



## توسعه یک مدل آتش کافت جهت شبیه‌سازی عددی تجزیه حرارتی ماده جامد قابل اشتعال

شهرز متقیان<sup>1</sup>، هادی پاسدارشهری<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی، تربیت مدرس، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی 14115-111، pasdar@modares.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 05 آبان 1395

پذیرش: 15 آذر 1395

ارائه در سایت: 15 دی 1395

کلید واژگان:

آتش

دینامیک سیالات محاسباتی

آتش کافت

گسترش شعله

پی.ام.ام.ای

### چکیده

یکی از اهداف مطالعه پدیده آتش، شبیه‌سازی آن در مقیاس‌های بزرگ است. از مهم‌ترین رفتارهای آتش گسترش شعله از یک نقطه به یک نقطه دیگر است که سبب تخریب ساختمان‌ها، جنگل‌ها و ... می‌شود. به همین دلیل گسترش آتش روی مواد جامد از اهمیت بسیاری برخوردار است. در شبیه‌سازی گسترش شعله به روش دینامیک سیالات محاسباتی بر جسم جامد، پیش‌بینی دقیق رفتار آتش کافت جامد نقش مهمی را ایفا می‌کند. در این مطالعه یک مدل یک‌بعدی آتش کافت بر پایه کد متن‌باز این فوم توسعه داده شده است تا شبیه‌سازی گسترش شعله با بالا بردن دقت و کارایی مدل موجود در دسترس قرار گیرد. نتایج این مدل با نتایج تجربی برای دمای سطح جامد و نرخ جرم از دست رفته ماده پی.ام.ام.ای مقایسه شده است. به دلیل عدم وجود مقادیر مشخص و یکتا این پارامترها در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، نیاز به مشخص کردن مقادیری به‌عنوان ورودی برای مدل است تا نتایج مدل‌سازی با نتایج تجربی هم‌خوانی مطلوبی داشته باشند. به همین منظور استفاده از روش‌های بهینه‌سازی بسیار مرسوم است. به دلیل تعدد پارامترهای ورودی و ماهیت غیرخطی مساله، فرآیند بهینه‌سازی بسیار پرهزینه است که در این مقاله به بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر نتایج مدل آتش کافت توسعه داده شده پرداخته شده تا بتوان اثرات پارامترهای ورودی را بر آتش کافت مشاهده کرد. از سویی پارامترهای مهم بر دمای سطح و نرخ جرم از دست‌رفته معرفی شده‌اند تا با بهینه‌سازی این پارامترها از هزینه محاسبات فرآیند بهینه‌سازی در مشخص کردن پارامترهای ورودی کاسته شود.

## Developing a pyrolysis model for numerical simulation of thermal decomposition in combustible solid

Shahrooz Motaghian<sup>1</sup>, Hadi Pashdarshahri<sup>1\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran, pasdar@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 26 October 2016  
Accepted 05 December 2016  
Available Online 04 January 2017

#### Keywords:

Fire  
CFD  
Pyrolysis  
Flame Spread  
PMMA

### ABSTRACT

In fire community, predicting large scale fire behavior is the main target of researches. Flame spread from one area to another is one of the most important fire behaviors which may lead to destruction of buildings, jungles, etc. Therefore, in recent years, flame spread of solid is attracting considerable attentions and many studies focused on these phenomena. Pyrolysis modeling is one of main aspects in flame spread simulations via computational fluid dynamics (CFD) method. A 1D pyrolysis model has been developed based on Open FOAM, an open source toolbox in order to enhance Fire FOAM solver potential to simulate flame spread on solid materials. The prediction of developed pyrolysis model has been compared with empirical data for surface temperature and mass loss rate of PMMA. Uncertainties in experimental measurements are the reason input parameters are not unique, thus, a particular set of model input parameters have to be determined to reach an acceptable agreement between pyrolysis model and experimental results. Using optimization method is very common in this situation. The non-linear nature of problem and input parameters being numerous would make optimization calculation expensive. In this article, the effects of input parameters (as PMMA properties) have been investigated, firstly to observe the effects of material properties on pyrolysis process. In the other hand, the most influential properties are introduced in order to reduce computational costs in optimization process by optimizing only these properties.

### 1- مقدمه

اشتعال در مواجهه با شار حرارتی ناشی از شعله اهمیت بسیاری دارد. آتش در بسیاری از آتش‌سوزی‌ها با شروع از یک نقطه (نقطه اشتعال) در زمان کوتاهی به نقاط مختلف گسترش پیدا می‌کند. زمانی که ماده جامد قابل اشتعال در معرض یک شار حرارتی خارجی قابل توجه قرار می‌گیرند، فرآیندی به نام

در سال‌های اخیر محققان به رفتار ماده جامد اشتعال‌پذیر در زمانی که در معرض شعله آتش قرار می‌گیرد توجه بسیاری کرده‌اند. برای پیش‌بینی رفتار و گسترش آتش در مقیاس‌های بزرگ توضیح و بیان تغییرات ماده جامد قابل

### Please cite this article using:

Sh. Motaghian, H. Pashdarshahri, Developing a pyrolysis model for numerical simulation of thermal decomposition in combustible solid, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 86-94, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تجربی خواص می‌شود. می‌توان از روش‌های بهینه‌سازی برای تعیین پارامترهای ورودی استفاده کرد. به کمک این روش‌های پارامترهای ورودی به شکلی تعیین می‌شوند (در بازه داده‌های تجربی) تا نتایج مدل آتش‌کافت تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی داشته باشد. در این مقاله با بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر نتایج مدل آتش‌کافت توسعه یافته، پارامترهای ورودی با تأثیر بیشتر مشخص شده‌اند. در روش‌های بهینه‌سازی می‌توان به جای بهینه‌سازی تمامی پارامترهای ورودی، تنها پارامترها با تأثیر بیشتر را بهینه‌سازی کرد و هزینه محاسباتی بهینه‌سازی را کاهش داد.

## 2- معادلات حاکم

برای تجزیه جامد بدون زغال‌شدگی پی‌ام‌ای به گاز قابل اشتعال معادله واکنش تک‌مرحله‌ای رابطه (1) در نظر گرفته شده است:



در مدل توسعه داده شده در این مطالعه خواص ترموفیزیکی به صورت تابعی از دما در نظر گرفته شده‌اند که این تابعیت به شکل رابطه (2) بیان می‌شود [13].

$$\varphi = \varphi_0 \left( \frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^{n_\varphi} \quad (2)$$

در رابطه (2) نشانگر خاصیت مورد نظر و  $\varphi_0$  و  $n_\varphi$  ثابت‌هایی است که باید به‌عنوان پارامترهای ورودی برای مدل مشخص شوند. در تابعیت خواص به دما اگر  $n_\varphi$  مثبت باشد، با افزایش دما مقدار خاصیت افزایش می‌یابد و اگر  $n_\varphi$  منفی باشد افزایش دما سبب کاهش آن می‌شود. مدل توسعه داده شده به شکل کلی و برای واکنش‌های چند مرحله‌ای نیز قابل استفاده است. چند گونه جامد در واکنش‌های چند مرحله‌ای وجود دارد؛ بنابراین نیاز است خواص متوسط‌گیری شده برای خواص مواد در هر سلول محاسباتی محاسبه شود. متوسط‌گیری برای هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی به صورت رابطه (3) در هر سلول محاسباتی صورت می‌گیرد.

