

مدلسازی احتراق اسپری تحت کنترل فرآیند تبخیر در شرایط مادون بحرانی

مهدی احمدی^۱، عباس فخرطباطبایی^۲، محمدعلی سرودی^۳

پژوهشکده سیستم‌های پدافند هوایی، مرکز تحقیقات فناوری پیشرانس

soroodi_ma@yahoo.com

چکیده

در این مقاله مدلی یک‌بعدی و پایا برای احتراق اسپری در محفظه‌های استوانه‌ای و در شرایط مادون بحرانی ارائه شده است. در این مدل، پس از اختلاط بی‌نهایت سریع سوخت مایع و اکسند گاز، احتراق بلافاصله صورت گرفته و تنها مقیاس زمانی حاکم بر مساله مربوط به تبخیر قطرات سوخت خواهد بود. خواص فاز گازی با استفاده از شرایط تعادل محاسبه شده است. با استفاده از این مدل می‌توان در هر نقطه از محفظه احتراق دما و سرعت گاز، قطر و سرعت قطره، نسبت هم‌ارزی و نیز دبی جرمی گاز و مایع را محاسبه نمود. همچنین با استفاده از این مدل می‌توان پارامترهای حائز اهمیت از نظر طراحی از قبیل طول محفظه، پیشانی شعله و حداکثر دمای گازهای محفظه احتراق را در زمان محاسباتی معقولی تخمین زد.

واژه‌های کلیدی: احتراق اسپری - مادون بحرانی - تعادل شیمیایی - هیتان نرمال - مدلسازی.

۱- مقدمه

احتراق اسپری در کاربردهای مهمی از قبیل موتورهای اشتعال جرقه‌ای و دیزل، توربین‌های گاز، موتورهای راکت، موتورهای پالسی انفجاری یا (Pulse Detonation Engine) PDE و رم‌جت، و کوره‌های صنعتی و زباله‌سوزها (Incinerator) به خدمت گرفته شده است. مطالعات فراوانی به منظور فهم پدیده‌های شیمیایی و فیزیکی احتراق اسپری به انجام رسیده و بسیاری از جنبه‌های تبخیر و احتراق اسپری به نحو مطلوبی شناخته شده که می‌توان مروری بر این مطالب را در مرجع [۱] مطالعه نمود. مدلسازی میدان احتراق اسپری شامل پدیده‌های متنوعی از قبیل ویژگی‌های هیدرودینامیکی تزریق و تشکیل اسپری، مشخصات انتقالی قطرات منفرد، جریان آشفته دوفازی اسپری، واکنش‌های شیمیایی در محیط آشفته و تعامل تشعشع با شیمی و آشفته‌گی بوده [۱-۳] و عموماً برای حل مسائل کاربردی نیاز به شبیه‌سازی‌های عددی پیچیده و وقت‌گیر می‌باشد که استفاده از آنها برای تخمین‌های اولیه طراحی به صرفه نیست.

با وجود پیچیدگی پدیده‌های فوق‌الذکر، در برخی از موارد کاربردی می‌توان با استفاده از مدل‌های ساده یک‌بعدی و فرضیات مطلوب، برخی از جنبه‌های موجود در احتراق اسپری را با دقتی مناسب تخمین زده و از شبیه‌سازی‌های عددی مزبور اجتناب نمود. چنین مدل‌هایی در بررسی اثر تابع توزیع سایز بر فرآیند خشک‌کردن اسپری، شبیه‌سازی تبخیر قطره در موتور وانکل، مطالعه راندمان احتراق در موتورهای راکت سوخت مایع، و بررسی آلاینده‌های محفظه احتراق توربین‌های گاز مورد

۱- کارشناس طراحی پیشرانه‌های نوین

۲- کارشناس ارشد سامانه‌های پیشرانس

۳- کارشناس ارشد مدلسازی احتراق و انفجار

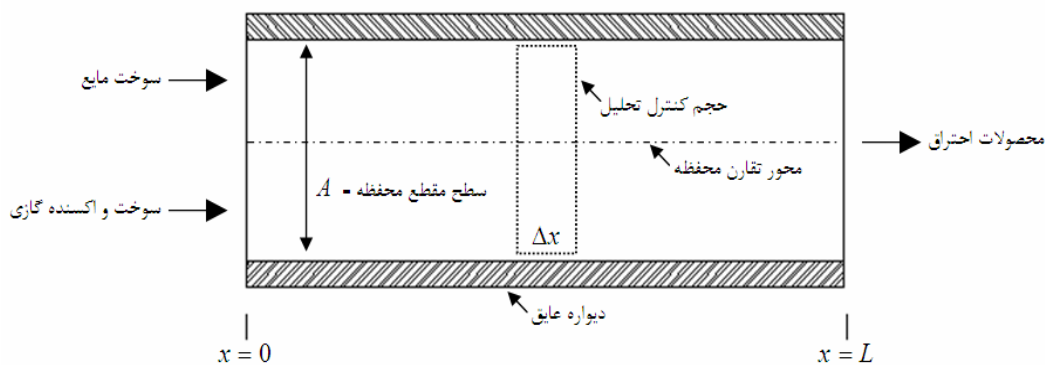
استفاده قرار گرفته اند [۴]. هدف از این مطالعه نیز استفاده از یک مدل ساده یک‌بعدی برای تخمین اولیه پارامترهای طراحی محفظه احتراق موتورهای راکت سوخت مایع، رمجت سوخت مایع و توربین‌های گاز می‌باشد. در قسمتهای آتی این مدل تشریح شده و نتایج حاصل از آن ارائه می‌گردد.

