مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1396، دوره 17، شماره 9، ص‌ص 86-96

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

رفتار حرارتی- مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری تحت تاثیر آتش

خسرو لاری[1*]، محمد غلامیان[2]، عمید پورامینایی[2]، عماد جمعه زاده[3]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان
2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان
* کرمان، صندوق پستی 76311-33131، k.lari@kgut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 12 اردیبهشت 1396
پذیرش: 21 تیر 1396
ارائه در سایت: 17 شهریور 1396

کلید واژگان:
سازه کامپوزیتی
آتش
تحلیل حرارتی- مکانیکی
آباکوس

چکیده

استفاده از کامپوزیت‌های پایه پلیمری تا به امروز رشد روز افزونی داشته است. کامپوزیت‌ها به علت خواص مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی خاص، کاربرد زیادی دارند؛ اما احتراق ذاتی این مواد و عدم استحکام آن‌ها در دماهای بالا به‌ویژه هنگام مواجهه با آتش یکی از چالش‌های استفاده کامپوزیت در صنایع است. زمانی که کامپوزیت‌ها در معرض آتش می‌گیرند، ماتریس کامپوزیت همراه با آزادسازی گرما، دود، ذرات دوده و بخارات سمی تجزیه می‌شود. در اثر تاثیر آتش بر سازه کامپوزیتی فرآیندهای حرارتی متعددی از جمله رسانایی حرارتی در سازه، تجزیه شدن رزین و تولید و خروج گازهای فرار از کامپوزیت رخ می‌دهد. هدف از این تحقیق، بررسی تاثیرات آتش بر سازه‌های کامپوزیتی می‌باشد. تحلیل مقاومت کامپوزیت در برابر آتش، تعیین میزان و مدت زمان دوام آوردن کامپوزیت در برابر آتش و همچنین بررسی اثرات تنش حرارتی ایجاد شده در سازه کامپوزیتی نیازمند تحلیل ترکیبی حرارتی- مکانیکی کامپوزیت می‌باشد. جهت تحلیل مساله در این پژوهش از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. مدل مناسب جهت تحلیل بخش‌های حرارتی و مکانیکی مساله با توجه به معادلات حاکم، توسعه یافته و از طریق زیرروال‌های موجود در نرم افزار آباکوس در این نرم‌افزار وارد می‌شود. مدل حرارتی- مکانیکی با نتایج موجود در مطالعات معتبر، اعتبارسنجی شده و در نهایت این مدل، جهت تحلیل حرارتی-مکانیکی یک سازه کامپوزیتی استوانه‌ای تحت تاثیر آتش مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج نشان دادند که با تخمین زمان شکست کامپوزیت، می‌توان میزان نیروی قابل تحمل توسط سازه را در شرایط مختلف تاثیر آتش بر سازه، تعیین نمود.

Thermo-mechanical behavior of polymer composites exposed to fire

Khosro Lari*, Mohammad Gholamian, Amid Pouraminaei, Emad Jomehzadeh

Department of Mechanical Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran
* P.O.B. 76311-33131, Kerman, Iran, k.lari@kgut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 May 2017
Accepted 12 July 2017
Available Online 08 September 2017

Keywords:
Composites structures
Fire
Thermal-Mechanical Analysis
Abaqus

ABSTRACT

Nowadays, the use of polymer-based composites has been growing. Composites due to mechanical, chemical and physical properties are widely used, but the inherent combustion of these materials and the lack of strength at high temperatures, especially when exposed to fire is one of the challenges of using composites in industries. When composites are exposed to fire, matrix of composite decomposed with heat release, smoke, soot and toxic fumes. Due to the influence of fire on the composite structure, several thermal processes occur such as thermal conductivity in the structure, production and escape of the gases from the composite and resin decomposition. The aim of this study is the investigation of the effects of fire on the composite structures. Analysis of composite resistance to fire, determining the amount and duration of the fire-resistant composite as well as the effects of thermal stress in composite structure requires thermo-mechanical analysis of the composite. ABAQUS software is used for solving the problem in this study. An appropriate model for analyzing the thermal and mechanical parts of the problem according to the governing equations is developed and imported to the Abaqus software through Abaqus subroutines. Thermo-mechanical model is confirmed with the results of valid studies. Finally, this model is used for thermo-mechanical analysis of a composite cylindrical structure exposed to the fire. The results showed that by estimating the failure time of the composite, it is possible to determine the amount of load that can be applied to the structure under different conditions of fire.

1- مقدمه

پلاستیک‌ها یا رزین‌های تقویت‌شده با الیاف و به عبارت بهتر کامپوزیت‌های پلیمری، امروزه در صنعت از اهمیت خاصی برخوردار هستند و روزبه‌روز بر کاربردهای مختلف آن‌ها افزوده می‌شود. یکی از اشکالات عمده کامپوزیت‌های پلیمری اشتعال‌پذیری و آسیب‌پذیری ذاتی است که پیاده‌سازی مواد کامپوزیتی را به‌خصوص در صنایع دریایی و هوایی که خطر قرار گرفتن در برابر آتش وجود دارد را با مشکل مواجهه کرده است [1].

رفتار کامپوزیت تحت تأثیر آتش اهمیت زیادی در این بحث دارد. پدیده سوختن کامپوزیت‌ها که در حقیقت تجزیه ماتریس پلیمری است، با ایجاد تغییر در ماهیت ماده اولیه همراه است. ناحیه سوخته شده دیگر خواص حالت اولیه خود را ندارد و تجزیه ماتریس پلیمری و واکنش‌های شیمیایی انجام شده، منجر به تولید ماده‌ای جدید با خواص فیزیکی و مکانیکی تازه‌ای

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Kh. Lari, M. Gholamian, A. Pouraminaei, E. Jomehzadeh, Thermo-mechanical behavior of polymer composites exposed to fire, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 86-96, 2017 (in Persian)

می‌شود. در سازه‌های کامپوزیتی که از یک طرف در معرض شار حرارتی قرار می‌گیرند، پس از مدت زمان معینی ضخامتی از کامپوزیت در اثر فرآیند تجزیه ماتریس آسیب‌دیده و در ساختار خود دچار کاهش خواص مکانیکی می‌شود و سازه قابلیت تحمل نیروی خود را از دست می‌دهد. از طرفی تجزیه ماتریس منجر به تولید دود و گازهای فرار می‌شود. گرما، دود و گاز آزاد شده در اثر سوختن کامپوزیت احتمال آسیب و نابودی کامپوزیت را افزایش می‌دهد [1].

مطالعه اثرات آتش روی کامپوزیت‌ها مبحث جدیدی است که بسیاری از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه در دو دهه اخیر صورت گرفته است که می‌توان به‌صورت خلاصه به برخی از آن‌ها اشاره کرد:

هندرسون و همکاران [2] در سال 1987 مدل تجزیه یک بعدی روی چوب را برای استفاده بر روی لمینیت مسلح شده به‌وسیله‌ی الیاف انجام دادند. آن‌ها از روش اختلاف محدود برای حل مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل کوپل شده و متقارن استفاده کردند. گرینیر و همکاران [3] در سال 1998 مشخصه‌های آتش دو نوع ماده کامپوزیتی را که در صنایع دریایی استفاده می‌شوند، به‌طور آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. لوآ و همکاران [4] در سال 2006 در یک مدل عددی المان محدود از روش وابستگی گرمایی دما و جرم برای پاسخ آتش در کامپوزیت‌های دریایی بهره بردند و دریافتند که استفاده از مدل وابستگی گرمایی دما و جرم دقت پاسخ گرمایی را به‌شدت بالا می‌برد. موریتز و همکاران [5] در سال 2009 مدلی تئوری را ارائه کردند که از لحاظ گرمایی، شیمیایی و فیزیکی پاسخ ساختاری و شکست مواد کامپوزیتی در آتش را مرور می‌کند. آن‌ها بر روی لمینیت پلیمری مسلح شده با الیاف‌های غیرقابل احتراق تمرکز کردند و نیز تجزیه، آسیب و شکست کامپوزیت در آتش را بررسی کردند.

گو و همکاران [6] در سال 2009 در یک روش عددی اختلاف محدود به بررسی ظرفیت تحمل بار برای پنل‌ها در کامپوزیت‌های ماتریس پلیمری در سازه‌های دریایی تحت شرایط حرارتی- مکانیکی پرداختند و دریافتند که با انتقال فاز در مواد سوخته در محدوده درجه حرارت بالا در آتش، رسانایی حرارتی در بخش سوخته کامپوزیت به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. ژانگ و همکاران [7] در سال 2009 یک مدل سه‌بعدی و به روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس برای آنالیز گرمایی مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری در برابر آتش به‌کار گرفتند و دریافتند که فشار گاز با افزایش نفوذپذیری و تخلخل کاهش می‌یابد. کاندر و همکاران [8] در سال 2012 یک مدل برای پیش‌بینی پاسخ حرارتی، نرم شدن و شکست لمینیت که با یک روکش پلیمری پوشیده شده است، ارائه کردند. در این مدل ارائه شده افزایش دما، میزان تجزیه شدن، انبساط روکش، نرم شدن و شکست لمینیت که از یک سمت تحت شار حرارتی و از سمت دیگر تحت نیروی محوری است را محاسبه می‌نماید. سامرز و همکاران [9] در سال 2012 یک مدل تئوری ساختار گرمایی را بررسی کردند. آن‌ها در این تحقیق حساسیت کامپوزیت به پارامترهای مختلف را بررسی نمودند. به تازگی، آنژانگ و همکاران [11,10] خواص کامپوزیت‌های ساندویچی و شکست این نوع از کامپوزیت‌ها را در برابر آتش بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل پیشنهادی قابلیت تخمین زمان شکست و مکانیزم شکست را برای کامپوزیت‌های ساندویچی در شرایط مختلف بار و شار حرارتی دارا می‌باشد.