در روابط (3-5) اندیس  $i$  برای خواص نشانگر آن خاصیت در جامد آم است.

$$k = \sum_{i=1}^n k_i X_i \quad (3)$$

$$c_p = \sum_{i=1}^n c_{p,i} Y_i \quad (4)$$

$$\rho = \sum_{i=1}^n \rho_i X_i \quad (5)$$

## 2-1- معادلات بقا

در مدل یک بعدی توسعه داده شده در این مطالعه معادلات بقایی شامل سه معادله بقایی می‌شود؛ 1- معادله بقای جرم جامد، 2- معادله بقای گونه جامد و 3- معادله بقای انرژی گونه جامد. در این قسمت معادلات بقایی به صورت کلی برای واکنش‌های چند مرحله‌ای بیان شده‌اند. معادله بقای جرم جامد در رابطه (6) ارائه شده است. در رابطه (6)،  $\dot{\omega}_{g,j}'''$  نرخ تولید گاز در واکنش  $j$ ام و  $n$  تعداد واکنش‌هاست.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \sum_{j=1}^n \dot{\omega}_{g,j}''' \quad (6)$$

آتش‌کافت<sup>1</sup> اتفاق می‌افتد [2,1]. در این فرآیند شار حرارتی خارجی سبب تغییر دما در جامد می‌شود. زمانی که دمای جامد به حد بحرانی (دمای آتش‌کافت) می‌رسد، سبب تغییر ساختار جامد و شکسته شدن مولکول‌های آن می‌شود. گازهای ناشی از آتش‌کافت با تغییر در ساختار مولکولی تولید می‌شوند و از سطح جامد جدا می‌شوند. این گازها نقش سوخت را در احتراق ایفا می‌کنند. نرخ تولید گازهای ناشی از آتش‌کافت با تشکیل شعله و افزایش شار حرارتی نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه سوخت بیشتری به شعله رسیده و سبب افزایش حرارت آزاد شده توسط شعله می‌شود.

در این فرآیند افزایش انتقال حرارت سبب افزایش نرخ تولید آتش‌کافت می‌شود و افزایش نرخ تولید آتش‌کافت سبب افزایش حرارت آزاد شده و به تبع آن افزایش انتقال حرارت می‌شود. این فرآیند متقابل بین نرخ تولید گاز و افزایش انتقال حرارت سبب گسترش آتش می‌شود. این مواد به دلیل استفاده از جامدات در ساختمان‌ها نقش اصلی را در گسترش آتش به‌عنوان سوخت ایفا می‌کنند. ماده پلیمری پی‌ام‌ای<sup>2</sup> در مطالعات انجام شده در سال‌های اخیر در زمینه گسترش آتش و آتش‌کافت به دلیل کاربردهای فراوان به‌عنوان نمونه مورد مطالعه قرار گرفته است [3]. فرآیند آتش‌کافت در مواد پلیمری مختلف به سه شکل زیر اتفاق می‌افتد: 1- بدون زغال‌شدگی<sup>3</sup>، 2- با زغال‌شدگی<sup>4</sup> و 3- آماسه<sup>5</sup> [4]. پی‌ام‌ای از دسته موارد با آتش‌کافت بدون زغال‌شدگی است. در این دسته از مواد در زمانی که مولکول‌های جامد به مولکول‌های گازی شکسته می‌شوند ماده جامد دیگری باقی نمی‌ماند.

یکی از روش‌های بررسی رفتار آتش‌سوزی در مقیاس‌های بزرگ استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی<sup>6</sup> است. در این روش نیاز به شبیه‌سازی فرآیند آتش‌کافت در کنار شبیه‌سازی شعله و احتراق است. مطالعات بسیاری در زمینه مدل‌سازی آتش‌کافت انجام شده است. دی بلاسی [5] و کوئنتیر و ایکبال [6] نخستین مدل‌های آتش‌کافت را برای مواد بدون زغال‌شدگی توسعه دادند. در سال‌های اخیر لانتبرگر و فرناندز-پلو [7] یک مدل آتش‌کافت در قالب کد رایانه‌ای جیپایرو<sup>7</sup> [8] برای تمامی مواد یادشده توسعه دادند که این مدل پیچیده‌ترین مدل در بین مدل‌های آتش‌کافت است. استیلیاروف و همکاران [9] مدل آتش‌کافت ترمال کین<sup>8</sup> را توسعه دادند. تمامی مدل‌های مذکور و مدل‌های یک بعدی است، اما استیلیاروف و همکاران [10,11] مدل آتش‌کافت دوبعدی ترمال کین تودی<sup>9</sup> را توسعه دادند.

در مقاله حاضر یک مدل آتش‌کافت یک بعدی در حلگر فایرفوم<sup>10</sup> بر مبنای کدی رایانه‌ای براساس کد متن‌باز اپن‌فوم<sup>11</sup> [12] توسعه داده شده است. هدف از توسعه این مدل بهبود نتایج مدل آتش‌کافت حلگر است تا با توجه به قابلیت‌های آن در شبیه‌سازی گسترش شعله استفاده شود. پارامترهای اصلی در پدیده آتش‌کافت دمای سطح جامد و نرخ جرم از دست رفته است.

خواص حرارتی مواد به‌عنوان پارامترهای ورودی برای مدل مطرح است. در گزارش‌ها تجربی این خواص در یک بازه قرار می‌گیرند و دارای مقادیر یکتا نیست. شرایط آزمایشگاهی متفاوت سبب مشاهده اختلاف در اندازه‌گیری‌های

<sup>1</sup> Pyrolysis

<sup>2</sup> PMMA (PolyMethylMethAcrylate)

<sup>3</sup> Non-Charring

<sup>4</sup> Charring

<sup>5</sup> Intumescent

<sup>6</sup> Computational Fluid Dynamics (CFD)

<sup>7</sup> Gpyro

<sup>8</sup> ThermalKin

<sup>9</sup> ThermalKin2D

<sup>10</sup> FireFOAM

<sup>11</sup> OpenFOAM

در مقاله حاضر با شبیه سازی آتش کافت در شرایط شکل 1 سعی در ارزیابی عملکرد مدل توسعه داده شده است. همان طور که در شکل 1 آورده شده یک نمونه از ماده پی.ام.ام.ای با ضخامت 0.04 متر در نظر گرفته شده در معرض یک شار حرارتی تشعشعی به اندازه  $40 \text{ kW/m}^2$  قرار گرفته است. لازم به ذکر است که نه تنها ابعاد در راستاهای دیگر در پاسخ مساله اثری ندارند (به دلیل یک بعدی بودن مدل آتش کافت) بلکه اگر ضخامت ماده بسیار کم نباشد، ابعاد در جهت z نیز تأثیری در نتایج نخواهد داشت.

### 2-3- شرایط مرزی

در مدل توسعه داده شده آتش کافت، برای حل معادله انرژی، نیاز به دو شرط مرزی برای سطح بالایی ( $z = 0$ ) و سطح پایینی ( $z = 0.04$ ) دارد. این شرایط مرزی در روابط (13,14) ارائه شده اند. در معادله (13)، ضریب انتقال حرارت جابه جایی است که در این مطالعه برابر با  $10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  در نظر گرفته شده است [7].  $T_s$  دمای سطح جامد،  $T_\infty$  دمای محیط و  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن است. جملات (1,2) در روابط (13) نشان دهنده اتلاف انرژی در مرز بالایی جامد است؛ جمله نخست مربوط به انتقال حرارت جابه جایی و جمله دوم ناشی از تشعشع در سطح جامد و برای سطح پایینی جامد نیز شرط مرزی عایق در نظر گرفته شده است.

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{-h(T_s - T_\infty)}{(1)} - \frac{\varepsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4)}{(2)} \quad (13)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0.04} = 0 \quad (14)$$

### 3- داده های تجربی

به وجود داده های تجربی برای ارزیابی مدل آتش کافت توسعه داده شده در این مطالعه در راستای قیاس آن ها با نتایج مدل نیاز است. در این مقاله از مطالعه تجربی کاشیواگی و اهللمیلر [14] به عنوان مرجع داده های تجربی استفاده شده است. در مطالعه تجربی یادشده اثرات میزان اکسیژن در محیط و مقدار شار تشعشعی بر آتش کافت و بر تغییرات دو پارامتر دمای سطح جامد و نرخ جرم از دست رفته جامد در زمان مورد بررسی قرار گرفته است.

