



مدل سازی سوختگی های ناشی از کیسه های هوا به منظور بررسی نقش پارامترهای مختلف در ایجاد آن

آیدا فتحی پور¹، کیومرث مظاهری^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 143-14115، kiumars@modares.ac.ir

چکیده

استفاده از کیسه های هوا به عنوان وسیله ای مورد قبول برای ایمنی سرنشین در تصادفات، در حال افزایش است. اما در بسیاری از موارد خود کیسه های هوا، باعث آسیب دیدگی سرنشین می شود. یکی از آسیب دیدگی های رایج، سوختگی ناشی از کیسه هوا است. سوختگی های ناشی از کیسه های هوا می توانند شیمیایی یا حرارتی باشند. سوختگی های شیمیایی در این مقاله بررسی نشده است. سوختگی های حرارتی ناشی از کیسه های هوا دو نوع است: سوختگی ناشی از برخورد مستقیم با کیسه هوا و سوختگی ناشی از برخورد با گاز داغ خروجی از دریچه های کیسه هوا. هدف این مقاله شبیه سازی عددی این دو نوع سوختگی است. یک مطالعه پارامتریک برای بررسی نقش جنس کیسه هوا، قطر دریچه، تعداد دریچه ها و فاصله سرنشین از کیسه هوا، انجام شده است. طبق نتایج به دست آمده بیشترین سوختگی مربوط به (PA66 پلی آمید 66) و کمترین مربوط به PET (پلی اتیلن) می باشد. با افزایش قطر دریچه عمق ایجاد سوختگی بیشتر می شود. با افزایش تعداد دریچه ها عمق ایجاد سوختگی افزایش پیدا می کند. فاصله سرنشین از کیسه هوا رابطه مشخصی با سوختگی ندارد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 08 اردیبهشت 1393
پذیرش: 11 تیر 1393
ارائه در سایت: 17 شهریور 1393
کلید واژگان:
کیسه هوا
سوختگی
تابع سوختگی امگا
مدل دینامیک گاز ونگ - نفسکه

Modeling burn due to airbag deployment to evaluate the role of various parameters in producing burns

Aida Fathipour¹, Kiumars Mazaheri^{2*}

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115143 Tehran, Iran, kiumars@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 28 April 2014
Accepted 02 July 2014
Available Online 08 September 2014

Keywords:

Airbag
Burns
Injury Criterion Omega Function
Wang-Nefske Gas Dynamic Model

ABSTRACT

Using of airbags is now increasing as a widely accepted safety measure designed to reduce morbidity associated with vehicle accidents. However, in many accidents the airbag, itself, causes the injury of passenger. One of the common injuries causes by air bag is the skin burning. Burns due to airbag deployment could be chemical or thermal. Chemical burns are not studied in this research. There are two mechanisms for thermal burns due to an airbag deployment; contact with the hot airbag itself, contact with the hot expelled gases from the airbag. Present research focus, is on numerical simulation of these two types of burns. A parametric study is done to investigate effect of airbag material, vent port diameter, number of vent ports and distance between driver and airbag. It was found that the most severe burns are due to PA66 and the less severe burns are due to PET. Increasing the vent port diameter and decreasing number of vent ports result burn in less skin depth. There is no clear relation between distance of driver with airbag and burns. Increasing the distance may cause less or more burn.

می کند تا یک کیسه از جنس نایلون با گاز تولیدی پر شود. به محض این که سرنشین با کیسه هوا برخورد می کند و آن را فشار می دهد گاز به صورت کنترل شده ای از دریچه های کوچکی که در پشت آن تعبیه شده اند، خارج می شود. حجم کیسه هوا و اندازه دریچه های خروجی بستگی به طراحی وسیله نقلیه دارد.

با توجه به آمارهای موجود، با وجود آن که، کیسه هوا وسیله مناسبی برای کاهش آسیب دیدگی سرنشین است، ولی می تواند باعث آسیب دیدگی و حتی مرگ سرنشینان نیز بشود [1]. صدمات وارده می تواند ساییدگی پوست، آسیب شنوایی ناشی از صدای بلند انفجار (165-175 دسی بل)، آسیب دیدگی

1- مقدمه

کیسه هوا یک وسیله ایمنی خودرو است که به هنگام تصادف باز شده و از برخورد سرنشین با اجزاء داخلی خودرو جلوگیری می کند. مکانیزم کار کیسه های هوا به این صورت است که یک واحد کنترل مرکزی کیسه هوا، سنسورهای موجود در داخل وسیله نقلیه را کنترل می کند. از جمله این سنسورها می توان شتابسنج، سنسور ضربه، سنسور فشار طرفین (درب)، سنسور سرعت چرخ، ژيروسکوپ، سنسورهای فشار ترمز و سنسور اشغال صندلی را نام برد [1]. در صورتی که مقادیر مربوط به سنسورها از مقدار مجاز بیشتر شود واحد کنترل مرکزی سریعاً یک مولد گاز را منفجر

Please cite this article using:

A. Fathipour, K. Mazaheri, Modeling burn due to airbag deployment to evaluate the role of various parameters in producing burns, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 83-94, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

رید در سال 1999 ارائه شد [7]. ورودی این مدل ضریب انتقال حرارت جابجایی جت گاز است که می‌تواند از طریق نتایج شبیه‌سازی کیسه هوا یا نتایج اندازه‌گیری‌های تجربی بدست آید. در این مدل برای حل معادله هدایت حرارت در داخل پوست از روش تفاضل محدود استفاده شده است [7].

در سال 2005 سیدهو و مرسر [8] مقاله‌ای در زمینه سوختگی‌های ناشی از کیسه‌های هوا منتشر کردند. در این مقاله ابتدا سوختگی‌های ناشی از گازهای خروجی از کیسه هوا بررسی شد. در این کار ضریب انتقال حرارت جابجایی جت گاز خروجی محاسبه نشده و چند مقدار اختیاری برای مطالعه تأثیر این ضریب در نظر گرفته می‌شد. در تحقیقات قبلی برای محاسبه توزیع دما در پوست از حل معادله فوریه بدون در نظر گرفتن تأثیر بافت زیستی در انتقال حرارت استفاده شده است، در حالی که انتقال حرارت در بافت‌های زیستی با معادله زیست گرما بیان می‌شود بنابراین در مقاله سیدهو و مرسر برای تعیین توزیع دما داخل پوست به جای حل معادله فوریه از حل معادله زیست گرمای پنس (بخش 2-3)، استفاده شد. نتایج این کار به صورت نموداری از عمق سوختگی بر حسب زمان برای ضرایب انتقال حرارت مختلف ارائه شد. طبق نتایج به دست آمده، حتی برای ضرایب انتقال حرارت کم نیز، اگر بازه زمانی برخورد بیشتر از 300 میلی ثانیه باشد، امکان ایجاد سوختگی وجود دارد. در این تحقیق همچنین سوختگی‌های ناشی از برخورد مستقیم پوست با کیسه هوا بررسی شده است. در این مورد نیز عمق آسیب دیدگی پوست بر حسب زمان برای دماهای مختلف جت گاز خروجی از کیسه هوا بررسی شده است. بر اساس این نتایج اگر زمان تماس مستقیم سرنشین با کیسه هوا بیشتر از یک ثانیه باشد امکان ایجاد سوختگی‌های درجه دو، ناشی از برخورد مستقیم وجود دارد. در این کار هیچ مقایسه‌ای با نتایج تجربی و کارهای عددی انجام شده وجود نداشت.

برای کاهش سوختگی‌های ناشی از کیسه‌های هوا باید نقش پارامترهای مختلف در ایجاد آن بررسی شود، در تحقیقات پیشین تأثیر پارامترهای مختلف در ایجاد سوختگی بررسی نشده است. هدف اصلی مقاله حاضر مدل‌سازی سوختگی حرارتی ناشی از کیسه‌های هوا و بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر روی شدت سوختگی می‌باشد. این پارامترها شامل فاصله سرنشین با کیسه هوا، جنس کیسه هوا، اندازه دریچه و تعداد دریچه‌های کیسه هوا می‌باشد. همان‌طور که در مطالب پیشین اشاره شد در هیچ یک از تحقیقات انجام شده ضریب انتقال حرارت محاسبه نشده است و مقادیر اختیاری برای آن در نظر گرفته شده است. با توجه به اهمیت نقش انتقال حرارت جابجایی جت گازهای خروجی از کیسه هوا در سوختگی پوست، در کار حاضر ضریب انتقال حرارت جابجایی با استفاده از شبیه‌سازی عددی برخورد جت گاز با یک صفحه تخت بدست می‌آید. برای شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار تجاری فلونت² استفاده شده است.

2- معادلات حاکم و روش‌های عددی

سوختگی‌های حرارتی دو نوع هستند: سوختگی ناشی از برخورد پوست با جت گاز داغ خروجی از دریچه‌های کیسه هوا و سوختگی ناشی از برخورد مستقیم پوست با کیسه هوا.

برای پیش‌بینی سوختگی‌های ناشی از برخورد پوست با جت گاز داغ خروجی از دریچه‌های کیسه هوا چهار مرحله وجود دارد:

الف- شبیه‌سازی فرایند پرشدن کیسه هوا به منظور به دست آوردن سرعت و دمای جت گاز خروجی از دریچه‌های کیسه هوا؛ برای شبیه‌سازی فرایند

سر و چشم و شکستگی بینی، دست‌ها، بازوها و سر باشد. کیسه‌های هوا معمولاً با یک گاز داغ، که در یک پروسه شیمیایی تولید می‌شود، پر می‌شوند. استفاده از گاز داغ باعث می‌شود که برای به دست آوردن فشار مورد نظر به حجم گاز کمتری نیاز باشد. ولی استفاده از گازهای داغ، خطر سوختگی سرنشین را در اثر برخورد با گازهای داغ به وجود می‌آورد. با توجه به آمارهای موجود 7% از افرادی که کیسه هوا خودروی آنها باز شده است دچار سوختگی ناشی از کیسه هوا شده‌اند [2].

دو منبع اصلی برای سوختگی‌های حرارتی در هنگام باز شدن کیسه هوا و بعد از باز شدن آن وجود دارد. اول، گازهای داغی که کیسه هوا را پر می‌کنند، اگر این گازها در هنگام خروج از دریچه‌های پشت کیسه هوا به پوست برخورد کنند باعث سوختگی‌های درجه اول و دوم می‌شوند که در اثر انتقال حرارت همرفتی وقوع می‌یابند. نوع دوم سوختگی ناشی از برخورد با کیسه هوای داغ است. اگر اختلالی در خالی شدن کیسه هوا به وجود بیاید و زمان تماس سرنشین با کیسه هوا طولانی شود، امکان ایجاد سوختگی نوع دوم وجود دارد.