در این پژوهش، تحلیل کامل حرارتی- مکانیکی سازه کامپوزیتی تحت تاثیر آتش انجام خواهد گرفت. جهت تحلیل مسئله در این مطالعه، از نرم‌افزار آباکوس استفاده خواهد شد. ابتدا معادلات حاکم حرارتی و مکانیکی جهت بررسی تاثیر آتش بر کامپوزیت‌ها معرفی شده و سپس مدل مناسب جهت تحلیل هر دو بخش حرارتی و مکانیکی مسئله با توجه به معادلات حاکم، از طریق زیرروال‌های موجود در نرم‌افزار آباکوس به این نرم‌افزار وارد می‌شود. اعتبارسنجی مدل‌های تحلیل حرارتی و مکانیکی به‌وسیله مقایسه با مسائل حل شده در پژوهش‌های دیگر مورد تایید قرار گرفته و درنهایت این مدل، جهت تحلیل حرارتی و مکانیکی یک سازه کامپوزیتی استوانه‌ای تحت تاثیر آتش مورد استفاده قرار می‌گیرد. در آخر نتایج به‌دست آمده برای کمیت‌های مختلف مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

لازم به ذکر است که تحلیل کامل حرارتی و مکانیکی تاثیر آتش بر کامپوزیت‌های استوانه ای شکل، برای اولین بار در این پژوهش انجام گرفته است. مدل توسعه یافته در این پژوهش می‌تواند در صنایع مختلف هوایی، دریایی و نظامی مورد استفاده تحلیل‌گران و مهندسین جهت بررسی تاثیرات آتش بر سازه‌های کامپوزیتی و نحوه جلوگیری از شکست این‌گونه سازه‌ها، قرار گیرد.

2- مدل ریاضی و معادلات حاکم

2-1- معادلات مکانیکی

رفتار و واکنش مواد در برابر بار، تابعی از حالت تغییر شکل آن‌ها می‌باشد که به‌عنوان الاستیک[1] شناخته می‌شود. اگر فرض شود اجزاء تنش تابعی خطی از اجزاء کرنش باشد، عمومی‌ترین شکل معادلات اساسی خطی در تغییر شکل‌های کوچک به‌صورت زیر است:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\,\varepsilon_{kl} + \sigma_{ij}^{0} \tag{1}$$

در این روابط C تانسور مرتبه چهار از خواص مواد می‌باشد که تانسور سختی نامیده می‌شود. ε و σ به ترتیب تانسور کرنش و تنش می‌باشد. در ادامه بحث فرض بر این است که تنش‌های اولیه (σ_{ij}^{0}) صفر در نظر گرفته می‌شود.

در حالت کلی 3^4=81 جزء اسکالر در یک تانسور مرتبه چهار وجود دارد که تعداد اجزا تانسور سختی به‌دلیل تقارنی که در ماتریس تنش، کرنش و سختی وجود دارد تا حد زیادی کمتر از این تعداد است. در حالتی که تانسور تنش متقارن باشد ($\sigma_{ij}=\sigma_{ji}$) ماتریس سختی دارای 6×3^2=54 عضو مستقل می‌باشد و چون تانسور کرنش با توجه به تعریف متقارن است ($\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$)، ماتریس سختی باید در دو اندیس آخر هم متقارن باشد و این یعنی تعداد اعضا مستقل عبارت‌اند از: 36= 6×6.

با اعمال تغییرات در حالت تقارن ارتوتروپیک معادله (1) به شکل زیر تغییر می‌یابد:

$$\sigma_i = c_{ij}\varepsilon_j \tag{2}$$

که در حالت ماتریسی معادله بالا به‌صورت زیر است:

$$\begin{Bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \sigma_4\\ \sigma_5\\ \sigma_6\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0\\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0\\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \varepsilon_4\\ \varepsilon_5\\ \varepsilon_6\end{Bmatrix} \tag{3}$$

در صورتی‌که تغییرات دما در جسم وجود داشته باشد، تنش حرارتی ایجاد می‌شود و معادله ساختاری ماده به‌صورت زیر تغییر می‌کند:

$$\sigma_j = c_{ij}(\varepsilon_i - \alpha_j \Delta T) \tag{4}$$

که در این رابطه α_j ضریب انبساط حرارتی[2] است. درنهایت، معادله ساختاری ماده برای ماده‌ای که تحت تاثیر آتش قرار دارد، همراه با تاثیر تغییر چگالی

[1] Elastic
[2] Thermal expansion coefficient

ناشی از سوختن به‌صورت زیر به دست می‌آید [12]:

$$\sigma_{\mathrm{j}} = F c_{\mathrm{ij}}(\varepsilon_{\mathrm{i}} - \alpha_{\mathrm{j}}\Delta T) \tag{5}$$

که در این معادله $F = (\rho - \rho_{\mathrm{d}})/(\rho_{\mathrm{v}} - \rho_{\mathrm{d}})$ کسر جرمی لحظه‌ای[1] نامیده می‌شود. ρ چگالی لحظه‌ای، ρ_{v} چگالی کامپوزیت در حالت اولیه و ρ_{d} چگالی کامپوزیت کاملاً سوخته شده است که از محاسبات چگالی در تحلیل حرارتی مسئله به دست می‌آید. همچنین $c_{\mathrm{ij}}(T)$ مؤلفه‌های ماتریس سختی هستند که از طریق مدول الاسیسیته و مدول برشی به دما وابسته می‌باشند.

2-2- مدل حرارتی

جهت به‌دست آوردن میدان دما در کامپوزیت تحت تاثیر آتش نیاز به حل معادلات تحلیل حرارتی آتش می‌باشد. این معادلات به‌صورت زیر می‌باشد [1]:

$$\rho C_{\mathrm{p}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[k \frac{\partial T}{\partial x}\right] - \left(Q_{\mathrm{p}} + h - h_{\mathrm{g}}\right) \frac{\partial \rho}{\partial t} - \dot{m}_{\mathrm{g}} C_{\mathrm{pg}} \frac{\partial T}{\partial t} \tag{6}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\rho_{\mathrm{v}} - \rho_{\mathrm{d}}) \left[\frac{\rho - \rho_{\mathrm{d}}}{\rho_{\mathrm{v}} - \rho_{\mathrm{d}}}\right]^{n} A e^{-\frac{E}{RT}} \tag{7}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{g}} = \int_{x}^{L} \frac{\partial \rho}{\partial t} dx \tag{8}$$

معادله (6) معادله انرژی یک‌بعدی در راستای ضخامت است. در این معادله جمله اول سمت راست مربوط به رسانایی حرارتی، جمله دوم سمت راست مربوط به تجزیه رزین و جمله سوم سمت راست مربوط به انتقال حرارت جابه‌جایی در اثر آزاد شدن گازهای فرار می‌باشد. معادله (7) معادله نرخ جنبشی آرهنیوس و معادله (8) رابطه برای محاسبه شار جرم گازهای فرار مورد استفاده در معادله انرژی می‌باشد.

در این معادلات T دما، ρ چگالی، C_{p} ظرفیت حرارتی فاز جامد در فشار ثابت، C_{pg} ظرفیت حرارتی گازهای حاصل از واکنش در فشار ثابت، k رسانایی حرارتی و L ضخامت لایه کامپوزیتی می‌باشد. همچنین Q_{p} حرارت تجزیه، h آنتالپی فاز جامد، h_{g} آنتالپی گازهای حاصل از واکنش و $\dot{m}_{\mathrm{g}}$ شار جرم گازهای فرار هستند.

در معادله آرهنیوس نیز، A ثابت نرخ، E انرژی اکتیواسیون، n مرتبه واکنش و $\mathrm{R} = 8.3144621\, J/(\mathrm{mol}\cdot\mathrm{K})$ ثابت جهانی گاز می‌باشد. ρ_{v} مقدار چگالی اولیه ماده اصلی و ρ_{d} مقدار چگالی ماده تجزیه شده نهایی است.

مقادیر h و h_{g} با مشخص بودن ظرفیت‌های حرارتی فاز جامد و گاز برحسب دما، از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$h = \int_{T_{\mathrm{r}}}^{T} C_{\mathrm{p}}\, dT \quad \text{و} \quad h_{\mathrm{g}} = \int_{T_{\mathrm{r}}}^{T} C_{\mathrm{pg}}\, dT \tag{9}$$

که در آن T_{r} دمای مرجع می‌باشد.

از حل معادلات تحلیل حرارتی آتش (معادلات (6) تا (8))، کمیت‌های دما (T) و چگالی (ρ) لایه کامپوزیتی برحسب مکان و زمان به دست می‌آیند. لازم به ذکر است که معادله انرژی و معادله آرهنیوس با یکدیگر کوپل می‌باشند و باید به‌صورت هم‌زمان حل گردند تا کمیت‌های دما و چگالی به‌دست آیند.

3-2- تغییر خواص مکانیکی با دما

علاوه بر بررسی اثرات دما، نیاز به بررسی اثرات تجزیه نیز احساس می‌شود. ناحیه سوخته شده کامپوزیت دیگر خواص حالت اولیه خود را ندارد و تجزیه ماتریس پلیمری و واکنش‌های شیمیایی انجام‌شده، منجر به تولید ماده‌ای جدید با خواص فیزیکی و مکانیکی تازه‌ای می‌شود. در حال حاضر اطلاعات کمی در مورد اثرات تجزیه روی خواص مکانیکی شناخته شده است. تا زمانی که رابطه مناسب‌تری به دست آید از رابطه پیشنهادی (10) استفاده می‌گردد که رابطه‌ای وابسته به دما و چگالی است [1]:

$$P(T) = \left(\frac{P_{\mathrm{U}} + P_{\mathrm{R}}}{2} - \frac{P_{\mathrm{U}} - P_{\mathrm{R}}}{2} \tanh\left(k\left(T - T_{\mathrm{g}}\right)\right)\right) R^{n} \tag{10}$$

در این رابطه P_{U} و P_{R} به ترتیب مقادیر خاصیت مکانیکی در دمای بالا و پایین است. R مقدار باقیمانده رزین[2] می‌باشد و n توانی است که برای حالت کششی بیشتر از 1 نمی‌تواند باشد و برای قدرت فشاری نمی‌تواند بیشتر از 3 باشد [13]. k ضریب هدایت حرارتی است و T_{g} دمای انتقال شیشه‌ای است که در این مسئله جنس آن شیشه می‌باشد.

