

طراحی گرم کن بستر سرامیکی دما بالا برای تونل باد ابرصوتی

محمد تقی بشارتی هجراندوست^۱، محمدعلی جزو وزیری^{۲*} و علیرضا ربیعی^۳

دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۵)

چکیده

یکی از گلوگاه‌های طراحی تونل باد ابرصوتی، طراحی گرم کن آن می‌باشد. هدف از انجام این پژوهش، طراحی گرم کن بستر سرامیکی در دمای ۱۸۰۰ کلوین برای جلوگیری از میعان هوا در تونل باد ابرصوتی می‌باشد. برای طراحی اولیه گرم کن، از طریق یک کد مهندسی غیر لزج روابط حاکم بر جریان سیال و انتقال حرارت حل می‌شود. این کد با دریافت خواص فیزیکی ثابت و ترمودینامیکی سیال و جامد، ابعاد هندسی بستر و توزیع دمای دیواره، مقدار دمای هوای خروجی گذرا را تخمین می‌زند. به همین دلیل، طراحی نهایی گرم کن از طریق حل عددی معادلات ناویراستوکس، انرژی و مدل توربولانسی K- ω SST با حلگر نوع فشار پایه کاپلر با دقت مرتبه دوم انجام گردید. نتایج عددی به دست آمده از این روش انطباق خوبی با نتایج تجربی دارد. از طریق تحلیل پارامتری، طرح‌های مختلفی برای یافتن یک بستر گرم کن مناسب مورد ارزیابی قرار گرفت. پارامترهای مورد بررسی شامل ارتفاع، قطر و تخلخل بستر و قطر سوراخ‌ها می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که قطر سوراخ، قطر بستر و سپس ارتفاع و تخلخل مهم‌ترین پارامترها در طراحی بستر گرم کن بوده و به ترتیب تأثیر بیشتری بر مقدار دمای هوای خروجی و مدت زمان اجرا آزمون دارند. به طوری که افزایش یا کاهش ۱۴ درصدی هر یک به ترتیب باعث افزایش ۶۱، ۵۱، ۲۸ و ۸ درصدی مدت زمان اجرا و ۳، ۲ و ۱/۸ درصدی دمای هوای خروجی می‌شود. همچنین قطر سوراخ و تخلخل بستر گرم کن، دو پارامترهای مهم در تعیین ابعاد بستر گرم کن می‌باشند. در نهایت با استفاده از این نتایج طرح اولیه به یک طرح نهایی با ابعاد قطر بستر ۰/۴۵ متر، ارتفاع ۱/۷ متر، قطر سوراخ ۳ میلی‌متر و تخلخل ۰/۲۵۱۲ اصلاح شد.

واژه‌های کلیدی: گرم کن بستر سرامیکی، تونل باد ابرصوتی، گرم کن‌های دما بالا، چگالش هوا در تونل بادهای ابرصوتی

Design High Temperature Cored Brick Heater for Hypersonic Wind Tunnel

M. Besharati¹ M. Jozvaziri^{2*} A. Rabiee³

Imam Hossein University

(Received: 20/Janury/2020 ; Accepted:15/July/2020)

ABSTRACT

One of the throats in designing hypersonic wind tunnel is the design of heater. The purpose of this study is designing a heater with ceramic cored, in 1800K temperature for preventing air condensation in wind tunnel. In initial part of design the fluid flow and heat transfer equation have been solved through an inviscid engineering code. This code estimates the temperature of transient outlet flow with static physical and thermodynamic properties of fluid and solid, geometrical dimensions of bed and wall distribution temperature. The final part of design has been solved with computational methods and using of Navir Stocks and energy equation, with K- ω SST turbulence model. The solver is 2nd order and pressure base. The numerical results are in acceptable agreement with experimental. By parameter analysis, various design for obtaining a suitable heater have been evaluated. The evaluated parameters are height, diameter, porosity of the bed and the diameter of the hole and diameter of the bed. The results show that the diameter of the hole, the diameter of the bed, the height and prosity the most important parameters in the design of the heating bed and have a great impact on the temperature of the exhaust air and the duration the test respectively. 14% increase or decrease of each parameter increase 61, 51, 28, and 8% of execution time and 6, 3, 2 and 1.8 % of the output air temperature respectively. The hole diameter and prosity of the heater bed are two important parameters in determining the dimension of the heater bed. Finally with using of the results the final design has been modified with bed diameter of 0.45 meter, height of 1.7 meter, hole diameter of 3 millimeter and prosity 0.2512.

Keywords: Cored Ceramics Brick Heater, Hypersonic Wind Tunnel, High Temperature Heaters, Air Condensation in Hypersonic Wind Tunnel

۱- کارشناس ارشد: Mohammad.t.besharati@chmail.ir

۲- مربی (نویسنده پاسخگو): Mohamad.ali.vaziri@chmail.ir

۳- مربی: Alireza.rabiee.chmail.ir

۱- مقدمه

طراحی آیرودینامیکی وسایل پرنده ابرصوتی، نیازمند آزمودن تجربی در تونل بادهای ابرصوتی می‌باشد. مهم‌ترین مشکل این تونل‌ها در استفاده از سیال کاری هوا، ایجاد پدیده چگالش هوا در محفظه آزمون بوده و برای حل آن از روش‌های ایجاد گرمایش در مسیر جریان هوا استفاده می‌گردد. این روش‌ها خود به سه دسته، گرمایش حاصل از شوک حرارتی، گرمایش حاصل از احتراق و گرمایش توسط انواع گرمکن تقسیم‌بندی و در انواع تونل‌ها به کار می‌روند. روش گرمایش حاصل از احتراق به دلیل تفاوت خواص سیال گاز داغ تولیدی با هوا و روش‌های گرمایش حاصل از شوک به دلیل محدود بودن مدت‌زمان انجام آزمون و نیاز به ابزارهای اندازه‌گیری سریع و دقیق، مناسب نیاز فعلی نبوده، بنابراین از تونل‌های دارای گرم‌کن به منظور انجام آزمون در مدت‌زمان طولانی استفاده می‌گردد. مناسب‌ترین حالت، استفاده از تونل‌های پیوسته دارای گرم‌کن قوس الکتریکی است؛ اما این گرم‌کن‌ها دارای هزینه زیاد راه‌اندازی و نگهداری بوده و نیاز به پست برق اختصاصی دارند؛ به همین دلیل می‌توان از تونل‌های آنتالپی بالای فشار-خلاء که از گرم‌کن‌های مخزنی برای دستیابی به جریان هوای پایا در مدت‌زمان طولانی آزمون استفاده می‌کنند بهره برد. این نوع گرم‌کن‌ها خود به دو نوع بستر ریگی و بستر سرامیکی تقسیم می‌شوند. با توجه به مشکلات گرم‌کن بستر ریگی مانند افزودن گردوغبار به هوای آزمون، پدیده شناوری ریگ‌ها، ظرفیت جذب پایین حرارتی ریگ‌ها (عدم افزایش بیش‌ازحد دمای گرم‌کن) و عدم ثبات گرمایشی در طول زمان بالای کارکرد، از گرم‌کن بستر سرامیکی دارای هسته آجری سوراخ‌دار که چنین مشکلاتی ندارد، استفاده می‌شود [۱].

با توجه به مشکلات و معایب گرم‌کن‌های بستر ریگی، از این‌رو از سال ۱۹۶۰ مطالعه و طراحی بر روی گرم‌کن‌های بستر سرامیکی هسته آجری آغاز شد. اولین گرم‌کن بستر سرامیکی هسته آجری در سال ۱۹۶۴ برای تونل سه منظوره و سپس با بازطراحی گرم‌کن‌های آزمایشی مرکز تحقیقاتی امز ناسا در سال ۱۹۷۱ توسط شرکت مهندسی فلوداین که امروزه با نام شرکت سیستم‌های مهندسی آیرو ای اس ای (ASE) در سنت پائول آمریکا شناخته می‌شود،

طراحی گردید [۲]. تاکنون گزارشی در مورد طراحی گرم‌کن بستر سرامیکی هسته آجری در داخل کشور منتشر نشده است؛ اما در مورد طراحی گرم‌کن بستر ریگی [۳] و گرم‌کن سیال گازی [۴] برای تونل باد ابرصوتی به ترتیب آقایان آشتیانی و شاکری پژوهش‌هایی انجام و نمونه‌های آزمایشی از کار آن‌ها ساخته شده است [۵]. کنس وی اسمیس و همکارش [۶] از شرکت مهندسی فلوداین مطالعاتی برای توسعه گرم‌کن دما بالا با استفاده از ماتریس‌های هسته آجری از جنس زیرکونیا پایدار شده با ایتریا برای سازمان ملی هوانوردی و فضایی مرکز تحقیقات آمیس موفیت فیلد، کالیفرنیا انجام دادند. اروین ای. لیزبرگ [۷] از مرکز تحقیق لیوز کلیولند اهایو مطالعه‌ای بر روی گرم‌کن هسته سوراخ‌دار تونل باد ابرصوتی برای سازمان ملی هوانوردی و فضایی واشنگتن دی سی انجام داده است. ال. ال. فرنباچر [۸] از آزمایشگاه‌های هوافضا رایت پاترسون ای اف بی (AFB) اوهایو خواص مطلوب سرامیک زیرکونیا برای کارایی بالا گرم‌کن ذخیره‌سازی را مورد مطالعه قرار داد. سی. آر. تنسی و همکارانش [۹] از شرکت آرو بر روی تحقیق و توسعه آجرهای ماتریس زیرکونیا پایدار و تثبیت‌شده با ایتریا در واحد آزمون آزمایشی پی تی یو (PTU) در مرکز توسعه مهندسی آرنولد (AEDC) برای کاربرد در گرم‌کن هسته آجری پرداختند. اف. سی. ویلر و همکارانش [۱۰] از انجمن آکرکس آنالیز تنش حرارتی برای هسته‌های آجری سرامیکی مورد استفاده در گرم‌کن‌های تونل باد ابرصوتی برای آزمایشگاه مواد نیروی هوایی انجام دادند. د. ای. هاگفورد و همکارش [۱۱] از شرکت مهندسی فلوداین در گزارش نهایی تحقیقی بر روی تمام قسمت‌های گرم‌کن‌های ذخیره‌ساز دمابالا برای تونل باد ارائه دادند. ای. جی. جیوتجیز [۱۲] از دانشگاه صنعتی آینده‌وون مدل عددی برای ارزیابی رفتار گرم‌کن احیاکننده در دمای بالا ارائه کرد. تیموتی آلن آمل [۱۳] از دانشگاه مونتانا بر روی شبیه‌سازی حرارتی بستر ثابت هسته آجری سوراخ‌دار دما بالا مطالعاتی انجام داد. همچنین جیوفری کارلس هریک [۱۴] نیز در رشته مکانیک از همان دانشگاه کار مشابهی با عنوان تجزیه و تحلیل پاسخ حرارتی پیش‌گرم‌کننده آزمایشی بر روی گرم‌کن هسته آجری انجام داده است. در ادامه گری آلن آپاشو [۱۵] نیز در همین رشته و از همین دانشگاه کار مهم‌تری با عنوان یک روش شبیه‌سازی برای طراحی حرارتی هیدرولیکی گرم‌کن

بازیابی ارائه دادند. این پژوهش شامل چهار بخش توسعه چارچوب برای طراحی بهینه گرم‌کن هسته آجری، مدل ریاضی برای نمایش گرم‌کن ذخیره‌سازی، راه‌حل تحلیلی برای تخمین عملکرد گرم‌کن برای دوره‌های گرمایش و تخلیه و اعتبارسنجی مدل ریاضی با نتایج تجربی است. هدف از این پژوهش ارائه چارچوب کلی برای طراحی و تحلیل گرم‌کن ذخیره‌سازی هسته آجری برای استفاده در پروژه‌های آینده در آزمایشگاه تحقیق و توسعه دفاع (DRDL) می‌باشد. در ادامه از نتایج کد عددی و تجربی این مقاله برای اعتبارسنجی روش حل مورد استفاده در این پژوهش استفاده شد [۲۶ و ۲۷].

انگیزه اصلی از انجام این پژوهش طراحی بستر آجر سوراخ‌دار مناسب برای گرم‌کن تونل باد دانشگاه جامع امام حسین (ع) بجای گرم‌کن با بستر ریگی می‌باشد و این کار برای اولین بار در داخل کشور صورت می‌گیرد.

۲- طراحی اولیه و مدل‌سازی هندسی

آجر سوراخ‌دار مربوط به واحد ذخیره‌سازی حرارتی باید با ملاحظات هم‌چون عملکرد انتقال حرارت، کنترل افت فشار (به جهت شناوری آجر)، مقاومت در برابر تنش‌های حرارتی (به جهت جلوگیری از ایجاد ترک) طراحی شود و تبادل حرارتی با هوای آزمایشی برای ارائه در بخش آزمون با شرایط جریان هوا مطابق با الزامات جریان مانند نرخ جریان، دما، فشار و غیره باشد. برای مرحله پیش‌گرمایش از گاز شهری به دلیل اقتصادی بودن استفاده می‌شود و پس از گرم شدن آجرها، مشعل خاموش شده و مسیر هوا برای اجرای مرحله گرمایش هوا با عبور از روزنه آجرها باز می‌گردد. آجرهای بستر گرم‌کن‌ها به دو شکل شش‌ضلعی یا استوانه‌ای ساخته می‌شوند. در هر صورت با توجه به اینکه دونقطه هم‌ارتفاع در روی بستر با همدیگر هم‌دما هستند و اختلاف دمای خیلی جزئی دارند می‌توان کل مقطع بستر و آجرها را با سلول‌های مرز آدیاباتیک دایره‌ای یا شش‌ضلعی ساده‌سازی نمود و به جای شبیه‌سازی کل بستر و یا یک آجر کامل، به شبیه‌سازی یک سلول با مرز آدیاباتیک اکتفا نمود. شکل ۱ نمایی از ساده‌سازی کل بستر گرم‌کن با یک سلول را نشان می‌دهد.