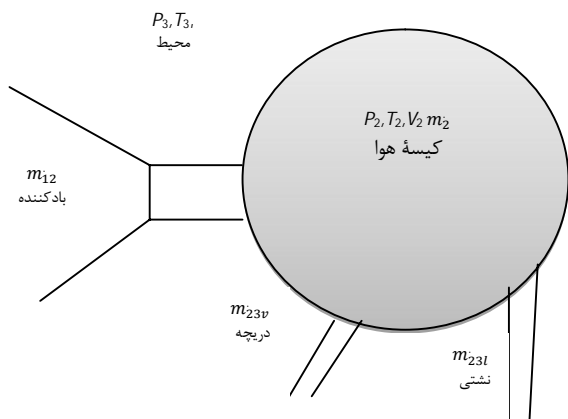
اولین تحقیقی که برای بررسی سوختگی انجام شد در سال 1947 توسط هنریک و موریتز بود [3]. این دو دانشمند با بررسی تجربی روی پوست انسان و خوک، میزان زمان تماس جسم داغ را با پوست برای ایجاد سوختگی درجه‌های مختلف بررسی کردند. هنریک و موریتز نشان دادند که می‌توان فرایند سوختگی را به عنوان یک فرایند نرخی¹ (بخش 2-3) در نظر گرفت. آنها با استفاده از تئوری فرایندهای نرخی تابعی به نام تابع امگا به عنوان معیاری برای تشخیص میزان سوختگی به دست آوردند (بخش 2-3). ورودی این تابع توزیع دما در لایه‌های مختلف پوست و خروجی آن عددی برای تشخیص شدت سوختگی است. این تابع بسیار معتبر است و در حال حاضر هم در تمامی مدل‌سازی‌های سوختگی استفاده می‌شود.

اولین تحقیق انجام شده در مورد سوختگی‌های ناشی از کیسه هوا بوسیله رید و اشنایدر در سال 1994 در دانشگاه میشیگان انجام شد [4]. در این تحقیق سرعت و دمای گاز خروجی از دریچه‌ها برای یک کیسه هوای ساکن در حال باز شدن اندازه گیری شد. با استفاده از این نتایج، یک رابطه ریاضی بدست آمد که کمترین زمان لازم برای ایجاد سوختگی در سرعت و دمای مشخص را تخمین می‌زد. علاوه بر کارهای تجربی انجام شده یک مدل ریاضی نیز برای پیش‌بینی سوختگی توسط رید و اشنایدر ارائه شد [4]. مدل ارائه شده به مدل ASBM معروف است و دارای سه فاز اصلی است. در فاز اول ضریب انتقال حرارت جت گاز خروجی از دریچه‌های کیسه هوا بدست می‌آید. برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی جت گاز خروجی با استفاده از مدل فشار ثابت و نگ و نفسکه [5] فرایند پرشدن کیسه هوا شبیه‌سازی می‌شود و سرعت و دمای گاز خروجی از کیسه هوا به دست می‌آید. سپس با استفاده از روابط تجربی ارائه شده توسط مارتین [6]، ضریب انتقال حرارت جت گاز محاسبه می‌شود. البته ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده در تحقیق ذکر شده صحیح نبوده و در مقاله بعدی رید و اشنایدر به صحیح نبودن آنها اشاره شده است [7]. در فاز دوم، توزیع دمای داخل پوست با استفاده از حل تحلیلی معادله فوریه یک بعدی برای جسم نیمه بی‌نهایت محاسبه می‌شود. در این تحقیق از فرض خواص ثابت برای لایه‌های مختلف پوست و شرط مرزی جابجایی، استفاده شد. سرانجام، در فاز سوم، با استفاده از تابع انتگرالی امگا هنریک و موریتز شدت سوختگی تعیین می‌شود.

برای رفع محدودیت‌ها و نواقص مدل ASBM اولیه، مدل دیگری توسط

2- Fluent 6.3.26

1- Rate Process



شکل 1 حجم کنترل استفاده شده در مدلونگ- نفسکه

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{12} \quad (3)$$

$$\dot{m}_{out} = \dot{m}_{23} + \dot{m}'_{23} \quad (4)$$

\dot{m}_{12} شار جرمي ورودی از باد کننده کيسه هواست. \dot{m}_{23} و \dot{m}'_{23} به ترتيب شار جرم خروجی از دريچه های خروجی تعبیه شده روی کيسه هوا و نشتی ها هستند. جريان ورودی از بادکننده کيسه هوا با فرض جريان آيزنوتروپيک، یک بعدی و شبه پایا به صورت رابطه (5) تخمين زده می شود [9]:

$$\dot{m}_{12} = c_{12} A_{12} \frac{P_1}{R \sqrt{T_1}} \left(\frac{P_e}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}} \left[2 \left(\frac{kR}{k-1} \right) \left(1 - \frac{P_e}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

که در این رابطه C_{12} و A_{12} به ترتيب ضريب سطح و مساحت سطح بين کيسه هوا و باد کننده هستند. k نسبت گرماهای ویژه، P_1 و T_1 فشار و دمای داخل باد کننده هستند. P_e فشار گاز خروجی از دريچه کيسه هوا است.

برای محاسبه فشار خروجی از دريچه های کيسه هوا از مفهوم فشار بحرانی استفاده می شود. زمانی که جريان از یک محیط پر فشار به محیطی با فشار کمتر از طریق یک دريچه، نازل تخلیه می شود، با کاهش فشار پشت، سرعت آن افزایش می یابد. این افزایش سرعت تا زمانی که فشار به فشار بحرانی برسد، افزایش می یابد. در فشار بحرانی جريان دچار خفگی می شود و با کاهش فشار پایین دست، تغییری در سرعت (دبی جرمی) خروجی وجود نخواهد آمد.

فشار بحرانی، P_c ، با استفاده از روابط دینامیک گازی با استفاده از رابطه (6) بدست می آید [5]:

$$\frac{P_c}{P_1} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (6)$$

با توجه به مفاهیم ارائه شده در قسمت قبلی فشار خروجی از باد کننده و ورودی به کيسه هوا P_e به صورت روابط (7) به دست می آید:

$$P_e = P_2 P_2 > P_c \quad (7-الف)$$

$$P_e = P_c P_2 < P_c \quad (7-ب)$$

در حالت دوم که جريان دچار خفگی شده است، جريان پایین دست تأثیری در میزان دبی جرمی ندارد. با استفاده از روابط ترمودینامیکی مانند رابطه (5) می توان دبی جرمی خروجی از دريچه ها و همچنین نشتی ها را محاسبه کرد (روابط ۸.۹) [5]:

$$\dot{m}_{23} = c_{23} A_{23} \frac{P_2}{R \sqrt{T_2}} \left(\frac{P_e}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}} \left[2 \left(\frac{kR}{k-1} \right) \left(1 - \frac{P_e}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$\dot{m}'_{23} = c'_{23} A'_{23} \frac{P_2}{R \sqrt{T_2}} \left(\frac{P_e}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}} \left[2 \left(\frac{kR}{k-1} \right) \left(1 - \frac{P_e}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

پرشدن کيسه هوا، در کار حاضر از مدل دینامیک گازی ارائه شده توسط ونگ و نفسکه استفاده شده است.

ب- به دست آوردن ضريب انتقال حرارت جابجایی گاز خروجی با دما و سرعت مشخص از دريچه: برای به دست آوردن ضريب انتقال حرارت جابجایی جت گاز از حل معادلات حاکم بر جريان جت گاز توسط نرم افزار فلوئنت استفاده شده است.

ج- حل معادله زیست گرما: با شرط مرزی جابجایی و ضريب انتقال حرارت به دست آمده در مرحله قبل و به دست آوردن توزیع دما در لایه های مختلف پوست، معادله زیست گرمای فوریه ای و روش های حل آن در بخش 2-4 معرفی شده اند.

د- محاسبه پارامتر سوختگی (امگا) با توزیع دمای به دست آمده در مرحله قبل: تابع امگا برای پیش بینی سوختگی در بخش 2-5 معرفی شده است.

برای پیش بینی سوختگی های ناشی از برخورد مستقیم پوست با کيسه هوا دو مرحله وجود دارد:

الف- حل معادله زیست گرما برای به دست آوردن توزیع دما در لایه های مختلف پوست با در نظر گرفتن کيسه هوا به عنوان یک لایه اضافی روی پوست و شرط مرزی دما ثابت روی کيسه هوا.

ب- محاسبه پارامتر سوختگی (امگا) با توزیع دمای به دست آمده در مرحله قبل.

1-2- شبیه سازی پرشدن کيسه هوا

در این قسمت از مدل ارائه شده توسط ونگ و نفسکه [5] برای شبیه سازی فرایند پر شدن و خالی شدن کيسه هوا استفاده می شود. با شبیه سازی کيسه هوا می توان سرعت و دمای گاز خروجی از دريچه های کيسه هوا را به دست آورد. در این بخش همچنین به تست تجربی (تست تانک) انجام شده برای به دست آوردن دبی جرمی ورودی بادکننده اشاره می شود.

1-1-2- مدل ونگ و نفسکه

برای مدل سازی فرایند پرشدن کيسه هوا، کيسه هوا به صورت یک حجم کنترل در حال انبساط که جريان جرمی به آن وارد می شود و یا از آن خارج می شود، در نظر گرفته می شود. (شکل 1). فرضیات اصلی این مدل به صورت زیر می باشند [5]:

- 1- گاز داخل حجم کنترل از رفتار گاز ایده آل پیروی می کند.
- 2- ظرفیت گرمایی ویژه گاز داخل حجم کنترل ثابت در نظر گرفته می شود.
- 3- فرض می شود که هیچ گونه انتقال حرارتی بین حجم کنترل و محیط اطراف وجود ندارد (حجم کنترل بی دررو)

4- از فرض فشار و دمای یکنواخت (مدل فشار یکنواخت) استفاده می شود. با توجه به شکل 1 و فرض گاز ایده آل برای داخل کيسه هوا می توان نوشت:

$$P_2 V_2 = m_2 R T_2 \quad (1)$$

که P_2 ، m_2 ، V_2 ، T_2 به ترتيب فشار، حجم، جرم و دمای هوا در کيسه هوا هستند که مجهول اند و R ثابت مخصوص گاز است. برای به دست آوردن این چهار مجهول، نیاز به چهار معادله است. معادله اول معادله حالت (1) است. معادله دوم، معادله قانون بقای جرم می باشد. نرخ تغییر جرم در داخل حجم کنترل برابر با شار خالص جرم از مرزها است.

$$\frac{dm_2}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (2)$$

\dot{m}_{in} شار جرم ورودی به هوا و \dot{m}_{out} شار جرم خروجی از کيسه هوا هستند که با استفاده از روابط (3) و (4) بدست می آیند:

با توجه به این که دبی جرمی خروجی از دریچه ها را می توان به صورت زیر به دست آورد:

$$\dot{m}_{23} = \rho u A_{23} \quad (23)$$

با جای گذاری رابطه (21)، (22) و (23) در رابطه (8) می توان سرعت گاز خروجی از دریچه ها را به صورت رابطه (24) به دست آورد:

$$u = [2T_2 \left(\frac{kR}{k-1} \right) \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (24)$$

2-1-2- تست تانک

باید توجه کرد که معادله (5) برای به دست آوردن دبی جرمی ورودی از بادکننده، نیاز به خواص (دما و فشار) بادکننده دارد. برای به دست آوردن شرایط گازهای خروجی از بادکننده نیاز به مدل سازی احتراقی بادکننده می باشد که بسیار پیچیده است و نیاز به پارامترهای زیادی برای پیش بینی دارد [5].

