

مدل‌سازی رفتار لوله‌های کامپوزیتی زمینه پلیمری حامل سیال در معرض آتش هیدروکربنی

علیرضا رحیمی^{۱*} و احسان سلاخی^۲

۱- عسلویه، شرکت پتروشیمی بوشهر، واحد مهندسی معکوس و ساخت کالا

۲- مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

چکیده ...

علی‌رغم خواص مکانیکی بسیار خوب مواد کامپوزیتی، مقاومت این مواد در برابر آتش مناسب نیست. بنابراین با توجه به استفاده روزافزون از لوله‌های کامپوزیتی به‌ویژه در صنایع نفت و گاز و پتروشیمی، تحلیل آتش‌سوزی در این لوله‌ها بسیار پراهمیت است. مهم‌ترین هدف این مقاله بررسی اثرات آتش بر مقاومت لوله‌های کامپوزیتی و میزان و مدت‌زمان دوام آوردن آن‌ها با انجام تحلیل حرارتی-مکانیکی به روش عددی برای لوله‌ی کامپوزیتی حامل سیال با بهره‌گیری از نرم‌افزار MATLAB بوده است. در مرحله مدل‌سازی حرارتی ابتدا توزیع حرارت ناشی از آتش‌سوزی مواد نفتی در لوله کامپوزیتی برحسب مکان و زمان به‌دست آورده شده و سپس در مرحله مدل‌سازی مکانیکی، افت خواص مکانیکی بر اثر این افزایش دما محاسبه شده و با در نظر گرفتن تنش‌های وارده از طرف سیال داخل لوله و همچنین تنش‌های حرارتی به وجود آمده، تنش‌های نهایی محاسبه شده است. سپس مدل حرارتی-مکانیکی حاصل با نتایج موجود در مقالات مرتبط، اعتبارسنجی شده و مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت با استفاده از معیار شکست Tsai-Wu زمان شکست لوله کامپوزیتی محاسبه شد. نتایج نشان دادند که با تخمین زمان شکست لوله کامپوزیتی، می‌توان میزان نیروی قابل‌تحمل توسط لوله را در شرایط مختلف تأثیر آتش بر لوله، تعیین کرد.

واژه‌های کلیدی:

آتش،
تحلیل مکانیکی-حرارتی،
کامپوزیت،
لوله‌های کامپوزیتی زمینه
پلیمری

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

al.rahimi@bupc.ir

مقدمه

مواد کامپوزیتی به دلیل مقاومت مکانیکی بالا، سبک بودن، مقاومت در برابر خوردگی و سایش، کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند. در عین حال، یکی از مهم‌ترین عیوب کامپوزیت‌های زمینه پلیمری، اشتعال‌پذیری بالای رزین آن‌هاست. از آنجا که یکی از مهم‌ترین کاربردهای مواد کامپوزیتی در صنعت نفت، گاز و پتروشیمی به کارگیری آن‌ها در ساخت لوله‌ها و مخازن کامپوزیتی برای نگهداری و انتقال مواد نفتی و مشتقات آن‌هاست که به واسطه شرایط محیطی کارکرد و سیال داخلی می‌تواند در معرض آتش‌سوزی قرار گیرند. بنابراین تحلیل رفتار لوله‌های کامپوزیتی حامل سیال در مقابل آتش هیدروکربنی برای تحلیل چگونگی رفتار، مدت‌زمان دوام آوردن، میزان مقاومت و عمر این لوله‌ها بسیار حائز اهمیت است.

لوله‌های کامپوزیتی زمینه پلیمری از ترکیب الیاف، رزین و افزودنی‌ها متناسب با شرایط فرایندی و عملیاتی موردنظر ساخته می‌شوند که استفاده از ترکیب الیاف شیشه به همراه رزین پلی‌استر، وینیل‌استر و اپوکسی در صنعت رایج‌تر است. عامل اصلی ضعف لوله‌های کامپوزیتی در برابر آتش ناشی از قابلیت اشتعال‌پذیری بالای رزین است و سوختن کامپوزیت‌ها در واقع تجزیه رزین پلیمری آن‌هاست. هنگامی که دمای سطح رو به آتش در کامپوزیتی بالا رود و به دمای تجزیه رزین برسد؛ حرارت، دود و بخارهای سمی آزاد می‌شوند و زمانی که مقدار این گازها به حد بحرانی برسد آتش‌سوزی رخ می‌دهد. از طرفی بعد از گذشت مدت زمانی ضخامتی از کامپوزیت سوخته شده، خواص مکانیکی آن دچار کاهش شده، ریسک رخ دادن کمانش و تورق افزایش یافته و لوله مقاومت خود را در مقابل فشار سیال و سایر نیروهای وارده از دست می‌دهد. با وجود عملکرد ضعیف کامپوزیت‌ها در برابر آتش، پایین بودن نرخ انتقال حرارت که باعث کندگی گسترش آتش در آن‌ها می‌شود و همچنین امکان استفاده از پوشش‌های مقاوم به آتش، کامپوزیت‌ها را گزینه خوبی برای سکوها نفتی فراساحلی و لوله‌ها و مخازن مواد نفتی کرده است.

