



mct.cdsts

www.mct.cdsts.ir

ارزیابی قابلیت اعتماد شبیه‌سازی قطعی متناوب در یک محفظه احتراق مدل توربین گاز هوایی با احتراق هیدروژن خالص

فرزاد بازددیدی طهرانی^{۱*}

محمدصدرا علی‌خانی^۲

علی کوثری نژاد^۳

۱- استاد، آزمایشگاه تحقیقاتی انتقال حرارت، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

bazdidi@iust.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، آزمایشگاه تحقیقاتی انتقال حرارت، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

mo_alikhani@mecheng.iust.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری، آزمایشگاه تحقیقاتی انتقال حرارت، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

ali_kosarinezhad@mecheng.iust.ac.ir

خلاصه

در مقاله حاضر، قابلیت اعتماد شبیه‌سازی قطعی متناوب در یک محفظه احتراق اتمسفریک توربین گاز هوایی با جریان واکنشی چرخشی آشفته و سوخت هیدروژن خالص ارزیابی شده است. برای اعتبارسنجی اولیه، نتایج عددی با داده‌های تجربی- عددی گاورد و همکاران مقایسه شد. سپس با اجرای شبیه‌سازی‌های احتراقی آشفته نشان داده شد که در این محفظه، حل مبتنی بر تعادل شیمیایی و حل فلیملت اختلاف قابل توجهی نداشته و هر دو رویکرد معتبر هستند. در ادامه، دو روش متفاوت برای ایجاد مدل قطعی ارائه شد که نتایج بیانگر تأثیر مستقیم روش برش بر میدان جریان و واکنش بودند. برای هر رویکرد، قطاع‌های ۱۸۰، ۱۲۰ و ۶۰ درجه استخراج و نتایج آنها با حل کامل مقایسه شد. تحلیل‌ها نشان داد زاویه مناسب قطاع به هندسه محفظه وابسته است. اهمیت تحقیق حاضر با توجه به به‌کارگیری روزافزون هیدروژن به عنوان سوخت پاک و رفتار متمایز آن در احتراق پررنگ است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که استفاده صحیح از مدل قطعی می‌تواند هزینه محاسباتی شبیه‌سازی‌های پیچیده احتراق را به‌طور چشمگیری کاهش دهد و در کاربردهایی نظیر بهینه‌سازی مبتنی بر شبکه‌های عصبی بسیار ارزشمند است.

کلیدواژگان: سوخت هیدروژن، دینامیک سیالات محاسباتی، محفظه احتراق توربین گاز، جریان واکنشی آشفته، شرط مرزی متناوب



mct.cdsts

www.mct.cdsts.ir

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، افزایش تقاضای توربین‌های گاز و الزام کاهش آلاینده‌ها، پژوهش‌ها را به سمت استفاده از سوخت‌های پاک، به‌ویژه هیدروژن، سوق داده است. هیدروژن به‌عنوان سوخت پاک آینده، در دستیابی به هدف کربن صفر تا سال ۲۰۵۰ نقش کلیدی دارد و صنعت توربین گاز متعهد به توسعه سامانه‌های تمام‌هیدروژنی تا سال ۲۰۳۰ شده است [1].

مطالعات مروری اخیر نشان می‌دهند که استفاده از هیدروژن در توربین‌های گازی می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد و به توسعه سیستم‌های با اثرات زیست‌محیطی کمتر کمک نماید. با این حال، ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی خاص هیدروژن از جمله سرعت بالای شعله، محدوده اشتعال وسیع و حساسیت به شرایط مخلوط‌شدن، موجب بروز چالش‌های جدید در طراحی و پیش‌بینی عملکرد محفظه‌های احتراق می‌شود [2].

در زمینه‌ی شبیه‌سازی عددی محفظه‌های احتراق، مدل‌سازی کامل سه‌بعدی جریان واکنشی و آشفته در محفظه‌های احتراق توربین گاز یکی از پیچیده‌ترین مسائل مهندسی محسوب می‌شود، زیرا باید تعاملات میان توربولانس، انتقال حرارت، واکنش‌های شیمیایی و پدیده‌های انتقال حرارت با دقت بالا حل شوند. برای کاهش هزینه‌های محاسباتی، بسیاری از پژوهش‌ها از تقارن هندسی و مرزهای تناوبی^۱ استفاده می‌کنند، به طوری که تنها یک قطاع^۲ از محفظه شبیه‌سازی شده و به کمک شرایط مرزی تناوبی به‌عنوان معرف کل حلقه به‌کار می‌رود [3].

در میان پژوهش‌های عددی محفظه احتراق، مطالعات زیادی به بررسی احتراق در شرایط مختلف پرداخته‌اند، اما بیشتر آن‌ها بر جریان‌های متعارف با سوخت‌های هیدروکربنی تمرکز دارند یا از مدل‌های محدود بهره می‌برند. برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از قطاع‌ها با مرزهای تناوبی می‌تواند رفتار آیرودینامیک پایه را بازتولید کند، اما اثر زاویه‌ی قطاع و نحوه‌ی پیاده‌سازی مرزهای تناوبی بر دقت پیش‌بینی میدان‌های جریان پیچیده در محفظه‌های احتراق هنوز به‌طور نظام‌مند بررسی نشده است؛ این موضوع در مطالعات عددی اخیر بارها مورد توجه قرار گرفته اما غالباً برای سوخت‌های مرسوم هیدروکربنی یا در شرایط ساده شده انجام شده است [3].

ایلباس^۳ و همکاران [4] در سال ۲۰۲۱ به بررسی احتراق کروسین غنی شده با هیدروژن در یک محفظه احتراق توربین گاز از نوع حلقوی پرداخته‌اند. این نوع محفظه احتراق به‌صورت طبیعی از چندین تکرار قطاعی تشکیل می‌شود. نویسندگان برای مدل‌سازی این سیستم، از حل قطاعی بهره برده‌اند. به این معنا که به‌جای شبیه‌سازی کل محفظه‌ی حلقوی، تنها یک بخش تکرارشونده شامل ورودی‌های مرتبط با کروسین، هیدروژن، هوای چرخاننده‌ها^۴، ورودی اولیه،

¹ Rotational Periodic Boundary Condition² Sector³ Ilbas⁴ Swirlers



ثانویه و رقیق‌کننده مدل شده است. این روش با کاهش حجم محاسبات، امکان بررسی جزئیات تعامل شعله، نرخ واکنش، توزیع دما و تولید NOx را تحت شرایط مختلف غنی‌سازی هیدروژن و کاهش درصد اکسیژن فراهم می‌کند. در این مقاله همچنان هندسه‌ی کامل یک بخش از مجموعه محفظه احتراق شامل ساختمان کامل چرخاننده‌ها و ورودی‌های خنک‌کننده حل شده است و صرفاً هندسه تکرار شونده‌ی کل مجموعه حلقوی محفظه احتراق به شکل قطاع در آمده است. کامریتی^۵ و همکاران [5] در سال ۲۰۲۵ به بررسی عملکرد احتراق و انتشار آلاینده‌ها در محفظه احتراق یک توربوفن واقعی با سوخت هیدروژن در مقایسه با سوخت مرسوم JET-A پرداختند. به دلیل تقارن ۳۰ نازل سوخت در اطراف محفظه، محققان دامنه محاسباتی را به یک قطاع ۱۲ درجه‌ای محدود کردند تا هم هزینه محاسباتی کاهش یابد و هم ماهیت تکرارشونده‌ی جریان و واکنش در کل محفظه حفظ شود. البته این پژوهش نیز سائز اکثر موارد شبیه‌سازی قطاعی محفظه احتراق سوخت هیدروژن، شامل قطاعی از یک محفظه حلقه‌ای سرتاسری می‌باشد. به عبارتی اجزاء اصلی خود محفظه به شکل قطاع در نیامده است و صرفاً تکرارشوندگی میان سلول‌های یک محفظه کامل مد نظر بوده است.

۲. معادلات حاکم

معادلات بقای جرم، مومنتوم و اسکالره‌ای مختلف (نظیر انرژی و اجزای شیمیایی)، چهارچوب اصلی تحلیل جریان‌های واکنشی و آشفته را تشکیل می‌دهند. در این بخش، معادلات (۱) تا (۳) به ترتیب بیانگر بقای جرم، مومنتوم و اسکالر هستند، [6]: [7]

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = \dot{S}_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + F_i \quad (2)$$

معادله (۲) نشان‌دهنده‌ی بقای مومنتوم خطی در است. در این معادله، u_i مؤلفه‌ی سرعت در راستای i -ام، p فشار، و μ ویسکوزیته دینامیکی سیال را نمایش می‌دهد. جمله‌ی F_i معرف نیروی برهم‌کنش میان فاز پیوسته و فاز گسسته است.

$$\frac{\partial (\rho u_j \psi_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \alpha_i \frac{\partial \psi_i}{\partial x_j} \right) + \rho \dot{\omega}_i + S_{\psi_i} + \dot{S} \quad (3)$$

رابطه‌ی (۳) نیز بقای اسکالره‌ای عمومی مانند کسر جرمی گونه‌ها، انرژی، یا آنتالپی را بیان می‌کند. در این معادله، ψ_i نشان‌دهنده‌ی متغیر اسکالر مورد نظر و α_i ضریب نفوذ یا ضریب اختلاط توربولانسی متناظر با آن است. جمله‌ی $\rho \dot{\omega}_i$ بیانگر

⁵ Cameretti

نرخ تولید یا مصرف جزء i در اثر واکنش‌های شیمیایی است. همچنین، S_{ψ_i} به عنوان چشمه‌ی^۶ یا چاه^۷ اسکالر ناشی از حضور فاز گسسته در نظر گرفته می‌شود.

با اعمال تفکیک رینولدز در معادلات ناویر-استوکس لحظه‌ای و میانگین‌گیری، معادلات پیوستگی و مومنتوم میانگین‌شده به صورت زیر حاصل می‌شود [8]:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_j) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\tau}_{ij} - \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j] + \bar{\rho} f_i. \quad (5)$$

در این معادله $\bar{\tau}_{ij}$ تنش لزج میانگین و جمله‌ی اضافی $-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j$ تانسور تنش رینولدز است که از میانگین‌گیری جمله‌ی همرفت حاصل می‌شود [9].