۲- مدل یک‌بعدی احتراق اسپری

در این مطالعه مدلی یک‌بعدی برای احتراق پایای اسپری با توزیع یکنواخت (Monodisperse)، تحت کنترل تبخیر (Vaporization-Controlled) و در شرایط مادون‌بحرانی ارائه شده است. به‌منظور ساده‌سازی مدل از آثار نفوذ (Diffusion) صرف‌نظر شده، فرآیند تبخیر و احتراق یک فرآیند فشار- ثابت در نظر گرفته شده و همچنین محفظه احتراق با سطح مقطع ثابت و تقارن محوری فرض شده است. فاز گازی از قانون گاز ایده‌آل تبعیت کرده و خواص آن از طریق حل تعادلی میدان محاسبه می‌شود. در مدل اعمالی در این مقاله فرض اسپری رقیق (Dilute) یا جریان مجزا (Separated-Flow) اعمال شده و لذا یک فرمولاسیون لاگرانژی-اویلری برای تحلیل محفظه مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از این مدل می‌توان در هر نقطه از طول محفظه احتراق پارامترهای دمای گاز، سرعت گاز، سرعت قطره، نسبت هم‌ارزی، قطر قطره، دبی جرمی گاز و دبی جرمی مایع را محاسبه نمود. همچنین با استفاده از این مدل می‌توان طول محفظه، پیشانی شعله و حداکثر دمای گازهای محفظه احتراق که برای طراحی صفحه‌انژکتور و جنس محفظه احتراق مهم می‌باشد را تعیین کرد. بطور کلی با استفاده از این مدل می‌توان پارامترهای عملکردی انواع محفظه‌های احتراق سوخت مایع را براحتی محاسبه نمود.

۲-۱- تئوری و فرضیات

شکل (۱) تصویر شماتیک محفظه احتراق مورد مطالعه را نمایش می‌دهد. قطرات سوخت بصورت یکنواخت در محفظه توزیع شده و در حین حرکت به سمت پائین دست محفظه در حال تبخیر در جریان گازی هستند. فرض می‌شود که بخار سوخت با گاز مخلوط شده و بلافاصله بسوزد. بدین ترتیب دمای گاز بالا رفته و سرعت تبخیر قطرات گاز افزایش می‌یابد. سرعت گاز نیز بسبب تبخیر قطرات مایع و کاهش چگالی گاز بواسطه احتراق افزایش می‌یابد. جریان یک‌بعدی بوده و فشار در طول محفظه ثابت فرض می‌شود. چنین مدلی در مطالعه محفظه احتراق موتور راکت سوخت مایع [۵ و ۶] و توربین گاز [۷] مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۱- نمای شماتیک محفظه احتراق و حجم کنترل انتخابی

۲-۲- معادلات فاز پیوسته

با توجه به پایا بودن جریان محفظه، براحتی می‌توان معادله بقای جرم را برای حجم کنترل نمایش داده شده در شکل (۱)، به صورت زیر نوشت [۸]:

$$\frac{d\dot{m}_l}{dx} + \frac{d\dot{m}_g}{dx} = 0 \quad (1)$$

که در رابطه فوق \dot{m}_l و \dot{m}_g به ترتیب بیانگر دبی جرمی مایع و دبی جرمی گاز می باشد. با توجه به یکنواخت بودن توزیع قطرات سوخت، می توان \dot{m}_l را به صورت $\dot{m}_l = \dot{N}m_d$ نوشت که در آن \dot{N} بیانگر تعداد قطرات سوخت ورودی به محفظه در واحد زمان بوده و m_d معرف جرم قطره است. با تبدیل جرم قطره کروی به چگالی آن و با استفاده از رابطه (۱) می توان این رابطه را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{d\dot{m}_g}{dx} = -\frac{\pi}{4} \dot{N} \rho_l D \frac{dD^2}{dx} \quad (2)$$