در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در خصوص تحلیل رفتار مواد کامپوزیتی غیر لوله‌ای در برابر آتش انجام شده است و کتاب‌هایی نیز در این زمینه منتشر شده است که می‌توان به کتاب مقاومت، عملکرد و مدل‌سازی سازه‌های کامپوزیتی در معرض آتش اشاره کرد [۱]. همچنین با استفاده از روش‌های محاسبات عددی به انواع مختلفی از تحلیل‌های حرارتی و مکانیکی روی کامپوزیت‌ها پرداخته شده است، مانند تحقیقات گیسون و همکاران در سال ۲۰۰۶ که اقدام به ارائه مدل ترمو-مکانیکی برای تعیین افت خواص مکانیکی در کامپوزیت مسطح لایه‌ای

داغ و تورق شده کردند [۲] یا مدل ترمو-مکانیکی که توسط فیه و همکاران در سال ۲۰۰۷ برای پیش‌بینی دما، تجزیه حرارتی، مقاومت فشاری و زمان شکست لایه در معرض آتش ارائه شده است [۳].

یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی سازه‌های کامپوزیتی تعیین مدت دوام و قابلیت تحمل بار در معرض آتش است و بنابراین سازوکارهای شکست مواد کامپوزیتی حائز اهمیت است، در کتابی که پائول رابینسون و همکاران در سال ۲۰۱۲ نگاشته‌اند، این موضوع مورد بررسی قرار گرفته است [۴]. در سال ۲۰۱۲ مدل ترمو-مکانیکی سه‌بعدی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی آسیب‌های ناشی از آتش‌سوزی برای ساندویچ پنل‌های پلیمری توسط لووا و همکاران ایجاد شد [۵] و آنجانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۵ به ارائه مدلی برای تخمین زمان شکست کامپوزیت‌های ساندویچی تحت بار کششی هم‌زمان با آتش یک‌طرفه پرداختند [۶] و جورجیو ریزک و همکاران در سال ۲۰۱۸ مدلی سه‌بعدی را برای پیش‌بینی طول عمر ساندویچ پنل‌ها در شرایط آتش دما بالا تا ۵۷۰ درجه سانتی‌گراد توسعه دادند [۷].

اخیراً سپهری و سلاحي [۸] با انجام شبیه‌سازی اجزای محدود به ارزیابی آسیب در پنل‌های کامپوزیتی ساندویچی فاقد و دارای پوشش عایق مقاوم به حریق در معرض حریق و ضربه بالستیک پرداختند. همچنین سلاحي و همکارانش [۹] با ارائه مدل ترکیبی عددی به مطالعه گسیختگی مخازن کامپوزیتی تحت فشار نامتقارن و در معرض حریق پرداختند.

محیط ساحلی چالش‌های بیشتری را برای طراحی سازه‌های دریایی ایجاد می‌کند. جایی که آتش‌سوزی، هرچند نادر است، می‌تواند اثرات فاجعه‌باری داشته باشد. با توجه به اهمیت این موضوع در سال ۲۰۱۹ کتابی توسط نیواین و همکاران منتشر شده که به بررسی عملکرد کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف در معرض آتش‌سوزی پرداخته است. این الیاف برای استفاده در صنایع دریایی مانند ساخت کشتی، زیردریایی و سازه‌های دریایی کاربرد دارند [۱۰].

با مروری بر تحقیق‌های فوق مشاهده می‌شود که در زمینه تحلیل لوله‌های کامپوزیتی در برابر آتش تحقیقات بسیار کمی صورت گرفته است که اکثراً در نهادهای نظامی و محرمانه، طبقه‌بندی شده و قابل ارائه نیستند.

۲ روش حل

۱-۲ فرضیات

به منظور ارائه حل عددی، لوله کامپوزیتی با قطر خارجی ۰/۸۴۲

دوم سوختن رزین کامپوزیت است، همچنین در این معادله از عبارت مربوط به انتقال حرارت ناشی از خروج گازهای فرار صرف‌نظر شده است [۱۱].

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[k \frac{\partial T}{\partial r} \right] - \frac{\partial \rho}{\partial t} (Q + h - h_g) \quad (1)$$

معادله ۲ که به صورت جفت‌شده و هم‌زمان با معادله ۱ حل می‌شود، معادله نرخ جنبشی آرنیوس برای واکنش مرتبه یک است که میزان تغییرات چگالی لوله کامپوزیتی در حال سوختن را برحسب زمان و دما نشان می‌دهد.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\rho - \rho_d) A \exp\left(-\frac{E}{R * T}\right) \quad (2)$$

در معادلات فوق، T دما، ρ چگالی، C_p ظرفیت حرارتی فاز جامد در فشار ثابت، K رسانایی حرارتی و r شعاع لوله کامپوزیتی است. همچنین Q حرارت تجزیه، h آنتالپی فاز جامد، h_g آنتالپی گازهای حاصل از واکنش هستند. در معادله آرنیوس نیز، A ثابت معادله، E انرژی فعال‌سازی، ρ_d مقدار چگالی ماده تجزیه‌شده نهایی، R ثابت جهانی گازها است. شرایط مرزی و اولیه برای حل معادلات فوق به صورت زیر است:

- معادله تغییر دمای سطح رو به آتش برحسب زمان برای آتش هیدروکربنی به‌عنوان شرط اولیه در سطح خارجی لوله در نظر گرفته می‌شود که به صورت معادله ۳ است [۱۲]:

$$T = 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) + 293.15 \quad (3)$$

طبق معادله فوق دمای سطح روبه آتش لوله کامپوزیتی در زمان صفر برابر دمای ۲۹۳/۱۵ درجه کلونین (۲۰ درجه سانتی‌گراد) به دست می‌آید که دمای تقریبی محیط است و بخشی از شرط اولیه مسئله است.

- شرط مرزی در سطح داخلی لوله به صورت معادله ۴ است:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

- شرط اولیه مربوط به چگالی به صورت معادله ۵ تعریف می‌شود:

$$\rho(x, 0) = \rho_0(x) \quad (5)$$

خروجی تحلیل در این مرحله توزیع حرارت در لوله کامپوزیتی

متر و قطر داخلی ۰/۸ متر که الباف تشکیل‌دهنده آن از جنس شیشه و رزین آن از جنس وینیل‌استر در نظر گرفته شده است، مدل‌سازی شد. فرضیات مورد استفاده در مدل‌سازی به شرح زیر هستند:

- لوله به اندازه کافی بلند و بزرگ فرض می‌شود که بتوان آن را به‌عنوان استوانه جدار نازک و یک‌بعدی تحلیل کرد.
- شعله مستقیم آتش مواد هیدروکربنی به صورت یکنواخت و تقارن محوری در سطح خارجی لوله فرض می‌شود.
- خصوصیات مکانیکی و حرارتی لوله کامپوزیتی با دیدگاه ماکروسکوپی در نظر گرفته شده است.
- مرتبه معادله آرنیوس برای نرخ تجزیه رزین برابر یک در نظر گرفته می‌شود.
- و رفتار لوله‌های کامپوزیتی به صورت ارتوتروپیک در نظر گرفته می‌شود.
- از انتقال حرارت ناشی از خروج جرمی گاز صرف‌نظر شده است.
- از تغییرات جرم در حل معادلات تنش صرف‌نظر شده است.
- از فرض شبه‌پایدار در حل معادلات استفاده شده است.

۲-۲ استخراج معادلات حاکم

ابتدا معادلات حاکم حرارتی و مکانیکی که برای تحلیل آتش‌سوزی در کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، استخراج شده و سپس از طریق روش عددی تفاضل محدود در نرم‌افزار متلب حل می‌شوند. مدل توسعه‌یافته در این پژوهش می‌تواند در صنایع مختلف به‌ویژه صنایع نفت، گاز و پتروشیمی مورد استفاده تحلیلگران و مهندسان در بررسی تأثیرات آتش بر لوله‌های کامپوزیتی و تعیین مدت‌زمان استقامت و جلوگیری از شکست این‌گونه لوله‌ها، قرار گیرد.

۲-۲-۱ مدل‌سازی حرارتی

وقتی لوله کامپوزیتی از سمت بیرون در معرض آتش قرار می‌گیرد، از سه طریق دچار انتقال حرارت می‌شود؛ تشعشع از سمت آتش، همرفت به‌وسیله هوای گرم اطراف لوله در سمت رو به آتش و هدایت گرمایی که در آن گرما در راستای ضخامت لوله منتقل می‌شود. برای به‌دست آوردن توزیع دما در مکان‌ها و زمان‌های مختلف، نیاز به حل معادلات حرارتی آتش است. معادله انتقال حرارت ناشی از آتش در مختصات استوانه‌ای به صورت معادله ۱ است که همان معادله انرژی یک‌بعدی در راستای شعاع لوله کامپوزیتی است. در این معادله جمله اول سمت راست مربوط به انتقال حرارت رسانش و جمله

برحسب زمان و مکان است. با معکوس‌گیری از ماتریس فوق ماتریس سفتی به دست می‌آید که درایه‌های آن برای ورود به معادله یک‌بعدی جابه‌جایی در راستای شعاع برحسب زمان، معادله ۸، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[C_{11} r \frac{\partial u_r}{\partial r} + C_{12} u_r \right] - C_{11} \frac{u_r}{r^2} - \frac{C_{12}}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} = \rho \frac{\partial^2 u_r}{\partial T^2} \quad (8)$$

خروجی معادله ۸ مقادیر جابه‌جایی در زمان‌های مختلف است. در ادامه با استفاده از روابط کرنش-جابه‌جایی، معادلات ۹، مقادیر کرنش در زمان‌های مختلف محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r}, \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \gamma_{rz} = \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \quad (9)$$

