

## مقایسه شبیه‌سازی احتراق پیش‌آمیخته آشفته با مدل‌های اتلاف ادی‌ها و زی‌مونت

سید عبدالمهدی هاشمی<sup>۱\*</sup>، حامد عزیزاده نوده‌ی<sup>۲</sup>، ایوب عادل‌ی<sup>۳</sup>، نجمه حاجی‌علی‌گل<sup>۴</sup>

دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک (تبدیل انرژی)

\*Hashemi@Kashanu.ac.ir

### چکیده

در این مطالعه یک شعله پیش‌آمیخته آشفته متان-هوا با به کارگیری دو مدل اتلاف ادی‌ها و زی‌مونت شبیه‌سازی شده است. هندسه به صورت دوعبدهی متقارن محوری شبیه‌سازی شده است. معادلات حاکم با تقریب مرتبه دوم گسسته‌سازی شده‌اند و برای حل همزمان معادله‌های پیوستگی، مومنتوم، انرژی و جزءها از الگوریتم سیمپل بهره گرفته شده است. از مدل k-ε استاندارد برای مدل‌سازی آشفته‌گی جریان و از روش DO برای مدل‌سازی تشعشع استفاده شده است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که مدل زی‌مونت میدان دمایی را نزدیک به مقادیر واقعی نشان می‌دهد و مدل اتلاف ادی‌ها برای پیش‌بینی رفتار خطوط همدم در جریان‌های با آشفته‌گی بالا مناسب نیست. به کارگیری هر دو مدل ناحیه‌های چرخشی بوجود آمده در میدان سرعت افقی را به خوبی پیش‌بینی می‌کنند در حالیکه هر دو مدل در پیش‌بینی مقادیر واقعی میدان افقی سرعت دارای ۵۰٪ درصد خطا هستند.

واژه‌های کلیدی: احتراق پیش‌آمیخته، شبیه‌سازی عددی، مدل اتلاف ادی‌ها، مدل زی‌مونت.

### ۱- مقدمه

احتراق پیش‌مخلوط آشفته از برهم‌کنش مفاهیم آشفته‌گی و احتراق حاصل می‌شود. پیچیدگی مفاهیم آشفته‌گی و احتراق و برهم‌کنش آنها باعث می‌شود که احتراق پیش‌مخلوط آشفته به یکی از پیچیده‌ترین مسائل علم مکانیک سیالات تبدیل شود. این رژیم احتراقی در بسیاری از در احتراق پیش‌آمیخته آشفته در شبیه‌سازی مشعل‌های صنعتی بدلیل نرخ بالای واکنش و سرعت آن فرض احتراق یک‌مرحله‌ای بکارگرفته می‌شود. اولین مدل در زمینه احتراق پیش‌آمیخته آشفته، مدل اضمحلال ادی‌ها (Eddy Break-up) است که توسط اسپالدینگ به کار برده شد [۱]. این مدل براساس تحلیل‌های پدیده‌شناختی احتراق پیش‌آمیخته آشفته با فرض اعداد رینولدز و دامکولر بالا به وجود آمد. فرض مهم دیگر در این مدل‌سازی این است که برخلاف سینتیک شیمیایی، آشفته‌گی نقش اساسی در تعیین نرخ واکنش دارد. ناحیه واکنش بصورت مجموعه‌ای از بسته‌های گازهای نسوخته و گازهای سوخته در نظر گرفته می‌شود که توسط گردابه‌ها انتقال می‌یابند. این روش علی‌رغم موفقیت در مدل‌سازی احتراق، محدودیت در نظر نگرفتن اثرات سینتیک شیمیایی را بطور ذاتی دارد. جذابیت این روش به لحاظ سادگی محاسبه نرخ واکنش براساس مقادیر متوسط و بدون افزودن معادله اضافی است. برخی تغییرات برای افزودن اثرات واکنش شیمیایی در محاسبه نرخ واکنش توسط محققین دیگر ارائه شد [۲]. مدل اضمحلال ادی‌ها نرخ واکنش را در میدان‌های جریان با تنش بالا بیشتر از حد معمول پیش‌بینی می‌کند. در نرم‌افزارهای تجاری به منظور کاهش نرخ واکنش مدل با قانون آرنیوس ترکیب می‌شود. لازم به توضیح است که روش اتلاف ادی‌ها (Eddy Dissipation) از تعمیم این روش برای محاسبه احتراق غیرپیش‌آمیخته توسط مگنوسن و مجرتگر [۳] به وجود آمد. در دهه ۸۰ میلادی دیدگاه دیگری در شبیه‌سازی احتراق