سرامیکی هسته آجری احیاکننده ارائه داده است. رودنی کارل هرریس [۱۶] تنش حرارتی را در آجر سرامیکی پیش‌گرم‌کن در دانشگاه مونتانا مورد مطالعه قرار داد. تی. ای. آمل و همکارش [۱۷] از دانشگاه مونتانا بوزمن به شبیه‌سازی کامپیوتری گرم‌کن هسته آجری پرداختند. ای. اس. پائول [۱۸] از مرکز توسعه مهندسی آرنولد نوآوری جدیدی از گرم‌کن هسته آجری از جنس زیرکونیا تثبیت‌شده با ایتریا را برای تونل پیوسته ارائه داد. پیتر اچ. سی. چو و همکارانش [۱۹] از شرکت مهندسی آبرو از سنت پائول آمریکا بر روی فناوری گرم‌کن ذخیره‌سازی دما بالا برای تونل‌های باد ابرصوتی و تأسیسات آزمون پیش‌رانده‌ای مطالعاتی انجام دادند. دیوید پی. ساری و همکارانش [۲۰] از شرکت مهندسی آبرو بر روی فناوری گرم‌کن ذخیره‌ساز تولید هوای تمیز برای تأسیسات آزمون پیش‌رانده مطالعه انجام دادند. توماس پی. فتروف و همکارش [۲۱] از نیروی هوایی ایالات‌متحده و گروه میراتک آرنولد ای اف بی تنسی به بررسی فناوری بستر آزمون هوای تمیز آبرو نیرو پیش‌رانده ابرصوتی آزمون پیشرفته نیرو پیش‌رانده پرداختند. آزمایشگاه تحقیق و توسعه دفاع (DRDL) هند سندی در مورد طراحی و ساخت تأسیسات ابرصوتی فشار خلاً با قطر ۱ متر برای محدوده ماک ۵ تا ۱۲ که از دو گرم‌کن هسته آجری با گرمایش احتراق گاز مایع استفاده می‌کند منتشر کرد این تأسیسات در شامیرت (بدامافوی)، حیدرآباد [۲۲] برای اهداف هوافضایی آینده ساخته خواهد شد. گوکل. ام و کریشن [۲۳] از دپارتمان مهندسی مکانیک دانشگاه‌های ولالار و کیمبرتر، تامیل نادو، هند به مقایسه عددی جریان سیال و انتقال حرارت در بستر ریگی با بستر هسته آجری پرداختند. ساینس و همکاران [۲۴] از گروه مهندسی مکانیک، موسسه مهندسی و فناوری سرباس، حیدرآباد، هند با استفاده از نرم‌افزار انسیس آنالیزی بر روی عایق لانه‌زنبوری برای گرم‌کن هسته آجری انجام دادند. راما کریشن و همکارانش [۲۵] از موسسه فناوری کیمبرتر، تامیل نادو، هند بر روی بهبود انتقال حرارت توسط ایجاد و القای آشفستگی در جریان هوای عبوری از هسته آجری گرم‌کن با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند.

اس. ناقندرا بابو و همکارانش از آزمایشگاه تحقیق و توسعه دفاع (DRDL) حیدرآباد، تلانگانا، هند چارچوب ریاضی برای طراحی و بهینه‌سازی گرم‌کن ذخیره‌سازی

$$n = \frac{\frac{\pi D^2}{4} * \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}}}{2 * \frac{\sqrt{3}}{4} s^2} = \frac{\sqrt{3} \pi D^2}{6 s^2} = \frac{0.90689 D^2}{s^2} \quad (2)$$

با جایگذاری مقدار معادل s^2 از معادله (۱) در معادله (۲) رابطه تعداد سوراخ با سه پارامتر مهم تخلخل، قطر ماتریس و قطر سوراخ به صورت معادله (۳) زیر به دست می آید.

$$n = \frac{\eta D^2}{d^2} \quad (3)$$

اگر A سطح مقطع آجر باشد $A\eta$ مساحت حفره ها خواهد بود و می توان دبی کل ورودی به بستر را با معادله (۴) در زیر نوشته و از تساوی موجود دوباره معادله (۳) را نتیجه گرفت.

$$m^{\square} = n \rho v \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) = \eta \rho v \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \rightarrow n = \frac{\eta D^2}{d^2} \quad (4)$$

اگر هوا ورودی به بستر به عنوان گاز ایده آل فرض شود. معادله (۵) که معروف به معادله حالت است رابطه بین فشار، دما و چگالی هوا را نشان خواهد داد.

$$P = \rho RT \quad (5)$$

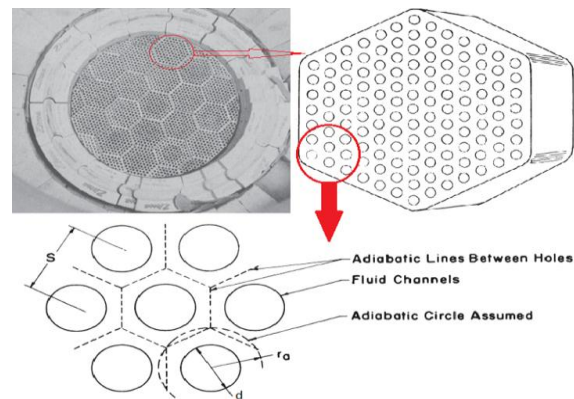
که R ثابت گازها بوده و برای هوا برابر ۲۸۷ می باشد. مقدار گرمای ذخیره شده در گرمایش هوا توسط بستر (توان حرارتی جذب شده توسط هوا) از معادله (۶) در زیر به دست می آید:

$$q = m^{\square} C_p (T_2 - T_1) \quad (6)$$

که T_1 و T_2 دمای اولیه و ثانویه هوا، C_p گرمای ویژه و m^{\square} دبی جرمی هوا می باشد. همچنین مقدار انتقال حرارت جابجایی بین سیال و جامد از معادله (۷) به دست می آید:

$$q = hA \left(\frac{\theta_2 + \theta_1}{2} - \frac{T_2 + T_1}{2} \right) \quad (7)$$

که در این رابطه θ_1 و θ_2 دمای اولیه و ثانویه جامد و A مساحت انتقال حرارت بوده که از حاصل ضرب محیط خیس



شکل (۱): ساده سازی کل بستر گرم کن با یک سلول

با توجه به ویژگی های چنین گرم کن هایی دو متغیر مستقل هندسی اولیه می توانند تعیین شوند: (۱) سطح مقطع بستر A و ارتفاع H واحد ذخیره سازی حرارتی که به طور مستقیم اندازه واحد ذخیره حرارتی را تعیین و سپس اندازه گرم کن را تعیین می کند. (۲) پارامترهای هندسی مقطعی از واحد ذخیره ساز حرارتی مانند قطر سوراخ d ، فاصله سوراخ ها s ، نسبت فاصله سوراخ به دهانه سوراخ s/d ، نسبت تخلخل سطح η ، تعداد سوراخ ها n که از این میان تنها سه پارامتر مستقل از یکدیگر هستند.

نسبت تخلخل سطح η یک پارامتر هندسی مهم است که تأثیر مستقیم بر ظرفیت جریان هوا (دبی)، ظرفیت ذخیره سازی گرما، عملکرد انتقال حرارت و سطح تنش حرارتی دارد. این نسبت به عنوان حجم حفره ها به حجم کل جسم تعریف می شود و یک رابطه هندسی مستقیم یا معکوس با بیشتر پارامترهای دیگر مانند قطر ماتریس D ، قطر سوراخ d ، حجم ماتریس V_{bed} ، مساحت کل انتقال حرارت A_{ht} ، مساحت سطح مقطع ماتریس A_f ، محیط خیس شونده p ، ارتفاع بستر H ، افت فشار در واحد طول dp/dz ، چگالی آجر و مساحت سطح در واحد حجم S_v از واحد ذخیره سازی حرارت داشته و آن ها را تعیین می کند. ضریب تخلخل مطابق معادله (۱) به دست می آید.

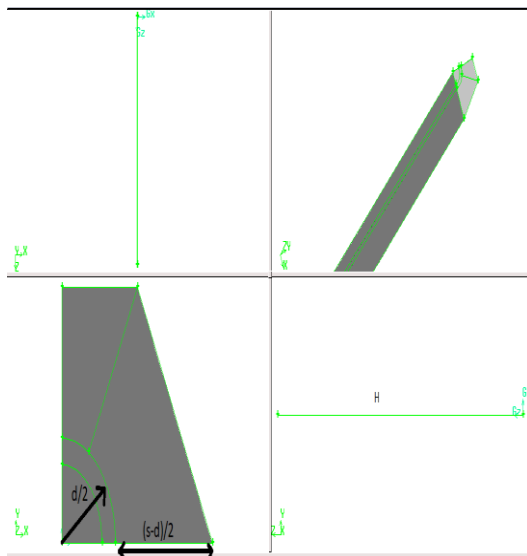
$$\eta = \frac{\frac{1}{2} \frac{\pi d^2}{4} H}{\frac{1}{2} \frac{\sqrt{3}}{2} s^2 H} = \frac{\sqrt{3} \pi}{6 (s/d)^2} = \frac{0.90689}{(s/d)^2} \quad (1)$$

و تعداد سوراخ های بستر از معادله (۲) در زیر محاسبه می شود:

جدول (۱): نتایج ورودی و خروجی های کد مهندسی

مورد	دمای هوا در خروجی T_{02} (k)	فشار هوا در ورودی P_{01} (bar)	دبی ورودی به بستر \dot{M} (kg/sec)	دمای ابتدایی بستر قبل از اجرای تونل T (k)	مدت زمان اجرای تونل باد Run-time (sec)
۱	۴۰۶	۵/۵	۵/۹	۴۶۰	۱۱
۲	۶۷۱	۲۱	۴/۹	۸۰۰	۱۲
۳	۹۹۱	۴۵	۲/۹	۱۲۰۰	۲۳
۴	۱۳۵۵	۷۵	۱/۶	۱۷۰۰	۴۵
۵	۱۸۰۰	۹۰	۰/۷۵	۱۹۵۰	۵۷

نمونه‌ای از هندسه مدل‌سازی شده برای اعتبارسنجی روش حل و تحلیل ابعاد هندسی خروجی از کد مهندسی همانند شکل ۲ در زیر می‌باشد.



شکل (۲): مدل شبیه‌سازی شده

۳- معادلات حاکم

معادلات ناویراستوکس قادر به بیان کامل رفتار فیزیکی سیال در میدان جریان هستند و به‌عنوان معادلات حاکم معرفی شوند. به‌دلیل حضور ترم‌های غیرخطی حل مستقیم و تحلیلی معادلات ناویراستوکس به‌جز در مواردی محدود ممکن نبوده و برای حل از روش‌های عددی استفاده

شونده p در ارتفاع L بستر به‌دست می‌آید. همچنین h ضریب انتقال حرارت جابجایی بوده و از معادله (۸) به‌دست می‌آید:

$$h = 0.0231 \text{Re}_d^{0.8} \text{Pr}^{1/3} \left(\frac{K}{d} \right) \quad (8)$$

که در این رابطه K ضریب هدایت حرارتی هوا و d قطر سوراخ می‌باشد همچنین اعداد بی‌بعد Pr و Re به ترتیب از معادلات (۹) و (۱۰) به‌دست می‌آیند:

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (9)$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (10)$$

که در این روابط μ ویسکوزیته و v سرعت هوا می‌باشد. معادله (۱۱) زیر نشان‌دهنده مقدار انتقال حرارت ذخیره‌شده یا از دست‌رفته از جامد در مدت‌زمان t می‌باشد.

$$q = \frac{mc}{t} (\theta_1 - \theta_2) \quad (11)$$

در این رابطه c گرمای ویژه و m جرم آجر می‌باشد که از حاصل ضرب چگالی آجر در حجم آن حاصل می‌شود.

معادله بقا جرم و مؤمنتم برای یک لوله از معادلات (۱۲) و (۱۳) زیر به‌دست می‌آید:

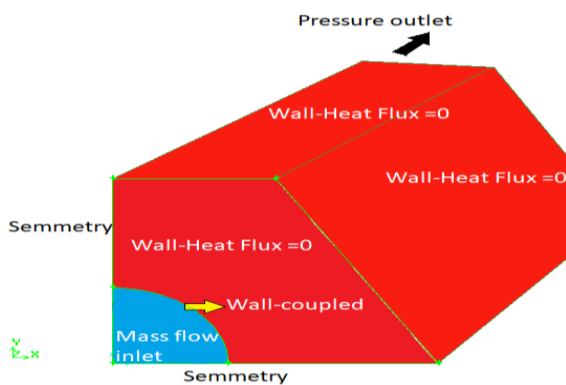
$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2 \quad (12)$$

$$P_1 + \rho_1 v_1^2 = P_2 + \rho_2 v_2^2 \quad (13)$$

که در این روابط اندیس ۱ نشان‌دهنده ورودی و ۲ خروجی است. با توجه به روابط ذکر شده در بالا برای طراحی اولیه و مهندسی بستر گرم‌کن کد نویسی شده که با دادن شرایط ورودی قادر به تعیین ابعاد بستر گرم‌کن برای تأمین دمای موردنیاز جهت عدم میعان هوا می‌باشد.

این کد در یکی از مراکز تحقیقاتی آیرودینامیک کشور موجود بوده و برای شرایط جدول ۱ هندسه‌ای به ابعاد قطر بستر ۰/۳۵ متر و ارتفاع ۱/۵ متر با قطر سوراخ ۴ میلی‌متر و تخلخل ۰/۳۵۴۳ (s/d=۱/۶) پیش‌بینی می‌کند.

در چرخه پیش گرمایش بستر توسط هوای داغ از قرار دادن دمای جامد برابر ۳۰۰ کلوین و برای چرخه گرمایش هوا از اعمال توزیع دمای چند درجه‌ای با ارتفاع بر روی بستر استفاده شده است. هوای ورودی در این حالت با دمای ۲۱۹ کلوین که دمای هوا در خروجی مخزن فشار است به حالت یک شرط مرزی وارد می‌شود و در حالت گرمایش بستر در اعتبارسنجی روش حل، این دما برای هوای داغ خروجی از مشعل ۸۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است.



شکل (۳): شرایط مرزی برای حل مسئله

۵- خواص سیال و جامد

با توجه به تغییر خواص هوا در فشار و دمای بالا، در این پژوهش برای محاسبه چگالی، ویسکوزیته، ضریب هدایت حرارتی و گرمای ویژه از روابط زیر استفاده شده است.

۵-۱- قانون گاز ایده‌آل^۲

برای تراکم‌پذیری هوا در فشار و دمای بالا، طبق معادله (۱۵) تغییر چگالی با دما و فشار از قانون گاز ایده‌آل استفاده شد.

$$\rho = \frac{P_{op} + P}{\frac{R}{M_w} T} \quad (15)$$

در معادله فوق P_{op} نشان‌دهنده فشار کاری^۳ و M_w جرم مولکولی می‌باشد. نمودار ۱ تغییرات چگالی هوا با فشار و دما را در حالات مختلف و پیش‌بینی گاز ایده‌آل را نشان می‌دهد.

