

اصول مدل‌های ناحیه‌ای آتش‌سوزی در فضای بسته

لیلا تقی اکبری، سعید بختیاری*، مسعود جمالی آشتیانی

تهران، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن صندوق

پیام‌نگار: bakhtiyari@bhrc.ac.ir

چکیده

دو روش اصلی مورد استفاده در مدل‌سازی آتش، روش‌های مدل‌سازی میدانی و ناحیه‌ای هستند. مبنای نظری مدل‌های ناحیه‌ای، بقای جرم و انرژی در فضاهای بسته آتش‌سوزی است. این مدل‌ها اساساً شدت رهایش گرمای ناشی از سوختن مواد، جریان ستونی آتش، جریان جرمی، حرکت دود و دمای گاز را در نظر می‌گیرند. قوانین بقا به شکل حجم کنترل ارائه می‌شوند و برای رفتار آتش در فضاهای بسته به کار می‌روند. در این مقاله اصول نظری مدل‌سازی ناحیه‌ای آتش‌سوزی در فضاهای بسته، ارائه و رفتار این نوع آتش‌سوزی‌ها بحث شده است. معادلات حاکم بر مدل‌ها استخراج و ارائه شده است. همچنین برخی از مدل‌های ناحیه‌ای به همراه حوزه کاربرد آن‌ها در شبیه‌سازی آتش‌سوزی در فضاهای مختلف به همراه مقایسه این مدل‌ها با نتایج تجربی آمده است.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی آتش، مدل ناحیه‌ای، بقای جرم، بقای انرژی، حجم کنترل

۱- مقدمه

مدل‌های ناحیه‌ای به دو دسته تک ناحیه‌ای و دو ناحیه‌ای تقسیم می‌شوند. مدل‌های تک ناحیه‌ای به طور وسیعی در تحلیل آتش‌سوزی‌های پس از گرگرفتگی سراسری و همچنین مطالعه اثر حرکت دود در فضاهای بسته دور از محل حریق استفاده می‌شوند. در طول دو دهه گذشته، تعدادی از پژوهشگران، مدل‌هایی را برای آتش پس از گرگرفتگی سراسری توسعه داده‌اند تا قادر به پیش‌بینی حرکت و غلظت دود در ساختمان و اثر دما روی سازه ساختمان باشند، از جمله دو مدل NRC و Ozone [۴-۲].

مدل‌های دو ناحیه‌ای برای محاسبه توزیع دود، گازهای آتش‌سوزی و گرما در سراسر ساختمان در طول یک آتش‌سوزی استفاده می‌شود. در مدل‌های دو ناحیه‌ای، هر فضای بسته به دو لایه تقسیم شده است. این مدل‌ها بر اساس اصل بقای جرم و انرژی و همچنین قانون گاز ایده آل هستند. مدل‌های دو ناحیه‌ای برای تحلیل

امروزه پدیده گسترش آتش‌سوزی با استفاده از معادلات و فرمول‌های ریاضی به کمک بسط معادلات فیزیکی حاکم بر فرایندهای فیزیکی در فضاهای بسته، قابل توصیف است. یکی از رویکردهای مهم برای مدل کردن فرایند آتش‌سوزی، که به طور وسیع توسط پژوهشگران آتش استفاده می‌شود، مدل‌سازی ناحیه‌ای^۱ است. این مدل‌ها به عنوان مبنای کدهای کامپیوتری برای پیش‌بینی جنبه‌های گوناگون رفتار در برابر آتش در فضاهای بسته به کار رفته‌اند [۴-۱]. پژوهشگران متعددی در مورد کاربرد مدل‌های ناحیه‌ای در شبیه‌سازی آتش‌سوزی در فضاهای مختلف، پیش‌بینی گرگرفتگی سراسری و مقایسه آن‌ها با آزمون‌های آتش یا سایر روش‌ها بحث و بررسی کرده‌اند [۷-۵].

1. Zone Modeling

معادلات حاکم، فرضیات، محدودیت‌ها و مبنای فیزیکی آن‌ها نداشته باشند.

هدف اصلی این مقاله، بررسی مبانی فیزیکی معادلات حاکم بر رفتار آتش‌سوزی در فضاهای بسته است. این مقاله به درک بهتری از تحلیل رفتار آتش‌سوزی در فضاهای بسته، از طریق رابطه‌های ریاضی، کمک می‌کند و دید فیزیکی بهتری از مدل‌های کامپیوتری شبیه‌ساز حریق فراهم می‌نماید. روش استخراج معادلات بقا بر مبنای اصول حجم کنترل و فرضیات استفاده شده در رویکرد مدل‌سازی ناحیه‌ای ارائه می‌شود. فرض می‌شود که خواننده درک خوبی از مکانیک سیالات و ترمودینامیک دارد.

آتش‌سوزی‌های پیش از گرگرفتگی سراسری استفاده می‌شوند. این مدل‌ها به دو گروه تقسیم‌بندی می‌شوند: مدل‌هایی که برای یک فضای بسته استفاده می‌شوند (مدل‌های تک فضایی) و مدل‌هایی که برای چند فضای بسته استفاده می‌شوند (مدل‌های چند فضایی). در جدول (۱) فهرست برخی از مدل‌های ناحیه‌ای چند فضایی که در مدل‌سازی آتش کاربرد زیادی دارند، آمده است.

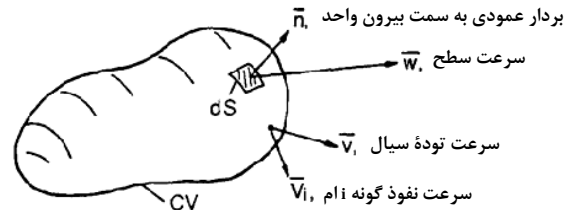
در عین حال کاربرد گسترده و رو به رشد مدل‌های کامپیوتری، خطر نادیده گرفته شدن مبنای فیزیکی فرایندها را به همراه دارد، زیرا کاربرهای معمولی عمدتاً فقط به خروجی و نتایج مدل‌ها علاقمند هستند. به علاوه، ممکن است کاربران درک درستی از استخراج

جدول ۱- معرفی برخی از مدل‌های ناحیه‌ای

| نام مدل | قابلیت‌ها، مزایا و معایب |
|-----------------------|--|
| CFAST/FAST/CCFM.VENTS | مدل دو ناحیه‌ای گسترش آتش سوزی برای فضاهای چند اتاقه و تکمیل کننده مدل‌های FAST و CCFM می‌باشد. CFM برای محاسبه توزیع خروجی دود، گازهای آتش و گرما در طول آتش سوزی استفاده می‌شود. این مدل قادر است ۳۰ فضای بسته دارای سیستم فن و کانال برای هر فضا، ۳۱ آتش جداگانه، تا حد گسترش شعله، چندین نوع آتش جریان‌های ستونی، چندین نوع آشکار ساز و شبکه بارنده و ده گونه مطرح بسیار مهم در سمیت آتش‌های با دوز خطرناک و موثر را مدل کند. |
| FIRM | در این مدل، فرض می‌شود که لایه زیرین در دمای محیط قرار دارد، در حالی که در واقع، در دمای بالاتری است، به همین دلیل پیش‌بینی دمای لایه گرم محافظه کارانه است. |
| NRC | مدل حرکت دود، برای پیش‌بینی گسترش آتش سوزی و تولید دود و حرکت دود در یک ساختمان با چند فضای بسته استفاده می‌شود تا خطر آتش در ساختمان را ارزیابی کند. این مدل نتایج مطلوبی برای دمای لایه فوقانی گاز، ارتفاع سطح مشترک و شدت جریان در پیچه ارائه می‌کند. |
| BRANZFIRE | این مدل شامل گزینه‌های گسترش شعله روی دیوارها و سقف‌ها است و برای محاسبه توزیع وابسته به زمان دود، گازهای آتش و گرما در سراسر یک مجموعه از فضاهای بسته به هم پیوسته در طول یک آتش‌سوزی استفاده می‌شود. نسخه جدید آن تا ۱۲ فضای بسته را مدل می‌کند. این مدل ارزیابی گونه‌هایی مانند CO را در بر می‌گیرد که برای ایمنی اجزاء جداکننده در معرض محیط آتش مهم هستند. پیش‌بینی‌های BRANZFIRE با آزمون آتش مقیاس بزرگ گوشه اتاق مقایسه شده و نتایج، توافق قابل قبولی نشان داده است. |
| ARGO | برای شبیه‌سازی توسعه آتش و انتقال دود در یک فضای بسته و برای ارزیابی خطر آتش می‌تواند استفاده شود و تا ۵ فضای بسته را مدل می‌کند. مقایسه‌ها نشان داده‌اند که تطابق خوبی بین اندازه‌گیری‌ها و موارد شبیه‌سازی شده (مانند دماها، غلظت‌های اکسیژن و زمان ردیابی حرارت و دود) وجود دارد. |

۲- معادلات حجم کنترل

مخلوط واکنشی از گازهای کامل در حجم کنترلی مشخص نشان داده شده در شکل (۱) را در نظر بگیرید که می‌تواند مطابق سرعت سطحی w حرکت کند.