با جای‌گذاری کرنش‌های به‌دست‌آمده از معادلات ۹ در رابطه ماتریسی ۱۰، تنش‌های موردنظر در قسمت مدل‌سازی مکانیکی به‌دست می‌آید. برای مدل‌سازی دقیق، خواص مواد در این مدل‌سازی وابسته به دما در نظر گرفته شده است. در این ماتریس منظور از T، اختلاف دما است.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \sigma_{zr} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_r - \alpha_r T \\ \varepsilon_\theta - \alpha_\theta T \\ \varepsilon_z - \alpha_z T \\ \gamma_{zr} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

۲-۲-۴ مدل‌سازی شکست

یکی از پر کاربردترین نظریه‌های شکست مورد استفاده در کامپوزیت‌های ناهمسانگرد نظریه‌ی شکست سای-وو است. این نظریه شکست، بر اساس نظریه شکست کامل انرژی بلترامی است. در زیر معادله ۱۱ مربوط به معیار شکست سای-وو آمده است. در اولین زمانی که شرط معیار سای-وو برقرار نشود گسیختگی شروع شده و زمان گسیختگی لوله در معرض آتش و فشار داخلی به دست می‌آید.

$$(11)$$

$$H_1 \sigma_1 + H_2 \sigma_2 + H_6 \tau_{12} + H_{11} \sigma_1^2 + H_{22} \sigma_2^2 + H_{66} \tau_{12}^2 + 2H_{12} \sigma_1 \sigma_2 < 1$$

که مقادیر Hها به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$H_1 = \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_1^C)_{ult}} \quad (12)$$

۲-۲-۲ معادله افت خواص مکانیکی

افزایش دما و تجزیه کامپوزیت موجب تشکیل لایه سوخته موسوم به لایه زغالی می‌شود. این لایه خصوصیات مکانیکی حالت اولیه خود را از دست داده و دچار افت خواص می‌شود. بنابراین لازم است که در گام نخست، افت خواص مکانیکی این لایه به دست آورده شود. در حال حاضر اطلاعات کمی در مورد اثرات تجزیه روی خواص مکانیکی شناخته شده است و در پژوهش‌ها اکثراً از معادله پیشنهادی ۶ استفاده می‌شود [۱].

$$P(T) = P_U - \frac{P_U - P_R}{2} \left(1 + \tanh \left(k (T - T_g) \right) \right) \quad (6)$$

در این رابطه P نماینده هرکدام از خصوصیات مکانیکی و U و R به ترتیب مقادیر خاصیت مکانیکی در دمای بالا و پایین است. K ضریب هدایت حرارتی و T_g دمای انتقال شیشه‌ای است. نتایج حاصل در این مرحله شامل مقدار مدول کشسانی شعاعی (E3)، مماسی (E1)، محوری (E2)، مدول برشی (G)، استحکام کششی (شعاعی، مماسی و محوری)، استحکام فشاری (شعاعی، مماسی و محوری) و استحکام برشی برحسب دما است.

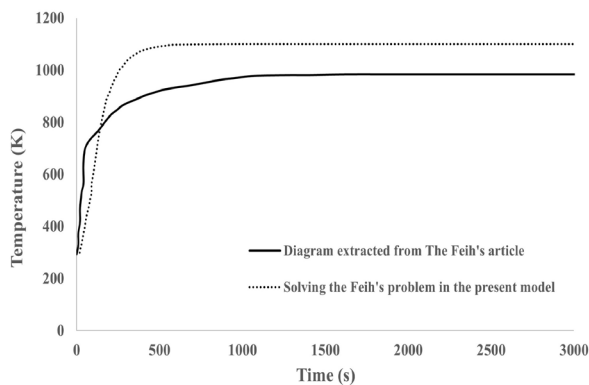
۲-۲-۳ مدل‌سازی مکانیکی

هدف این مرحله تعیین مجموع تنش‌های ناشی از فشار هیدرواستاتیکی سیال داخل لوله و تنش‌های حرارتی ایجاد شده در اثر آتش و در نهایت بررسی گسیختگی و زمان رخداد آن است. برای تعیین تنش‌ها ابتدا از معادلات جابه‌جایی و سپس کرنش و نهایتاً تنش استفاده شده است. کلیه معادلات مذکور از کتاب کاو (Kaw) استخراج شده است [۱۳].

با جای‌گذاری مقادیر مدول کشسانی به‌دست‌آمده از بخش قبل که برحسب زمان و مکان است می‌توان ماتریس معکوس سفتی در یک ماده با رفتار ارتوتروپیک را به صورت معادله ۷ تعریف کرد:

$$(7)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}$$



شکل ۱ نمودار مقایسه‌ای نتیجه حل مسئله فیه در مدل‌سازی حاضر با نتیجه استخراجی از مقاله فیه.

است و از آنجا که اختلاف متوسط دو نمودار ۱۲٪ است، بنابراین مدل‌سازی موجود دقت لازم را دارد.

با توجه به اینکه در مقاله فیه و همکاران، شرط مرزی در سطح پشت به آتش به صورت انتقال حرارت جابه‌جایی و تابشی در نظر گرفته شده است دمای نهایی در سطح گرم، میانی و پشت به آتش در سه دمای متفاوت و در مجموع در دمای پایین‌تری به حالت پایدار رسیده‌اند.