در رابطه اخیر ρ_l و D به ترتیب معرف چگالی مایع تشکیل دهنده قطره و قطر قطره می باشد. تغییرات قطر قطره نسبت به تغییرات مکان در قسمت بعد مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. مقدار \dot{N} را می توان برآستی به دبی جرمی اولیه سوخت ($\dot{m}_{l,0}$) و قطر اولیه قطرات یا D_0 مربوط نمود:

$$\dot{N} = \frac{6\dot{m}_{l,0}}{\pi \rho_l D_0^3} \quad (3)$$

با استفاده از سطح مقطع تزریق (A_{inj}) و سرعت اولیه قطرات ($v_{d,0}$) سوخت مایع و رابطه پیوستگی $\dot{m}_{l,0} = \rho_l A_{inj} v_{d,0}$ ، رابطه (۳) بازنویسی شده و پس از جاگذاری در رابطه (۲) بصورت زیر تبدیل خواهد گردید:

$$\frac{d\dot{m}_g}{dx} = -\frac{6 \rho_l A_{inj} v_{d,0}}{4 D_0^3} D \frac{dD^2}{dx} \quad (4)$$

بدلیل ثابت بودن فشار، معادله مومنتوم حذف شده و تنها کافیسیت تا معادله انرژی در حجم کنترل بدست آید. به طریق مشابه با رابطه (۱)، می توان معادله بقای انرژی فاز گازی را به صورت زیر نوشت [۸]:

$$\frac{d(\dot{m}_g h_g)}{dx} + \frac{d(\dot{m}_l h_l)}{dx} = 0 \quad (5)$$

در رابطه اخیر، h_l و h_g به ترتیب بیانگر انتالپی ویژه فاز گاز و مایع می باشد. بدیهی است که با توجه به فرضیات مساله h_l ثابت بوده و h_g تنها تابعی از دمای گاز یا T_g و نسبت هم‌ارزی (Equivalence Ratio) فاز گاز یا ϕ_g می باشد. با توجه به این مطلب می توان رابطه (۵) را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{dT_g}{dx} = \left(\frac{h_l - h_g}{\dot{m}_g} \frac{d\dot{m}_g}{dx} - \frac{\partial h_g}{\partial \phi_g} \frac{d\phi_g}{dx} \right) / \frac{\partial h_g}{\partial T_g} \quad (6)$$

مقادیر h_g ، $\partial h_g / \partial \phi_g$ و $\partial h_g / \partial T_g$ را می توان با استفاده از ترکیب تعادلی مخلوط گازی در شرایط T_g ، P_g (فشار ثابت محفظه) و ϕ_g مشخص نمود که نحوه محاسبه این متغیرها در قسمت (۳) مورد بررسی قرار خواهد گرفت. تنها پارامتر مجهول رابطه (۶)، تغییرات نسبت هم‌ارزی برحسب تغییرات مکانی در طول محفظه یا $d\phi_g / dx$ است که در این قسمت مورد بررسی قرار می گیرد. بدین منظور فرض می شود که در ورودی محفظه احتراق جریان اولیه فاز گاز موجود باشد که این جریان اولیه می تواند مخلوط نسوخته سوخت و اکسندگازی و یا تنها اکسندگازی باشد. بنابراین می توان دبی جرمی اولیه گاز یا $\dot{m}_{g,0}$ را برحسب مقدار اولیه گاز حاصل از تبخیر سوخت یا $\dot{m}_{f,0}$ و مقدار اولیه اکسندگازی یا $\dot{m}_{o,0}$ بیان کرد:

$$\dot{m}_{g,0} = \dot{m}_{f,0} + \dot{m}_{o,0} \quad (7)$$

نسبت هم‌ارزی در محفظه احتراق به صورت نسبت دبی جرمی سوخت به اکسندگاز در هر نقطه از محفظه به نسبت دبی جرمی سوخت به اکسندگاز در حالت استوکیومتری تعریف می گردد. باید توجه داشت که در محاسبه نسبت دبی جرمی سوخت

به اکسنده، تنها مقداری از دبی جرمی سوخت یا اکسنده که در واکنش تعادلی محفظه احتراق شرکت می‌کنند باید در نظر گرفته شود. بنابراین می‌توان نسبت سوخت به اکسنده در هر نقطه از محفظه را بصورت زیر نوشت:

$$\left(\frac{F}{O}\right)_x = \frac{\dot{m}_g - \dot{m}_{o,0}}{\dot{m}_{o,0}} \quad (8)$$

با توجه به تعریف نسبت هم‌ارزی و با استفاده از رابطه (۸) می‌توان تغییرات نسبت هم‌ارزی در طول محفظه را به صورت زیر نوشت [۸]:

$$\frac{d\phi_g}{dx} = \frac{d\dot{m}_g}{dx} \frac{1}{\dot{m}_{o,0}(F/O)_{stoic}} \quad (9)$$

با توجه به فرضیات مساله، معادلات فاز پیوسته مورد نیاز به روابط (۴) و (۶) محدود می‌شوند. برای محاسبه سرعت گاز یا v_g می‌توان از فرض گاز ایده‌ال و رابطه زیر استفاده نمود:

$$v_g = \frac{\dot{m}_g}{\rho_g A} = \frac{\dot{m}_g R_u T_g}{W_g P_g A} \quad (10)$$

که در رابطه فوق W_g و R_u ، A ، ρ_g بترتیب معرف چگالی گاز، سطح مقطع محفظه احتراق، ثابت جهانی گازها و وزن مولکولی مخلوط گاز می‌باشد.