مدل $k-\varepsilon$ قابل تحقق^۸ که نخستین بار توسط Shih و همکاران [10] در سال ۱۹۹۵ معرفی شد، ساختار دو معادله‌ای خود را حفظ می‌کند اما معادله‌ی ε و رابطه‌ی لزجت آشفته را اصلاح می‌کند تا قیود ریاضی موسوم به *realizability* برای تنش‌های رینولدز برقرار شوند.

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon, \quad (6)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S \varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}}, \quad (7)$$

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \text{ و } P_k = \mu_t S^2 \text{ که در آن}$$

قانون ساترلند^۹

قانون ساترلند یک رابطه نیمه تجربی است که ریشه در نظریه جنبشی گازها دارد. این قانون وابستگی ویسکوزیته دینامیکی μ را به دمای مطلق T مدل‌سازی می‌کند و علاوه بر آن، اثرات تقریبی جاذبه بین‌مولکولی را نیز در نظر می‌گیرد. فرم استاندارد قانون ساترلند به شکل زیر است [11], [12]:

$$\mu(T) = \mu_{\text{ref}} \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^{3/2} \frac{T_{\text{ref}} + S}{T + S} \quad (8)$$

در این رابطه، $\mu(T)$ ویسکوزیته دینامیکی در دمای مطلق T است، μ_{ref} ویسکوزیته مرجع در دمای T_{ref} بوده و T_{ref} دمای مرجع را نشان می‌دهد؛ همچنین S ثابت ساترلند (یا دمای مؤثر) است که گاهی با T_S نیز نمایش داده می‌شود.

⁶ Source

⁷ Sink

⁸ Realizable

⁹ Sutherland's Law

مدل جهت‌های گسسته (DOM)^{۱۰} در انتقال حرارت تشعشعی

در یک محفظه احتراق با دمای بالا، انتقال حرارت تشعشعی بخش قابل توجهی (و گاه غالب) از انتقال حرارت کلی را تشکیل می‌دهد. رفتار تشعشعی یک محیط مشارکت‌کننده^{۱۱} توسط معادله انتقال تشعشع^{۱۲} توصیف می‌شود. معادله انتقال تشعشع یک معادله دیفرانسیلی-انتگرالی است که هم وابسته به مکان و هم به جهت و طول موج (یا فرکانس) می‌باشد. معادله انتقال تشعشعی در جهت بردار $\vec{s}$ و مکان $\vec{r}$ به صورت زیر بیان می‌شود [13]:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} = \kappa(\vec{r})I_b(\vec{r}) - [\kappa(\vec{r}) + \sigma_s(\vec{r})]I(\vec{r}, \vec{s}) + \frac{\sigma_s(\vec{r})}{4\pi} \int_{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}')\Phi(\vec{s}' \rightarrow \vec{s})d\Omega' \quad (9)$$

که در آن $I(\vec{r}, \vec{s})$ شدت تشعشع در راستای $\vec{s}$ است، κ ضریب جذب، σ_s ضریب پراکندگی و I_b شدت تشعشع جسم سیاه در دمای محلی را نشان می‌دهند؛ همچنین $\Phi(\vec{s}' \rightarrow \vec{s})$ تابع فاز پراکندگی است.

در مدل جهت‌های گسسته، کره‌ی واحد به تعداد محدودی جهات مجزا تقسیم می‌شود (N_Ω) و معادله فوق برای هر جهت حل می‌شود. به صورت عددی، انتگرال زاویه‌ای به مجموع گسسته‌ای از ضرایب وزنی w_n و جهت‌های $\vec{s}_n$ تبدیل می‌شود:

$$\frac{dI_n}{ds} = \kappa(I_b - I_n) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \sum_{m=1}^{N_\Omega} I_m \Phi(\vec{s}_m \rightarrow \vec{s}_n)w_m \quad (10)$$

گرمای تشعشعی خالص جذب‌شده در هر نقطه از میدان دما از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\nabla \cdot \vec{q}_r = \int_{4\pi} [\kappa I_b - \kappa I(\vec{s})]d\Omega \approx \sum_{n=1}^{N_\Omega} w_n [\kappa I_b - \kappa I_n] \quad (11)$$

در این رابطه، κ_λ و σ_λ به ترتیب ضرایب جذب و پراکندگی هستند، I_b شدت تابش جسم سیاه، و Φ تابع فاز پراکندگی است.

مدل مجموع وزن‌دار گازهای خاکستری (WSGGM)^{۱۳}

در یک محیط گازی، معادله انتقال تشعشع تک‌فام در راستای جهت s به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{dI_v(x, s)}{ds} = -\kappa_v(x)I_v(x, s) + \kappa_v(x)I_v^b(T(x)) \quad (12)$$

که در آن I_v شدت طیفی تابش بر حسب $[W/m^2 sr Hz^{-1}]$ ، κ_v ضریب جذب طیفی بر حسب $[m^{-1}]$ و $I_v^b(T)$ شدت تابش جسم سیاه در دمای T است.

از معادله معادله انتقال تشعشع، چشمه حرارتی تابشی (بر واحد حجم) که در معادله انرژی ظاهر می‌شود، به صورت زیر حاصل می‌شود [14]:

$$\dot{q}_{rad} = \nabla \cdot \vec{q}_r = 4\pi\bar{\kappa}(T, composition)[I_b(T) - G] \quad (13)$$

¹⁰ Discrete Ordinates Method - DOM

¹¹ Participating medium

¹² Radiative Transfer Equation - RTE

¹³ Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model - WSGGM

در این رابطه، $I_b(T) = \sigma T^4 / \pi$ شدت تابشی جسم سیاه، $G = \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} I(s) d\Omega$ تابش ورودی^{۱۴} و $\bar{k}$ ضریب جذب میانگین طیفی است. در حل‌گرهای دینامیک سیالات محاسباتی، معادله انتقال تشعشع برای مجموعه‌ای محدود از جهات (مانند مدل DOM) حل شده و $\dot{q}_{rad}$ از نتایج زاویه‌ای محاسبه می‌شود [14].

مدلسازی احتراق (جریان واکنشی)

نرخ واکنش که در جمله مبدأ معادله انتقال کسر جرمی گونه‌ها ظاهر می‌شود، توسط یکی از مدل‌های احتراقی مدل‌سازی می‌گردد. فرآیند احتراق از منظر سینتیکی به سه دسته کلی پیش‌آمیخته^{۱۵}، غیرپیش‌آمیخته^{۱۶} و نیمه‌پیش‌آمیخته^{۱۷} تقسیم‌بندی می‌شود که هر یک دارای مدل احتراقی ویژه‌ای هستند. در این مقاله، احتراق از نوع نیمه‌پیش‌آمیخته مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور، از دو مدل شعله‌ای تعادل شیمیایی^{۱۸} و فلیملت پایا^{۱۹} استفاده می‌شود. در رژیم نیمه‌پیش‌آمیخته، سوخت و اکسیدکننده نه کاملاً پیش از احتراق با هم مخلوط شده‌اند و نه کاملاً مجزا هستند، بلکه در عوض از درجاتی از لایه‌بندی و آمیختگی برخوردارند که بر انتشار شعله، آزادسازی گرما، تشکیل آلاینده‌ها و برهم‌کنش‌های آشفته‌گی-شیمی تأثیر می‌گذارد [15].

معادله انتقال متغیر پیشرفت^{۲۰} (معادله C)^{۲۱}

رویکردی رایج و کارآمد برای مدل‌سازی جریان‌های نیمه‌پیش‌آمیخته، معرفی اسکالر پیشرفت واکنش C است. این متغیر معمولاً به صورت ترکیب خطی از کسر جرمی محصولات یا دمای نرمال‌سازی شده تعریف می‌شود. در این تعریف، $C = 0$ متناظر با مخلوط تازه (سوخت و اکسیدکننده‌ی نسوخته) و $C = 1$ معرف محصولات احتراق یا حالت نهایی نرمال‌شده است [16]. معادله‌ی انتقال میانگین فاور^{۲۲} متغیر $\tilde{C}$ در جریان‌های تراکم‌پذیر به صورت زیر بیان می‌شود [17], [18]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{C}) + \nabla \cdot (\bar{\rho}\tilde{u}\tilde{C}) = \nabla \cdot (\bar{\rho}D_c\nabla\tilde{C}) + \bar{\rho}\tilde{\omega}_c - \nabla \cdot (\bar{\rho}\tilde{u}''c'') \quad (14)$$

که در آن ρ چگالی میانگین، $\tilde{u}$ سرعت میانگین فاور، D_c ضریب نفوذ مؤثر (مولکولی یا آشفته) متغیر پیشرفت، و $\tilde{\omega}_c$ نرخ میانگین یا فیلترشده‌ی تولید (یا مصرف) شیمیایی متغیر C هستند؛ همچنین جمله‌ی $\nabla \cdot (\bar{\rho}\tilde{u}''c'')$ بیانگر شار آشفته‌ی متغیر پیشرفت است که معمولاً با مدل‌های نفوذی گرادیانی یا مدل‌های پیشرفته‌تر مدل‌سازی می‌شود.

¹⁴ Irradiation

¹⁵ Premixed

¹⁶ Non-Premixed

¹⁷ Partially Premixed

¹⁸ Chemical Equilibrium

¹⁹ Steady Diffusion Flamelet

²⁰ Progress Variable Transport Equation

²¹ C - Equation

²² Favre-Averaged

یکی از چالش‌های اصلی در مدل‌سازی، بستن ترم منبع شیمیایی $\bar{\rho}\tilde{\omega}_c$ است. در احتراق پیش‌مخلوط و نیمه‌پیش‌مخلوط، این نرخ معمولاً با استفاده از مفهوم چگالی سطح شعله^{۲۳} و سرعت احتراق آشفته^{۲۴} بیان می‌شود. این فرمولاسیون پیوندی مستقیم بین فرآیند شیمیایی و ویژگی هندسی شعله برقرار می‌کند و هسته اصلی مدل‌های RANS در احتراق نیمه‌پیش‌آمیخته محسوب می‌شود [17]:

$$\bar{\rho}\tilde{\omega}_c = \bar{\rho}_u S_T \bar{\Sigma} \quad (15)$$

که در آن $\bar{\rho}_u$ چگالی گاز نسوخته، S_T سرعت احتراق آشفته، و $\bar{\Sigma}$ چگالی میانگین سطح شعله است که معمولاً به صورت $\bar{\Sigma} \approx |\nabla \tilde{c}|$ مدل می‌شود.