۳-۲ نتایج مدل حرارتی

در مرحله اول پژوهش با حل هم‌زمان معادلات انرژی و معادله چگالی آرنیوس، نمودارهای توزیع دما برحسب زمان برای مدت زمانی که لوله کامپوزیتی ۱۲۰ ثانیه در برابر آتش قرار گرفته است در سه سطح خارجی، داخلی و میانی ضخامت لوله بررسی شده و نتایج در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، آتش باعث افزایش تدریجی دمای هر لایه شده و پس از سپری شدن زمانی در حدود ۵۰ ثانیه به حالت پایدار می‌رسد. سطح خارجی لوله در مدت زمان کمتر و صفحات میانی و داخلی به ترتیب در مدت زمان بیشتری به پایداری می‌رسند. همچنین با توجه به اینکه انتقال حرارت در سطوحی که رو به آتش نیستند از طریق انتقال حرارت رسانشی گسترش می‌یابد و ضریب رسانایی حرارتی کامپوزیت‌ها، کوچک است، می‌توان از انتقال حرارت در راستای غیر از شعاع صرف‌نظر کرد.

نمودار تغییرات چگالی برحسب زمان نیز در شکل ۳ آورده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با تجزیه شدن کامپوزیت، به تدریج چگالی آن کاهش می‌یابد. شدت کاهش چگالی در سطح خارجی به ترتیب بیشتر از سطح میانی و سطح سرد است.

$$H_{11} = \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult} (\sigma_1^C)_{ult}} \quad (13)$$

$$H_2 = \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_2^C)_{ult}} \quad (14)$$

$$H_{22} = \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult} (\sigma_2^C)_{ult}} \quad (15)$$

$$H_6 = 0 \quad (16)$$

$$H_{66} = \frac{1}{(\tau_{12})_{ult}^2} \quad (17)$$

$$H_{11} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult} (\sigma_1^C)_{ult} (\sigma_2^T)_{ult} (\sigma_2^C)_{ult}}} \quad (18)$$

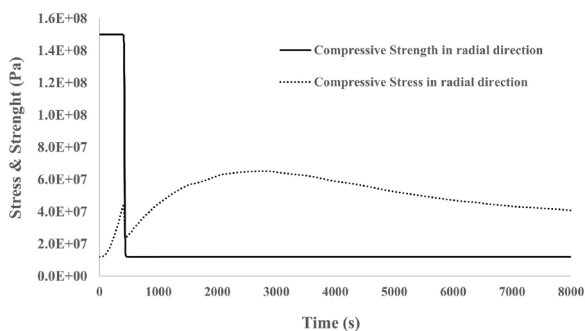
همچنین $\sigma_1 = \sigma_\theta$ ، $\sigma_2 = \sigma_z$ ، $\tau_{12} = \tau_{\theta z}$ ، σ_{ult} ها برابر با حد نهایی متناظر برای هر تنش است. شکست به وجود آمده در لوله کامپوزیتی ناشی از فشار هیدرواستاتیکی وارده از طرف سیال و تنش حرارتی ناشی از افزایش دما است.

۳ ارائه نتایج

۳-۱ نتایج اعتبارسنجی

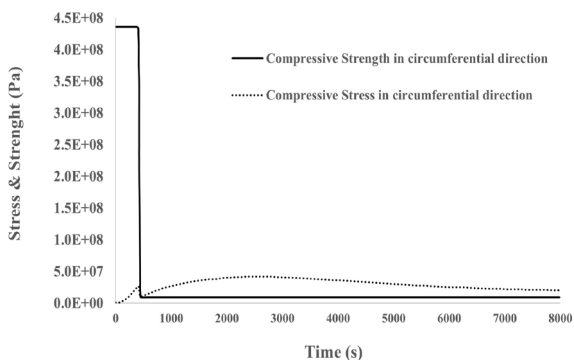
پس از کدنویسی کامل معادلات حاکم در متلب، برای اطمینان از صحت مدل به کار گرفته شده، مسئله حل شده در تحقیق تجربی که توسط فیه و همکاران ارائه شده است [۳]، در مدل‌سازی موجود حل شده و نتیجه آن با مقادیر واقعی مقایسه و اعتبارسنجی شده است. نمونه مورد بررسی صفحه کامپوزیتی تک لایه از جنس شیشه وینیل استر با ابعاد 100×100 میلی متر مربع و ضخامت ۹ میلی‌متر است که از یک طرف تحت شار حرارتی آتش قرار گرفته است. خواص گرمایی کامپوزیت مورد بررسی در پروژه حاضر مطابق با خواص در نظر گرفته شده در تحقیق فیه و همکاران است [۳].

