



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

آیدا فتحی پور<sup>1</sup>، کیومرث مظاهری<sup>2\*</sup>

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

## 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

## 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.

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

Aida Fathipour<sup>1</sup>, Kiumars Mazaheri<sup>2\*</sup>

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.

### 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

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

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:

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)

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 فلونت<sup>2</sup> 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.

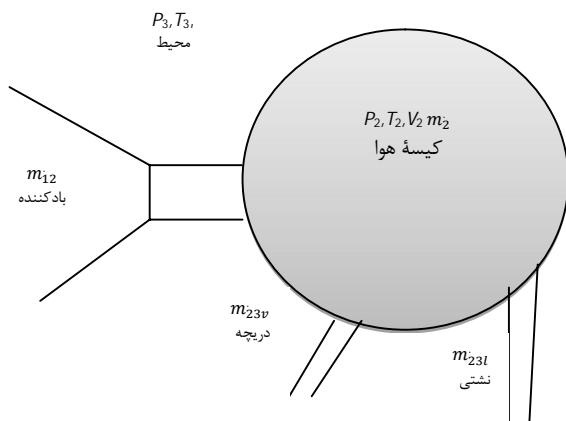
اولین تحقیقی که برای بررسی سوختگی انجام شد در سال 1947 توسط هنریک و موریتز بود [3]. این دو دانشمند با بررسی تجربی روی پوست انسان و خوک، میزان زمان تماس جسم داغ را با پوست برای ایجاد سوختگی درجه‌های مختلف بررسی کردند. هنریک و موریتز نشان دادند که می‌توان فرایند سوختگی را به عنوان یک فرایند نرخی<sup>1</sup> (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 جرمی ورودی از باد کننده کیسه هواست.  $\dot{m}_{23}$  و  $\dot{m}'_{23}$  به ترتیب شار جرم خروجی از دریچه‌های خروجی تعبیه شده روی کیسه هوا و نشی‌ها هستند. جریان ورودی از بادکننده کیسه هوا با فرض جریان آیزن‌تروپیک، یک‌بعدی و شبه‌پایا به صورت رابطه (5) تخمین زده می‌شود [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 ترتیب ضریب سطح و مساحت سطح بین کیسه 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 دریچه کیسه هوا است.

برای محاسبه فشار خروجی از دریچه‌های کیسه هوا از مفهوم فشار بحرانی استفاده می‌شود. زمانی که جریان از یک محیط پر فشار به محیطی با فشار کمتر از طریق یک دریچه، نازل تخلیه می‌شود، با کاهش فشار پشت، سرعت آن افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت تا زمانی که فشار به فشار بحرانی برسد، افزایش می‌یابد. در فشار بحرانی جریان دچار خفگی می‌شود 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 می‌آید [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 کیسه هوا  $P_e$  به صورت روابط (7) به دست می‌آید:

$$P_e = P_2 P_2 > P_c \quad (7-الف)$$

$$P_e = P_c P_2 < P_c \quad (7-ب)$$

در حالت دوم که جریان دچار خفگی شده است، جریان پایین دست تأثیری در میزان دبی جرمی ندارد. با استفاده از روابط ترمودینامیکی مانند رابطه (5) می‌توان دبی جرمی خروجی از دریچه‌ها و همچنین نشی‌ها 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 کیسه هوا، در کار حاضر از مدل دینامیک گازی ارائه شده توسط ونگ و نفسکه استفاده شده است.

ب- به دست آوردن ضریب انتقال حرارت جابجایی گاز خروجی با دما و سرعت مشخص از دریچه: برای به دست آوردن ضریب انتقال حرارت جابجایی جت گاز از حل معادلات حاکم بر جریان جت گاز توسط نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است.

ج- حل معادله زیست گرما: با شرط مرزی جابجایی و ضریب انتقال حرارت به دست آمده در مرحله قبل و به دست آوردن توزیع دما در لایه‌های مختلف پوست، معادله زیست گرمای فوریه‌ای و روش‌های حل آن در بخش 2-4 معرفی شده‌اند.

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

برای پیش‌بینی سوختگی‌های ناشی از برخورد مستقیم پوست با کیسه هوا دو مرحله وجود دارد:

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

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

## 2-1- شبیه‌سازی پرشدن کیسه هوا

در این قسمت از مدل ارائه شده توسط ونگ و نفسکه [5] برای شبیه‌سازی فرایند پر شدن و خالی شدن کیسه هوا استفاده می‌شود. با شبیه‌سازی کیسه هوا می‌توان سرعت و دمای گاز خروجی از دریچه‌های کیسه 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 می‌شود.

### 2-1-1- مدل ونگ و نفسکه

برای مدل‌سازی فرایند پرشدن کیسه هوا، کیسه هوا به صورت یک حجم کنترل در حال انبساط که جریان جرمی به آن وارد می‌شود و یا از آن خارج می‌شود، در نظر گرفته می‌شود. (شکل 1). فرضیات اصلی این مدل به صورت زیر می‌باشند [5]:

1- گاز داخل حجم کنترل از رفتار گاز ایده‌آل پیروی می‌کند.  
2- ظرفیت گرمایی ویژه گاز داخل حجم کنترل ثابت در نظر گرفته می‌شود.  
3- فرض می‌شود که هیچ‌گونه 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 می‌شود. با توجه به شکل 1 و فرض گاز ایده‌آل برای داخل کیسه هوا می‌توان نوشت:

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

که  $P_2$ ،  $m_2$ ،  $V_2$ ،  $T_2$  به ترتیب فشار، حجم، جرم و دمای هوا در کیسه هوا هستند که مجهول‌اند 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 می‌باشد. 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 کیسه هوا هستند که با استفاده از روابط (3) و (4) بدست می‌آیند:

با توجه به این که دبی جرمی خروجی از دریچه‌ها را می‌توان 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) می‌توان سرعت گاز خروجی از دریچه‌ها را به صورت رابطه (24) به دست آورد:

$$u = [2T_2 \left( \frac{kR}{k-1} \right) \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (24)$$

#### 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 مدل‌سازی احتراقی بادکننده می‌باشد که بسیار پیچیده است و نیاز به پارامترهای زیادی برای پیش‌بینی 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 می‌شود، با انجام احتراق گاز تولید شده وارد مخزن می‌شود و فشار مخزن نسبت به زمان اندازه‌گیری می‌شود که برای محاسبه دبی جرمی تانک از آن استفاده می‌شود [5] (شکل 2).

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

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

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 می‌باشد. 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 می‌شود (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 می‌آید:

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

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 راه‌های ساده به دست آوردن دمای بادکننده استفاده از رابطه (29) است [5]:

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

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 می‌شود [5].