### 4- نتایج و بحث

در این مطالعه پاسخ مدل آتش کافت توسعه داده شده به پارامترهای ورودی مورد بررسی قرار گرفته است. این پارامترهای ورودی شامل چهار دسته است: 1- پارامترهای حل عددی، 2- خواص حرارتی جامد، 3- خواص تابشی جامد و 4- خواص سینماتیکی. منظور از پارامترهای حل عددی اندازه شبکه تولیدشده و گام زمانی حل است. چهار خاصیت حرارتی جامد به عنوان پارامترهای ورودی در حل مورد استفاده قرار می گیرند؛ ضریب هدایت حرارتی، چگالی، ظرفیت حرارتی ویژه و گرمای آتش کافت. به دلیل وجود

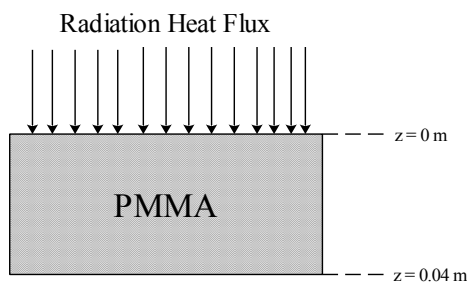


Fig. 1 Schematic of geometry of problem

شکل 1 شماتیک هندسه مساله

معادله بقای گونه جامد از رابطه (7) به دست می آید.

$$\frac{(\partial \rho Y_{i,s})}{\partial t} = \sum_{j=1}^n \dot{\omega}_{i,f,j,s}''' - \sum_{j=1}^n \dot{\omega}_{i,d,j,s}''' \quad (7)$$

در این رابطه،  $Y_{i,s}$  کسر جرمی جامد ام،  $\dot{\omega}_{i,f,j,s}'''$  نرخ تولید جامد ام در واکنش ام و  $\dot{\omega}_{i,d,j,s}'''$  نرخ مصرف جامد ام در واکنش ام است.

معادله بقای انرژی به فرم انتالپی محسوس برای فاز جامد به صورت رابطه (8) است.

$$\rho \frac{(\partial h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \sum_{j=1}^n Q_j + \dot{q}_{\text{rad}}'' \quad (8)$$

در رابطه (8) انتالپی محسوس متوسط گیری شده سلول محاسباتی، z جهت عمود بر سطح جامد به سمت داخل،  $Q_j$  نرخ حجمی انرژی مصرفی یا تولیدی در واکنش ام و  $\dot{q}_{\text{rad}}''$  انرژی جذب شده به واسطه تشعشع در هر سلول محاسبات به صورت رابطه (9) است.

$$Q_1 = -H_p \dot{\omega}_{\text{PMMA}}''' \quad (9)$$

در رابطه (9)،  $H_p$  گرمای آتش کافت و  $\dot{\omega}_{\text{PMMA}}'''$  نرخ مصرف پی.ام.ام.ای است. پس از ورود تابش به داخل جسم قسمتی از آن در هر مرز سلول محاسباتی منعکس، قسمتی جذب و قسمتی از آن عبور می کند. قسمت جذب شده تشعشع به کمک رابطه (10) تخمین زده می شود.

$$\begin{aligned} \dot{q}_{\text{rad}}'' &= \frac{\dot{q}_{\text{top}}'' A_{\text{top}} - \dot{q}_{\text{bottom}}'' A_{\text{bottom}}}{V_{\text{cell}}} \\ &= \varepsilon \dot{q}_{\text{ext}}'' \frac{f_a(z_{\text{top}}) A_{\text{top}} - f_a(z_{\text{bottom}}) A_{\text{bottom}}}{V_{\text{cell}}} \end{aligned} \quad (10)$$

در این رابطه،  $A_{\text{top}}$  مساحت مرز بالایی سلول محاسباتی،  $A_{\text{bottom}}$  مساحت سطح پایینی سلول محاسباتی،  $\varepsilon$  بیانگر ضریب صدور تشعشعی جامد،  $\dot{q}_{\text{ext}}''$  شار حرارتی تابشی خارجی بر سطح جامد،  $f_a$  تابع میرایی تشعشع،  $z_{\text{top}}$  فاصله سطح جامد تا مرز بالایی سلول محاسباتی،  $z_{\text{bottom}}$  فاصله سطح جامد تا مرز پایینی سلول محاسباتی و  $V_{\text{cell}}$  حجم سلول محاسباتی است. تابع میرایی تشعشع به صورت یک تابع نمایی مانند رابطه (11) تخمین زده می شود.

$$f_a(z) = e^{-\kappa z} \quad (11)$$

در این رابطه،  $\kappa$  ضریب میرایی تشعشعی است [13]. در معادلات بقای یادشده نیاز به محاسبه نرخ های واکنش است که با فرض آرنیوس بودن واکنش ها از قانون آرنیوس برای محاسبه این پارامترهای استفاده می شود. برای واکنش تجزیه پی.ام.ام.ای نرخ مصرف این ماده به کمک رابطه آرنیوس در هر سلول محاسباتی به شکل رابطه (12) محاسبه می شود.

$$\dot{\omega}_{\text{PMMA}}''' = \rho_{\text{PMMA}} Y_{\text{PMMA}}^n A_{\text{Arr}} \times \exp\left(\frac{E_a}{R_u T}\right) \quad (12)$$

با توجه به رابطه (12)، n درجه واکنش که در این مساله برابر با واحد فرض شده است. منظور از A ضریب پیش نمایی و  $E_a$  انرژی فعال سازی است. برای محاسبه نرخ جرم از دست رفته از رابطه (12) بر کل جامد (یک بعدی) انتگرال گیری می شود و به تعبیری نرخ مصرف ماده جامد در تمامی سلول های محاسباتی با یکدیگر جمع می شوند. در این مدل آتش کافت، حرکت گاز در جامد (فرض جامد متخلخل) در نظر گرفته نمی شود و فرض می شود که تمامی گاز تولیدی در جامد در یک گام زمانی محاسباتی به شکل لحظه ای از سطح آن آزاد می شوند.

### 2-2- هندسه مساله

جدول 2 مقادیر نامی خواص مستقل از دما [18]

Fig. 2 Nominal values of temperature independent properties [18]

مقدار اسمی	پارامترهای ورودی مستقل از دما
0.21	هدایت حرارتی (W/(m.K))
1664.66	ظرفیت گرمای ویژه (J/(kg.K))
1187.80	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
500	ضریب میرایی تابش (m <sup>-1</sup> )
125	انرژی فعال‌سازی (kJ/mol)
5×10 <sup>8</sup>	ضریب پیش‌نمایی (s <sup>-1</sup> )
0.86	ضریب گسیل تابشی (-)
10 <sup>6</sup>	گرمای آتش کافت

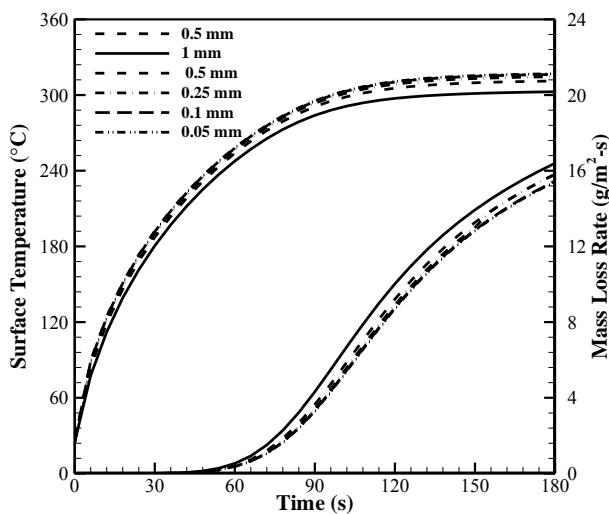


Fig. 2 Grid independency study of present model

شکل 2 بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی در مدل حاضر

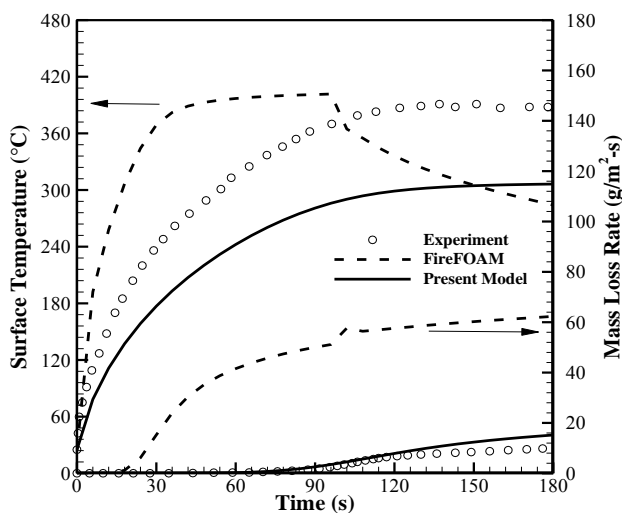


Fig. 3 Comparison between prediction of FireFOAM pyrolysis model and present model

شکل 3 مقایسه نتایج مدل آتش کافت فایرفوم با مدل توسعه‌داده‌شده در این مطالعه

تابشی 40 kW/m<sup>2</sup> در کنار نتایج تجربی کاشیواگی و اهلیمیلر [14] با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با توجه به نمودارهای شکل 3 مدل آتش کافت توسعه داده شده در این مطالعه نتایج بهتری نسبت به مدل اولیه حلگر فایرفوم دارد. در

تابش و در نظر گرفتن آن لازم است ضریب گسیل و ضریب میرایی تابش به‌عنوان خواص تابشی مشخص شوند. با توجه به فرض آرنیوسی بودن واکنش در مدل، دو پارامتر انرژی فعال‌سازی و ضریب پیش‌نمایی نیز به‌عنوان خواص سنتتیکی مطرح می‌شوند.