4-2- شرایط مرزی

شرط مرزی به دو صورت شرط مرزی حرارتی و مکانیکی می‌باشد. در زمینه شرایط مرزی مکانیکی استفاده‌شده در این پژوهش می‌توان گفت جسم در یک مقطع می‌تواند به‌صورت کاملاً ثابت شده در نظر گرفته شود و یا این‌که یک‌بار خارجی تحمل کند. در مورد شرایط مرزی حرارتی، در سطح آزاد جسم شرایط مرزی جابجایی و تبادل تشعشعی در نظر گرفته می‌شود. فرم کلی شرط مرزی حرارتی واردشده برای سطح جسم به‌صورت زیر می‌باشد:

$$-k \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = \bar{h}[T_{\infty} - T_{\mathrm{s}}] + \sigma\varepsilon[T_{\infty}^{4} - T_{\mathrm{s}}^{4}] \tag{11}$$

که در آن T_{∞} دمای محیط، T_{s} دمای سطح، $\bar{h}$ ضریب انتقال حرارت جابجایی و ε قابلیت صدور سطح می‌باشند.

3- روش عددی

در این پژوهش از نرم‌افزار آباکوس جهت حل معادلات حاکم استفاده می‌شود. نرم‌افزار آباکوس سه نمونه تحلیل مختلف را برای مسائل انتقال حرارت ارائه می‌کند: 1- آنالیز انتقال حرارت غیرکوپل شده، 2- آنالیز تنش- حرارت با کوپل یک‌طرفه، 3- آنالیز تنش- حرارت کاملاً کوپل شده. مسئله مورد بررسی در این پژوهش به روش آنالیز تنش- حرارت کاملاً کوپل شده حل خواهد شد. این نوع آنالیز زمانی بکار می‌رود که حل مکانیکی و حرارتی به مقدار زیادی بر یکدیگر اثر می‌گذارند. بدین منظور آنالیز انتقال حرارت و آنالیز مکانیکی به‌طور هم‌زمان انجام می‌شود و کمیت‌های به‌دست‌آمده از تحلیل حرارتی مانند دما و چگالی در هر نقطه محاسباتی در تحلیل مکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

1-3- تحلیل حرارتی مسئله

در نرم‌افزار آباکوس معادله بالانس انرژی اساسی زیر جهت آنالیز انتقال حرارت بکار گرفته می‌شود:

$$\int_{v} \rho \dot{U} dV = \int_{s} q dS + \int_{v} r dV \tag{12}$$

که در آن V حجم ماده جامد با مساحت سطح S، $\dot{U}$ نرخ زمانی انرژی داخلی بر واحد جرم، q شار حرارتی بر واحد سطح وارد شده به جسم و r حرارت منتقل شده خارجی به بر واحد حجم می‌باشد. f بردار شار حرارتی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$q = -f \cdot n \tag{13}$$

که در آن n بردار واحد عمود بر سطح به سمت خارج می‌باشد. با جایگذاری معادله (13) در (12) و با استفاده از قضیه دیورژانس، معادله انرژی به‌صورت زیر در می‌آید:

[1] Instantaneous mass fraction

[2] residual resin content (RRC)

$$\int_v \rho \dot{U} dV = -\int_v \frac{\partial}{\partial x} \cdot f dV + \int_v r dV \quad (14)$$

معادله (14) فرم عمومی معادلات انتقال حرارت قابل حل در آباکوس را ارائه می‌کند؛ بنابراین جهت حل معادله انرژی (معادله (6)) می‌بایست این معادله به‌صورت قابل‌محاسبه در نرم‌افزار آباکوس تبدیل شود.

به‌طور پیش‌فرض آباکوس تنها رسانایی حرارتی در جسم جامد را در تحلیل حرارتی در نظر می‌گیرد، بدین معنی که در صورت استفاده از آنالیزهای انتقال حرارت موجود در خود نرم افزار آباکوس، تنها اولین جمله سمت راست معادله (6) مربوط به رسانایی حرارتی در نظر گرفته می‌شود و جملات دوم و سوم سمت راست معادله (6) که به ترتیب مربوط به تجزیه رزین و انتقال حرارت جابجایی ناشی از خروج گازهای فرار هستند، مورد تحلیل قرار نمی‌گیرند.

بنابراین جهت انجام تحلیل کامل حرارتی آتش در کامپوزیت، نمی‌توان از آنالیزهای انتقال حرارت پیش‌فرض آباکوس استفاده نمود. برای غلبه بر این مشکل نیاز به استفاده از زیرروال‌های موجود در آباکوس و کدنویسی می‌باشد.

3-2- محاسبه شار گازهای فرار

برای محاسبه شار گازهای فرار ($\dot{m}_g$) نیاز به حل معادله (8) می‌باشد. برای حل این معادله باید از نرخ تغییرات چگالی به‌دست آمده از حل معادله نرخ جنبشی آرهنیوس (معادله (7))، در راستای ضخامت لایه کامپوزیتی انتگرال گرفت. اینکار نیز از طریق استفاده از زیرروال‌های آباکوس و کدنویسی امکان پذیر می‌گردد.

لازم به ذکر است که شکل هندسه سازه کامپوزیتی نیز در نحوه محاسبه شار گازهای فرار بسیار تاثیر گذار است. به عنوان مثال برای یک هندسه استوانه ای (مساله اصلی مورد بررسی در این پژوهش) انتگرالگیری در راستای ضخامت باید با تغییر متغیر در مختصات قطبی و استوانه ای حل شود که این موضوع باید بطور دقیق در کدنویسی لحاظ شود.

3-3- تحلیل مکانیکی مسئله

جهت تحلیل مکانیکی سازه کامپوزیتی نیاز به حل معادله (5) می‌باشد. به دلیل وجود پارامتر F (کسر جرمی لحظه‌ای) در معادله ساختاری ماده برای آتش و همچنین خواص ماده وابسته به دما و وابسته به وضعیت تجزیه، تحلیل مکانیکی مساله وابسته به حل معادلات حاکم حرارتی و به‌دست آوردن دما و چگالی ماده در هر لحظه می‌باشد. بنابراین، برای انجام تحلیل مکانیکی مسئله نمی‌توان از تحلیل پیش‌فرض آباکوس بهره جست و نیاز است که مانند تحلیل حرارتی در اینجا نیز از زیرروال‌های موجود در آباکوس استفاده شود.

3-4- زیرروال‌های کاربر آباکوس

زیرروال‌های کاربر آباکوس جهت افزایش توانایی‌های کاربردی آباکوس در حالتی که روش‌های ورود داده معمولی به‌تنهایی جوابگو نیستند، ایجاد شده‌اند. این زیرروال‌ها به زبان برنامه‌نویسی فرترن[1] نوشته می‌شوند و باید در یک مدل هنگام اجرای آنالیز مربوط به آن اضافه گردند.

زیرروال‌های کاربر نمی‌توانند یکدیگر را فراخوانی کنند. این زیرروال‌ها برای اجرا نیاز به کامپایل شدن و لینک شدن به آنالیز موردنظر در آباکوس دارند. نگارش زیرروال‌های کاربر باید با دقت بسیاری انجام شود. به‌منظور اطمینان از اجرای موفقیت‌آمیز زیرروال‌ها، قوانین و راهنمایی‌های مخصوص هر زیرروال، باید به‌دقت رعایت گردد.

[1] FORTRAN

دو زیرروال کاربر آباکوس که در این پژوهش جهت تحلیل آتش در کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و نحوه به‌کارگیری آن‌ها، در ادامه توضیح داده می‌شود.

3-4-1- زیرروال کاربر UMATHT

زیرروال UMATHT[2] جهت تعریف رفتار ساختاری حرارتی یک ماده و تولید حرارت داخلی در فرآیندهای انتقال حرارت بکار می‌رود. این زیرروال در تمامی نقاط محاسباتی المان‌ها که تعریف ماده در آن‌ها شامل رفتار ماده حرارتی تعریف‌شده توسط کاربر باشد، فراخوانی می‌شود. زیرروال UMATHT می‌تواند در آنالیزهای انتقال حرارت موجود در آباکوس استفاده شود. در زیرروال UMATHT تعداد شش کمیت باید تعریف گردد که عبارت‌اند از:

1- انرژی داخلی بر واحد جرم، U

2- تغییرات انرژی داخلی نسبت به دما، $\partial U/\partial T$

3- تغییرات انرژی داخلی نسبت به گرادیان مکانی دما، $\partial U/\partial(\partial T/\partial x)$

4- بردار شار حرارتی، f

5- تغییرات شار حرارتی نسبت به دما، $\partial f/\partial T$

6- تغییرات شار حرارتی نسبت به گرادیان مکانی دما، $\partial f/\partial(\partial T/\partial x)$

شش کمیت ذکرشده در قبل که باید در زیر روال UMATHT تعریف شوند، براساس معادلات حاکم حرارتی (معادلات (6) تا (8)) به‌دست‌آمده و در قسمت تعیین‌شده در زیرروال نوشته می‌شوند.

3-4-2- زیرروال کاربر UMAT

زیرروال UMAT[3] جهت تعریف رفتار ساختاری مکانیکی ماده بکار می‌رود. این زیرروال در تمامی نقاط محاسباتی ماده در المان‌ها که تعریف ماده در آن‌ها شامل رفتار ماده تعریف‌شده توسط کاربر باشد، فراخوانی می‌شود. زیرروال UMAT می‌تواند در تمامی آنالیزهای مکانیکی موجود در آباکوس استفاده شود. دو کمیت اصلی که در زیرروال UMAT لازم است تعریف شود، در زیر آمده است:

1- تنش‌ها (بردار تنش)، σ

2- ماتریس ژاکوبین ماده[4]، $\partial\Delta\sigma/\partial\Delta\varepsilon$

در تحلیل مکانیکی مسئله، نیاز به داشتن دما (T) و وضعیت تجزیه (F) در نقطه محاسباتی وجود دارد که این دو کمیت از تحلیل حرارتی مسئله که از طریق زیرروال UMATHT صورت می‌گیرد، به دست می‌آیند.

4- نتایج و بحث

4-1- اعتبارسنجی حرارتی

در این بخش، پس از کد نویسی کامل معادلات حاکم در زیرروال آباکوس، جهت اطمینان از صحت مدل به‌کار گرفته شده برای تحلیل آتش، مسئله حل شده در مراجع [14] و [15] جهت اعتبارسنجی انتخاب شده است. در این مسئله، یک صفحه کامپوزیتی تک لایه از جنس ای-گلس وینیل استر[5] با جهت الیاف به‌صورت [0/90] و به ابعاد 9×50×560 میلی‌متر مکعب است که ازیک‌طرف تحت شار حرارتی آتش قرار دارد. خواص کامپوزیت مورد بررسی در این بخش در جدول 1 نشان داده شده است.