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

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

که  $c_p$  و  $c_v$  ظرفیت گرمایی ویژه گاز در فشار و حجم ثابت هستند. از طرفی می‌توان 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 می‌آید:

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

بدین ترتیب معادله سوم به دست می‌آید. برای به دست آوردن تمامی مجهولات نیاز به یک معادله دیگر هست. برای به دست آوردن این معادله فرض می‌شود 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) می‌توان معادلات حاکم بر مرحله اول را به دست آورد. تغییرات حجم کیسه هوا به صورت رابطه (14) به دست می‌آید [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 می‌آیند:

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

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

فرض می‌شود که معادلات (13) تا (16) تا زمانی که حجم کیسه هوا به یک حجم نامی مشخص برسد صحیح می‌باشند. این حجم نامی ( $V_{20}$ ) حجمی تعریف می‌شود که در آن پوشش ناپلونی کیسه هوا تا حد نهایت خود کشیده شده باشد [5]. این حجم توسط تست‌های تجربی روی کیسه هوا به دست می‌آید.

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

بعد از رسیدن کیسه هوا به حجم نامی، گاز داخل کیسه هوا از دریچه‌ها خارج شده و حجم کیسه هوا شروع به کاهش می‌کند. در این قسمت مرحله دوم مدل‌سازی شروع می‌شود. طبق رابطه‌ی ارائه شده در مرجع [5] در این مرحله تغییرات فشار و حجم از روابط (17) و (18) به دست می‌آیند.

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

در این روابط  $C_s$  ضریب کشش کیسه هوا و  $\Delta V$  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 می‌شود.

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

با استفاده از روابط (1) تا (20) می‌توان حجم، دما، فشار و جرم گاز داخل کیسه هوا را در زمان‌های مختلف پیش‌بینی کرد.

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

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

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

### 2-3- معادله زیست گرما و پیش‌بینی سوختگی

با توجه به زمان انتقال حرارت و عمق ایجاد سوختگی، انتقال حرارت به پوست توسط کیسه هوا را می‌توان یک بعدی فرض کرد [4]. پوست را می‌توان سه لایه مختلف با خواص ترمودینامیکی و ضخامت متفاوت در نظر گرفت. ضخامت لایه‌ها و خواص استفاده شده در این مقاله از مرجع [4] گرفته شده است. این مقادیر در جدول 1 آمده است. معادله انتقال حرارت حاکم بر مسأله، معادله زیست گرمای پنس [12] است (رابطه 30):

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

$\rho$  چگالی پوست،  $c$  ظرفیت گرمایی ویژه پوست،  $T$  دما،  $t$  زمان،  $x$  عمق،  $k$  ضریب هدایت حرارتی،  $\omega_b$  نرخ شارش خون<sup>1</sup> (جریان خون در واحد جرم بافت)،  $\rho_b$  چگالی خون،  $c_b$  ظرفیت گرمایی ویژه خون و  $T_b$  دمای پایه بدن است.

با توجه به تحقیقات انجام شده توسط هنریک و موریتز و داده‌های به دست آمده می‌توان واکنش سوختن پوست را یک فرایند نرخی فرض کرد. یک فرایند نرخی به فرایندی گفته می‌شود که مشتق یک یا چند متغیر مربوط به واکنش، با زمان متناسب است. با توجه به این ایده، هنریک و موریتز معادله (31) را برای پیش‌بینی سوختگی پیشنهاد دادند [3]:

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

در رابطه (31)،  $\Omega$ : متغیر معرف واکنش سوختن است.  $G$  و  $\Delta E$  ثوابتی که از داده‌های تجربی به دست می‌آیند و مقدار  $G$ ،  $1/s$  و مقدار  $\Delta E$   $629 \times 10^3 \text{ J/mol}$  است.  $T$  دما در عمق دلخواه پوست،  $R$  ثابت جهانی گازها،  $\Delta E$  همان انرژی فعال‌سازی آرنیوسی است.

با انتگرال‌گیری از معادله (31)، معادله (32) به دست می‌آید.

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

برای پیش‌بینی عمق سوختگی در یک بازه زمانی مشخص، دما نسبت به زمان در  $T(t)$  در یک عمق دلخواه را با حل معادله زیست گرما با روش تفاضل محدود، به دست آمده و با قرار دادن در معادله (32)،  $\Omega$  محاسبه می‌شود. اگر در عمق مورد نظر  $\Omega$  برابر با یک باشد سوختگی در عمق مورد نظر رخ داده است.

### 3- مراحل شبیه‌سازی سوختگی و اعتبارسنجی

در این قسمت مراحل شبیه‌سازی دو نوع سوختگی ذکر شده در بخش‌های پیشین بیان شده و اعتبارسنجی برای قسمت‌های مختلف انجام شده است.

#### 3-1- شبیه‌سازی سوختگی‌های ناشی از تماس مستقیم با کیسه هوا

در این قسمت سوختگی‌های ناشی از تماس مستقیم با کیسه هوا شبیه‌سازی شده است. برای اعتبارسنجی نتایج با نتایج عددی و تجربی مقایسه شده است. در انتها برای بررسی نقش جنس کیسه هوا در ایجاد سوختگی مدل‌سازی موردی انجام شده است.

برای مدل‌سازی ریاضی، پوست به عنوان یک جسم با سه لایه اپیدرم یا لایه سطحی، درم یا لایه میانی، و هاپیودرم یا لایه زیرین با خواص فیزیکی متفاوت در لایه‌های مختلف در نظر گرفته شده و کیسه هوا که در تماس با سطح خارجی پوست است به عنوان یک لایه اضافی با ضخامت 1 میلی‌متر [9] در نظر گرفته می‌شود. بعد از حل معادله زیست گرما و به دست آوردن توزیع دما در عمق‌های مختلف، توزیع دما در تابع پیش‌بینی سوختگی  $\Omega$  جایگذاری شده و مقدار  $\Omega$  برای زمان‌های مختلف در عمق‌های مختلف به دست می‌آید.

بادکنده (علت تغییر جرم، خارج شدن جرم از بادکنده است) هستند. با توجه به روابط (25) تا (28) برای به دست آوردن دبی جرمی ورودی از بادکنده نیاز به تغییرات فشار تانک در حین تست تانک است. تغییرات فشار تانک به صورت نمودارهای تجربی براساس زمان توسط سازندگان بادکنده ارائه می‌شوند. نمودار استفاده شده در این مقاله از مرجع [4] گرفته شده است.