۱- استادیار، دانشگاه کاشان

۲- کارشناسی ارشد، دانشگاه کاشان

۳- مدیر عامل، شرکت تولیدی-مهندسی شعله صنعت

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه کاشان

پیش‌آمیخته آشفته با استفاده از محاسبه سرعت شعله آشفته ابداع شد. مدل زیمونت از جمله روش‌هایی است که از تقریب سرعت شعله آشفته استفاده می‌کند. این روش با افزودن یک معادله بعنوان معادله متغیر پیشرفت واکنش به شبیه‌سازی شعله پیش‌آمیخته آشفته می‌پردازد. سادگی و نتایج دقیق این روش آن را بعنوان یکی از بهترین مدل‌ها برای شبیه‌سازی احتراق پیش‌آمیخته آشفته معرفی کرد. روش زیمونت توسط محققین بسیاری در دهه اخیر مورد بررسی قرار گرفته است. زیمونت و همکارانش [۴] از این مدل برای مدلسازی یک مشعل مخروطی استفاده و نتایج خود را با نتایج تجربی مقایسه کردند که همخوانی خوبی داشت. دینکلیکر و هلزلر [۵] از مدل زیمونت برای مدلسازی شعله V شکل پیش‌آمیخته آشفته استفاده کردند و با مقایسه معادلات سرعت شعله پیش‌آمیخته آشفته و نرخ واکنش مختلف نتیجه گرفتند که روش زیمونت بهترین روش برای شبیه‌سازی احتراق پیش‌آمیخته آشفته است. بیلماز و همکارانش [۶] با مقایسه روش زیمونت و دو روش چگالی سطح شعله توانایی مدل زیمونت را برای مدلسازی احتراق پیش‌آمیخته آشفته بررسی و تایید کردند.

این مطالعه به بررسی دو مدل احتراق آشفته مختلف و مقایسه آنها با نتایج تجربی بنه‌اوی و همکارانش می‌پردازد. اولین مدل در سال ۱۹۸۶ و دومین مدل در سال ۱۹۹۸ ارائه شده است و هر دو مدل از فرض واکنش سریع استفاده می‌کنند. تفاوت عمده دو مدل، شیوه مدلسازی جمله نرخ واکنش متوسط است.

## ۲- معادلات حاکم

برای شبیه‌سازی عددی جریان سیال از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \iint_A \rho \phi V \cdot dA = \iint_A \Gamma \nabla \phi \cdot dA + \int_V S_\phi dV \quad (1)$$

که در آن  $\phi$  کمیت کلی است که مقدار آن برابر ۱ در معادله پیوستگی،  $u$  در معادله مومنتم در جهت  $x$ ،  $v$  در معادله مومنتم در جهت  $y$ ،  $h$  در معادله انرژی و  $Y_i$  در معادله کسر جرمی اجزا است. در سمت چپ معادله، اولین جمله نماینده حالت گذرا و دومین جمله نماینده جابجایی است. در سمت راست معادله، اولین جمله نماینده نفوذ و دومین جمله نماینده تولید کمیت  $\phi$  در داخل سلول است.

## ۲-۱- مدلسازی آشفته‌گی

برای مدلسازی آشفته‌گی این بررسی از مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد استفاده شده است. انرژی جنبشی توربولانت  $k$  و نرخ اتلافات  $\varepsilon$  از معادلات انتقال زیر بدست می‌آیند:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3)$$

که در آن  $G_k$  بیانگر تولید انرژی جنبشی آشفته‌گی ناشی از گرادیان‌های سرعت متوسط و  $C_{1\varepsilon}$  و  $C_{2\varepsilon}$  ضرایب ثابتی هستند که به صورت تجربی تعریف می‌شوند.  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon$  عدد پراوتل برای  $k$  و  $\varepsilon$  می‌باشند که آن‌ها نیز به صورت تجربی تعریف می‌شوند. لزجت آشفته‌گی از روی مقادیر  $k$  و  $\varepsilon$  و با رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

که در آن  $C_{\mu}$  یک ثابت تجربی می‌باشد. این مقادیر ثابت برای مدل استاندارد  $k-\varepsilon$  به صورت مقادیر جدول (۱) پیشنهاد شده است:

جدول ۱- مقادیر ثابت مدل استاندارد  $k-\varepsilon$

| $C_{\mu}$ | $C_{1\varepsilon}$ | $C_{2\varepsilon}$ | $\sigma_{\varepsilon}$ | $\sigma_k$ |
|-----------|--------------------|--------------------|------------------------|------------|
| ۰.۰۹      | ۱.۴۴               | ۱.۹۲               | ۱                      | ۱.۳        |

## ۲-۲-مدلسازی احتراق

برای مدل کردن احتراق لازم است که نرخ انجام واکنش‌های شیمیایی مشخص شود. با توجه به برهم‌کنش آشفته‌گی و واکنش شیمیایی، تاثیر آشفته‌گی بر احتراق نیز باید در نظر گرفته شود. در این مطالعه از روش اتلاف ادی‌ها و زیمونت برای مدلسازی احتراق پیش‌آمیخته استفاده شده است.

