



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و هفت، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۱۰۱ تا ۱۰۹
Vol. 47, No. 1, Summer 2015, pp. 101-109



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی مکانیک)
Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering)
(AJSR - ME)

تحلیل حرارتی نظری و تجربی عایق فداشونده آزیست-فنولیک

آرش اسماعیلی^{۱*}، سعود ناصری^۲

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

(دریافت ۱۳۹۲/۱/۰۱، پذیرش ۱۳۹۳/۱۰/۱۵)

چکیده

یکی از چالش‌های مهم مهندسی که در سامانه‌های پرواز سرعت بالا وجود دارد، گرمایش آئرودینامیک است. به همین دلیل در این سامانه‌ها از سیستم حفاظت حرارتی استفاده می‌شود. یکی از اجزای اصلی این سیستم‌ها، عایق‌های فداشونده است. در پژوهش حاضر تحلیل نظری و تجربی عایق آزیست فنولیک به صورت یک‌بعدی انجام شده است. رزین‌های فنولیک با بیشترین بازده تخریب حرارتی بطور وسیعی در عایق‌های فداشونده زغال گذار استفاده می‌شوند. وقتی یک عایق فداشونده با شار حرارتی مواجه می‌شود سطح آن گرم شده و پس از آن با شروع تخریب، گازهای تولیدشده و خروجی از زغال، عمل خنک‌سازی را انجام می‌دهند. معادلات حاکم بر این پدیده با استفاده از روش اختلاف محدود گسسته‌سازی و به صورت ضمنی و گذرا حل شده‌اند. برای مقداردهی خواص ترموفیزیکی از گراف‌های اسمی و برای مقداردهی ثوابت پیرولیز از واکنش‌های ترموشیمی استفاده شده است. صحت‌سنجی حل عددی با استفاده از آزمون اکسی‌استیلن انجام شده است. با گذشت زمان اختلاف بین نتایج آزمون و حل عددی افزایش می‌یابد که دلیل آن می‌تواند مدل یک‌بعدی و جمع‌شدن کاذب انرژی دو بعد مدل‌نشده در بعد مدل‌شده باشد. با این حال نتایج حل عددی و آزمون تجربی هم‌خوانی خوبی دارند و میانگین قدر مطلق خطا ۷/۵۴٪ است.

کلمات کلیدی

سیستم حفاظت حرارتی، پیرولیز، فداشوندگی، آزمون اکسی‌استیلن، آزیست-فنولیک، روش اختلاف محدود.

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: arash.esmaili@gmail.com

۱- مقدمه

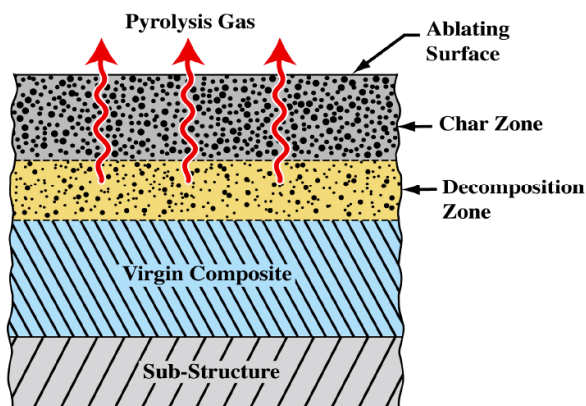
عایق‌های حرارتی موضوع جذاب و مهمی برای مهندسیین و محققین برای توسعه فناوری‌های مرتبط با انتقال حرارت محسوب می‌شود. یکی از چالش‌های مهم مهندسی که در پروازهای فضایی سرعت بالا وجود دارد، گرمایش آئرو دینامیک است. ماشین‌های پرنده‌ای که با سرعت‌های بالا در جو زمین حرکت می‌کنند، به دلیل اصطکاک سطحشان با هوا به شدت گرم می‌شوند و باید تمهیداتی اندیشیده شود تا آسیب نبینند. به همین دلیل در سامانه‌های بازگشت‌پذیر به زمین^۱ از سیستم‌های حفاظت حرارتی^۲ استفاده می‌شود. وظیفه‌ی این سیستم‌ها، حفظ دمای بخش‌های خاصی از یک سیستم در یک محدوده‌ی قابل قبول است، تا حین فرایندهایی مثل گرمایش آئرو دینامیک به اجزای سیستم آسیبی نرسد. در این میان یکی از مهم‌ترین سازوکارهای دخیل در رفتار عایق‌های به کار رفته در یک سیستم حفاظت حرارتی، فداشوندگی^۳ است. تحلیل و طراحی یک سیستم حفاظت حرارتی مبتنی بر عایق فداشونده، مستلزم حل معادله‌ی حاکم بر انتقال حرارت در عایق فداشونده است. در معادله گفته شده، ضرایبی وارد می‌شوند که ابتدا باید مدل‌هایی مناسب برای این ضرایب انتخاب شود تا جواب حل معادله قابل اطمینان باشد.

