنده قرارگرفته است.



شکل ۲) اجزا تشکیل‌دهنده مجموعه مشعل گازسوز تابشی

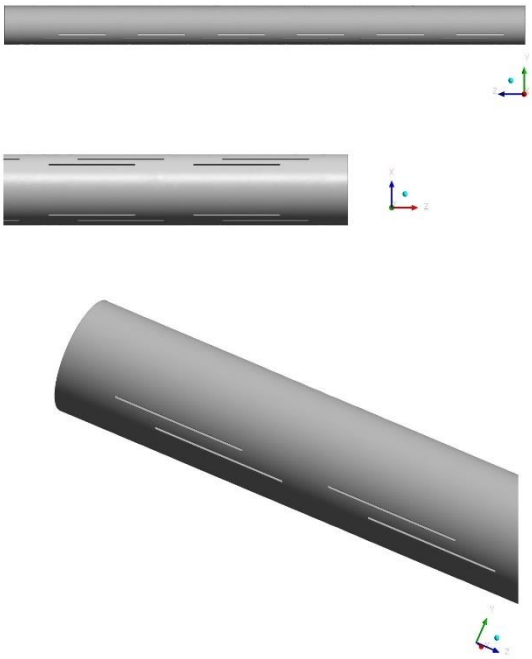
به دلیل تفاوت در ساختار این مشعل با سایر مشعل‌های تابشی، نیاز بر شناخت عوامل تأثیرگذار بر عملکرد آن وجود دارد. به‌طورکلی می‌توان به دو نوع آسیب در مشعل اشاره کرد. مورد اول، اثرات ناشی از تنش‌ها و کرنش‌های حرارتی به وجود آمده در شرایط بارگذاری حرارتی و مورد دوم، اثرات عواملی که سبب کاهش یکنواختی دما در سطح لوله تابنده و در نتیجه جذب غیریکنواخت حرارت توسط ماده تحت پخت می‌شود. از این عوامل می‌توان به سرعت دمنده سیال مشعل، نوع سیال احتراق، شرایط کاری کوره، جنس قطعات مشعل و ... اشاره کرد.

یکی از عوامل اصلی مؤثر بر عملکرد مشعل مورد بحث، مسیر خروج سیال از لوله تابنده می‌باشد. در لوله‌های تابشی متداول، سیال از یک انتهای لوله خارج می‌شود درحالی‌که در نمونه مورد مطالعه در این پژوهش، سیال از خروجی‌های متعددی که در بدنه لوله تابنده تعبیه‌شده است خارج می‌شود. در پژوهش حاضر، سه طرح مختلف از لوله تابنده مورد بررسی قرار می‌گیرد که در آن‌ها ضمن یکسان در نظر گرفتن طول، قطر، ضخامت و جنس لوله، دریچه‌های خروج گاز هندسه‌های متفاوتی دارند. مجموع مساحت‌های هندسه‌های متفاوت در لوله‌های مورد آزمایش در نهایت یکسان می‌باشند؛ یعنی هر سه طرح پیشنهادی لوله تابنده از منظر مساحت هندسه خروجی‌های تعبیه‌شده بر آن‌ها، برابر هستند. تأثیر هندسه این دریچه‌ها بر رفتار مکانیکی لوله‌های نام‌برده در شرایط کاری یکسان مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به این منظور با کمک تحلیل برهمکنش سیال- جامد عملکرد مشعل‌های تابشی با لوله‌های نام‌برده در شرایط کاری معین، توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی‌شده و مورد بررسی قرارگرفته است.

سه طرح پیشنهادی جهت آزمون، به ترتیب عبارت‌اند از:

طرح اول با خروجی‌های هندسی مستطیلی، با ضخامت کلی ۲ میلی‌متر که توسط دستگاه برش بر روی لوله اصلی در ٤ردیف و در فواصل مشخص، قرار می‌گیرد. این هندسه دارای ۲٤ خروجی با ابعاد یکسان می‌باشد. (شکل ۳)

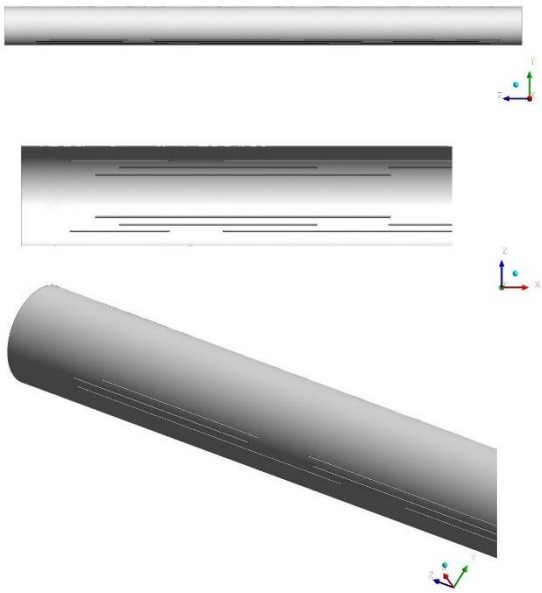
طرح دوم با هندسه خروجی مستطیلی، با تفاوت در ابعاد نسبت به مدل قبلی در ٦ ردیف و در ضخامت ۱میلی‌متر در فواصل متفاوت



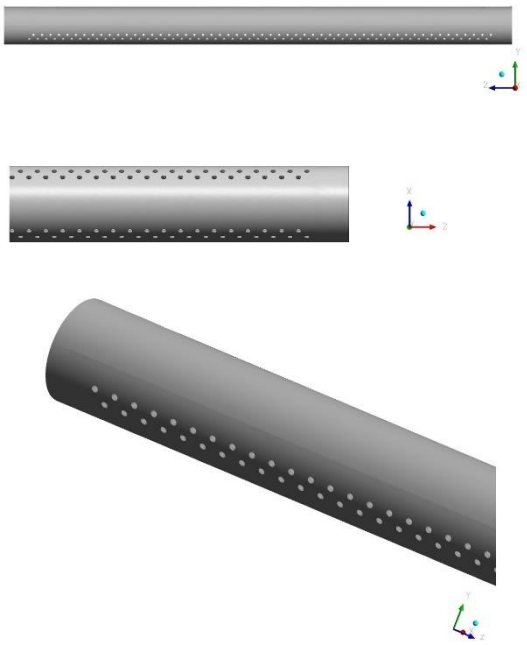
شکل ۳) هندسه لوله تابنده با خروجی مستطیلی ۴ ردیفه

در هر ردیف توسط دستگاه برش ساخته می‌شود. این مدل دارای ۲۰ خروجی با ابعاد متغیر در هر ردیف می‌باشد و همانند مدل قبلی متقارن نسبت به صفحه YZ است. با وجود تقارن نسبت به صفحه YZ در آن، اندازه خروجی‌های قرارگرفته در این مدل به صورت تصادفی می‌باشد. (شکل ٤)

طرح سوم با هندسه خروجی دایروی در ٤ ردیف و با قطر ۳ میلی‌متر در فواصل مشخص توسط ابزار مته سوراخ می‌شود. مجموعاً دارای ۲۲۰ خروجی دایروی با قطر ثابت می‌باشد. همچنین میزان تراکم دایره‌های خروجی در سراسر لوله یکسان می‌باشد. (شکل ۵).