شکل ۱- نمادگذاری حجم کنترل^۱

سرعت گونه‌های i به صورت زیر است:

$$v_i = v + V_i \quad (1)$$

که v سرعت متوسط وزن یافته جرمی مخلوط با گونه‌های N است:

$$v = \frac{1}{\rho} \sum_{i=1}^N V_i \rho_i \quad (2)$$

که در آن ρ_i چگالی گونه‌های i

$$\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i \quad (3) \quad \text{چگالی مخلوط}$$

$$Y_i = \frac{\rho_i}{\rho} \quad (4) \quad \text{جزء جرمی گونه‌های } i$$

$$X_i = \frac{M}{M_i} Y_i \quad (5) \quad \text{جزء مولی گونه‌های } i$$

که در آن M_i وزن مولکولی گونه‌های i (مثلاً بر حسب

$$M = \frac{\sum (n_i M_i)}{\sum n_i} \text{ (g/mole)}, \text{ وزن مولکولی مخلوط، که در آن}$$

n_i = تعداد مول‌های گونه‌های i و \sum بدون حدود بالا و پایین، به معنای $\sum_{i=1}^N$ است. V_i سرعت نفوذ گونه‌های i و سرعت آن نسبت به

جریان توده (v) است.

$$\rho Y_i V_i = -\rho D_i \nabla Y_i \quad \text{با استفاده از قانون فیک:}$$

که D_i ضریب نفوذ گونه‌های i در مخلوط است.

طبق قانون بقای جرم کلی:

$$\frac{d}{dt} \iiint_{CV} \rho dV + \iint_{CS} \rho (v - w) \cdot n ds = 0 \quad (6)$$

بقای جرم برای گونه‌های i :

$$\frac{d}{dt} \iiint_{CV} \rho_i dV + \iint_{CS} \rho_i (v + V_i - w) \cdot n ds = \iiint_{CV} \dot{\omega}_i dV \quad (7)$$

که $\dot{\omega}_i$ شدت تولید در واحد حجم گونه‌های i به دلیل واکنش شیمیایی است. می‌توان نشان داد که با جمع کردن معادله (۷) روی همه گونه‌های N ، طرف سمت چپ، مشابه با معادله (۶) است. از این

$$\text{رو } \iiint_{CV} \sum_{i=1}^N \dot{\omega}_i dV = 0 \text{ یا:}$$

$$\sum_{i=1}^N \dot{\omega}_i = 0 \quad (8)$$

این جمله بیانگر قانون بقای جرم در یک واکنش شیمیایی است. یک واکنش شیمیایی کامل ساده را که در آن یک سوخت گازی (F) با اکسیژن (O) واکنش داده، فرآورده‌های P را تشکیل می‌دهد، در نظر بگیرید. در این واکنش بیش از یک فرآورده می‌تواند تشکیل شود، ولی در این جا فقط یکی در نظر گرفته می‌شود، زیرا تعمیم دادن به فرآورده‌های بیشتر به سادگی با استفاده از استوکیومتری مربوط به آن گونه‌های خاص صورت می‌گیرد. برای شرایط آتش‌سوزی، استوکیومتری یک واکنش خاص وابسته به سوخت و مقادیر نسبی هوا و سوخت است. اگر هوای کافی (هوای اضافه از نظر استوکیومتری) در دسترس باشد، به طور رضایت‌بخش می‌توان برای

۱. توجه شود که در این مقاله، بردارها در شکل‌ها به وسیله یک خط بالای حروف و در متن به وسیله حروف پر رنگ نشان داده شده‌اند.

که در آن Y_F جزء جرمی سوخت، Y_O جزء جرمی اکسیژن، E انرژی فعال‌سازی، R ثابت گازها، T دما و k_F ثابتی برای سوخت است. این معادله بیانگر سینتیک آرنیوس برای سوخت می‌باشد. معمولاً اطلاعات کافی برای استفاده از معادله (۱۰) در دسترس نیست (به‌ویژه در رویکرد حجم کنترل)، با وجود این، با دانستن $\dot{\omega}_F^-$ می‌توان شدت‌های گونه‌های دیگر را با ضرایب موجود در معادله (۹) تعیین کرد:

$$\dot{\omega}_O^- = \frac{1}{r} \dot{\omega}_F^- \quad (11) - (الف)$$

$$\dot{\omega}_P^- = -\frac{(r+1)}{r} \dot{\omega}_F^- \quad (11) - (ب)$$

در آتش‌سوزی‌های فضای بسته و در بسیاری دیگر از اشکال عملی احتراق، می‌توان فرض کرد که شدت واکنش منحصراً به وسیله شدت سوخت یا اکسیژن تعیین می‌شود، یعنی:

$$\dot{\omega}_F = \iiint_{CV} \dot{\omega}_F^- dV =$$

(شدت تأمین سوخت به CV) یا (شدت تأمین اکسیژن به CV) $r \times$

(۱۲)

هر کدام که کوچک‌تر است.

این یک رویکرد پذیرفته شده است که منتهی به سوخت باقی‌مانده یا اکسیژن باقی‌مانده در جریان خروجی می‌شود. حال به استخراج معادلات بقای انرژی برای یک حجم کنترل (برای گونه‌های واکنش‌دهنده N) می‌پردازیم:

$$\frac{d}{dt} \iiint_{CV} \sum_{i=1}^N \rho_i u_i dV$$

(شدت تغییر انرژی داخلی)

$$+ \iint_{CS} \sum_{i=1}^N \rho_i h_i (\mathbf{v} + \mathbf{V}_i - \mathbf{w}) \cdot \mathbf{n} dS$$

(شدت جریان آنتالپی خالص خروجی از CV)

$$- \iint_{CS} \mathbf{Pn} \cdot \mathbf{w} dS =$$

(کار فشاری به دلیل حرکت حجم کنترل)

$$- \iint_{CS} \mathbf{q}'' \cdot \mathbf{n} dS$$

(شدت گرمای هدر رفته به وسیله تابش و هدایت (یا جابجایی)

در مرز CV)

$$+ \iint_{CS} \sum_{i=1}^N \tau_i' v_i dS$$

(شدت کار انجام شده به وسیله تنش‌های سطحی τ_i' (به جز فشار) روی سیال در CV)

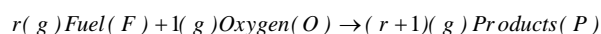
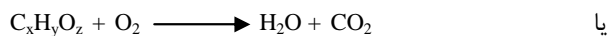
$$+ \iiint_{CV} \sum_{i=1}^N \rho_i f_i v_i dV$$

(شدت کار انجام شده به وسیله نیروهای بدنه بر واحد جرم، f_i روی سیال در CV)

(۱۳)

سوخت $C_xH_yO_z$ فرض کرد که CO_2 و H_2O محصولات اصلی احتراق هستند. تولید CO ، دوده (دود)، H_2 و دیگر گونه‌ها مانند ترکیبات حاوی Cl ، F ، N و غیره نیز ممکن است. بعضی از این نتایج را می‌توان از فرمول‌های شیمیایی سوخت برآورد کرد؛ ولی به طور کلی نتایج تجربی با استفاده از آزمون‌های آتش مورد نیاز می‌باشد، به ویژه برای CO و دود که هنوز پایه نظری مناسبی برای آنها بنا نشده است. این نتایج آزمون، معمولاً برحسب "بازدهی‌ها" یا جرم گونه‌های (یا انرژی) تولید شده به ازای جرم سوخت فرار کرده^۲ به داخل فاز گاز، طی تخریب حرارتی (یعنی احتراق یا پیرولیز) ارائه می‌شوند. به عنوان مبنایی برای توسعه معادلات مورد نیاز برای پیش‌بینی آتش‌سوزی اتاق، می‌توان با یک استوکیومتری ایده‌آل برای واکنش سوخت $C_xH_yO_z$ با اکسیژن به صورت زیر آغاز نمود:

(موازنه نشده)



(۹)

که محصولات واکنش در این جا شامل مخلوط H_2O و CO_2 بوده و کلاً به صورت یک ماده تک در نظر گرفته می‌شوند، ولی به سهولت می‌توان آنها را به طور جداگانه مطابق با استوکیومتری‌های مربوط به خود در نظر گرفت. به طور کلی، شدت واکنش (تولید) بر واحد حجم برای سوخت را می‌توان به صورت زیر ارائه نمود:

$$\dot{\omega}_F^- = -k_F Y_F^n Y_O^m e^{-E/RT} \quad (10)$$

می‌تواند به زیر انتگرال منتقل شود. با جمع معادله حاصل بر روی (N و i=1):

$$\frac{d}{dt} \iiint_{CV} \sum_{i=1}^N \rho_i h_i^o dV + \iint_{CS} \sum_{i=1}^N \rho_i h_i^o (\mathbf{v} + \mathbf{V}_i - \mathbf{w}) \cdot \mathbf{n} dS = \iint_{CV} \sum_{i=1}^N \dot{\omega}_i h_i^o dV \quad (18)$$