روش دیگری برای بدست آوردن دبی جرمی گاز خروجی از بادکننده وجود دارد. این روش تجربی است و تست تانک نام دارد. در این تست، بادکننده به یک مخزن بسته با حجم ثابت که قبلاً تخلیه شده است وصل می شود، با انجام احتراق گاز تولید شده وارد مخزن می شود و فشار مخزن نسبت به زمان اندازه گیری می شود که برای محاسبه دبی جرمی تانک از آن استفاده می شود [5] (شکل 2).

دبی جرمی ورودی از بادکننده، با تحلیل دینامیک گازی تخلیه می گاز بادکننده به تانک انجام می شود. این تحلیل با فرض تانک به عنوان یک حجم کنترل با مرزهای ثابت که فشار و دما در کل آن یکنواخت است به دست می آید. همچنین فرض می شود که فرایند بی دررو است. با فرض گاز کامل معادله حالت برای تانک به صورت زیر نوشته می شود:

$$P_T V_T = M_T R T_T \quad (25)$$

در آن P_T ، M_T ، T_T ، V_T به ترتیب فشار، دما، جرم و حجم تانک هستند. فشار، دما و جرم هوای داخل تانک مجهول هستند. از آنجایی که حجم تانک ثابت و مشخص است، نیاز به 2 معادله دیگر علاوه بر معادله (25) برای به دست آوردن مجهولات می باشد. تغییرات جرم تانک برابر با دبی جرمی ورودی از بادکننده است.

$$\frac{dm_T}{dt} = \dot{m}_{1T} \quad (26)$$

شار جرم ورودی از بادکننده به تانک \dot{m}_{1T} است. نیاز به یک معادله دیگر برای به دست آوردن مجهولات است. برای به دست آوردن معادله دیگر از قانون اول برای فرایند بی دررو استفاده می شود (رابطه 27) [5].

$$\frac{d}{dt} (m_T c_v T_T) = c_p T_1 \dot{m}_{1T} \quad (27)$$

با استفاده از روابط (25) تا (27) دبی جرمی ورودی از بادکننده به صورت رابطه (28) به دست می آید:

$$\dot{m}_{1T} = \frac{\dot{P}_T V_T}{R k T_1} \quad (28)$$

که در آن \dot{P}_T ، V_T ، R ، k ، T_1 به ترتیب دمای بادکننده، نسبت گرمایی ویژه فشار ثابت به حجم ثابت، ثابت گازها، حجم تانک و نرخ تغییرات فشار اندازه گیری شده در تانک است. در این معادله باز هم نیاز به دمای بادکننده وجود دارد. یکی از راه های ساده به دست آوردن دمای بادکننده استفاده از رابطه (29) است [5]:

$$T_1 = \frac{V_T \bar{P}_{Te}}{k R \bar{M}_n} \quad (29)$$

به ترتیب اختلاف فشار و جرم قبل و بعد از احتراق در داخل

در روابط فوق P_e فشار خروجی از دریچه کیسه هوا است که برابر فشار اتمسفر در نظر گرفته می شود [5].

سومین معادله لازم برای به دست آوردن مجهولات با نوشتن قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل به صورت (10) به دست می آید:

$$\frac{d}{dt} (m_2 c_v T_2) = c_p T_1 \dot{m}_{in} - c_p T_2 \dot{m}_{out} - P_2 \frac{dv_2}{dt} \quad (10)$$

که c_p و c_v ظرفیت گرمایی ویژه گاز در فشار و حجم ثابت هستند. از طرفی می توان سمت چپ معادله (10) را به صورت (11) بسط داد:

$$\frac{d}{dt} (m_2 c_v T_2) = m_2 c_v \frac{dT_2}{dt} + c_v T_2 \frac{dm_2}{dt} \quad (11)$$

با ترکیب معادلات (10) و (11) با معادله (2) رابطه (12) به دست می آید:

$$\frac{1}{T_2} \dot{T}_2 = \frac{1}{m_2} (\dot{m}_{out} - \dot{m}_{in}) + \frac{k}{m_2} \left(\frac{T_1}{T_2} \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \right) - \frac{(k-1)}{V_2} \dot{V}_2 \quad (12)$$

بدین ترتیب معادله سوم به دست می آید. برای به دست آوردن تمامی مجهولات نیاز به یک معادله دیگر هست. برای به دست آوردن این معادله فرض می شود دو مرحله برای پرشدن کیسه هوا وجود دارد. در مرحله اول فشار برابر فشار اتمسفر است:

$$P_2 = P_a \quad (13)$$

با ترکیب معادلات (1)، (2)، (12) و (13) می توان معادلات حاکم بر مرحله اول را به دست آورد. تغییرات حجم کیسه هوا به صورت رابطه (14) به دست می آید [5].

$$\dot{V}_2 = \frac{R T_1 \dot{m}_{in}}{P_2} \quad (14)$$

تغییر جرم و دما در کیسه هوا به ترتیب از روابط (15) و (16) بدست می آیند:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{in} \quad (15)$$

$$T_2 = \frac{P_a V_2}{m_2 R} \quad (16)$$

فرض می شود که معادلات (13) تا (16) تا زمانی که حجم کیسه هوا به یک حجم نامی مشخص برسد صحیح می باشند. این حجم نامی (V_{20}) حجمی تعریف می شود که در آن پوشش ناپلونی کیسه هوا تا حد نهایت خود کشیده شده باشد [5]. این حجم توسط تست های تجربی روی کیسه هوا به دست می آید.

$$\dot{P}_2 = \frac{V_T \dot{P}_T - k R T_2 \dot{m}_{23} + k P_2 \Delta V}{V_2 + k P_2 C_s V_{20}} \quad (17)$$

بعد از رسیدن کیسه هوا به حجم نامی، گاز داخل کیسه هوا از دریچه ها خارج شده و حجم کیسه هوا شروع به کاهش می کند. در این قسمت مرحله دوم مدل سازی شروع می شود. طبق رابطه ای ارائه شده در مرجع [5] در این مرحله تغییرات فشار و حجم از روابط (17) و (18) به دست می آیند.

$$\dot{V}_2 = \frac{C_s V_{20} (V_T \dot{P}_T - k R T_2 \dot{m}_{23}) - V_2 \Delta V}{V_2 + k P_2 C_s V_{20}} \quad (18)$$

در این روابط C_s ضریب کشش کیسه هوا و ΔV تغییر حجم ناشی از برخورد سرشین است. تغییرات جرم در حجم کنترل به صورت زیر است:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{1T} - \dot{m}_{23} \quad (19)$$

با استفاده از روابط گاز کامل دمای حجم کنترل محاسبه می شود.

$$T_2 = \frac{P_2 V_2}{m_2 R} \quad (20)$$

با استفاده از روابط (1) تا (20) می توان حجم، دما، فشار و جرم گاز داخل کیسه هوا را در زمان های مختلف پیش بینی کرد.

دمای و چگالی گاز خروجی از دریچه با استفاده از روابط آیزنتروپیک به صورت زیر به دست می آید:

$$T_e = T_2 \left(\frac{P_e}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (21)$$

$$\rho = \frac{P_2}{R T_2} \left(\frac{P_e}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (22)$$

2-3- معادله زيست گرما و پيش بيني سوختگي

با توجه به زمان انتقال حرارت و عمق ايجاد سوختگي، انتقال حرارت به پوست توسط كيسه هوا را مي توان يك بعدي فرض كرد [4]. پوست را مي توان سه لايه مختلف با خواص ترموديناميكي و ضخامت متفاوت در نظر گرفت. ضخامت لايه ها و خواص استفاده شده در اين مقاله از مرجع [4] گرفته شده است. اين مقادير در جدول 1 آمده است. معادله انتقال حرارت حاكم بر مسأله، معادله زيست گرمای پنس [12] است (رابطه 30):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \omega_b \rho_b c_b (T_b - T) \quad (30)$$

ρ چگالي پوست، c ظرفيت گرمایی ویژه پوست، T دما، t زمان، x عمق، k ضريب هدايت حرارتي، ω_b نرخ شارش خون¹ (جريان خون در واحد جرم بافت)، ρ_b چگالي خون، c_b ظرفيت گرمایی ویژه خون و T_b دمای پایه بدن است.

با توجه به تحقيقات انجام شده توسط هنريك و موريتز و داده هاي به دست آمده مي توان واكنش سوختن پوست را يك فرايند نخي فرض كرد. يك فرايند نخي به فرايندي گفته مي شود كه مشق يك يا چند متغير مربوط به واكنش، با زمان متناسب است. با توجه به اين ايده، هنريك و موريتز معادله (31) را براي پيش بيني سوختگي پيشنهاد دادند [3]:

$$\frac{d\Omega}{dt} = G \exp\left[\frac{-\Delta E}{RT(t)}\right] \quad (31)$$

در رابطه (31)، Ω : متغير معرف واكنش سوختن است. G و ΔE ثوابتي كه از داده هاي تجربی به دست مي آيند و مقدار G ، $1/s$ و مقدار ΔE $629 \times 10^3 \text{ J/mol}$ است. T دما در عمق دلخواه پوست، R ثابت جهاني گازها، ΔE همان انرژي فعال سازي آرنیوسی است.

با انتگرال گيري از معادله (31)، معادله (32) به دست مي آيد.

$$\Omega = G \int_0^t \exp\left[\frac{-\Delta E}{RT(t)}\right] dt \quad (32)$$

براي پيش بيني عمق سوختگي در يك بازه زماني مشخص، دما نسبت به زمان در $T(t)$ در يك عمق دلخواه را با حل معادله زيست گرما با روش تفاضل محدود، به دست آمده و با قرار دادن در معادله (32)، Ω محاسبه مي شود. اگر در عمق مورد نظر Ω برابر با يك باشد سوختگي در عمق مورد نظر رخ داده است.