مدل زیمونت^{۲۵}

مدل زیمونت با ساده‌سازی واکنش‌های شیمیایی، فرایند احتراق را به یک معادله‌ی انتقال برای متغیر پیشرفت واکنش c تقلیل می‌دهد و ترم منبع آن را از طریق تعریف سرعت سوختن (یا سرعت شعله) آشفته S_T مدل‌سازی می‌کند. زیمونت ترم منبع را به‌صورت هندسی، یعنی حاصل ضرب بین سطح متوسط جبهه‌ی شعله و سرعت مصرف سوخت، می‌نویسد [19]:

$$\bar{\rho}\tilde{\omega}_c = \bar{\rho}_u S_T \bar{\Sigma} \approx \bar{\rho}_u S_T |\nabla \tilde{c}| \quad (16)$$

هدف اصلی در مدل زیمونت، تعیین سرعت شعله آشفته S_T به‌عنوان تابعی از ویژگی‌های محلی آشفستگی و واکنش شیمیایی است. بر این اساس، سرعت شعله آشفته به‌صورت نسبی با سرعت شعله آرام S_L بیان می‌شود [20]:

$$\frac{S_T}{S_L} = 1 + \Phi(\text{turbulence, chemistry}) \quad (17)$$

که در آن Φ تابعی از اعداد بدون بعدی نظیر عدد رینولدز (Re)، عدد دامکوهلر (Da)، عدد پرانتل (Pr) و کمیت‌های معادل آن‌ها مانند شدت آشفستگی u' ، مقیاس انتگرالی l_t و ضخامت شعله آرام δ_L است.

مدل فلیملت نفوذی پایا^{۲۶}

مفهوم فلیملت نفوذی پایا، یک شعله‌ی آشفته‌ی غیرپیش‌آمیخته یا نیمه‌پیش‌آمیخته را به‌صورت مجموعه‌ای از ساختارهای شعله‌ی نفوذی آرام نازک (فلیملت‌ها) درون جریان آشفته در نظر می‌گیرد. در این روش دو پارامتر نقش اساسی دارند، کسر اختلاط Z و اتلاف اسکالر در نسبت استوکیومتری.

کسر اختلاط $Z(x, t)$ یک کمیت اسکالر پایستار است که میزان اختلاط موضعی جریان سوخت و اکسیدکننده را نشان می‌دهد (به‌گونه‌ای نرمال‌سازی شده که $Z = 1$ در جریان خالص سوخت و $Z = 0$ در جریان خالص اکسیدکننده باشد). در فرم میانگین فاور، معادله انتقال برای $\tilde{Z}$ به‌صورت زیر است [6]:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{Z})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}\tilde{u}\tilde{Z}) = \nabla \cdot (\bar{\rho}D_{eff}\nabla\tilde{Z}) \quad (18)$$

²³ Flame Surface Density - FSD

²⁴ Turbulent Burning Velocity

²⁵ Zimont

²⁶ Steady Diffusion Flamelet

مدل تعادل شیمیایی^{۲۷}

مدل تعادل شیمیایی در چارچوب احتراق نیمه‌پیش‌آمیخته شعله را با این فرض مدل‌سازی می‌کند که مقیاس‌های زمانی واکنش‌های شیمیایی نسبت به اختلاط آشفته به‌طور بی‌نهایت سریع هستند. تحت این فرض نیازی به حل معادلات سینتیک شیمیایی با نرخ محدود^{۲۸} برای گونه‌های اصلی نیست [6]. در این مدل غلظت‌ها از طریق کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس^{۲۹} محاسبه می‌شود.

همانطور که بیان شد، کسر مخلوط Z به‌عنوان یک اسکالر پایستار، فرایند اختلاط محلی بین جریان سوخت و اکسیدکننده را نمایش می‌دهد [6]. این فرم حاکی از پایسته بودن کسر اختلاط است؛ بنابراین هیچ ترم منبع شیمیایی در آن ظاهر نمی‌شود. واریانس کسر مخلوط Z''^2 برای ساخت جداول PDF به‌کار می‌رود که به کمک آن خواص ترموشیمیایی میانگین‌گیری شده‌ی فلور از جداول تعادلی استخراج می‌شوند [21]:

$$\frac{\partial(\rho Z''^2)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u Z''^2) = \nabla \cdot (\rho D_{\text{eff}} \nabla Z''^2) - C_X \rho \frac{\varepsilon}{k} Z''^2 + 2\rho D_{\text{eff}} |\nabla Z|^2 \quad (19)$$

این معادله انتقال و اتلاف نوسانات کسر اختلاط را مدل‌سازی می‌کند. در مدل تعادل شیمیایی، برای مخلوطی شامل N گونه‌ی شیمیایی متشکل از E عنصر، حالت تعادلی با کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس و رعایت قیود بقای جرم عنصری تعیین می‌شود. این قیود تضمین می‌کنند که ترکیب تعادلی با ساختار اتمی ناشی از سوخت و اکسیدکننده سازگار باشد [22]:

$$\sum_{k=1}^N a_{k,e} Y_k = B_e, \quad e = 1, \dots, E \quad (20)$$

که در آن $a_{k,e}$ تعداد اتم‌های عنصر e در گونه‌ی k ، Y_k کسر جرمی گونه‌ی k و B_e کسر جرمی عنصر e هستند. این روابط فضای شیمیایی مجاز را که سیستم می‌تواند در آن به تعادل برسد تعریف می‌کنند. حالت تعادل شیمیایی با کمینه کردن انرژی آزاد گیبس کل مخلوط در فشار و دمای ثابت به‌دست می‌آید [22]:

$$G(T, P, Y_1, \dots, Y_N) = \sum_{k=1}^N n_k g_k(T, P) \quad (21)$$

شرط لازم برای تعادل آن است که پتانسیل‌های شیمیایی برابر باشند [22]:

$$\left(\frac{\partial G}{\partial n_k} \right)_{T, P, n_{j \neq k}} = \mu_k = 0 \quad (22)$$

مکانیزم Nox حرارتی

²⁷ Chemical Equilibrium

²⁸ Finite Rate

²⁹ Gibbs free energy

در احتراق یک سوخت پاک (سوختی که مؤلفه نیتروژن نداشته باشد) با هوا، باز هم NOx تولید می‌گردد. زلدوویچ^{۳۰} واکنش اصلی برای تشکیل NO را به صورت روابط زیر ارائه داده است [22], [23]:



لاویه پیشنهاد داده است که مکانیزم زلدوویچ را می‌توان به صورت واکنش پیشرونده‌ای که می‌تواند به تولید NO کمک کند، بسط داد [22]:



زلدوویچ و همکاران [23] اشاره کرده‌اند که تشکیل اکسید نیتروژن فقط به دمای شعله بالا بستگی دارد و مستقیماً با واکنش احتراق مرتبط نیست. از طرفی نرخ تشکیل NO بسیار کوچک‌تر از نرخ احتراق است و تشکیل NO بعد از احتراق کامل می‌شود. بنابراین فرآیند می‌تواند به صورت یک واکنش احتراق تعادلی و با فرض واکنش احتراق اجزاء حل گردد. در حقیقت بر پایه محدودیت نرخ k_{f1} ، نرخ تولید اکسید نیتروژن حرارتی، زمانی که دمای شعله ۲۲۰۰ کلوین باشد، با هر افزایش ۹۰ درجه‌ای دو برابر می‌شود.

۳. محفظه احتراق مدل و شرایط مرزی

در این مقاله، برای اعتبار سنجی نتایج اولیه، از کار آزمایشگاهی گاورت^{۳۱} و همکاران [24] که در تاسیسات بخش تکنولوژی پایشانش مرکز هوافضا آلمان (DLR^{۳۲}) در شهر کلن آلمان انجام شده، استفاده شده است. این مقاله شامل آزمایش تجربی و حل عددی بر روی یک محفظه احتراق مدل توربین گاز هوایی با استفاده از سوخت هیدروژن گازی خالص است. همانطور که در شکل زیر مشخص می‌باشد، این محفظه احتراق مدل دارای یک ورودی چرخشی حلقه مانند از سوخت هیدروژن خالص، یک چرخاننده^{۳۳} ورود هوا در داخل حلقه‌ی ورودی سوخت هیدروژن، و یک چرخاننده ورود هوا در خارج حلقه ورودی سوخت هیدروژن است. بنابراین این محفظه از نوع دو چرخاننده^{۳۴} می‌باشد. همچنین این محفظه احتراق مدل شامل ۶ جت هوای رقیق سازی^{۳۵} در وسط محفظه است که با زاویه مایل ۴۵ درجه‌ای وارد محفظه می‌شوند و ۶ ورودی هوای خنک کننده

³⁰ Zeldovich

³¹ Govert

³² Combustor Department, Institute of Propulsion Technology, German Aerospace Center (DLR), Cologne 51147, Germany