می‌شود. در جریان آشفته با استفاده از روش تجزیه رینولدز به معادلات ناویراستوکس متوسط‌گیری شده توسط رینولدز (RANS) طبق معادله (۱۴) رسید:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} &= 0 \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_j} \right) &= \rho \bar{g}_i - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \rho \bar{U}_i \bar{U}_j' \right) \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho \bar{U}_i \bar{U}_i'}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{U}_j \frac{\rho \bar{U}_i \bar{U}_i'}{2} \right) &= \rho \bar{U}_i \bar{U}_j' \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\bar{U}_i' \left(\frac{\bar{P}}{\rho} + \frac{\rho \bar{U}_i \bar{U}_i'}{2} \right) \right] \\ + \nu \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\bar{U}_j' \left(\frac{\partial \bar{U}_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j'}{\partial x_i} \right) \right] &+ \nu \left(\frac{\partial \bar{U}_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j'}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_j'}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (14)$$

در این روابط معادله مؤنتم برای مقادیر متوسط سرعت نسبت به معادله مؤنتم برای مقادیر لحظه‌ای سرعت دارای ترم اضافی $(\rho \bar{U}_i \bar{U}_j')$ می‌باشد که بیانگر اثر تبادل مؤنتم در مقیاس اغتشاشی بوده و آن را تنش رینولدزی می‌نامند. این ترم اضافی باید به نحوی مدل شود تا میدان جریان متوسط گیری شده به سمت میدان جریان اصلی میل کند. این مدل‌سازی خود به چند زیرمجموعه دو، سه و چهار معادله‌ای تقسیم می‌شود. در حل این مسئله به دلیل اهمیت انتقال حرارت بین سیال و دیواره و نیاز به دقت بالا از مدل دو معادله‌ای کی امگا $(k-\omega)$ انتقال تنش برشی^۱ (SST) استفاده شده است. این مدل از یک تابع بهبود رفتار که امکان تغییر وضعیت هموار از حالت اعداد رینولدز پایین به روابط تابع دیواره را میسر می‌سازد استفاده می‌کند و برای جریان رینولدز پایین و دارای جدایش پیش‌بینی بهتری نسبت به سایر مدل‌های دو معادله‌ای دارد.

۴- شرایط مرزی و اولیه

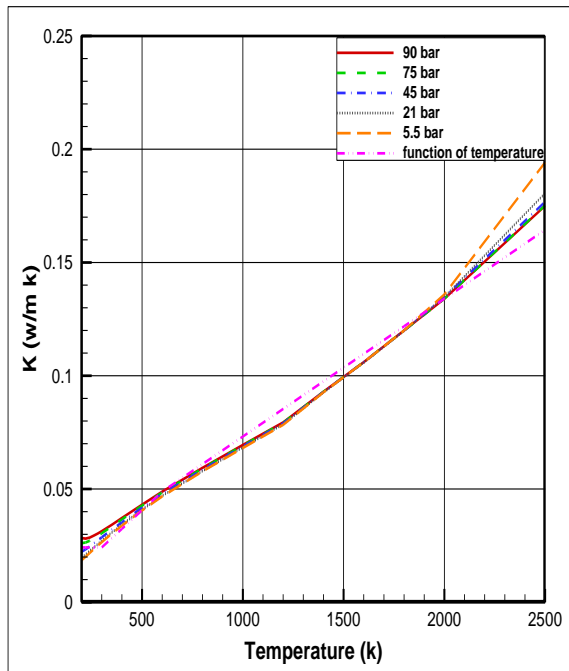
شرایط مرزی حل مطابق شکل ۳ برای مرزهای بیرونی و دو مرز جانبی سمت ورود و خروج هوا به سلول از شرط مرزی دیوار عایق گرما و برای مرزهای جانبی شرط متقارن می‌باشد. همچنین برای مرز تماس بین جامد و سیال شرط مرزی دیوار کوپل به معنای داشتن انتقال حرارت جابجایی به همراه هدایت در نظر گرفته شده است. شرط اولیه دمایی

2- Ideal gas
3- Operating pressure

1- Shear Stress Transport

است. همان طور که در نمودار ۳ نشان داده شده این ضریب بستگی به فشار ندارد. در نرم افزار عددی برای اعمال از گزینه تابع چندتکه‌ای - چندجمله‌ای^۵ استفاده شده است.

$$\begin{cases} 0 < T < 300 \rightarrow K = 0.0242(W / mK) \\ 300 < T < 600 \rightarrow K = (123571.4 + 608.2149T) * 10^{-7} \\ 600 < T < 2500 \rightarrow K = (-45 + 8.216T) * 10^{-5} \end{cases} \quad (16)$$



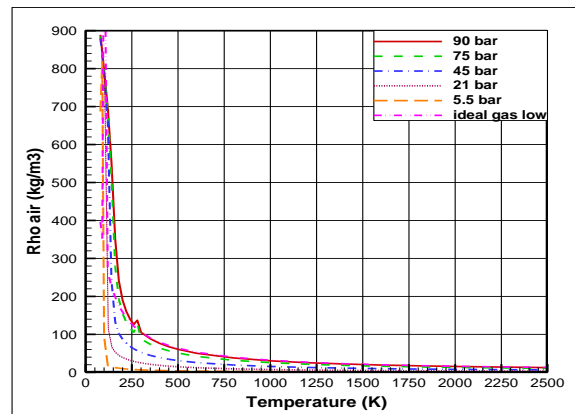
نمودار (۳): تغییرات ضریب هدایت حرارتی هوا با دما در فشارهای کاری مختلف [۲۸].

۴-۵ - گرمای ویژه^۶

برای بیان دقیق تر گرمای ویژه هوا در بازه‌های دمایی مختلف برحسب کلوین، از چندین تابع چندجمله‌ای برحسب دما در بازه‌های فشاری مختلف مطابق معادله (۱۷) استفاده شده است (واحد ژول بر کیلوگرم کلوین). مطابق نمودار ۴ این ضریب در یک بازه کوتاه بستگی به فشار دارد.

$$\begin{cases} 0 < T < 350 \rightarrow \begin{cases} P < 45bar \rightarrow cp = 1303.664 - 1.06854T \\ P = 45bar \rightarrow cp = 1403.664 - 1.06854T \\ P > 45bar \rightarrow cp = 1503.664 - 1.06854T \end{cases} \\ 350 < T < 1150 \rightarrow cp = 1070 - 0.365T + 8.5 * 10^{-4} T^2 - 3.9 * 10^{-7} T^3 \\ 1150 < T < 2500 \rightarrow cp = 1019.2 + 0.1295T \end{cases} \quad (17)$$

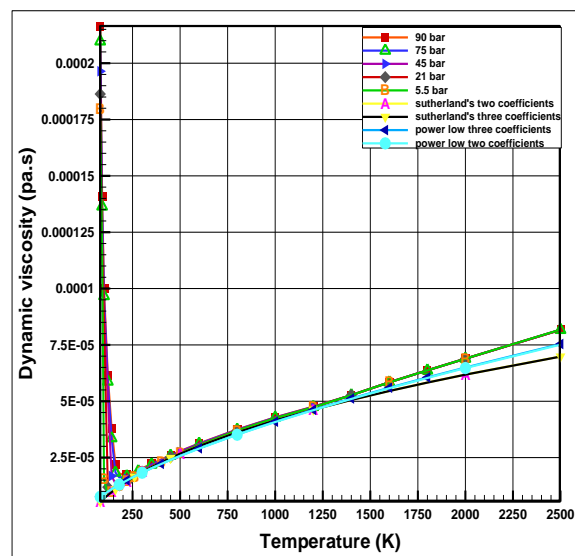
5- Piecewise-polynomial
6- Specific Heat



نمودار (۱): تغییر چگالی هوا با دما در فشارهای کاری مختلف [۲۸].

۲-۵ - ویسکوزیته^۱

برای محاسبه تغییرات ویسکوزیته هوا با دما و فشار از قانون توانی روش دو ضریب^۲ با رابطه $\mu = (4.093e - 7) * T^{\frac{2}{3}}$ استفاده شد. نمودار ۲ تغییرات ویسکوزیته دینامیکی هوا با دما در فشارهای کاری مختلف و پیش‌بینی قانون توانی مورد استفاده در مقایسه با قانون ساترلند^۳ را نشان می‌دهد.



نمودار (۲): تغییر ویسکوزیته دینامیکی هوا با دما در فشارهای کاری مختلف [۲۸].

۳-۵ - ضریب هدایت حرارتی^۴

برای محاسبه دقیق تر ضریب هدایت حرارتی هوا در بازه‌های دمایی مختلف برحسب کلوین از معادله (۱۶) استفاده شده است

1- Viscosity
2- Power law two coefficients
3- Sutherland's law
4- Thermal conductivity coefficient

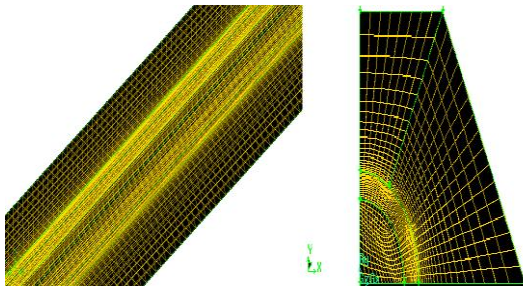
۵-۷- ضریب هدایت حرارتی آلومینا

ضریب هدایت حرارتی برای ماده آلومینا از معادله (۱۹) محاسبه و طبق نمودار ۵ با دما تغییر می‌کند.

$$\begin{cases} 298 < T < 1500 \rightarrow K = 85.868 - 0.22972T + 2.607 * 10^{-4} T^2 \\ -1.3607 * 10^{-7} T^3 + 2.7092 * 10^{-11} T^4 \\ 1500 < T < 2000 \rightarrow K = 5.8604 \end{cases} \quad (19)$$

۶- شبکه‌بندی

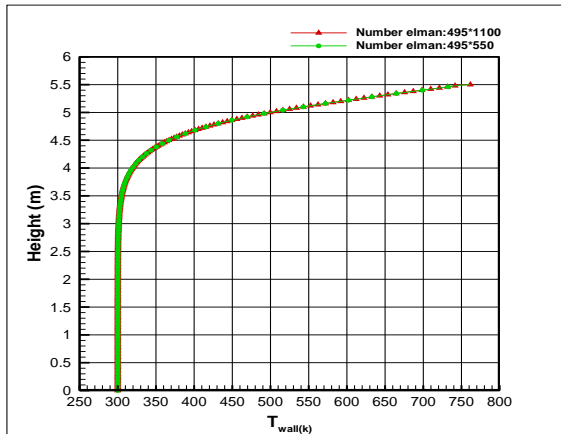
در این مسئله به دلیل نیاز به تحلیل و محاسبه دقیق تر خروجی‌ها از شبکه محاسباتی ساختاریافته مطابق شکل ۵ استفاده شد و در مرز بین سیال و جامد از شبکه‌بندی ریزتری برای محاسبه لایه‌مرزی سرعت و حرارتی با دقت بیشتری مورد استفاده قرار گرفت.



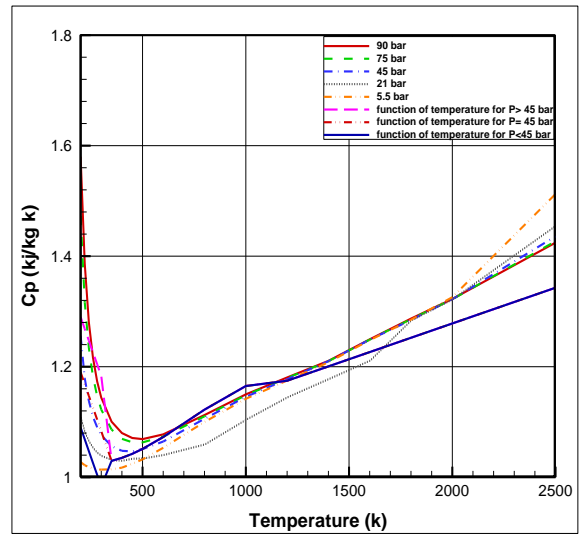
شکل (۵): شبکه محاسباتی

۶-۱- استقلال حل از شبکه

در حل این مسئله در دو جهت سطح مقطع و طول به دلیل حضور گرادیان شدید دمایی به استقلال نتایج حل از شبکه پرداخته شده است. نمودار ۶ نشان داد که با افزایش تعداد المان شبکه در جهت ارتفاع، دمای دیواره تغییراتی ندارد.



نمودار (۶): تغییر دمای دیواره با شبکه ریزتر در جهت ارتفاع



نمودار (۴): تغییر گرمای ویژه هوا در فشار کاری مختلف [۲۸].

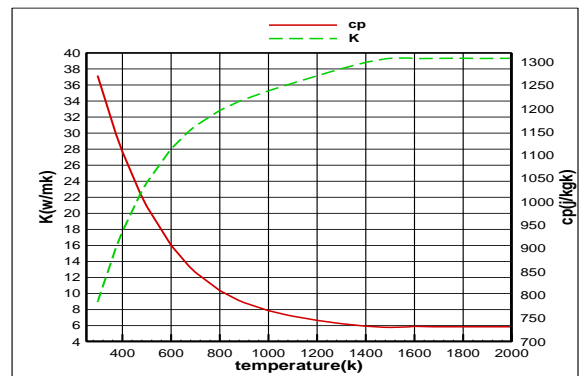
۵-۵- چگالی آلومینا

در این پژوهش جنس آلومینا برای بستر گرم‌کن انتخاب شده که این ماده برحسب درصد خلوص و تخلخل دارای چگالی‌های مختلفی است. در اینجا از خلوص بالا با چگالی ۳۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شده است.

۵-۶- گرمای ویژه آلومینا

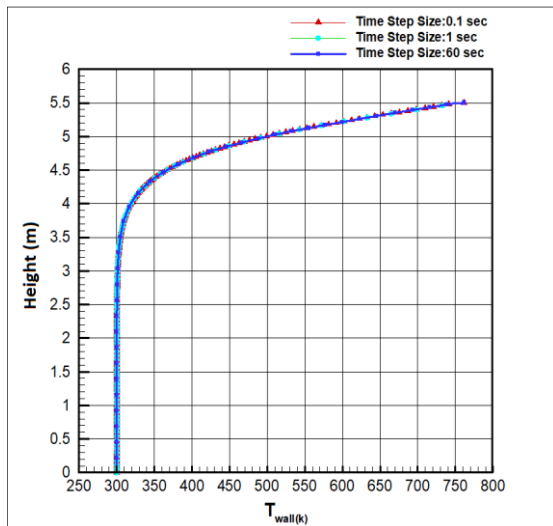
مقدار گرمای ویژه ماده آلومینا با دما مطابق معادله (۱۸) تغییر می‌کند. نمودار ۵ نشان‌دهنده تغییرات گرمای ویژه و ضریب حرارتی آلومینا با دما می‌باشد.

$$\begin{cases} 298 < T < 1500 \rightarrow cp = -40.92 + 4.024T \\ -5.0048 * 10^{-3} T^2 + 2.8852 * 10^{-6} T^3 - 6.2488 * 10^{-10} T^4 \\ 1500 < T < 2000 \rightarrow cp = 1308.375 \end{cases} \quad (18)$$



نمودار (۵): تغییر گرمای ویژه و ضریب هدایت برای آلومینا [۲۸].