معمولاً در کاربردهای مهندسی، خواص حرارتی، خواص تابشی و خواص سینماتیکی به کمک مطالعات تجربی تعیین می‌شوند. مطالعات آزمایشگاهی متعددی در زمینه رفتار آتش کافت جامد صورت گرفته است. خواص یادشده گزارش شده در آزمایشات به شکل یکتا نیست و به دلیل تفاوت در شرایط آزمایشگاهی، نتایج تجربی تفاوت‌های قابل توجهی با یکدیگر دارند [15]. به دلیل سادگی مدل و در نظر نگرفتن بسیاری از پیچیدگی‌های رفتار ماده در مدل‌سازی عددی، خواص مواد به طور معمول در مدل‌های توسعه داده شده [17,16,7] به روش مدل‌سازی معکوس<sup>1</sup> مشخص می‌شوند. در مدل‌سازی معکوس با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی، خواص ترموفیزیکی ماده را به شکلی انتخاب می‌کنند تا نتایج حاصل از یک مدل آتش کافت با نتایج آزمایشگاهی مطابقت مطلوبی داشته باشد. قابل توجه است که در فرآیند بهینه‌سازی سعی می‌شود تا مقادیر نهایی خواص در بازه اندازه‌گیری‌های تجربی قرار داشته باشد.

در این بخش مقایسه نتایج مدل توسعه داده شده با نتایج مدل اولیه حلگر فایرفوم در کنار نتایج تجربی ارائه شده است. این مقایسه برای پارامترهای دمای سطح و نرخ جرم از دست رفته انجام شده است. از مقادیر اسمی خواص گزارش شده توسط بل [18]، به‌عنوان ورودی در هر دو مدل استفاده شده است. این مقادیر اسمی در جدول 1 و 2 آورده شده‌اند. در جدول 1 برای خواصی که تابع دما در نظر گرفته شده‌اند، دو ضریب با توجه به رابطه (2) مشخص شده‌اند و برای خواص مستقل از دما مقادیر اسمی در جدول 2 گزارش شده است.

#### 1-4- مطالعه شبکه و گام زمانی

اندازه شبکه مدل آتش کافت به‌عنوان یک پارامتر ورودی محسوب می‌شود که در دقت حل عددی به شکل یک‌بعدی تأثیرگذار است. پاسخ مدل با ورودی‌های اسمی با تابش 40 kW/m<sup>2</sup> در اندازه شبکه‌های مختلف و گام‌های زمانی متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل 2 شبکه با اندازه 0.1 میلی‌متر به‌عنوان شبکه مناسب در ادامه محاسبات مورد استفاده قرار گرفته است. به همین شکل در گام زمانی 0.1 ثانیه، حل عددی از گام زمانی مستقل است.

#### 2-4- مقایسه نتایج مدل آتش کافت فایرفوم و مدل توسعه داده‌شده

نتایج مدل اولیه و مدل توسعه داده شده در این مطالعه در شکل 3 در شار

جدول 1 ضرایب اسم خواص ترموفیزیکی تابع دما [18]

ضرایب با توجه به رابطه (2)		پارامترهای ورودی تابع دما
$\phi_0$	$n_\phi$	
0.192	0.12	هدایت حرارتی (W/(m.K))
1411	0.97	ظرفیت گرمای ویژه (J/(kg.K))
1178	-0.059	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )

<sup>1</sup> Reverse modelling

توجه به شکل 4 با افزایش  $k_0$  شیب افزایش دما سطح کاهش اندکی می‌یابد اما در نهایت در زمان 180 ثانیه دما سطح بدون تغییر باقی می‌ماند و نرخ جرمی تجزیه جامد کاهش می‌یابد و به نتایج تجربی نزدیک‌تر می‌شود. افزایش هدایت حرارتی سبب کاهش دمای هر نقطه در جامد می‌شود و به دلیل این که نرخ انجام واکنش، با افزایش دما افزایش می‌یابد، در دماهای پایین‌تر نرخ جرم از دست رفته کمتر است. این موضوع سبب می‌شود که نرخ کلی جرم از دست‌رفته جامد کاهش یابد. تأثیر افزایش  $k_0$  بر نرخ جرم از دست رفته به مراتب بیشتر تأثیر آن بر دمای سطح است. این موضوع به این دلیل است که با توجه به شرایط مرزی مساله، تأثیر تشعشع به مراتب بیشتر از هدایت در افزایش دمای سطح است. زمانی که دمای جامد افزایش پیدا می‌کند، با توجه به رابطه (2)، مقادیر  $n_k$  افزایش یافته، در نتیجه هدایت حرارتی افزایش می‌یابد و همان‌طور که در شکل 5 دیده می‌شود سبب کاهش نرخ جرم از دست رفته می‌شود. تأثیر افزایش  $n_k$  بر دمای سطح مانند شکل 5 قابل توجه نیست. این موضوع به این معنی است که تابعیت هدایت حرارتی به دما تأثیری زیادی بر دمای سطح جامد ندارد.

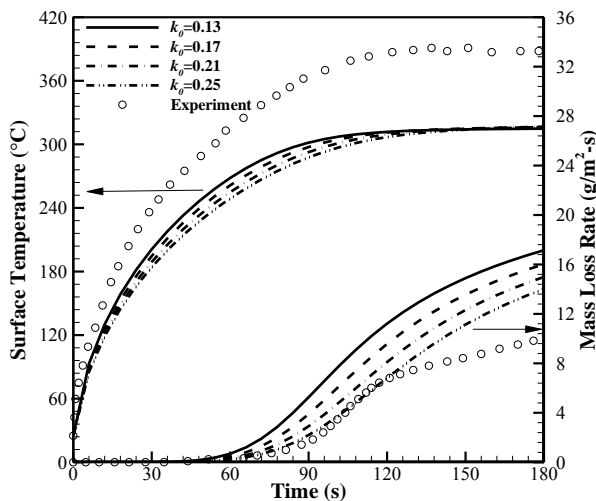


Fig. 4 Modeled surface temperature and mass loss rate at different  $k_0$   
شکل 4 مقادیر مدل‌سازی شده دمای سطح و نرخ جرم از دست‌رفته در  $k_0$ های مختلف

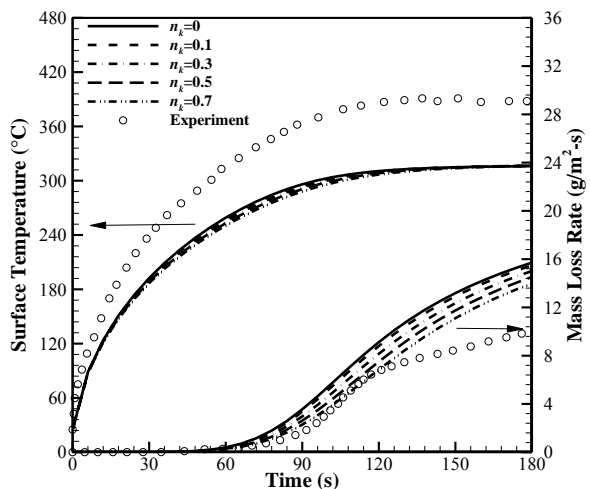


Fig. 5 Modeled surface temperature and mass loss rate at different  $n_k$   
شکل 5 مقادیر مدل‌سازی شده دمای سطح و نرخ جرم از دست‌رفته در  $n_k$ های مختلف