مطالعاتی در زمینه‌ی مدل‌سازی عایق‌های فداشونده انجام شده است. گودمن [۱] و آلمن [۲] برای حل بالانس انرژی از روش انتگرالی استفاده کرده‌اند. زین [۳] برای حل گذرای یک‌بعدی از روش θ -momentum استفاده کرده است. چانگ و همکاران [۴] مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از روش θ -momentum و اختلاف محدود انجام داده‌اند. بلکول [۵] با استفاده از روش حجم محدود و با استفاده از اندازه شبکه‌ی متغیر، معادلات یک‌بعدی فداشوندگی را حل کرده است. پاتس [۶] از روش شبه‌پایا^۴ و انتگرالی برای حل معادله‌ی انرژی استفاده کرده است. فن [۷] فداشوندگی سیلیکا فنولیک^۵ را در حالت شبه‌پایا و در جریان آشفته^۶ بررسی کرده است. والبر [۸] نیز مسئله‌ی فداشوندگی را با شار متغیر و خواص حرارتی ثابت حل کرده است. در پژوهش حاضر حل یک‌بعدی فداشوندگی با استفاده از روش اختلاف محدود انجام شده است. خواص حرارتی، به صورت متغیر با دما در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی مرز پس‌رونده از روش شبکه‌سازی مجدد استفاده شده است. برای سنجش صحت حل عددی از آزمون اکسی‌استیلن^۷ (مطابق با استاندارد ASTM-E-285-80) استفاده شده است [۹].

۲- تحلیل نظری

۲-۱- تحلیل نظری فداشوندگی

وقتی کامپوزیت‌های فداشونده، در معرض شار حرارتی بالا قرار بگیرند، ابتدا سطح آنها گرم می‌شود و واکنش تخریب شروع می‌شود و در نهایت زغال متخلخل ایجاد می‌شود. زغال عایق حرارتی است و در اثر عبور گازهای خروجی (ناشی از تخریب حرارتی) از حفره‌هایش، تا حدودی خنک می‌شود. این فرایند در شکل (۱) نشان داده شده است [۱۰].



شکل (۱): شماتیک فرایند پیرولیز [۱۱]

- سازوکارهای جذب و اتلاف گرما در کامپوزیت‌های فداشونده شامل موارد ذیل هستند [۱۲]:
۱. نفوذ حرارت به لایه‌های زیرین و ذخیره آن متناسب با ظرفیت حرارتی ماده
 ۲. تشکیل فازهای مختلف و متغیر در کامپوزیت
 ۳. جذب حرارت توسط گازهای تشکیل شده در لایه‌های زیرین
 ۴. ایجاد فاز مذاب و انتقال حرارت جابجایی در این فاز
 ۵. خروج گازهای تشکیل شده از سطح و پس‌راندن لایه مرزی حرارتی از سطح
 ۶. تابش در سطح
 ۷. واکنش‌های شیمیایی گرماگیر و گرمازا
 ۸. فرسایش مکانیکی جرم از سطح

۲-۲- معادلات حاکم و شرایط مرزی

معادله حاکم بر انتقال حرارت در عایق فداشونده به همراه شرط مرزی آن به شرح زیر است:

$$\left(\rho c + \Delta \hat{H}_P \frac{d\rho}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + \left[c_{pg} G + v_{\infty} \left(\rho c + \Delta \hat{H}_P \frac{d\rho}{dT} \right) \right] \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

که در این رابطه T^* دمای پیرولیز، ΔT^* نصف بازه دمایی که در آن پیرولیز اتفاق می‌افتد و Γ_{max} حداکثر گاززایی است. جدول (۱) مقدار این سه پارامتر را برای کامپوزیت آزیست - فنولیک نشان می‌دهد.

جدول (۱): پارامترهای T^* ، ΔT^* و Γ_{max} برای کامپوزیت آزیست - فنولیک [۱۳]

	Parameter	Unit	Value
1	T^*	°C	550
2	ΔT^* (°C)	°C	250
3	Γ_{max}	-	0.25

نرخ جرمی گازهای خروجی ناشی پیرولیز از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$G = \int_{\infty}^x \frac{dp}{dT} dx \approx \rho_0 \Gamma v_{\infty} \quad (6)$$

در این رابطه ρ_0 دانسیته اولیه کامپوزیت و v_{∞} نرخ پس‌روی سطح است که با استفاده از داده‌های تجربی در شار 8000 kW/m^2 تقریباً برابر با 0.155 mm/sec است. مشتق دانسیته dp/dT که در رابطه‌ی (۱) آمده است نیز باید در دمای نقطه مورد نظر محاسبه شود. این کار با استفاده از تقریب زیر که با واقعیت هم‌خوانی خوبی دارد، انجام می‌شود [۱۳]:

$$\frac{dp}{dT} = \rho_0 \frac{3}{4\Delta T^*} \left[1 - \left(\frac{T - T^*}{\Delta T^*} \right)^2 \right] \quad (7)$$

ظرفیت گرمایی ویژه گازهای ناشی از سوختن اکسیژن و استیلن، در دمای دیواره 2000 K برابر با 0.91 kJ/kg.K و در دمای لایه مرزی 3400 K برابر با 0.95 kJ/kg.K فرض می‌شود. شار ورودی شعله‌ی اکسی‌استیلن با استفاده از رابطه‌ی (۸) به دست می‌آید:

$$\frac{q_{hw}}{q_{cw}} = \frac{T_e - T_w}{T_e - 300K} \Rightarrow q_{hw} = q_{cw} \cdot \frac{T_e - T_w}{T_e - 300K} \quad (8)$$

که T_e دمای گاز داغ و q_{hw} و q_{cw} به ترتیب شار دیواره‌ی سرد و شار دیواره‌ی گرم هستند. ضریب دمش (γ) نیز از رابطه‌ی زیر حساب می‌شود [۱۳]:

شرایط مرزی نیز به صورت زیر نوشته می‌شوند؛

$$q_{\lambda} = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=S(t)} = \underbrace{\left(\frac{\alpha}{c_p} \right) (I_e - I_w)}_{q_{hw}} - \varepsilon \sigma T^4 + q_{reac} - \underbrace{\gamma G (I_e - I_w)}_{q_{blowing}} \quad (2)$$

$$q_{\lambda} = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (3)$$

شرط اولیه نیز به صورت دمای یکنواخت تعریف می‌گردد؛

$$T(x,0) = T_0 \quad (4)$$

در رابطه‌ی فوق شرط مرزی ۱ (B.C.1) (رابطه ۲) روی مرز پس‌رونده یعنی مرزی که در معرض جریان گاز داغ قرار دارد، و شرط مرزی ۲ (B.C.2) (رابطه ۳) روی سطح داخل ($x=0$) تعریف می‌شود.

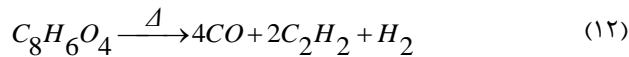
۲-۳- مقداردهی پارامترها

معادله‌ی (۱) شامل ضرایبی است که برای حل این معادله باید معلوم باشند. این ضرایب شامل ضریب هدایت حرارتی عایق (λ)، ظرفیت گرمایی ویژه گاز (C_{pg})، گرمای پیرولیز (ΔH_P)، حاصل‌ضرب دانسیته در گرمای ویژه‌ی عایق (ρc)، نرخ جرمی جریان گاز (G)، تغییرات دانسیته با دما (dp/dT) و سرعت پس‌روی سطح (v_{∞}) هستند. I_e و I_w نیز به ترتیب آنتالپی گاز در دمای گاز داغ و دمای دیواره هستند و α ضریب نفوذ حرارتی است. $S(t)$ مختصات سطح پس‌رونده و q_{reac} گرمای واکنش شعله‌ی اکسی‌استیلن است، که با فرض این که در آن اکسیژن وجود ندارد، مقدار آن صفر در نظر گرفته می‌شود. ضریب هدایت حاصل‌ضرب دانسیته در ظرفیت گرمایی ویژه که توابعی از دما هستند، از گراف‌های اسمی^۹ که از حل معکوس به دست می‌آیند، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۳].

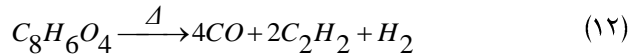
سه ضریب مهم دیگر یعنی نرخ جرمی جریان گاز (G)، تغییرات دانسیته با دما (dp/dT) و سرعت پس‌روی سطح (v_{∞})، با استفاده از مدل‌های تجربی یا نیمه‌تجربی محاسبه می‌شوند. لازم به ذکر است که در ارتباط با این ضرایب، پارامتر مهم دیگری به نام ضریب گاززایی (Γ) تعریف می‌شود که بیانگر کسری از ماده جامد اولیه است که می‌تواند در دمای مشخص به فاز گازی تبدیل شود.

ضریب گاززایی با دقت خوبی از تقریب زیر به دست می‌آید [۱۳]:

$$\Gamma = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{T - T^*}{\Delta T^*} \right] \Gamma_{max}; \quad 0 \leq \Gamma \leq \Gamma_{max} \quad (5)$$



بدین ترتیب ترکیب درصد گازهای خروجی از سطح به صورت جدول (۳) در می‌آید، در نتیجه جرم مولکولی گازهای خروجی (M_g) برابر با 24.24242 kg/mol می‌شود.



جدول (۳): ترکیب درصد گازهای خروجی از سطح

i	n_i (kmol)	w_i (%)
CO ₂	0.6	26.4
CH ₄	1.25	20
C ₂ H ₂	0.65	16.9
CO	1.3	36.4
H ₂	0.325	0.65
Σ	4.125	100
M_g	24.24242	

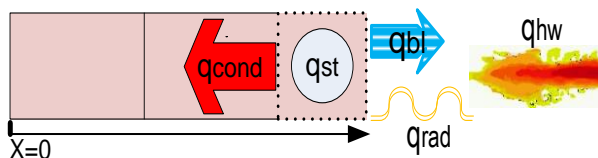
۳- حل عددی

۳-۱- کلیات

با توجه به این که در مورد پژوهش حاضر خواص ترموفیزیکی متغیر با دما هستند، برنامه‌ی رایانه‌ای لازم برای حل معادلات، باید قابلیت دریافت خواص حرارتی متغیر با دما را داشته باشد. شار تابشی به علت داشتن عبارت شامل توان چهارم دما معادله‌ی شرط مرزی را غیرخطی می‌کند. برای خطی‌سازی، همان‌طور که از رابطه‌ی (۱۳) مشاهده می‌شود، در هر گام زمانی از یک حلقه‌ی تکرار، درون حلقه‌ی اصلی استفاده می‌شود و دمای سطح با استفاده از رابطه‌ی ۱۵ اصلاح می‌شود.

$$\varepsilon \sigma T^4 \equiv \varepsilon \sigma (T_{itr-1}^3 \times T_{itr}) \quad (13)$$

T_{itr} دما در تکرار فعلی و T_{itr-1} دما در تکرار قبل از آن است.