معادلات (17) و (18) را در معادله (13) جایگزین کرده، روابط زیر را به کار برید:

$$\sum_{i=1}^N p_i = p$$

$$\sum_{i=1}^N \rho_i c_{p_i} = \rho c_p$$

که در آن C_p گرمای ویژه مخلوط بوده که ثابت فرض شده است.

$$\frac{d}{dt} \iiint_{CV} (\rho c_p (T - T_o) - p) dV + \iint_{CS} \sum_{i=1}^N \rho_i c_{p_i} (T - T_o) (\mathbf{v} + \mathbf{V}_i - \mathbf{w}) \cdot \mathbf{n} dS$$

$$= - \iint_{CV} \sum_{i=1}^N \dot{\omega}_i h_i^o dV - \iint_{CS} \mathbf{p} \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{w} dS - \iint_{CS} \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} dS \quad (19)$$

از آن جا که c_p ثابت است و $P = \rho RT$ برای مخلوط، که در آن R ثابت گاز برای مخلوط است و ثابت فرض می‌شود، همچنین

$$c_v = c_p - R \quad \text{و} \quad \frac{c_p}{c_v} = k \quad (20)$$

به وسیله معادلات (2) و (7) می‌توان نشان داد که:

$$\frac{d}{dt} \iiint_{CV} \rho c_p T_o dV + \iint_{CS} \sum_{i=1}^N \rho_i c_{p_i} T_o (\mathbf{v} + \mathbf{V}_i - \mathbf{w}) \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (21)$$

پس معادله (19) به صورت زیر می‌شود:

$$\frac{d}{dt} \iiint_{CV} c_v \rho T dV + \iint_{CS} \rho c_p T (\mathbf{v} - \mathbf{w}) \cdot \mathbf{n} dS$$

$$= - \iint_{CV} \sum_{i=1}^N \dot{\omega}_i h_i^o dV - \iint_{CS} \mathbf{p} \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{w} dS - \iint_{CS} \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} dS - \iint_{CS} \sum_{i=1}^N \rho_i c_{p_i} T \mathbf{V}_i \cdot \mathbf{n} dS$$

$$(22) \quad \text{حال } h_i^o \text{ را در معادله (7) ضرب کنید. از آنجایی که } h_i^o \text{ ثابت است،}$$

که در آن u_i انرژی داخلی به ازای جرم گونه‌های i ، h_i آنتالپی به ازای جرم گونه‌های i و

$$h_i = u_i + p_i / \rho_i \quad \Leftrightarrow \quad \rho_i u_i = \rho_i h_i - p_i \quad (14)$$

که p_i فشار جزئی گونه‌های i و P فشار ترمودینامیکی مخلوط، به شکل زیر است:

$$P = \sum_{i=1}^N p_i \quad (15) \quad \text{طبق قانون دالتون برای گازهای ایده‌آل}$$

آنتالپی هر گونه، به طور نسبی با یک حالت استاندارد مرجع ثابت شده (25°C و فشار 1 atm) تعریف می‌شود؛ یعنی:

$$h_i = h_i^o + \int_{T_o}^T C_{p_i} dT \quad \text{برای گاز کامل} \quad (16) \text{-(الف)}$$

و برای گرمای ویژه ثابت

$$h_i = h_i^o + C_{p_i} (T - T_o) \quad (16) \text{-(ب)}$$

که h_i^o و $T_o = 25^\circ\text{C}$ آنتالپی تشکیل گونه‌های i در دمای مرجع T_o است (و برای مواد عنصری ساخته شده از همان عنصر برابر صفر گرفته می‌شود، در حالی که برای ترکیبات می‌تواند مقادیر مثبت یا منفی داشته باشد).

برای کاربرد در مسائل آتش، دو عبارت آخر مربوط به کار، در معادله (13)، ناچیز در نظر گرفته شده که از معادله حذف می‌شوند. حال سمت چپ (LHS) معادله (13) را در نظر گرفته و معادلات (14) و (16-ب) را در آن جایگزین می‌کنیم:

$$LHS = \frac{d}{dt} \iiint_{CV} \sum_{i=1}^N (\rho_i h_i^o + \rho_i c_{p_i} (T - T_o) - p_i) dV$$

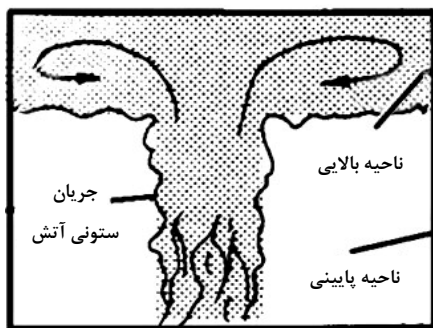
$$+ \iint_{CS} \sum_{i=1}^N \rho_i h_i^o (\mathbf{v} + \mathbf{V}_i - \mathbf{w}) \cdot \mathbf{n} dS \quad (17)$$

$$+ \iint_{CS} \sum_{i=1}^N \rho_i c_{p_i} (T - T_o) (\mathbf{v} + \mathbf{V}_i - \mathbf{w}) \cdot \mathbf{n} dS$$

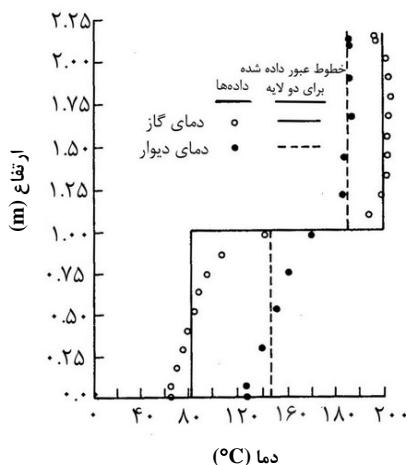
کنترل متناسب با آتش‌سوزی‌های اتاق به کار می‌روند. کل ناحیه CV یا قسمت‌های مجزای آن به صورت همگن در نظر گرفته می‌شوند. همچنین شکل‌ها به صورت خطوط مستقیم در نظر گرفته می‌شوند، ولی می‌توانند به شکل‌های فضاهای بسته اختیاری تعمیم داده شوند.

۳- قوانین بقا برای آتش‌سوزی‌های فضای بسته

انتخاب یک حجم کنترل بر اساس رفتار مشاهده شده برای آتش‌سوزی‌های واقعی در فضاهای بسته است. در این نوع آتش‌سوزی‌ها، آتش یک جریان ستونی شناور به وجود می‌آورد که باعث تشکیل دو ناحیه بالایی و پایینی به صورت لایه لایه می‌شود که به خوبی مخلوط شده است. به طوری که می‌توان دیوار و فاز گاز را در دو ناحیه بالا و پایین، دارای دمای یکنواخت فرض کرد (شکل‌های (۲) و (۳)).



شکل ۲- رفتار آتش در فضای بسته



شکل ۳- دمای اتاق با فرض وجود یک دریچه تهویه بر روی دیوار در حالت پایدار [۸] (آتش ۱۲۰ kW روی دیوار در یک اتاق ۲/۸ × ۲/۸ به ارتفاع ۲/۱ m)

اگر C_{pi} برای همه گونه‌ها یکسان فرض شود، از معادلات (۱) و (۲)، عبارت آخری در معادله (۲۲) صفر است. از استوکیومتری معادله (۱۱) نتیجه گرفته می‌شود که:

$$-\sum_{i=1}^N \dot{\omega}_i h_i^{\circ} = -\dot{\omega}_F h_F^{\circ} + \dot{\omega}_O h_O^{\circ} + \dot{\omega}_P h_P^{\circ}$$

$$= -\dot{\omega}_F \left(h_F^{\circ} + \frac{1}{r} h_O^{\circ} - \frac{r+1}{r} h_P^{\circ} \right) = [-\dot{\omega}_F] \Delta H$$

که $[-\dot{\omega}_F]$ شدت مصرف سوخت و واکنش داده است و

$$\Delta H = \sum_{i=1}^N \{ (\gamma_i h_i) - (\gamma_i h_i) \} \text{واکنشگرها} \quad (23)$$

که ضرایب استوکیومتری (مبنای جرمی) بر واحد جرم سوخت و واکنش داده و ΔH انرژی آزاد شده بر واحد جرم سوخت و واکنش داده در یک واکنش شیمیایی است که در آن واکنش با حالت‌های نهایی و اولیه در حالت استاندارد T_0 به صورت کامل رخ می‌دهد. باید توجه کرد که علامت قراردادی در این جا به گونه‌ای است که گرمای احتراق به صورت مثبت در نظر گرفته می‌شود، در حالی که معمولاً در ترمودینامیک، برای واکنش‌های گرمای احتراق، منفی در نظر گرفته می‌شود. توجه شود که $-\dot{\omega}_F$ به طور ذاتی منفی است، چون به عنوان شدت تولید تعریف شده و سوخت مصرف می‌شود (منفی تولید). بنابراین $-\dot{\omega}_F \Delta H$ یک شدت رهایش انرژی مثبت برای واکنش گرماست.