³³ Swirler

³⁴ Double-Swirl Burner

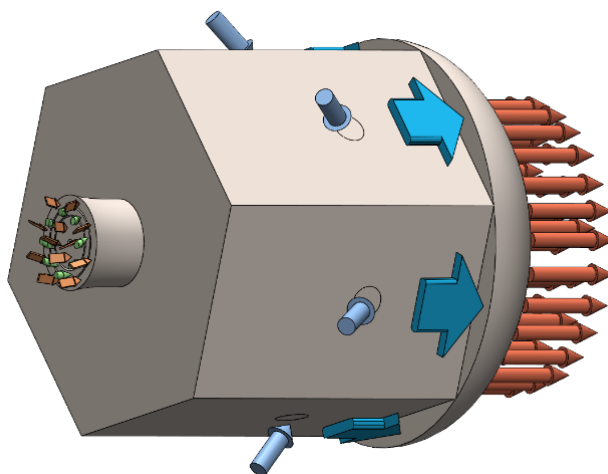
³⁵ Dilution Air Wholes



mct.cdsts

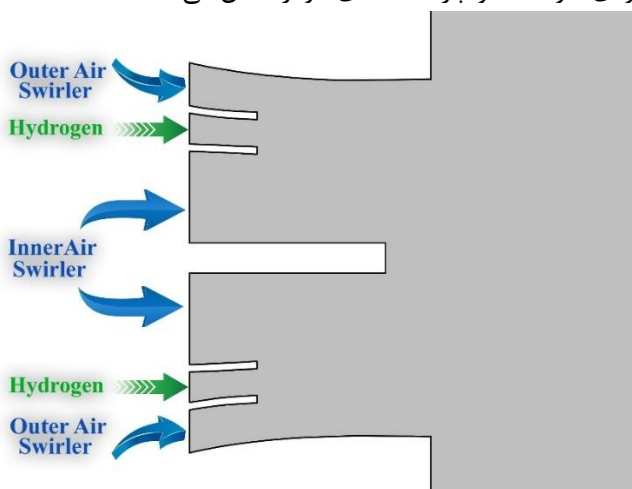
www.mct.cdsts.ir

هم در انتهای محفظه احتراق وجود دارد. حرکت سیال در جهت محور Y یعنی در راستای خروجی محفظه در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: نمایی از هندسه محفظه احتراق مدل

مقطع اصلی محفظه احتراق به شکل ۶ ضلعی با اندازه ضلع ۵۵ میلی‌متر است. طول کل محفظه (به غیر از بخش ورود و مخلوط اولیه سوخت و اکسیدایزر) ۱۰۵ میلی‌متر و طول قسمت شش ضلعی برابر با ۸۵ میلی‌متر است. ۶ عدد ورودی هوای رقیق‌سازی در اضلاع بخش شش ضلعی وجود دارد که قطر هریک ۹ میلی‌متر بوده و هوای اضافه را با زاویه مایل ۴۵ درجه به داخل محفظه منتقل می‌کند. این سوراخ‌های هوای رقیق‌سازی، در وسط هر ضلع قرار دارد و از نظر مکان طولی، در ۵۰ میلی‌متری ابتدای محفظه قرار دارند. قطر مقطع دایره‌ای مربوط به ورودی‌های خنک‌کننده‌ها، ۱۱۰ میلی‌متر و قطر خروجی محفظه احتراق، ۸۴ میلی‌متر است. همچنین حجم کل محفظه احتراق مدل که در این مقاله بررسی شده است، برابر با ۱۰۸ لیتر می‌باشد. همچنین شکل زیر بخش مربوط به ورودی سوخت‌ها و چرخاننده‌های هوا را نشان می‌دهد.



شکل ۲: بخش ورودی سوخت هیدروژن خالص و چرخاننده‌های هوای داخلی و خارجی



mct.cdsts

www.mct.cdsts.ir

دیواره‌های محفظه احتراق مدل از شرط مرزی شار حرارتی برابر با صفر (عایق یا آدیاباتیک^{۳۶}) استفاده شده است. فشار کاری محفظه احتراق برابر با فشار محیط و برابر با ۱ اتمسفر می‌باشد. به عبارتی محفظه احتراق مدل که در این مقاله بررسی شده است، یک محفظه احتراق اتمسفریک است. دمای ورودی سوخت هیدروژن خالص برابر با ۲۹۱.۶ کلوین است. اما هوای ورودی از چرخاننده‌های داخلی و خارجی، پیش‌گرم شده و دمای آنها برابر با ۳۷۶.۲ کلوین است. همچنین دمای هوای ورودی از جت‌های رقیق‌ساز و ورودی هوای خنک‌کننده برابر با ۲۹۱.۶ کلوین می‌باشد.

در این مقاله دبی سوخت هیدروژن، مطابق با سناریوی (A) از پژوهش گاورت و همکاران [24] برابر با ۰.۴۹۸ گرم بر ثانیه است. مجموع دبی هوای ورودی از چرخاننده‌های داخلی و خارجی، برابر با ۱۹ گرم بر ثانیه است. همچنین دبی هوای ورودی هریک از جت‌های رقیق‌ساز برابر با ۲.۹۶ گرم بر ثانیه و در نتیجه مجموع دبی هوای رقیق‌سازی برابر با ۱۷.۷۶ گرم بر ثانیه می‌باشد. همچنین مجموع دبی هوای خنک‌کاری برابر با ۱۲ گرم بر ثانیه است.

۴. روش حل

با توجه به کارهای پیشین محققان، در این شبیه‌سازی از مدل آشفتگی RANS استفاده می‌شود. برای گسسته‌سازی معادلات غیرخطی حاکم بر مسئله از روش حجم محدود^{۳۷} ارائه شده و استاندارد سازی شده توسط پاتانکار^{۳۸} استفاده [25] می‌شود. از منظر زمانی، حل به صورت پایا^{۳۹} انجام شده است. برای اتصال عبارات فشار و سرعت، از الگوریتم Coupled استفاده می‌شود. جزئیات بیشتر در خصوص این الگوریتم و گسسته‌سازی معادلات در مراجع [26]، [7] ذکر شده است. برای شبیه‌سازی از بسته نرم‌افزاری ANSYS Fluent و برای شبکه‌بندی محفظه احتراق مدل از بسته نرم‌افزاری Fluent Meshing استفاده می‌شود. معیار همگرایی برای معادله پیوستگی 10^{-4} و برای معادلات مومنتوم و انرژی و احتراقی 10^{-6} در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی آشفتگی جریان داخل محفظه احتراق از مدل آشفتگی مرسوم در محفظه احتراق توربین گاز Realizable k- ϵ استفاده می‌شود. علت انتخاب این مدل، توانایی بالا در پیش‌بینی جریان‌های پیچیده و رینولدز بالا و هزینه محاسباتی معقول آن می‌باشد [28]، [27]. جهت مدلسازی انتقال حرارت تشعشعی از مدل جهت‌های گسسته^{۴۰}، همراه با مدل طیفی مجموع وزن‌دار گازهای خاکستری^{۴۱}، استفاده می‌شود. برای مدل‌سازی ویسکازیتیه مخلوط گونه‌ها، از مدل ساترلند^{۴۲} استفاده می‌شود. برای مدل‌سازی جریان کنار دیواره، از مدل Menter-Lechner استفاده می‌شود [7]. این مدل، یک مدل تعمیم‌یافته است که بسیاری از معایب مدل‌های لایه مرزی را ندارد و به مقدار Y^+ حساس نمی‌باشد. میانگین پارامتر Y^+ بر روی شروط مرزی دیواره، برابر با ۱.۲۹ است.

³⁶ Adiabatic

³⁷ Finite Volume Method - FVM

³⁸ Patankar

³⁹ Steady State

⁴⁰ Discrete Ordinates Method - DOM

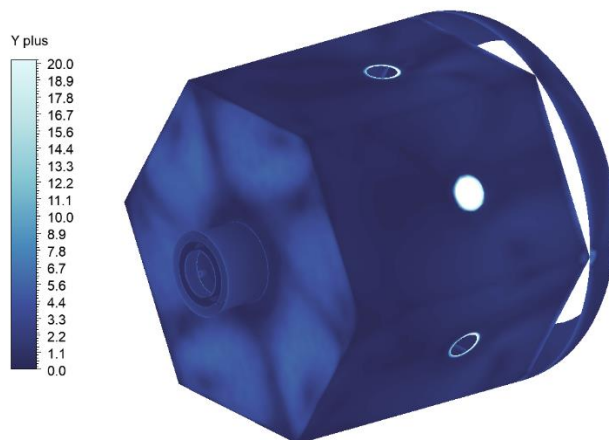
⁴¹ Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model - WSGGM

⁴² Sutherland



mct.cdsts

www.mct.cdsts.ir



شکل ۳: کانتور پارامتر Y_{plus} بر روی دیواره‌ها

محفظه احتراق مدل مذکور در این مقاله، شامل ناحیه‌ای در بخش ورودی سوخت و هوا است که موجب ایجاد پیش آمیختگی جزئی پیش از ورودی سوخت به فضای اصلی احتراق می‌شود. بنابراین به فیزیک مسئله نزدیک تر است که از مدل‌های مربوط به احتراق نیمه‌پیش‌آمیخته^{۴۳} استفاده کنیم. هماهنگی با نتایج تجربی نیز این ادعا را اثبات می‌کند. برای مدل‌سازی پیشرفت واکنش از معادله C^{44} و برای مدل‌سازی سرعت شعله آشفته نیز از مدل زیمونت^{۴۵} استفاده می‌شود.

جهت مدل‌سازی احتراق از مدل احتراقی تعادل شیمیایی^{۴۶} استفاده شده است که دلایل آن به شرح زیر است:

- رویکرد تعادلی به‌طور ویژه برای احتراق آشفته‌ی دمای بالا در توربین‌های گازی، مشعل‌های صنعتی، و پیکربندی‌هایی که در آن‌ها شعله‌های نفوذی غالب هستند مناسب است؛ جایی که ترکیب گونه‌های اصلی و توزیع دما به شرایط تعادلی نزدیک می‌شوند. توصیف‌های بنیادی این حد در نظریه‌ی کلاسیک احتراق و منابع مدرن عددی احتراق ارائه شده است [17].