۲-۳- معادلات فاز گسسته

می‌توان تاریخچه زمانی تغییر قطر قطرات کروی سوخت تک‌جزئی (Single-component) و بدون قابلیت حل در محیط گازی با فرض دمای یکنواخت در قطره و عدد لوئیس واحد را با استفاده از معادله شبه‌پایای بالانس جرم قطره به صورت زیر بیان کرد [۲]:

$$\frac{dD^2}{dt} = \frac{-8k_g}{\rho_l c_{p,g}} \ln(B+1) \quad (11)$$

که در رابطه فوق k_g ، $c_{p,g}$ و B بترتیب معرف ضریب هدایت حرارتی فاز گاز، گرمای ویژه فشار- ثابت فاز گاز و عدد اسپالدینگ (Spalding) یا عدد انتقال جرم بوده و t بیانگر زمان است. براحتی می‌توان رابطه اخیر را با استفاده از سرعت قطره یا v_d به مشتق مکانی تبدیل نمود:

$$\frac{dD^2}{dx} = \frac{-8k_g}{\rho_l c_{p,g} v_d} \ln(B+1) \quad (12)$$

مقدار B را می‌توان با فرض قرار داشتن کل قطره در دمای جوش مایع تشکیل دهنده آن، از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$B = \frac{c_{p,g}(T_g - T_b)}{h_{fg}} \quad (13)$$

در رابطه فوق T_b و h_{fg} به ترتیب بیانگر دمای جوش مایع تشکیل دهنده قطره و گرمای نهان تبخیر قطره می‌باشد. همچنین می‌توان معادله مومنتوم قطره را با فرض نیروی پسا به عنوان تنها نیروی اعمالی بر قطره و با توجه به ثابت بودن فشار محفظه به صورت زیر نوشت:

$$m_d \frac{dv_d}{dt} = \frac{1}{2} \rho_g (v_g - v_d) v_g - v_d |C_D A \quad (14)$$

در رابطه فوق C_D معرف ضریب پسای قطره می‌باشد. به طریق مشابه می‌توان تغییرات سرعت قطره را نیز بر حسب تغییرات مکانی جایگزین نمود. بدین ترتیب می‌توان به کمک رابطه $m_d = \rho_l V_d$ معرف حجم قطره می‌باشد، رابطه اخیر را بصورت زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{dv_d}{dx} = \frac{3C_D \rho_g (v_g - v_d) |v_g - v_d|}{4D \rho_l v_d} \quad (15)$$

سرعت و چگالی گاز از رابطه (۱۰) محاسبه شده و مقدار ضریب پسا در محیط آرام را می‌توان از رابطه زیر تعیین نمود [۸]:

$$C_D \approx \frac{24}{\text{Re}_{D,rel}} + \frac{6}{1 + \sqrt{\text{Re}_{D,rel}}} + 0.4 \quad (16)$$

در رابطه فوق $\text{Re}_{D,rel}$ معرف عدد رینولدز بر مبنای سرعت نسبی قطره نسبت به گاز بوده و مقدار آن بر حسب قطر قطره و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Re}_{D,rel} = \frac{\rho_g D |v_g - v_d|}{\mu_g} \quad (17)$$

در رابطه اخیر μ_g بیانگر ضریب لزجت گاز می‌باشد. با توجه به فرضیات اعمالی بر مساله، دستگاه معادلات (۴)، (۶)، (۱۲) و (۱۵) توصیف کاملی از میدان حل ارائه می‌نمایند. برای حل دستگاه مزبور، علاوه بر مقادیر دبی جرمی گاز، دمای گاز و قطر و سرعت قطرات در ورودی محفظه، باید مقدار $\dot{m}_{o,0}$ نیز در ورودی مشخص باشد. همچنین مقادیر فشار محفظه، سطح مقطع محفظه و طول آن، سطح مقطع تزریق و در نهایت نسبت سوخت به اکسنده در حالت استوکیومتری نیز از پارامترهای اصلی دستگاه معادلات به حساب می‌آیند.