همگرایی در هر گام زمانی تغییراتی در نتایج حل وجود ندارد؛ بنابراین به ترتیب گام‌های زمانی ۶۰ و یک ثانیه در صحت سنجی روش حل و تحلیل مسئله، به‌عنوان دوره مناسب برای پیش‌گرمایش و گرمایش انتخاب و استفاده شدند.



نمودار (۹): مقایسه تغییر دمای دیواره با گام زمانی حل

۴-۶- معیار همگرایی

مقدار باقیمانده‌های حل برای معادلات پیوستگی، مؤمنتم و انرژی کمتر از 10^{-5} به‌عنوان معیار همگرایی در نظر گرفته شده است.

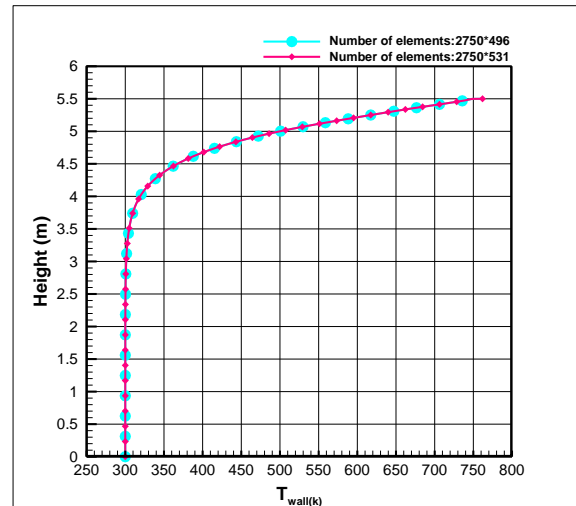
۴-۳- عدد بی بعد y-plus

یکی از مسائل مهم در شبیه‌سازی جریان‌های آشفته، خصوصاً در مواقعی که پدیده‌های نزدیک دیواره دارای اهمیت است، حضور تعداد کافی سلول در لایه مرزی برای شبیه‌سازی دقیق پروفیل دما و سرعت است. از این رو عدد بدون بعدی که برای محاسبه ارتفاع اولین سلول مجاور دیواره به کار می‌رود، به‌صورت معادله (۲۰) تعریف می‌شود:

$$y^+ = \frac{\rho u^* y}{\mu} \quad (20)$$

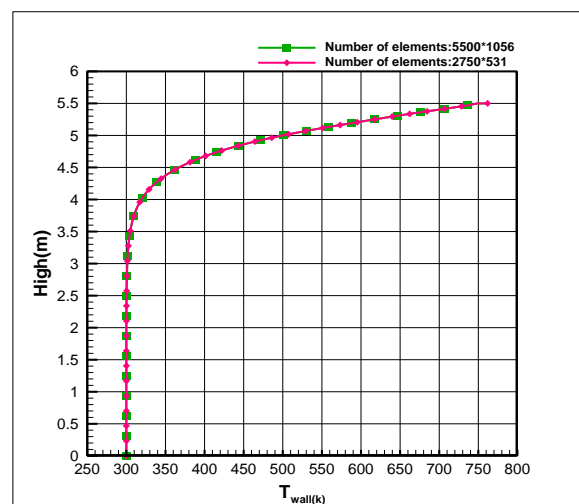
که y ارتفاع اولین سلول مجاور دیواره می‌باشد. همچنین u^* یک سرعت مشخصه برای جریان آشفته است که از روی تنش برشی دیواره و چگالی سیال محاسبه می‌شود. در

نمودار ۷ تغییرات را برای یک شبکه بندی ریزتر در جهت سطح مقطع نشان می‌دهد.



نمودار (۷): تغییرات دمای دیواره با ریز کردن شبکه در جهت سطح مقطع

همچنین مطابق نمودار ۸ اگر در هر دو جهت ارتفاع و سطح مقطعی شبکه را ریزتر کنیم تغییراتی نخواهیم داشت.



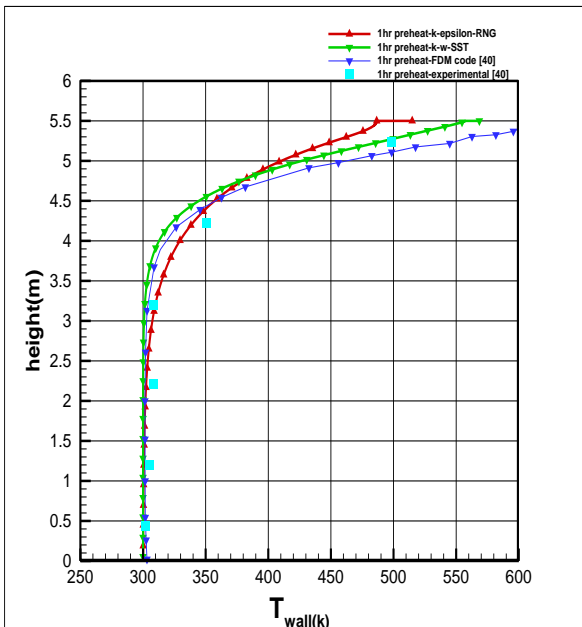
نمودار (۸): تغییرات دمای دیواره با شبکه ریزتر در جهت سطح مقطع و ارتفاع

۴-۲- استقلال حل از گام زمانی

برای به‌دست آوردن گام زمانی مناسب و افزایش سرعت همگرایی در حل نا پایا، دوره‌های زمانی متفاوتی امتحان شد. نمودار ۹ نشان می‌دهد که با افزایش گام زمانی به شرط

۵-۶- اعتبارسنجی روش حل

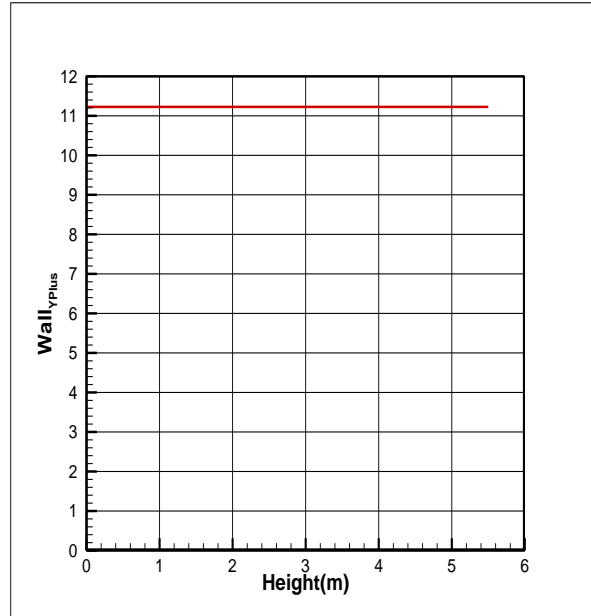
برای اعتبارسنجی روش حل مسئله به بررسی دو مدل توربولانسی کی اپسیلون RNG و کی امگا SST پرداخته شد. همان طور که از نمودار ۱۲ برای یک ساعت چرخه پیش گرمایش دیده می شود روش کی امگا SST قادر به پیش بینی نتایج دقیق و نزدیک تری به نتایج تجربی و کد عددی (مقاله مورداستفاده برای اعتبارسنجی، مرجع [۲۶]) نسبت به روش کی اپسیلون RNG دارد؛ بنابراین در شبیه سازی ها برای حل مسئله از روش کی امگا SST استفاده شد.



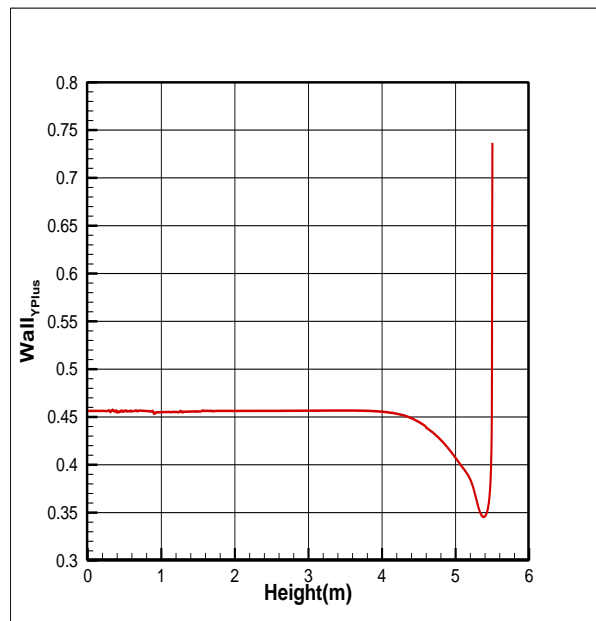
نمودار (۱۲): مقایسه دو روش حل کی اپسیلون RNG و کی امگا SST با نتایج تجربی و کد عددی

این شبیه سازی برای چرخه پیش گرمایش در فشار کاری محیط یعنی ۱۰۱۳۲۵ پاسکال و برای شرط مرزی دبی ورودی و فشار خروجی صفر با شرایط مرزی و اولیه و خواص سیال و جامد متغیر ذکر شده در قبل، برای هندسه سلول به ابعاد قطر بستر ۲/۵ متر، قطر سوراخ ۸ میلی متر، ارتفاع ۵/۵ متر و تعداد سوراخ بستر ۱۴۸۵۰ و دبی هوای داغ ورودی ۲ کیلوگرم بر ثانیه انجام و اعتبارسنجی روش حل صورت

حل و اعتبارسنجی روش حل این مسئله با مدل کی اپسیلون RNG مقدار عدد YPlus مطابق نمودار ۱۰ حداکثر برابر ۱۱ و در استفاده از مدل کی امگا SST مطابق نمودار ۱۱ این مقدار برابر ۰/۴۵ تا ۰/۷ در ورودی می باشد.

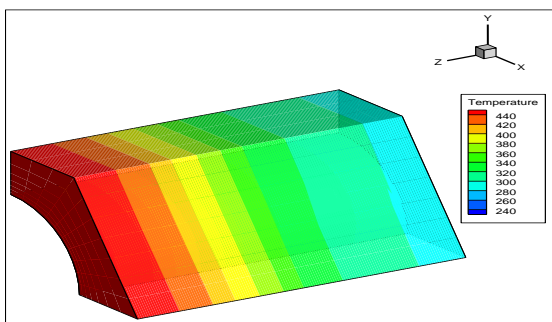


نمودار (۱۰): عدد YPlus در حل مسئله به روش K- ϵ RNG



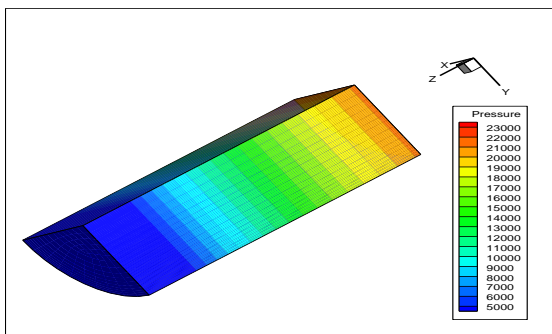
نمودار (۱۱): عدد YPlus در حل مسئله به روش SST K- ω

به‌دست می‌آید. برای اعمال فشار هوای ورودی به بستر این فشار را در قسمت فشار کاری نرم‌افزار عددی وارد کرده و در خروجی از شرط مرزی فشار خروجی برابر صفر استفاده می‌شود بدین ترتیب نرم‌افزار به‌صورت خودکار فشار در ورود و خروج را محاسبه می‌کند. برای اعمال دمای ابتدایی بستر قبل از شروع به اجرا تونل، مطابق شکل ۶ این دما را به‌صورت منحنی مشابه پیش‌گرمایش شش‌ساعته برای بستر که در مقاله مورد استفاده برای اعتبارسنجی ارائه شده به‌عنوان شرط مرزی اولیه اعمال می‌کنیم.



شکل (۶): کانتور دمای ابتدایی بستر برای گوشته سلول

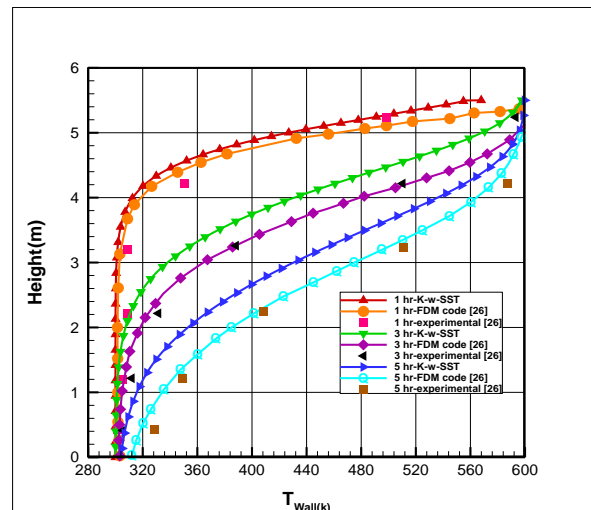
تغییر فشار هوا در ثانیه یازدهم اجرا برای مورد اول جدول ۱ با دبی ورودی کل ۵/۹ کیلوگرم بر ثانیه طبق شکل ۷ است.



شکل (۷): کانتور تغییرات فشار در ثانیه یازدهم اجرا

نمودار ۱۴ نشان‌دهنده تغییرات فشار هوا در طول بستر و در مرکز لوله برای ثانیه یازدهم اجرا می‌باشد. حاصل جمع فشار کاری با مقادیر این نمودار فشار کل را به‌دست می‌دهد که از ورودی تا خروجی به دلیل لزجت شاهد افت فشار هستیم. با گرمایش هوا، چگالی کاهش یافته و هوا سبک‌تر می‌شود. نمودار ۱۵ تغییرات چگالی در طول بستر را نشان می‌دهد. نمودار ۱۶ تغییرات سرعت محوری هوا را در طول سوراخ برای ثانیه یازدهم نشان می‌دهد. طبق این نمودار با افزایش

گرفته است. نمودار ۱۳ نشان‌دهنده مقایسه بین نتایج عددی با نتایج تجربی و ریاضی برای یک، سه و پنج ساعت پیش‌گرمایش تا ۶۰۰ کلین می‌باشد.