### ۲-۲-۱- مدل اتلاف ادی‌ها

اسپالدینگ اولین تلاش‌ها برای عدم به‌کارگیری منابع شیمیایی در حل جریان‌های احتراقی را به‌کار برد [۱]. او فرآیند اختلاط آشفته را به‌صورت یک فرآیند آبخاری از کل به مقیاس مولکولی مطرح کرد. از دیدگاه اسپالدینگ این فرآیند آبخاری می‌تواند واکنش‌های شیمیایی همپای اختلاط را کنترل کند تا آنجا که واکنش یک فرآیند قابل اندازه‌گیری می‌شود. به‌عبارت دیگر اسپالدینگ پیشنهاد اندازه‌گیری فرآیند اختلاط را به جای واکنش شیمیایی مطرح کرد. به همین دلیل این مدل، مدل اضمحلال ادی نامیده شد. نرخ متوسط احتراق آشفته محصولات به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\overline{\omega_p} = \rho C_{EBU} \frac{\varepsilon}{k} (\overline{Y_p^{n_2}})^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

که در آن  $\overline{Y_p^{n_2}}$  واریانس کسر جرمی محصول و  $C_{EBU}$  ثابت مدل است. این مدل بعدها توسط مگنسن و جرتاگر بهینه شد [۳]. در واقع آن‌ها  $\overline{Y_p^{n_2}}$  را با میانگین کسر اجزاء ناقص (سوخت برای مخلوط رقیق و اکسیژن برای مخلوط غنی) جایگزین کردند. این مدل کمترین مقدار سه نرخ زیر را مبنا قرار می‌دهد:

نرخ کسر جرمی متوسط سوخت

$$\overline{\omega_F} = \overline{\rho} \overline{AY_F} \frac{\varepsilon}{k} \quad (6)$$

نرخ کسر جرمی متوسط اکسیدکننده

$$\overline{\omega_{O_2}} = \overline{\rho} \frac{\overline{AY_{O_2}}}{\nu} \frac{\varepsilon}{k} \quad (7)$$

نرخ کسر جرمی متوسط محصول

$$\overline{\omega_p} = \overline{\rho} \frac{A.B}{(1+\nu)} \overline{Y_p} \frac{\varepsilon}{k} \quad (8)$$

این مدل بر مبنای فرضیات حدسی بنا نهاده شده است. فرض اصلی بر مبنای جایگزینی مقیاس زمانی واکنش (در حالت فرضی واکنش یک مرحله‌ای) با مقیاس زمانی آشفته‌گی  $\tau = \varepsilon/k$  می‌باشد. بنابراین مدل اضمحلال ادی تأثیر سینتیک شیمیایی

را نادیده می‌گیرد و یک واکنش سریع و محدود را ارائه می‌کند. وقتی که این مدل در دینامیک سیالات محاسباتی به کار برده شود، باید دقت شود که ضرایب  $C_{EBU}$ ،  $A$  و  $B$  برای ایجاد نتایج رضایت‌بخش در محدوده وسیعی از مسائل، مورد بررسی قرار گیرند. این مدل برای جریان‌های با عدد دامکولر کمتر از یک جواب‌های رضایت‌بخشی ارائه می‌کند. عدد دامکولر بیانگر نسبت مقیاس زمانی آشفته‌گی به مقیاس زمانی احتراق می‌باشد. وقتی که این عدد بیشتر از یک می‌باشد به معنای سریعتر بودن اختلاط نسبت به احتراق می‌باشد. این وضعیت به‌خصوص در نزدیکی دیوارها، نگهدارنده شعله و منطقه چرخشی به وجود می‌آید. این شرایط با فرض مدل، که سرعت واکنش را بسیار بیشتر از سرعت انتشار آشفته‌گی می‌پندارد سازگار نمی‌باشد. همچنین این مدل حداکثر تا دو مرحله قادر به پیش‌بینی اجزای میانی واکنش می‌باشد. لذا پیش‌بینی اجزای میانی واکنش نیازمند مدل‌های پیشرفته‌تر و دقیق‌تری است.