معادله انرژی حاکم به صورت زیر است:

$$\frac{d}{dt} \iiint_{CV} c_v \rho T dV + \iint_{CS} \rho c_p T (\mathbf{v} - \mathbf{w}) \cdot \mathbf{n} dS + \iint q'' \cdot \mathbf{n} dS$$

(گرمای هدر رفته) (کار فشاری) (انرژی احتراق)

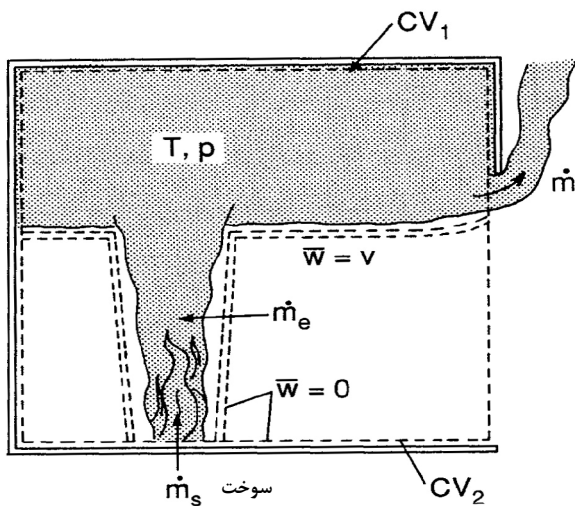
$$= \iint_{CV} [-\dot{\omega}_F] \Delta H \cdot dV - \iint_{CS} Pn \cdot \mathbf{w} dS$$

(شدت جریان آنتالپی) (انرژی داخلی)

$$(24)$$

عبارت آخر در معادله (۲۲)، به صورت یک تقریب در معادله (۲۴) حذف شده است. همچنین، تقریب قابل قبولی خواهد بود اگر c_v ، c_p و R را خواص هوا در نظر بگیریم، چون مخلوط دارای مقدار قابل توجهی نیتروژن هوا در شرایط معمولی آتش‌سوزی است. معادلات (۶)، (۷) و (۲۴)، جرم، گونه‌ها و انرژی برای حجم‌های

در این انتخاب، در نظر گرفتن جریان ستونی شعله به صورت شبه پایدار، می‌تواند مفید باشد. برای این کار از عباراتی به شکل $\frac{d}{dt} \iiint \rho dV$ صرف نظر می‌شود که حجم کوچکی را جریان ستونی شعله پیشنهاد می‌کند، در حالی که لایه بالایی کاملاً ناپایدار در نظر گرفته می‌شود. انتخاب اول در مورد در نظر گرفتن یک حجم کنترل برای شعله و لایه فوقانی، به عنوان یک شروع پذیرفته می‌شود. این موضوع در شکل (۵) نشان داده شده است که در آن حجم کنترلی CV_1 معادل است با: جریان ستونی آتش + لایه فوقانی و سطح به گونه‌ای که در شکل (۵) نشان داده شده، انتخاب شده است، به طوری که $w=0$ در مرزهای جامد، به جز در وجه پائین لایه که $w=v$ می‌باشد، یعنی سطح این لایه به صورت سیال متشکل از ناحیه لایه‌لایه متناظر با آن حرکت می‌کند. هر سیالی که وارد CV_1 شود، به دلیل اختلاف فشار در بازشوها، اثرات اختلاط برشی یا شناوری که وجه مشترک لایه‌بندی شده و پایدار بین لایه‌های داغ و سرد را خراب می‌کند، آن جا را ترک می‌کند.



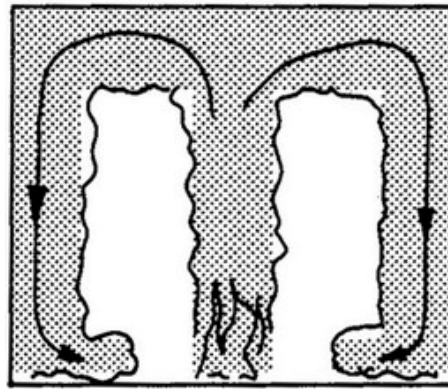
شکل ۵- حجم‌های کنترلی انتخاب شده در مدل‌سازی ناحیه‌ای [۹]

ناحیه سرد CV_2 ، باقی‌مانده حجم گاز فضای بسته است. برخی فرضیات دیگر به صورت زیر است:

۱- هیچ نفوذ یا هدایتی در سطوح مرزی آزاد حجم کنترل رخ نمی‌دهد.

برای فضاهای بزرگ به دلیل از دست رفتن حرارت، تغییرات دمایی، می‌تواند قابل توجه باشد. ناحیه جریان ستونی آتش از این دو ناحیه بالایی و پایینی مجزا بوده و می‌تواند به عنوان یک حجم کنترل مجزا در نظر گرفته شود. رفتار توصیف شده در صورتی معتبر است که اندازه حرکت جت سقفی در مقایسه با شناوری جت، پایین باشد. چنانچه عکس این موضوع صدق نماید، اندازه حرکت بر سیستم غالب بوده و می‌تواند منجر به ناحیه خوب مخلوط‌شده در سراسر فضای بسته شود (شکل (۴)).

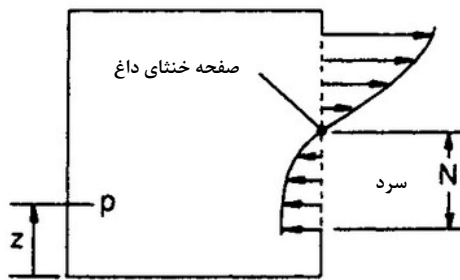
برای مورد لایه لایه‌ای، همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده، سه حجم کنترل فاز گازی قابل تشخیص است: لایه داغ بالایی، لایه سرد پایینی و جریان ستونی آتش - ناحیه در حال احتراق.



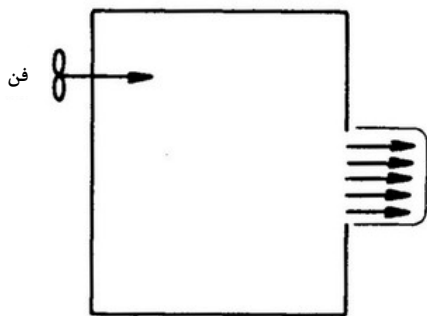
جت احتراقی

شکل ۴- اختلاط فضای بسته، کنترل شده با اندازه حرکت (امکان‌پذیر برای جت احتراقی فشار بالا)

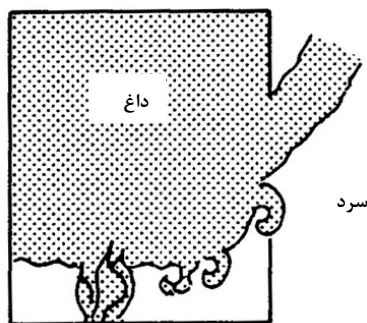
در توسعه معادلات آتش فضای بسته، فرض می‌شود (گاهی به طور مفهومی) که جریان ستونی آتش، حجم ناچیزی در مقایسه با حجم فضای بسته دارد و می‌تواند به عنوان بخشی از حجم کنترل لایه فوقانی در نظر گرفته شود. این یک تقریب است و باید توجه شود که میزان واکنش (شعله) تغییر می‌کند و ممکن است در سراسر لایه بالایی در برخی شرایط آتش‌سوزی بزرگ امتداد یابد. به صورت دیگر، می‌توان دو حجم کنترل انتخاب کرد، یکی برای لایه فوقانی و یکی برای شعله. مورد اخیر وقتی مفید است که برخی از خواص متوسط یکنواخت جریان ستونی آتش لازم باشد، مثلاً، دما، گونه‌ها و غیره.



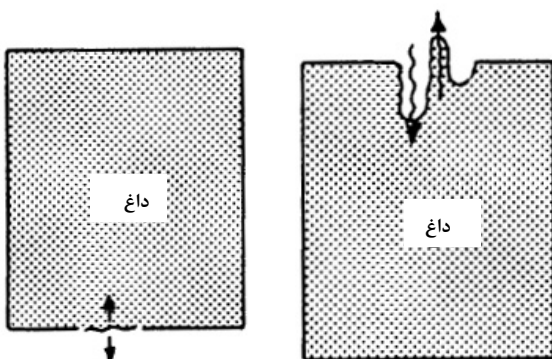
(الف)



(ب)



(پ)



(ث)

(ت)

شکل ۶- انواع تبادل‌های جریان در آتش‌سوزی‌های اتاق
 (الف) جابجایی طبیعی از طریق هواکش دیوار، (ب) جابجایی
 تحت فشار، (پ) اختلاط برشی در مرز مشترک (داغ/ سرد)،
 (ت) اختلاط ناپایدار، (ث) اختلاط پایدار

۲- تبادل جرم در مرزهای آزاد به دلیل انتقال توده سیال به علت اختلاط برشی یا فشاری است.