۳- محاسبه خواص

تعیین سه دسته خواص برای حل دستگاه معادلات حاکم بر مساله ضروری است. دسته اول خواص مربوط به فاز مایع است که عبارتند از h_l, T_b, ρ_l و h_{fg} که در این زمینه می‌توان از اطلاعات مرجع [۹] و یا مراجع مشابه استفاده نمود. دسته دوم اطلاعات مربوط به خواص انتقالی فاز گازی می‌باشد که عبارتند از k_g و μ_g . به منظور سهولت در محاسبه خواص انتقالی فاز گاز، در این مطالعه از فرضیات ساده‌کننده مرجع [۸] استفاده شده است. بدین منظور فرض شده است که ضریب لزجت گاز معادل با ضریب لزجت اکسنده گازی می‌باشد ($\mu_g = \mu_{ox}$). همچنین در محاسبه ضریب هدایت گاز از رابطه پیشنهادی مرجع [۱۰] استفاده شده است:

$$k_g = 0.4k_f + 0.6k_{ox} \quad (18)$$

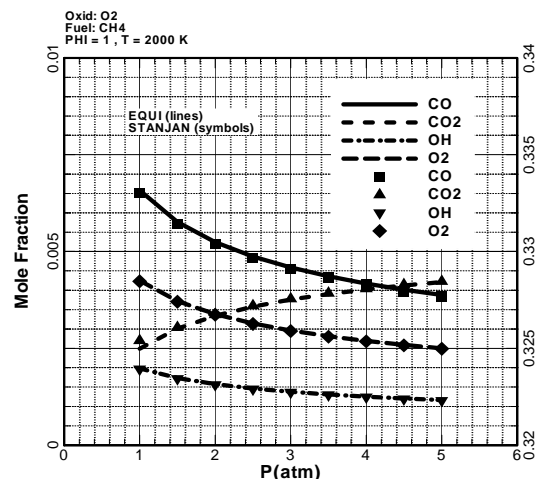
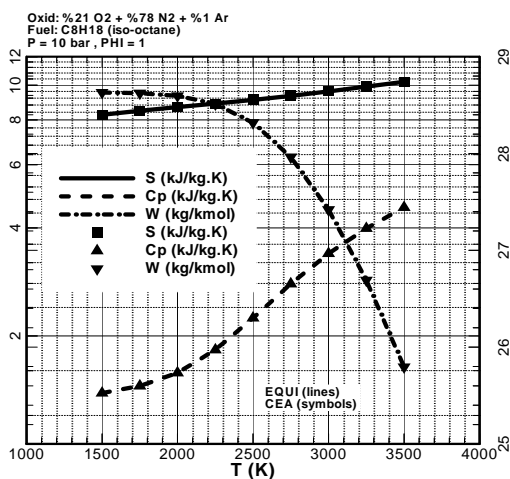
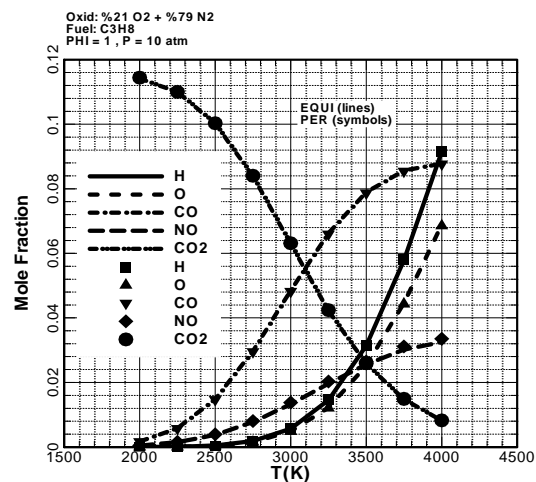
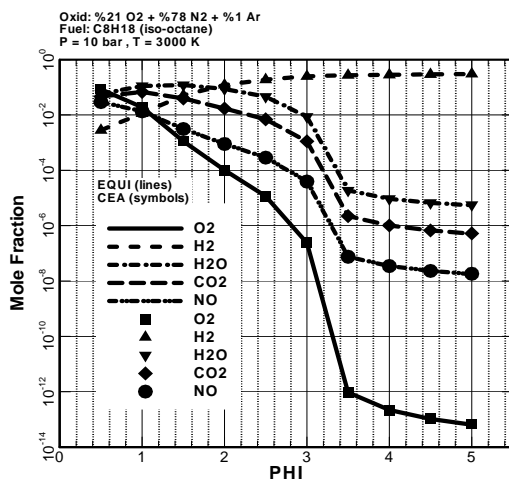
در رابطه فوق k_f و k_{ox} بر ترتیب ضرایب هدایت حرارتی بخار سوخت و اکسنده گازی می‌باشد. باید توجه داشت که با توجه به پیشنهاد مرجع [۱۰]، مقادیر پارامترهای مزبور در دمای متوسط $\bar{T} = 0.5(T_b + T_g)$ محاسبه می‌گردند.