### ۲-۲-۲-۲ مدل زیمنت

مدل احتراق پیش‌آمیخته آشفته، براساس تحقیقات زیمنت [۴]، یک معادله انتقال متغیر پیشرفت واکنش را به معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی اضافه و حل می‌کند. بسته شدن این معادله براساس تعریف سرعت آشفته شعله صورت می‌گیرد.

$$2-2-2-2-1 \text{ پیشروی پیشانی شعله}$$

در بسیاری از سیستم‌های احتراق پیش‌آمیخته، فرآیند سوختن در یک لایه نازک صورت می‌گیرد. با حرکت پیشانی شعله، گازهای نسوخته می‌سوزند و به محصولات احتراق تبدیل می‌شوند. در نتیجه مدل احتراق پیش‌آمیخته، میدان جریان واکنشی را به دو ناحیه محصولات احتراق و گازهای نسوخته تقسیم می‌کند.

پیشروی پیشانی شعله توسط معادله انتقال متغیر پیشرفت واکنش ( $C$ ) مدل‌سازی می‌شود. متغیر پیشرفت واکنش بصورت مجموع محصولات احتراق استاندارد شده تعریف می‌شود.

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{\sum_{i=1}^n Y_{i,eq}} \quad (9)$$

که در آن،  $n$  تعداد محصولات احتراق،  $Y_i$  کسر جرمی گونه نام محصولات و  $Y_{i,eq}$  کسر جرمی گونه نام محصولات در حالت تعادل می‌باشند. براساس این تعریف،  $c=0$  مربوط به مکانی گازهای نسوخته و  $c=1$  مربوط به مکان محصولات احتراق است. کمیت  $C$  بعنوان شرط مرزی در تمامی ورودی‌ها معین می‌شود و معمولاً به صورت صفر (گازهای نسوخته) و یک (محصولات احتراق) مشخص می‌شود.

معادله دیفرانسیل اضافه شده بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} c) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{Sc_t} \nabla c \right) + \dot{w}_c \quad (10)$$

کمیت نرخ واکنش متوسط توسط معادله زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$\bar{\dot{w}}_c = \rho_u U_t |\Delta c| \quad (11)$$

که در آن  $\rho_u$  چگالی گازهای نسوخته و  $U_t$  سرعت شعله آشفته هستند.

### ۲-۲-۲-۲-۲ پیشروی پیشانی شعله سرعت آشفته

بخش اصلی مدل احتراق پیش‌آمیخته پیش‌بینی  $U_t$ ، سرعت شعله آشفته عمود بر سطح متوسط شعله است. سرعت شعله آشفته توسط عواملی مانند سرعت شعله آرام، غلظت سوخت، دما، نفوذ مولکولی و سینتیک شیمیایی تعیین می‌شود.

چین خوردگی و کشیدگی پیشانی شعله توسط گردابه‌های بزرگ و ضخیم‌تر شدن شعله توسط گردابه‌های کوچک صورت می‌گیرد.

در مدل زیمونت سرعت شعله آشفته بوسیله معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$U_t = B(u')^{3/4} U_i^{1/2} \alpha^{-1/4} l_x^{1/4} = Bu' \left( \frac{\tau_t}{\tau_c} \right)^{1/4} \quad (12)$$

که در آن  $B$  ضریب ثابت،  $u'$  ریشه مربعات سرعت  $U_i$  سرعت شعله آرام،  $\alpha = k/\rho c_p$  ضریب انتقال حرارت مولکولی گازهای نسوخته (نفوذ حرارتی)،  $l_t$  طول مقیاس آشفستگی،  $\tau_t = l_t/u'$  زمان مقیاس آشفستگی و  $\tau_c = \alpha/U_i^2$  زمان مقیاس واکنش شیمیایی هستند. طول مقیاس آشفستگی،  $l_x$  از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$l_x = C_D \frac{(u')^3}{\varepsilon} \quad (13)$$

که در آن  $\varepsilon$  نرخ اضمحلال آشفستگی است.

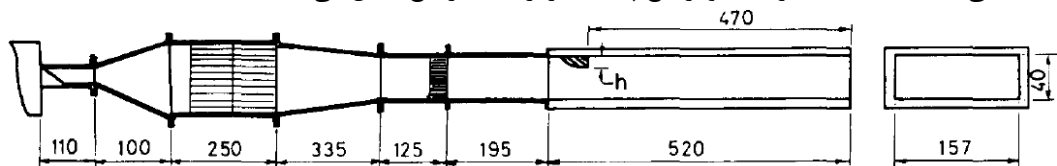
مدل زیمونت براساس فرض پایداری آشفستگی‌های دارای مقیاس کوچک است و همانطور که بیان شد معادله سرعت شعله آشفته براساس پارامترهای آشفستگی بزرگ می‌باشد. مقدار پیش فرض  $A = 0.152$  توسط زیمونت [۱] توصیه شده است و برای اغلب شعله‌های پیش‌آمیخته مناسب است. مقدار پیش فرض  $C_D = 0.37$  نیز برای اکثر شعله‌های پیش‌آمیخته مناسب است.