نمودار تغییرات دما در حلگر فایرفوم دما پس از ثانیه 100 کاهش پیدا می‌کند که این موضوع با فیزیک مساله مطابقت ندارد، اما نتایج مدل حاضر از نظر کیفی با نتایج تجربی هم‌خوانی دارد و خطای کمتری در آن مشاهده می‌شود. پیش‌بینی مدل فایرفوم در نمودار تغییرات نرخ جرمی تجزیه جامد بسیار بیشتر از واقعیت و این مقادیر در مدل حاضر به مراتب نزدیک‌تر به مقادیر تجربی است. نتایج مدل حاضر با وجود این که از نظر کیفی و کمی نسبت به نتایج فایرفوم بسیار دقیق‌تر و به واقعیت نزدیک‌تر است، اما همچنان دارای خطا در پیش‌بینی دمای سطح و نرخ جرم از دست‌رفته است. دلیل این امر استفاده از مقادیر اسمی خواص و در نظر نگرفتن فیزیک‌های متعدد و پیچیده فرآیند آتش کافت است (برای نمونه استفاده از واکنش تک مرحله‌ای) که برای رفع این موضوع، همان‌طور که یاد شد، در مدل‌سازی‌هایی که توسط دیگران انجام شده نیاز به بهینه‌سازی پارامترهای ورودی است تا نتایج به نتایج تجربی نزدیک و مدل دقت لازم برای پیش‌بینی فرآیند آتش کافت را داشته باشد. این موضوع سبب می‌شود که نتایج مطلوب حاصل شوند و از سویی هزینه محاسبات در گسترش شعله زمانی که مدل در کنار حلگر جریان قرار می‌گیرد به دلیل سادگی و نداشتن پیچیدگی در مدل آتش کافت کاهش می‌یابد.

در این مقاله با بررسی تأثیر پارامترهای ورودی (آنالیز حساسیت) بر پیش‌بینی دمای سطح و نرخ جرمی از دست رفته که توسط مدل صورت گرفته است سه هدف دنبال می‌شود:

- 1- تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر دمای سطح و نرخ جرمی از دست‌رفته چگونه است و تأثیرگذاری هر یک چه مقدار است.
- 2- در چه مقادیری از پارامترهای به صورت مجزا نتایج در ماده پی‌ام‌ام‌ای به نتایج آزمایشگاهی نزدیک می‌شود و کدامیک از پارامترها به‌عنوان پارامترهای غالب نیاز به بهینه‌سازی دارند؟
- 3- تحلیل رفتار مواد غیرزغال‌شدگی با خواص مختلف در مواجهه با آتش. بازه تغییرات به گونه‌ای است که با بازه خواص اندازه‌گیری‌شده در آزمایش‌ها مختلف هم‌خوانی داشته باشد. با تغییر خاصیت مورد نظر در بررسی تأثیر هر یک از خواص برای خواص دیگر از جداول 1 و 2 استفاده شده است.

#### 3-4- تأثیر خواص حرارتی

خواص حرارتی جامد عبارت است از هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه، چگالی و گرمای آتش کافت. تأثیر هر کدام از این خواص مورد بررسی قرار گرفته‌اند. قابل توجه است که با توجه به رابطه (2) هر یک از خواص حرارتی دارای دو پارامتر تأثیرگذار است. یکی  $\varphi_0$  نشانگر مقدار خاصیت در دمای محیط و دیگری  $n_\varphi$  که بیانگر مقدار وابستگی خاصیت به دماست. هر میزان قدر مطلق  $n_\varphi$  بیشتر باشد با تغییر دما از مقدار  $\varphi_0$  فاصله بیشتری می‌گیرد. مقادیر مثبت  $n_\varphi$  بیانگر افزایش خاصیت با افزایش دماست، هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ماده پی‌ام‌ام‌ای با توجه به نتایج تجربی با افزایش دما افزوده و از چگالی آن کاهیده می‌شود. مقادیر صفر  $n_\varphi$  نشانگر صرف نظر شدن از تابعیت  $\varphi$  به دماست.

با توجه به شکل 4 با افزایش  $k_0$ ، شیب افزایش دما سطح اندکی کاهش می‌یابد، اما در نهایت در زمان 180 ثانیه دما سطح بدون تغییر باقی می‌ماند و نرخ جرمی تجزیه جامد کاهش می‌یابد و به نتایج تجربی نزدیک‌تر می‌شود. افزایش هدایت حرارتی سبب کاهش دمای هر نقطه در جامد می‌شود و به دلیل این که نرخ انجام واکنش، با افزایش دما افزایش می‌یابد، در دماهای پایین‌تر نرخ جرم از دست رفته کمتر است. این موضوع سبب می‌شود که با

مقدار  $n_p$  چگالی در هر سلول کاهش می‌یابد که با توجه به شکل 9 سبب افزایش بسیار اندک در دمای سطح و کاهش در نرخ جرم از دست رفته می‌شود. افزایش (یا کاهش) چگالی سبب دو تأثیر متقابل می‌شود؛ یکی افزایش جرم در سلول محاسباتی که با توجه به ثابت بودن ظرفیت گرمایی ویژه سبب کاهش دما در یک شار حرارتی ثابت می‌شود. این کاهش دما نرخ جرم‌گازی تولیدی را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر افزایش چگالی غلظت جرمی در سلول را افزایش می‌دهد. قانون آرنیوس با افزایش نرخ واکنش و افزایش نرخ جرمی تولید گاز را منجر می‌شود. در کاهش چگالی نیز این اثرات معکوس است. در شکل 8 تأثیر اثر اول بر نرخ تولید جرمی غالب است. در شکل 9 اثر دوم غالب است و باعث کاهش نرخ جرم از دست رفته می‌شود. همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌شود، تأثیر تغییرات چگالی در نرخ جرمی از دست رفته بیشتر است که با کاهش آن نتایج را به نتایج تجربی نزدیک می‌کند.

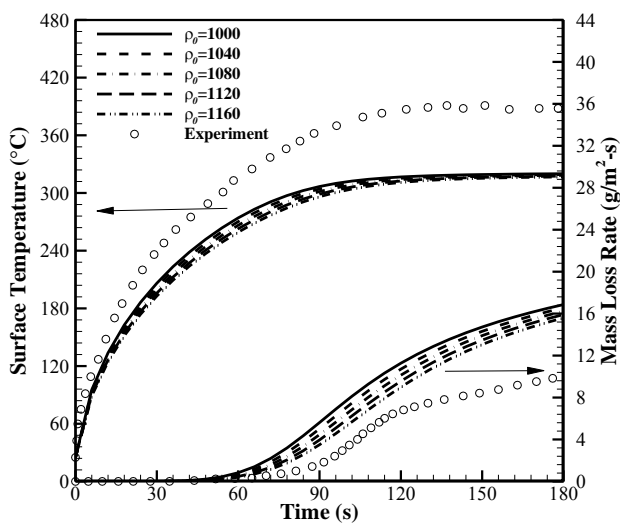


Fig. 8 Modeled surface temperature and mass loss rate at different  $\rho_0$   
 شکل 8 مقادیر مدل‌سازی‌شده دمای سطح و نرخ جرم از دست‌رفته در  $\rho_0$  های مختلف

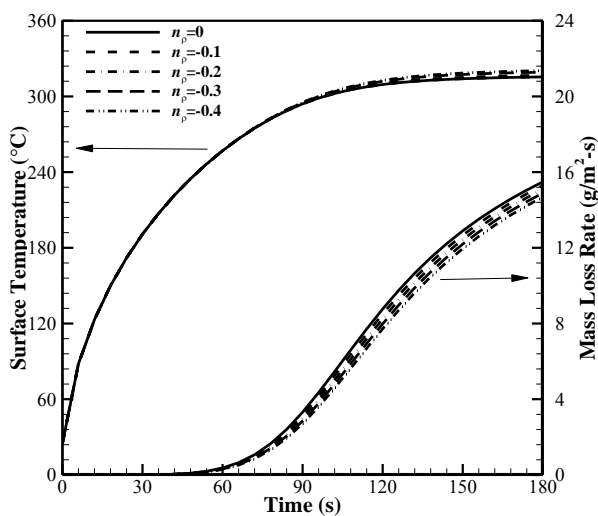


Fig. 9 Modeled surface temperature and mass loss rate at different  $n_p$   
 شکل 9 مقادیر مدل‌سازی‌شده دمای سطح و نرخ جرم از دست‌رفته در  $n_p$  های مختلف