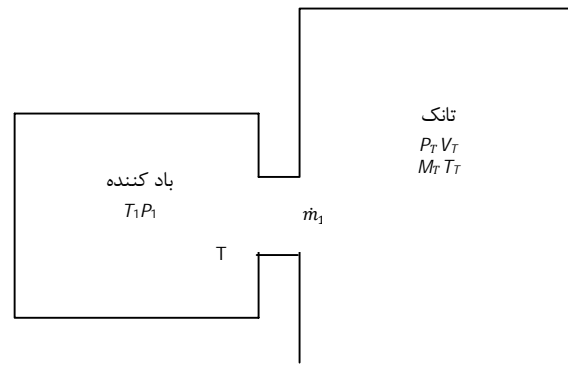
#### 2-2- معادلات حاکم بر جریان جت گاز خروجی از دریچه کیسه هوا و روش شبیه‌سازی

برای به دست آوردن ضریب انتقال حرارت گاز خروجی از دریچه‌های کیسه هوا، نیاز به مدل‌سازی انتقال حرارت جت گاز خروجی از کیسه هوا است. مسأله جت گاز خروجی از یک دریچه که به صورت عمودی به یک صفحه برخورد می‌کند به علت کاربرد زیاد در مسائل مهندسی هم به صورت عددی و هم به صورت تجربی بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است. کاربرد بیشتر این مسأله به علت نرخ زیاد انتقال حرارت از جت گاز در انتقال حرارت می‌باشد [11].

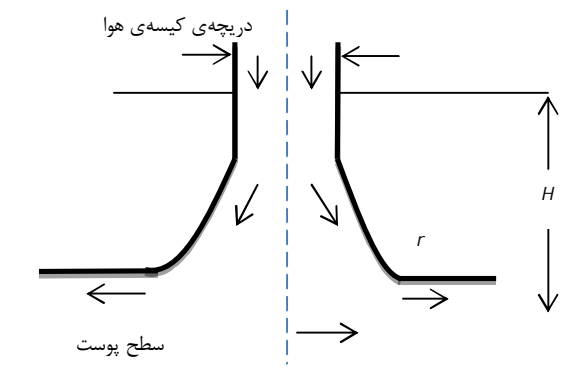
جت گاز خروجی از کیسه هوا یک جریان سیال تراکم پذیر است که به یک صفحه برخورد می‌کند (شکل 3).  $H$  فاصله دریچه کیسه هوا از پوست است.  $D$  قطر دریچه و  $r$  فاصله از محور جت است. سرعت گاز خروجی از دریچه بسیار بالاست (280 تا 300 متر بر ثانیه) در نتیجه عدد ماخ (سرعت گاز به سرعت صوت) بالای 0/8 است و جریان سیال تراکم پذیر است.

معادلات حاکم بر جریان یک سیال تراکم پذیر لزج توسط معادله بقای انرژی، معادله پیوستگی و معادله بقای مومنتم بیان می‌شوند [10].

معادلات فوق با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت و مدل توربولانسی SST-k $\omega$  حل شده‌اند. علت استفاده از این مدل توربولانسی توانایی این مدل در پیش‌بینی گردابه‌های جریان و رفتار جریان نزدیک دیوار است [11].



شکل 2 تست تانک



شکل 3 جت گاز خروجی از دریچه کیسه هوا

1- Blood Perfusion rate

ثانیه به دست آمده است. شرایط مرزی رسانش در کیسه هوا در شکل 6 نشان داده شده است. با توجه به شکل 6 شرط مرزی دما ثابت اول برابر با دمای گاز داخل کیسه هوا است که به صورت اختیاری 250 درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است و شرط مرزی دما ثابت دوم برابر با دمای محیط که 25 درجه سلسیوس است در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل 7 دما در ضخامت کمی از کیسه هوا دارای تغییر است. این نکته نیز قابل ذکر است که بعد از حداکثر 60 میلی ثانیه کیسه ی هوا به سرنشین برخورد می‌کند و فرصتی برای تعادل حرارتی وجود ندارد [4]. از این رو در این مقاله، شرط اولیه کیسه هوا برابر با 25 درجه سلسیوس در نظر گرفته می‌شود.

برای اعتبارسنجی نتایج پیش‌بینی سوختگی انجام شده در کار حاضر برای برخورد با جسم داغ با نتایج تجربی هنریک و موریتز [3] مقایسه شده است. هنریک و موریتز [3] با تماس دادن اجسام داغ با پوست خوک و انسان دمای لازم برای ایجاد سوختگی را در دماهای مختلف بررسی کرده‌اند. برای اعتبارسنجی معادله زیست گرمای پنس برای شرایط آزمایش‌های تجربی مرجع [3] حل شده و با قرار دادن توزیع دما در سطح مشترک لایه میانی و سطحی پوست در تابع آسیب حرارتی امگا لازم برای رسیدن امگا به 1 به دست آمده است. نتایج کار حاضر در شکل 8 با نتایج تجربی مرجع [3] مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشخص است در زمان‌های پایین خطا بالای 50 درصد است. علت اصلی این امر پاسخگو نبودن فرض انتقال حرارت فوری‌های در زمان‌های پایین تخمین زده می‌شود. روند نمودارها تقریباً یکسان است.

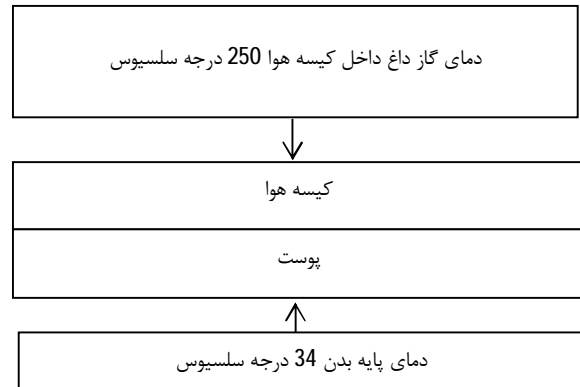
برای بررسی اثر جنس کیسه هوا در ایجاد سوختگی، سه جنس مختلف PA46 (پلی آمید 46)، PA66 (پلی آمید 66)، PET (پلی استر) در نظر گرفته می‌شود. خواص ترمودینامیکی و حرارتی این سه جنس در جدول 2 ارائه شده است. با استفاده از روش شرح داده شده در قسمت قبل توزیع دما در لایه‌های مختلف پوست برای زمان 4 ثانیه و سه جنس مختلف کیسه 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 پیش‌بینی سوختگی عمق از بین رفتن پوست در زمان‌های مختلف بررسی شده است. عمقی که در آن  $\Omega$  برابر یک است به عنوان عمقی که در آن بافت از بین می‌رود در نظر گرفته شده است. نتایج در جدول 3 ارائه شده است.