شکل (۲): شارهای ورودی و خروجی از سطح عایق

شارهایی که با سطح عایق در تراکنش هستند همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده‌اند عبارتند از:

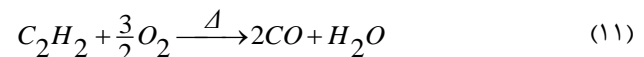
$$\gamma = a \left(\frac{M_e}{M_g} \right)^b \quad (9)$$

که در آن $b=0.55$ است. هم‌چنین برای سطح صاف ضریب a برابر با 0.8 است. در این رابطه M_e جرم مولکولی گاز داغ و M_g جرم مولکولی گاز دمیده شده است. نرخ جرمی بی‌بعد گاز \bar{G} را نیز می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\bar{G} = \frac{Gc_{pe}}{q_{cw}} (T_e - 300) \quad (10)$$

ضرایب و پارامترهایی که باید برای اتمسفر اکسی‌استیلن محاسبه شوند، عبارتند از: ظرفیت گرمایی ویژه‌ی گاز داغ (C_{pe})، جرم مولکولی گاز داغ (M_e)، جرم مولکولی گاز دمیده شده (M_g) و ظرفیت گرمایی ویژه‌ی گاز دمیده شده (C_{pg}). از این چهار پارامتر، موارد اول و دوم مربوط به اتمسفر و موارد سوم و چهارم مربوط به رزین به کاررفته در کامپوزیت است.

اتم‌سفر آزمون اکسی‌استیلن که ناشی از سوختن گاز استیلن با اکسیژن است، بر اساس واکنش زیر است:



بنابراین اتمسفر آزمایش، شامل مونوکسیدکربن و بخار آب به نسبت مولی ۲:۱ است. با در اختیار داشتن ظرفیت گرمایی و جرم مولکولی H_2O و CO در فشار 1 atm و دمای 3400 K به آسانی می‌توان ظرفیت گرمایی و جرم مولکولی اتمسفر را حساب کرد. بر اساس این محاسبات، جرم مولکولی گاز داغ برابر با 24.67 kg/kmol و ظرفیت حرارتی آن برابر با 24.67 kJ/kg.K به دست می‌آید.

جدول (۲) ترکیب درصد گازهای حاصل از پیرولیز رزین فنولیک را در دمای 700°C نشان می‌دهد. این نتایج از کروماتوگرافی گازی به دست آمده است، این آزمون با استفاده از دستگاه CSD (Agilent 6890 GC) 5973hp (Mass) و پیرولایزر CSD 20000 در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران انجام شده است.

جدول (۲): ترکیب درصد گازهای حاصل از پیرولیز

i	(%)wt
CO ₂	26
CH ₄	20
C ₈ H ₆ O ₂	54
Σwt _i	100

ظرفیت گرمایی این مخلوط برابر با 3.1 kJ/kg.K است. ترکیب $C_8H_6O_2$ با عبور از لایه‌های زغال که دمایی بالاتر از 700°C دارند، تجزیه می‌شود:

۴- معیار تجربی

برای سنجش صحت حل عددی در پژوهش حاضر از نتایج آزمون اکسی‌استیلن استفاده شده است. این آزمون روی نمونه‌هایی از کامپوزیت آزیست - فنولیک (۵۰٪ الیاف) به‌عنوان معیار تجربی مقایسه مدل‌ها تعریف می‌شود. رزین فنولیک مورد استفاده دارای چگالی 1200 kg/m^3 و درصد جامد ۸۷٪ است. برای این که بتوان به‌هنگام آزمون دمای داخل این نمونه‌ها را اندازه‌گیری کرد، باید در نقاط معینی از ضخامت قطعه ترموکوپل نصب کرد. داخل نمونه‌های تخت در فواصل ۲، ۴ و ۶ میلی‌متر از سطح نمونه ترموکوپل نصب می‌شود. منظور از سطح نمونه، سطحی است که قرار است، در معرض شعله‌ی اکسی‌استیلن قرار گیرد. برای این منظور به‌هنگام لایه گذاری، بین لایه‌های اول و دوم، لایه‌های دوم و سوم و لایه‌های سوم و چهارم ترموکوپل گذاشته می‌شود. ترموکوپل‌ها از نوع K هستند که قادرند تا 1300°C را اندازه‌گیری نمایند. پس از چیدن لایه‌ها در قالب، بلوک کامپوزیت زیر پرس، تحت فشار و دما پخت می‌شود. این آزمون برای ارزیابی رفتار حرارتی و کارایی فداشوندگی عایق‌های فداشونده بر اساس استاندارد ASTM-E-285-80 انجام شده است. در جدول (۴) شرایط انجام آزمون اکسی‌استیلن آمده است. با استفاده از این آزمون می‌توان گاز داغ با درجه حرارت 3400 K و شار حرارتی 8000 kW/m^2 ایجاد کرد. برای اندازه‌گیری سرعت پسروری سطح، آزمون در سه شار حرارتی انجام می‌گیرد. برای اینکه از پایدار شدن فداشوندگی اطمینان حاصل کنیم، لازم است تا در هر شار حرارتی تست با سه زمان تکرار شود. برای هر شار حرارتی، در پایان هر تست میزان افت وزن از تفاضل وزن نمونه قبل و بعد از تست اندازه گرفته می‌شود. از تقسیم نرخ افت وزن بر چگالی اولیه کامپوزیت و سطح مقطع نمونه، سرعت خوردگی در آن شار حرارتی به‌دست می‌آید. در شکل (۳) شمایی از تجهیزات این آزمون نشان داده شده است. هم‌چنین در شکل (۴) شمایی از قرارگیری ترموکوپل‌ها و مجموعه‌ی داده‌خوانی مشاهده می‌شود.