3- مراحل شبیه سازي سوختگي و اعتبارسنجي

در اين قسمت مراحل شبیه سازي دو نوع سوختگي ذكر شده در بخش هاي پيشين بيان شده و اعتبارسنجي براي قسمت هاي مختلف انجام شده است.

3-1- شبیه سازي سوختگي هاي ناشي از تماس مستقيم با كيسه هوا

در اين قسمت سوختگي هاي ناشي از تماس مستقيم با كيسه هوا شبیه سازي شده است. براي اعتبارسنجي نتايج با نتايج عددي و تجربی مقايسه شده است. در انتها براي بررسي نقش جنس كيسه هوا در ايجاد سوختگي مدل سازي موردی انجام شده است.

براي مدل سازي رياضي، پوست به عنوان يك جسم با سه لايه اپيدرم يا لايه سطحی، درم يا لايه میانی، وهايپودرم يا لايه زیرین با خواص فيزيکی متفاوت در لايه هاي مختلف در نظر گرفته شده و كيسه هوا كه در تماس با سطح خارجي پوست است به عنوان يك لايه اضافی با ضخامت 1 ميلي متر [9] در نظر گرفته مي شود. بعد از حل معادله زيست گرما و به دست آوردن توزيع دما در عمق هاي مختلف، توزيع دما در تابع پيش بيني سوختگي Ω جايبگذاري شده و مقدار Ω براي زمان هاي مختلف در عمق هاي مختلف به دست مي آيد.

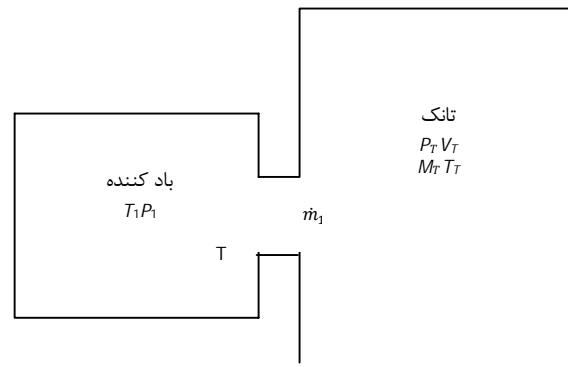
بادكننده (علت تغيير جرم، خارج شدن جرم از بادكننده است) هستند. با توجه به روابط (25) تا (28) براي به دست آوردن دبي جرمی ورودی از بادكننده نياز به تغييرات فشار تانك در حين تست تانك است. تغييرات فشار تانك به صورت نمودارهاي تجربی براساس زمان توسط سازندگان بادكننده ارائه مي شوند. نمودار استفاده شده در اين مقاله از مرجع [4] گرفته شده است.

2-2- معادلات حاكم بر جريان جت گاز خروجی از دريچه كيسه هوا و روش شبیه سازي

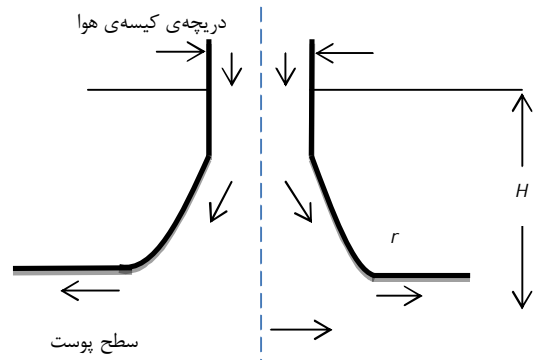
براي به دست آوردن ضريب انتقال حرارت گاز خروجی از دريچه هاي كيسه هوا، نياز به مدل سازي انتقال حرارت جت گاز خروجی از كيسه هوا است. مسأله جت گاز خروجی از يك دريچه كه به صورت عمودي به يك صفحه برخورد مي كند به علت کاربرد زياد در مسائل مهندسی هم به صورت عددي و هم به صورت تجربی بسيار مورد مطالعه قرار گرفته است. کاربرد بيشتري اين مسأله به علت نرخ زياد انتقال حرارت از جت گاز در انتقال حرارت مي باشد [11].

جت گاز خروجی از كيسه هوا يك جريان سيال تراكم پذير است كه به يك صفحه برخورد مي كند (شكل 3). H فاصله دريچه كيسه هوا از پوست است. D قطر دريچه و r فاصله از محور جت است. سرعت گاز خروجی از دريچه بسيار بالاست (280 تا 300 متر بر ثانيه) در نتيجه عدد ماخ (سرعت گاز به سرعت صوت) بالای 0/8 است و جريان سيال تراكم پذير است.

معادلات حاكم بر جريان يك سيال تراكم پذير لزج توسط معادله بقای انرژي، معادله پيوستگي و معادله بقای مومنتم بيان مي شوند [10]. معادلات فوق با استفاده از نرم افزار فلوئنت و مدل توربولانسی SST-k ω حل شده اند. علت استفاده از اين مدل توربولانسی توانایی اين مدل در پيش بيني گردابه هاي جريان و رفتار جريان نزديك ديوار است [11].



شكل 2 تست تانك



شكل 3 جت گاز خروجی از دريچه كيسه هوا

1- Blood Perfusion rate

ثانيه به دست آمده است. شرايط مرزي رسانش در کيسه هوا در شکل 6 نشان داده شده است. با توجه به شکل 6 شرط مرزي دما ثابت اول برابر با دمای گاز داخل کيسه هوا است که به صورت اختياري 250 درجه سلسيوس در نظر گرفته شده است و شرط مرزي دما ثابت دوم برابر با دمای محيط که 25 درجه سلسيوس است در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل 7 دما در ضخامت کمی از کيسه هوا دارای تغيير است. اين نکته نيز قابل ذکر است که بعد از حداکثر 60 ميلي ثانيه کيسه ي هوا به سرنشين برخورد می کند و فرصتي برای تعادل حرارتي وجود ندارد [4]. از اين رو در اين مقاله، شرط اوليه کيسه هوا برابر با 25 درجه سلسيوس در نظر گرفته می شود.

برای اعتبارسنجی نتايج پيش بينی سوختگی انجام شده در کار حاضر برای برخورد با جسم داغ با نتايج تجربی هنريک و موريتز [3] مقايسه شده است. هنريک و موريتز [3] با تماس دادن اجسام داغ با پوست خوک و انسان دمای لازم برای ايجاد سوختگی را در دماهاي مختلف بررسي کرده اند. برای اعتبارسنجی معادله زیست گرمای پنس برای شرايط آزمایش های تجربی مرجع [3] حل شده و با قرار دادن توزیع دما در سطح مشترک لایه میانی و سطحی پوست در تابع آسیب حرارتي امگا لازم برای رسیدن امگا به 1 به دست آمده است. نتايج کار حاضر در شکل 8 با نتايج تجربی مرجع [3] مقايسه شده اند. همان طور که مشخص است در زمان های پایین خطا بالای 50 درصد است. علت اصلی این امر پاسخگو نبودن فرض انتقال حرارت فوريه ای در زمان های پایین تخمین زده می شود. روند نمودارها تقريباً یکسان است.

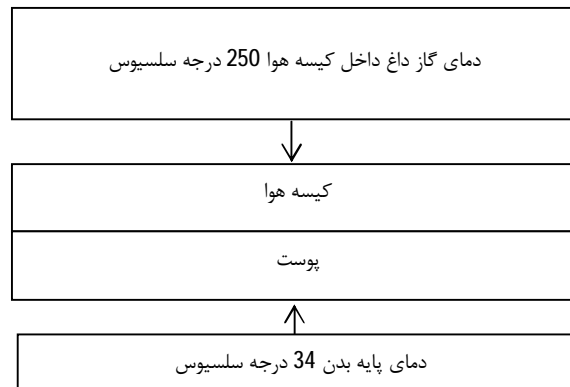
برای بررسي اثرجنس کيسه هوا در ايجاد سوختگی، سه جنس مختلف PA46 (پلی آمید 46)، PA66 (پلی آمید 66)، PET (پلی استر) در نظر گرفته می شود. خواص ترمودینامیکی و حرارتي این سه جنس در جدول 2 ارائه شده است. با استفاده از روش شرح داده شده در قسمت قبل توزیع دما در لایه های مختلف پوست برای زمان 4 ثانيه و سه جنس مختلف کيسه هوا به دست آمده در نمودار شکل 9 قابل مشاهده است. دما برای PA66 و PA46 نزدیک است ولی برای PET بسیار پایین تر است. با قرار دادن توزیع دما در تابع پيش بينی سوختگی عمق از بین رفتن پوست در زمان های مختلف بررسي شده است. عمقی که در آن Ω برابر یک است به عنوان عمقی که در آن بافت از بین می رود در نظر گرفته شده است. نتايج در جدول 3 ارائه شده است.

با توجه به نتايج جدول 3، جنس های PA46، PA66 و PET به ترتیب در زمان کمتری باعث ايجاد سوختگی می شوند. بنابراین اگر ايجاد سوختگی پارامتر اصلی برای انتخاب کيسه هوا باشد، بهتر است از پلی استر استفاده شود زیرا با توجه به نتايج، در کمتر از 4 ثانيه هیچ گونه سوختگی توسط این نوع کيسه هوا ايجاد نمی شود و بدترین جنس مورد استفاده پلی آمید 66 است. زیرا در کمتر از 2 ثانيه موجب ايجاد سوختگی خواهد شد. البته قابل ذکر است که به دلیل به صرفه بودن اقتصادی اکثر کيسه های هوا از پلی آمید 66 ساخته شده اند [13]

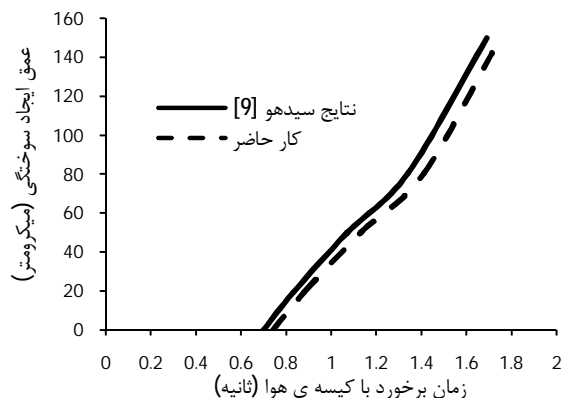
طبق نتايج به دست آمده در این بخش زمان لازم برای گرم شدن کيسه هوا و انتقال گرما به پوست که سبب ايجاد سوختگی می شود، حدود دو ثانيه است. در صورت عملکرد صحیح، باید کيسه هوا در کمتر از یک ثانيه تخلیه شده و در تماس با سرنشين نباشد. به دلیل زمان کم فرایند تخلیه، کيسه هوا گرم نمی شود در نتیجه سوختگی ايجاد نخواهد شد. اما اگر در اثر عملکرد نامناسب زمان تخلیه طولانی تر شود کيسه هوا داغ می شود و امکان ايجاد سوختگی های درجه ی اول و دوم برای سرنشين که در تماس با آن است، وجود دارد.