با توجه به نتایج جدول 3، جنس‌های PA46، PA66 و PET به ترتیب در زمان کمتری باعث ایجاد سوختگی می‌شوند. بنابراین اگر ایجاد سوختگی پارامتر اصلی برای انتخاب کیسه هوا باشد، بهتر است از پلی استر استفاده شود زیرا با توجه به نتایج، در کمتر از 4 ثانیه هیچ‌گونه سوختگی توسط این نوع کیسه هوا ایجاد نمی‌شود و بدترین جنس مورد استفاده پلی آمید 66 است. زیرا در کمتر از 2 ثانیه موجب ایجاد سوختگی خواهد شد. البته قابل ذکر است که به دلیل به صرفه بودن اقتصادی اکثر کیسه‌های هوا از پلی آمید 66 ساخته شده‌اند [13]

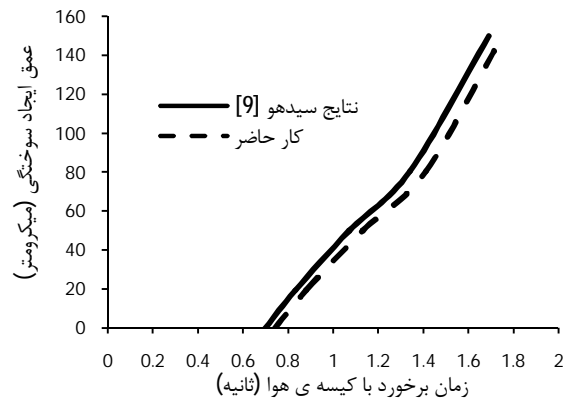
طبق نتایج به دست آمده در این بخش زمان لازم برای گرم شدن کیسه هوا و انتقال گرما به پوست که سبب ایجاد سوختگی می‌شود، حدود دو ثانیه است. در صورت عملکرد صحیح، باید کیسه هوا در کمتر از یک ثانیه تخلیه شده و در تماس با سرنشین نباشد. به دلیل زمان کم فرایند تخلیه، کیسه هوا گرم نمی‌شود در نتیجه سوختگی ایجاد نخواهد شد. اما اگر در اثر عملکرد نامناسب زمان تخلیه طولانی‌تر شود کیسه هوا داغ می‌شود و امکان ایجاد سوختگی‌های درجه‌ی اول و دوم برای سرنشین که در تماس با آن است، وجود دارد.

جدول 1 خواص ترمودینامیکی مربوط به لایه‌های 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
$\rho$ (چگالی)	1200	1200	1000
$\omega$ (نرخ شارش خون)	0	0/00125	0/00125
	1/s		



شکل 4 شرایط مرزی اعمال شده برای حل معادله زیست گرما در پیش‌بینی سوختگی ناشی از تماس مسقیم



شکل 5 مقایسه‌ی عمق ایجاد سوختگی در اثر برخورد با کیسه ی هوا با مرجع [9]

ابتدا برای اعتبارسنجی، مسأله با شرایط مرزی ارائه شده در مرجع [9] حل می‌شود. شرایط مرزی 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 اولیه کیسه هوا به صورت خطی از دمای گاز در داخل کیسه تا دمای بدن در سطح پوست تغییر می‌کند. علت این فرض، به صورت دقیق توضیح داده نشده است.  $A$  ضخامت کیسه هوا،  $x$  عمق پوست،  $T_g$  دمای گاز داغ داخل کیسه هوا است. در شکل 5 عمق ایجاد سوختگی، با نتایج عددی به دست آمده توسط سیدهو [9] مقایسه شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است، نتایج روند یکسانی دارند ولی زمان پیش‌بینی شده برای سوختگی در کار حاضر اندکی بیشتر است.

دمای پایه بدن در اکثر مراجع 37 درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن، شرط اولیه ارائه شده در مرجع [9] برای کیسه هوا (معادله (33))، درست به نظر نمی‌رسد، برای اثبات این موضوع فرض شده است که از زمان باز شدن کیسه هوا تا برخورد با سرنشین یک ثانیه طول می‌کشد. با حل معادله رسانش در کیسه ی هوا به ضخامت 1 میلی متر توزیع دما بعد از 1

جدول 2 خواص جنس های مختلف کیسه هوا [13]

PET	PA46	PA66	واحد کمیت	خاصیت ترمودینامیکی
0/2	0/4	0/22	W/m-K	K (ضریب انتقال حرارت جابجایی)
2/5	3/6	3/6	kJ/kg-K	C (ظرفیت گرمایی ویژه)
1000	1200	1200	kg/m <sup>3</sup>	$\rho$ (چگالی)

جدول 3 عمق ایجاد سوختگی در زمان های مختلف برای جنس های مختلف (میکرومتر)

PET	PA46	PA66	جنس کیسه هوا
سوختگی	سوختگی	10	عمق ایجاد سوختگی (میکرومتر) در 2 ثانیه
ایجاد نمی شود	ایجاد نمی شود	110	عمق ایجاد سوختگی (میکرومتر) در 3 ثانیه
سوختگی ایجاد نمی شود	90	350	عمق ایجاد سوختگی (میکرومتر) در 4 ثانیه
70	300		

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].

### 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 کیسه 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

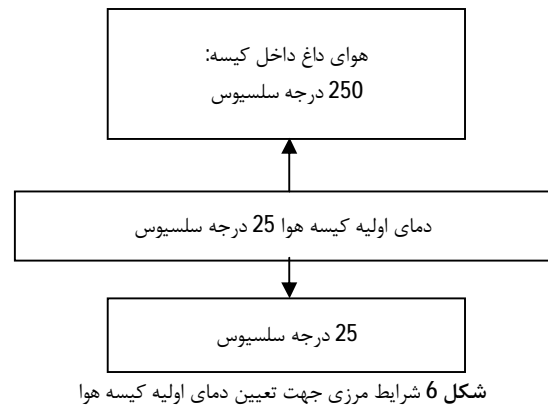
برای شبیه سازی دینامیک گازی، داده های مربوط به تست تانک مورد نیاز می باشد [4]. داده مورد نیاز، تغییرات فشار تانک نسبت به زمان است. نمودارهای تست تانک، توسط سازندگان بادکندها به دست می آیند. نمودار تست تانک استفاده شده در این مقاله از مرجع [4] گرفته شده است (شکل 10).

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

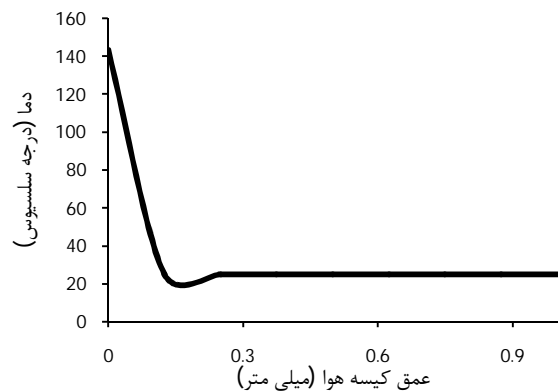
مربوط به کیسه هوا هستند که به صورت زیر در نظر گرفته شده اند:

- 1- حجم نامی کیسه هوا برابر 60 لیتر در نظر گرفته شده است.
- 2- ضریب کشش کیسه هوا  $C_s$ ، صفر در نظر گرفته شده است.
- 3- تغییر حجم مربوط به برخورد سرنشین صفر در نظر گرفته شده است.
- 4- هیچ گونه نشستی از کیسه هوا وجود ندارد. (در نتیجه گاز فقط از دریچه های تعبیه شده خارج می شود)
- 5- کیسه 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.