### ۲-۳- روش محاسباتی

به منظور حل معادلات حاکم بسته نرم افزاری FLUENT [۸] که مبتنی بر روش حجم محدود در مرکز سلول است مورد استفاده قرار گرفته است. برای گسسته‌سازی ترم‌های معادلات، تقریب مرتبه ۲ به کار برده شده و کوپل کردن ترم‌های فشار و سرعت توسط الگوریتم سیمپل (SIMPLE) صورت گرفته است.

### ۳- هندسه و شرایط مرزی

شکل (۱) طرحواره‌ای از هندسه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مخلوط هوا و گاز از یک سیستم اختلاط پیچشی عبور کرده و قبل از ورود به محفظه احتراق، از یک صاف‌کننده جریان عبور می‌کند. محفظه احتراق یک کانال با سطح مقطع مستطیلی  $40 \times 157$  میلی‌متر است و ارتفاع پله،  $h$  برابر نصف ارتفاع کانال می‌باشد.



شکل ۱ - هندسه مسئله بنه‌اوی [۷]

عدد رینولدز جریان برابر  $10^4 \times 1/35$  است. دیواره‌های فوقانی و پایینی توسط آب خنک می‌شوند که سیستم را غیرآدیاباتیکی می‌سازند. بنه‌اوی و همکارانش [۷] نتایج تجربی مفصلی از احتراق پیش‌آمیخته آشفته در این هندسه ارائه کردند. در این بخش سعی شده است که با استفاده از نتایج تجربی، روش‌های حل عددی مورد ارزیابی قرار گیرند. هردو روش زیمونت و اتلاف ادی‌ها برای شبیه‌سازی احتراق در هندسه موردنظر با نسبت هم‌ارزی‌های مختلف بکار برده شده‌اند. همچنین مدل استاندارد  $k-\varepsilon$  و مدل DO، بترتیب برای مدلسازی آشفستگی و تشعشع استفاده می‌شوند. جداول (۲) و (۳)، بترتیب اطلاعات ورودی مدل اتلاف ادی‌ها و مدل زیمونت را نشان می‌دهند. به‌منظور مقایسه دو روش احتراق، بقیه کمیت‌های مورد استفاده

یکسان در نظر گرفته شده‌اند. در ورودی و خروجی بترتیب از شرط مرزی سرعت ورودی و فشار خروجی استفاده شده است. در دیواره‌ها از نتایج تجربی بنه‌های [۷]، بصورت شرط دما ثابت، استفاده شده است.

جدول ۲- اطلاعات ورودی مدل اتلاف ادی‌ها

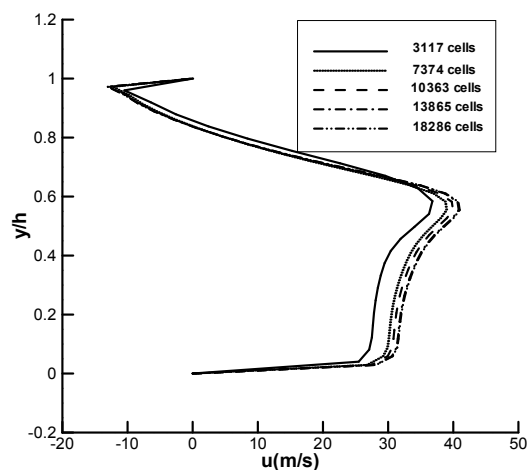
| مقدار                                                            | کمیت                               |
|------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| $0.95CH_4 + 2(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 7.52N_2$ | مکانیزم واکنش                      |
| گاز ایده‌آل غیرقابل تراکم                                        | چگالی مخلوط، $\rho_u$ ( $kg/m^3$ ) |
| $2.88 \cdot 10^{-8}$                                             | نفوذ جرمی، ( $m^2/s$ )             |
| 0.0454                                                           | هدایت گرمایی، k ( $w/m-k$ )        |
| 5%                                                               | شدت آشفته‌گی ورودی                 |

جدول ۳- اطلاعات ورودی مدل زی‌مونت

| مقدار               | کمیت                                |
|---------------------|-------------------------------------|
| $2 \cdot 10^{-5}$   | نفوذ حرارتی ( $m^2/s$ )             |
| 0.0454              | هدایت گرمایی، k ( $w/m-k$ )         |
| 0.049               | کسر جرمی سوخت، $Y_F$                |
| 1.150               | چگالی مخلوط، $\rho_u$ ( $kg/m^3$ )  |
| 0.3                 | سرعت شعله آرام ( $m/s$ )            |
| $5.0041 \cdot 10^7$ | گرمای احتراق، $H_{comb}$ ( $J/kg$ ) |
| 10000               | نرخ تنش بحرانی، $g_G$ ( $1/s$ )     |
| 5%                  | شدت آشفته‌گی ورودی                  |