شکل ۴) هندسه لوله تابنده با خروجی مستطیلی ۶ ردیفه



شکل ۵) هندسه لوله تابنده با خروجی دایروی ۴ ردیفه

همان طور که در شکل‌ها مشخص می‌باشد، تمامی‌مدل‌ها دارای تقارن صفحه‌ای بوده و به جهت جلوگیری از برخورد مستقیم سیال حاصل از احتراق با سطح زیر پخت، دارای حداقل زاویه ٤٥ درجه نسبت به سطح زیر پخت می‌باشند. همچنین جنس لوله مورد استفاده استیل ۳۱۰ می‌باشد که خواص آن در جدول ۱ به آن اشاره شده است.

۳- مدل‌سازی و حل عددی

سیال مسئله حاضر، گازهای حاصل از احتراق می‌باشد که پس از عبور از محفظه آتش دان سبب گرمایش جداره لوله می‌گردد. با توجه به نسبت اختلاط حدودی ۱۰به۱ هوا و سوخت می‌توان رفتار سیال هوا را به عنوان مرجع برای رفتار سیال مسئله حاضر در نظر گرفت. در این مسئله، سیال گستره‌ی دمایی در حدود ٤۰۰ الی ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد را در بر می‌گیرد. معادلات حاکم بر جریان سیال، در تحقیق حاضر به عنوان یک سیال نیوتني و تراکم ناپذیر فرض شده است.

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \qquad (۱)$$

معادله مومنتوم:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\delta_{ij} - \rho u_i' u_j'\right] \qquad (۲)$$

معادله انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j C_p T) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x_j} + \frac{\mu_t}{\sigma_{h,t}}\frac{\partial (C_P T)}{\partial x_j}\right) + u_j\frac{\partial P}{\partial x_j} + \left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\delta_{ij} - \rho\overline{u_i' u_j'}\right]\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \qquad (۳)$$

همچنین برای حل مسئله از روابط k-ε realizable استفاده شده است[11]. این معادلات به ترتیب:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k - \rho\varepsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \rho C_1 s_\varepsilon - C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{K + \sqrt{\nu\varepsilon}} \qquad (۴)$$

همچنین به جهت تعیین آرام یا آشفته بودن جریان از رابطه رینولدز استفاده می‌شود:

$$R_e = \frac{\varphi v L}{\mu} \qquad (۵)$$

که در آن:

φ= چگالی سیال (kg/m^3)

v=سرعت سیال (m/s)

L= طول مشخصه سیال (m)

μ=ویسکوزیته دینامیکی سیال

به منظور بدست آوردن نمودار تنش-کرنش از معادله رامبرگ-ازگود[14] بهره گرفته می‌شود:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002\left(\frac{\sigma}{S_{ty}}\right)^{1/n} \qquad (۶)$$

که در آن σ، E، Sty و n به ترتیب عبارت‌اند از مقدار تنش، مدول الاستیسیته، مقاومت کششی ماده و توان کرنش سخت شوندگی ماده که با استفاده از خواص معلوم ماده قابل‌محاسبه می‌باشد.

$$n = \frac{log\left(\frac{S_{tu}}{S_{ty}}\right)}{log\left(\frac{\varepsilon_f}{0.002}\right)} \qquad (۷)$$

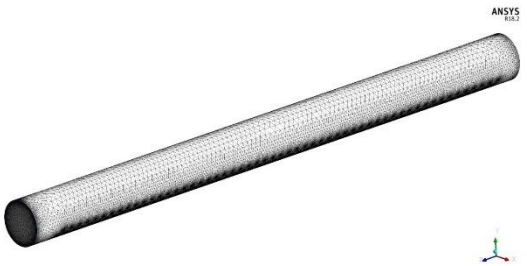
جدول ۱) مشخصات ST-310 [15]

معیار سختی		بیشینه درصد کشیدگی تا شکست قطعه	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام شکست (MPa)		درجه
Brinell (HB) max	Rockwell B (HR B) max					
۲۱۷	۹۵	۴۰	۲۰۵	۵۱۵		۳۱۰
۲۱۷	۹۵	۴۰	۲۰۵	۵۱۵		۳۱۰S
گرمای ویژه °C (J/kg.K)		میانگین ضریب انبساط حرارتی		مدول الاستیسیته (GPa)	چگالی (kg/m3)	درجه
		۰-۵۳۸ °C	۰-۳۱۵ °C	۰-۱۰۰ °C		
۵۰۰	۱۷/۰	۱۶/۲	۱۵/۹	۲۰۰	۷۷۵۰	۳۱۰/S

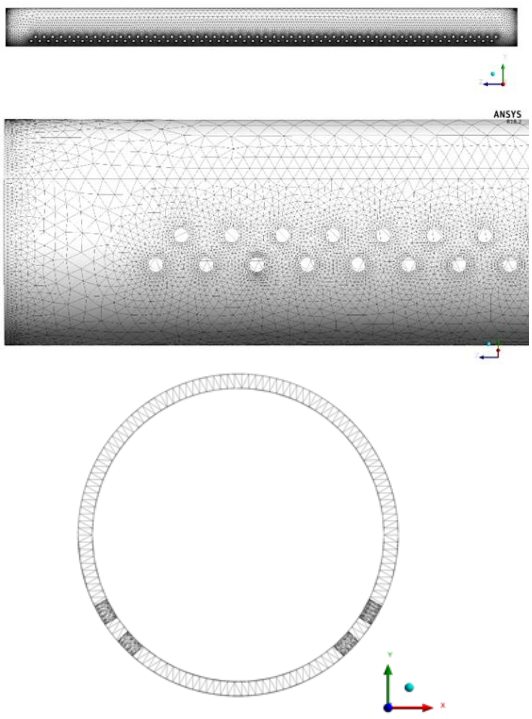
به جهت حل مسئله، ساختار آن که شامل جسم جامد و سیال درون آن است، باید شبکه‌بندی گردند (شکل ٦). در این بخش به شبکه‌بندی یک نمونه از نمونه‌های معرفی‌شده پرداخته می‌شود و شبکه‌بندی قسمت جامد و سیال آن به طور جداگانه معرفی می‌شوند.