جدول 1 خواص ترمودینامیکی مربوط به لایه های مختلف پوست

خواص ترمودینامیکی	لایه سطحی	لایه میانی	لایه زیرین
K (ضریب هدایت)	0/22	0/4	0/2
c (ظرفیت گرمایی ویژه)	3/6	3/6	2/5
ρ (چگالی)	1200	1200	1000
ω (نرخ شارش خون)	0	0/00125	0/00125
واحد کمیت	W/m°C	kJ/kg°C	kg/m³
	1/s		



شکل 4 شرايط مرزي اعمال شده برای حل معادله زیست گرما در پيش بينی سوختگی ناشی از تماس مسقیم



شکل 5 مقايسه ی عمق ايجاد سوختگی در اثر برخورد با کيسه ي هوا با مرجع [9]

ابتدا برای اعتبارسنجی، مسأله با شرايط مرزي ارائه شده در مرجع [9] حل می شود. شرايط مرزي این مرجع در شکل 4 نشان داده شده است (ابطه 33).

$$T(x, 0) = \begin{cases} \frac{(34 - T_g)x}{A} + 34, & -A < x < 0 \\ 34, & 0 < x < L \end{cases} \quad (33)$$

در مرجع [9] فرض شده است که دمای اوليه کيسه هوا به صورت خطی از دمای گاز در داخل کيسه تا دمای بدن در سطح پوست تغيير می کند. علت این فرض، به صورت دقیق توضیح داده نشده است. A ضخامت کيسه هوا، x عمق پوست، T_g دمای گاز داغ داخل کيسه هوا است. در شکل 5 عمق ايجاد سوختگی، با نتايج عددی به دست آمده توسط سیدهو [9] مقايسه شده است. همان طور که از شکل مشخص است، نتايج روند یکسانی دارند ولی زمان پيش بينی شده برای سوختگی در کار حاضر اندکی بیشتر است.

دمای پایه بدن در اکثر مراجع 37 درجه سلسيوس در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن، شرط اوليه ارائه شده در مرجع [9] برای کيسه هوا (معادله 33)، درست به نظر نمی رسد، برای اثبات این موضوع فرض شده است که از زمان باز شدن کيسه هوا تا برخورد با سرنشين یک ثانيه طول می کشد. با حل معادله رسانش در کيسه ي هوا به ضخامت 1 ميلي متر توزیع دما بعد از 1

جدول 2 خواص جنس هاي مختلف كيسه هوا [13]

PET	PA46	PA66	واحد كميته	خاصيت ترموديناميكي
0/2	0/4	0/22	W/m-K	K (ضريب انتقال حرارت جابجايي)
2/5	3/6	3/6	kJ/kg-K	C (ظرفيت گرمائي ويژه)
1000	1200	1200	kg/m ³	ρ (چگالي)

جدول 3 عمق ايجاد سوختگي در زمان هاي مختلف براي جنس هاي مختلف (ميكرومتر)

PET	PA46	PA66	جنس كيسه هوا
سوختگي	سوختگي	10	عمق ايجاد سوختگي (ميكرومتر) در 2 ثانيه
ايجاد نمي شود	ايجاد نمي شود	110	عمق ايجاد سوختگي (ميكرومتر) در 3 ثانيه
سوختگي ايجاد نمي شود	90	350	عمق ايجاد سوختگي (ميكرومتر) در 4 ثانيه
70	300		

سوختگي هاي ناشي از تماس مستقيم با كيسه هوا براي جنس هاي مختلف كيسه هوا بررسي شد. طبق نتايج به دست آمده، اگر سرنشينين بيشتر از دو ثانيه با كيسه هوا تماس داشته باشد احتمال ايجاد سوختگي و از بين رفتن بافت پوست تا عمق 350 ميكرومتر وجود دارد. بيشترين جنس مورد استفاده (PA66)، بيشتر از جنس هاي ديگر كيسه هوا باعث ايجاد سوختگي مي شود. كمترين ايجاد سوختگي مربوط به PET است كه به دليل گران بودن كمتر مورد استفاده قرار مي گيرد [14].

3-2- شبیه سازی سوختگی های ناشی از برخورد با گاز خروجی از دریچه ها

در این قسمت یک مطالعه موردی برای پیش بینی سوختگی توسط جت گاز خروجی از كيسه هوا، مدل سازی شده است. هدف از این مرحله، مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج مرجع [4] است. در نهایت نتایج با نتایج تجربی مقایسه شده است.

3-2-1- شبیه سازی دینامیک گازی

برای شبیه سازی دینامیک گازی، داده های مربوط به تست تانک مورد نیاز می باشد [4]. داده مورد نیاز، تغییرات فشار تانک نسبت به زمان است. نمودارهای تست تانک، توسط سازندگان بادکننده ها به دست می آیند. نمودار تست تانک استفاده شده در این مقاله از مرجع [4] گرفته شده است (شکل 10).

داده های دیگر مورد نیاز برای شبیه سازی دینامیک گازی، مشخصه های

مربوط به كيسه هوا هستند كه به صورت زیر در نظر گرفته شده اند:

1- حجم نامی كيسه هوا برابر 60 لیتر در نظر گرفته شده است.

2- ضریب کشش كيسه هوا c_s ، صفر در نظر گرفته شده است.

3- تغییر حجم مربوط به برخورد سرنشينين صفر در نظر گرفته شده است.

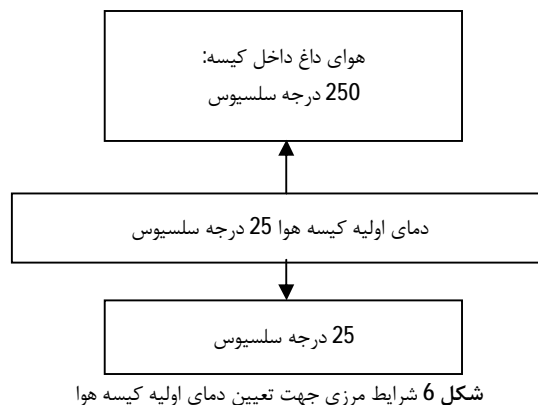
4- هیچ گونه نشستی از كيسه هوا وجود ندارد. (در نتیجه گاز فقط از دریچه های تعبیه شده خارج می شود)

5- كيسه هوا دارای دو دریچه با قطر 35 میلی متر برای خروج گاز است.

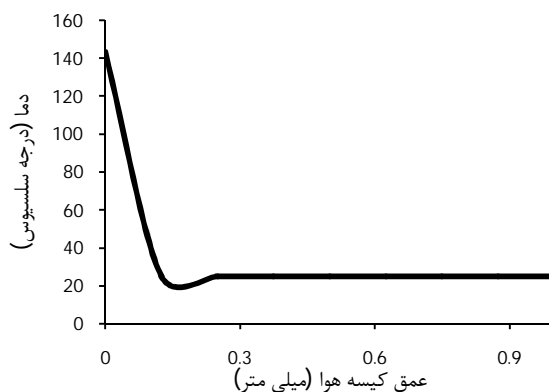
6- ضریب سطح دریچه A_{23} در معادله 0/6 در نظر گرفته می شود.

7- گاز تولید شده نیتروژن است.

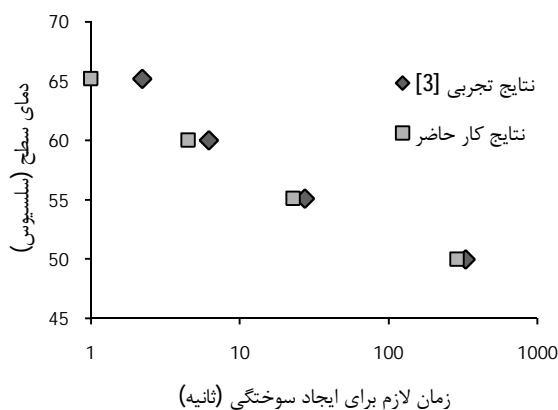
با توجه به داده های ارائه شده و در نظر گرفتن 800 کلون برای دمای بادکننده، با استفاده از مدل دینامیک گازی معرفی شده در بخش 2-2 سرعت و دمای گاز خروجی از دریچه ها محاسبه شده است. نتایج در شکل های 11 و 12 نشان داده شده است. همان طور كه مشاهده می شود نتایج همخوانی خوبی با نتایج مرجع [4] دارند. پس از رسیدن به حجم نامی، دریچه ها باز می شود و گاز داغ از دریچه ها خارج می شود.



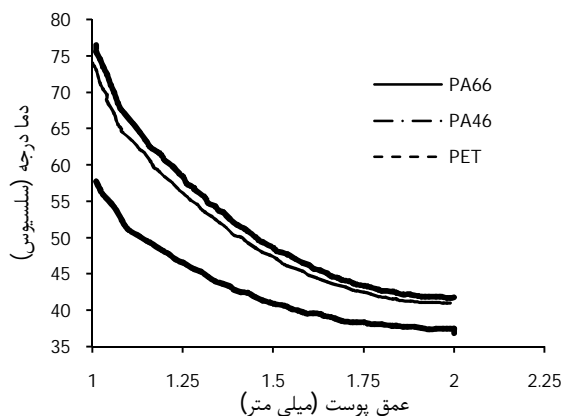
شکل 6 شرایط مرزی جهت تعیین دمای اولیه كيسه هوا



شکل 7 توزیع دمای اولیه در ضخامت كيسه هوا



شکل 8 زمان لازم برای ايجاد سوختگي بر حسب دمای سطح جسم داغ



شکل 9 نمودار توزیع دما در اعماق مختلف پوست با دمای گاز 250 درجه سلسیوس برای جنس های مختلف

صرفه جويي محاسبات براي يک چهارم انجام شده است) شبیه سازی شده است. سرعت جت گاز با توجه به محاسبات انجام شده در قسمت قبل، 278 متر بر ثانيه و دمای آن 778 کلوين در نظر گرفته شده است. حل مستقل از شبکه با 100000 سلول محاسباتي انجام شده است. علت بیشینه بودن ضريب انتقال حرارت زیر جت ها [6] نمودار ضريب انتقال حرارت (روی دیوار پایینی که جت به آن برخورد می کند روی محور تقارن موازی محور x) در شکل 14 رسم شده است.