- شار دیواره‌ی گرم (ورودی)
- شار تابشی (خروجی)
- شار دمشی (خروجی)
- شار هدایتی (خروجی)
- شار ذخیره‌شده

از مسائل چالش‌برانگیز در پژوهش حاضر اینست که با افزایش پسروری در طول زمان، مرز مواجه با شار به گره‌های تعریف‌شده در حل عددی می‌رسد. راهکاری که برای برخورد با این پدیده اندیشیده شده است، حذف گره از سطح است. به این منظور در ابتدای هر گام زمانی میزان پسروری کل تعیین می‌شود. اگر مرز جلورونده به گره برسد، گره‌ی موردنظر حذف و دماهای گام زمانی قبل به گونه‌ای در گره‌های جدید بازنشینی می‌شوند که دمای سطح در انتهای حل در گام قبلی، به سطح جدید در گام زمانی فعلی منتقل شود. دمای سایر نقاط نیز با توجه به موقعیت مکانی باید به درستی منتقل شوند تا از لحاظ فیزیکی دماها در مکان درست خود قرار گیرند.

۳-۲- گسسته‌سازی

از لحاظ زمانی شمای حل ضمنی است، یعنی به جز دمای عبارت $\partial T / \partial t$ ، تمامی دماها در شرط مرزی و معادله‌ی حاکم مربوط به گام زمانی جدید هستند.

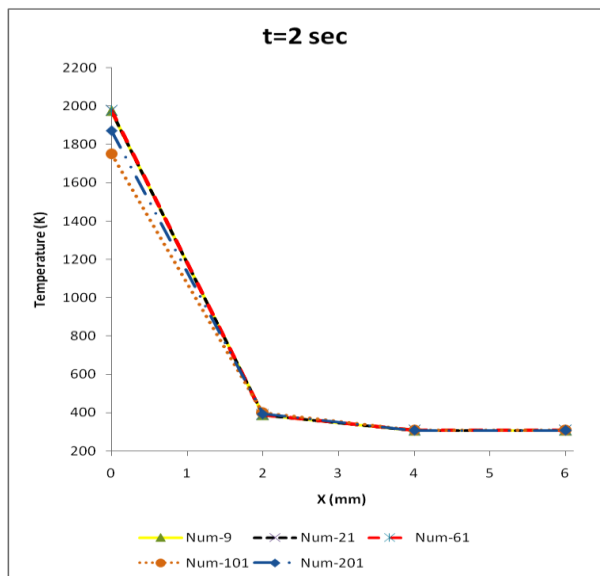
در معادلات حاکم دو مشتق مکانی وجود دارد. یکی جمله پیرولیز $[C_{pg}G + v_{\infty}(\rho c + \Delta H_p \frac{d\rho}{dT})]$ است، که به دلیل ماهیت جابجایی آن، از تفاضل‌گیری پسروری برای مشتق مرتبه اول استفاده می‌شود. ترم دیگر که در آن مشتق مکانی داریم، هدایت است. برای مشتق مرتبه‌ی دوم از تفاضل‌گیری مرکزی استفاده شده است، تا روند نفوذ دما در کل شبکه حالت یکنواخت‌تری به خود بگیرد.

برای حالتی که شبکه‌ی غیریکنواخت وجود دارد، باید برای سه‌گره‌ی نزدیک به سطح از فرمولاسیون دیگری غیر از آن‌چه تا بحال برای گره‌های میانی استفاده شده است، استفاده شود. برای این‌کار بسط تیلور برای گره‌های قبل و بعد نوشته می‌شود.

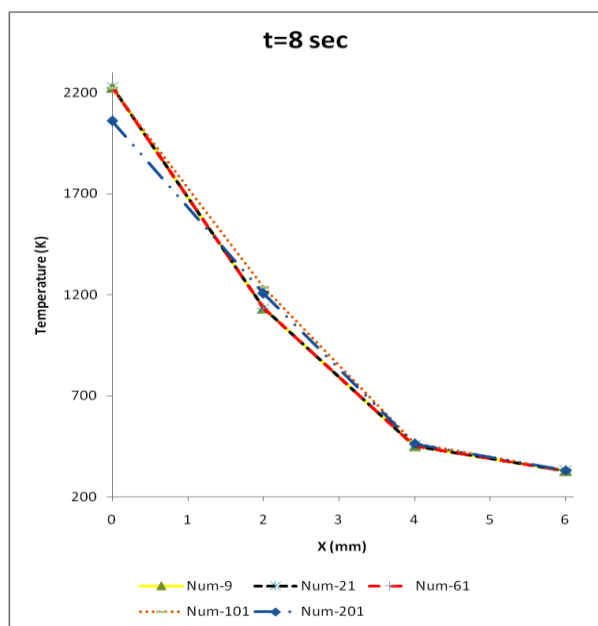
$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_{i+1} - T_i}{dx} \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \left[T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1} + \frac{T_{i+1} - T_i}{dx} (dx' - dx) \right] / \left(\frac{dx^2 + dx'^2}{2} \right) \quad (15)$$