نمودار (۱۳): تغییرات دمای دیواره با ارتفاع بستر برای یک، سه و پنج ساعت پیش‌گرمایش تا ۶۰۰ کلین

با توجه به نمودارهای آورده شده در بالا، روش حل عددی کی امگا SST به همراه شرایط مرزی، اولیه و فرضیات انجام شده توانست با خطایی کم‌تر از ده درصد نتایجی نزدیک به نتایج تجربی و ریاضی پیش‌بینی نماید؛ بنابراین از نتایج حاصل از پیش‌گرمایش و خصوصاً توزیع دمای شکل گرفته بر روی دیواره بعد از شش ساعت پیش‌گرمایش به‌عنوان شرط اولیه توزیع دمای دیواره برای حل چرخه گرمایش هوا در مراحل بعدی حل مسئله استفاده شد.

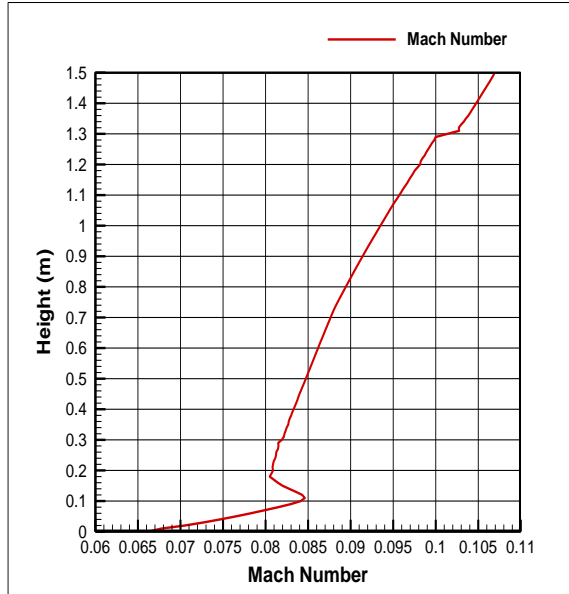
۴- نتایج و بحث

در این بخش به تحلیل و طراحی بستر مناسب برای گرم‌کن پرداخته شده است.

۴-۱- تحلیل ابعاد بستر گرم‌کن به‌دست‌آمده از طراحی اولیه به روش مهندسی برای شرایط ورودی مختلف

پس از مدل‌سازی و شبکه‌بندی هندسه به‌دست‌آمده از طراحی اولیه با کد مهندسی برای نتایج جدول ۱، تعداد سوراخ بستر محاسبه و دبی هوای ورودی به هر سلول

نمودار ۱۷ تغییرات عدد ماخ در مرکز یک سوراخ را در راستای ارتفاع بستر نشان می‌دهد.

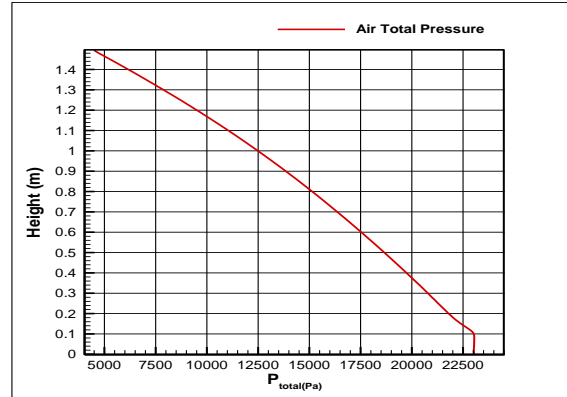


نمودار (۱۷): تغییرات عدد ماخ با ارتفاع بستر در ثانیه یازدهم

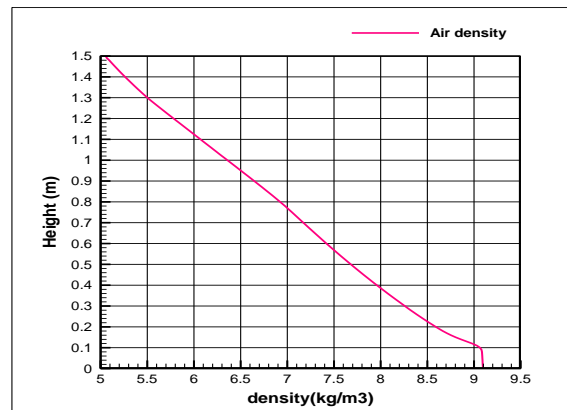
در نمودارهای ۱۶ و ۱۷ با توجه به افزایش دمای سیال و افزایش حجم آن انتظار می‌رود سرعت افزایش یابد؛ اما در این نمودارها یک تغییر جهت ناگهانی وجود دارد که علت آن در نظر گرفتن سرعت در محور وسط سوراخ آجر به جای سرعت متوسط در هر مقطع عرضی برحسب ارتفاع می‌باشد. توجیه فیزیکی این پدیده اینکه در برخی از ارتفاع‌ها (مانند بخشی که دچار پرش شده) برهم‌کنش لایه مرزی حرارتی و سرعتی موجب گردیده سرعت در اطراف دیواره رشد بیشتری داشته (به دلیل دمای بالاتر) و به دلیل حفظ پیوستگی، سرعت در خط میانی اندکی کاهش یابد، در صورتی که سرعت متوسط در هر مقطع عرضی از پایین تا بالای مجرا کاملاً افزایشی و بدون پرش است.

شکل ۸ تغییرات دمای هوا را برای ثانیه یازدهم نشان می‌دهد. لایه مرزی حرارتی از کنار دیواره شروع و با نزدیک شدن به سمت مرکز لوله انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

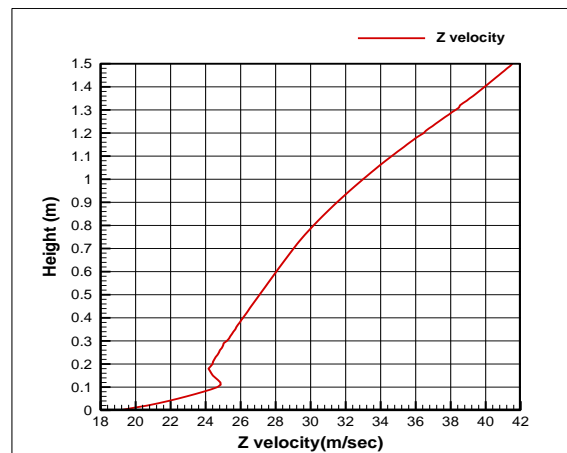
دمای هوا از ورودی تا خروجی، شاهد افزایش سرعت هستیم.



نمودار (۱۴): تغییرات فشار کل در طول بستر در ثانیه یازدهم



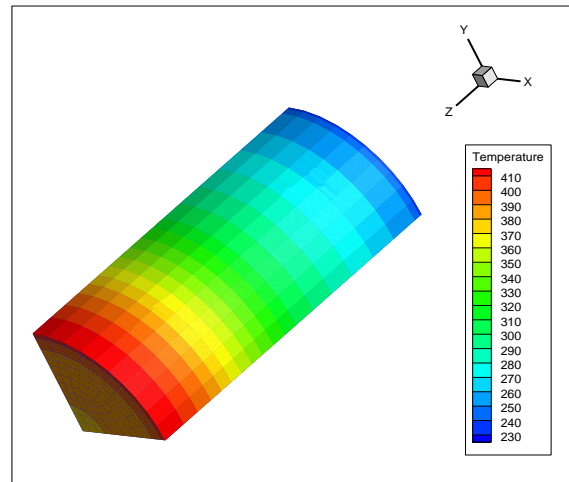
نمودار (۱۵): تغییر چگالی هوا در طول بستر برای گرمایش هوا



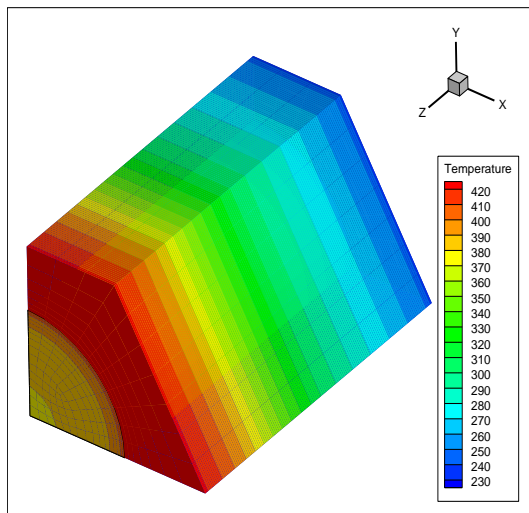
نمودار (۱۶): تغییر سرعت محوری در طول بستر در ثانیه یازدهم

نمودار ۱۸ تغییرات دمای هوا را برای ثانیه یازدهم اجرا در طول بستر نشان می‌دهد. همچنین کانتور شکل ۹ تغییرات دمای دیواره را برای ثانیه یازدهم اجرا نشان می‌دهد. نمودار ۱۹ نشان‌دهنده تغییرات دمای دیواره برای ثانیه یازدهم اجرا می‌باشد.

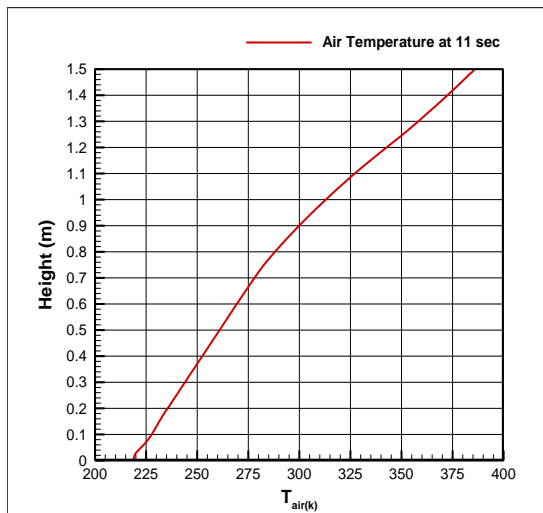
نمودار ۲۰ تغییرات دمای هوای مرکز لوله در امتداد ارتفاع بستر را در مدت‌زمان اجرا نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که باگذشت زمان از ظرفیت حرارتی گرم‌کن کاسته شده و توانایی ارائه دمای هوا بالا برای خروجی همانند ثانیه‌های اولیه شروع اجرا را ندارد.



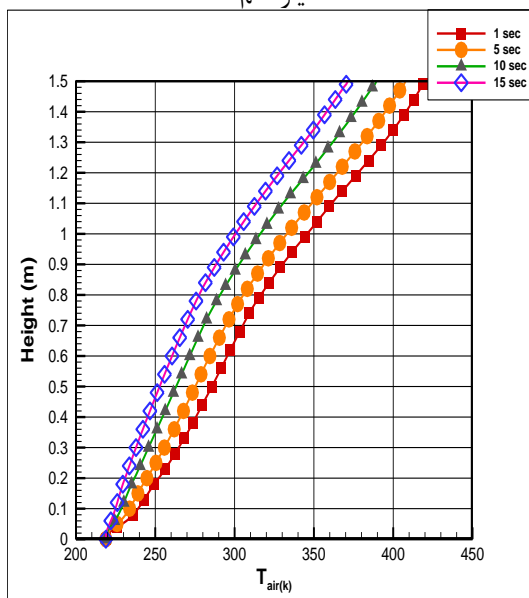
شکل (۸): تغییرات دمای هوای ورودی برای ثانیه یازدهم



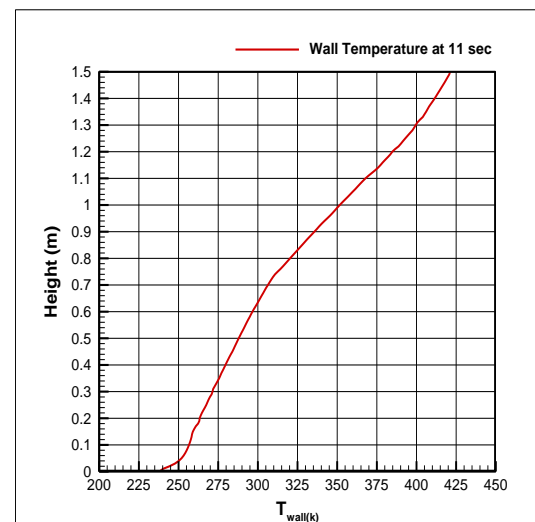
شکل (۹): کانتور تغییرات دمای دیواره برای ثانیه یازدهم



نمودار (۱۸): تغییر دمای هوای در طول بستر برای ثانیه یازدهم



نمودار (۲۰): تغییرات دمای هوا با ارتفاع بستر در زمان‌های مختلف از زمان اجرا

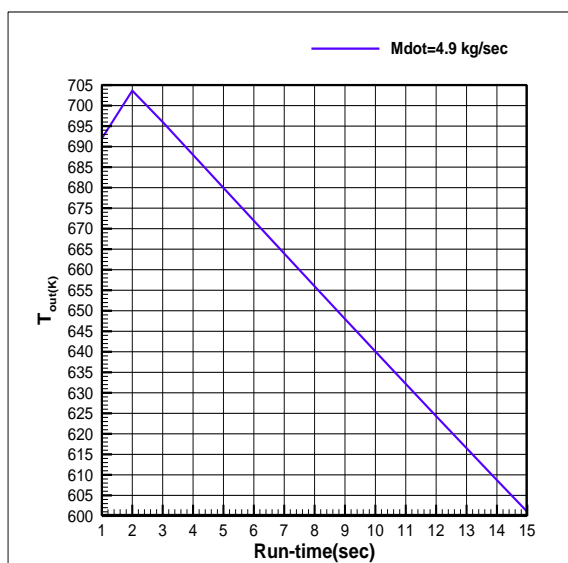


نمودار (۱۹): تغییرات دمای دیواره برای ثانیه یازدهم اجرا

همان‌طور که از نمودار (۲۲) برای میانگین وزنی دمای هوا در خروجی مشاهده می‌شود این طراحی با الحاق حداکثر مقدار دمای ابتدایی بستر ۴۶۰ کلوین تنها به مدت ۶ ثانیه پس از شروع اجرا قادر به تأمین دمای ۴۰۶ کلوین موردنیاز برای عدم چگالش هوای خروجی است و برای دستیابی به مدت ۱۱ ثانیه باید ابعاد طراحی اصلاح شود.