همان طور که مشاهده می شود در شکل 14 ضريب انتقال حرارت بیشینه $1200 \text{ W/m}^2\text{K}$ است. در مرجع [4] برای محاسبه بیشینه ضريب انتقال حرارت از فرمول تجربی ارائه شده توسط مارتین [6] استفاده شده است. مقدار به دست آمده برای سرعت و دمای ذکر شده در مرجع [4] $312 \text{ W/m}^2\text{K}$ است که با مقدار به دست آمده در این مقاله تفاوت زیادی دارد. در مقاله دیگری که توسط رید و اشنايدر چاپ شده است [8]، به اشتباه بودن روش مرجع [4] برای محاسبه ضريب انتقال حرارت اشاره شده است. ولی روشی برای محاسبه ضريب انتقال حرارت ارائه نشده است. در مرجع [8] برای ضريب انتقال حرارت چند مقدار اختیاری در نظر گرفته شده است.

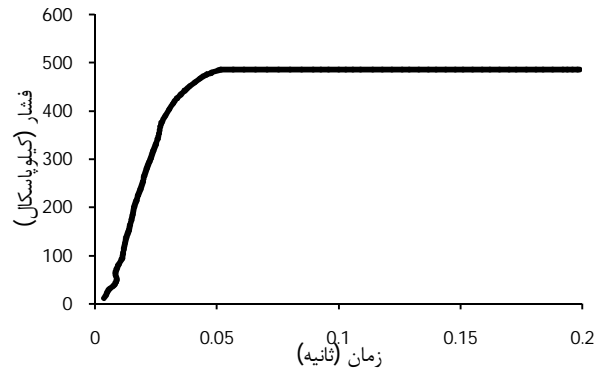
3-2-3- حل معادله زیست گرما

معادله زیست گرمای فوریهای پنس با شرط مرزی جابجایی، با در نظر گرفتن ضريب انتقال حرارت (مقدار بیشینه) به دست آمده در مرحله قبل حل شده و توزیع دما به دست آمده است. طبق نتایج به دست آمده توسط شبیه سازی دینامیک گازی (شکل 12)، فرایند پشدن و خالی شدن کيسه هوا، فقط 120 میلی ثانیه طول می کشد، در نتیجه محاسبات برای 120 میلی ثانیه انجام می شود.

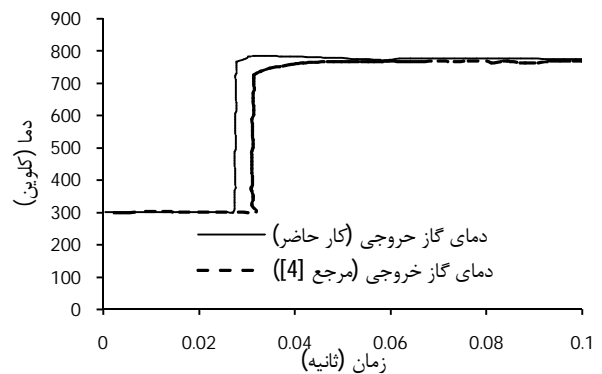
در مرجع [4] برای انتقال حرارت به پوست دو مرحله در نظر گرفته شده است. در مرحله اول جت گاز خروجی از دریچه کيسه هوا با پوست برخورد می کند، در مرحله دوم گاز با پوست برخورد نمی کند و پوست توسط هوا خنک می شود. مرحله اول 120 میلی ثانیه و مرحله دوم 0/5 ثانیه در نظر گرفته شده و امگا برای هر کدام محاسبه شده است. در مرحله اول امگا برابر 0/5 است ولی با نظر گرفتن مرحله دوم امگا برابر 5/5 می شود، در نتیجه سوختگی رخ می دهد.

در کار حاضر با فرض ضريب انتقال حرارت $1200 \text{ W/m}^2\text{K}$ (در مرحله ی قبلی به دست آمده است) توزیع دما به دست آمده، نتایج در شکل 15 نشان داده شده است. در شکل 15 نتایج توزیع دما در عمق های مختلف نشان داده شده است. ولی با در نظر گرفتن ضريب انتقال حرارت $1200 \text{ W/m}^2\text{K}$ نتایج بسیار متفاوتی برای توزیع دما در سطح مشترک لایه ی سطحی و میانی نتیجه می شود. نتایج در دو مرحله انتقال حرارت نشان داده شده اند. با محاسبه تابع امگا مشاهده می شود که در همان مرحله اول، امگا مقدار بیشتر از یک (5/96) دارد، در نتیجه سوختگی ایجاد می شود در نتیجه نیازی به حل فاز دوم برای پیش بینی سوختگی نیست.

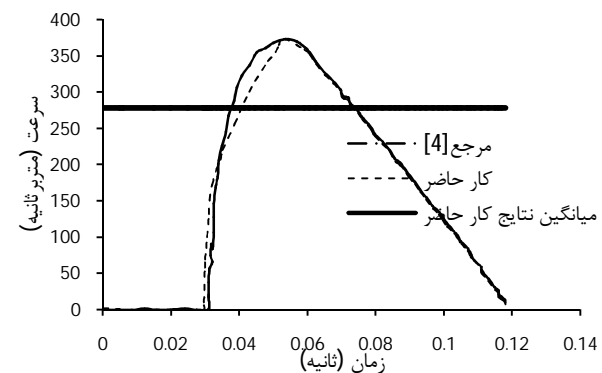
در کار انجام شده توسط رید و اشنايدر [4] تنها برای این مورد سوختگی بررسی شده است. همان طور که توضیح داده شد، نتایج رید و اشنايدر با توجه به محاسبات مربوط به انتقال حرارت جت گاز منطقی نیست. از طرف دیگر دمای 800 کلوين برای بادکننده بسیار زیاد است. در حال حاضر دمای بادکننده ها 500 کلوين در نظر گرفته شده است [9]. در قسمت بعدی با در نظر گرفتن دمای 500 کلوين برای بادکننده نقش پارامترهای مختلف در عمق ایجاد سوختگی بررسی می شود.



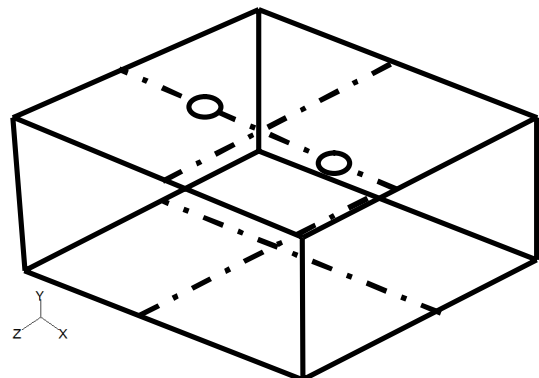
شکل 10 فشار تانک در تست تانک



شکل 11 توزیع دمای گاز خروجی از دریچه های کيسه هوا نسبت به زمان



شکل 12 توزیع سرعت گاز خروجی از دریچه های کيسه ی هوا نسبت به زمان



شکل 13 شبیه سازی جت گاز در فلونت

3-2-2- محاسبه ضريب انتقال حرارت

برای به دست آوردن ضريب انتقال حرارت جابجایی با استفاده از نرم افزار فلونت دو جت گاز (شکل 13) که روی یک دیوار بی دررو قرار گرفته اند (برای

3-2-4- مقايسه با نتايج تجربي

براي اعتبارسنجي نتايج پيش بيني سوختگي ناشي از برخورد با جت گاز داغ از نتايج تجربي ريد [4] استفاده شده است. يك جت با قطر 10 ميلي متر و فاصله بي بعد شده صفحه تا جت (H/D) 6 و سرعت 80 متر بر ثانيه و دماي 550 درجه سلسيوس شبیه سازي شده است.

با توجه به نتايج شبیه سازي هاي انجام شده، ضريب انتقال حرارت جابجايي روي پوست با ضريب انتقال حرارت فوق توزیع دما نسبت به زمان در سطح مشترک لایه میانی و سطحی به دست می آید. با حل معادله زیست گرما با شرط مرزی جابجایی روی پوست با ضريب انتقال حرارت فوق توزیع دما نسبت به زمان در سطح مشترک لایه میانی و سطحی به دست آمده و زمان لازم برای رسیدن امگا به 1 محاسبه شده است. این کار برای دماهای مختلف انجام شده و نتايج با نتايج تجربي ريد و اشنايدر مقايسه شده است. طبق شکل 16 نتايج حدود 20 ميلي ثانيه با نتايج تجربي تفاوت دارند، با توجه به مقايسه اي که با نتايج عددي ريد و اشنايدر [4] و نتايج تجربي [4] انجام شده است. نتايج کار حاضر منطقي تر به نظر مي رسد.

4- بررسي نقش پارامترهاي مختلف در ايجاد سوختگي

در اين قسمت نقش پارامترهاي مختلف برای کيسه هوا با مشخصات ارائه شده در قسمت قبل بررسي شده است. اولين پارامتر مورد بررسي، تعداد دريچه هاي کيسه هوا است. پارامتر بعدي قطر دريچه ها و فاصله کيسه هوا است. قابل ذکر است که تعداد دريچه ها و قطر آنها در سرعت گاز خروجي تأثير زيادي دارند. از اين رو شبیه سازي دينامیک گازی برای به دست آوردن اين پارامترها انجام شده است که نتايج آن در جدول 4 ارائه شده است. در محاسبات انجام شده دماي گاز خروجي نیز محاسبه شده است که با تغيير قطر دريچه تفاوت زيادي در دماي گاز خروجي ايجاد نمی شود و دما 470 کلوين در نظر گرفته می شود.

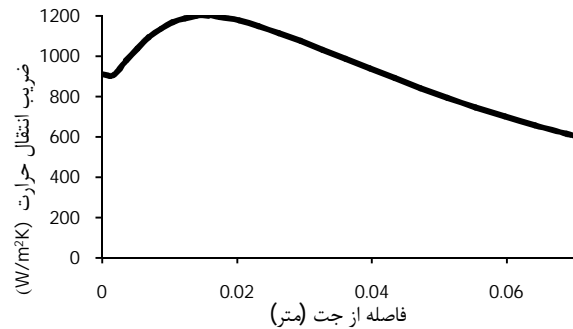
4-1- بررسي نقش قطر

براي بررسي نقش قطر دريچه هاي کيسه هوا 3 قطر مختلف برای یک دريچه در نظر گرفته شده است. برای بررسي نقش قطر دريچه هاي کيسه هوا 3 قطر مختلف برای یک دريچه در نظر گرفته شده است. ضرايب انتقال حرارت جت گاز برای این سه قطر محاسبه شده اند. فاصله H/D شکل 3 برابر 7/5 در نظر گرفته شده است [4]. با افزایش قطر ضريب انتقال حرارت کاهش می يابد [11]. اين نتيجه در شکل 17 نشان داده شده است. (پارامترهاي r و D در شکل 3 مشخص شده اند) در شکل 18 توزيع دما در سطح مشترک لایه میانی و سطحی نسبت به زمان برای 3 حالت نشان داده شده است. دما با افزایش قطر کاهش می يابد.