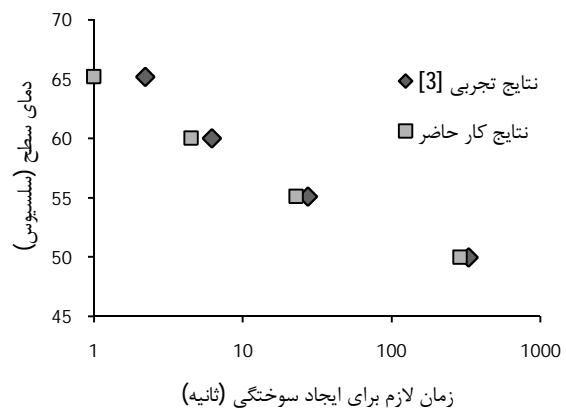
با توجه به داده های ارائه شده و در نظر گرفتن 800 کلین برای دمای بادکنده، با استفاده از مدل دینامیک گازی معرفی شده در بخش 2-2 سرعت و دمای گاز خروجی از دریچه ها محاسبه شده است. نتایج در شکل های 11 و 12 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود نتایج همخوانی خوبی با نتایج مرجع [4] دارند. پس از رسیدن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



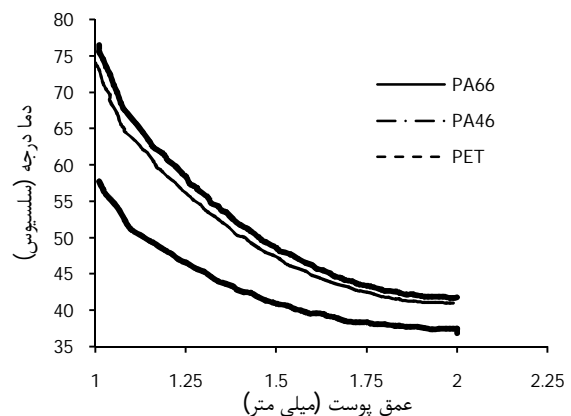
شکل 6 شرایط مرزی جهت تعیین دمای اولیه کیسه هوا



شکل 7 توزیع دمای اولیه در ضخامت کیسه هوا



شکل 8 زمان لازم برای ایجاد سوختگی 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

صرفه‌جویی محاسبات برای یک چهارم انجام شده است) شبیه‌سازی شده است. سرعت جت گاز با توجه به محاسبات انجام شده در قسمت قبل، 278 متر بر ثانیه و دمای آن 778 کلوین در نظر گرفته شده است.

حل مستقل از شبکه با 100000 سلول محاسباتی انجام شده است. به علت بیشینه بودن ضریب انتقال حرارت زیر جت‌ها [6] نمودار ضریب انتقال حرارت (روی دیوار پایینی که جت به آن برخورد می‌کند روی محور تقارن موازی محور  $x$ ) در شکل 14 رسم شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در شکل 14 ضریب انتقال حرارت بیشینه  $1200 \text{ W/m}^2\text{K}$  است. در مرجع [4] برای محاسبه بیشینه ضریب 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 اشناپدر چاپ شده است [8]، به اشتباه بودن روش مرجع [4] برای محاسبه ضریب انتقال حرارت اشاره شده است. ولی روشی برای محاسبه ضریب انتقال حرارت ارائه نشده است. در مرجع [8] برای ضریب انتقال حرارت چند مقدار اختیاری در نظر گرفته شده است.

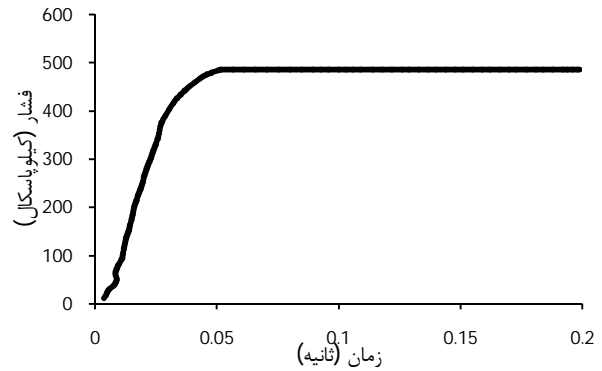
### 3-2-3- حل معادله زیست گرما

معادله زیست گرمای فوریه‌ای پنس با شرط مرزی جابجایی، با در نظر گرفتن ضریب 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 شبیه‌سازی دینامیک گازی (شکل 12)، فرایند پشدن و خالی شدن کیسه هوا، فقط 120 میلی ثانیه طول می‌کشد، در نتیجه محاسبات برای 120 میلی ثانیه انجام می‌شود.

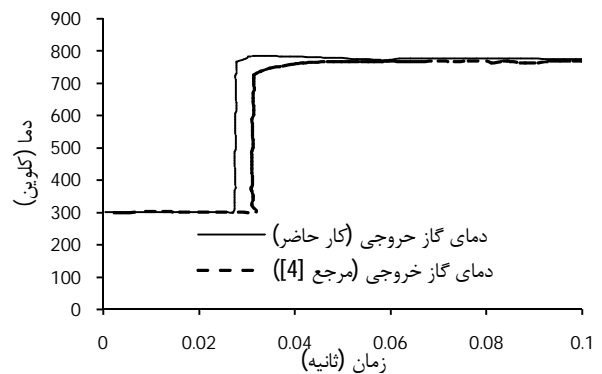
در مرجع [4] برای انتقال حرارت به پوست دو مرحله در نظر گرفته شده است. در مرحله اول جت گاز خروجی از دریچه کیسه هوا با پوست برخورد می‌کند، در مرحله دوم گاز با پوست برخورد نمی‌کند و پوست توسط هوا خنک می‌شود. مرحله اول 120 میلی‌ثانیه و مرحله دوم 0/5 ثانیه در نظر گرفته شده و امگا برای هر کدام محاسبه شده است. در مرحله اول امگا برابر 0/5 است ولی با نظر گرفتن مرحله دوم امگا برابر 5/5 می‌شود، در نتیجه سوختگی رخ می‌دهد.