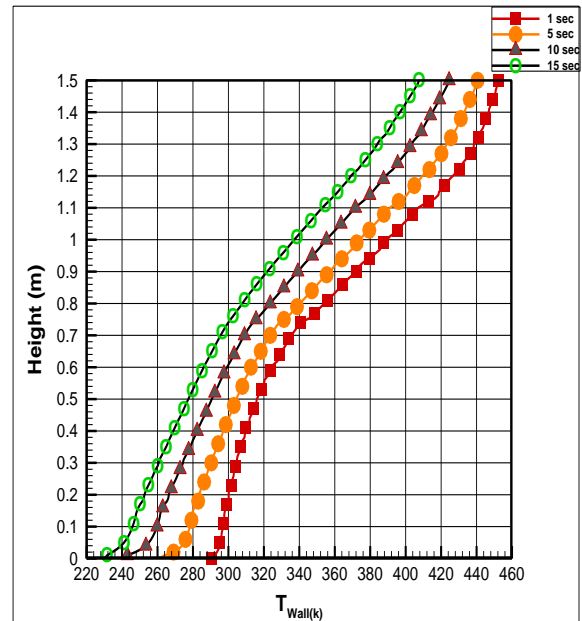
برای موارد ۲ تا ۵ جدول ۱ نیز مشابهاً می‌توان نمودار و کانتورهای فشار، دما، چگالی و سرعت را در ثانیه آخر اجرا بررسی و ارائه کرد. نمودار مربوط به تغییرات دمای هوای خروجی باگذشت زمان اجرا نشان‌دهنده تناسب یا عدم تناسب ابعاد هندسی طراحی شده از کد طراحی مهندسی برای بستر است. این نمودار برای موارد ۲ تا ۵ به صورت زیر است.

نمودار ۲۳ تغییرات دمای هوای خروجی بستر گرم‌کن را در مدت‌زمان اجرا برای مورد دوم جدول ۱ با دبی ورودی کل ۴/۹ کیلوگرم بر ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طور که از این نمودار برای میانگین وزنی دمای هوا در خروجی مشاهده می‌شود این طراحی با الحاق حداکثر مقدار دمای ابتدایی بستر ۸۰۰ کلوین تنها به مدت ۶ ثانیه پس از شروع اجرا قادر به تأمین دمای ۶۷۱ کلوین موردنیاز برای عدم چگالش هوای خروجی است و برای دستیابی به مدت ۱۲ ثانیه باید ابعاد طراحی اصلاح شود.



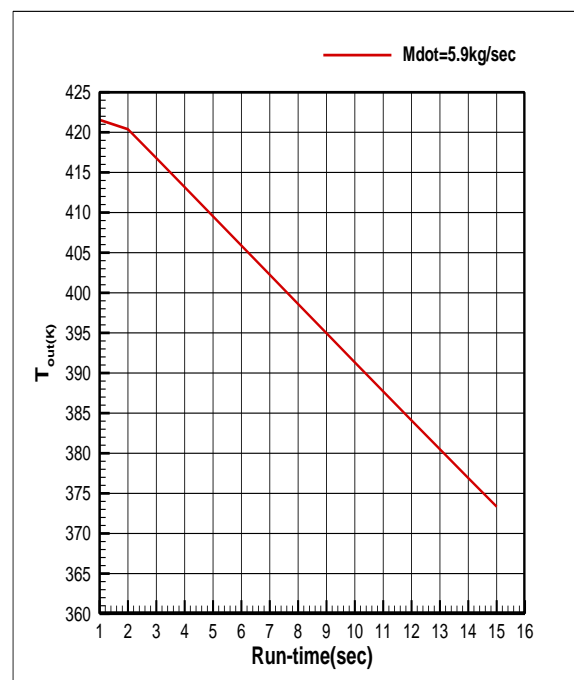
نمودار (۲۳): تغییرات دمای هوای خروجی باگذشت زمان برای مورد دوم جدول (۱)

نمودار ۲۱ تغییرات دمای دیواره در طول بستر را در زمان‌های مختلف اجرا نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با گذر زمان دیواره خنک‌تر شده و دما افت می‌کند.



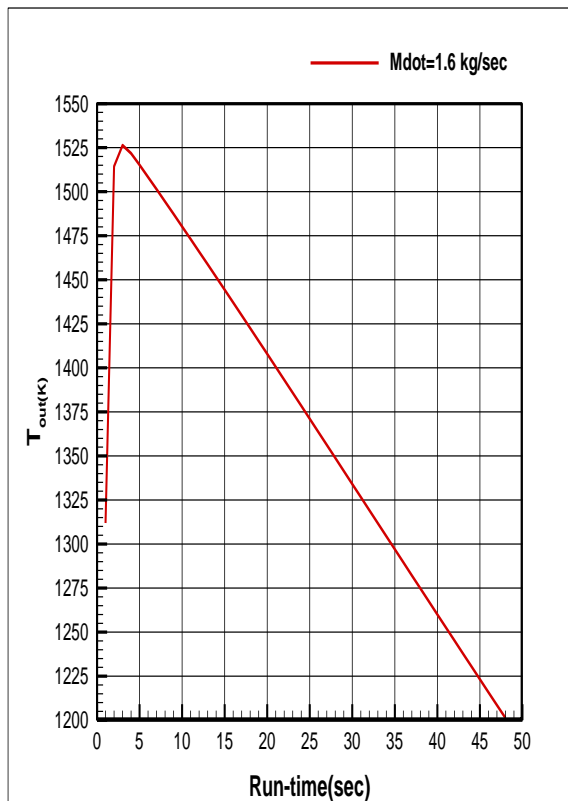
نمودار (۲۱): تغییر دمای دیواره در طول بستر با زمان اجرا

نمودار ۲۲ تغییرات دمای هوای خروجی بستر گرم‌کن را در مدت‌زمان اجرا نشان می‌دهد.



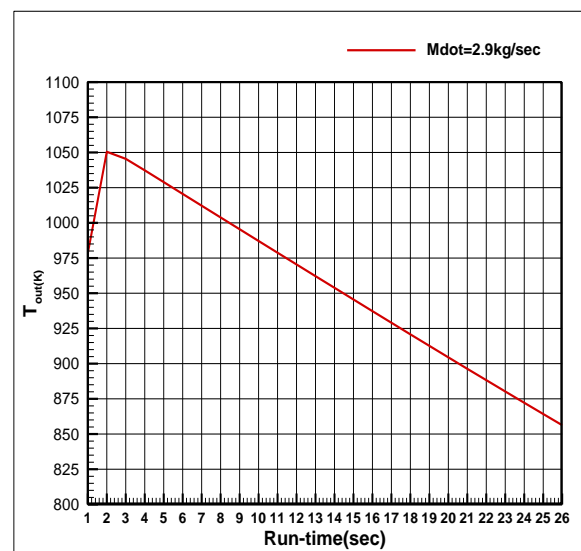
نمودار (۲۲): تغییرات دمای هوای خروجی باگذشت زمان برای مورد اول جدول (۱)

دمای ابتدایی بستر ۱۹۵۰ کلوین تنها به مدت ۴ ثانیه در طول اجرا قادر به تأمین دمای ۱۸۰۰ کلوین موردنیاز برای عدم چگالش هوای خروجی است و برای دستیابی به مدت ۵۷ ثانیه باید ابعاد طراحی اصلاح شود.

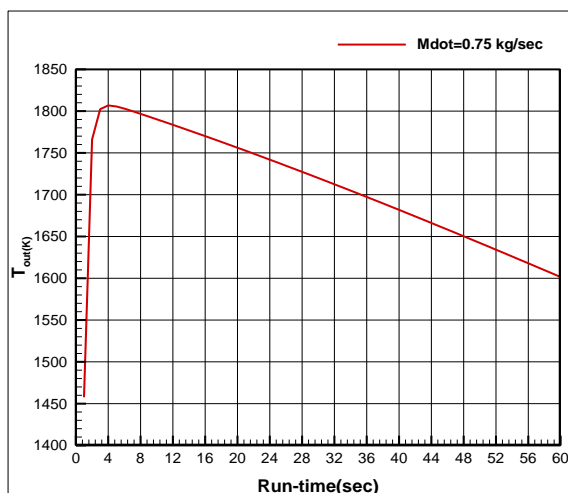


نمودار (۲۵): تغییرات دمای هوای خروجی با گذشت زمان برای مورد چهارم جدول (۱)

نمودار ۲۴ تغییرات دمای هوای خروجی بستر گرم‌کن را در مدت‌زمان اجرا برای مورد سوم از جدول ۱ با دبی ورودی کل ۲/۹ کیلوگرم بر ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طور که از این نمودار برای میانگین وزنی دمای هوا در خروجی مشاهده می‌شود این طراحی با الحاق حداکثر مقدار دمای ابتدایی بستر ۱۲۰۰ کلوین تنها به مدت ۹ ثانیه پس از شروع اجرا قادر به تأمین دمای ۹۹۱ کلوین موردنیاز برای عدم چگالش هوای خروجی است و برای دستیابی به مدت ۲۳ ثانیه باید ابعاد طراحی اصلاح شود.

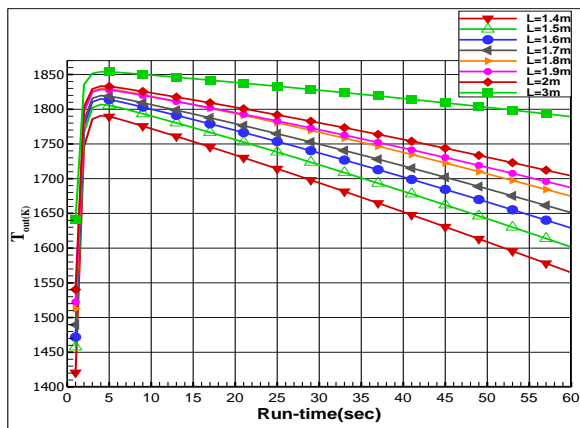


نمودار (۲۴): تغییرات دمای هوای خروجی با گذشت زمان برای مورد سوم جدول (۱)



نمودار (۲۶): تغییرات دمای هوای خروجی با گذشت زمان برای مورد پنجم جدول (۱)

نمودار ۲۵ تغییرات دمای هوای خروجی بستر گرم‌کن را در مدت‌زمان اجرا برای مورد چهارم از جدول ۱ با دبی ورودی کل ۱/۶ کیلوگرم بر ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طور که از این نمودار برای میانگین وزنی دمای هوا در خروجی مشاهده می‌شود این طراحی با الحاق حداکثر مقدار دمای ابتدایی بستر ۱۷۰۰ کلوین تنها به مدت ۲۸ ثانیه پس از شروع اجرا قادر به تأمین دمای ۱۳۵۵ کلوین موردنیاز برای عدم چگالش هوای خروجی است و برای دستیابی به مدت ۴۵ ثانیه باید ابعاد طراحی اصلاح شود. نمودار ۲۶ تغییر دمای هوای خروجی بستر گرم‌کن را در زمان اجرا برای مورد پنجم جدول ۱ با دبی ورودی کل ۰/۷۵ کیلوگرم بر ثانیه نشان می‌دهد. طبق این نمودار که برای میانگین وزنی دمای هوا در خروجی رسم شده است. این طراحی با الحاق حداکثر



نمودار (۲۷): تأثیر طول‌های مختلف بستر گرم‌کن بر دمای هوای خروجی در مدت‌زمان اجرا

۴-۱-۲- بررسی اثر قطر سوراخ بر گرمایش هوا

برای بررسی تأثیر قطر سوراخ بر دمای هوای خروجی سه پارامتر ارتفاع، قطر و تخلخل بستر ثابت فرض شده و هندسه برای قطرهای سوراخ مختلف مدل‌سازی، شبکه‌بندی و حل شده است. با توجه به مقدار تخلخل ثابت با تغییر قطر سوراخ فاصله مراکز سوراخ‌ها از هم و در نتیجه حجم گوشته اطراف سلول تغییر می‌کند که اگر این حجم افزایش یابد ظرفیت ذخیره و آزادسازی حرارت افزایش می‌یابد. از طرفی با ثابت بودن قطر بستر، تعداد سوراخ‌ها با تغییر قطر تغییر کرده و نرخ دبی جرمی و سرعت در هر سوراخ تغییر می‌کند. جدول ۲ این تغییرات را برای قطرهای مختلف نشان می‌دهد. برای حل دبی را تغییر و سایر شرایط حل مشابه مورد پنجم می‌باشد.

جدول (۲): تغییرات دبی ورودی با قطر سوراخ

قطر سوراخ d(mm)	فاصله مرکز به مرکز سوراخ‌ها s(mm)	تعداد سوراخ n	دبی ورودی به هر سوراخ $m^3(kg/sec)$
۳	۴/۸	۴۸۲۲	$۳/۸ \times ۱۰^{-۵}$
۴	۶/۴	۲۷۱۲	$۶/۹ \times ۱۰^{-۵}$
۵	۸	۱۷۳۶	$۰/۰۰۰۱$
۶	۹/۶	۱۲۰۶	$۰/۰۰۰۱۵$
۷	۱۱/۲	۸۸۶	$۰/۰۰۰۲$
۸	۱۲/۸	۶۷۸	$۰/۰۰۰۲۷$
۱۰	۱۶	۴۳۴	$۰/۰۰۰۴۳$

افزایش اولیه در نمودارهای ۲۳ الی ۲۶ به دلیل مقداردهی اولیه می‌باشد، به‌طور مثال هوایی که در ابتدا در وسط مجرا قرار داشته نصف هوایی که در پایین مجرا قرار داشته، در معرض آجر داغ قرار گرفته است در نتیجه در ابتدای حل تا زمانی که هوای داخل لوله تخلیه شود، رفتار غیرعادی وجود دارد که غیر فیزیکی است، زیرا در واقعیت هوای داخل مجرا در فرآیند شارژ گرم‌کن تقریباً با آن هم‌دم شده است. ولی از آنجایی که در زمان اجرای تونل، چند ثانیه اول جریان داخل تونل به دلیل باز شدن شیرهای کنترلی و سایر عوامل، به لحاظ سرعت و دمای سیال نا پایا بوده و عملاً آزمون از ثانیه‌های بعدی که جریان پایا شده، آغاز می‌گردد. از این رو چند ثانیه اول از اهمیت کمتری برخوردار بوده و در این تحلیل نیز کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

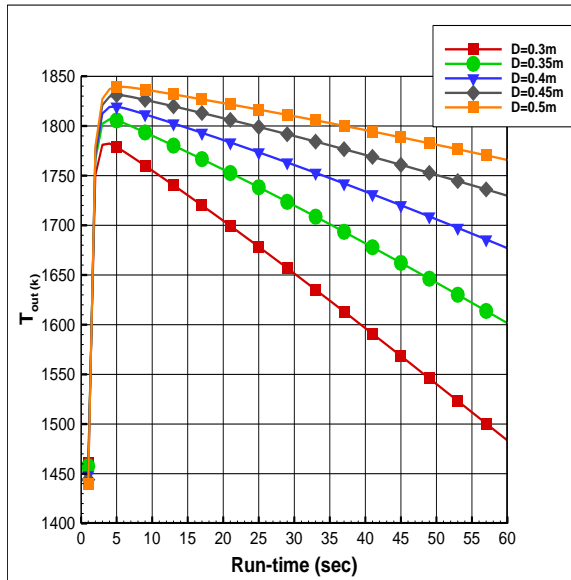
۴-۱-۱- تحلیل پارامتری مسئله

همان‌طور که از نمودارهای پنج مورد بالا مشاهده شد، این ابعاد هندسه قادر به تأمین دمای هوای خروجی در مدت‌زمان اجرا نبوده و تنها چندین ثانیه در طی زمان کل اجرا این دما را تأمین می‌کند. از طرفی مورد پنجم مورد بحرانی‌تر محسوب شده و اگر ابعاد طراحی قادر به تأمین دمای هوای خروجی در مدت‌زمان اجرا مدنظر برای این مورد باشد، قادر به پاسخگویی برای سایر موارد نیز خواهد بود بنابراین در ادامه به بررسی پارامتری مجهولات روی مورد پنجم پرداخته شد تا تأثیر هر یک بر ابعاد طراحی مشخص شود و سپس طرحی با ابعاد مناسب ارائه گردد.