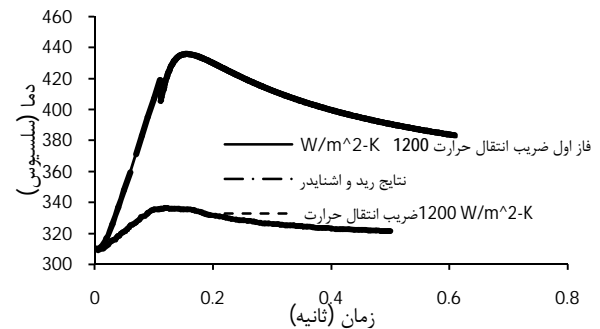
در شکل 19 عمق ايجاد سوختگي برای قطرهاي مختلف بررسي شده است. با توجه به اين شکل عمق ايجاد سوختگي با افزایش قطر کاهش پیدا می کند. تفاوت بين نتايج مربوط به قطرهاي 35 و 45 ميلي متر کمتر است. اين احتمالاً به علت تفاوت کمتر سرعت جت در اين دو مورد است. عمق ايجاد سوختگي بين 150 میکرومتر و 200 میکرومتر تغيير می کند، اين نشان می دهد که کل لایه سطحی از بين رفته و سوختگي تا عمق زيادي از لایه میانی پيش رفته است.

4-2- بررسي نقش تعداد دريچه ها

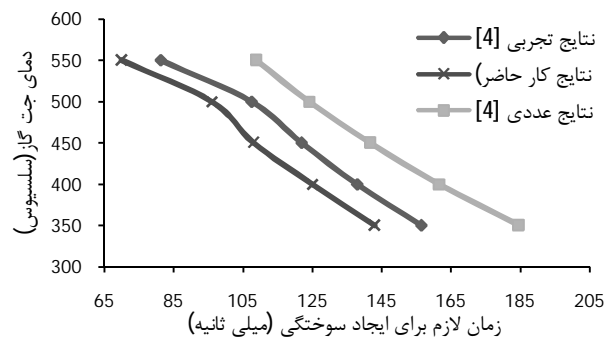
در اين بخش نقش تعداد دريچه ها در ايجاد سوختگي بررسي شده است. به اين منظور تعداد یک، دو و سه دريچه با قطر 35 ميلي متر و فاصله H/D ، 7/5 شبیه سازي شده اند [4].



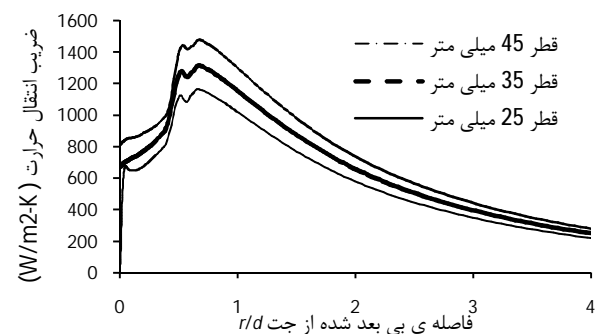
شکل 14 ضريب انتقال حرارت جابجايي دو جت گاز



شکل 15 مقايسه توزيع دما در لايه هاي مختلف پوست با مرجع [4]



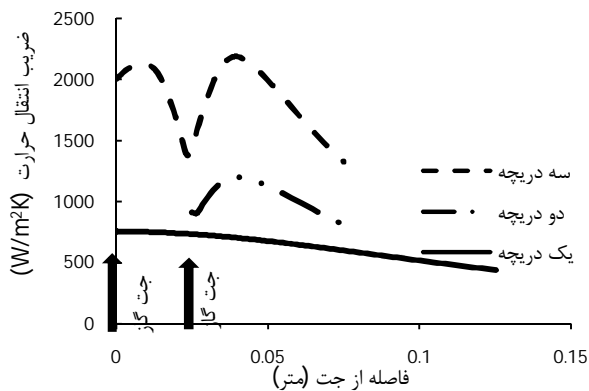
شکل 16 زمان لازم برای ايجاد سوختگي در دماي مختلف جت هوا



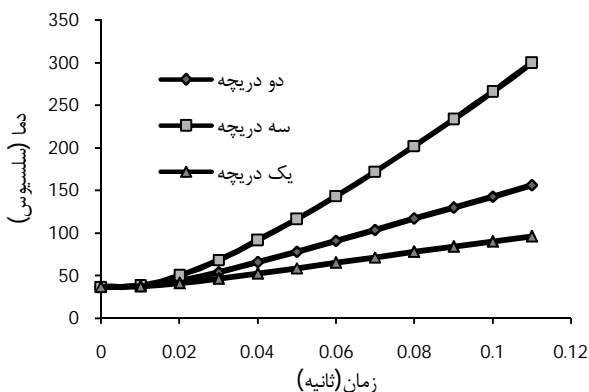
شکل 17 ضريب انتقال حرارت برای قطرهاي مختلف جت گاز

جدول 4 سرعت گاز خروجي از دريچه

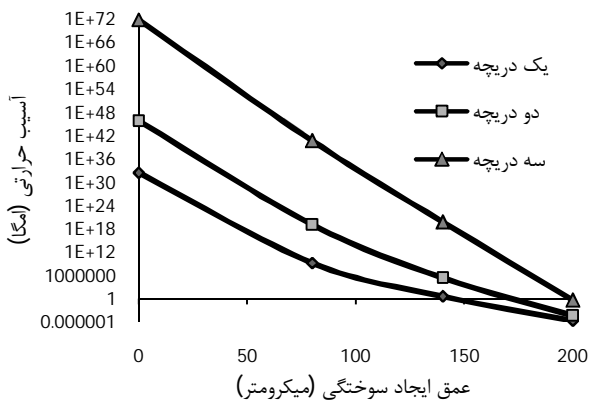
قطر دريچه	تعداد دريچه	سرعت (متر بر ثانيه)
25 ميلي متر	1	371
35 ميلي متر	1	350/5
40 ميلي متر	1	336/72
45 ميلي متر	1	320/43
35 ميلي متر	2	278
35 ميلي متر	3	230/8



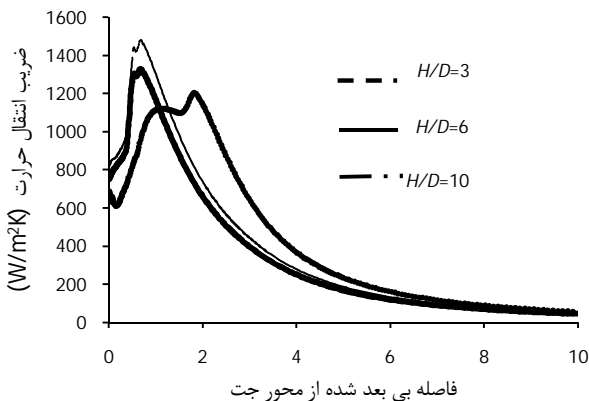
شکل 21 ضریب انتقال حرارت برای تعداد درپچه های مختلف



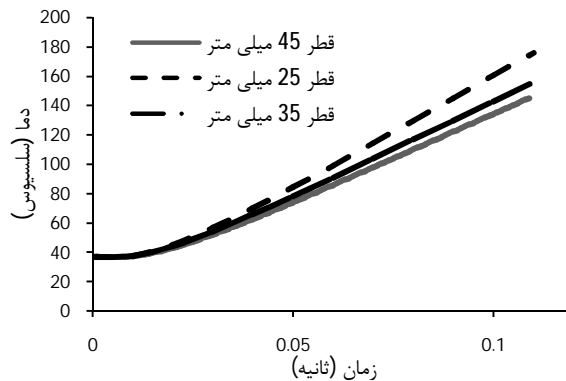
شکل 22 توزیع دما در سطح مشترک لایه میانی و سطحی برای تعداد درپچه های مختلف



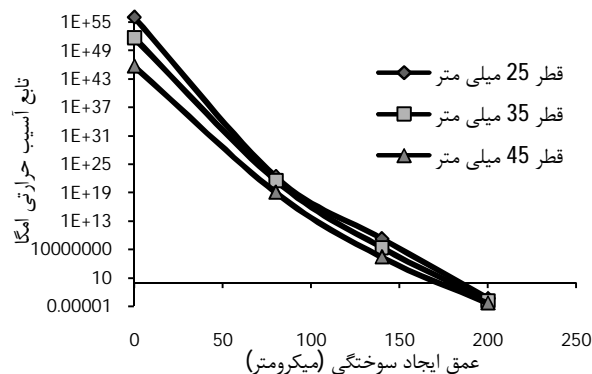
شکل 23 مقدار تابع آسیب حرارتی برای تعداد درپچه های مختلف



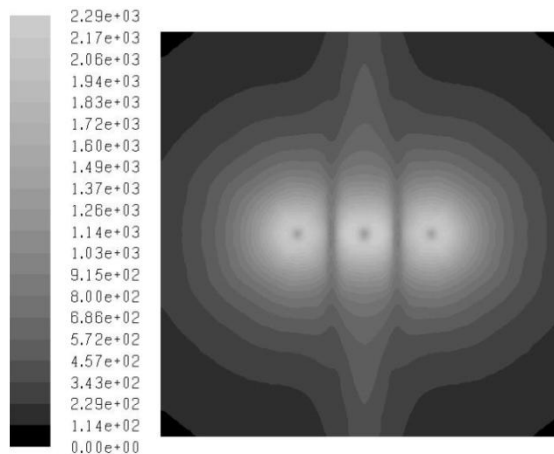
شکل 24 ضرایب انتقال حرارت برای فاصله های مختلف درپچه تا پوست



شکل 18 دما در سطح مشترک لایه میانی و سطحی برای قطرهای مختلف جت گاز



شکل 19 عمق ایجاد سوختگی در اثر برخورد جت گاز با قطرهای مختلف



شکل 20 کانتور ضریب انتقال حرارت برای سه درپچه (W/m²K)

نتایج کانتور ضریب انتقال حرارت برای سه درپچه در شکل 20 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، بیشترین ضریب انتقال حرارت در زیر جت ها است. همچنین تقابل بین جت ها باعث افزایش بیشتر ضریب انتقال حرارت می شود [11].