- مدل‌های فلیملت بر اساس فرض عدد لوئیز برابر با یک^{۴۷} توسعه پیدا کرده اند [29], [30], [7]. این فرض برای احتراق سوخت‌های هیدروکربنی، فرض مناسبی به شمار می‌آید. اما زمانی که از هیدروژن خالص یا درصد‌های قابل توجهی از هیدروژن استفاده می‌کنیم، به دلیل ضریب انتشار جرمی بسیار بالای هیدروژن در مقایسه با سوخت‌های سنگین‌تر، عدد لوئیز از مقدار واحد فاصله گرفته و بسیار کمتر می‌شود [31]. یعنی جرم سریع‌تر از گرما منتشر می‌شود

⁴³ Partially Premixed

⁴⁴ C-Equation

⁴⁵ Zimount

⁴⁶ Chemical Equilibrium

⁴⁷ Unity Lewis Number

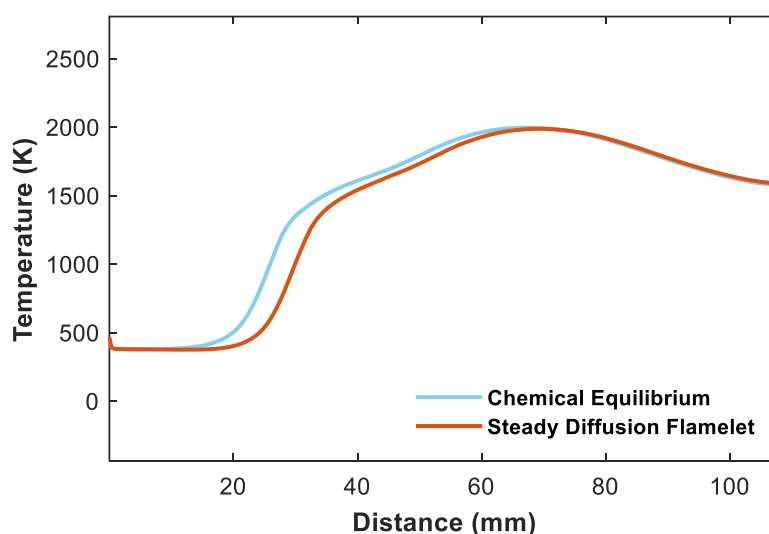
که به آن انتشار ترجیحی^{۴۸} نیز می‌گویند. در چنین شرایطی استفاده از مدل‌های فلیملت می‌تواند موجب وارد شدن خطا در حل مسئله شود.

با وجود این موارد، مقایسه‌ای بین نتایج مدل تعادل شیمیایی و مدل فلیملت نفوذی پایا انجام شده است. برای استفاده از مدل فلیملت نفوذی پایا، از شاخه هیدروژن مکانیزم شیمیایی سن-دیگو^{۴۹} [32] استفاده شد. این مکانیزم شامل ۸۲ گونه شیمیایی و ۱۸۰ واکنش شیمیایی است.

جدول ۱: مقایسه نتایج حل مدل احتراقی تعادل شیمیایی و فلیملت

عامل	مدل تعادل شیمیایی	مدل فلیملت نفوذی پایا
توان حرارتی کل محفظه (KW)	۵۶/۵۰۶	۵۶/۵۱۶
ماکسیمم دمای نقطه‌ای (K)	۲۴۲۰	۲۳۷۰
میانگین وزنی غلظت NOx حرارتی ^{۵۰} در صفحه خروجی (ppm)	۱۱/۱۸۸	۵/۱۱

همچنین نمودار زیر بیانگر مقایسه تغییرات دما بر روی محور طولی محفظه احتراق برای مدل تعادل شیمیایی و مدل فلیملت نفوذی پایا است.



شکل ۴: مقایسه دما در محور طولی محفظه احتراق برای مدل احتراقی تعادل شیمیایی و فلیملت

⁴⁸ Preferential Diffusion

⁴⁹ San Diego Mechanism

⁵⁰ Thermal NOx

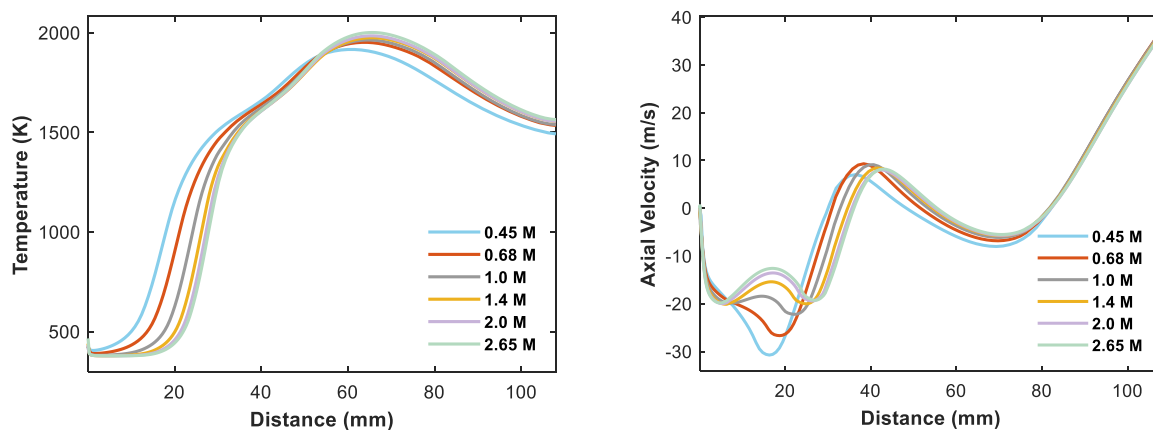
۵. شبکه بندی و استقلال حل از شبکه

جهت تولید شبکه محاسباتی، از بسته نرم افزاری Fluent Meshing استفاده شده است. یکی از مهمترین قابلیت‌های این نرم افزار، توانایی ایجاد شبکه از نوع Poly-Hexcore می‌باشد. این نوع شبکه با استفاده از سلول‌های شش‌وجهی^{۵۱} در نواحی مرکزی دامنه و سلول‌های چندوجهی^{۵۲} یا چهاروجهی^{۵۳} در نواحی پیچیده و نزدیک به دیواره، تعادل مناسبی میان کیفیت، دقت و هزینه محاسباتی ایجاد می‌کند. جهت مقایسه تاثیر مش در نتایج، شش شبکه محاسباتی ایجاد شد. جدول زیر اطلاعات مربوط به این شش شبکه محاسباتی را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مشخصات شش شبکه محاسباتی مورد بررسی جهت یافتن استقلال از شبکه

سایز شبکه (میلیون سلول)	۰.۴۵	۰.۶۸	۱	۱.۴	۲	۲.۶۵
تعداد سلول ^{۵۴}	۴۳۱۷۸۴	۶۸۳۲۴۲	۹۷۱۴۷۷	۱۳۹۲۲۹۷	۲۰۰۱۷۹۲	۲۶۴۳۴۶۷

برای مقایسه این شبکه‌ها نمودارهای سرعت و دما بر روی خط محوری محفظه احتراق رسم شده است. با توجه به شکل ۱ و شکل ۲ مشاهده می‌شود که سه شبکه درشت یعنی ابعاد ۰.۴۵ و ۰.۶۸ و ۱ میلیون سلول، اختلاف قابل توجهی با سایر نتایج دارند. اما سه شبکه ریزتر یعنی ۱.۴ و ۲ و ۲.۶۵ میلیون سلول، تا حد قابل قبولی مشابه هستند. نهایتاً شبکه ۱.۴ میلیون سلول برای ادامه پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۵: مقایسه دما و سرعت محوری در محور طولی محفظه برای شش شبکه محاسباتی مختلف

^{۵۱} Hexahedral

^{۵۲} Polyhedral

^{۵۳} Tetrahedral

^{۵۴} Cell Number



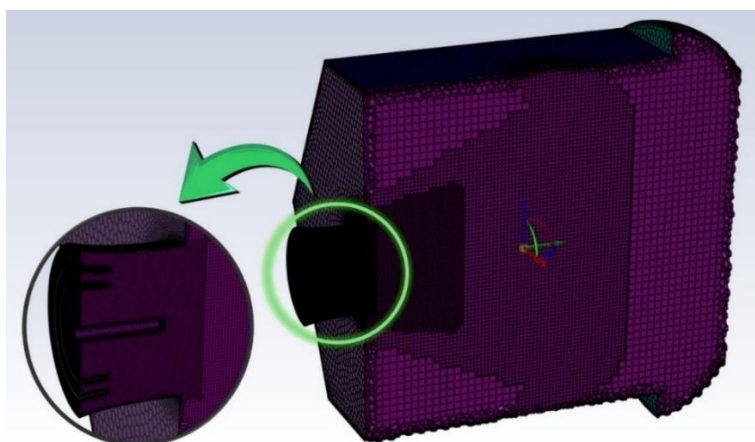
mct.cdsts

www.mct.cdsts.ir

چهارمین همایش بین‌المللی دانشجویان

مهندسی مکانیک و هوافضا

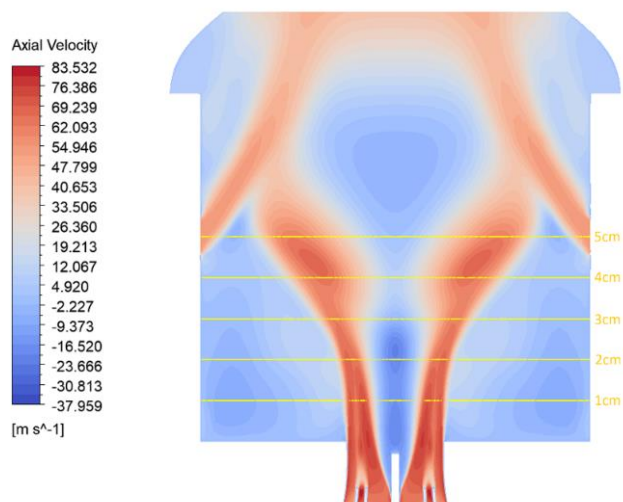
4th International Conference for Mechanical and Aerospace Engineers Students