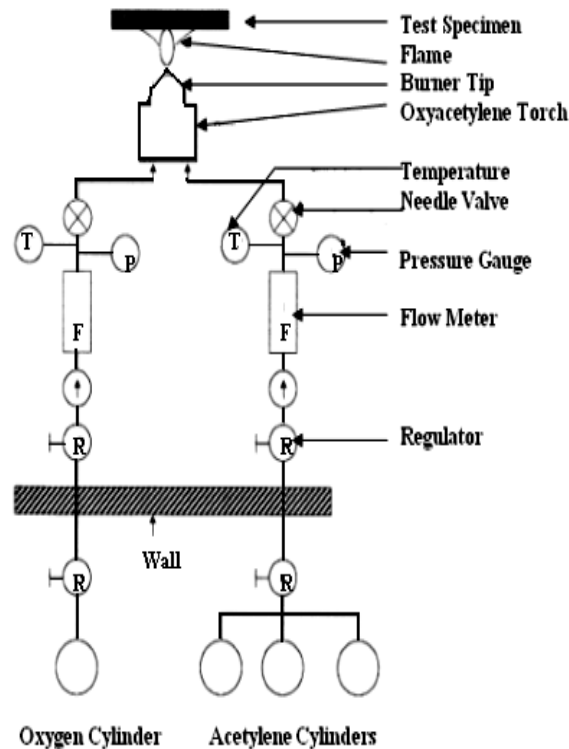
در رابطه‌ی (۱۵) dx طول المان خورده‌نشده و dx' طول اولین المان نزدیک به سطح یا خورده‌شده است.



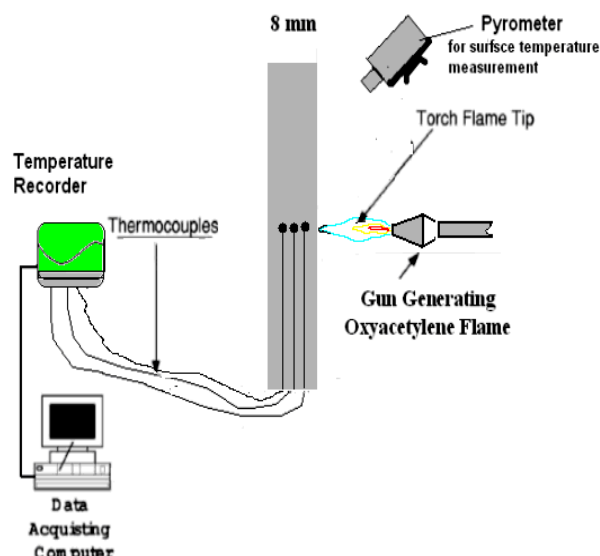
شکل (۵): استقلال از شبکه در زمان ۲ ثانیه



شکل (۶): استقلال از شبکه در زمان ۸ ثانیه



شکل (۳): نمایی کلی از اجزای آزمون شعله اکسی استیلن [۹]



شکل (۴): شمایی از فرارگیری ترموکوپل‌ها و مجموعه داده‌خوانی

۵- نتایج

۵-۱- استقلال از شبکه

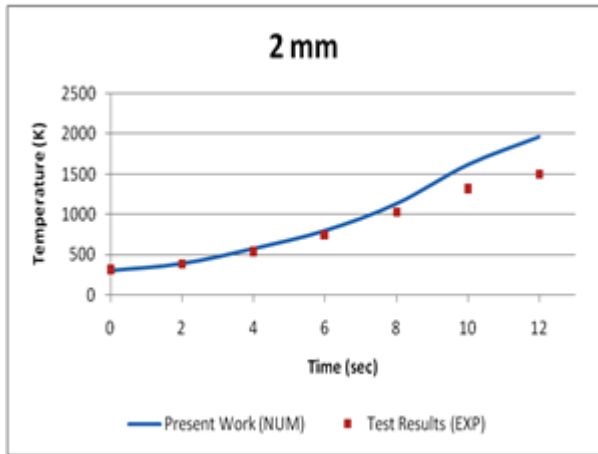
از آن جایی که حل گذرا است، برای دو زمان $t=2 \text{ sec}$ و $t=8 \text{ sec}$ نمودارهای دما بر حسب مکان رسم شده‌اند، تا علاوه بر اثر شبکه اثر زمان نیز در استقلال از شبکه دیده شود. شبکه‌های انتخاب شده دارای ۹، ۲۱، ۶۱، ۱۰۱ و ۲۰۱ گره هستند.

از شکل‌های (۵) و (۶) مشاهده می‌شود که حل مستقل از شبکه است. در ادامه‌ی محاسبات از ۶۱ گره استفاده می‌شود.

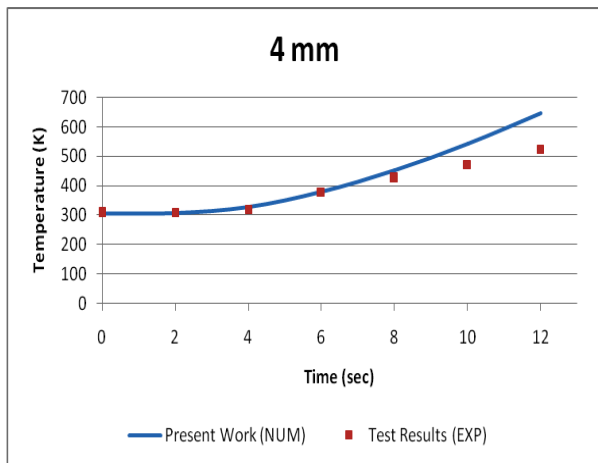
۵-۲- آزمون فرضیه خواص ثابت برای دماهای خارج از محدوده