در کار حاضر با فرض ضریب انتقال حرارت  $1200 \text{ W/m}^2\text{K}$  (در مرحله‌ی 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 عمق‌های مختلف نشان داده شده است. ولی با در نظر گرفتن ضریب انتقال حرارت  $1200 \text{ W/m}^2\text{K}$  نتایج بسیار متفاوتی برای توزیع دما در سطح مشترک لایه‌ی سطحی و میانی نتیجه می‌شود. نتایج در دو مرحله انتقال حرارت نشان داده شده‌اند. با محاسبه تابع امگا مشاهده می‌شود که در همان مرحله اول، امگا مقدار بیشتر از یک (5/96) دارد، در نتیجه سوختگی ایجاد می‌شود در نتیجه نیازی به حل فاز دوم برای پیش‌بینی سوختگی نیست.

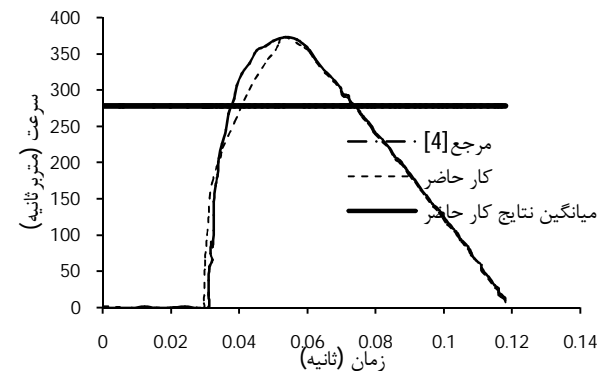
در کار انجام شده توسط رید و اشناپدر [4] تنها برای این مورد سوختگی بررسی شده است. همان‌طور که توضیح داده شد، نتایج رید و اشناپدر با توجه به محاسبات مربوط به انتقال حرارت جت گاز منطقی نیست. از طرف دیگر دمای 800 کلوین برای بادکننده بسیار زیاد است. در حال حاضر دمای بادکننده‌ها 500 کلوین در نظر گرفته شده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



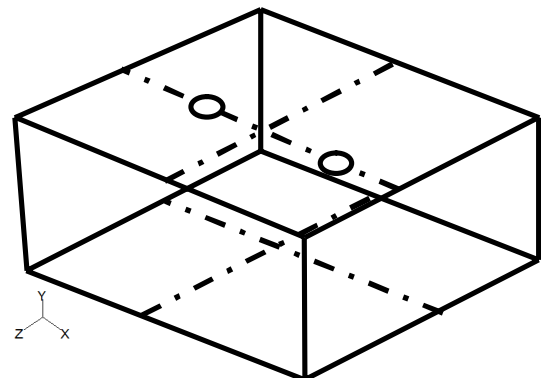
شکل 10 فشار تانک در تست تانک



شکل 11 توزیع دمای گاز خروجی از دریچه‌های کیسه هوا نسبت به زمان



شکل 12 توزیع سرعت گاز خروجی از دریچه‌های کیسه ی هوا نسبت به زمان



شکل 13 شبیه‌سازی جت گاز در فلونت

### 3-2-2- محاسبه ضریب انتقال حرارت

برای به دست آوردن ضریب انتقال حرارت جابجایی با استفاده از نرم‌افزار فلونت دو جت گاز (شکل 13) که روی یک دیوار بی دررو قرار گرفته‌اند (برای



## 3-2-4- مقایسه با نتایج تجربی

برای اعتبارسنجی نتایج پیش‌بینی سوختگی ناشی از برخورد با جت گاز داغ از نتایج تجربی رید [4] استفاده شده است. یک جت با قطر 10 میلی‌متر و فاصله بی بعد شده صفحه تا جت ( $H/D$ ) 6 و سرعت 80 متر بر ثانیه و دمای 550 درجه سلسیوس شبیه‌سازی شده است.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده، ضریب انتقال حرارت جابجایی روی پوست با ضریب انتقال حرارت فوق توزیع دما نسبت به زمان در سطح مشترک لایه میانی و سطحی به دست می‌آید. با حل معادله زیست گرما با شرط مرزی جابجایی روی پوست با ضریب 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 نتایج با نتایج تجربی رید و اشنایدر مقایسه شده است. طبق شکل 16 نتایج حدود 20 میلی‌ثانیه با نتایج تجربی تفاوت دارند، با توجه به مقایسه‌ای که با نتایج عددی رید و اشنایدر [4] و نتایج تجربی [4] انجام شده است. نتایج کار حاضر منطقی‌تر به نظر می‌رسد.

## 4- بررسی نقش پارامترهای مختلف در ایجاد سوختگی

در این قسمت نقش پارامترهای مختلف برای کیسه هوا با مشخصات ارائه شده در قسمت قبل بررسی شده است. اولین پارامتر مورد بررسی، تعداد درپچه‌های کیسه هوا است. پارامتر بعدی قطر درپچه‌ها و فاصله کیسه هوا است. قابل ذکر است که تعداد درپچه‌ها و قطر آنها در سرعت گاز خروجی تأثیر زیادی دارند. از این رو شبیه‌سازی دینامیک‌گازی برای به دست آوردن این پارامترها انجام شده است که نتایج آن در جدول 4 ارائه شده است. در محاسبات انجام شده دمای گاز خروجی نیز محاسبه شده است که با تغییر قطر درپچه تفاوت زیادی در دمای گاز خروجی ایجاد نمی‌شود و دما 470 کلوین در نظر گرفته می‌شود.

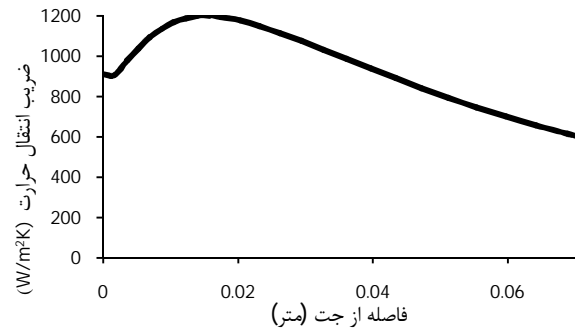
## 4-1- بررسی نقش قطر

برای بررسی نقش قطر درپچه‌های کیسه هوا 3 قطر مختلف برای یک درپچه در نظر گرفته شده است. برای بررسی نقش قطر درپچه‌های کیسه هوا 3 قطر مختلف برای یک درپچه در نظر گرفته شده است. ضرایب انتقال حرارت جت گاز برای این سه قطر محاسبه شده‌اند. فاصله  $H/D$  شکل 3 برابر 7/5 در نظر گرفته شده است [4]. با افزایش قطر ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد [11]. این نتیجه در شکل 17 نشان داده شده است. (پارامترهای  $r$  و  $D$  در شکل 3 مشخص شده‌اند) در شکل 18 توزیع دما در سطح مشترک لایه میانی و سطحی نسبت به زمان برای 3 حالت نشان داده شده است. دما با افزایش قطر کاهش می‌یابد.