فرایند آتش به صورت شار حرارتی ثابت با مقدار ۷۵ کیلووات بر متر مربع برای صفحه رو به آتش و بارگذاری مکانیکی به صورت بار فشاری استاتیکی برابر با ۱۹/۳۵ مگا پاسکال است. در شکل ۱ نتیجه حل مسئله مرجع در مدل‌سازی موجود با مقادیر واقعی آن از مقاله فیه برای دو سطح خارجی مقایسه شده

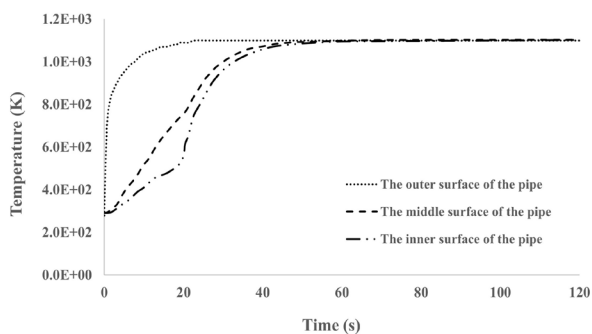


شکل ۴ تنش و استحکام فشاری در جهت شعاعی روی سطح میانی لوله.

میزان جابه‌جایی‌ها، کرنش‌ها و تنش‌ها محاسبه می‌شوند. نتایج مربوط به کرنش و جابه‌جایی تا زمانی که صفحه کامپوزیتی نسوخته است یا در ابتدای فرآیند سوختن قرار دارد اعتبار دارد و پس‌از آن با از بین رفتن بخش اعظم صفحه کامپوزیت، تبدیل شدن به خاکستر و کاهش شدید مقاومت و مدول کشسانی، عملاً این صفحه نقشی در تحمل بار و تنش نخواهد داشت. شکل‌های ۴، ۵ و ۶ تنش فشاری و استحکام فشاری را در سه جهت شعاعی، محیطی و محوری برای یک نقطه روی میانه ضخامت لوله کامپوزیتی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار تنش در ابتدا با گذشت زمان افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به مقدار بیشینه، کاهش پیدا می‌کند. تنش ایجاد شده در سازه از دو بخش مکانیکی و حرارتی تشکیل می‌شود و به دما و تغییرات چگالی وابسته است. در ابتدا، چگالی صفحه رو به آتش ثابت است، بنابراین تنش در اثر افزایش دمای سازه و افزایش تنش حرارتی، افزایش می‌یابد. اما پس‌از آن، با تجزیه رزین و کاهش چگالی مقدار کسر جرمی کاهش یافته و تنش به تدریج کاهش می‌یابد.



شکل ۵ تنش و استحکام فشاری در جهت محیطی روی سطح میانی لوله.



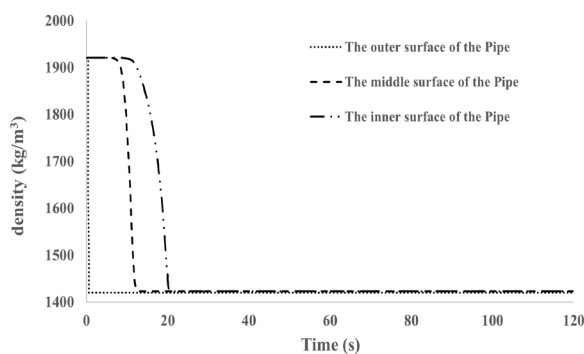
شکل ۶ نمودار تغییر دما برحسب زمان در سه سطح خارجی، میانی و داخلی لوله کامپوزیتی.

طبق معادله آرنیوس ۲ هرچه مرتبه واکنش بیشتر باشد تغییرات شدیدتری در چگالی ایجاد می‌شود. از آنجا که در مقاله فیه واکنش از مرتبه یک است و باتوجه به اینکه شار جرم گازهای فرار از طریق انتگرال‌گیری از تغییرات چگالی در راستای ضخامت طبق معادله ۱۹ به دست می‌آید؛ بنابراین نتیجه مهمی که از این بررسی‌ها حاصل می‌شود، این است که در صورت کوچک بودن مرتبه واکنش در معادله آرنیوس می‌توان از محاسبه انتقال حرارت جابه‌جایی مربوط به گازهای فرار صرف‌نظر کرد [۱۰]. بنابراین در پژوهش حاضر نیز از این عامل صرف‌نظر شده است.

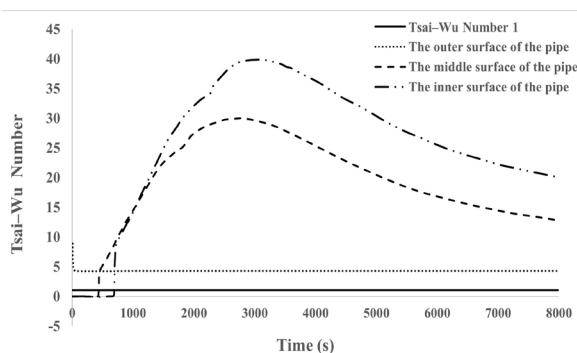
$$\dot{m}_g = \int_X^L \frac{\partial \rho}{\partial t} dx \quad (19)$$

۳-۳ نتایج مدل مکانیکی

برای تحلیل مکانیکی، فشار هیدرو استاتیکی برابر با ۲۰ مگا پاسکال از طرف سیال داخل لوله به آن وارد شده و نتیجه تأثیر این فشار همراه با تأثیر آتش مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا محاسبات مربوط به افت خواص کامپوزیت انجام شده و سپس



شکل ۷ نمودار تغییر چگالی بر حسب زمان در سه سطح خارجی، میانی و داخلی لوله کامپوزیتی.