گراف‌های اسمی

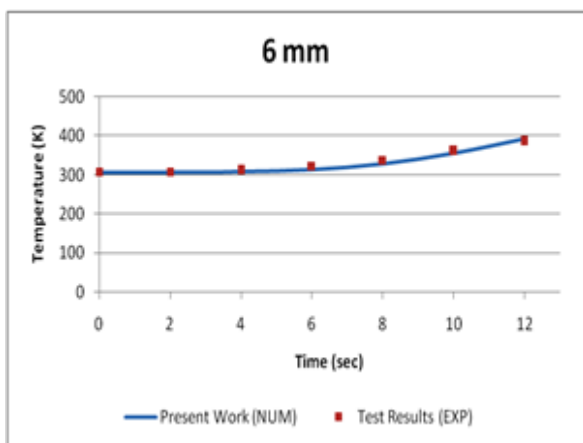
از دیگر چالش‌هایی که پژوهش حاضر با آن روبرو بوده است، اینست که محدوده‌ی دمایی که برای نمودارهای خواص در اختیار است، بین ۳۰۰ تا ۱۴۰۰ کلوین است،



شکل (۹): دمای ۲ میلی متری از سطح نسبت به زمان

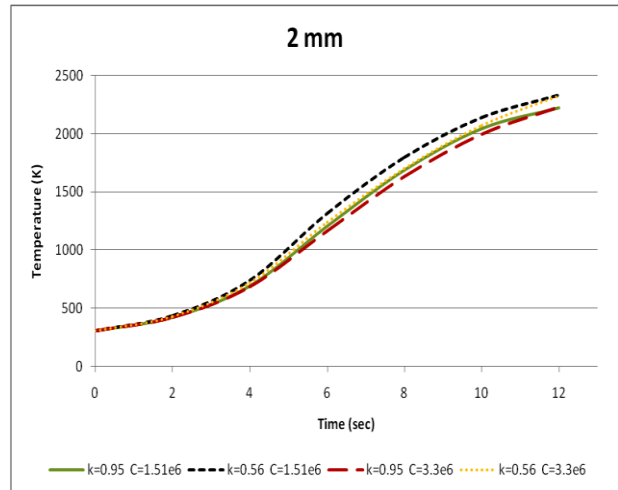


شکل (۱۰): دمای ۴ میلی متری از سطح نسبت به زمان



شکل (۱۱): دمای ۶ میلی متری از سطح نسبت به زمان

در حالی که دمای گره‌های ابتدایی در ثانیه‌های میانی حل از این محدوده تجاوز می‌کند. در برنامه‌ی حاضر برای این محدوده‌ها که داده‌ای برای رفتار خواص نسبت به دما موجود نیست، از خواص ثابت استفاده شده است. برای آزمون صحت این فرضیه، برای کران‌های بالا و پایین محدوده‌های خواص یعنی برای چهار حالت برنامه اجرا شده است و پروفیل دما نسبت به زمان برای یک نقطه‌ی خاص برای این چهار حالت مورد مقایسه قرار گرفته است.

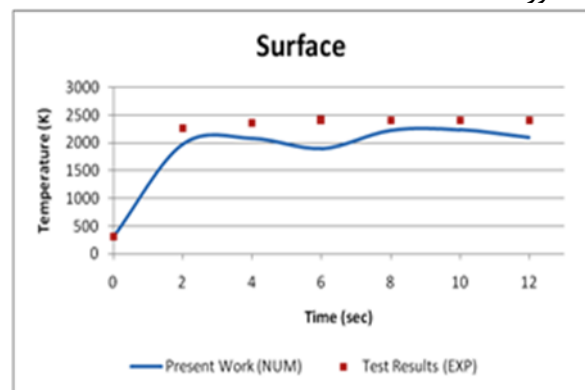


شکل (۷): دمای نقطه‌ی ۲ میلی متر از سطح نسبت به زمان با خواص حدی

همان‌طور که از شکل (۷) مشاهده می‌شود، استفاده از خواص ثابت برای دماهای بیش از ۱۴۰۰ کلوین، خطای زیادی در محاسبات ایجاد نمی‌کند.

۵-۳- توزیع دما در عایق

توزیع دما در سطح عایق و مکان قرارگیری ترموکوپل‌ها یعنی، ۲، ۴ و ۶ میلی متری از سطح عایق با استفاده از حل عددی به دست آمده است و نتایج آن با داده‌های تجربی خوانده شده از ترموکوپل مقایسه شده است. این نتایج در شکل‌های (۸) تا (۱۱) آورده شده‌اند.



شکل (۸): دمای سطح نسبت به زمان

دارند. این اختلاف با گذشت زمان و افزایش انرژی ورودی به سیستم افزایش می‌یابد.

در پژوهش حاضر تحلیل یک‌بعدی گرمایش در یک عایق فداشونده انجام شده است که جنس عایق آزبست-فنولیک بوده است. با تغییر جنس عایق، واکنش‌های ترموشیمی سطح و ضرایب معادلات حاکم تغییر می‌کنند. همچنین با تغییر محیط آزمون نیز این ثوابت و برخی از معادلات تغییر می‌کنند. تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی این عایق‌ها نیز می‌توانند در بهبود نتایج محاسباتی موثر باشند.

۷- مراجع

Goodman, T. R., "The heat balance integral and its application to problems involving a change of phase", Transactions of ASME, Vol. 80, pp. 315- 322, 1958

Altman, M., "Some aspects of the melting solution for a semi infinite slab", Chemical engineering progress symposium series, Vol. 57, pp. 16- 23, 1958

Zien, T. F., "Integral solution of ablation problems with time dependant heat flux", AIAA journal, Vol. 16, pp. 1287- 1295, 1978.