جسم جامد مسئله یا همان لوله تابنده از مشعل، به صورت سه بعدی شبکه‌بندی می‌شود و خودکار توسط نرم‌افزار انجام می‌گردد. همچنین در اطراف خروجی‌های سیال، به سبب آسیب‌پذیری بیشتر قطعه در آن ناحیه، به منظور افزایش دقت محاسبات شبکه‌بندی ریز تر می‌گردد. (شکل ۷)

شبکه‌بندی سیال مورد بحث به جهت آشفته بودن جریان، اهمیت بالایی در محاسبات دارد. با توجه به تعریف تابع دیواره و شیوه محاسبه آن، کمترین فاصله دیواره سیال تا خانه مش بعدی محاسبه می‌گردد و به منظور کاهش مجموع شبکه‌ها و در نتیجه کاهش زمان محاسبه، فواصل خانه مش بعدی از دیواره، با نسبت مشخصی افزایش می‌یابند. (شکل ۸)

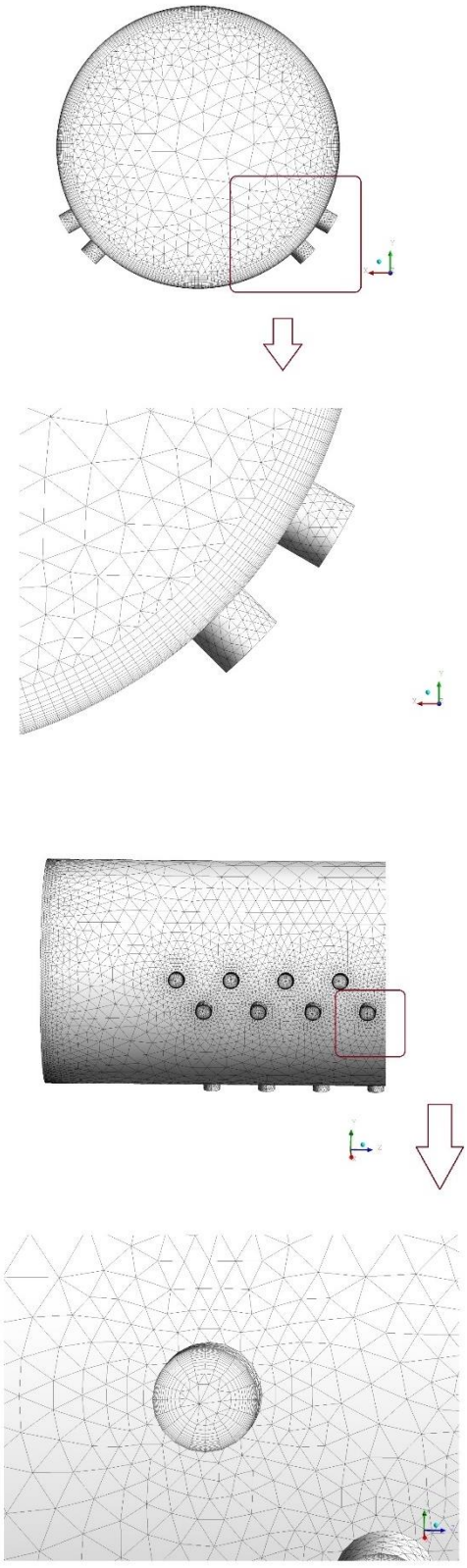


شکل ۶) شبکه‌بندی کامل مسئله



شکل ۷) شبکه‌بندی جسم جامد

همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، به منظور شبکه‌بندی سیال و جامد از نوع مش سه بعدی استفاده شده است. آرایش شبکه به صورت دوگانه بوده و ترکیبی از خانه مش چهارضلعی (Tetrahedron)و منشوری (Prism) استفاده شده است[12].



شکل ۸) شبکه‌بندی سیال مسئله

۲-۳- شرایط مرزی مسئله

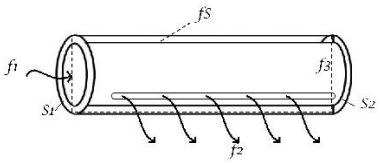
برای به دست آوردن ورودی‌های سیال به ناچار از داده‌های به دست آمده از آزمون عملی استفاده گردید. به این منظور با قرار دادن دبی سنج در انتهای محفظه آتش دان با اندازه‌گیری سوخت و هوای ورودی (بدون احتراق) سرعت سیال، تعیین گردید. همچنین برای دمای ورودی نیز با توجه به مراجع مربوط به احتراق و همچنین اندازه‌گیری‌های متوالی توسط دماسنج‌های مختلف، حدود نسبی دمای ورودی تعیین شد. دمای محیط نیز به منظور حل دقیق تر، بر مبنای دمای کاری کوره قرار داده شد. سایر قیود مربوطه نیز با توجه به شکل ۹، در جدول ۲ نشان داده شده است.

۳-۳- همگرایی در حوزه مکان

به منظور دست یافتن به حلی که مستقل از شبکه بوده و تعداد مش در نتایج تاثیری نداشته باشد، بر روی یکی از نمونه‌های پیش تر معرفی‌شده، آزمون همگرایی صورت گرفته است. به این منظور لوله تابنده با خروجی‌های دایروی مورد بررسی قرارگرفته و مقادیر تنش فون میزز را به عنوان پارامتر معیار جهت آزمون همگرایی انتخاب می‌شود[13]. لذا مقادیر تنش در تعداد المان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۱۰ قابل‌مشاهده می‌باشد. پس از مقایسه تعداد المان‌های ۳۸۰۰۶۰۱ و ٤۲۲۱۰۵۲ می‌توان دریافت که خطای محاسباتی و اختلاف جواب‌ها در حدود ۱ درصد بوده که نشان‌دهنده دقت مطلوب جواب‌ها و انتخاب درست تعداد المان نمونه می‌باشد.

۴- نتایج حل عددی

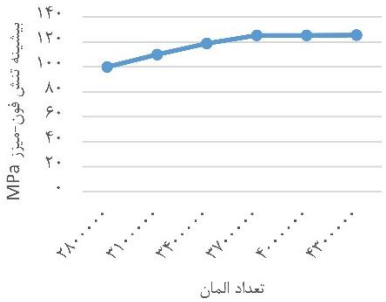
با جایگذاری مشخصات لوله استیل ۳۱۰ در رابطه رامبرگ-ازگود، می‌توان مجموعه‌ای پارامترهای تنش و کرنش بر حسب یکدیگر را توسط یک نرم‌افزار محاسباتی بدست آورد. با در کنار هم قرار دادن این مجموعه، در شکل ۱۱ تنش و کرنش بر حسب یکدیگر بدست می‌آید.