۴-۱-۱-۱- بررسی اثر طول بستر گرم‌کن بر گرمایش هوا

برای بررسی اثر طول، سه پارامتر دیگر یعنی قطر سوراخ، قطر بستر و تخلخل را ثابت نگه‌داشته و با تغییر ارتفاع بستر دمای هوای خروجی را با گذشت زمان به دست می‌آوریم. سایر شرایط مرزی و حل مشابه مورد پنجم بالا می‌باشد. نمودار ۲۷ تأثیر طول بستر را بر دمای هوای خروجی در مدت‌زمان اجرا نشان می‌دهد. با افزایش طول بستر برای سرعت ورودی یکسان، هوا فرصت گرمایش بیشتری پیدا کرده و با دمای بالاتری از بستر خارج می‌شود. به دلیل وجود گرادیان شدید دما بین دمای هوا و دیواره، در چند ثانیه ابتدای اجرا دما افزایش صعودی دارد و بعد از آن با گذشت زمان هر دو دمای دیواره و هوا افت می‌کنند.

نمودار ۲۹ تأثیر افزایش یا کاهش قطر بستر را بر دمای هوای خروجی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش قطر بستر تعداد سوراخ و در نتیجه انتقال حرارت افزایش یافته و دمای هوای خروجی با دمای بالاتری را در مدت زمان اجرا بیش‌تری می‌توان به دست آورد.

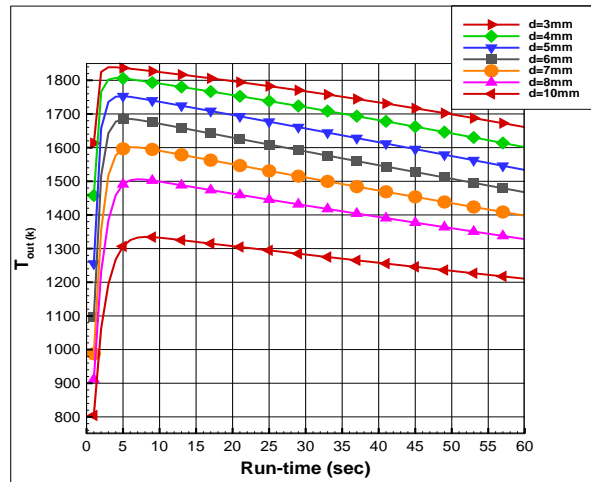


نمودار (۲۹): تأثیر قطر بستر بر دمای هوای خروجی با زمان

۴-۱-۴- تأثیر تخلخل بر انتقال حرارت در بستر گرم‌کن

برای بررسی تأثیر تخلخل بر دمای هوای خروجی با گذشت زمان، سه پارامتر قطر و ارتفاع بستر و قطر سوراخ را ثابت فرض کرده و هندسه برای نسبت تخلخل‌های مختلف مدل‌سازی، شبکه‌بندی و حل شده است. با توجه به ثابت بودن قطر سوراخ برای تغییر تخلخل، فاصله مراکز سوراخ‌ها به‌تنهایی تغییر کرده و با ثابت بودن قطر بستر، تعداد سوراخ و در نتیجه دبی جرمی و سرعت در هر سوراخ نیز تغییر خواهد کرد. در واقع تخلخل و تعداد سوراخ طوری تغییر می‌کنند که مقدار قطر بستر و قطر سوراخ ثابت بماند. جدول ۴ زیر این تغییرات را برای قطر بسترهای مختلف نشان می‌دهد. برای حل دبی را تغییر داده و سایر شرایط مشابه مورد پنجم بالا می‌باشد.

نمودار ۲۸ تأثیر افزایش و کاهش قطر سوراخ بر دمای هوای خروجی را نشان می‌دهد. با افزایش قطر سوراخ دمای هوای خروجی افت و با کاهش آن انتقال حرارت افزایش می‌یابد.



نمودار (۲۸): تأثیر قطر سوراخ بر دمای هوای خروجی با زمان

۴-۱-۳- بررسی اثر تغییر قطر بستر بر گرمایش هوا

برای بررسی اثر قطر بستر گرم‌کن سه پارامتر قطر سوراخ، ارتفاع بستر و تخلخل را ثابت نگاه‌داشته و هندسه برای قطرهای بستر مختلف مدل‌سازی، شبکه‌بندی و حل شده و دمای هوای خروجی با گذشت زمان به دست آورده شده است. با توجه به اینکه در این حالت تخلخل و قطر سوراخ ثابت است بنابراین با تغییر قطر بستر، تعداد سوراخ تغییر می‌کند و در نتیجه دبی جرمی و سرعت در هر سوراخ نیز تغییر خواهد کرد. جدول ۳ زیر این تغییرات را برای قطر بسترهای مختلف نشان می‌دهد. برای حل دبی را تغییر داده و سایر شرایط مشابه مورد پنجم بالا می‌باشد.

جدول (۳): تغییرات دبی ورودی با قطر بستر گرم‌کن

قطر بستر D(m)	فاصله مرکز به مرکز سوراخ‌ها s(mm)	تعداد سوراخ n	دبی ورودی به ۱/۴ هر سوراخ $m^3(kg/sec)$
۰/۳	۴/۸	۱۹۹۳	$۹/۴ \times ۱۰^{-۵}$
۰/۳۵	۶/۴	۲۷۱۲	$۶/۹ \times ۱۰^{-۵}$
۰/۴	۸	۳۵۴۳	$۵/۳ \times ۱۰^{-۵}$
۰/۴۵	۹/۶	۴۴۸۳	$۴/۱۸ \times ۱۰^{-۵}$
۰/۵	۱۱/۲	۵۵۳۶	$۳/۳۸ \times ۱۰^{-۵}$

افزایش مدت زمان اجرا نیز تأثیر دارد؛ اما بیشترین تأثیر از طریق افزایش قطر بستر یا کاهش قطر سوراخ و تخلخل با افزایش تعداد سوراخ و جبران کاهش سطح انتقال حرارت رخ می‌دهد.

۴-۱-۵- آنالیز حساسیت پارامترها

با توجه به جدول ۵ در نمودارهای ذکر شده در بالا با افزایش یا کاهش ۱۴ درصدی هر یک از پارامترهای ارتفاع، قطر بستر و سوراخ‌ها و فاصله مرکز به مرکز سوراخ‌ها، بیشترین تأثیر بر مدت زمان اجرا به ترتیب اهمیت توسط چهار پارامتر قطر سوراخ، قطر و ارتفاع بستر و فاصله مرکز به مرکز سوراخ‌ها اعمال می‌شود و بیشترین تأثیر بر مقدار دمای هوای خروجی به ترتیب اهمیت توسط چهار پارامتر قطر سوراخ و بستر، ارتفاع بستر و فاصله مرکز به مرکز سوراخ‌ها اعمال می‌شود.

جدول (۵): آنالیز حساسیت پارامترها

پارامتر	ارتفاع بستر	قطر سوراخ	قطر بستر	فاصله مرکز به مرکز سوراخ‌ها
درصد تغییرات	۱۴	۱۴/۲	۱۴/۲۸	۱۳/۳
تغییر مدت زمان اجرا	۸ ثانیه	۲۰ ثانیه	۱۸ ثانیه	۴ ثانیه
درصد تغییر مدت زمان اجرا	۲۸/۵۷	۶۱/۵۳۸	۵۱/۴۲۸	۸
تغییر دمای هوای خروجی	۳۵ کلوین	۹۰ کلوین	۵۰ کلوین	۳۰ کلوین
درصد تغییر دمای هوای خروجی	۲	۶	۳	۱/۸

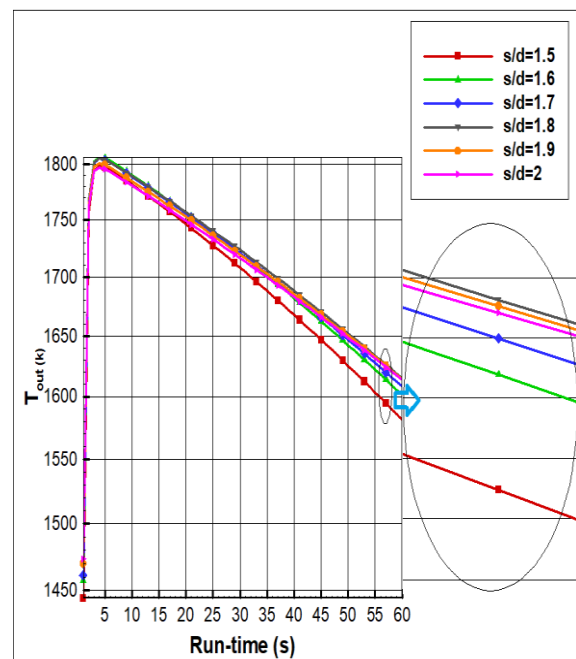
۴-۲- ارائه مدل و طرح پیشنهادی نهایی

برای بهبود و رساندن دمای هوای خروجی از گرم‌کن به شرایط مطلوب برای مورد پنجم تغییراتی در ابعاد هندسه بستر مطابق جدول ۶ انجام شد. این تغییرات شامل افزایش ارتفاع، قطر و نسبت s/d (کاهش تخلخل) و کاهش قطر سوراخ‌ها می‌باشد.

جدول (۴): تغییرات دبی ورودی با تخلخل بستر گرم‌کن

نسبت فاصله مرکز به مرکز سوراخ‌ها به قطر سوراخ s/d	فاصله مرکز به مرکز سوراخ‌ها s(mm)	تعداد سوراخ n	دبی ورودی به هر سوراخ $m^3(kg/sec)$
۱/۵	۶	۳۰۸۶	$۶/۰۷ \times ۱۰^{-۵}$
۱/۶	۶/۴	۲۷۱۲	$۶/۹ \times ۱۰^{-۵}$
۱/۷	۶/۸	۲۴۰۳	$۷/۸ \times ۱۰^{-۵}$
۱/۸	۷/۲	۲۱۴۳	$۸/۷۴ \times ۱۰^{-۵}$
۱/۹	۷/۶	۱۹۲۴	$۹/۷۴ \times ۱۰^{-۵}$
۲	۸	۱۷۳۶	$۱/۰۸ \times ۱۰^{-۴}$

نمودار ۳۰ زیر تغییرات دمای هوای خروجی از بستر گرم‌کن را با گذشت زمان نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت فاصله مرکز به مرکز سوراخ به قطر دمای هوای خروجی بالاتری را می‌توان به دست آورد.



نمودار (۳۰): تأثیر تخلخل بر دمای هوای خروجی با زمان

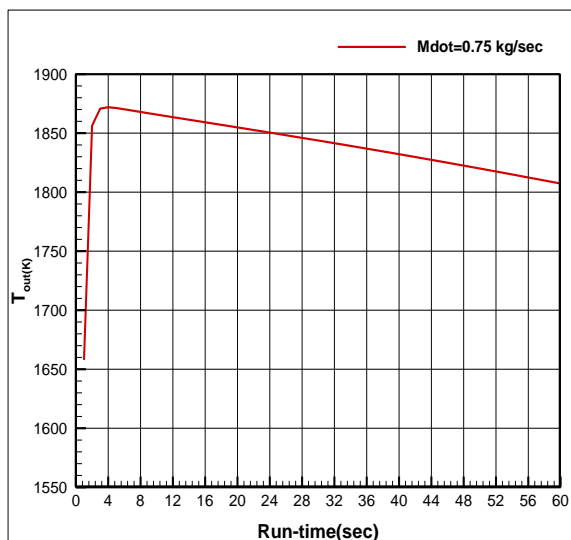
از نمودارهای بالا نتیجه می‌شود که با افزایش ارتفاع بستر می‌توان دمای هوای خروجی بالاتری به دست آورد و برای مداومت این دما می‌توان تعداد سوراخ را به وسیله تغییر در سه پارامتر دیگر افزایش داد. البته افزایش ارتفاع بستر بر

خروجی حاکم است مجبور به افزایش ارتفاع بستر هستیم تا این افت دما در مدت آزمون را جبران کرده و همواره دمای بالای ۱۸۰۰ کلوین را ارائه نماید.

جدول (۷): تغییرات ابعاد بستر برای مورد پنجم

۱/۷	ارتفاع بستر L(m)
۰/۴۵	قطر بستر D(m)
۳	قطر سوراخ d(mm)
۱/۹	نسبت فاصله مراکز به قطر سوراخ s/d
۰/۲۵۱۲	نسبت تخلخل η
۵۶۵۲	تعداد سوراخ n
$۳/۳۱۷۴ \times ۱۰^{-۵}$	دبی جرمی عبوری از ۱/۴ سوراخ

نتایج حاصل از تحلیل با اعمال تغییرات بالا بر ابعاد بستر طبق نمودار ۳۲ زیر است. طراحی با این ابعاد هندسی توانسته به مدت ۵۷ ثانیه دمای بالای ۱۸۰۰ کلوین را برای هوای خروجی از بستر تأمین نماید.