دسته سوم اطلاعات مربوط به خواص ترمودینامیکی مخلوط فاز گازی است که شامل $h_g, W_g, c_{p,g}$ و $\partial h_g / \partial \phi_g$ و $\partial h_g / \partial T_g$ می‌شود. مطابق پیشنهاد مرجع [۱۰]، مقدار $c_{p,g}$ برابر با گرمای ویژه فشار- ثابت بخار سوخت در دمای \bar{T} فرض می‌شود. سایر مقادیر نیز از حل تعادلی مخلوط سوخت و اکسنده در دما و فشار مورد نظر محاسبه می‌گردند. به منظور تعیین خواص مزبور، کدی موسوم به EQUI برای محاسبه ترکیب تعادلی سیستمهای دما- فشار ثابت فازگازی با استفاده از روش مینیمم‌سازی انرژی آزاد گی‌بس به زبان فرترن تهیه گردیده است. هدف از تدوین این کد در اختیار داشتن ابزار قوی برای مطالعات دینامیکی احتراق بوده است تا بتوان کد مزبور را در حل معادلات میدان جریان بکار گرفت. جزئیات این کد و روش استفاده از آن در مرجع [۱۱] مورد بررسی قرار گرفته است.

۴- بررسی نتایج

۴-۱- تایید نتایج محاسبات تعادلی

نتایج حاصل از کد EQUI، با نرم افزارهای تعادلی متداول مانند CEA [۱۲]، STANJAN [۱۳] و PER [۱۴] مقایسه گردیده که در تمام موارد تطابق مطلوبی مشاهده گردیده است [۱۱]. نمونه‌ای از مقایسه نتایج این کد با کدهای متعارف، در شکل (۲) نمایش داده شده است. در این موارد احتراق ایزواکتان و پروپان با هوا و احتراق متان با اکسیژن مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور مقادیر کسر مولی اجزاء شیمیایی مختلف و همچنین انتروپی، گرمای ویژه فشار ثابت و وزن مولکولی متوسط مخلوط محاسبه شده توسط کد EQUI با نتایج بدست آمده از نرم‌افزارهای مزبور مقایسه شده است.



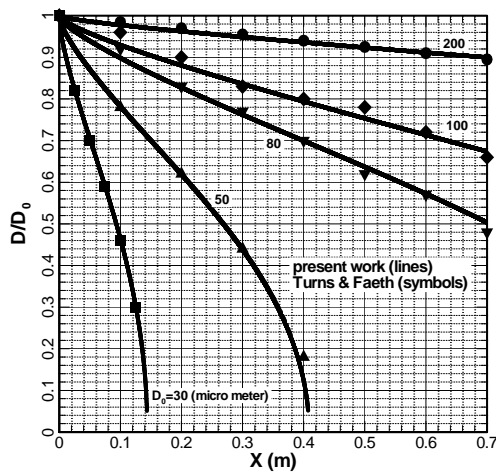
شکل ۲- مقایسه نتایج کد EQUI با نتایج کدهای تعادلی متعارف

۴-۲- معادلات احتراق اسپری

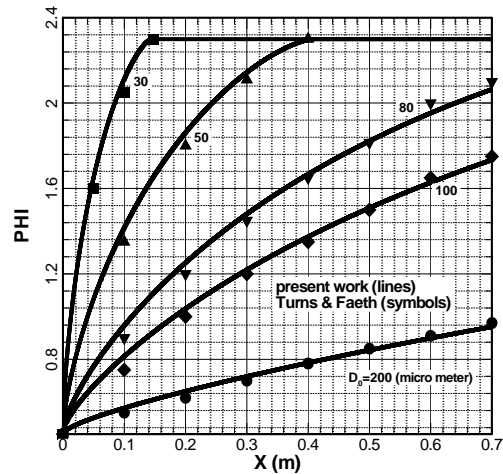
برای حل دستگاه معادلات (۴)، (۶)، (۱۲) و (۱۵) از روش رانگ- کوتای مرتبه چهارم استفاده شده است. با حل این دستگاه می‌توان دما، سرعت گاز، قطر قطره، سرعت قطره و نسبت هم‌ارزی را در هر نقطه از محفظه محاسبه نمود. به‌منظور بررسی کارایی این روند، احتراق اسپری هپتان نرمال با اکسند اکسیژن گازی مورد مطالعه قرار گرفته است. مشخصات اطلاعات ورودی در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- اطلاعات ورودی محفظه احتراق