#### ۴- استقلال از شبکه

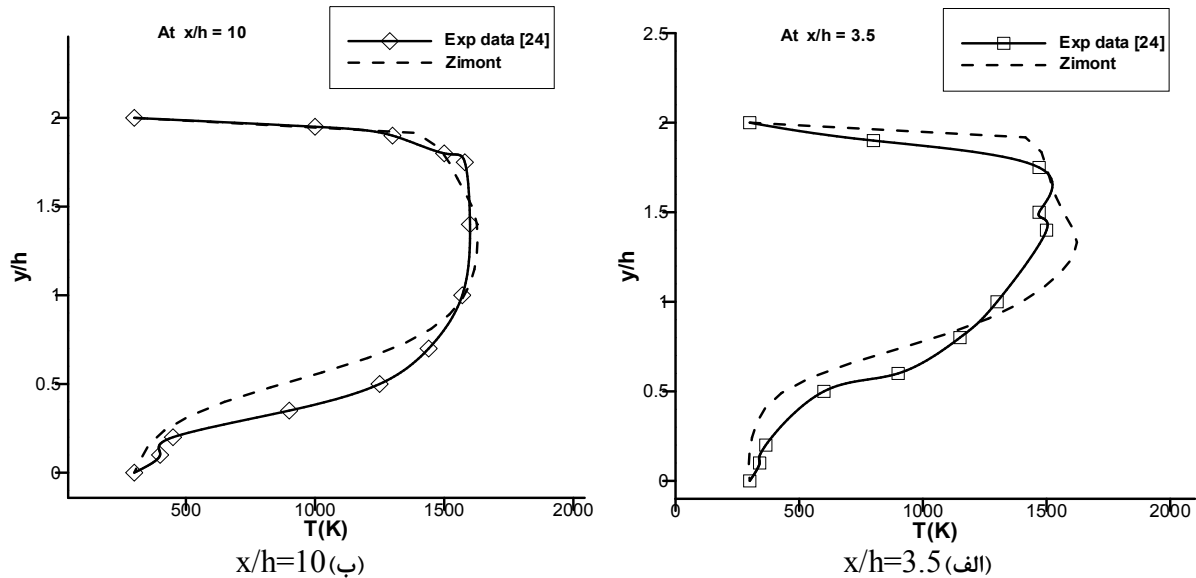
برای بررسی استقلال از شبکه نتایج، تعداد سلول‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفت که تعداد المان‌های آنها عبارتند از ۳۱۱۷، ۷۳۷۴، ۱۰۳۶۳، ۱۳۸۶۵ و ۱۸۲۸۶. نتایج حاصل از این بررسی برای مؤلفه سرعت افقی در شکل (۲) به نمایش گذاشته شده است. با توجه به این شکل، نتایج حاصل از تعداد سلول‌های ۱۳۸۶۵ و ۱۸۲۸۶ روی هم منطبق شده‌اند. بنابراین برای این مطالعه شبکه دارای ۱۳۸۶۵ المان برای هردو مدل مناسب تشخیص داده‌شد. لازم به ذکر است که شکل (۲) نتایج را برای مدل زی‌مونت نشان می‌دهد.



شکل ۲ - نتایج مدل زی‌مونت: مؤلفه سرعت افقی در موقعیت‌های عرضی متفاوت: بررسی استقلال از شبکه

## ۵- نتایج و بحث

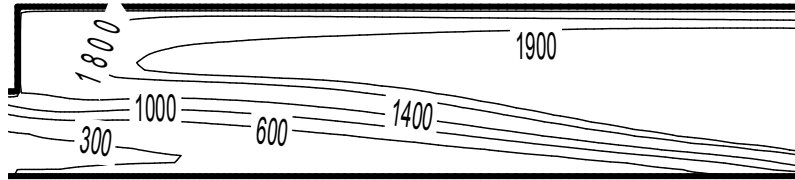
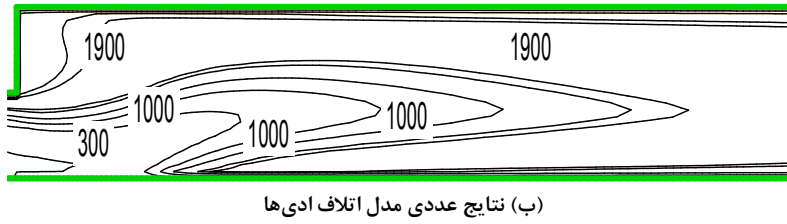
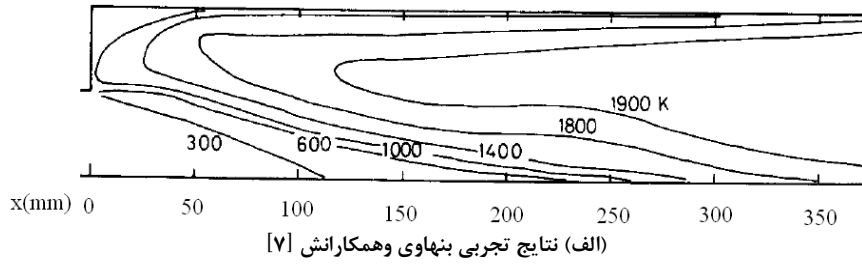
شکل (۳) تغییرات دما با افزایش ارتفاع را در نسبت هم‌ارزی ۰/۷۷ نشان می‌دهد. در این شکل نتایج تجربی با نتایج عددی حاصل از به کارگیری مدل زیمونت مقایسه شده است. مدل زیمونت بازه دمایی را بطور قابل قبولی پیش‌بینی کرده است. این مدل در نیمه بالایی محفظه پیش‌بینی خوبی از مقدار دما دارد و در نیمه پایینی، دمای پیش‌بینی شده کمتر از مقدار واقعی آن است.