شکل ۷ تغییرات زمانی معیار سای-وو بر حسب زمان در سه سطح خارجی، میانی و داخلی لوله کامپوزیتی.

رخ داده است. در شکل ۷ زمان شکست برای لوله کامپوزیتی در سطوح خارجی، میانی و داخلی بررسی شده است.

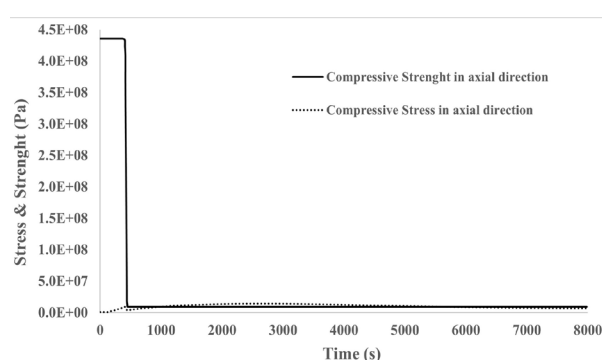
در نمودار شکست مربوط به سطح خارجی لوله کامپوزیتی، نمودار تنش به سرعت نمودار استحکام را قطع کرده و عدد سای-وو با شیب زیادی به ۱ می‌رسد که به معنای شکست سریع پوسته‌ی خارجی لوله کامپوزیتی به دلیل تشکیل لایه زغالی است که تحمل تنش فشاری را ندارد. نمودار مربوط به سطح میانی و داخلی لوله در مدت زمان بیشتری عدد سای-وو ۱ را قطع کرده و شکسته‌اند.

در شکل ۸ نرخ تغییرات تنش در راستای شعاعی بر حسب زمان برای صفحات داخلی، میانی و خارجی رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نرخ تغییرات تنش در راستای ضخامت دارای مقادیر بزرگی است و این نرخ تغییر تنش با حرکت از صفحه داخلی به سمت صفحه خارجی بیشتر می‌شود.

۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش لوله کامپوزیتی حامل سیال در نرم‌افزار حل عددی MATLAB مورد بررسی قرار گرفت. در این مدل لوله کامپوزیتی دارای الیافی از جنس شیشه و رزینی از جنس وینیل‌استر بوده و تحت تنش‌های حرارتی و فشار هیدرو استاتیکی از طرف سیال داخل لوله قرار داشت.

در مرحله اول معادلات حاکم حرارتی شامل معادله انرژی و معادله تغییر چگالی آرنیوس به صورت کوپل شده به لوله کامپوزیتی اعمال شد. در این مرحله توزیع حرارت و تغییرات چگالی بر حسب زمان برای سه سطح بیرونی، میانی و داخلی به دست آورده شده است. در مرحله دوم افت خواص مکانیکی لوله کامپوزیتی ناشی از افزایش دما و تجزیه بر حسب زمان محاسبه شده است. سپس مقادیر و نحوه تغییرات جابه‌جایی، کرنش و تنش نشان داده شده است.

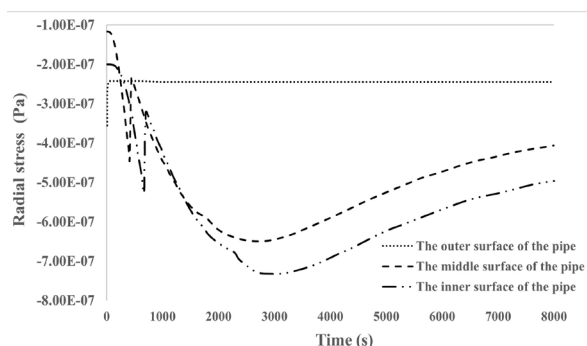


شکل ۸ تنش و استحکام فشاری در جهت محوری روی سطح میانی لوله.

۴-۳ نتایج مدل سازی شکست

برای سنجش زمان شکست نظریه‌های مختلفی وجود دارد که با توجه به تفاوت ماهیت آن‌ها، نتایج مختلفی برای زمان شکست به دست می‌آید. در مقاله فیه [۳]، به مدت‌زمانی که یک‌لایه کامپوزیت بتواند بار خارجی را تحت تأثیر آتش تحمل کند، زمان شکست گفته می‌شود، به صورت مدت‌زمانی که استحکام باقیمانده کاهش می‌یابد تا به سطح تنش خارجی وارد شده برسد، محاسبه می‌شود. طبق این تعریف و با توجه به فشار داخلی ناشی از سیال در مسئله ما که برابر با ۹۰٪ استحکام فشاری کمانش در نظر گرفته می‌شود شکست در لوله کامپوزیتی تحت بررسی بعد از گذشت ۷۲۱ ثانیه اتفاق می‌افتد. واضح است که بار فشاری بیشتر از این مقدار منجر به شکست سازه کامپوزیتی در زمانی کوتاه‌تر می‌شود و در بار فشاری کمتر از این مقدار، کامپوزیت تا زمان بیشتری دوام می‌آورد.