فرآیند آتش به‌صورت یک شار حرارتی ثابت با مقدار 25 kW/m^2 و 50 kW/m^2 شبیه‌سازی شده است. شرایط مرزی به‌کار رفته در این مسئله اعتبار

[2] user-defined thermal material behavior
[3] user-defined material behavior
[4] Jacobian matrix
[5] E-glass vinyl ester

سنجی بدین‌صورت است که ضریب انتقال حرارت جابجایی برای صفحه‌ای که در برابر آتش قرار گرفته ست $15\ W/m^2{\cdot}K$ است و برای صفحه‌ای که پشت به آتش است (صفحه سرد) مقدار این ضریب $5\ W/m^2{\cdot}K$ می‌باشد. شرایط مرزی تابشی بدین‌صورت است که ضریب صدور صفحه داغ 0.9 و ضریب صدور صفحه سرد 0.6 می‌باشد. صفحات بالا و پایین عایق در نظر گرفته می‌شود.

در "شکل 1" نمودار دما برحسب زمان برای سه‌نقطه در صفحات داغ، میانی و سرد برای شار حرارتی 25 کیلووات بر مترمربع رسم شده و مورد مقایسه قرار گرفته است. برای بررسی بیشتر اثر آتش بر کامپوزیت، جملات موجود در سمت راست معادله حرارتی آتش (معادله (6)) را یکی یکی وارد کرده و تحلیل مربوط به اثر وارد شدن هر جمله انجام گرفته است. روش کار بدین صورت است که ابتدا معادله انرژی با در نظر گرفتن جمله رسانایی حرارتی به‌تنهایی حل‌شده است که نتایج آن در شکل‌ها به‌صورت رسانایی خالص[1] نمایش داده شده است. سپس معادله انرژی با در نظر گرفتن جملات رسانایی و تجزیه رزین حل گردیده است که نتایج آن به‌صورت تجزیه رزین[2] در نمودارها نشان داده شده است. درنهایت معادله کامل انرژی حل گردیده است و نتایج آن به‌صورت آتش کامل[3] نشان داده شده است.

نتایج به‌دست آمده برای سه حالت مختلف رسانایی خالص، تجزیه رزین و آتش کامل با نتایج رساله دکتری لو [14] و مقاله فیه [15] مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج برای هر سه حالت انطباق خوبی با نتایج دیگر پژوهش‌ها دارد (میانگین میزان خطا با کار فیه [15] 1.3% و با کار لو [14] 0.3% است). البته آنچه مشخص است نتایج حالت آتش کامل، انطباق بهتری با نتایج پژوهش‌های گذشته دارد. همچنین مشاهده می‌شود که در این مسئله حالت تجزیه رزین و حالت آتش کامل، نتایج بسیار نزدیک به یکدیگر دارند که علت در ادامه توضیح داده خواهد شد.

جدول 1 خواص گرمایی و مکانیکی کامپوزیت استفاده شده در مراجع [14] و [15]

Table 1 Thermal and mechanical properties for the composite used in Refs. [14, 15]

خاصیت	E-glass/vinyl ester
ثابت نرخ (s^{-1})	5.59×10^{13}
انرژی اکتیواسیون ($Jmol^{-1}$)	2.12×10^{5}
مرتبه واکنش	1
حرارت تجزیه (Jkg^{-1})	378800
گرمای ویژه کامپوزیت ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	1360
گرمای ویژه گاز ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	2386.5
ضریب رسانایی ($Wm^{-1}K^{-1}$)	0.43
چگالی الیاف شیشه (kgm^{-3})	2560
چگالی وینیل استر[4] (kgm^{-3})	1140
کسر حجمی الیاف	0.55
مدول الاستیسیته (GPa)	$\frac{26.5+18.2}{2}-\frac{26.8-18.2}{2}\tanh[0.0266(T-361.8)]$
مدول برشی (GPa)	$\frac{5.041+0.156}{2}-\frac{5.041-0.156}{2}\tanh[0.035(T-356)]$
ضریب انبساط گرمایی ($10^{-6}K^{-1}$)	0.000001
استحکام فشاری اولیه (GPa)	435
استحکام فشاری نهایی (GPa)	9
استحکام فشاری کمانش (MPa)	21.5
دمای انتقال شیشه‌ای (°C)	88
ضریب پواسون	0.4

در "شکل 2" نتایج دما برحسب زمان در شار حرارتی $50\ kW/m^2$ در سه‌ن قطه صفحه داغ، وسط و سرد برای سه حالت رسانایی خالص، تجزیه رزین و آتش کامل به‌دست آمده است و با نتایج با کارلو [14] و فیه [15] مقایسه شده است. از آنجایی که شرایط مرزی داده شده در رساله دکتری لو [14] مورد استفاده قرارگرفته است، مشاهده می‌شود که انطباق بهتری با نتایج کار لو [14] وجود دارد (میزان اختلاف باکار لو [14] 0.7% و میزان اختلاف با کار فیه [15] 1.8% است). نتایج حالت رسانایی خالص دارای اختلاف قابل

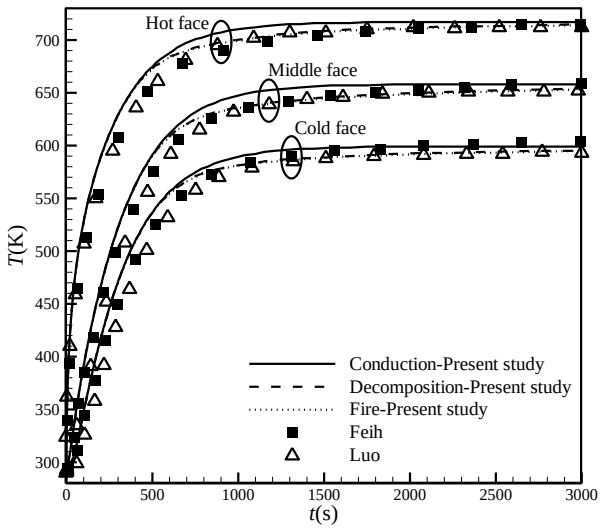

Fig. 1 Temperature–time response of composite at heat flux of $25kW/m^2$ for cold, middle and hot face compared to Refs. [14,15]

شکل 1 نمودار توزیع دما برای صفحات سرد، میانی و داغ برای شار حرارتی 25 کیلو وات بر مترمربع و مقایسه آن با کارلو [14] و فیه [15]

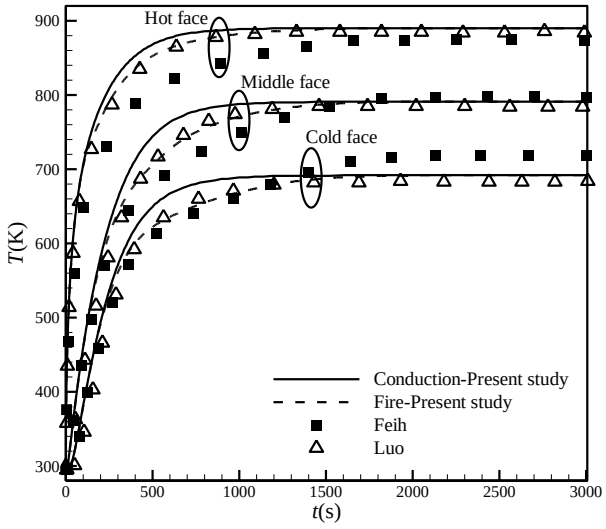

Fig. 2 Temperature–time response of composite at heat flux of $50kW/m^2$ for cold, middle and hot face compared to Refs. [14, 15]

شکل 2 توزیع دما برای صفحات سرد، میانی و گرم برای شار حرارتی 50کیلووات بر مترمربع و مقایسه آن با کارلو [14] و فیه [15]

[1] Conduction
[2] Decomposition
[3] Fire
[4] vinyl ester

توجهی با نتایج آتش کامل می‌باشد که می‌توان نتیجه گرفت که صرف‌نظر کردن از عبارت‌های تجزیه رزین و خروج گازهای فرار، موجب ایجاد خطا در محاسبات می‌شود.

جهت بررسی بهتر مدل تحلیل حرارتی به کار گرفته شده در این پژوهش، مسئله دیگری از رساله ژانگ [12] انتخاب گردید. در این مسئله یک صفحه کامپوزیتی به ضخامت 12.7 میلی‌متر از یک طرف تحت تاثیر یک شار حرارتی ثابت به میزان $25\ \mathrm{kW/m^2}$ قرار می‌گیرد. شرایط مرزی این مسئله بدین صورت است که ضریب انتقال حرارت جابجایی در صفحه داغ برابر $10\ \mathrm{W/m^2{\cdot}K}$ است و ضریب صدور صفحه داغ یعنی صفحه‌ای که در معرض آتش قرار دارد 1 است. صفحه سرد و صفحات بالا و پایین ایزوله در نظر گرفته می‌شوند. خواص حرارتی کامپوزیت استفاده شده در رساله ژانگ در جدول 2 نشان داده شده است.

در "شکل 3"، نتایج دمای لایه برحسب زمان در شار حرارتی $25\ \mathrm{kW/m^2}$ در سه نقطه در صفحات داغ، میانی و سرد برای حالت‌های رسانایی خالص، تجزیه رزین و آتش کامل نشان داده‌شده است و با نتایج کار ژانگ [12] مقایسه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت نتایج حالت آتش کامل که در آن معادله انرژی به‌طور کامل حل می‌شود با نتایج کار انجام گرفته در رساله ژانگ [12] بسیار نزدیک است (خطا 1.6%). این نتایج نشان می‌دهد که مدل به‌کار رفته برای تحلیل اثر آتش‌بر کامپوزیت دارای اعتبار خوبی می‌باشد.

در "شکل 3" نتایج مربوط به رسانایی خالص دارای اختلاف بسیار زیادی با نتایج واقعی است و اختلاف بین نتایج تجزیه رزین با نتایج رساله ژانگ نیز قابل توجه است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت صرف‌نظر کردن از هر یک از جملات تجزیه رزین و یا جابجایی گازهای فرار در حل معادله انرژی، می‌تواند موجب ایجاد خطا در نتایج گردد.