با انجام محاسبات عددی برای  $c_{p,0}$  های مختلف، با توجه به شکل‌های 6 و 7 افزایش  $n_c$  و  $c_{p,0}$  که منجر به افزایش ظرفیت گرمایی ویژه می‌شود، به کاهش دمای سطح و نرخ جرمی از دست‌رفته منجر می‌شود. با افزایش ظرفیت گرمایی به‌ازای شار حرارتی یکسان در یک سلول محاسباتی دما کمتر افزایش می‌یابد. به همین دلیل دمای سطح کاهش می‌یابد و با توجه به وابستگی نرخ واکنش به دما، تولید گاز و نرخ جرمی تجزیه نیز کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل 6 و 7 مشاهده می‌شود با افزایش ظرفیت گرمایی ویژه در ابتدا نرخ جرمی از دست‌رفته به نتایج آزمایشگاهی نزدیک می‌شود و سپس با افزایش بیشتر آن از آن‌ها دور می‌شود، اما از طرفی دیگر دمای سطح از واقعیت فاصله می‌گیرد. تغییرات  $c_{p,0}$  به نسبت تغییرات  $n_c$  تأثیر بیشتری بر نتایج مدل آتش کافت می‌گذارد.

بر خلاف هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه، با افزایش دما چگالی کاهش می‌یابد. در شکل 8 با افزایش  $\rho_0$  چگالی به طور کلی افزایش می‌یابد که سبب کاهش در دمای سطح و نرخ جرمی از دست رفته می‌شود. با کاهش

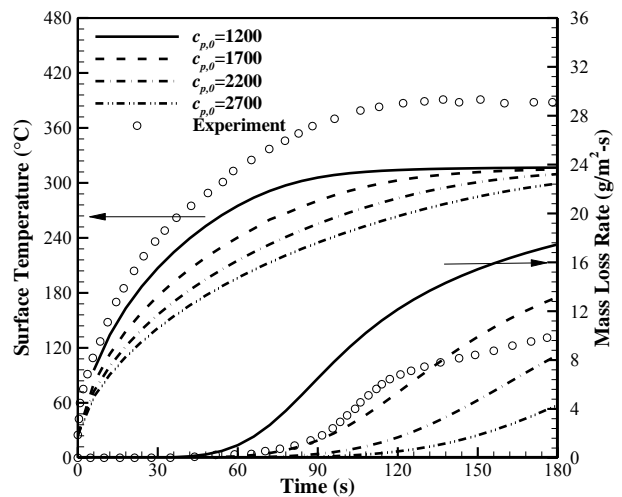


Fig. 6 Modeled surface temperature and mass loss rate at different  $c_{p,0}$   
 شکل 6 مقادیر مدل‌سازی‌شده دمای سطح و نرخ جرم از دست‌رفته در  $c_{p,0}$  های مختلف

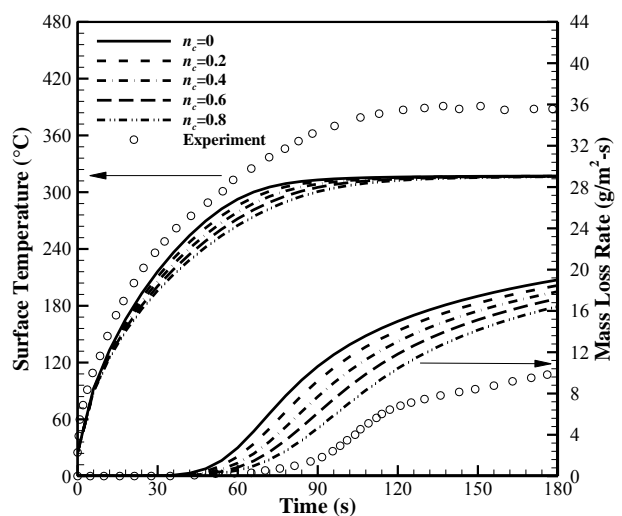


Fig. 7 Modeled surface temperature and mass loss rate at different  $n_c$   
 شکل 7 مقادیر مدل‌سازی‌شده دمای سطح و نرخ جرم از دست‌رفته در  $n_c$  های مختلف

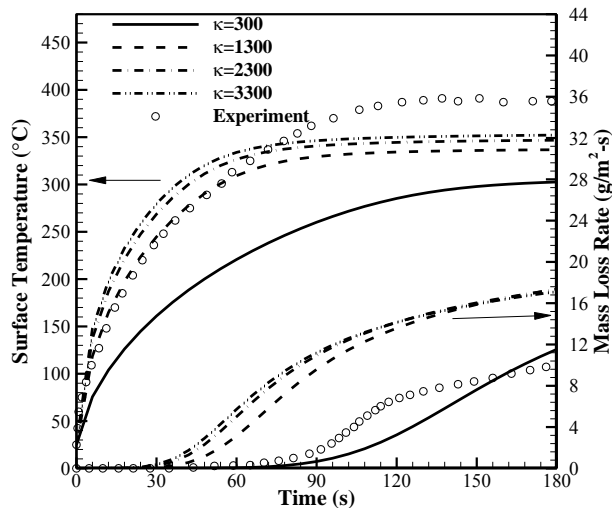


Fig. 11 Modeled surface temperature and mass loss rate at different attenuation coefficients

شکل 11 مقادیر مدل‌سازی شده دمای سطح و نرخ جرم از دست‌رفته در ضریب میرایی‌های مختلف

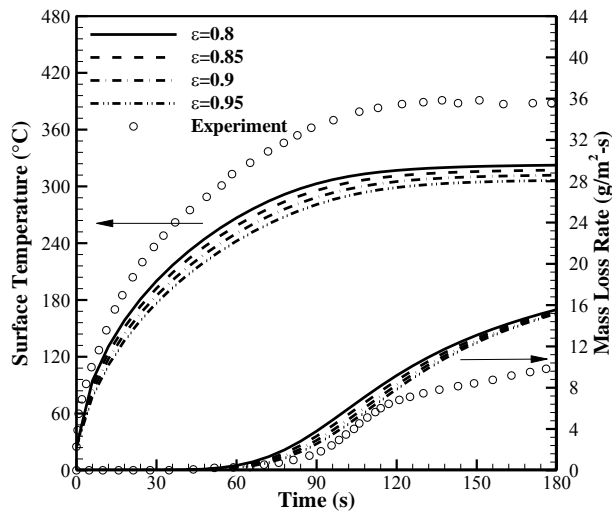


Fig. 12 Modeled surface temperature and mass loss rate at different emissivities

شکل 12 مقادیر مدل‌سازی شده دمای سطح و نرخ جرم از دست‌رفته در ضریب صدورهای مختلف

صدور افزایش می‌یابد. از سویی دیگر با افزایش این خاصیت ماده در شرط مرزی رابطه (13) شار حرارت تابشی از دست‌رفته در سطح جامد افزایش می‌یابد. نتایج ارائه شده بیانگر تأثیر بیشتر شرط مرزی سطح است که نه تنها سبب کاهش دمای سطح می‌شود بلکه با کاهش دما در سلول‌های داخلی نرخ انجام واکنش را نیز کاهش می‌دهد.

#### 4-5- تأثیر خواص سنتیکی

پارامترهای ثابت مدل آرنیوس در رابطه (12) یعنی انرژی فعال‌سازی و ضریب پیش‌نمایی به‌عنوان خواص سنتیکی ماده جامد مطرح است. این خواص در محاسبه نرخ واکنش تجزیه جامد مؤثر است. بازه وسیعی از مقادیر برای این ثابت‌ها به دلیل پیچیدگی در تعیین این پارامترها به صورت تجربی گزارش شده است. مدل آتش‌کافت در این مطالعه در بازه‌ای محدود از این

در شکل 10 با افزایش مقدار گرمای آتش‌کافت و با توجه به رابطه (8) (گرمای آتش‌کافت به شکل چاه حرارتی در معادله بقای انرژی جامد ظاهر می‌شود)، دما در سلول‌های داخلی کاهش می‌یابد و سبب کاهش در نرخ تولید گاز می‌شود. براساس شکل 10 افزایش گرمای آتش‌کافت تأثیر چندانی بر دمای سطح ندارد، اما سبب بهبود نتایج مدل از نظر کمی و کیفی (با توجه به نتایج تجربی) در نرخ جرم از دست‌رفته می‌شود.