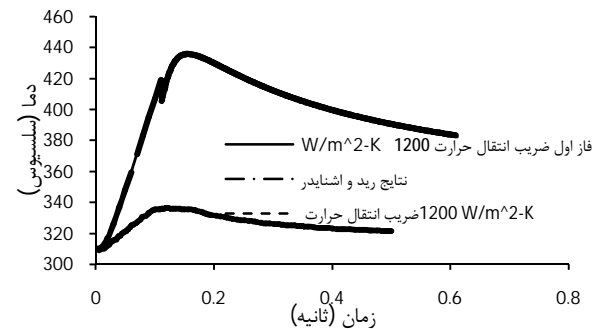
در شکل 19 عمق ایجاد سوختگی برای قطرهای مختلف بررسی شده است. با توجه به این شکل عمق ایجاد سوختگی با افزایش قطر کاهش پیدا می‌کند. تفاوت بین نتایج مربوط به قطرهای 35 و 45 میلی‌متر کمتر است. این احتمالاً به علت تفاوت کمتر سرعت جت در این دو مورد است. عمق ایجاد سوختگی بین 150 میکرومتر و 200 میکرومتر تغییر می‌کند، این نشان می‌دهد که کل لایه سطحی از بین رفته و سوختگی تا عمق زیادی از لایه میانی پیش رفته است.

## 4-2- بررسی نقش تعداد درپچه‌ها

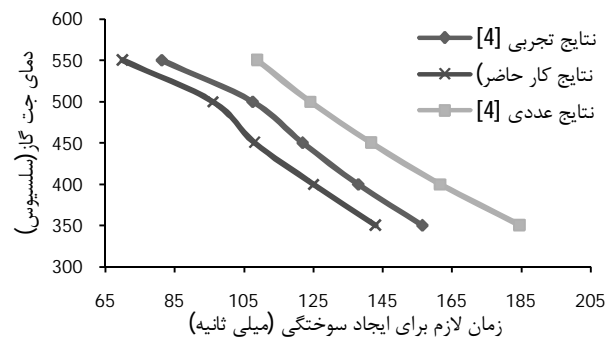
در این بخش نقش تعداد درپچه‌ها در ایجاد سوختگی بررسی شده است. به این منظور تعداد یک، دو و سه درپچه با قطر 35 میلی‌متر و فاصله  $H/D$ ، 7/5 شبیه‌سازی شده‌اند [4].



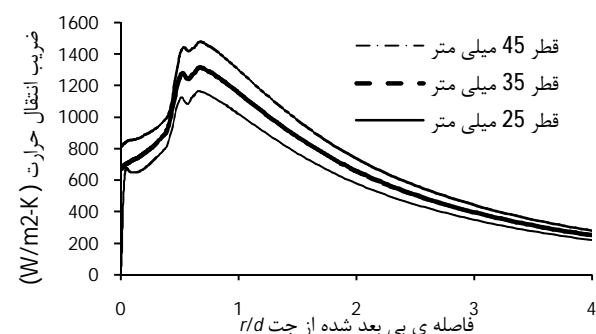
شکل 14 ضریب انتقال حرارت جابجایی دو جت گاز



شکل 15 مقایسه توزیع دما در لایه‌های مختلف پوست با مرجع [4]



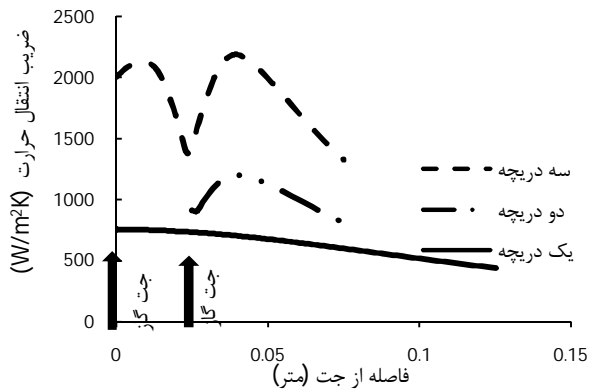
شکل 16 زمان لازم برای ایجاد سوختگی در دمای مختلف جت هوا



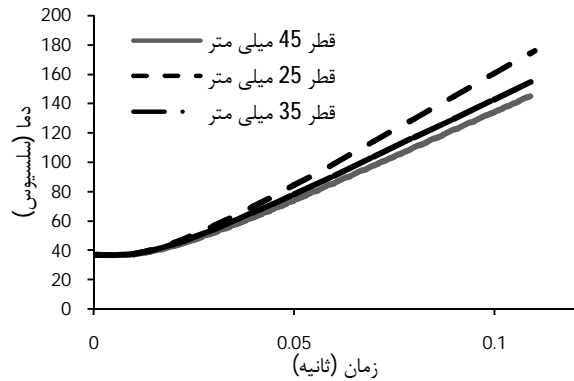
شکل 17 ضریب انتقال حرارت برای قطرهای مختلف جت گاز

جدول 4 سرعت گاز خروجی از درپچه

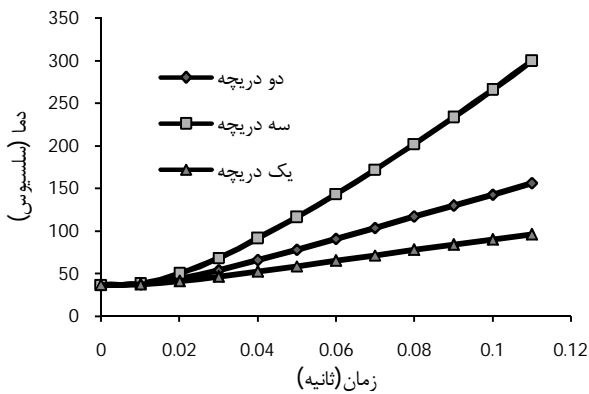
قطر درپچه	تعداد درپچه	سرعت (متر بر ثانیه)
25 میلی‌متر	1	371
35 میلی‌متر	1	350/5
40 میلی‌متر	1	336/72
45 میلی‌متر	1	320/43
35 میلی‌متر	2	278
35 میلی‌متر	3	230/8



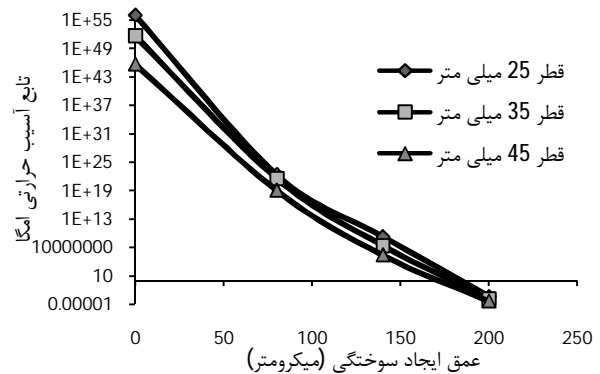
شکل 21 ضریب انتقال حرارت برای تعداد درپچه‌های مختلف