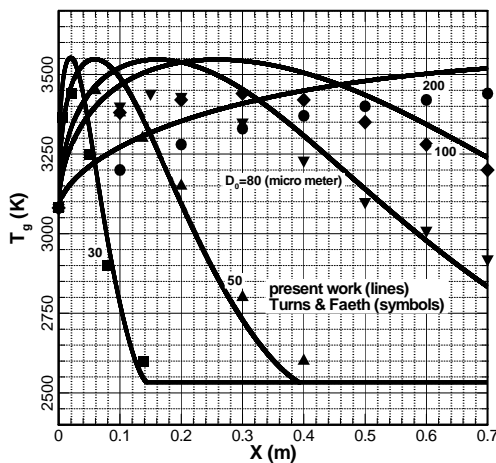
سطح مقطع محفظه احتراق	۰/۱۵۷ متر مربع
طول محفظه احتراق	۰/۷۲۵ متر
دبی جرمی ورودی سوخت مایع	۵۵/۵ کیلوگرم بر ثانیه
دبی جرمی ورودی اکسنده گازی	۱۰۵/۵ کیلوگرم بر ثانیه
دبی جرمی ورودی بخار سوخت	۱۱۹ کیلوگرم بر ثانیه
دمای اولیه گاز درون محفظه	۳۰۸۱ درجه کلوین
فشار محفظه احتراق	۲/۴۴۷۴ مگا پاسکال
سرعت اولیه قطرات مایع	۱۰ متر بر ثانیه



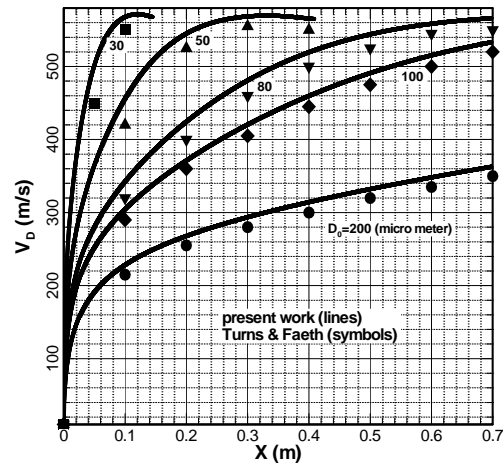
شکل ۴- مقایسه نتایج اندازه قطره با مرجع [۷]



شکل ۳- مقایسه نتایج نسبت هم‌ارزی با مرجع [۷]



شکل ۶- مقایسه نتایج دمای گاز با مرجع [۷]



شکل ۵- مقایسه نتایج سرعت قطره با مرجع [۷]

نتایج حل معادلات و مقایسه آن با اطلاعات موجود در مرجع [۷] در شکل‌های (۳) تا (۶) برای قطرهای اولیه مختلف نمایش داده شده است. در شکل (۳) مقادیر نسبت هم‌ارزی محاسبه شده در این مطالعه ارائه گردیده است. با توجه به این

نمودار ملاحظه می‌گردد که مقدار اولیه نسبت هم‌ارزی برای مقادیر مختلف اندازه‌های قطر قطره همواره برابر با $0/45$ می‌باشد که این مقدار با توجه به مقادیر دبی جرمی ورودی سوخت (به صورت مایع و بخار) و اکسندگی تعیین شده است. حداکثر مقدار نسبت هم‌ارزی در انتهای عمر قطره، مستقل از اندازه قطر قطره بوده و در حدود $2/3$ خواهد بود. از آنجاییکه محفظه به‌طور کلی به صورت غنی‌سوز عمل می‌نماید لذا همانگونه که در شکل (۳) ملاحظه می‌گردد، مقدار نسبت هم‌ارزی همواره در طول محفظه افزایش می‌یابد.

در شکل (۴) نتایج محاسبات اندازه قطر قطره ارائه گردیده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد که برای قطرات ریزتر (قطر اولیه 30 و 50 میکرون)، احتراق به سرعت درون محفظه تکمیل شده و قطره در طولی کمتر از $0/725$ متر کاملاً تبخیر می‌گردد. در شکل‌های (۵) و (۶) نیز به ترتیب تغییرات سرعت قطره و دمای گاز در طول محفظه ارائه شده است. با توجه به نمودار شکل (۵) مشاهده می‌گردد که رشد سرعت قطره در قطرات ریزتر بسیار سریعتر بوده ولیکن سرعت نهایی قطره مستقل از اندازه قطر می‌باشد. در شکل (۶) مقادیر دمای گاز نشان داده شده و ملاحظه می‌گردد که با ریزتر شدن قطرات موقعیت حداکثر دما به ابتدای محفظه (صفحه پاشش) نزدیکتر می‌شود، ولیکن حداکثر مقدار دما مستقل از اندازه قطر می‌باشد (حدود 3550 درجه کلونین). همچنین با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌گردد که حداکثر دمای گاز در حوالی نسبت هم‌ارزی واحد (شرایط استوکیومتری) رخ می‌دهد.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی یک‌بعدی برای احتراق اسپری در محفظه‌های استوانه‌ای و در شرایط مادون بحرانی ارائه شده است. به منظور بررسی مدل یک بعدی محفظه، احتراق اسپری هپتان نرمال با اکسیژن گازی در حالت مادون بحرانی و در محفظه‌ای با شرایط عملکردی و ابعاد جدول (۱) مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در اجرای برنامه کامپیوتری سعی شده تا نتایج حاصل از طیف گسترده‌ای از قطر قطرات (ابعاد 30 الی 200 میکرون) مورد استفاده قرار گیرد تا قابلیت مدل در پوشش کاربردهای مختلف صنعتی مشخص گردد.