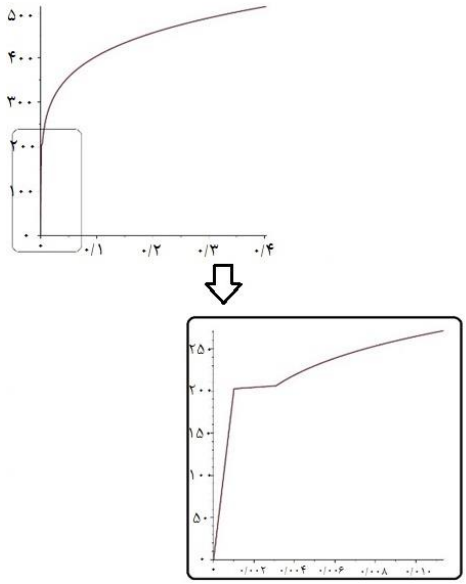
شکل ۹) نمایی ساده‌شده از مسئله برای نام‌گذاری مرزها

جدول ۲) شرایط مرزی مسئله

ردیف	عنوان مرز	ناحیه مرز	نماد مرز در شکل	شرایط مرزی
۱	ورودی سیال حاصل احتراق به لوله	سیال	$f1$	ورودی سیال به لوله بر اساس سرعت
۲	خروجی جریان سیال	سیال	$f2$	فشار صفر
۳	محور تقارن لوله	سیال	$f3$	شرایط تقارن صفحه ای
۴	ابتدای لوله	جامد	$S1$	جابجایی صفر
۵	انتهای لوله	جامد	$S2$	جابجایی آزاد
۶	مرز مشترک هوا و لوله تابنده	سیال و جامد	fs	قید سینماتیکی و دینامیکی کوپل سیال و جامد



شکل ۱۰) آزمون همگرایی در حوزه مکان

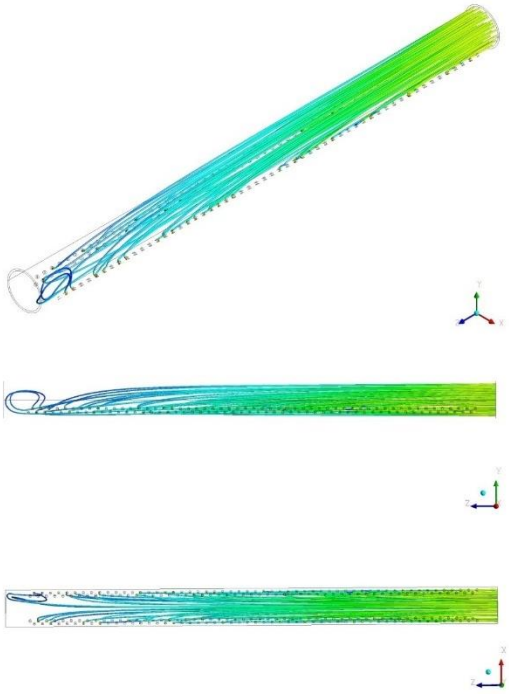


شکل ۱۱) منحنی تنش کرنش استیل ۳۱۰ بدست آمده از حل رابطه رامبرگ-ازگود

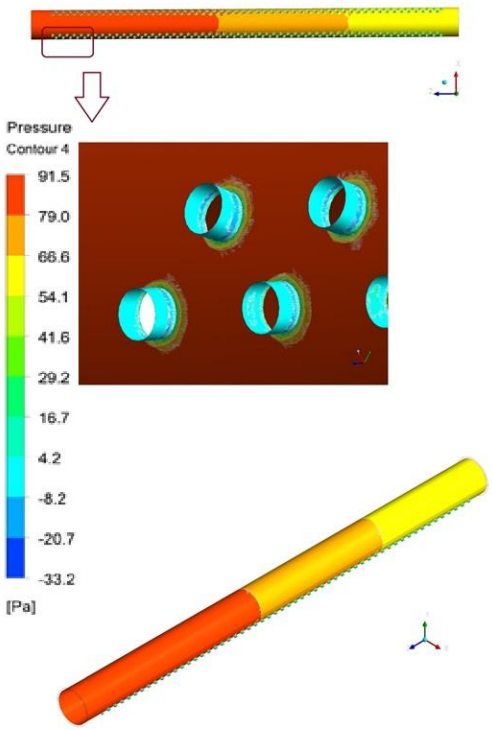
با قرار دادن این مجموعه اعداد در نرم‌افزار انسیس، پس از اتمام فرآیند محاسبه جواب می‌توان مقادیر دقیق تنش و کرنش و همچنین تغییر شکل دائمی بوجود آمده در قطعه را محاسبه نمود. با توجه به کشسانی بالای استیل ۳۱۰ امکان شکست کامل قطعه در آن بسیار ضعیف است ولیکن در مواد مختلف حتی شکست قطعه را نیز نرم‌افزار از طریق این نمودار تعیین می‌نماید.

با بارگذاری حرارتی و ورود سیال داغ حاصل از احتراق به لوله تابنده هر سه هندسه پیش‌تر معرفی‌شده و اعمال شرایط مرزی ، حل آن توسط نرم‌افزار صورت گرفت. همان طور که از خطوط جریان در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، سیال پس از ورود از دهانه ابتدایی لوله تابشی، حجم زیادی از آن از طریق خروجی‌های قرارگرفته بر جداره تخلیه می‌گردد. همچنین به علت بسته بودن انتهای لوله جریان برگشتی در ناحیه انتهایی لوله پدید می‌آید.

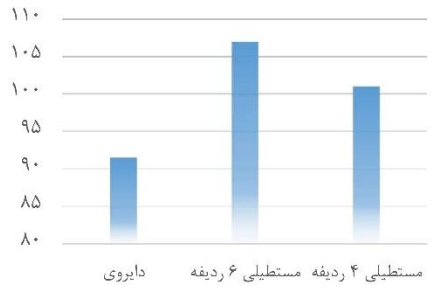
با توجه به مقادیر فشار بدست آمده در جداره جسم جامد از حل سیال، و ناچیز بودن مقادیر آن، می‌توان از تأثیر فشار سیال بر تنش‌های به وجود آمده ناشی از این پارامتر صرف‌نظر نمود. مقادیر منفی نشان‌دهنده جریان برگشتی در اطراف خروجی‌هاست.(شکل ۱۳) به طور کلی به جهت مقایسه مقادیر فشار در هر سه طرح عنوان‌شده، می‌توان از شکل ١٤ استفاده نمود.