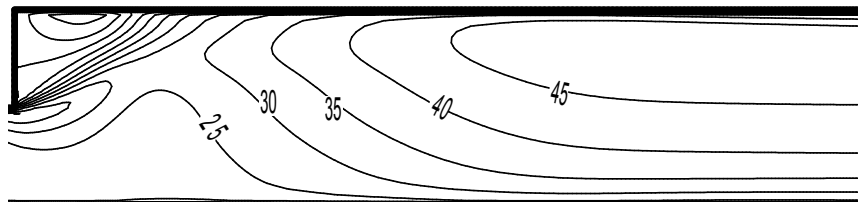
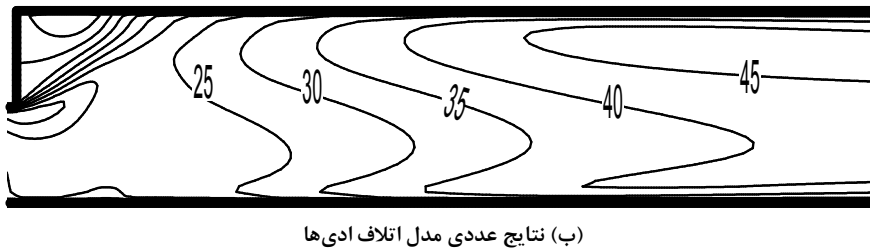
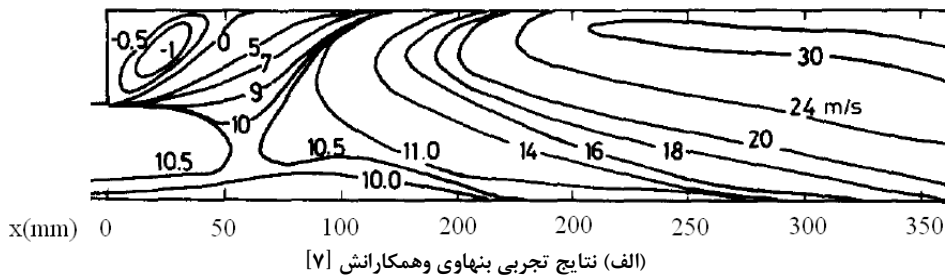
شکل ۳- نتایج مدل زیمونت: نمودار تغییرات دما در موقعیت های عرضی متفاوت

شکل (۴) میدان دمای داخل محفظه را در نسبت هم‌ارزی ۰/۹، بصورت خطوط هم‌دما نشان می‌دهد. خطوط هم‌دما حاصل از کار تجربی در شکل ۴-الف دیده می‌شود و شکل‌های ۴-ب و ۴-ج نتایج عددی خطوط هم‌دما را به ترتیب با به کارگیری مدل‌های اتلاف ادی‌ها و زیمونت به نمایش می‌گذارند. با مقایسه این نمودارها، می‌توان نتیجه گرفت به کارگیری مدل زیمونت سازگاری بهتری با نتایج تجربی دارد. عدم تطابق نتایج مدل اتلاف ادی‌ها می‌تواند ناشی از پیش‌بینی نادرست مکان شعله باشد. با توجه به خطوط هم‌دما بدست آمده از مدل اتلاف ادی‌ها، جریان ورودی پس از اشتعال به سمت بالا منحرف می‌شود که در واقعیت اینگونه نمی‌باشد. شکل (۴) نشان می‌دهد نتایج مدل زیمونت تا حدود زیادی با واقعیت مطابقت دارد و در مقابل مدل اتلاف ادی‌ها علارغم نشان دادن بازه دمایی صحیح، توانایی کمتری در پیش‌بینی رفتار خطوط هم‌دما دارد. مدل زیمونت تراکم خطوط هم‌دما را در قسمت پایین کانال به خوبی نشان می‌دهد و همچنین کشیدگی خطوط هم‌دما در قسمت بالای کانال، بخوبی توسط این مدل شبیه‌سازی شده است.