با اجرای برنامه، تغییرات دمای گاز، قطر قطره، نسبت تعادل و سرعت قطره در طول محفظه بدست آمده است. برای اجرای برنامه کامپیوتری احتراق اسپری از برنامه کامپیوتری حل تعادل واکنش شیمیایی EQUI استفاده شده که نتایج حاصل از این نرم‌افزار با استفاده از نتایج نرم‌افزارهای CEA، STANJAN و PER تایید گردیده است. در نهایت نتایج مدل احتراق اسپری با نتایج موجود در مرجع [۷] مقایسه و تایید شده و ملاحظه گردیده است که مدل فوق‌الذکر بدلیل سادگی شرایط بکارگیری و نیاز به حداقل اطلاعات ورودی و زمان محاسبات نسبتاً کوتاه می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در مطالعات پارامتری طراحی و توسعه انواع موتور با محفظه‌های احتراق مشابه استفاده شود.

با توجه به نمودار شکل‌های (۳) تا (۶) می‌توان نتایج کلی زیر را ارائه نمود: برای تمام سایزهای قطرات، حداکثر دمای محفظه احتراق در حدود 3550 درجه کلونین است که این مقدار در حدود نسبت هم‌ارزی واحد رخ می‌دهد و این امر بیانگر آنست که حداکثر دمای محفظه احتراق از قطر قطره مستقل است - موقعیت پیشانی شعله با کوچک شدن اندازه قطر قطره به صفحه انژکتور نزدیک‌تر می‌شود که این مساله خطری بالقوه برای مجموعه انژکتورهای محفظه به حساب می‌آید. از سوی دیگر با بزرگ کردن سایز قطر امکان تکمیل نشدن تبخیر و احتراق قطره در محفظه و کاهش کارایی محفظه وجود دارد. لذا می‌توان قطر بهینه‌ای برای قطر انتخاب نمود تا هم احتراق در محفظه کامل شود و هم پیشانی شعله فاصله مناسبی از انژکتورها داشته‌باشد.

مراجع

- 1- Faeth G.M., "Current Status of Droplet and Liquid Combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 3, 1977, pp. 191-224.

- 2- Faeth G.M., "Evaporation and Combustion of Sprays," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 9, 1983, pp. 1-76.
 - 3- Faeth G.M., "Spray Combustion Phenomena," *Twenty-Seventh International Symposium on Combustion*, The Combustion Institute, 1996, pp. 1593-1612.
 - 4- Kuo K.K., *Principles of Combustion*, John Wiley & Sons, 1986.
 - 5- Priem R.J. and Heidmann M.F., "Propellant Vaporization as a Design Criterion for Rocket-Engine Combustion Chambers," NASA Technical Report R-67, 1960.
 - 6- Dipprey D.F., "Liquid Rocket Engines," in *Chemistry in Space Research* (Landal R.F. and Rembaum A., Eds.), Elsevier, 1972, pp. 464-597.
 - 7- Turns S.R. and Faeth G.M. "A One-Dimensional Model of a Carbon-Black Slurry-Fueled Combustor," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 1, No. 1, 1985, pp. 5-10.
 - 8- Turns S.R., *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*, 2nd Ed., Mc Graw-Hill, 2000.
 - 9- Yaws C.L., *Chemical Properties Handbook*, McGraw-Hill, 1999.
 - 10- Law C.K. and Williams F.A., "Kinetics and Convection in the Combustion of Alkane Droplets," *Combustion and Flame*, Vol. 19, No. 3, 1972, pp. 393-406.
- ۱۱ - سرودی، محمدعلی، "تدوین نرم افزار محاسبه خواص و ترکیبات تعادلی واکنشهای شیمیایی،" مرکز تحقیقات فناوری پیشرانس، پژوهشکده سیستم های پدافند هوایی، PTRC-CS-8301، ۱۳۸۳.
- 12- Gordon S. and McBride B.J., "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications, Vol1: Analysis," NASA RP-1311, 1994.
 - 13- Reynolds W.C., "The Element Potential Method for Chemical Equilibrium Analysis: Implementation in the Interactive Program STANJAN," Department of Mechanical Engineering, Stanford University, 1986.
 - 14- Olikara C. and Borman G., "A Computer Program for Calculating Properties of Equilibrium Combustion Products with Some Applications to I.C. Engines," SAE Paper no. 750468, 1975.