با توجه به اینکه در مواد کامپوزیتی پیش از شکست کامل، خرابی رخ می‌دهد، لذا در پژوهش حاضر از معیار شکست سای-وو استفاده شده است که معیاری دقیق‌تر برای تعیین شکست در کامپوزیت‌ها است. طبق این نظریه‌ی شکست در زمان ۷۱۶ ثانیه



شکل ۹ نرخ تغییرات تنش در راستای شعاعی در سه سطح خارجی، میانی و داخلی لوله کامپوزیتی.

حرارت و فشار سیال قرار گیرد. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده از انجام این پژوهش به شرح زیر هستند:

- ۱- قرارگیری لوله‌های کامپوزیتی در معرض آتش موجب بالا رفتن دمای لایه‌های کامپوزیت و تجزیه رزین می‌شود.
- ۲- افزایش دما و تجزیه رزین به تدریج در عمق لایه کامپوزیت نفوذ کرده و موجب افت خواص مکانیکی و استحکام می‌شود.
- ۳- کاهش استحکام ناشی از افزایش دما و تجزیه هم‌زمان با فشار هیدرو استاتیکی سیال جاری می‌تواند منجر به شکست لوله‌های کامپوزیتی حامل مواد نفتی شود.
- ۴- با تخمین زمان شکست کامپوزیت، می‌توان میزان فشار قابل تحمل از طرف سیال را در طراحی‌ها و شرایط عملیاتی تعیین کرد.

در مرحله بعد با استفاده از معیار شکست سای-و-مدت دوام آوردن کامپوزیت در مقابل تنش هم‌زمان حرارتی و فشاری محاسبه شده است. برای اطمینان از صحت نتایج حاصل، نتایج به‌دست‌آمده با پژوهش معتبر دیگری اعتبارسنجی شد. مدل انتخاب‌شده بر روی لوله کامپوزیتی اعمال و در مورد نتایج آن بحث و بررسی صورت گرفت.

لوله‌های کامپوزیتی در بسیاری از کاربردهای صنایع نفت، گاز و پتروشیمی مورد استفاده هستند و با توجه به شرایط عملیاتی و کاربردی آن‌ها و خطرات احتمالی که می‌توانند داشته باشند تحلیل رفتار آن‌ها در مواجهه با آتش از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین نتایج این پژوهش می‌تواند مبنای طراحی‌های آینده به‌ویژه برای برآورد مدت دوام لوله‌های کامپوزیتی در مقابل

مراجع

- ۱- سلاخی احسان، مقاومت، عملکرد و مدل‌سازی سازه‌های کامپوزیتی در معرض آتش، سازمان چاپ و انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی، چاپ اول، مردشت، ۱۳۹۵.
2. Gibson AG., Wu YS., Evans JT., Mouritz AP., Laminated Theory Analysis of Composites Under Load in Fire, *Journal of Composite Materials*, 40, 639-697, **2006**.
3. Feih S., Mathys Z., Gibson AG., Mouritz AP., Modelling the Compression Strength of Polymer Laminates in Fire, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38, 2354-2365, **2007**.
4. Robinson P., Greenhalgh E., Silvestre P., Editors., Failure Mechanisms in Polymer Matrix Composites: Criteria, Testing and Industrial Applications, *Cambridge: Woodhead Publishing*, England, **2012**.
5. Luo C., Lua J., DesJardin PE., Thermo-Mechanical Damage Modeling of Polymer Matrix Sandwich Composites in Fire, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43, 814-821, **2012**.
6. Anjang A., Chevali VS., Lattimer BY., Case SW., Feih S., Mouritz AP., Post-Fire Mechanical Properties of Sandwich Composite Structures, *Composite Structures*, 132, 1019-1028, **2015**.
7. Rizk G., Legrand V., Khalil K., Casari P., Jacquemin F., Durability of Sandwich Composites Under Extreme Conditions: Towards the Prediction of Fire Resistance Properties Based on Thermo-Mechanical Measurements, *Composite Structures*, 186, 233-245, **2018**.
8. Sepehri A., Selahi E., Damage Evaluation of Protected and Non-Protected Composite Sandwich Panels with Insulation Subjected to Fire and Impact Loads, *Iranian Journal of Science and Technology: Transactions of Mechanical Engineering*, 44, 333-345, **2020**.
9. Selahi E., Setoodeh A.R., Tahani M., Failure Analysis of Fiber Glass-Vinylester Composite Cylinders Subjected to Fire and Asymmetric Transient Pressure, *Polymer Composites*, 42, 5607-5623, **2021**.
10. Nguyen Q., Tran J., Ren X., Zhang G., Mendis P., Fire Performance of Maritime Composites, *Cambridge: Woodhead Publishing*, England, **2019**.
11. Zhang Z., Thermo-Mechanical Behavior of Polymer Composites Exposed to Fire, Virginia Tech, USA, **2010**.
12. Fire Tests on Building Materials and Structures, British Standards Institution BS 476, Part 20, **1987**.
13. Kaw AK., Mechanics of Composite Materials, CRC press, USA, **2006**.