شکل ۱۲) خطوط جریان سیال در لوله تابنده با هندسه خروجی‌های الف -مستطیلی ۴ ردیفه ب-مستطیلی ۶ ردیفه پ-دایروی ۴ ردیفه



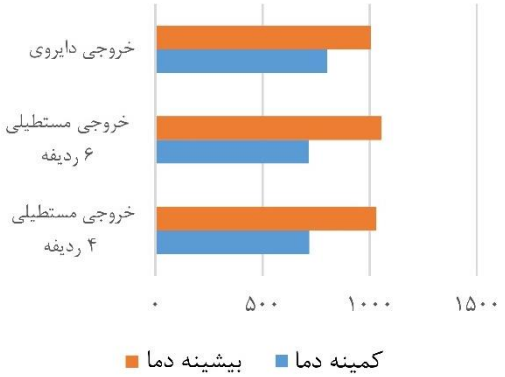
شکل ۱۳) فشار در لوله تابنده با خروجی هندسی الف-۴ردیفه مستطیلی ب-۶ردیفه مستطیلی پ-۴ ردیفه دایروی



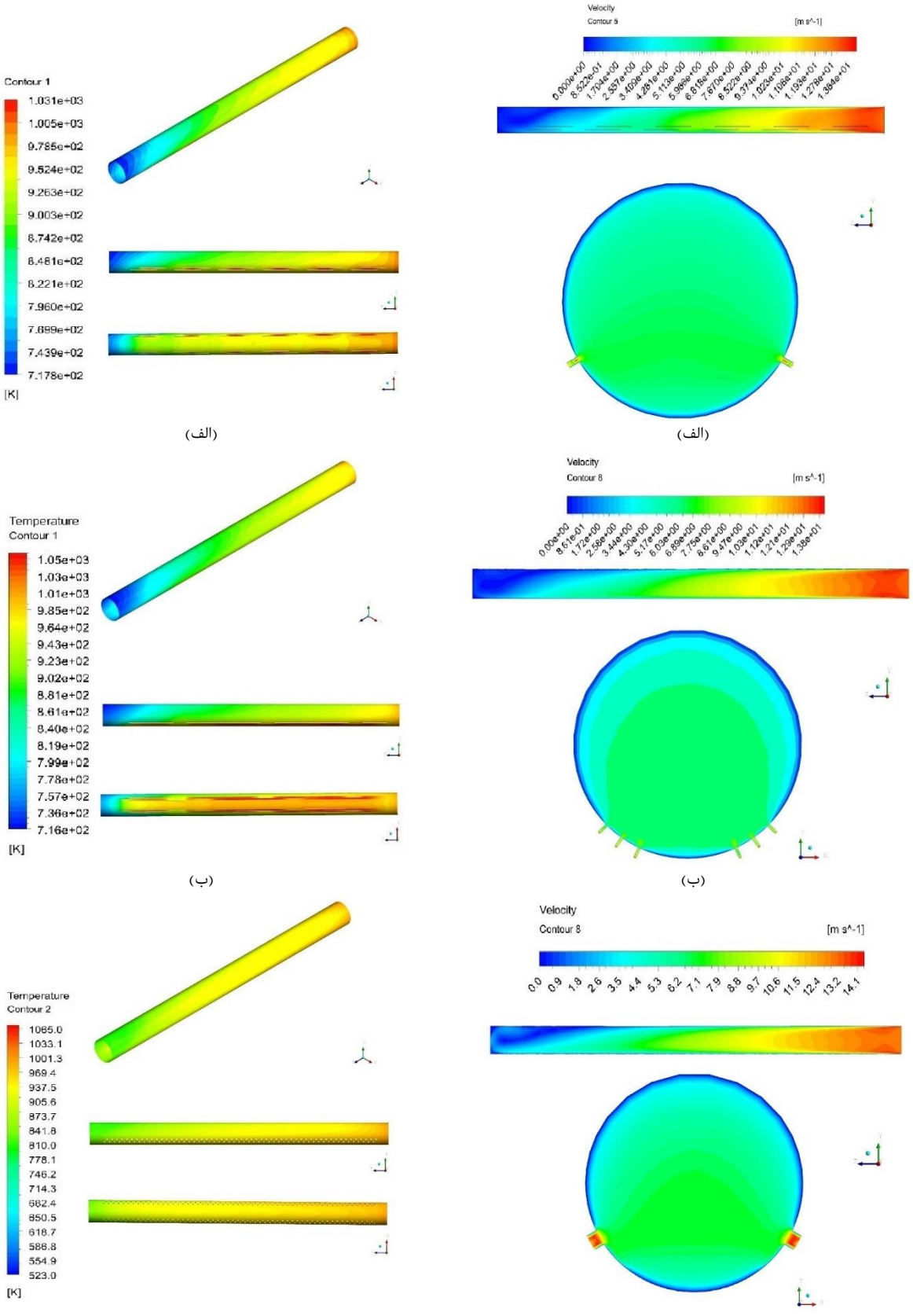
شکل ۱۴) بیشینه مقادیر فشار (Pa)

همچنین پروفیل سرعت سیال را در لایه میانی (مقاطع میانی در راستای طولی و عرضی) از لوله می‌توان در شکل ۱۵ نشان داد. با توجه به شکل می‌توان اثرات دیواره بر پروفیل سرعت سیال در سرتاسر لوله را مشاهده نمود. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد سرعت سیال در هر سه طرح، در نواحی اطراف دیواره لوله صفر بوده و در میانه لوله و خروجی‌های تعبیه‌شده در جداره لوله، این مقادیر به بیشینه مقدار خود می‌رسد.