شکل ۶: نمایی از شبکه محاسباتی با ۱.۴ میلیون سلول از نوع PolyHex-Core

۶. اعتبارسنجی

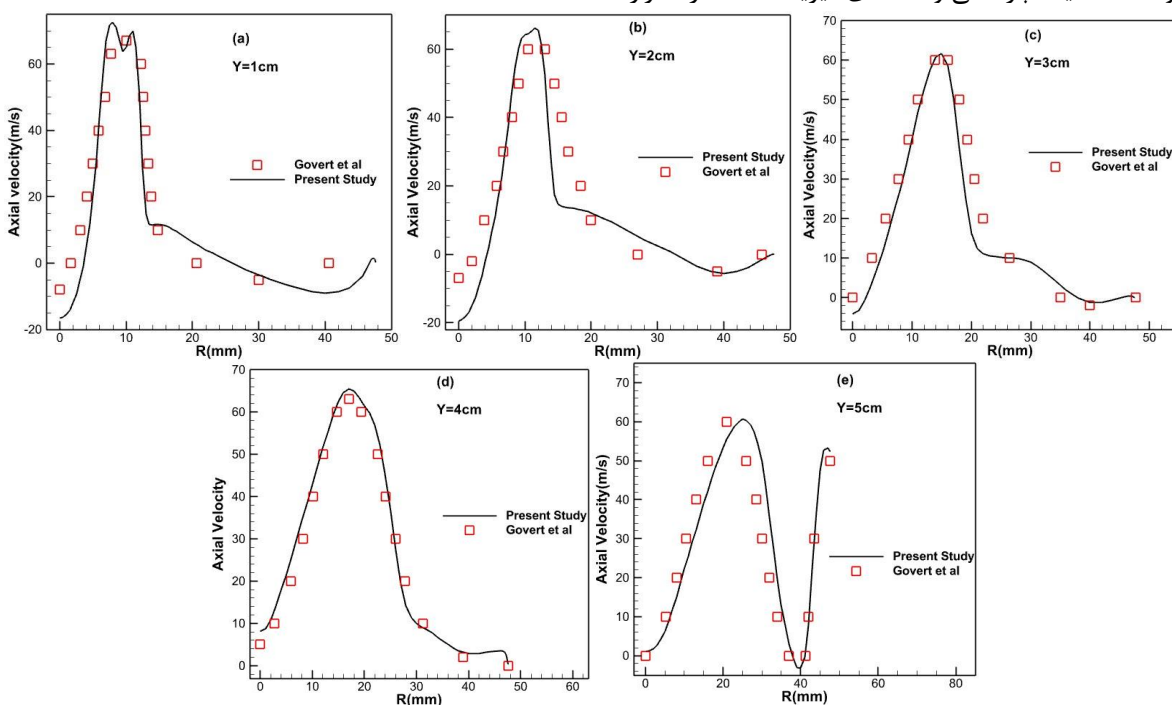
جهت سنجش درستی شبیه سازی محفظه احتراق مدل، نتایج مربوطه را با کار تجربی-عددی گاورت و همکاران [24] که در تاسیسات بخش تکنولوژی پیشران‌های مرکز هوافضا آلمان (DLR⁵⁵) در شهر کلن آلمان انجام شده، مقایسه می‌کنیم. شکل زیر کانتور سرعت محوری Y در صفحه برش طولی محفظه احتراق مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۷: کانتور سرعت محوری بر روی صفحه برش محفظه احتراق

⁵⁵ Combustor Department, Institute of Propulsion Technology, German Aerospace Center (DLR), Cologne 51147, Germany

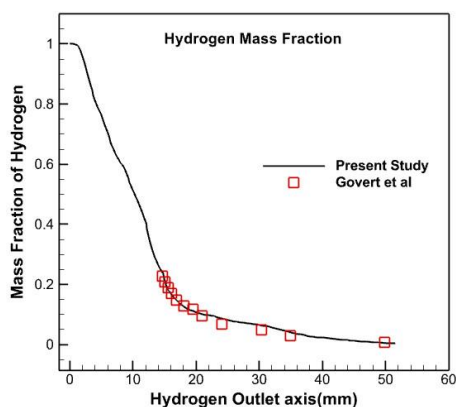
شکل زیر مقایسه سرعت محوری در چهار مقطع از محفظه احتراق در طول‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلیمتری برای مقاله حاضر با کار تجربی-عددی مرکز DLR را نشان می‌دهد. بخش‌هایی که سرعت محوری در محدوده منفی قرار دارند، نواحی بازچرخش جریان^{۵۶} است که در پایداری شعله در محفظه احتراق، نقش اساسی دارد. همانطور که در نمودارهای سرعت محوری مشخص است، نتایج شبیه‌سازی در بخش شبیه‌سازی جریان، تا حد بسیار خوبی به نتایج کار تجربی-عددی DLR نزدیک است و توانسته ماهیت چرخشی و آشفته‌ی فیزیک مسئله را تکرار کند.



شکل ۸: مقایسه سرعت محوری در راستای شعاعی برای نتایج مرجع کار آزمایشگاهی گاورت و همکاران [24] و نتایج شبیه‌سازی حاضر در مقطع (a) ۱ سانتی‌متر (b) ۲ سانتی‌متر (c) ۳ سانتی‌متر (d) ۴ سانتی‌متر (e) ۵ سانتی‌متر

دیگر پارامتر مهم مربوط به کسر جرمی سوخت هیدروژن می‌باشد. شکل زیر مقایسه کسر جرمی هیدروژن در نتایج شبیه‌سازی پایه‌ی مقاله حاضر با کار تجربی-عددی مرکز DLR را نشان می‌دهد. این نمودار بیانگر کسر جرمی هیدروژن در راستای محور خروجی سوخت هیدروژن خالص است و نفوذ سوخت هیدروژن در عمق محفظه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در دهانه ورودی سوخت، کسر جرمی هیدروژن برابر با یک است. با ادامه حرکت هیدروژن داخل محفظه احتراق مدل، با اختلاط و سوختن هیدروژن، کسر جرمی این گونه‌ی شیمیایی کاهش می‌یابد.

⁵⁶ Recirculation



شکل ۹: مقایسه کسر جرمی هیدروژن در محور خروجی سوخت هیدروژن برای نتایج مرجع کار آزمایشگاهی گاورت و همکاران [24] و نتایج شبیه‌سازی حاضر

۷. حل قطاع

مدل‌سازی کامل هندسه‌ی محفظه احتراق در مقیاس واقعی، علاوه بر افزایش حجم سلول‌های محاسباتی، منجر به زمان حل طولانی و نیاز به منابع پردازشی گسترده می‌شود؛ مسئله‌ای که می‌تواند انجام مطالعات پارامتری یا بهینه‌سازی را با چالش جدی مواجه کند. از این‌رو، استفاده از رویکردهای کاهش‌دهنده هزینه محاسباتی، بدون کاهش معنی‌دار دقت، از اهمیت بالایی برخوردار است.

یکی از روش‌هایی که می‌تواند موجب کاهش هزینه حل در محفظه‌های دارای تقارن هندسی و جریان شود، استفاده از شبیه‌سازی قطاعی^{۵۷} به وسیله شرط مرزی تناوب^{۵۸} است. در این رویکرد، تنها یک قطاع زاویه‌ای مشخص از هندسه‌ی کامل مدل‌سازی می‌شود و با اعمال شرط مرزی تناوبی چرخشی، رفتار جریان به‌گونه‌ای بازتولید می‌گردد که گویی محفظه به شکل کامل شبیه‌سازی شده است. این روش، در صورتی که هندسه و شرایط جریان از تقارن دورانی برخوردار باشند، قادر است دقت شبیه‌سازی هندسه کامل را حفظ کند، در حالی که هزینه محاسباتی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد.

جهت انتخاب قطاع از هندسه‌ی محفظه احتراق مدل حاضر در این مقاله، دو رویکرد قابل اتخاذ است:

۱. محل برش قطاع از رئوس مقطع شش ضلعی صورت بگیرد.
۲. محل برش قطاع از وسط اضلاع مقطع شش ضلعی (دقیقا از وسط جت‌های رقیق‌ساز) صورت بگیرد.

جهت بررسی نتایج، در هریک از این دو رویکرد، سه قطاع ۱۸۰، ۱۲۰ و ۶۰ درجه‌ای از محفظه احتراق مدل، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند.

⁵⁷ Sector Simulation

⁵⁸ Periodic Boundary Condition

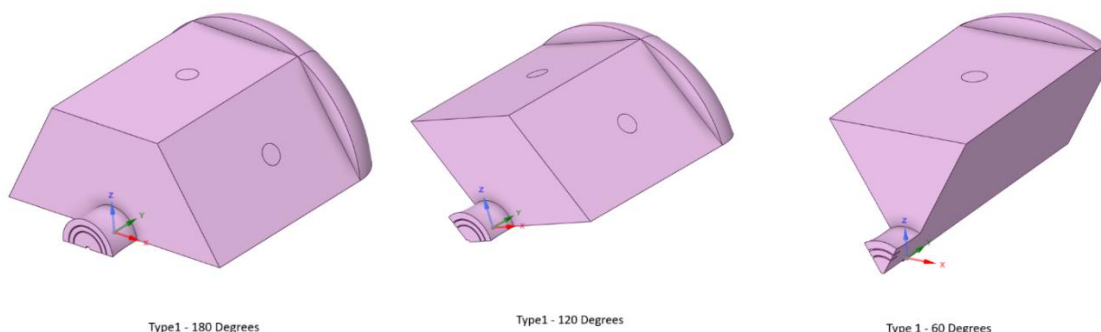


mct.cdsts

www.mct.cdsts.ir

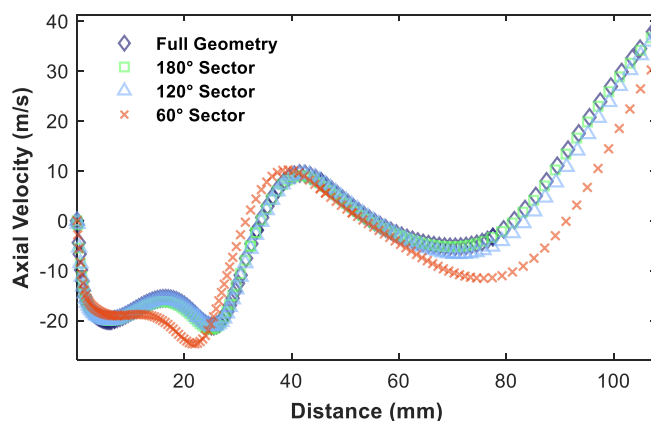
۱. رویکرد اول، محل برش از رئوس اضلاع شش ضلعی

در این رویکرد، در قطاع ۱۸۰ درجه‌ای سه ضلع کامل از مقطع شش ضلعی در دامنه محاسبات قرار می‌گیرند. سپس صفحه برش به دو قسمت مساوی تقسیم شده و شرط مرزی تناوب چرخشی بر آنها اعمال می‌شود. در قطاع ۱۲۰ درجه‌ای، دو ضلع کامل از مقطع شش ضلعی و در قطاع ۶۰ درجه‌ای، یک ضلع کامل از مقطع شش ضلعی در دامنه محاسباتی قرار می‌گیرند. شکل زیر نمایی از هندسه سه قطاع اتخاذ شده در رویکرد اول را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: هندسه‌ی سه قطاع رویکرد اول به ترتیب از چپ: ۱۸۰ درجه، ۱۲۰ درجه، ۶۰ درجه

مدل‌ها و فرضیات حل، کاملاً مشابه با شبیه‌سازی پایه می‌باشد. با این تفاوت که شروط مرزی مربوط به ورودی‌هایی که دچار تقطیع شده‌اند، به نسبت زاویه قطاع، تغییر یافته‌اند تا در همان قطاع، شرایط مشابه حالت حل کامل باشد. نمودار زیر سرعت محوری بر روی خط محور طولی Y برای سه قطاع رویکرد اول در مقایسه با حالت حل کامل را نشان می‌دهد.