Chung, B. T. F.; Chang, T. Y.; Hsiao, J. S.; Chang, C. I., "Heat transfer with ablation in a half-space subjected to time-variant heat flux", ASME winter annual meeting, paper No.81-WA/HT- 34, 1981.

Blackwell, B. F., "Numerical prediction of one-dimensional ablation using a finite control volume procedure with exponential differencing", Numerical heat transfer, Vol. 14, pp. 17- 34, 2003.

Potts, R. L., "Hybrid integral/quasi-steady solution of charring ablation", AIAA paper 94-2089, 1994.

Fen, R. H.; Gang, D., "A theoretical calculation method of local ablation in region of shock-boundary layer interaction", AIAA paper 80-1688, 1990.

Walber, F. B.; Marcia, B. H. M., "Approximate analytical solution for one-dimensional ablation with time-variable heat flux", 36th AIAA Thermophysics conference, 2003.

ASTM standard, E285-80, "Standard test method for oxyacetylene ablation testing of thermal insulation material", 2002.

از شکل‌های (۸) تا (۱۱) مشاهده می‌شود که داده‌های حل عددی با داده‌های تجربی مطابقت خوبی دارند و میانگین قدرمطلق خطا برای تمام نقاط 7.54% است.

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر برای حل عددی از شمای اختلاف محدود استفاده شده است. از آنجایی که این روش صرفاً یک فرمول‌بندی ریاضی است و لزوماً ضامن بقا نیست، برای صحت رفتار برنامه‌ی رایانه‌ای نوشته شده از آزمون‌های متفاوتی استفاده شده است. نخستین آزمون، عدم وابستگی حل به شبکه است که نتایج آن راضی‌کننده است. آزمون بعدی حذف و اعمال جایگشتی پدیده‌های پیرولیز و خوردگی و تطبیق آن با فیزیک مسئله است. در این آزمون نیز هم‌خوانی کیفی بین فیزیک و نتایج حل عددی خوب بوده است. اختلاف‌های بین حل عددی و نتایج تجربی را می‌توان حاصل از خطای ابزار و داده‌خوانی در مطالعه‌ی تجربی و همین‌طور فرضیات و ساده‌سازی‌های انجام‌شده در معادلات حاکم و حل عددی دانست. از جمله ساده‌سازی‌های انجام‌شده در نظر گرفتن خواص ترموفیزیکی به صورتی یک چندجمله‌ای درجه سوم (با توجه به گراف‌های اسمی) است، همچنین وقتی در پیش‌روی روند حل سطح پس‌رونده به یک گره نزدیک می‌شود، طول المان موردنظر بسیار کوچک می‌شود، بدیهی است این خطا در اثر گسسته‌سازی و ماهیت روش عددی به حل وارد می‌شود و در واقعیت یا در روش تحلیلی از آنجایی که میدان به صورت پیوسته دیده می‌شود و اساساً گره‌ای وجود ندارد، چنین خطایی به وجود نمی‌آید.

در نتایج حل عددی مربوط به دمای سطح (شکل (۸)) نوساناتی در دمای سطح مشاهده می‌شود. دلیل ایجاد این نوسانات به آنجا بازمی‌گردد که با بالا رفتن دمای سطح، شار تابشی خروجی از سطح افزایش می‌یابد و به تبع آن دمای سطح کاهش می‌یابد و پس از آن با کاهش دمای سطح، شار تابشی نیز کاهش می‌یابد. به طور خلاصه می‌توان گفت، شارهای عمده تاثیرگذار بر دمای سطح شار ورودی شعله اکسی‌استیلن و شار خروجی تابشی است. از آنجایی که شار خروجی رفتار نوسانی از خود نشان می‌دهد، دمای سطح در حل عددی نیز تا حدودی انحراف از داده‌های تجربی خواهد داشت که در طول زمان این انحرافات کاهش می‌یابند. دلیل دیگری که برای اختلاف دماهای نتایج نظری و تجربی می‌توان عنوان کرد، مدل‌سازی یک‌بعدی مسئله است. در واقعیت انرژی ورودی به سیستم در سه‌بعد منتشر می‌شود، در حالی که در حل عددی یک‌بعدی، همین انرژی در یک بعد منتشر می‌شود و به همین دلیل است که دماهای حل عددی مقدار بیشتری نسبت به دماهای تجربی

- Полежаев, Ю. В. , Юревич, Ф. Б, “Тепловая защита”, Москва, Энергия, 392с, 1976. [۱۳]
- Amar, A. J., “Modeling of One-Dimensional Ablation with Porous Flow Using Finite Control Volume Procedure”, MSc thesis, North Carolina state university, 2006. [۱۰]
- Yongkang, L., “Phenolic Resin in Heatshields”, 36th International SAMPE Symposium April, 1, 1991. [۱۱]
- Stover, E. R.; Juneau P. W.; Brazel, J. P, [۱۲]
“Ablative Materials”, Vol. 1, pp. 10- 26, 1978.

۸- زیر نویس ها

-
- ^Re-entry Launch Vehicle (RLV)
 - ^Thermal Protection System (TPS)
 - ^Ablation
 - ^Quasi-steady
 - ^Silica Phenolic
 - ^Turbulent
 - ^Oxyacetylene
 - ^Pyrolysis
 - ^Nominal curves
 - ^Chromatography