میدان مولفه افقی سرعت در شکل (۵) به نمایش گذاشته شده است. شکل‌های ۵-الف، ب و ج به ترتیب سرعت افقی را برای نتایج تجربی، نتایج عددی حاصل از به کارگیری مدل اتلاف ادی‌ها و مدل زیمونت نشان می‌دهند. به کارگیری مدل‌های اتلاف ادی‌ها و زیمونت، افزایش ناگهانی مؤلفه افقی سرعت در نیمه پایینی محفظه با افزایش فاصله از دیواره پایینی را به دنبال دارد. هر دو مدل ناحیه‌های چرخشی نیمه بالایی محفظه را به خوبی پیش‌بینی می‌کنند و هر دو اندازه سرعت را به طور کلی ۵۰٪ بیشتر از داده‌های تجربی پیش‌بینی می‌کند. نتایج میدان سرعت و دما نشان می‌دهند که در روش اتلاف ادی‌ها نرخ تغییرات بیش از حد زیاد است و این تغییرات شدید در میدان جریان واکنش، ناشی از زیاد بودن نرخ واکنش است [۳].



شکل ۴ - خطوط هم‌دما در نسبت هم-ارزی ۰/۹۵



شکل ۵ - پیش‌بینی مؤلفه افقی سرعت در نسبت هم-ارزی ۰/۹۵



### ۶- نتیجه گیری

در این مطالعه مدلسازی احتراق پیش‌آمیخته آشفته مخلوط هوا و متان در یک کانال دارای انبساط ناگهانی انجام شد. مقایسه نتایج عددی، با به کارگیری دو مدل مختلف شبیه‌سازی احتراق، با نتایج تجربی بنه‌اوی و همکارانش [۷] مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل‌های استفاده شده در این بررسی، مدل اتلاف ادی‌ها و مدل غیرآدیاباتیکی زیمونت بود. برای شبیه‌سازی از بسته نرم‌افزاری FLUENT که مبتنی بر روش حجم محدود در مرکز سلول است استفاده شد. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که به کارگیری مدل زیمونت نتایج میدان دمایی را نزدیکتر به مقدار واقعی نشان می‌دهد و در مقابل روش اتلاف ادی‌ها علاوه بر نشان دادن بازه دمایی صحیح، توانایی کمتری در پیش‌بینی رفتار خطوط همدمما دارد. هر دو مدل اتلاف ادی‌ها و زیمونت در پیش‌بینی میدان افقی سرعت تا ۵۰٪ دارای خطا هستند ولی هر دو مدل ناحیه‌های چرخشی ایجاد شده در نیمه بالایی محفظه را به خوبی پیش‌بینی می‌کنند.

### مراجع

- 1- Spalding, D.B., "Theory, measurement and application: B. E. Launder, Ed., Studies in Convection ", Combustion and Flame, Vol. 34, p 107, 1979.
- 2- Said, R., Garo, A. and Borghi, R., "Soot formation modeling for turbulent flames", Combustion and Flame, Vol. 108, Issues 1-2, pp 71-86, 1997.
- 3- Magnussen, B. F. and Mjertager, B. H., "The Eddy Dissipation Concept for turbulent combustion", 16th Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp 719-727, 1976.
- 4- Zimont, V., Polifke, W., Bettelini, M. and Weisenstein, W., "An Efficient Computational Model for Premixed Turbulent Combustion at High Reynolds Numbers Based on a Turbulent Flame Speed Closure", ASME J. Eng. Gas Turb. & Power, Vol. 120, pp 526-532, 1998.
- 5- Dinkelacker, F., Holzler, S., "Studies with a Turbulent-Flame-Speed-Closure Model for Premixed Turbulent Flame Calculations", Combustion science and technology, Vol. 158, pp 321-340, 2000.
- 6- Yilmaz, B., Ozdogan, S. and I. Gokalp, "A numerical study on flame front characteristics of conical turbulent lean premixed methane/air flames", Energy & Fuels, Vol. 23, pp 1843-1848, 2008.
- 7- Banhaway, Y. EL, Sivasegaram, S. and Whitelaw, J. H., "Premixed, turbulent combustion of a sudden-expansion flow", Combust. Flame, Vol. 50, pp 153-165, 1983.
- 8- FLUENT User's Manual, Version 6.3.26, 2006.