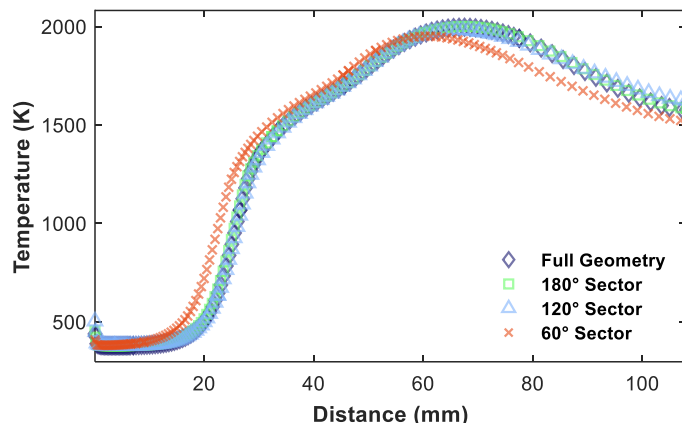


شکل ۱۱: سرعت محوری بر روی محور طولی محفظه احتراق برای سه قطاع رویکرد اول در مقایسه با حل هندسه‌ی کامل همچنین نمودار زیر دما بر روی محور طولی Y برای سه قطاع رویکرد اول در مقایسه با حالت حل کامل را نشان می‌دهد.



mct.cdsts

www.mct.cdsts.ir



شکل ۱۲: نمودار دما بر روی محور طولی محفظه احتراق برای سه قطاع رویکرد اول در مقایسه با حل هندسه‌ی کامل همچنین جدول زیر مقایسه برخی کمیت‌های عملکردی محفظه احتراق مدل را در سه قطاع رویکرد اول در مقایسه با حالت حل کامل نشان می‌دهد.

جدول ۳: مقایسه نتایج حل سه قطاع رویکرد اول در مقایسه با حل هندسه‌ی کامل

پارامترها	حل کامل	رویکرد ۱ - قطاع ۱۸۰ درجه	رویکرد ۱ - قطاع ۱۲۰ درجه	رویکرد ۱ - قطاع ۶۰ درجه
توان کل محفظه (KW)	۵۶,۵۰۶	۵۶,۴۶۵	۵۶,۹۲۰	۵۶,۸۹۶
میانگین وزنی غلظت NOx حرارتی در صفحه خروجی (ppm)	۱۱,۱۸۸	۱۱,۳۲۲	۱۰,۳۴۸	۱۲,۵۰۴
معیار یکنواختی دما در صفحه خروجی	۰,۸۶۷۹	۰,۸۶۶۹	۰,۸۸۵۶	۰,۸۹۱۸
همگرایی حل	عالی	عالی	عالی	ضعیف

۲. رویکرد دوم، محل برش قطاع از وسط اضلاع مقطع شش ضلعی

در این رویکرد، در قطاع ۱۸۰ درجه‌ای دو ضلع کامل و دو نیم ضلع از مقطع شش ضلعی در دامنه محاسبات قرار می‌گیرند. در قطاع ۱۲۰ درجه‌ای، یک ضلع کامل و دو نیم ضلع از مقطع شش ضلعی و در قطاع ۶۰ درجه‌ای، دو نیم ضلع از مقطع شش ضلعی در دامنه محاسباتی قرار می‌گیرند. شکل زیر نمایی از هندسه سه قطاع اتخاذ شده در رویکرد دوم را نشان می‌دهد.



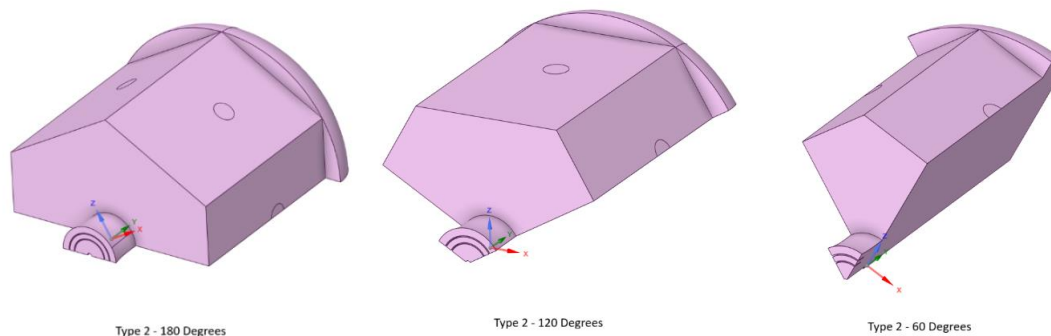
mct.cdsts

www.mct.cdsts.ir

چهارمین همایش بین‌المللی دانشجویان

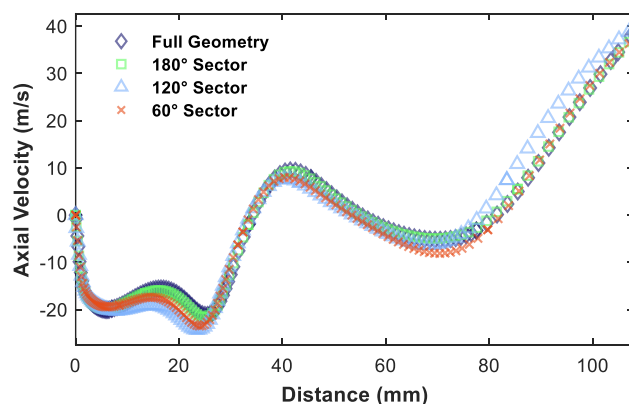
مهندسی مکانیک و هوافضا

4th International Conference for Mechanical and Aerospace Engineers Students

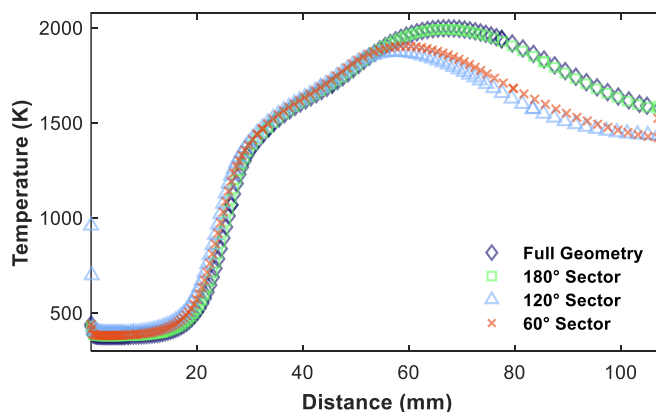


شکل ۱۳: هندسه‌ی سه قطاع رویکرد دوم به ترتیب از چپ: ۱۸۰ درجه، ۱۲۰ درجه، ۶۰ درجه

نمودار زیر سرعت محوری بر روی خط محور طولی Y برای سه قطاع رویکرد دوم در مقایسه با حالت حل کامل را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴: سرعت محوری بر روی محور طولی محفظه احتراق برای سه قطاع رویکرد دوم در مقایسه با حل هندسه‌ی کامل همچنین نمودار زیر دما بر روی محور طولی Y برای سه قطاع رویکرد دوم در مقایسه با حالت حل کامل را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵: نمودار دما بر روی محور طولی محفظه احتراق برای سه قطاع رویکرد دوم در مقایسه با حل هندسه‌ی کامل

همچنین جدول زیر مقایسه برخی کمیت‌های عملکردی محفظه احتراق مدل را در سه قطاع رویکرد دوم در مقایسه با حالت حل کامل نشان می‌دهد.

جدول ۴: مقایسه نتایج حل سه قطاع رویکرد دوم در مقایسه با حل هندسه‌ی کامل

عنوان	حل کامل	رویکرد ۲ - قطاع ۱۸۰ درجه	رویکرد ۲ - قطاع ۱۲۰ درجه	رویکرد ۲ - قطاع ۶۰ درجه
توان کل محفظه (KW)	۵۶/۵۰۶	۵۶/۴۸۶	۵۷/۱۶۷	۵۷/۰۵۶
میانگین وزنی غلظت NOx حرارتی در صفحه خروجی (ppm)	۱۱/۱۸۸	۱۱/۱۴۷	۹/۱۹۶	۹/۷۲۲
معیار یکنواختی دما در صفحه خروجی	۰/۸۶۷۹	۰/۸۶۷۰	۰/۸۹۰۹	۰/۹۰۹۰
همگرایی حل	عالی	عالی	عالی	ضعیف

۸. نتیجه گیری

هدف از این مقاله، بررسی اهمیت و تاثیر محل برش و زاویه اخذ قطاع هندسه‌ی محفظه احتراق مدل با جریان چرخشی در حضور سوخت هیدروژن خالص می‌باشد. اهمیت تحقیق حاضر با توجه به به‌کارگیری روزافزون هیدروژن به عنوان سوخت پاک و رفتار متمایز آن در احتراق پررنگ است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که استفاده صحیح از مدل قطاعی می‌تواند هزینه محاسباتی شبیه‌سازی‌های پیچیده احتراق را به‌طور چشمگیری کاهش دهد و در کاربردهایی نظیر بهینه‌سازی مبتنی بر شبکه‌های عصبی بسیار ارزشمند است. انتخاب هندسه‌ی قطاع با دو رویکرد انجام شد. رویکرد اول بر اساس برش از رئوس مقطع شش ضلعی و رویکرد دوم بر اساس برش از وسط اضلاع مقطع شش ضلعی می‌باشد. بررسی نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد:

۱. قطاع‌های ۶۰ درجه در مقایسه با سایر زوایا، عملکرد ضعیف‌تری ارائه دادند. هم در رویکرد اول و هم در رویکرد دوم، قطاع‌های زاویه‌ی ۶۰ درجه در زمینه همگرایی حل، ضعف شدیدی دارند. بعلاوه اینکه مقادیر سرعت محوری و دما و میانگین وزنی غلظت NOx حرارتی در صفحه خروجی با حل مرجع انحراف دارد.
۲. قطاع ۱۸۰ درجه‌ای در هر دو رویکرد، عملکرد مناسبی ارائه داد. هم در زمینه سرعت محوری و هم دما و دیگر پارامترها، اختلاف با حل مرجع تقریباً صفر است.
۳. در خصوص قطاع ۱۲۰ درجه، رویکرد اول کاملاً عملکرد بهتری در مقایسه با رویکرد دوم ارائه می‌دهد. با توجه به ضعف رویکرد دوم در قطاع ۱۲۰ درجه و همین‌طور ضعف در پیش‌بینی میانگین وزنی غلظت NOx حرارتی در صفحه خروجی، بنظر می‌رسد بهترین عملکرد در کنار پایین بودن هزینه محاسباتی، مربوط به قطاع ۱۲۰ درجه از رویکرد اول خواهد بود.