۳- نفوذ در مرزهای جامد می‌تواند رخ دهد، ولی معمولاً صرف نظر می‌شود.

۴- جریان ستونی فوراً به سقف می‌رسد.

۵- جرم یا ظرفیت گرمایی محتویات اتاق در مقایسه با اجزای سازه‌ای دیوار، سقف و کف فضای بسته نادیده گرفته می‌شود.

۶- مقطع عرضی افقی فضای بسته مساحت ثابت A است.

۷- فشار در فضای بسته در معادله انرژی یکسان در نظر گرفته می‌شود، ولی تغییرات هیدروستاتیک برای تفاوت‌های فشاری در مرزهای آزاد فضای بسته در نظر گرفته می‌شود، $P \gg \rho gh$. به طور کلی فشار فضای بسته، P ، بسیار بزرگ‌تر از تغییرات به دلیل هیدروستاتیک است.

۸- جریان جرمی به داخل جریان ستونی آتش به دلیل وارد شدن (یا مکش) توربولانس، v_e ، است.

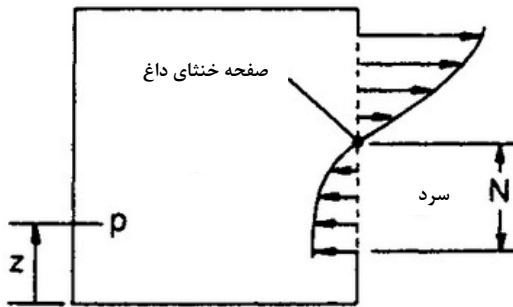
۹- در تحلیل‌هایی که در ادامه خواهد آمد، فرض می‌شود که CV_2 پائینی دارای خواص معادل با سیال پیرامون بیرون از فضای بسته است. این یک فرضیه ضروری نیست و می‌توان خواص متغیر برای لایه پائینی در نظر گرفت.

۴- جریان‌ها از راه بازشوها - مرزهای آزاد CV

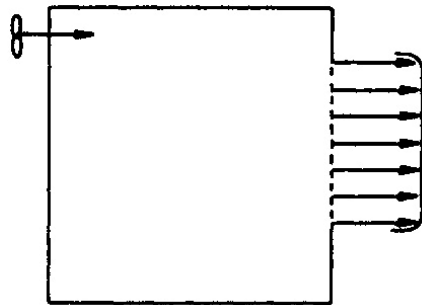
در اغلب موارد، جریان‌های درونی بازشوها در شرایط آتش‌سوزی به دلیل تفاوت‌های فشار ناشی از تفاوت‌های دما (چگالی) یا جابجایی، اجباری هستند. در موارد دیگر، جریان‌ها می‌توانند به دلیل اثرات برش یا نفوذ) باشند. اختلاف فشار می‌تواند به دلیل آتش‌سوزی یا سیستم تهویه ساختمان رخ دهد. چند مثال از تبادل جریان‌های ممکن در شکل (۶) نشان داده شده است.

جریان‌های ناشی از اختلاف فشار می‌توانند به وسیله معادله برنولی^۱ با یک ضریب تصحیح (معمولاً با عنوان ضریب جریان اریفیس، مانند آنچه در تحلیل‌های جریان در لوله‌ها به کار می‌رود) محاسبه شوند. جریان در شکل (۷) به عنوان جریان جت نشان داده شده است که می‌تواند نماینده یک مقطع افقی یا عمودی باشد.

1. Bernoulli



(الف)



(ب)

شکل ۸- جریان‌های نمونه‌وار برای تهویه (الف) جریان‌های هواکش نمونه‌وار، (ب) جابجایی تحت فشار

$$P = P(0) - \int_0^z \rho g dz \quad (27) \text{-(الف)}$$

$$P_\infty = P_\infty(0) - \int_0^z \rho_\infty g dz \quad (27) \text{-(ب)}$$

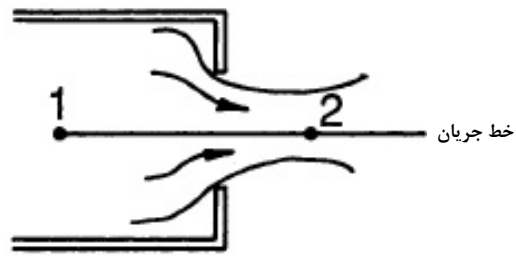
در اینجا g شتاب ثقل است. از این رو، به وسیله معادله (۲۵)، سرعت در هر ارتفاع Z در جت به صورت زیر داده می‌شود:

$$v(z) = \pm \sqrt{\frac{2(\Delta P)}{\rho}} \quad (28) \text{-(الف)}$$

که ρ ، بر حسب این که جریان از کجا آغاز می‌شود، می‌تواند مربوط به جریان داخل یا خارج باشد، و

$$\Delta P(z) = |P - P_\infty| \quad (28) \text{-(ب)}$$

اگر جهت جریان معکوس شود، همان گونه که در شکل (۸-الف) نشان داده شده است، نقطه تغییر، صفحه خنثی، N ، نام دارد که



شکل ۷- جریان اریفیس (روزنه)

برای جت در حال حرکت به فضای کناری، فشار آن فضا در نقطه‌ای در جت اختیار می‌شود که سطح مقطع جت کمتر از سطح مقطع باز شو است (این مورد به عنوان انقباض جت سیال یا فشردگی جریان^۱ در جریان روزنه شناخته می‌شود و ضریب جریان قبل از هر چیز، به خاطر این کاهش در سطح مقطع لحاظ می‌شود). در جریان خطی از ۱ به ۲ و فرض این که سرعت در ۱ در مقایسه با سرعت در ۲ ناچیز است،

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho_1}} \quad (25)$$

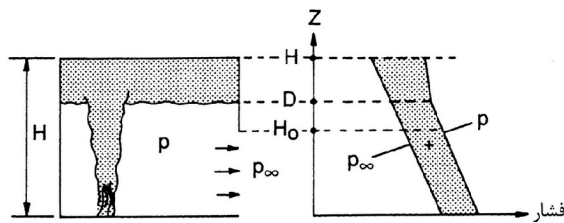
که ρ_1 چگالی سیال ورودی از فضای ۱ است. شدت جریان جرمی از راه هواکش در سراسر مساحت آن برابر است با:

$$\dot{m} = C \iint A \rho v_2 dA \quad (26)$$

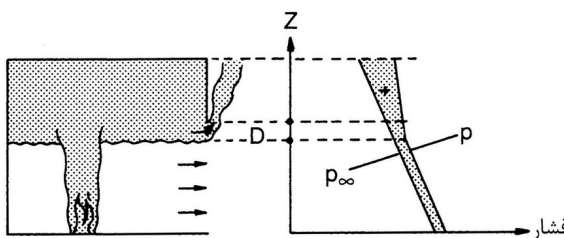
که A مساحت مقطع عرضی هواکش و C ضریب جریان (≈ 0.7) است. پروفیل‌های نمونه‌وار سرعت برای فشار جریان‌های استخراج شده (شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب)) در بالا داده شده است. برای مورد جابجایی طبیعی، فرض شد که فشار به طور عمودی در یک فضای بسته فقط به دلیل جاذبه، یعنی هیدروستاتیک، تغییر می‌کند.

بنابراین، جت‌های همراه با جریان‌های هواکش در شکل (۸-الف)، به فشار روی هر طرف باز شو پاسخ می‌دهند، به گونه‌ای که در سمت داخل، رابطه (۲۷-الف) و در سمت خارج فضای بسته (در محیط سرد)، با خواص مشخص شده با ∞ در پایین پراتنز، برقرار است. رابطه (۲۷-ب):

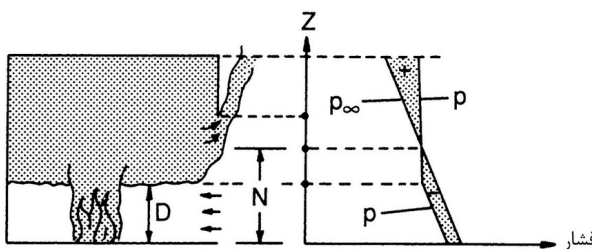
1. vena Contracta



(الف)



(ب)



شکل ۹- (الف) لایه در حال حرکت به سمت پائین، خروج جریان سرد از هواکش، (ب) جریان داغ شروع به خروج از هواکش می‌کند، (پ) مرز مشترک لایه زیر هواکش و ورود جریان سرد از محیط اطراف

$$\dot{m}_e = \text{const.} \times \dot{Q}^{\frac{1}{3}} D^{\frac{5}{3}} \quad (29) \text{ (ب)}$$

در معادله (۲۹-ب)، \dot{Q} ، شدت انرژی جابجایی است، یعنی رهائش انرژی شیمیایی منهای انرژی تابش شده از جریان ستونی آتش.