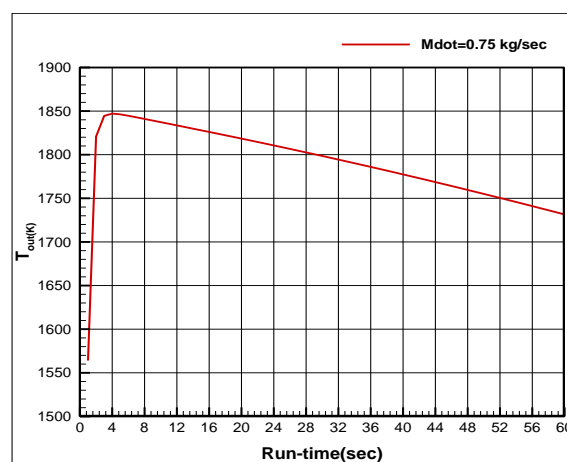
نمودار (۳۲): تغییرات دمای هوای خروجی با گذشت زمان

در نمودارهای (۳۳-۳۶) تغییرات دمای هوای خروجی از بستر برای موارد یک تا چهار با گذشت زمان آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ابعاد هندسی طراحی شده نهایی در تمامی موارد توانسته دمای مورد نیاز برای شرایط عدم میعان هوا را در مدت زمان مدنظر آزمون تأمین نماید.

جدول (۶): تغییرات ابعاد بستر برای مورد پنجم

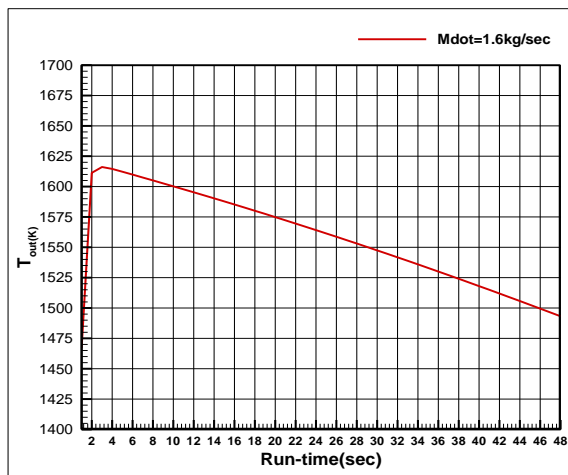
۱/۶	ارتفاع بستر L(m)
۰/۴	قطر بستر D(m)
۳/۵	قطر سوراخ d(mm)
۱/۷	نسبت فاصله مراکز به قطر سوراخ s/d
۰/۳۱۳۸	نسبت تخلخل η
۴۰۹۸	تعداد سوراخ n
$۴/۵۷ \times ۱۰^{-۵}$	دبی جرمی عبوری از ۱/۴ سوراخ

نمودار ۳۱ نتیجه این تغییرات را نشان می‌دهد.

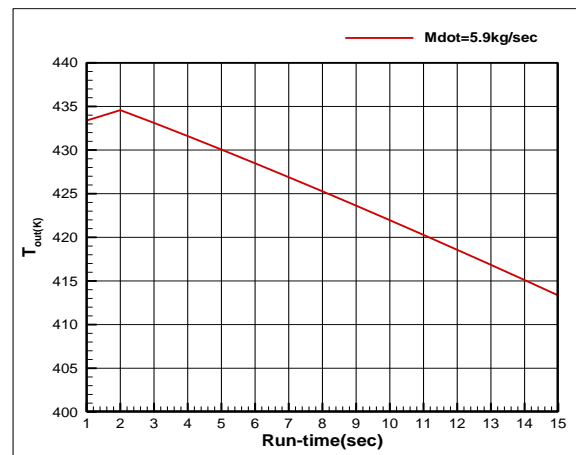


نمودار (۳۱): تغییرات دمای هوای خروجی با گذشت زمان

همان‌طور که مشاهده می‌شود این ابعاد هندسی تنها برای ۲۵ ثانیه توانسته دمای هوای خروجی ۱۸۰۰ کلوین را برای مورد پنجم تأمین کند و ممکن است پاسخگوی نیازهای سایر چهار مورد باشد اما به دنبال مورد جامعی هستیم که برای هر پنج مورد جوابگو باشد؛ بنابراین این ابعاد هندسی را مطابق جدول ۷ دوباره تغییر می‌دهیم. علت کاهش تخلخل (افزایش s/d)، افزایش مدت زمان اجرای آزمون با دمای هوای خروجی مدنظر است که منجر به افزایش ضخامت گوشته و افزایش حرارت ذخیره شده در آن می‌شود. از طرفی این تغییر به همراه کاهش قطر سوراخ باعث کاهش تعداد سوراخ و کاهش سطح انتقال حرارت می‌شود که برای جبران آن قطر بستر را افزایش داده و در نتیجه به تعداد سوراخ و سطح انتقال حرارت بین جامد و سیال افزوده می‌شود و با توجه به سیر نزولی که با گذشت زمان آزمون بر دمای هوای



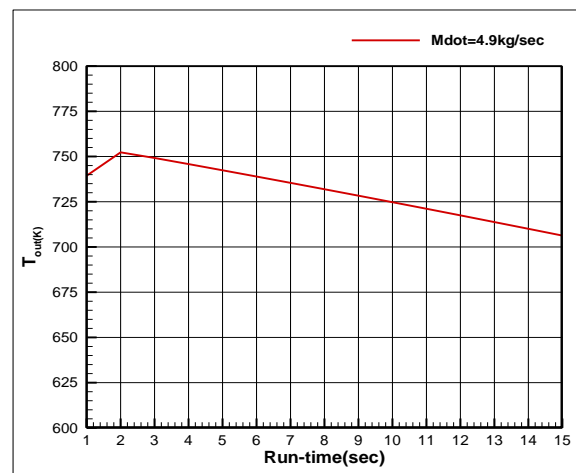
نمودار (۳۶): تغییر دمای هوا خروجی با زمان برای مورد چهارم



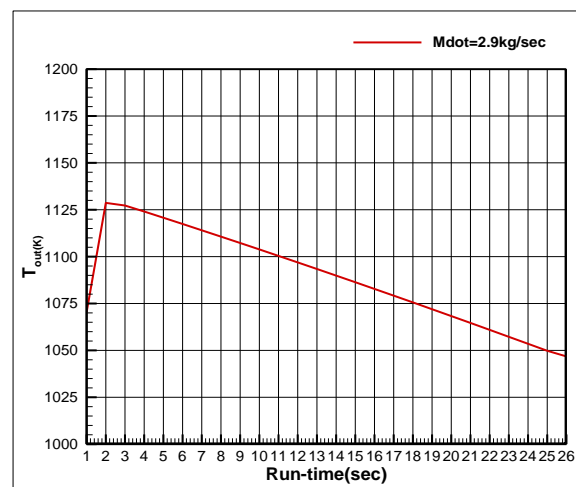
نمودار (۳۳): تغییر دمای هوا خروجی با گذر زمان برای مورد اول

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش طراحی اولیه واحدهای ذخیره سازی حرارتی نوع آجر سوراخ دار با جزئیات مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و پارامترهای طراحی هندسی مانند قطر سوراخ، فاصله سوراخ ها از هم ارتفاع و قطر آرایه ذخیره سازی حرارتی برای عملکرد انتقال حرارت مورد ارزیابی قرار گرفته اند. نتایج ارزیابی نشان می دهد که قطر سوراخ و فاصله مرکز به مرکز سوراخ ها (تخلخل) از مهم ترین پارامترهای طراحی بوده که تأثیر قابل توجهی بر پارامترهای دیگر و عملکرد عملیاتی دارد. انتخاب ارتفاع بستر به طور مستقیم بر میزان دمای هوا جریان خروجی و زمان تخلیه تأثیر داشته و یک پارامتر کلیدی در طراحی برای تثبیت دمای هوا خروجی و مدت زمان آزمون است. قطر بستر نیز به عنوان یک پارامتر طراحی بر تعداد سوراخ ها و افزایش سطح انتقال حرارت مؤثر می باشد. همچنین هر یک از پارامترهای قطر سوراخ و فاصله مرکز به مرکز سوراخ ها (تخلخل) با افزایش و کاهش ضخامت گواشته بر میزان ظرفیت ذخیره و آزاد سازی حرارت تأثیر داشته و باعث افزایش یا کاهش مدت زمان اجرا آزمون با دمای مطلوب می شود. طرح نهایی با ابعاد ارتفاع بستر ۱/۷ متر، قطر بستر ۰/۴۵ متر، تخلخل ۰/۲۵۱۲ و قطر سوراخ های ۳ میلی متر برای تمامی شرایط دبی ورودی بیشتر از ۰/۷۵ کیلوگرم بر ثانیه و فشار کل کمتر از ۹۰ بار قادر به تأمین دمای مورد نیاز برای عدم میعان هوا می باشد. از روش طراحی ارائه شده در این پژوهش می توان در طراحی



نمودار (۳۴): تغییر دمای هوا خروجی با زمان برای مورد دوم



نمودار (۳۵): تغییر دمای هوا خروجی با زمان برای مورد سوم

11. Hagford, D. and DeCoursin, D.J.F.E.C. "February, Research on Storage Heaters for High Temperature Wind Tunnels-Final Report", 1972: p. 40600-70.
12. Geutjes, A. "A Numerical Model to Evaluate the Behaviour of a Regenerative Heat Exchanger at high temperature", 1976: Technische Hogeschool, Afdeling der Elektrotechniek, Vakgroep Direkte.
13. Ameel, T.A., "Thermal Simulation of an Experimental High Temperature Fixed Bed Cored Brick Regenerative Air Preheater", 1977, Citeseer.
14. Herrick, G.C., "Analysis of Thermal Response of an Experimental Air Preheater", 1978, Citeseer.
15. Upshaw, G.A. "A Simulation Approach to the Thermal-Hydraulic Design of Cored Ceramic Brick Regenerative Heat Exchangers", 1977, Montana State University-Bozeman, College of Engineering.
16. Harris, R.C., "Thermal Stress in a Ceramic Brick Air Preheater", 1978, Montana State University-Bozeman, College of Engineering.
17. Ameel, T. and Townes, H. "Computer Simulation of Cored Brick Regenerative Heat Exchangers", in Summer Computer Simulation Conference. 1980.
18. Powell, S. "Mach 7 True-Temperature Test Facility Technology", in 24th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference. 2004.
19. Chu, P., C. Marksberry, and D. Saari. "High Temperature Storage Heater Technology for Hypersonic wind Tunnels and Propulsion Test Facilities", in AIAA/CIRA 13th International Space Planes and Hypersonics Systems and Technologies Conference. 2005.
20. Saari, D., P. Chu, and C. Jauch. "Clean air Regenerative Storage Heater Technology for Propulsion Test Facilities", in 16th AIAA/DLR/DGLR International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. 2009.
21. Fetterhoff, T. and W. Burfitt. "Overview of the Advanced Propulsion Test Technology Hypersonic Aero Propulsion Clean Air Testbed (HAPCAT)", in 17th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference.
22. (DRDL) india, D.R.a.D.L., "Design, Fabrication, Installation of Wind Tunnel System and Commissioning of Hypersonic Wind Tunnel

بستر سرامیکی هسته آجری گرم‌کن دما بالا برای شرایط ورودی مختلف به بستر استفاده کرد.

۶- تشکر و قدردانی

با تشکر از مجموعه اساتید و پژوهشگرانی که ما را در انجام این پژوهش راهنمایی نمودند.

۷- مراجع

1. Pope, A. and K.L. Goin, "High-speed Wind Tunnel Testing", 1965: Wiley.
2. Hedrick, W. "Storage Heater Design Study For The Hypersonic True Temperature Tunnel", 1964, Fluidyne Engineering Corp Minneapolis Mn Db/Phoenix Solutions Co.
3. Ashtiani, AM. "Conceptual Design of Heating Reservoir Tongue Basin, Above the Sound Tunnel", in the Faculty of Engineering, Fluid Mechanics. 2009, Imam Hossein University (AS): Tehran.
4. Shakeri, A. "Development of Technical Knowledge of Design and Construction of Gas Fluid Heater in Wind Tunnel", in Faculty of Engineering and Power Engineering. 2016, Zanjan University: Zanjan.
5. Sadrameli, S. and Ajdari, H.J.A.T.E. "Mathematical Modelling and simulation of thermal regenerators including solid radial conduction effects", Vol. 76, p.p. 441-448, 2015.
6. Smith, K.W. and Decoursin, D.G. "Development of a High Temperature Heater Using An Yttria Stabilized Zirconia Cored Brick Matrix", 1971.
7. Lezberg, E.A. "Drilled-core Storage Heater for a Hypersonic Tunnel", 1971.
8. Fehrenbacher, L., "Optimum Properties of Zirconia Ceramics for High Performance Storage Heaters, in Ceramics in severe environments", Springer. p.p. 105-122, 1971.
9. TINSLEY, C., "Research and Development Testing of Yttria/Rare Earth Stabilized Zirconia Matrix Bricks in the Pilot Test Unit(PTU) at AEDC(Development of Ceramic Materials for Construction of Full Scale, High Pressure, Hypersonic Facility For Testing Aircraft and Missile Models)", 1972.
10. Weiler, F., Derbidge, T., and Powars, C. "Analysis of Thermal Stresses in Cored Ceramic Bricks Used in Hypersonic Wind Tunnel Heaters", 1972, Acurex Corp/Aerotherm Mountain View Ca.

26. Samineni, N.B., et al., "A Mathematical Framework for Design and Optimization of Regenerative Storage Heater", 2018. 135: p. 521-529.
27. Babu, S.N., et al., "Selection of High Temperature Heat Storage Materials for Cored Brick Heaters of Hypersonic Wind Tunnel and Scramjet Facilities",. Vol. 5, no. 2, p.p. 7924-7929, 2018.
28. "Resources, Tools and Basic Information for Engineering and Design of Technical Applications",
https://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html.
29. Facility", May,2013. p. 159 (including title page).
23. Gokul, M., A.J.I.J.o.R.i.E. "Krishnan, and Technology, Comparative studies on heat transfer and fluid flow in cored brick and pebble bed heaters", Vol. 4, no. 01, 2015.
24. Sainath, K., Kumar, B.N. and Vineeth, A. "Analysis of Honey Comb Based Insulation for Cored Brick Heater",. Sreyas International Journal of Scientists and Technocrats. Vol. 1, no. 3, pp. 9-19, 2017.
25. Ramakrishnan, P. and Krishnan, A.J.A.R.M.E. "Heat transfer Enhancement in a 4-holed Cored Brick Regenerator by Inducing Turbulence",.Vol. 6, p.p. 18-23, 2017.