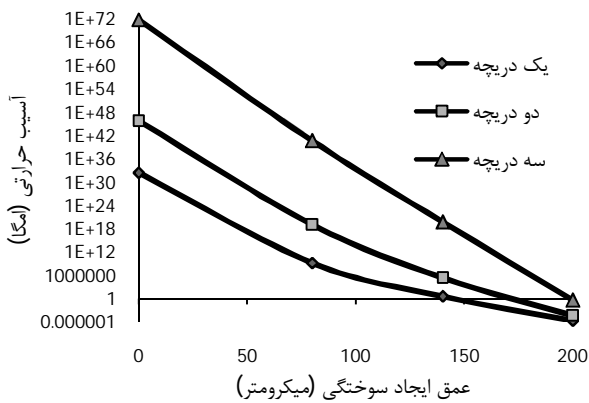
شکل 18 دما در سطح مشترک لایه‌ی میانی و سطحی برای قطرهای مختلف جت گاز



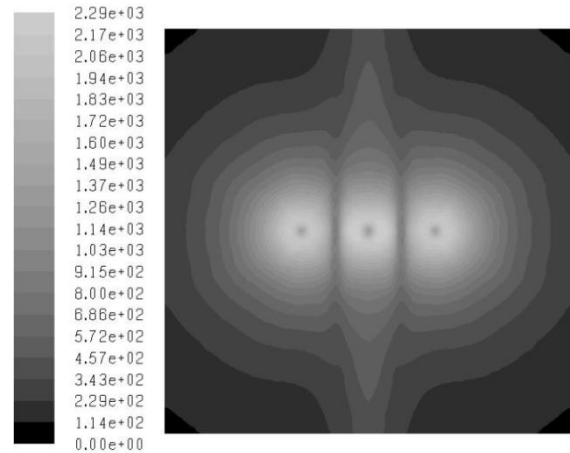
شکل 22 توزیع دما در سطح مشترک لایه میانی و سطحی برای تعداد درپچه‌های مختلف



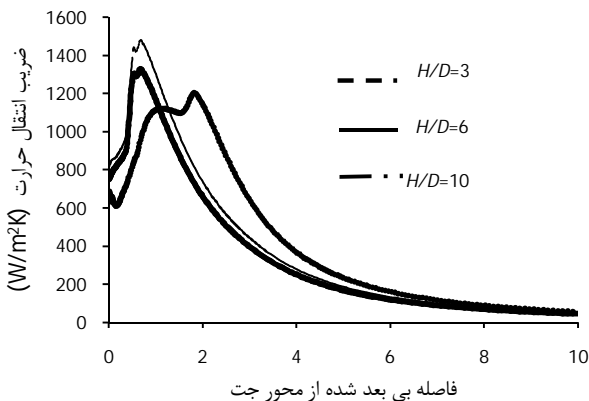
شکل 19 عمق ایجاد سوختگی در اثر برخورد جت گاز با قطرهای مختلف



شکل 23 مقدار تابع آسیب حرارتی برای تعداد درپچه‌های مختلف



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



شکل 24 ضرایب انتقال حرارت برای فاصله‌های مختلف درپچه تا پوست

نتایج کانتور ضریب انتقال حرارت برای سه درپچه در شکل 20 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین ضریب انتقال حرارت در زیر جت‌ها است. همچنین تقابل بین جت‌ها باعث افزایش بیشتر ضریب انتقال حرارت می‌شود [11].

در شکل 21 ضریب انتقال حرارت جابجایی برای تعداد درپچه‌های مختلف در روی صفحه نشان داده شده است. با توجه به نمودار با افزایش تعداد درپچه افزایش زیادی در ضریب انتقال حرارت ایجاد می‌شود. 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 می‌یابد و با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل 23 عمق ایجاد سوختگی هم زیاد می‌شود. با در نظر گرفتن 3 درپچه 200 میکرومتر از بافت پوست از بین می‌رود که مقدار خیلی زیادی است.

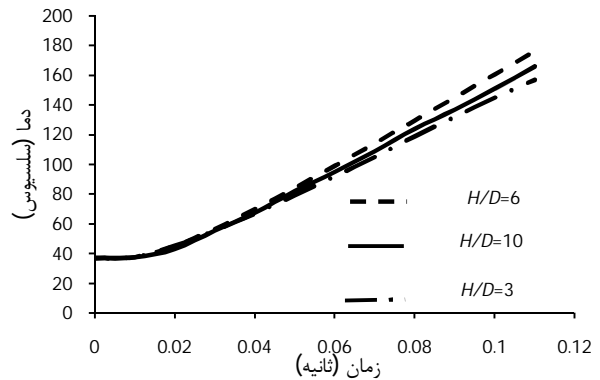
سوختگی های ناشی از تماس مستقیم با کیسه هوا برای جنس های مختلف کیسه هوا بررسی شد. طبق نتایج به دست آمده، اگر سرنشین بیشتر از دو ثانیه با کیسه هوا تماس داشته باشد احتمال ایجاد سوختگی و از بین رفتن بافت پوست تا عمق 350 میکرومتر وجود دارد. بیشترین جنس مورد استفاده (PA66)، بیشتر از جنس های دیگر کیسه هوا باعث 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.

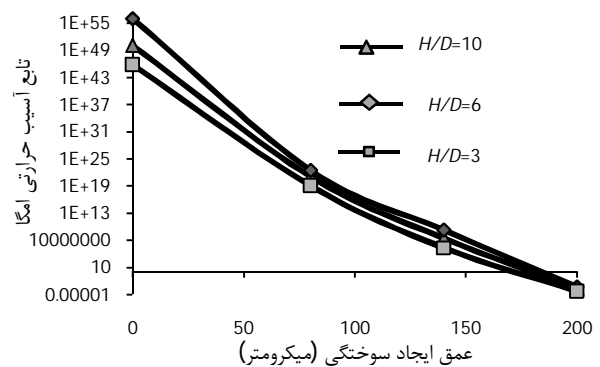
در مرحله بعدی اثر تعداد دریچه ها بررسی شد. افزایش تعداد دریچه ها باعث سریع تر تخلیه شدن کیسه هوا می شوند. از این رو سرنشین کمتر در معرض جت گاز است. ولی با افزایش تعداد دریچه ها ضریب انتقال حرارت جت گاز به شدت افزایش می یابد، همچنین مساحت برخورد افزایش می یابد از این رو تعداد دریچه کمتر، بهتر به نظر می 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, *Injuries secondary to airbag deployment*, *Injury Extra*, Vol. 42, pp. 69-70, 2011.
- [3] F.C.Henriques, Studies of Thermal Injury. V. The predictability and the significance of thermal 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.