۶- بقای جرم

شکل (۵) و حجم کنترلی CV_1 را در نظر بگیرید. این حجم در شکل (۱۰) دوباره رسم شده و جریان‌ها روی آن نشان داده شده‌اند.

بسته با یک تهویه در دیوار رخ می‌دهد. محاسبه کلی جریان‌های هواکش، اطلاعات مربوط به تفاوت‌های فشاری را در عرض هر بازو لازم دارد. برای مسائل چند اتاقی، این اطلاعات از حل معادلات بقای حاکم برای هر اتاق به دست می‌آید.

جریان‌های جرمی هواکش، تابعی از دماهای لایه و فشار اتاق خواهد بود. فشار اتاق معمولاً برابر با مقدار آن در کف گرفته می‌شود و فرض بر این است که برای ارتفاع در معادله (۲۴) یکنواخت باشد، ولی به منظور بیان شدت جریان‌های جرمی (معادله ۲۶)، به طور هیدرواستاتیکی با معادله (۲۷) تغییر می‌کند. این معادلات بقای خاص در ادامه ارائه خواهند شد. شرحی از حالت‌های جریان جابجایی طبیعی ناشی از آتش‌سوزی فضای بسته، در حالی که گسترش آتش‌سوزی اتاق را در بر می‌گیرد، در شکل (۹) نشان داده شده است. در این جا یک ناحیه خارجی با دمای یکنواخت و برابر با دمای ناحیه سرد پائین در فضای بسته در نظر گرفته می‌شود.

۵- ورود هوا به داخل جریان ستونی

قبل از در نظر گرفتن معادلات بقای کلی، نیاز داریم عبارتی برای شدت جریان ورودی به داخل جریان ستونی آتش از طریق سطح مشترک، روی ارتفاع D ، داشته باشیم. بسیاری از عبارات دیگر قابل دسترسی هستند ولی هیچ‌یک نه قطعی هستند و نه می‌توانند از اصول بنیادی استخراج شوند، بلکه همگی تجربی هستند. به طور کلی، شدت جرم نفوذ، \dot{m}_e ، وابسته به شدت رهائش انرژی آتش‌سوزی، \dot{Q} ، ارتفاع، D ، و هندسه آتش‌سوزی، G ، است (مثلاً آتش‌سوزی استخر، آتش‌سوزی خطی، آتش‌سوزی روی دیوار، آتش‌سوزی صندلی و غیره).

$$\dot{m} = \dot{m}_e(\dot{Q}, D, G) \quad (29) \text{ (الف)}$$

برای مثال، زوکوسکی^۱ [۱۰] برای یک جریان ستونی متقارن محوری منبع نقطه‌ای، با جریان جرمی اولیه صفر (در $Z \approx 0$) معادله زیر را ارائه می‌دهد:

1. Zukoski

$$\dot{\omega}_O = \left(\frac{1}{r}\right)\dot{\omega}_F \text{ و } \dot{\omega}_P = -\left(r + \frac{1}{r}\right)\dot{\omega}_F$$

سپس، با ضرب کردن معادله (۳۰-الف) در Y_i و کم کردن آن از معادله (۳۱) رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\rho z_i A \frac{dY_i}{dt} + \sum_{j=1}^J \dot{m}_j (Y_{ij} - Y_i) = \dot{\omega}_i \quad (32\text{-الف})$$

برای مورد خاص شکل (۱۰)، این معادله به صورت زیر در می‌آید:

$$\rho z_i A \frac{dY_i}{dt} + \dot{m}_e (Y_i - Y_{ie}) + \dot{m}_s (Y_i - Y_{is}) = \dot{\omega}_i \quad (32\text{-ب})$$

$\beta = Y_F - rY_O$ را در نظر بگیرید و یک متغیر جدید $i=0$ و $i=F$ تعریف کنید، که در نتیجه معادله (۳۲-الف) به صورت زیر در می‌آید:

$$\rho z_i A \frac{d\beta}{dt} + \sum_j \dot{m}_j (\beta_j - \beta) = 0 \quad (33)$$

حال برای مورد خاص شکل (۱۰)، جزء جرمی اکسیژن در جریان ورودی \dot{m}_e ، برابر با Y_{oe} و برای \dot{m}_s برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. پس معادله (۳۳) به شکل زیر خواهد بود:

$$\rho z_i A \frac{d\beta}{dt} + \dot{m}(\beta - \beta) - \dot{m}_e(\beta_e - \beta) - \dot{m}_s(\beta_s - \beta) = 0$$

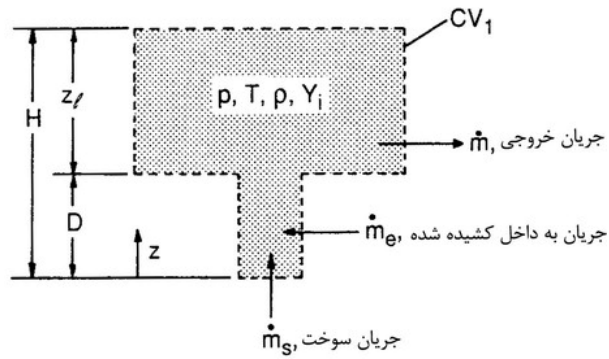
یا معادله (۳۴)

$$\rho z_i A \frac{d\beta}{dt} + \dot{m}_e(\beta - \beta_e) + \dot{m}_s(\beta - \beta_s) = 0 \quad (34)$$

که در آن:

$$\beta_e = rY_{oe} \quad (\text{در هوا } Y_{oe} = 0.233)$$

$$\beta_s = Y_{Fs} \quad (\text{اگر سوخت خالص باشد } = 1)$$



شکل ۱۰- جریان ستونی آتش و حجم کنترل لایه بالایی، با جریان‌های جرمی

با فرضیاتی که از قبل برای سیال در CV_1 و CV_2 ارائه شد و با در نظر گرفتن این که همه خواص داخل این CV یکنواخت هستند (به جز وقتی که P برای محاسبه جریان‌های جرمی استفاده می‌شود)، معادله (۶) برای نشان دادن رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$A \frac{d}{dt}(\rho z_i) + \sum_{j=1}^J \dot{m}_j = 0 \quad (30\text{-الف})$$

که عبارت دوم، جمع شدت‌های جریان جرمی خالص خروجی از CV را نشان می‌دهد.

$$A \frac{d}{dt}(\rho z_i) + \dot{m} - \dot{m}_e - \dot{m}_s = 0 \quad (30\text{-ب})$$

۷- بقای گونه‌ها

به طور مشابه، معادلات (۵) و (۷) می‌توانند برای استخراج بقای گونه i برای CV_1 در شکل (۱۰) استفاده شوند:

$$A \frac{d}{dt}(\rho z_i Y_i) + \sum_{j=1}^J \dot{m}_j Y_{ij} = \dot{\omega}_i \quad (31)$$

که Y_{ij} مقدار جزء جرمی گونه‌های i ام در جریان ورودی یا خروجی CV است (توجه: برای جریان‌های خروجی، $Y_{ij} = Y_i$ ، مقدار در CV و $\dot{\omega}_i$ شدت تولید i در CV_1 است.

اگر $[-\dot{\omega}_F]$ شدت سوخت واکنش داده داخل CV_1 باشد، آنگاه با استفاده از معادله (۱۱) (برای استوکیومتری در نظر گرفته شده):

که در آن T_j دمای جریان ورودی یا خروجی از CV و T دمای سیال در داخل CV_1 است. با ضرب کردن معادله (۳۰-الف) در $c_p T$ و کم کردن آن از معادله (۳۷) خواهیم داشت:

$$-Ac_p T \frac{d}{dt}(\rho z_l) + p \frac{dz_l}{dt} A + Ac_v \frac{d}{dt}(\rho T z_l) + c_p \sum_{j \text{ (netout)}} (T_j - T) \dot{m}_j = [-\dot{\omega}_F] \Delta H - \dot{Q}_{netloss} \quad (38)$$

از آنجایی که $P = R \rho T = (c_p - c_v) \rho T$ ، خواهیم داشت:

$$P \frac{dz_l}{dt} = \frac{d}{dt}(\rho z_l) - z_l \frac{dP}{dt} = R \frac{d}{dt}(\rho T z_l) - z_l \frac{dP}{dt}$$

و به دنبال آن:

$$-Ac_p T \frac{d}{dt}(\rho z_l) + Ac_p \frac{d}{dt}(\rho T z_l) - Az_l \frac{dP}{dt} + c_p \sum_j (T_j - T) \dot{m}_j = [-\dot{\omega}_F] \Delta H - \dot{Q}_{netloss} \quad (39)$$

یا

$$Ac_p \rho z_l \frac{dT}{dt} - Az_l \frac{dP}{dt} + c_p \sum_{j \text{ (netout)}} (T_j - T) \dot{m}_j = [-\dot{\omega}_F] \Delta H - \dot{Q}_{netloss} \quad (40)$$

معادله (۴۰) رایج‌ترین شکل معادله انرژی برای حجم کنترل به کار رفته در آتش‌سوزی‌های فضای بسته است. توجه کنید که عبارت جمع، برای همه جریان‌های خروجی از حجم کنترل صفر است، زیرا $T_j = T$. در نتیجه این عبارت فقط برای جریان‌های ورودی دخالت می‌کند، که علامت شدت جریان جرمی آنها منفی است.