#### 4-4- تأثیر خواص تابشی

خواص تابشی شامل صدور تابشی و مقدار میرایی تابش در جذب داخلی است. این خواص مستقل از دما و ثابت در نظر گرفته شده‌اند. این خواص از آن جهت دارای اهمیت هستند که تابش در زمان حضور شعله نقش پرنگی در انتقال حرارت بین شعله و جامد و بالا رفتن دمای جامد ایفا می‌کند. انرژی از دست‌رفته جامد توسط تابش در شرط مرزی جامد نیز ضریب صدور را تعیین می‌کند (با توجه به رابطه (13)).

در شکل 11 با افزایش ضریب میرایی، دمای سطح و نرخ جرمی از دست‌رفته افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند. این موضوع سبب نزدیک‌شدن نتایج دمای سطح و مقادیر پیش‌بینی شده نرخ جرم از دست‌رفته به نتایج آزمایشگاهی می‌شود. با توجه به رابطه (10) افزایش نرخ میرایی به معنای افزایش سهم جذبی سلول از تابش است، اما سلول‌های داخلی کمتری تابش قابل توجهی را جذب می‌کنند و تابش در عمق‌های بیشتر میرا می‌شود.

با بالا رفتن دما نرخ واکنش و به دنبال آن نرخ جرمی تولید گاز افزایش می‌یابد. اثرات قابل توجه این خاصیت نشان می‌دهد که در نظر گرفتن جذب داخلی تشعشع در نتایج مدل‌سازی عددی تأثیر بسزایی بر پیش‌بینی رفتار ماده دارد.

براساس نمودارهای شکل 12 هر دو پارامتر دمای سطح و نرخ جرم از دست‌رفته با افزایش ضریب صدور تابشی کاهش می‌یابند که سبب دور شدن نتایج از واقعیت برای دمای سطح و بهبود آن‌ها برای نرخ جرم از دست‌رفته می‌شود. افزایش این مقدار دارای دو تأثیر اصلی در مدل‌سازی است. با توجه به رابطه (10) مقدار تشعشع جذبی در سلول‌های داخلی با افزایش ضریب

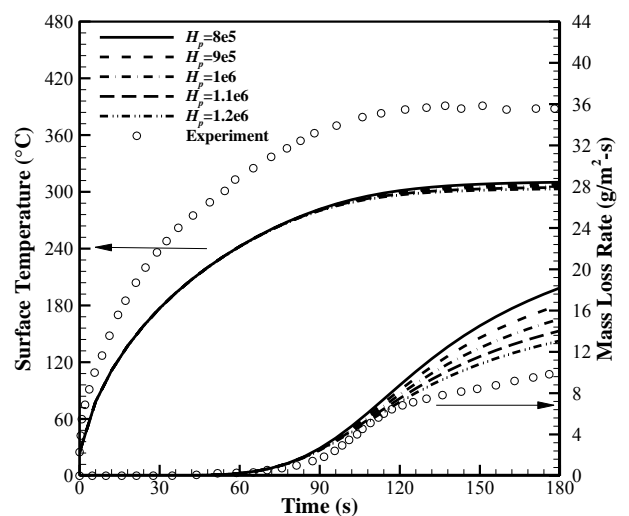


Fig. 10 Modeled surface temperature and mass loss rate at different heats of pyrolysis

شکل 10 مقادیر مدل‌سازی شده دمای سطح و نرخ جرم از دست‌رفته در گرمای آتش‌کافت مختلف

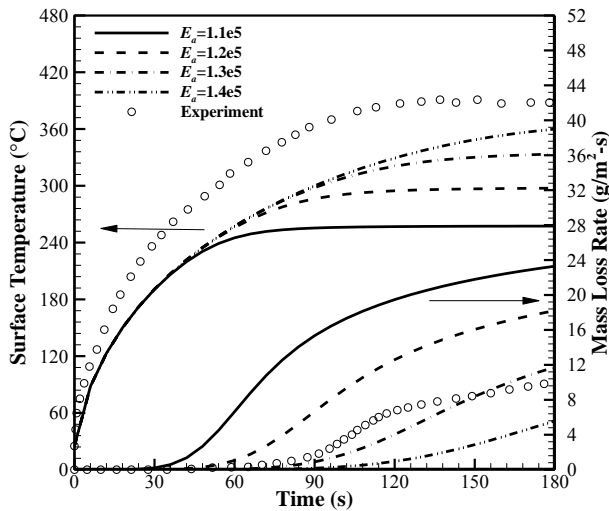


Fig. 14 Modeled surface temperature and mass loss rate at different activation energies

شکل 14 مقادیر مدل‌سازی شده دمای سطح و نرخ جرم از دست‌رفته در انرژی‌های فعال‌سازی مختلف

کمینه‌سازی اختلاف بین نتایج تجربی و عددی به کمک روش‌های بهینه‌سازی (مانند الگوریتم ژنتیک) است. به دلیل وابستگی به شدت غیرخطی نتایج به پارامترهای ورودی و تعداد بالای پارامترهای ورودی فرآیند بهینه‌سازی دارای هزینه محاسباتی بالایی خواهد بود. در این مطالعه با بررسی تأثیر خواص ورودی بر نتایج مدل‌سازی میزان اثرگذاری هر یک از پارامترها بر نتایج مدل مشخص شد. می‌توان خواص ظرفیت گرمایی ویژه، گرمای آتش‌کافت، ضریب میرایی تشعشعی، انرژی فعال‌سازی و ضریب پیش‌نمایی رابطه آرنیوس را به‌عنوان ورودی‌های با تأثیر بیشتر نسبت به خواص دیگر معرفی کرد. با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای دیگر و تغییر خواص با تأثیر بیشتر مذکور در فرآیند بهینه‌سازی می‌توان هزینه محاسباتی را در این عملیات به شدت کاهش داد. از طرفی دیگر با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی، رفتار کلی آتش‌کافت موادی که دارای خواص مختلفی نسبت به پی‌ام‌ای هستند را می‌توان پیش‌بینی کرد.

استفاده از آن در شبیه‌سازی گسترش شعله هدف از مدل‌سازی یک بعدی فرآیند آتش‌کافت است. برای این منظور باید مدل آتش‌کافت در کنار یک حلگر معادلات جریان و احتراق به‌عنوان یک زیر مدل قرار گیرد. این موضوع به دلیل توسعه مدل در حلگر فایرفوم صورت گرفته است. با پیدا کردن مقادیر مناسب به‌عنوان پارامترهای مدل می‌توان از این مدل برای شبیه‌سازی گسترش شعله بر جامدات استفاده کرد.

#### 6- فهرست علائم

$A$	مساحت ( $m^2$ )
$A_{Arr}$	ضریب پیش‌نمایی ( $m^{-1}$ )
$c_p$	ظرفیت گرمایی ویژه ( $J/kg \cdot K^{-1}$ )
$E_a$	انرژی فعال‌سازی ( $J/mol$ )
$h$	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ( $W/m^2 \cdot K^{-1}$ )
$H_p$	گرمای آتش‌کافت ( $J/kg$ )
$k$	هدایت حرارتی ( $W/m \cdot K^{-1}$ )

خواص دارای پایداری است و در دیگر مقادیر واگرایی در حل مشاهده می‌شود. در این بخش تأثیر آن‌ها بر پیش‌بینی رفتار ماده جامد با تغییر این پارامترها در بازه پایداری هر کدام مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به شکل 13 دمای سطح با افزایش ضریب پیش‌نمایی کاهش، و نرخ جرمی تولید گاز افزایش و نرخ واکنش تبدیل جامد به گاز با افزایش این خاصیت افزایش می‌یابد (براساس رابطه (12)) و سبب افزایش نرخ جرم از دست‌رفته می‌شود اما با توجه به رابطه‌های (9,8)، با افزایش نرخ واکنش، مقدار چاه حرارتی در معادله بقای انرژی جامد افزایش می‌یابد و سبب کاهش دما و شیب تغییرات آن می‌شود. با افزایش این خاصیت نتایج مربوط به دمای سطح و نرخ جرمی تولید گاز از نتایج تجربی فاصله می‌گیرند.