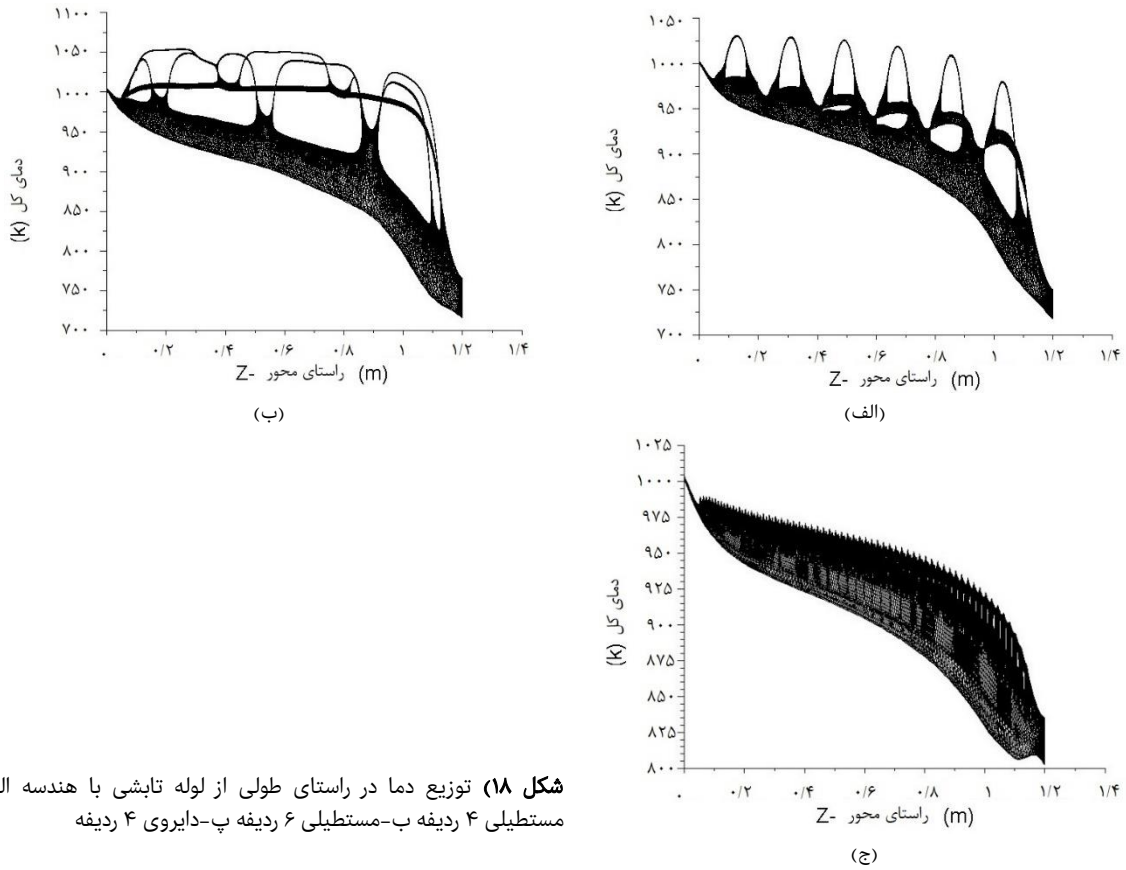
توزیع دما در لایه خارجی از لوله تابنده در هر سه طرح را می‌توان در شکل ۱۶ مشاهده نمود. همان طور که مشاهده می‌شود، در طرح‌های با خروجی مستطیلی، گرادیان حرارتی در اطراف خروجی‌ها به بیشینه مقدار خود می‌رسد؛ با این حال، همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هندسه دایروی خروجی‌های تعبیه‌شده در لوله تابنده، سبب شده تا در این طرح از توزیع حرارت یکنواخت تری نسبت به سایر طرح‌ها بهره ببرد. به منظور مقایسه بیشینه و کمینه دما در هر سه طرح شکل ۱۷ مورد استفاده قرار گرفته است؛ همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، مقادیر بیشینه و کمینه دماهای گزارش‌شده در سرتاسر هر سه طرح، از تفاوت اندکی نسبت به یکدیگر برخوردار هستند و از طرف دیگر اختلاف اندکی که در هر سه طرح مشاهده می‌گردد به سبب هندسه تفاوت در هندسه خروجی‌ها می‌باشد. برای مثال، در هندسه خروجی دایروی به دلیل عدم ایجاد نقطه تمرکز حرارت، مقادیر دمای گزارش‌شده در آن در حالت بیشینه از سایر طرح‌ها کمتر بوده و اختلاف آن با کمینه دمای گزارشی نیز کمتر از سایر طرح‌ها می‌باشد. همچنین همان‌گونه که از شکل‌های ۱۶ و ۱۸ مشاهده می‌شود، مقادیر بیشینه دمای گزارش‌شده در اطراف خروجی‌ها بر روی جداره لوله تابنده قرار گرفته است.



شکل ۱۷) کمینه و بیشینه دمای پدید آمده در سه طرح از لوله تابنده



شکل ۱۵) کانتور سرعت سیال در مقاطع میانی لوله تابنده با هندسه الف-مستطیلی ۴ ردیفه ب- مستطیلی ۶ ردیفه پ-دایروی ۴ ردیفه **شکل ۱۶)** گرادیان حرارتی در سطح خارجی لوله تابنده با هندسه الف-مستطیلی ۴ ردیفه ب-مستطیلی ۶ ردیفه پ-دایروی ۴ ردیفه



شکل ۱۸) توزیع دما در راستای طولی از لوله تابشی با هندسه الف- مستطیلی ۴ ردیفه ب-مستطیلی ۶ ردیفه پ-دایروی ۴ ردیفه

به صورت کلی دما در سرتاسر لوله تابنده در هر سه هندسه را می‌توان در شکل ۱۸ مشاهده نمود. این نمودار شامل کلیه دماها در هر مقطع از راستای طولی لوله می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌گردد، در هندسه‌های مستطیلی قله‌های دمایی رخ داده که خود عامل اصلی بوجود آمدن تنش‌های حرارتی می‌باشد.

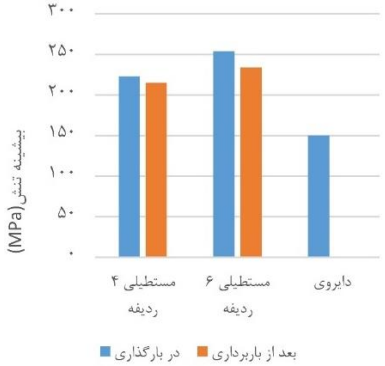
با وارد نمودن توزیع دمای بدست آمده در حل قسمت سیال و اثر دادن ضریب انبساط حرارتی برای ماده مذکور، تغییر شکل ناشی از بارگذاری حرارتی بدست می‌آید. همچنین مقادیر تنش در هندسه خروجی‌های مستطیلی ٤ ردیفه بصورت کانتور نشان داده‌شده در شکل ۱۹ می‌باشد. پس از باربرداری و رساندن دمای قطعه به دمای اولیه تغییر شکل نهایی را می‌توان مشاهده نمود. پس از باربرداری در اطراف خروجی‌ها، تنش در قطعه باقی می‌ماند که آن را می‌توان مرتبط با اثر تنش پسماند در قطعه دانست. در هندسه مستطیلی ٦ ردیفه نیز کانتور تنش‌ها در شکل ۲۰ نشان داده شده است. در نهایت تنش‌های لوله تابنده با خروجی دایروی در شکل ۲۱ نشان داده‌شده که به دلیل مقادیر پایین تنش‌ها، قطعه تسلیم نشده و به دلیل عدم ایجاد تغییر شکل دائمی در آن، پس از باربرداری مقادیر تنش پسماند در این هندسه صفر می‌باشد و از نشان دادن آن صرف‌نظر شده است.

مقایسه بیشینه مقادیر تنش در هر سه طرح در هنگام بارگذاری و پس از باربرداری در شکل ۲۲ می‌توان مشاهده نمود.