نکته قابل توجه بین نتایج این مسئله و مسئله قبل در مقاله فیه در این است که در مقاله فیه بین نتایج مربوط به تجزیه رزین با نتایج مربوط به آتش کامل اختلاف ناچیزی وجود داشت، درحالی‌که در کار انجام گرفته در رساله ژانگ اختلاف قابل ملاحظه ای بین نتایج مربوط به حالت تجزیه رزین با حالت آتش کامل وجود دارد.

پس از بررسی بیشتر این نتیجه به دست آمد که علت، تفاوت در توان n یا مرتبه واکنش[1] در معادله آرهنیوس می‌باشد. در مسئله بررسی شده در مقاله فیه n=1 می‌باشد این در حالی است که در مسئله مربوط به کار ژانگ n=4.6 است. میزان توان بزرگ در کار ژانگ موجب به‌دست آمدن تغییرات

جدول 2 خواص گرمایی کامپوزیت استفاده‌شده در مرجع[12]

Table 2 Thermal properties for the composite used in Ref. [12]

خاصیت	مقدار خاصیت
چگالی اولیه	1700
چگالی نهایی	1255
گرمای ویژه جامد	1100
گرمای ویژه گاز	3000
رسانایی گرمایی جامد	0.3
گرمای تجزیه	200000
ثابت نرخ	0.5×10^{28}
انرژی فعال‌سازی	3.62×10^{5}
مرتبه واکنش	4.6

[1] Order of reaction

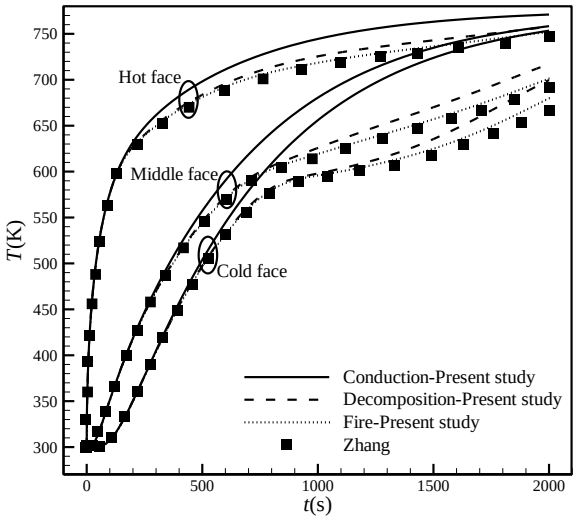

Fig. 3 Temperature–time response of composite at heat flux of $25\mathrm{kW/m^2}$ for cold, middle and hot face compared to Ref. [12]

شکل 3 نمودار توزیع دما برای صفحات سرد، میانی، داغ و مقایسه آن با کار ژانگ [12]

شدیدتر چگالی از طریق حل معادله آرهنیوس می‌شود. طبق رابطه (8) شار جرم گازهای فرار ($\dot{m}_g$) از طریق انتگرال‌گیری از تغییرات چگالی در راستای ضخامت به دست می‌آید، درنتیجه محاسبه شار جرم گازهای فرار در کار ژانگ تاثیر بیشتری دارد و حذف آن موجب خطا در محاسبات می‌شود.

نتیجه مهمی که از این بررسی‌ها به‌دست می‌آید این است که در صورت کوچک بودن توان n در معادله آرهنیوس می‌توان از محاسبه انتقال حرارت جابجایی مربوط به گازهای فرار صرف‌نظر کرد. لازم به ذکر است مدت‌زمان محاسبات برای حالتی که انتقال حرارت جابجایی برای گازهای فرار در نظر گرفته می‌شود، تقریباً 30 برابر حالتی است که از این عبارت صرف‌نظر می‌شود. بنابراین استفاده از این نتیجه می‌تواند کمک بسزایی در کاهش زمان تحلیل داشته باشد.

4-2- اعتبارسنجی بخش مکانیکی

جهت بررسی صحت تحلیل مکانیکی مسئله در این بخش، مسئله حل‌شده در مقاله فیه و همکاران [15] استفاده شده است. هندسه و ابعاد همان چیزی است که در بخش بررسی صحت نتایج حرارتی استفاده شده است. خواص مکانیکی کامپوزیت استفاده شده در جدول 2 نشان داده شده است.

پارامتر مهمی که در تحلیل مکانیکی مورد توجه است، پارامتری به نام زمان شکست[2] می‌باشد. این پارامتر نشان می‌دهد که در نتیجه تاثیر آتش بر روی کامپوزیت، در چه زمانی پس از شروع فرآیند سازه دچار شکست[3] می‌شود. تئوری‌های مختلفی در مقالات و کارهای پژوهشی گوناگون جهت بدست آوردن این زمان شکست به‌کاررفته است، که با توجه به تفاوت ماهیت این تئوری‌ها، نتایج مختلفی برای زمان شکست بدست می‌آید. در مقاله فیه [15]، زمان شکست به‌صورت مدت‌زمانی که یک‌لایه کامپوزیت می‌تواند یک بار خارجی وارد شده را در شرایطی که تحت تاثیر آتش است تحمل کند، تعریف می‌شود. زمان شکست، به‌صورت مدت زمانی که استحکام باقیمانده[4] کاهش می‌یابد تا به سطح تنش خارجی وارد شده، در نقطه‌ای که شکست باید رخ دهد، برسد، محاسبه می‌گردد.

[2] Time to failure
[3] Failure
[4] Residual strength

جهت به دست آوردن زمان شکست ابتدا باید مقدار استحکام فشاری طبق رابطه زیر در هر نقطه محاسباتی به دست آید [16]:

$$\sigma_c(T) = \left(\frac{\sigma_c(0)+\sigma_c(R)}{2} - \frac{\sigma_c(0)-\sigma_c(R)}{2}\tanh\left(\varphi\left(T - T_g\right)\right)\right)F^{\beta} \quad (15)$$

در رابطه فوق $\sigma_c(0)$ استحکام فشاری اولیه، $\sigma_c(R)$ استحکام فشاری نهایی می‌باشد. در مقاله فیه مقدار β برابر با 3 و مقدار φ برابر با 0.026 در نظر گرفته شده است. سپس، استحکام فشاری باقیمانده در یک سری مکان‌ها در جهت ضخامت لایه محاسبه می‌شود. آنگاه، استحکام فشاری کل از انتگرال‌گیری از این مقادیر در راستای ضخامت لایه طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_{\text{ave}} = \frac{1}{b-a}\int_a^b \sigma(x)dx \quad (16)$$

در "شکل 4" مقادیر زمان شکست برای شار گرمایی 25 kw/m^2 ترسیم شده است و با نتایج عملی و تئوری بدست آمده از کار فیه [15] مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود انطباق خوبی بین نتایج کار حاضر و نتایج ارائه شده در پژوهش فیه وجود دارد.

4-3- هندسه بررسی‌شده در این پژوهش

مسئله مورد بررسی مطابق "شکل 5" یک سازه کامپوزیتی استوانه‌ای به طول 560 میلی‌متر، شعاع داخلی 50 میلی‌متر و ضخامت 4 میلی‌متر می‌باشد. جهت بررسی تاثیر آتش بر قسمت‌های مختلف سازه، تنها یک‌چهارم محیط بیرونی استوانه در معرض آتش در نظر گرفته شده است. بدین صورت می‌توان تاثیر آتش را بر بخش‌هایی که بطور مستقیم در معرض آتش نیستند، بررسی نمود. آتش به‌صورت یک شار حرارتی ثابت با مقدار 25 kW/m^2 شبیه‌سازی شده است. شرایط مرزی جابجایی و تابشی در داخل و خارج استوانه برقرار است. ضریب انتقال حرارت جابجایی برای لایه داخلی 5 W/m^2·K و برای لایه خارجی 15 W/m^2·K می‌باشد. ضریب صدور صفحه داخلی 0.6 و ضریب صدور صفحه خارجی 0.9 است و خصوصیات ماده در جدول 1 نشان داده شده است.

4-3-1- نتایج تحلیل حرارتی

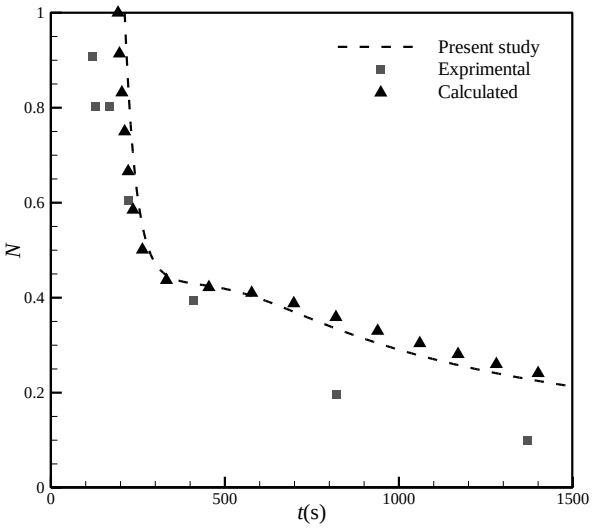

Fig. 4 Prediction failure times and compared with experimental and computational results in Ref. [15] at heat flux of 25kW/m^2

شکل 4 مقایسه زمان شکست لایه کامپوزیتی با نتایج محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در مقاله فیه [15] به ازای شار گرمایی 25 کیلووات بر مترمربع

در "شکل 5" کانتور دما برای زمانی که کامپوزیت 2000 ثانیه در برابر آتش قرار گرفته است، نشان داده شده است.

در "شکل 6" تغییرات دما برحسب زمان در مدت زمان 2000 ثانیه برای استوانه کامپوزیتی و در نقاط روبروی آتش (صفحه داغ)، صفحه میانی و صفحه سرد نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که دمای هر لایه به‌تدریج با گذر زمان به دلیل تاثیر آتش افزایش می‌یابد و پس از سپری شدن زمانی در حدود 400 ثانیه به حالت پایدار می‌رسد. صفحه داغ مقابل آتش، در دمای بالاتری به حالت پایدار می‌رسد و صفحات میانی و سرد به ترتیب در دماهای کمتری به پایداری می‌رسند.