در شکل 21 ضریب انتقال حرارت جابجایی برای تعداد درپچه های مختلف در روی صفحه نشان داده شده است. با توجه به نمودار با افزایش تعداد درپچه افزایش زیادی در ضریب انتقال حرارت ایجاد می شود. در شکل 22 توزیع دما در سطح مشترک لایه میانی و سطحی نسبت به زمان برای 3 حالت نشان داده شده است. با افزایش تعداد درپچه دما افزایش می یابد و با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل 23 عمق ایجاد سوختگی هم زیاد می شود. با در نظر گرفتن 3 درپچه 200 میکرومتر از بافت پوست از بین می رود که مقدار خیلی زیادی است.

سوختگی های ناشی از تماس مستقیم با کیسه هوا برای جنس های مختلف کیسه هوا بررسی شد. طبق نتایج به دست آمده، اگر سرنشین بیشتر از دو ثانیه با کیسه هوا تماس داشته باشد احتمال ایجاد سوختگی و از بین رفتن بافت پوست تا عمق 350 میکرومتر وجود دارد. بیشترین جنس مورد استفاده (PA66)، بیشتر از جنس های دیگر کیسه هوا باعث ایجاد سوختگی می شود. کمترین ایجاد سوختگی مربوط به PET است که به دلیل گران بودن کمتر مورد استفاده قرار می گیرد [14].

در قسمت بعدی مطالعه موردی انجام شده در مرجع [4] برای سوختگی های ناشی از برخورد گاز خروجی از دریچه ها انجام شد. تفاوت زیادی میان نتایج وجود داشت. اختلاف اصلی در ضریب انتقال حرارت جت گاز بود. طبق بررسی انجام شده ضریب انتقال حرارت به دست آمده در مرجع [4] کاملاً اشتباه است و در نتیجه، نتایج پیش بینی به دست آمده در مرجع [4] صحیح نیستند. طبق نتایج به دست آمده (بر خلاف نتایج به دست آمده در مرجع [4]) جت گاز در همان زمان خالی شدن کیسه هوا باعث ایجاد سوختگی می شود. طبق نتایج موجود دمای بادکننده کمتر از مقدار مورد استفاده در مرجع 4 است. از این رو با دمای بادکننده 500 کلوین و سرعت های به دست آمده از شبیه سازی دینامیک گازی کیسه هوا، مراحل پیش بینی سوختگی برای قطره های مختلف دریچه کیسه هوا انجام شد. طبق نتایج به دست آمده با افزایش قطر میزان سوختگی کاهش پیدا می کند. البته احتمال ایجاد سوختگی در مساحت بیشتری از پوست وجود دارد. از این رو افزایش قطر به مقدار زیاد صحیح به نظر نمی رسد.

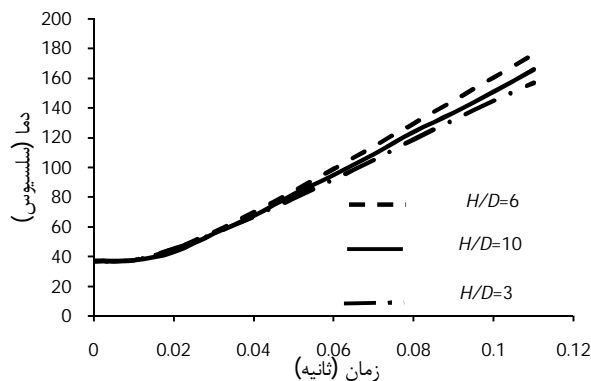
در مرحله بعدی اثر تعداد دریچه ها بررسی شد. افزایش تعداد دریچه ها باعث سریع تر تخلیه شدن کیسه هوا می شوند. از این رو سرنشین کمتر در معرض جت گاز است. ولی با افزایش تعداد دریچه ها ضریب انتقال حرارت جت گاز به شدت افزایش می یابد، همچنین مساحت برخورد افزایش می یابد از این رو تعداد دریچه کمتر، بهتر به نظر می رسد.

در مرحله بعدی فاصله سرنشین تا کیسه هوا مورد بررسی قرار گرفت. افزایش فاصله تا یک مقدار باعث افزایش عمق سوختگی و بعد از آن باعث کاهش آن می شود. البته باید توجه کرد فاصله دریچه تا سرنشین پارامتر قابل کنترلی در طراحی نیست. زیرا در تصادف امکان قرار گرفتن سرنشین در مقابل دریچه به هر نوعی وجود دارد.

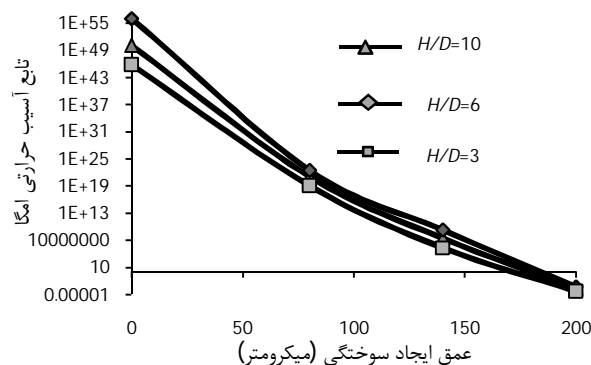
در مقایسه بین دو نوع سوختگی ناشی از کیسه هوا، امکان ایجاد سوختگی ناشی از تماس مستقیم کمتر است. همچنین در زمان برخورد برابر، شدت ایجاد سوختگی توسط جت گاز خیلی بیشتر است.

6- مراجع

- [1] A.M. Baruchin, On burn injuries related to airbag deployment, *burns*, Vol. 25, pp. 49-52, 1999.
- [2] Zeeshan, The unassuming danger of car airbags, *Injury Extra*, Vol. 42, pp. 69-70, 2011.
- [3] F.C.Henriques, Studies of Thermal Injury. V. The predictability and the significance of thermally induced rate processes leading to irreversible epidermal injury, *Archives of Pathology*, Vol. 43, pp. 489-502, 1947.
- [4] M. P. Reed, Lawrence.W.Schneider, Skin burns from airbag exhaust gaz: Laboratory experiments and mathematical modeling, Final report, *UMTRI 94-24*, university of Michigan. 1994.
- [5] J. T. WANG, D. J. Nefske, A new CAL3D Airbag Inflation Model, *International Congress and Exposition, SAE 880654*, Detroit. 1988.
- [6] H. Martin, Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces, *Advances in Heat Transfer*, Vol. 13, pp. 1-60, 1977.
- [7] M. P. Reed, J. D. Rupp, S. J. Reed and L. W.Schneider, Development of an improved Airbag-Induced Thermal Skin Burn Model, *SAE International Congress and Exposition Detroit*, Michigan, March 1-4, 1999.



شکل 25 توزیع دما در سطح مشترک لایه میانی و سطحی برای فاصله های مختلف دریچه تا پوست



شکل 26 عمق ایجاد سوختگی برای فاصله های مختلف دریچه از پوست

4-3- بررسی نقش فاصله کیسه هوا از سرنشین

برای بررسی تأثیر فاصله سرنشین با کیسه هوا، یک جت گاز با قطر 35 میلی متر و فاصله 3، 6، 10 برابر قطر دریچه از پوست، با سرعت 350 متر بر ثانیه و دمای 532 کلوین شبیه سازی شده و نتایج ضریب انتقال حرارت روی پوست، با هم مقایسه شده اند. نتایج ضرایب انتقال حرارت در شکل 24 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش فاصله از 3 به 6 ضریب انتقال حرارت افزایش یافته است ولی با افزایش فاصله از 6 به 10 کاهش یافته است. طبق نتایج تجربی مارتین [11]، در اعداد رینولدز بالا تأثیر افزایش فاصله را نمی توان پیش بینی کرد و نتایج مشابه نتایج مارتین در کار حاضر نیز مشاهده می شود. در این مورد نیز مانند موارد قبل توزیع دما و عمق ایجاد سوختگی بررسی شده است و در شکل های 25 و 26 نشان داده شده است. عمق ایجاد سوختگی برای فاصله 6 برابر قطر از همه بیشتر است. همچنین عمق ایجاد سوختگی برای فاصله 10 برابر و 6 برابر قطر تفاوت چندانی ندارند.

5- جمع بندی و نتیجه گیری

دو منبع اصلی برای سوختگی های حرارتی در هنگام باز شدن کیسه هوا و بعد از باز شدن آن وجود دارد. اول، گازهای داغی که کیسه هوا را پر می کنند. نوع دوم سوختگی ناشی از برخورد با کیسه هوای داغ می باشد. در کار حاضر هر دو نوع سوختگی مدل سازی شدند.

پیش بینی زمان لازم برای ایجاد سوختگی برای دو نوع سوختگی ناشی از جسم داغ و جت گاز انجام شد و نتایج با نتایج تجربی مقایسه شدند. در هر دو قسمت روند نمودارها با نمودارهای تجربی یکسان بود. برای جسم داغ در زمان برخورد کمتر از یک ثانیه خطای زیادی (50 درصد) وجود داشت که احتمالاً به دلیل فرض انتقال حرارت فوری است.

- [12] H.H. Pennes, Analysis of tissue and arterial blood temperature in the resting forearm, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 1, pp.93-122, 1948.
- [13] J.P.Abraham, N.N.Jhonson, An Archive of Skin-Layer Thicknesses and Properties and Calculations of Scald Burns With Comparisons to Experimental Observations, *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, Vol. 3 / 011003-1, 2011.
- [14] J. Badra, A. R. Masri, M. Freeman, Enhanced Heat Transfer from Arrays of Jets Impinging on Plates, *16th Australasian Fluid Mechanics Conference Crown Plaza, Gold Coast, Australia* 2-7 December 2007.
- [8] G.N.Mercer, H.S. Sidhu, Modeling thermal burns due to airbag deployment, *Burns*, Vol. 31, pp. 977-980, 2005.
- [9] F. Xu, K.A. Seffen, T.J. Lu, Non-Fourier analysis of skin biothermomechanics, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 2237-2259, 2008.
- [10] B. M, Parneix. S, Shabany. Y, Durbin. P. A, Numerical study of Turbulent Heat Transfer in Confined and Unconfined Impinging Jets, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 20, pp.1-9, 1999.
- [11] H, Martin, M, Kind, Measurements on steady state heat transfer and flow structure and new correlations for heat and mass transfer in submerged impinging jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 3957-3965, 2007.