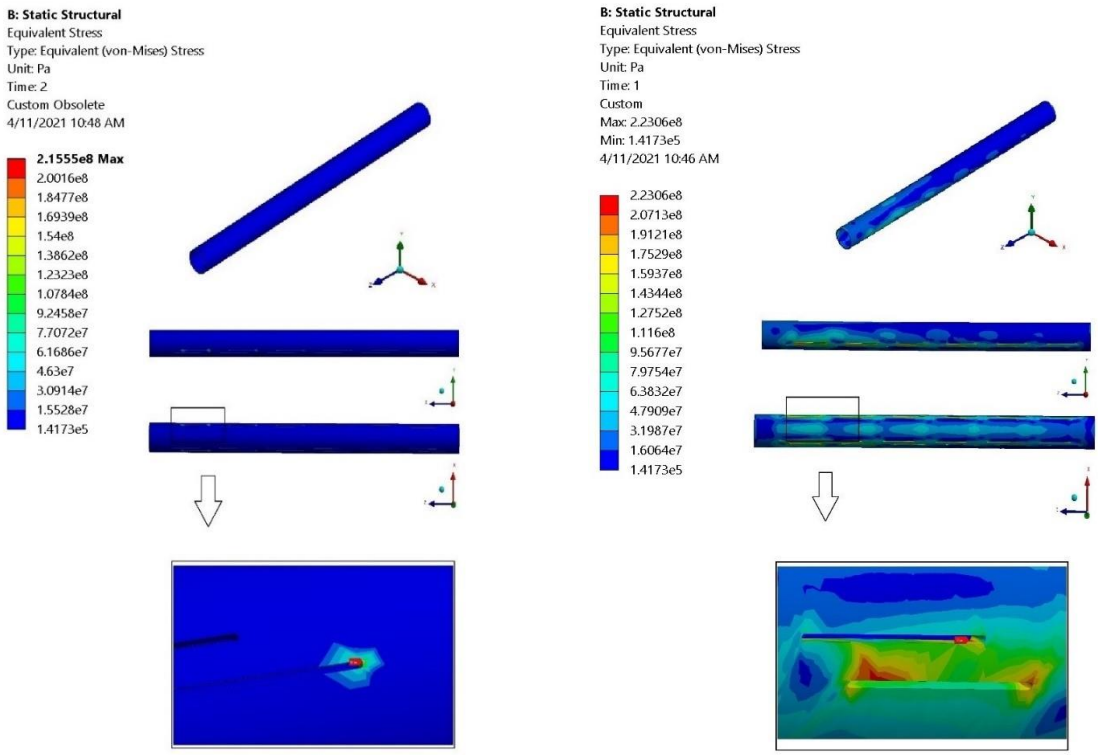
۵- نمونه تجربی

به منظور نشان دادن دقت حل و عملکرد مطلوب قطعه مورد بحث، اقدام به ساخت نمونه بهینه در آزمون تحلیلی با آلیاژ مورد نظر انجام شد. عملیات ماشین‌کاری برای حفر سوراخ‌های خروجی سیال بر روی لوله صورت گرفت تا در نهایت به فرم مشابه به نمونه تحلیلی درآید. (شکل ۲۳)

پس از ساخت و قرار دادن لوله تابنده در ساختمان مشعل، اقدام به راه‌اندازی و آزمون آن در چند سیکل مختلف صورت گرفت. با استفاده از ابزار آزمایشگاهی نظیر دماسنج‌های سوزنی و لیزری پارامتر دما در سرتاسر قطعه مورد ارزیابی قرار گرفت تا در نهایت میانگین دماهای ثبت‌شده در هر نقطه به عنوان معیاری برای مقایسه با حل تحلیلی باشد. (شکل ٢٤)

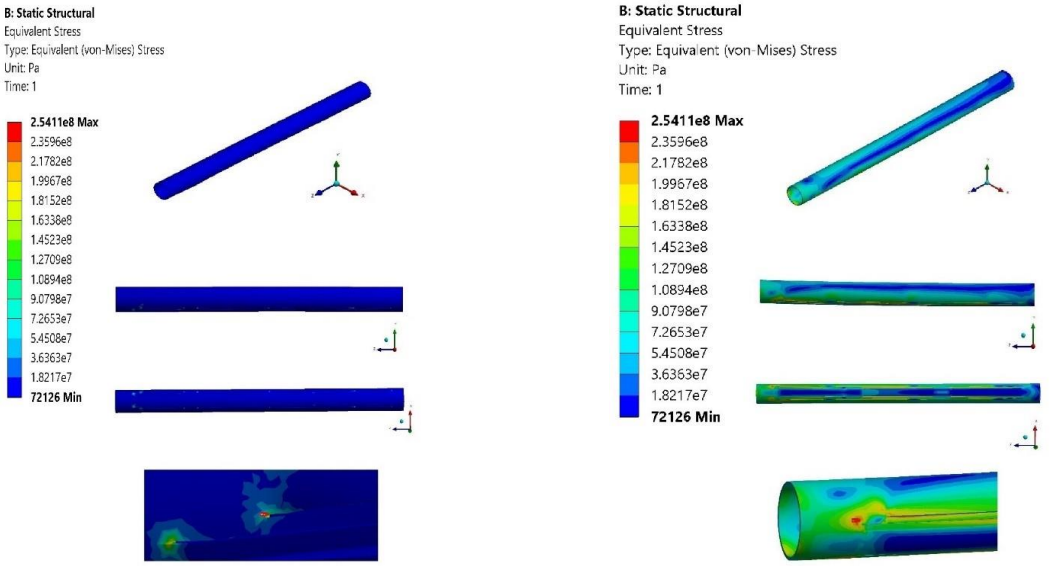


شکل ۲۲) مقایسه تنش‌های پدید آمده در سه طرح، در بارگذاری و پس از آن



(ب) (الف)

شکل ۱۹) کانتور تنش فون میزز لوله تابنده با هندسه خروجی مستطیلی ۴ردیفه؛ الف- در بارگذاری ب-پس از باربرداری



(ب) (الف)

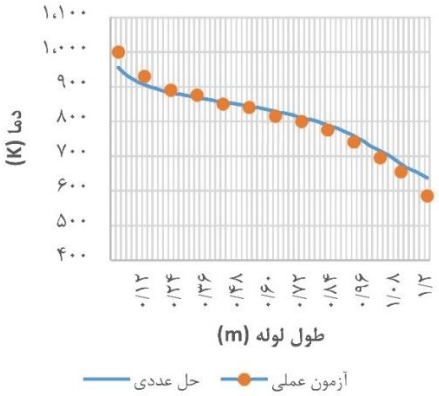
شکل ۲۰) کانتور تنش فون میزز لوله تابنده با هندسه خروجی مستطیلی ۶ ردیفه الف-هنگام بارگذاری ب-پس از باربرداری

شکل ۲۳) نمای آزمایشگاهی لوله تابشی مورد آزمون

شکل ۲۴) ثبت دمای سطح بالای لوله تابنده

با در نظر گرفتن دمای قسمت فوقانی لوله تابنده به عنوان معیار جهت مقایسه حل عددی و نتیجه آزمایشگاهی، دقت حل بدست آمد. مقایسه جواب‌های بدست آمده در شکل ۲۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، اختلاف جواب‌ها کمتر از ۵٪ بوده و نشان از دقت بالای روش حل دارد. از نظر کیفی نیز، با مشاهده لوله‌های تابشی پس از چند بار استفاده و با دقت در جزئیات آن‌ها برتری لوله تابنده با هندسه خروجی دایروی را مشاهده نمود (شکل ۲۶).