در "شکل 7" مقایسه‌ای بین تغییر دما در نقاط روبروی آتش با نقاطی که زاویه 90 درجه و 180 درجه نسبت به نقطه روبروی آتش دارند، انجام شده است. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود تغییر دما در راستای ضخامت به‌مراتب بیشتر از نقاط با زاویه 90 و 180 درجه نسبت به نقطه روبروی آتش می‌باشد. در مدت زمان 2000 ثانیه نقطه با 90 درجه زاویه فقط 3 درجه تغییر دما را تجربه می‌کند، نقطه با 180 درجه زاویه تغییر دما را ندارد و دارای دمای ثابت است. علت این امر این است که انتقال حرارت به سمت نقاطی که در معرض تاثیر مستقیم آتش قرار ندارند تنها از طریق رسانایی صورت می‌گیرد که ضریب رسانایی گرمایی کامپوزیت‌ها، کوچک می‌باشد (طبق جدول 1، $k = 0.43\ \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$).

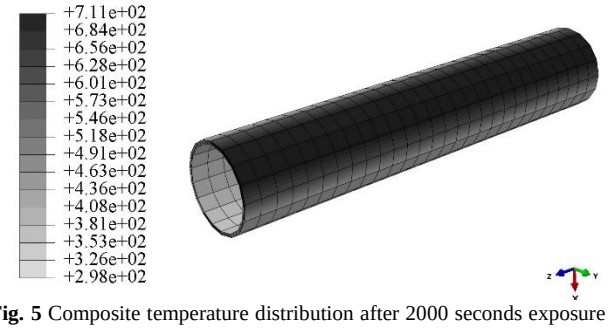

Fig. 5 Composite temperature distribution after 2000 seconds exposure to fire

شکل 5 توزیع دمای کامپوزیت پس از 2000 ثانیه در معرض آتش قرار گرفتن

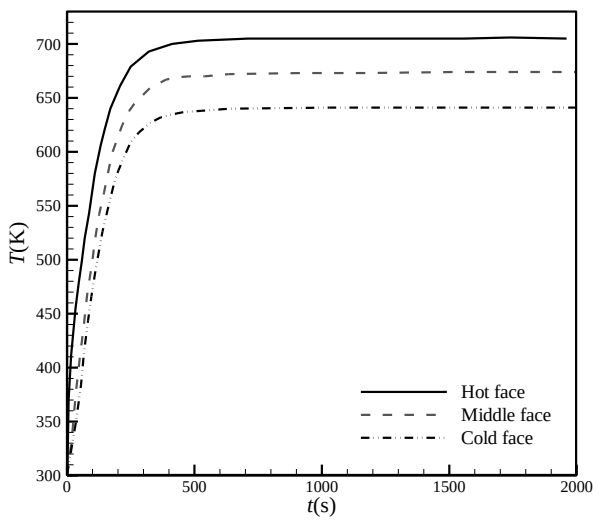

Fig. 6 Temperature–time response of composite cylinder for cold, middle and hot face

شکل 6 تغییر دما با زمان استوانه برای صفحات داغ، سرد و میانی

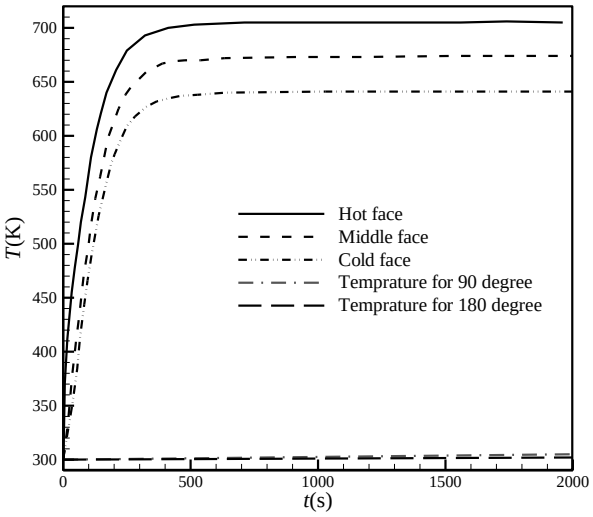

Fig. 7 Temperature–time response of composite cylinder for three areas

شکل 7 مقایسه تغییر دما در راستای ضخامت با نقاط با زاویه 90 و 180 درجه نسبت به روبروی آتش

در ادامه جهت بررسی بهتر اثرات آتش بر روی کامپوزیت، نتایج مربوط به تغییر چگالی در راستای ضخامت مقابل آتش برای سه نقطه مختلف برحسب زمان در "شکل 8" رسم شده است.

از مقایسه شکل مربوط به تغییر دما (شکل 6) با شکل مربوط به تغییر چگالی (شکل 8) می‌توان دریافت که شروع تغییر چگالی در زمانی اتفاق می‌افتد که به‌طور متوسط دما به 600 تا 700 درجه کلوین رسیده باشد. فرآیند سوختن از زمان حدود 200 ثانیه آغاز می‌شود و به‌تدریج با تجزیه شدن کامپوزیت، چگالی آن کاهش می‌یابد. این کاهش چگالی برای صفحه داغ بیشتر از صفحات دیگر است و در حدود 700 ثانیه چگالی صفحه داغ به مقدار مینیمم می‌رسد که نشان‌دهنده این است که در این زمان صفحه داغ به‌طور کامل سوخته است. این فرآیند برای صفحات میانی و سرد با شدت کمتری انجام می‌گیرد.

در "شکل 9" نرخ زمانی چگالی برای صفحات سرد، میانی و گرم برحسب زمان مشاهده می‌شود. تجزیه شدن کامل صفحه داغ (روبروی آتش) را از این شکل نیز می‌توان برداشت کرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نرخ زمانی چگالی برای تمامی صفحات دارای تغییر است ولی برای صفحه داغ پس از گذشت مدت زمانی به مقدار تقریبی صفر می‌رسد و این به معنای سوختن کامل است. این در حالی است که نقاط سرد و میانی همچنان دارای تغییر هستند. نکته دیگری که می‌توان از این شکل استخراج کرد این است که میزان نرخ زمانی چگالی برای صفحه داغ بیشتر از صفحات دیگر است.

در "شکل 10" نرخ تغییرات دما در راستای شعاعی برای صفحات سرد، میانی و داغ برحسب زمان رسم شده است. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود، نرخ تغییرات دما در راستای ضخامت دارای مقادیر بزرگی است و این

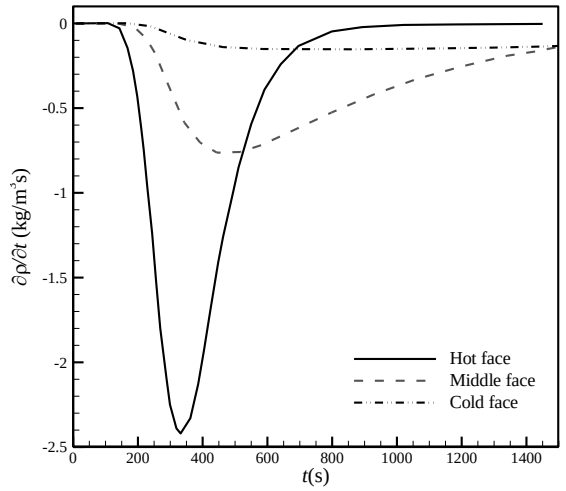

Fig. 9 Density rate-time response of composite cylinder for cold, middle and hot face

شکل 9 نرخ زمانی چگالی برای صفحات سرد، میانی و گرم

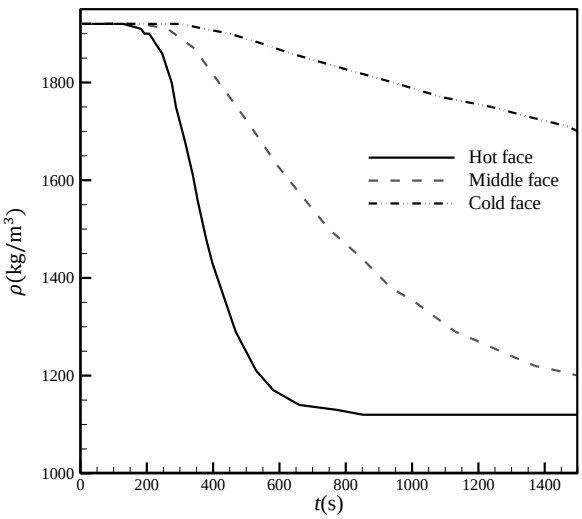

Fig. 8 Density-time response of composite cylinder for cold, middle and hot face

شکل 8 تغییر چگالی برای نقاط در راستای ضخامت مقابل آتش برحسب زمان برای صفحه داغ، میانی و سرد

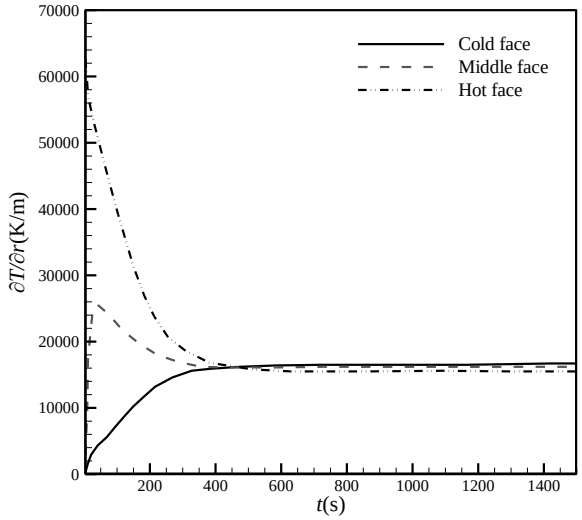

Fig. 10 Temperature variations in the thickness direction vs. time for hot, middle and cold face

شکل 10 تغییرات دما در راستای ضخامت در برابر آتش برای صفحه داغ، میانی و سرد

نرخ تغییر دما با حرکت از صفحه سرد به سمت صفحه داغ بیشتر می‌شود. در شکل فوق مشاهده می‌شود که پس از گذشت زمانی حدود 400 ثانیه تغییرات دما در راستای ضخامت به مقدار ثابتی می‌رسد، که با توجه به "شکل 6" زمانی است که تغییرات دما به حالت پایدار رسیده است و دیگر دما در هر لایه تغییری نمی‌کند.