در اینجا با صرف‌نظر از معادله گونه‌ها، چون این معادله مستقل از P و T و z_l است، دو معادله برای P ، T و z_l که به وسیله معادله‌های (۳۰) و (۴۰) داده شده‌اند، وجود دارد که $\rho = P/RT$ با معادله حالت برای گاز ایده‌آل داده شده است. با کاربرد معادلات یکسان برای CV_2 ، لایه پائین، می‌توان T_e را به دست آورد و چون $p_e = p$ و $z_e \equiv D = H - z_l$ ، دو معادله بیشتر داریم. بنابراین چهار

به علاوه، فرض بر این است که شدت رهایش انرژی به صورت زیر باشد:

$$\dot{Q} = [-\dot{\omega}_F] \Delta H \quad (35\text{-الف})$$

که

$$[-\dot{\omega}_F] = \begin{cases} \dot{m}_s Y_{Fs} & (\dot{m}_e = 0 \text{ برای } Y_{O_2} > 0) \\ r Y_{O_2} \dot{m}_e & Y_{O_2} = 0 \end{cases} \text{ یا}$$

$$(35\text{-ب})$$

معادله (۳۵-ب)، فرضی است بر اساس نیاز به تفاوت‌گذاری بین آتش‌سوزی‌های کنترل شده با سوخت ($Y_{O_2} > 0$) و آتش‌سوزی‌های محدود شده با تهویه ($Y_{O_2} = 0$)؛ و در غیاب هر مدل جایگزین دیگری برای $\dot{\omega}_F$ که با مفهوم مدل ناحیه‌ای سازگار باشد. توجه کنید با حل β ، مقادیر Y_F و Y_O در لایه بالایی به دست می‌آید، زیرا برای استوکیومتری ایده‌آل داده شده به وسیله ۹، هنگامی که $Y_{O_2} = 0$ باشد آنگاه $Y_F > 0$ و چنانچه $Y_{O_2} > 0$ باشد، آنگاه $Y_F = 0$ خواهد بود. همچنین می‌توان نشان داد که رابطه (۳۶) معادله (۳۴) را نیز برآورده می‌کند،

$$\beta = Y_F + \left(\frac{r}{r+1}\right) Y_P \quad (36)$$

به طوری که Y_P فوراً به دست آید (و این را می‌توان به بسیاری از فرآورده‌ها مثل CO_2 ، H_2O ، دوده و... عمومیت داد، به شرطی که استوکیومتری واکنش شناخته شده باشد).

۸- معادله انرژی

معادله انرژی برای CV_1 در شکل (۸) از معادله (۲۴) به دست می‌آید:

$$Ac_v \frac{d}{dt}(\rho T z_l) + c_p \sum_{j=1}^l T_j \dot{m}_j = [-\dot{\omega}_F] \Delta H - \dot{Q}_{netloss} - P \frac{dz_l}{dt} A \quad (37)$$

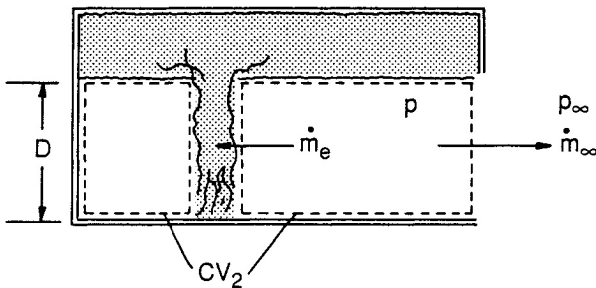
که \dot{m}_∞ به عنوان یک جریان خروجی از CV_2 برای این مورد تعریف می‌شود. برای یک مورد لایه پائینی محیط ($T_e=T_\infty$)، معادلات بقای حاکم، معادلات (۳۰)، (۴۲) و (۴۳) برای مجهول‌های T, P و z_l هستند. شدت جریان‌های جرمی همگی وابسته به این متغیرهاست و به محض تعیین آن‌ها، حل گونه‌های ویژه با حل معادله (۳۲) به دست می‌آید. در نتیجه، این معادلات قوانین بقا را برای فرمولاسیون مدل ناحیه‌ای آتش‌سوزی‌های فضای بسته ارائه می‌دهند.

۹- یک مثال کاربردی: پر شدن فضای بسته با دود

به طور کلی معادلات (۳۰-الف)، (۴۰) و (۴۳) اطلاعات کافی برای حل T, P, z_l با روابط مناسب برای \dot{m}_j و اتلاف حرارت از مرزها را در اختیار می‌گذارند. این موضوع، نتیجه کاربرد معادله انرژی برای لایه‌های بالایی و پایینی و معادله بقای جرم برای لایه بالایی است. دمای لایه پائینی واقعاً ثابت نیست، ولی با فرض $T_e=T_\infty$ می‌توان بقای جرم را برای لایه پائینی جهت به دست آوردن یک آلترناتیو معادله (۳۰-الف) به کار برد، به صورت زیر:

$$A \frac{d}{dt}(\rho_e D) + \sum_j \dot{m}_j = 0 \quad (44)\text{-الف}$$

برای CV_2 در شکل (۱۱)، معادله (۴۴-الف) را به کار می‌بریم، که در آن $\rho_e = \rho_\infty$ (مقدار محیط اطراف).



شکل ۱۱- ارتفاع لایه D طی پر شدن

$$\rho_\infty A \frac{dD}{dt} + \dot{m}_e(\dot{Q}, D, G) + \dot{m}_\infty(p, A_o) = 0 \quad (44)\text{-ب}$$

که \dot{m}_e شدت ورودی است (معادله (۲۹)) و \dot{m}_∞ شدت جریان خروجی داده شده توسط معادله (۴۵) است [۹].

معادله (دو تا انرژی و دو تا جرم)، با چهار مجهول T, T_e, P, z_l وجود دارد. به عنوان یک تقریب اولیه، می‌توان T_e را مساوی T_∞ (دمای محیط) گرفت. با این فرض T_e حذف شده و فقط سه معادله لازم است. یک شکل مفید از این معادلات در زیر با استفاده از معادله (۳۷) استخراج شده است. چون P در فضای بسته یکنواخت در نظر گرفته می‌شود، ما معادله انرژی را برای کل سیال در فضای بسته $CV = CV_1 + CV_2$ به کار می‌بریم.

با کاربرد معادله (۳۷) برای هر ناحیه CV_1 و CV_2 :

$$Ac_v \frac{d}{dt}(\rho T z_l) + c_p \sum_j T_j \dot{m}_j = [-\dot{\omega}F] \Delta H - \dot{Q}_{CV_1}^{netloss} - P \frac{dz_l}{dt} A$$

$$Ac_v \frac{d}{dt}[\rho_e T_e (H - z_l)] + c_p \sum_j T_j \dot{m}_j = -P \frac{d(H - z_l)}{dt} A - \dot{Q}_{CV_2}^{netloss}$$

و با در نظر گرفتن $\rho_e T_e = \rho T = P/R$ ، اضافه کنید:

$$Ac_v \frac{d}{dt} \left(\frac{P}{R} H \right) + c_p \sum_j T_j \dot{m}_j = [-\dot{\omega}F] \Delta H - \dot{Q}_{(CV_1+CV_2)}^{netloss} \quad (41)$$

که جمع جریان جرمی فقط در روی سطح غیر مشترک بین دو CV در نظر گرفته می‌شود، زیرا این عبارات در سطح مشترک حذف می‌شوند.