با افزایش انرژی فعال‌سازی در مدل آرنیوس، همان‌طور که در شکل 14 دیده می‌شود، دمای سطح افزایش می‌یابد و نرخ جرم از دست‌رفته کاهش می‌یابد. در قانون آرنیوس با افزایش انرژی فعال‌سازی نرخ انجام واکنش کاهش می‌یابد و برخلاف تأثیر ضریب پیش‌نمایی سبب کاهش اندازه چاه حرارتی در معادله انرژی می‌شود. این موضوع سبب افزایش دمای سطح و کاهش نرخ جرمی تولید گاز می‌شود که این دو تأثیر به هم‌خوانی بیشتر نتایج تجربی و پیش‌بینی مدل آتش‌کافت کمک می‌کند. همان‌طور که در شکل‌های 13 و 14 قابل مشاهده است تأثیر تغییرات انرژی فعال‌سازی بیشتر از تأثیر تغییرات ضریب پیش‌نمایی بر نتایج مدل‌سازی عددی است.

#### 5- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با توسعه یک مدل آتش‌کافت یک بعدی بر پایه کد متن باز اپن‌فوم سعی بر شبیه‌سازی فرآیند آتش‌کافت ماده پی‌ام‌ای و بهبود نتایج مدل آتش‌کافت حلگر فایرفوم شد. مشخص شد که نتایج به‌دست‌آمده از مدل توسعه داده شده به مراتب هم‌خوانی بیشتری با نتایج تجربی نسبت به مدل اولیه حلگر فایرفوم دارد. به دلیل عدم وجود نتایج تجربی یکتا برای پارامترهای ورودی (خواص ماده جامد)، از مقادیر اسمی خواص به‌عنوان ورودی مدل استفاده شد که این موضوع سبب مشاهده خطا در نتایج مدل آتش‌کافت توسعه داده شد. برای بهبود بخشیدن نتایج مدل نیاز به

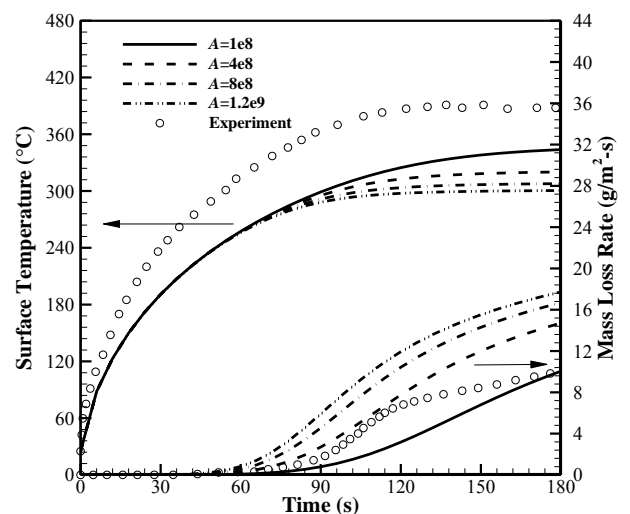


Fig. 13 Modeled surface temperature and mass loss rate at different pre-exponential factors

شکل 13 مقادیر مدل‌سازی شده دمای سطح و نرخ جرم از دست‌رفته در ضریب‌های پیش‌نمایی متفاوت



- [3] W. Zeng, S. Li, W. Chow, Review on chemical reactions of burning poly (methyl methacrylate) PMMA, *Fire Sciences*, Vol. 20, No. 5, pp. 401-433, 2002.
- [4] L. Shi, M. Y. L. Chew, A review of fire processes modeling of combustible materials under external heat flux, *Fuel*, Vol. 106, pp. 30-50, 2013.
- [5] C. Di Blasi, Modeling and simulation of combustion processes of charring and non-charring solid fuels, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 19, No. 1, pp. 71-104, 1993.
- [6] J. Quintiere, N. Iqbal, An approximate integral model for the burning rate of a thermoplastic-like material, *Fire and Materials*, Vol. 18, No. 2, pp. 89-98, 1994.
- [7] C. Lautenberger, C. Fernandez-Pello, Generalized pyrolysis model for combustible solids, *Fire Safety*, Vol. 44, No. 6, pp. 819-839, 2009.
- [8] C. Lautenberger, Gpyro-A Generalized Pyrolysis Model for Combustible Solids-Users' Guide, *Version 0.700, February*, Vol. 19, 2009.
- [9] S. I. Stoliarov, S. Crowley, R. E. Lyon, G. T. Linteris, Prediction of the burning rates of non-charring polymers, *Combustion and Flame*, Vol. 156, No. 5, pp. 1068-1083, 2009.
- [10] S. I. Stoliarov, I. T. Leventon, R. E. Lyon, Two-dimensional model of burning for pyrolyzable solids, *Fire and Materials*, Vol. 38, No. 3, pp. 391-408, 2014.
- [11] I. T. Leventon, J. Li, S. I. Stoliarov, A flame spread simulation based on a comprehensive solid pyrolysis model coupled with a detailed empirical flame structure representation, *Combustion and Flame*, Vol. 162, No. 10, pp. 3884-3895, 2015.
- [12] *OpenFOAM Source Code*, Accessed on 10 November 2016; <http://www.openfoam.com>.
- [13] Rein G., From pyrolysis kinetics to models of condensed-phase burning., *Recent Advance Flame Retardancy of Polymeric Material*, Vol. pp. 19, 56-65, 2008.
- [14] T. Kashiwagi, T. J. Ohlemiller, A study of oxygen effects on nonflaming transient gasification of PMMA and PE during thermal irradiation, *Symposium (International) on Combustion*, Elsevier, pp. 815-823, 1982.
- [15] N. Bal, G. Rein, On the effect of inverse modelling and compensation effects in computational pyrolysis for fire scenarios, *Fire Safety*, Vol. 72, pp. 68-76, 2015.
- [16] C. Lautenberger, G. Rein, C. Fernandez-Pello, The application of a genetic algorithm to estimate material properties for fire modeling from bench-scale fire test data, *Fire Safety*, Vol. 41, No. 3, pp. 204-214, 2006.
- [17] M. Chaos, M. M. Khan, N. Krishnamoorthy, J. L. de Ris, S. B. Dorofeev, Evaluation of optimization schemes and determination of solid fuel properties for CFD fire models using bench-scale pyrolysis tests, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 33, No. 2, pp. 2599-2606, 2011.
- [18] N. Bal, *Uncertainty and Complexity in Pyrolysis Modelling*, Ph.D.thesis, University of Edinburgh, 2012

$n$	درجه واکنش
$Q$	توان حجمی تولیدی یا مصرفی واکنش ( $Wm^{-3}$ )
$\dot{q}''$	شار حرارتی تشعشعی ( $Wm^{-2}$ )
$R_u$	ثابت جهانی گازها ( $Jmol^{-1}K^{-1}$ )
$T$	دما (K)
$t$	زمان (s)
$V$	حجم ( $m^3$ )
$X$	کسر مولی
$Y$	کسر جرمی
$z$	جهت عمود بر سطح جامد (m)

#### علائم یونانی

$\dot{\omega}'''$	نرخ واکنش ( $kgm^{-3}s^{-1}$ )
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )
$\varepsilon$	ضریب صدور
$\kappa$	ضریب میرایی تشعشعی ( $m^{-1}$ )
$\sigma$	ثابت استفان بولتزمن ( $WmK^{-2}$ )

#### زیرنویس‌ها

bottom	مرز پایینی
cell	سلول محاسباتی
d	مصرف
f	تشکیل
g	گاز
i	گونه‌های نام
j	واکنش نام
rad	تشعشع
s	جامد
top	مرز بالایی

#### 7- مراجع

- [1] M. J. Hurley, D. T. Gottuk, J. R. Hall Jr, K. Harada, E. D. Kuligowski, M. Puchovsky, J. M. Watts Jr, C. J. Wieczorek, *SFPE Handbook of fire protection engineering*, pp. 2.229-2.232, New York, Springer, 2015.
- [2] J. Quintiere, *Fundamentals of fire phenomena*, pp. 159-164, Chichester, Wiley, 2006.