برای این‌که بتوان تغییر دما در راستای ضخامت کامپوزیت را با تغییر زاویه‌ای دما در راستای محیط استوانه برای صفحه مقابل آتش، مقایسه کرد، این دو نمودار در "شکل 11" آورده شده‌اند.

همان‌طور که در "شکل 11" مشاهده می‌شود، وقتی تغییر زاویه‌ای دما با تغییر شعاعی دما مقایسه می‌شود، نمودار تغییر زاویه‌ای دما با زمان به‌صورت یک مقدار نزدیک به صفر مشاهده می‌شود که این به معنی تغییرات اندک دما در راستای محیط است که به دلیل کوچک بودن ضریب رسانایی کامپوزیت می‌باشد.

در "شکل 12" شار جرم گازهای فرار برای صفحات سرد، میانی و داغ برحسب زمان نشان داده شده است.

همان‌طور که در "شکل 12" مشاهده می‌شود شار جرمی گازهای فرار در صفحه مقابل آتش از صفحه میانی و صفحه میانی از صفحه سرد بیشتر است. نتیجه حاصل از این شکل این است که با حرکت از صفحه سرد به سمت صفحه داغ اثر انتقال حرارت جابجایی ناشی از حرکت گازهای فرار افزایش می‌یابد.

4-3-2- تعیین زمان شکست

موضوع دیگری که در این قسمت به آن پرداخته می‌شود، بررسی نمودار مربوط به تعیین زمان شکست می‌باشد. زمان شکستی که در این هندسه محاسبه‌شده است براساس تئوری به‌کاررفته در مقاله فیه [15] می‌باشد و همان‌طور که گفته شد در یک کامپوزیت شکست زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار بار فشاری وارد شده از مقدار استحکام کامپوزیت در برابر آتش بیشتر باشد. نمودار زمان شکست در واقع یک نمودار کلی است و برای انواع مختلفی از بارها می‌تواند شکست را تخمین بزند. در "شکل 13" نمودار زمان شکست برای هندسه استوانه‌ای نشان داده شده است.

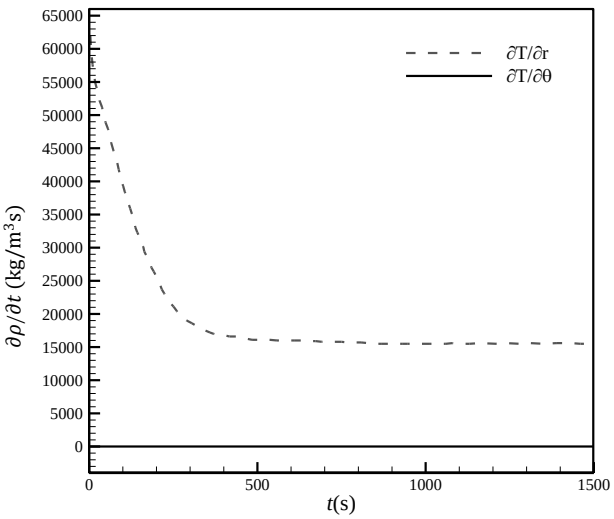

Fig. 11 Temperature variations with thickness and angle vs. time for hot face

شکل 11 مقایسه تغییر شعاعی دما و تغییر زاویه‌ای دما با زمان برای صفحه داغ

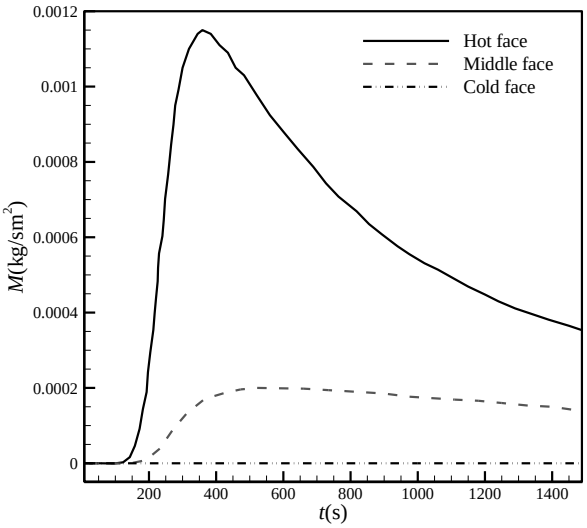

Fig. 12 Mass flow rate of volatile gases vs. time for cold, middle and hot face

شکل 12 شار دبی جرمی گازهای فرار برای صفحات سرد، میانی و داغ

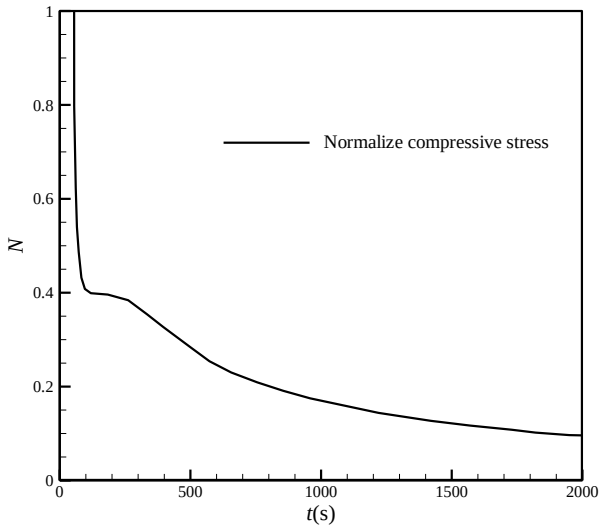

Fig. 13 Prediction failure times for composite cylinder

شکل 13 تخمین زمان شکست برای استوانه کامپوزیتی

در "شکل 13" محور عمودی تنش فشاری نرمالایز شده می‌باشد که از تقسیم استحکام فشاری میانگین (کل) به استحکام فشاری کمانش به دست می‌آید. در این مسئله مقدار استحکام فشاری کمانش از مقاله فیه [15] استفاده شده است و دارای مقدار 21.5 MPa می‌باشد. به‌عنوان‌مثال، در زمان 500 ثانیه مقدار تنش فشاری نرمالایز شده 0.285 می‌باشد که با داشتن استحکام فشاری کمانش، تنش فشاری میانگین 6.2175 MPa به دست می‌آید. با توجه به تئوری شکست استفاده شده در این کار، برای این که کامپوزیت بتواند 500 ثانیه در برابر آتش مدل شده دوام بیاورد و شکست رخ ندهد، حداکثر باری را که می‌تواند تحمل کند برابر با 6.2175 MPa می‌باشد. واضح است که بار فشاری بیشتر از این مقدار منجر به شکست سازه کامپوزیتی در زمانی زودتر از 500 ثانیه می‌شود و در بار فشاری کمتر از این مقدار، کامپوزیت تا زمان بیشتری دوام می‌آورد. با استفاده از این نمودار می‌توان زمان شکست را برای انواع مقادیر بار فشاری تخمین زد. نتیجه دیگری که از نمودار فوق می‌توان

گرفت این است که باگذشت زمان مقدار استحکام فشاری کل کاهش می‌یابد و این امر منجر به کاهش مقدار تنش فشاری نرمالایز شده می‌شود.

4-3-3- نتایج تحلیل مکانیکی

در ادامه به بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت در اثر تاثیر آتش پرداخته می‌شود. جهت تحلیل مکانیکی، بار فشاری مشخصی به استوانه اثر می‌کند و نتیجه تاثیر این بار همزمان با تاثیر آتش مورد بررسی قرار می‌گیرد. مقدار بار فشاری اعمال شده در این قسمت برابر با 90% استحکام فشاری کمانش یعنی 19.35 MPa در نظر گرفته می‌شود که به یکی از سرهای انتهایی استوانه وارد می‌شود، درحالی‌که سر دیگر، تکیه‌گاه ثابت است.

در "شکل 14" مقدار تنش وان میسز برای نقطه‌ای از صفحه سرد، صفحه میانی و صفحه داغ برحسب زمان مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، مقدار تنش برای هر سه نقطه، در ابتدا باگذشت زمان افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به یک مقدار ماکزیمم، کاهش پیدا می‌کند. با توجه به معادله (5)، تنش ایجاد شده در سازه از دو بخش تنش مکانیکی و تنش حرارتی تشکیل می‌شود و به دما و تغییرات چگالی از طریق کسر جرمی F وابسته است. در ابتدا، با توجه به "شکل 8 و 9"، تا حدود زمان 200 ثانیه چگالی صفحه رو به روی آتش ثابت است، بنابراین تنش در اثر افزایش دمای سازه و افزایش تنش حرارتی، افزایش می‌یابد.

اما پس از آن، با تجزیه رزین و کاهش چگالی مقدار کسر جرمی کاهش‌یافته و تنش به‌تدریج کاهش می‌یابد. برای صفحه داغ، مطابق با "شکل 9" پس از گذشت حدود 800 ثانیه مقادیر چگالی آن تغییر نمی‌کند و به چگالی کامپوزیت کاملاً سوخته شده می‌رسد، لذا مقدار کسر جرمی صفر می‌شود. در این زمان طبق "شکل 14" مقدار تنش برای صفحه داغ صفر می‌شود. این مطلب با فیزیک مسئله هم هم‌خوانی دارد، زیرا پس از سوختن کامل، صفحه کامپوزیتی تبدیل به زغال می‌شود و مقاومت آن در مقابل تحمل بار صفر می‌گردد، بنابراین دیگر نمی‌تواند تنشی را تحمل کند و تنش برای چنین صفحه‌ای صفر می‌شود. برای بقیه صفحات (میانی و سرد) همین روند اما به‌صورت کندتری رخ می‌دهد.