شکل ۲۵) مقایسه بین دماهای گزارش‌شده در حل عددی و آزمون



شکل ۲۶) مقایسه کیفی انواع لوله‌های تابشی پس از چند سیکل استفاده در کوره

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، لوله تابنده از مشعل گازسوز تابشی، به منظور دستیابی به بهترین طرح از نظر حداقل بودن مقادیر تنش و کرنش ناشی از بارگذاری حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌های مورد بررسی دارای تفاوت در آرایش هندسه خروجی‌های گاز تعبیه‌شده بر روی آن بودند. در حل این مسئله از برهمکنش سیال-جامد بهره گرفته شده است.

در ابتدا با استفاده از حل معادله رامبرگ ازگود نمودار تنش-کرنش استیل ۳۱۰ بدست آمد.

با توجه به مقادیر فشار نشان داده‌شده در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که در لوله‌های تابنده از مشعل فوق، مقادیر فشار ناچیز بوده و تاثیری در میزان تنش‌ها ندارد و اثرات آن قابل صرف‌نظر است.

مقایسه بیشینه و کمینه دمای گزارش‌شده در نمونه‌ها نشان می‌دهد لوله تابنده با هندسه خروجی‌های دایروی توزیع دمای یکنواخت تر و مطلوب تری نسبت به سایر طرح‌ها جهت کاربرد در مشعل تابشی دارد (شکل ۱۷).

با مشاهده شکل ۲۲ می‌توان دریافت که مقادیر تنش در لوله تابشی، از هندسه خروجی‌های تعبیه‌شده در آن تأثیر می‌پذیرند. لوله تابنده با خروجی‌های دایروی دارای کمترین میزان تنش نسبت به سایر طرح‌ها می‌باشد؛ همچنین از نظر مقادیر تنش‌ها بیشترین تنش در لوله با هندسه خروجی‌های مستطیلی ۶ ردیفه بوده و پس از آن لوله با هندسه خروجی مستطیلی ۴ ردیفه می‌باشد. بیشترین مقادیر تنش‌ها نیز در هر سه طرح در اطراف محل خروجی‌ها می‌باشد.

به منظور سنجش دقت حل آزمون عملی از یکی از نمونه‌ها به عمل آمد و با مقایسه دما در سطح بالایی در حل عددی و حل تجربی دقت روش حل مورد ارزیابی قرار گرفت و اعتبارسنجی حل به این شیوه انجام شد.

در انتها آزمون عملی از نمونه‌های انجام‌شده نیز همانند حل عددی نشان‌دهنده برتری لوله با هندسه خروجی‌های دایروی نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تأییدیه اخلاقی: ما نویسندگان این مقاله با آگاهی از غیرقابل تغییر بودن اسامی، اطلاعات و ترتیب درج نویسندگان اعلام می کنیم که همگی در انجام کار پژوهشی منجر به تولید این مقاله یا نگارش این مقاله همکاری داشته‌ایم و نام هیچ نویسنده‌ای بدون همکاری موثر در تولید این مقاله قید نشده است.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تعارض منافعی بین حامیان مالی، پشتیبانان علمی و نویسندگان، در تولید این مقاله وجود ندارد.

سهم نویسندگان: محمدجواد فرحمند حبیبی به عنوان پژوهشگر اصلی و نگارنده مقاله ۷۰ درصد، علی حسنی به عنوان پژوهشگر فرعی ۱۵ درصد و علی معظمی گودرزی به عنوان پژوهشگر فرعی ۱۵ درصد در این پژوهش نقش دارند.

منابع مالی: هزینه‌های پژوهش منتج به این مقاله، از محل اعتبار پایان‌نامه کارشناسی ارشد آقای محمدجواد فرحمند حبیبی در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، تأمین گردیده است.

منابع

1- Malek Mohamadi D., D. Jalali V. Investigation of natural gas consumption for different pieces of bread to optimize energy consumption, Second Iranian Combustion Conference, Mashhad, Iran Combustion Association, Islamic Azad University of Mashhad. 2008. [Persian].

2- Xu Q, Feng J, Zhou J, Liu L, Zang Y, Fan H. Study of a new type of radiant tube based on the traditional M-type structure. Applied Thermal Engineering. 2019;150:849-57.

3- Xu Q, Feng J. Analysis of nozzle designs on zoned and staged double P-type gas-fired radiant tube. Applied Thermal Engineering. 2017;114:44-50.

4- Denev JA, Dinkov I, Bockhorn H. Burner design for an industrial furnace for thermal post-combustion. Energy Procedia. 2017;120:484-91.

5- Marugán-Cruz C, Flores O, Santana D, García-Villalba M. Heat transfer and thermal stresses in a circular tube with a non-uniform heat flux. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016;96:256-66.

6- Irfan MA, Chapman W. Thermal stresses in radiant tubes due to axial, circumferential and radial temperature distributions. Applied Thermal Engineering. 2009;29(10):1913-20.

7- Irfan M, Chapman W. Thermal stresses in radiant tubes: A comparison between recuperative and regenerative systems. Applied Thermal Engineering. 2010;30(2-3):196-200.

8- Dini G, Vaghefi SM, Lotfiani M, Jafari M, Safaei-Rad M, Navabi M, Abbasi S. Computational and experimental failure analysis of continuous-annealing furnace radiant tubes exposed to excessive temperature. Engineering Failure Analysis. 2008;15(5):445-57.

9- Hellenkamp M, Pfeifer H. Thermally induced stresses on radiant heating tubes including the effect of fluid–structure interaction. Applied thermal engineering. 2016;94:364-74.

10- Caillat S, Pasquinet C. Radiant tubes lifetime prediction in steel processing lines using fluid–structure interaction modelling. Energy Procedia. 2017;120:596-603.

11- Mohammadi, B., Pironneau, O. Analysis of the K-Epsilon Turbulence Model. Applied Mechanics Reviews. 1994;47(12):B117.

12- Thompson MK. Methods for generating rough surfaces in ANSYS. InProceedings of the 2006 International ANSYS Users Conference & Exhibition, Pittsburgh, PA 2006.

13- Knupp PM. Algebraic mesh quality metrics. SIAM journal on scientific computing. 2001;23(1):193-218.

14- Ramberg W, Osgood WR. Description of stress-strain curves by three parameters. Technical Note No. 902, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington DC.

15- Carter GF, Paul DE. Materials science and engineering, CRC Press. 1991.