برای مورد خاص، معادله (۴۰) به شکل زیر در می‌آید:

$$Ac_p \rho z_l \frac{dT}{dt} - Az_l \frac{dP}{dt} + c_p \dot{m}_e (T - T_e) + c_p \dot{m}_s (T - T_s) = [-\dot{\omega}_F] \Delta H - \dot{Q}_{netloss, CV_1} \quad (42)$$

و معادله (۴۱) می‌دهد:

$$AH \frac{c_v}{R} \frac{dP}{dt} + c_p T \dot{m} + c_p \dot{m}_\infty T_e - \dot{m}_s c_p T_s = [-\dot{\omega}_F] \Delta H - \dot{Q}_{netloss, (CV_1+CV_2)} \quad (43)$$

آتش‌سوزی در ساختمان و به دست آوردن اطلاعات پارامترهای آتش در زمان‌های مختلف در فضای آتش‌سوزی است. در این نوع سناریوها بیشتر با حریق ناشی از جامدات سر و کار داریم، اما این موضوع لزوماً به معنای محدودیت برای مدل ناحیه‌ای از نظر نوع آتش‌سوزی نیست. برای حل معادلات انرژی لازم است تا شدت انرژی حاصل از سوختن نمونه مشخص باشد. این می‌تواند با استفاده از نتایج آزمایش‌های آتش و داده‌های شدت رهایش گرما به مدل وارد شود و معمولاً با آنچه در ترمودینامیک برای واکنش‌های شیمیایی داده می‌شود، متفاوت است، زیرا مقادیر ترمودینامیکی (اکثرأً مربوط به آنتالپی واکنش‌های احتراق) نمی‌تواند در واکنش‌های حریق واقعاً آزاد شود. به همین علت در ادبیات علمی حریق، از عبارت شدت رهایش گرما^۱ استفاده می‌شود. شدت افت جرم^۲ پارامتر دیگری است که باید بر اساس آزمون‌های آتش و اطلاعات دقیق به مدل‌ها داده شود. موضوع مهم، ارتباط دادن این روابط و معادلات به وسیله معادلات بقا برای حجم کنترلی است که در مدل‌های ناحیه‌ای، همانگونه که از نام آنها مشخص است، منطقه مورد نظر معمولاً به یک یا دو ناحیه تقسیم می‌شود. هر ناحیه به وسیله مجموعه‌ای از پارامترهای فیزیکی (مانند دما و غلظت) و معادلات تجربی یا نیمه تجربی نشان داده می‌شود. از محدودیت‌های این نوع مدل‌سازی این است که پارامترهای فیزیکی برای ناحیه بزرگی از فضا متوسط‌گیری می‌شود. مدل‌های ناحیه‌ای به علت نوع تعریف آنها، اطلاعات محدودی درباره محیط آتش‌سوزی تأمین می‌کنند، زیرا متغیرهای مورد نظر در تمام ناحیه‌ها با مقیاس فضایی بزرگی متوسط‌گیری می‌شوند. اشکال اصلی مدل‌های ناحیه‌ای، لزوم شناخت اولیه از ساختار جریان است. این معلومات باید یا از آزمون‌های تجربی و یا از ملاحظات نظری پایه استخراج شوند. این بدان معناست که اعتبار فرضیات موجود در مدل‌سازی ناحیه‌ای باید در هر مورد خاص تأیید شود. به عبارت دیگر توسعه مدل ناحیه‌ای هرگز نمی‌تواند از مطالعات تجربی پشتیبانی‌کننده جدا شود، در حالی که در رویکرد مدل‌سازی میدانی، این مشکل به وسیله اصول اساسی فیزیکی، مکانیکی و ترمودینامیکی برطرف می‌شود، که به طور عمومی برای هر سیستم مورد نظر درست است.

$$\dot{m}_{\infty} = \rho_{\infty} A_0 C \sqrt{\frac{2(P - P_{\infty})}{r_{\infty}}} \quad (45)$$

معادله لازم برای \dot{m}_{∞} توسط کویینتیر [۹] به شکل زیر ارائه شده است:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\infty} &= \rho_{\infty} A_0 C \sqrt{\frac{2}{\rho_{\infty}} \left(\frac{k-1}{k} \right)} \sqrt{\frac{\rho_{\infty}}{2} \frac{\dot{Q}_a}{C W_0 H_0 p_{\infty}}} = \frac{\rho_{\infty}}{p_{\infty}} \left(\frac{k-1}{k} \right) \dot{Q}_a \\ &= \frac{1}{RT_{\infty}} \left(\frac{k-1}{k} \right) \dot{Q}_a = \frac{1}{(c_p - c_v) T_{\infty}} \left(\frac{c_p - c_v}{c_p} \right) \dot{Q}_a = \dot{Q}_a / c_p T_{\infty} \end{aligned} \quad (46)$$

برای \dot{Q}_a کوچک یا برای یک هواکش در لایه داغ، می‌توان از \dot{m}_{∞} چشم‌پوشی کرد [۱۰] و با استفاده از معادله (۲۹) نوشت:

$$\begin{aligned} \dot{m}_e &= C_1 \dot{Q}^{1/3} D^{5/3} \quad \text{و} \quad C_1 = cte \quad \frac{dD}{dt} = -\frac{C_1 \dot{Q}^{1/3}}{\rho_{\infty} A} D^{5/3} \\ -\frac{3}{2} \int_H^D d(D^{-2/3}) &= -\int_0^t \frac{C_1 \dot{Q}^{1/3}}{\rho_{\infty} A} dt \end{aligned} \quad (47) \text{ - الف)}$$

$$\begin{aligned} -D^{-2/3} + H^{-2/3} &= -\frac{2 C_1 \dot{Q}^{1/3}}{3 \rho_{\infty} A} t \\ \frac{D}{H} &= \left[1 + \frac{2}{3} C_1 \frac{H^{2/3}}{\rho_{\infty} A} \dot{Q}^{1/3} t \right]^{-3/2} \end{aligned} \quad (47) \text{ - ب)}$$

این معادله یک رابطه تقریبی برای ارتفاع لایه است که با پیشرفت زمان کاهش می‌یابد (یعنی لایه داغ به سمت پایین می‌آید). توجه کنید که همان‌طور که D کوچکتر می‌شود، شدت کاهش آن، با استفاده از معادله (۴۷-الف) کم می‌شود. هنگامی که لایه به پایین آمده، از لبه هواکش (گشودگی) عبور کند (شکل ۹-پ)، معادله (۴۷-ب) دیگر صادق نیست و کاربرد آن برای بیشتر از این نقطه، شدت سقوط لایه را دست بالا برآورد می‌کند، زیرا افت جرم از لایه به حساب آورده نمی‌شود.

۱۰- برخی ملاحظات و محدودیت‌ها برای مدل‌های ناحیه‌ای

به طور کلی مدل‌های شبیه‌ساز حریق برای شبیه‌سازی گسترش

1. Heat Release Rate
2. Mass Loss Rate

۱۱- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر برای کمک به توصیف اصول اصلی و فرضیات به کار رفته در مدل‌سازی آتش‌سوزی‌های فضای محصور به منظور کمک به درک بهتر آن ارائه شد. قوانین اصلی بقا برای سیستم‌های واکنش‌دهنده بیان شد. شکل‌های مفید بقای جرم، بقای گونه‌ها، بقای انرژی برای سیستم مدل ناحیه‌ای استخراج شد. تحلیل‌های ارائه شده در این مقاله به درک بهتر مدل‌های حریق و تفسیر نتایج مسائل پیچیده‌تر کمک می‌کند. مروری اجمالی بر مدل‌های ناحیه‌ای انجام شد و چند مدل ناحیه‌ای پرکاربرد به همراه حوزه کاربرد آن‌ها ارائه گردید.

مراجع

- [1] Mitler, H. E., Rockett, J. A., "Users' Guide to FIRST, a Comprehensive Single-Room Fire Model," NBSIR 87-3595, Nat. Bur. Stand., Sept. (1987).
- [2] Tanaka, T., "A model of multiroom fire spread," NBSIR 83-2718, Nat. Bur. Stand., August (1983).
- [3] Jones, W. W., "A Multicompartment Model for the Spread of Fire Smoke and Toxic Gases," Fire Safety Jour. 9, 55-79.(1985).
- [4] Rockett, J. A., Morita, M., "The NBS/Harvard Mark VI Multi-room Fire Simulation," Fire Science Technol., 5 (2), PP. 159-164, (1985).
- [5] Jain, S. Kmar, S., Sharma, T. P., "Numerical simulation of fire in a tunnel: Comparative study of CFAST and CFX predictions", TUNNELING & UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY. 23, 2, (2008).
- [6] Remesh, K., "Performance Comparison of Zone Models with Compartment Fire Tests", Journal of Fire Sci., 25,4,321-353,(2007).
- [7] Chow. W. K., "Predictability of Flashover by Zone Models", Journal of Fire Sci., 16, 5,335-350, (1998).
- [8] Quintiere, J. G., Steckler, K., Corley, "An Assessment of Fire Induced Flows in Compartments," Fire Science and Technol., 4 (1), pp.1-44, (1984).
- [9] Quintiere, J. G., "Fundamental of enclosure fire "zone" models". Journal of fire protection and Engineering, 1, 3, 99-119, (1989).
- [10] Zukoski, E. E., "Development of a stratified ceiling layer in the early stages of a closed room fire" Fire and Materials, 2 (2), pp. 14-22.(1978).