در "شکل‌های 15 و 16" مقایسه کرنش ماکزیمم و جابه‌جایی در صفحات سرد، میانی و داغ برحسب زمان تا 2000 ثانیه نشان داده شده است. با توجه

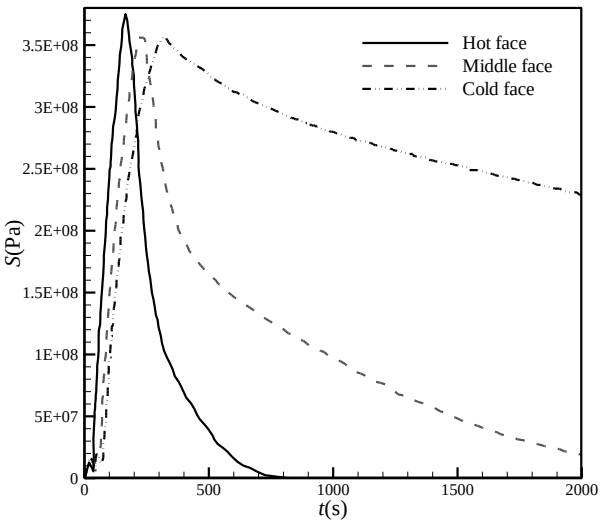

Fig. 14 Mises stress vs. time for hot, middle and cold face

شکل 14 مقایسه تنش در نقطه‌ای از صفحه سرد، صفحه میانی و صفحه داغ

به این شکل‌ها، مقدار کرنش و جابجایی برای صفحه داغ (صفحه مقابل آتش)، در زمان حدود 700 ثانیه به یکباره تغییرات شدید و غیرطبیعی دارد. می‌توان نتیجه گرفت که نتایج مربوط به کرنش و جابه‌جایی تا زمانی که صفحه کامپوزیتی نسوخته است یا در ابتدای فرآیند سوختن قرار دارد (به‌عنوان‌مثال برای صفحه داغ تا زمان حدود 500 ثانیه) اعتبار دارد و پس از آن با از بین رفتن بخش اعظم صفحه کامپوزیت، تبدیل‌شدن به خاکستر و کاهش شدید مقاومت و مدول الاسیسیته، عملاً این صفحه نقشی در تحمل بار و تنش نخواهد داشت و مقادیر به‌دست آمده برای کرنش و جابه‌جایی از طریق محاسبات، غیر فیزیکی خواهند بود.

لازم به ذکر است که تنها نتایج مربوط به جابه‌جایی و کرنش برای صفحه سوخته نامعتبر است، اما با توجه به شکل‌های قبل مربوط به تنش، تنش در صفحات درست محاسبه می‌شود و تنش در صفحه سوخته همان‌طور که انتظار می‌رود، برابر با صفر است. بنابراین، نتایج جابه‌جایی و کرنش برای بقیه

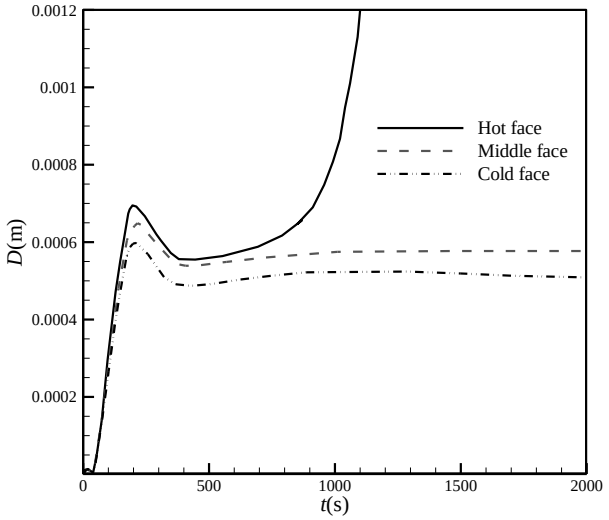

Fig. 15 Displacement vs. time for hot, middle and cold face

شکل 15 مقایسه مقادیر جابجایی در نقطه‌ای از صفحه سرد، میانی و صفحه داغ

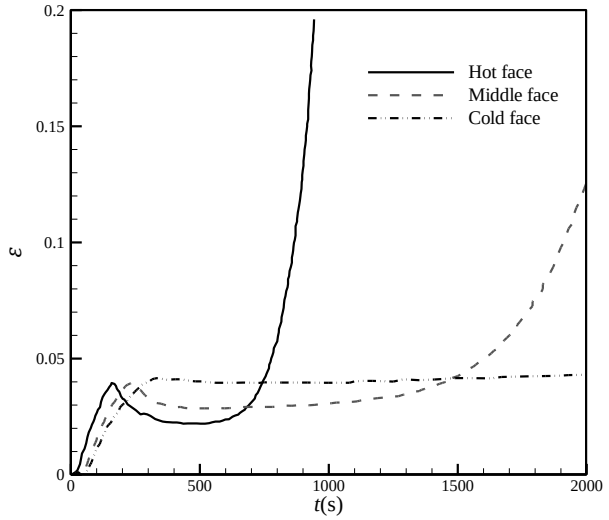

Fig. 16 Strain vs. time for hot, middle and cold face

شکل 16 مقایسه مقادیر کرنش برحسب زمان در نقطه‌ای از صفحه سرد، میانی و صفحه داغ

قسمت‌های کامپوزیت که هنوز به مرحله سوختن نرسیده‌اند، نیز معتبر می‌باشد.

5- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی اثر آتش بر روی سازه‌های کامپوزیتی پلیمری پرداخته شده است. پس از بررسی معادلات حاکم، مطالعاتی برای یافتن روشی برای حل این معادلات انجام گرفت. روش حل معادلات حاکم حرارتی و مکانیکی بوسیله برنامه نویسی فرترن و از طریق زیرروال‌های نرم افزار صنعتی آباکوس به این نرم افزار وارد گردید.

یک روش حل، زمانی می‌تواند معتبر باشد که نتایج حاصل از حل با نتایج کارهای پیشین نزدیک باشد. در این پژوهش برای اطمینان از صحت روش حل، اعتبار سنجی با چندین پژوهش معتبر دیگر انجام گرفت. در ادامه یک هندسه استوانه ای کامپوزیتی تحت تاثیر آتش مورد تحلیل قرار گرفت و در مورد نتایج بدست آمده بحث گردید. این سازه استوانه ای کامپوزیتی در بسیاری از کاربردهای دریایی و هوافضا مورد استفاده می‌باشد که بعضا امکان قرارگرفتن در معرض آتش خطر مهمی در آن‌ها می‌باشد. نتایج مربوط به این پژوهش می‌تواند مبنای طراحی‌های آینده قرار گیرد.

در هندسه استوانه ای مشاهده شد که توزیع دما در راستای ضخامت به مراتب بیشتر از توزیع دما در راستای عمود بر جهت آتش می‌باشد. همچنین نتایج نشان دادند که تاثیر مستقیم آتش موجب بالا رفتن دمای لایه‌های کامپوزیت و تجزیه رزین می‌شود و این تجزیه شدن به تدریج در عمق لایه کامپوزیت پیشروی می‌کند که موجب کاهش استحکام کامپوزیت می‌گردد. این کاهش استحکام در حالت اعمال بار فشاری می‌تواند منجر به شکست و از بین رفتن سازه شود که باید در تحلیل حرارتی-مکانیکی چنین سازه‌هایی حتما مدنظر قرار گیرد. همچنین با تخمین زمان شکست کامپوزیت، می‌توان میزان نیروی قابل تحمل توسط سازه را در شرایط مختلف تاثیر آتش بر سازه، تعیین نمود.

6- مراجع

[1] A. P. Mouritz, A. G. Gibson, *Fire Properties of Polymer Composite Materials*, pp. 133-158, Berlin: Springer Science & Business Media, 2007.

[2] J. Henderson, M. Tant, M. Doherty, E. O'Brien, Characterization of the high-temperature behaviour of a glass-filled polymer composite, *Composites*, Vol. 18, No. 3, pp. 205-215, 1987.

[3] A. T. Grenier, N. A. Dembsey, J. R. Barnett, Fire characteristics of cored composite materials for marine use, *Fire Safety Journal*, Vol. 30, No. 2, pp. 137-159, 1998.

[4] J. Lua, J. O'Brien, C. T. Key, Y. Wu, B. Y. Lattimer, A temperature and mass dependent thermal model for fire response prediction of marine composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, No. 7, pp. 1024-1039, 2006.

[5] A. Mouritz, S. Feih, E. Kandare, Z. Mathys, A. Gibson, P. Des Jardin, S. Case, B. Lattimer, Damage and failure modelling of fibre-polymer composites in fire, *Proceedings of The 17th International Conference on Composite Materials*, Edinburgh, UK, July 27-31, 2009.

[6] P. Gu, M. Dao, R. Asaro, Structural stability of polymer matrix composite panels in fire, *Marine Structures*, Vol. 22, No. 3, pp. 354-372, 2009.

[7] Z. Zhang, S. Case, J. Lua, A model and finite element implementation for the thermo-mechanical analysis of polymer composites exposed to fire, *Proceedings of The 17th International Conference on Composite Materials*, Edinburgh, UK, July 27-31, 2009.

[8] E. Kandare, G. Griffin, S. Feih, A. Gibson, B. Lattimer, A. Mouritz, Fire structural modelling of fibre–polymer laminates protected with an intumescent coating, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, No. 5, pp. 793-802, 2012.

[9] P. Summers, B. Lattimer, S. Case, S. Feih, Sensitivity of thermo-structural model for composite laminatesi in fire, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, No. 5, pp. 783-792, 2012.

[10] A. Anjang, V. S. Chevali, E. Kandare, A. P. Mouritz, S. Feih, Tension modelling and testing of sandwich composites in fire, *Composite Structures*, Vol. 113, No. 1, pp. 437-445, 2014.

[11] A. Anjang, V. S. Chevali, B. Y. Lattimer, S. W. Case, S. Feih, A. P. Mouritz, Post-fire mechanical properties of sandwich composite structures, *Composite Structures*, Vol. 132, No. 1, pp. 1019-1028, 2015.

[12] Z. Zhang, *Thermo-Mechanical Behavior of Polymer Composites Exposed to Fire*, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2010.

[13] A. Gibson, Y. S. Wu, J. Evans, A. Mouritz, Laminate theory analysis of composites under load in fire, *Journal of Composite Materials*, Vol. 40, No. 7, pp. 639-658, 2006.

[14] C. Luo, *Mathematical Modeling of Thermo-Mechanical Damage of Polymer Matrix Composites in Fire*, PhD Thesis, the University at Buffalo, State University of New York, 2010.

[15] S. Feih, Z. Mathys, A. Gibson, A. Mouritz, Modelling the compression strength of polymer laminates in fire, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38, No. 11, pp. 2354-2365, 2007.

[16] P. Summers, B. Lattimer, S. Case, S. Feih, Predicting compression failure of composite laminates in fire, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, No. 5, pp. 773-782, 2012.