می‌توان نتیجه گرفت در مقایسه رویکرد اول و رویکرد دوم، رویکرد اول برتری نسبی دارد. دلیل این اتفاق، توانایی حل کامل برهمکنش جت‌ها با ساختار کامل جت می‌باشد. درحالی که در رویکرد دوم، جت‌های مجاور شرط مرزی تناوب، به شکل ناقص حل شده و برهمکنش جت‌ها به شکل دقیق حل نمی‌شود.

به طور کلی جهت استفاده از هندسه‌ی قطاع در حل یک محفظه احتراق توربین گاز با جریان چرخشی واکنشی آشفته، در حضور سوخت هیدروژن باید به موارد زیر توجه کرد:

- در نتایج این مقاله نشان داده شد که روش اخذ قطاع از هندسه‌ی اصلی و محل برش قطاع، مستقیماً بر نتایج حل موثر است.
- زاویه قطاع مناسب جهت حل صحیح شبیه‌سازی بدون تغییرات معنادار نتایج در مقایسه با حالت هندسه کامل، شدیداً به هندسه‌ی محفظه احتراق بستگی دارد.
- در انتخاب محل برش و زاویه قطاع، با توجه شود که درون قطاع انتخاب شده، حداقل مکانیزم جریانی که در محفظه احتراق غالب است، حفظ شود. به طور مثال در مقاله حاضر بهترین نتیجه در عین کمترین هزینه محاسباتی، برای حالتی رخ داد که دو عدد جت رقیق‌سازی به طور کامل درون قطاع، وجود داشتند. به این ترتیب برهمکنش جت‌های رقیق‌سازی که یک پدیده‌ی غالب در محفظه به شمار می‌رود، حداقل یکبار درون هندسه به طور کامل حل می‌شود.
- نشان داده شد حل قطاع برای بررسی احتراق سوخت هیدروژن با وجود ضریب نفوذ بالا و سرعت شعله‌ی بالای این سوخت، در شرایط انتخاب قطاع مناسب، قابل قبول است.
- نتایج نشان دادند حل قطاع می‌تواند در حل جریان‌های چرخشی، موجب کاهش هزینه‌ی محاسباتی و حفظ دقت شبیه‌سازی شود.

مراجع

- [1] F. Yang and U. Sattar, "COP29: Technology development and transfer framework," *Front. Environ. Sci.*, vol. 12, p. 1349843, Feb. 2024, doi: 10.3389/fenvs.2024.1349843.
- [2] M. Alhuyi Nazari, M. Fahim Alavi, M. Salem, and M. E. H. Assad, "Utilization of hydrogen in gas turbines: a comprehensive review," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 17, pp. 513–519, Feb. 2022, doi: 10.1093/ijlct/ctac025.
- [3] C. Gong, S. Zhao, W. Chen, W. Li, Y. Zhou, and M. Qiu, "Numerical study on the combustion process in a gas turbine combustor with different reference velocities," *Adv. Aerodyn.*, vol. 5, no. 1, p. 24, Sep. 2023, doi: 10.1186/s42774-023-00154-0.
- [4] M. Ilbas, O. Kumuk, and S. Karyeyen, "Modelling of the gas-turbine colorless distributed combustion: An application to hydrogen enriched – kerosene fuel," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 24, pp. 12354–12364, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.228.



mct.cdsts

www.mct.cdsts.ir

چهارمین همایش بین‌المللی دانشجویان

مهندسی مکانیک و هوافضا

4th International Conference for
Mechanical and Aerospace Engineers Students

- [5] M. C. Cameretti, R. De Robbio, V. Ferrara, and R. Tuccillo, "Performance and Emissions Evaluation of a Turbofan Burner with Hydrogen Fuel," *Aerospace*, vol. 12, no. 3, p. 231, Mar. 2025, doi: 10.3390/aerospace12030231.
- [6] G. K. Batchelor, *An Introduction to fluid dynamics*, 14. print. in Cambridge mathematical library. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2010.
- [7] "A. Fluent, Theory Guide 17.2." Ansys Inc, USA, 2016.
- [8] S. B. Pope, *Turbulent flows*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2000.
- [9] K. Duraisamy, "Perspectives on machine learning-augmented Reynolds-averaged and large eddy simulation models of turbulence," *Phys. Rev. Fluids*, vol. 6, no. 5, p. 050504, May 2021, doi: 10.1103/PhysRevFluids.6.050504.
- [10] TSAN-HSING SHIH, WILLIAM W. LIOU, AAMIR SHABBIR, ZHIGANG YANG, and JIANG ZHU, "A NEW k-e EDDY VISCOSITY MODEL FOR HIGH REYNOLDS NUMBER TURBULENT FLOWS," *Computers & Fluids*, vol. 24, No. 3, pp. 227-23, 1995.
- [11] Frank M. White, *Fluid Mechanics*, Fourth Edition. McGraw-Hill.
- [12] W. Sutherland, "LII. The viscosity of gases and molecular force," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 36, no. 223, pp. 507-531, Dec. 1893, doi: 10.1080/14786449308620508.
- [13] M. F. Modest, *Radiative heat transfer*, Third Edition. New York: Academic Press, 2013.
- [14] M. F. Modest, "The Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model for Arbitrary Solution Methods in Radiative Transfer," *JOURNAL OF HEAT TRANSFER*, 1990.
- [15] E. Knudsen and H. Pitsch, "Large-Eddy Simulation for Combustion Systems: Modeling Approaches for Partially Premixed Flows".
- [16] M. Pfitzner, "A New Analytic pdf for Simulations of Premixed Turbulent Combustion," *Flow Turbulence Combust*, vol. 106, no. 4, pp. 1213-1239, Apr. 2021, doi: 10.1007/s10494-020-00137-x.
- [17] Thierry Poinso and Denis Veynante, *Theoretical and Numerical Combustion*, Third Edition.
- [18] D. Veynante and L. Vervisch, "Turbulent Combustion Modeling".
- [19] V. Zimont, W. Polifke, M. Bettelini, and W. Weisenstein, "An Efficient Computational Model for Premixed Turbulent Combustion at High Reynolds Numbers Based on a Turbulent Flame Speed Closure," *International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*, 1998.
- [20] P. Flohr and H. Pitsch, "A turbulent flame speed closure model for LES of industrial burner flows".
- [21] W. P. Jones and J. H. Whitelaw, "Calculation methods for reacting turbulent flows: A review," *Combustion and Flame*, vol. 48, pp. 1-26, Jan. 1982, doi: 10.1016/0010-2180(82)90112-2.
- [22] S. R. Turns, *An introduction to combustion: concepts and applications*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2012.



mct.cdsts

www.mct.cdsts.ir

چهارمین همایش بین‌المللی دانشجویان

مهندسی مکانیک و هوافضا

4th International Conference for
Mechanical and Aerospace Engineers Students

- [23] I. B. Zel'dovich, J. P. Ostriker, G. I. Barenblatt, R. A. Sîunîaev, and I. B. Zel'dovich, *Chemical physics and hydrodynamics*. in Selected works of Yakov Borisovich Zeldovich, no. v. 1. Princeton, N.J: Princeton University Press, 1992.
- [24] S. Gövert *et al.*, "Experimental and Numerical Investigation of Hydrogen Combustion in a Dual-Swirl Burner for Aero-Engine Applications," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 146, no. 11, p. 111013, Nov. 2024, doi: 10.1115/1.4065925.
- [25] Suhas V. Patankar, *Numerical Heat Transfer And Fluid Flow*. Taylor and Francis.
- [26] Klaus A. Hoffmann and Steve T. Chiang, *Computational Fluid Dynamics*, Fourth Edition., vol. Volume 1.
- [27] F. Bazdidi-Tehrani and H. Zeinivand, "Presumed PDF modeling of reactive two-phase flow in a three dimensional jet-stabilized model combustor," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 1, pp. 225–234, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.enconman.2009.09.020.
- [28] M. Alletto and M. Breuer, "One-way, two-way and four-way coupled LES predictions of a particle-laden turbulent flow at high mass loading downstream of a confined bluff body," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 45, pp. 70–90, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2012.05.005.
- [29] H. PITSCH and N. PETERS, "A Consistent Flamelet Formulation for Non Premixed Combustion Considering Differential Diffusion Effects," *COMBUSTION AND FLAME*, 1998.
- [30] A. Attili, F. Bisetti, M. E. Mueller, and H. Pitsch, "Effects of non-unity Lewis number of gas-phase species in turbulent nonpremixed sooting flames," *Combustion and Flame*, vol. 166, pp. 192–202, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.combustflame.2016.01.018.
- [31] H. Lee, P. Dai, and M. et al Wan, "Lewis number and preferential diffusion effects in lean hydrogen–air highly turbulent flames," *Physics of Fluids*, 2025.
- [32] University of California at San Diego, San Diego, CA, and accessed July 2, 2023, "San Diego Mechanism 2024, 'Chemical-Kinetic Mechanisms for Combustion Applications,' San Diego Mechanism, Mechanical and Aerospace Engineering (Combustion Research),." 2024.