

مقایسه ترکیب مدل‌های توربولانس با مدل احتراق در پیش‌گویی میدان جریان و دمای محفظه احتراق استوانه‌ای با سوخت مایع

میثم بابابیک^۱، علی سعیدی^۲، محمد مقیمان^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد- m_bababeyk@yahoo.com

^۲ هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد- Ali.saeedi@stu-mail.um.ac

^۲ استاد گروه مهندسی مکانیک- دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد- mmoghiman@yahoo.com

جریان چرخشی در محفظه احتراق را دو حالت احتراقی و هم دما با دو مدل RSM و $k-\epsilon$ استاندارد مدل‌سازی کردند. نتایج آنها نشان

دهنده ضعف $k-\epsilon$ استاندارد در پیش‌گویی ناحیه چرخش اجباری جریان بود. ثابت هلال و همکاران [۸] نیز ترکیب مدل‌های توربولنسی RSM و $k-\epsilon$ استاندارد را با مدل‌های احتراق لزجت گردابه‌ای و مدل شعله‌های کوچک آرام پایا در شعله جت هیدروژن مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها که با استفاده از کد نرم افزار فلونت بدست آمده است بیانگر پیشگویی بهتر RSM در اختلاط سوخت و هوا نسبت به $k-\epsilon$ استاندارد می‌باشد. بطور کلی پژوهش‌های اخیر نشان از توانایی بالای مدل RSM در پیشگویی جریان چرخشی در محفظه‌های احتراق دارد. با توجه به مشکلات مدل انتقال تنش رینولدز مانند پرهزینه و زمان بر بودن، تنظیم سخت‌تر شرایط مرزی و همگرایی دشوارتر، استفاده از این مدل محدود می‌شود. در پژوهش حاضر توانایی مدل‌های آشفتگی ASM، $k-\epsilon$ استاندارد و RNG $k-\epsilon$ در ترکیب با مدل احتراق مگنسن جهت پیشگویی میدان جریان و دمای داخل محفظه احتراق استوانه‌ای بررسی شده و جواب‌ها با نتایج آزمایشگاهی خلیل [۹] مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

مدل فیزیکی و روش حل

شکل ۱ ابعاد و هندسه محفظه احتراق مورد مطالعه را نشان می‌دهد. سوخت مورد استفاده ستان ($C_{16}H_{34}$) از نوع مایع و نوع احتراق غیر پیش آمیخته است. محل پاشش سوخت روی محور در مرکز جریان ورودی می‌باشد. در شرایط مورد مطالعه، هوا در فشار اتمسفر و دمای $k=300$ ، سرعت 18 m/s و با عدد چرخش (SN) $1/24$ وارد محفظه احتراق می‌شود. برای حل میدان جریان که بصورت دو بعدی و متقارن محوری است، از یک کد عددی که با مدل‌های توربولانس مذکور ارتقا یافته، استفاده شده است. در این کد عددی، معادلات حاکم منفصل شده به روش حجم کنترل، با استفاده از روش الگوریتم سیمپل و طرح ADI حل می‌شوند.

چکیده

در این مقاله نتایج عددی شبیه‌سازی میدان جریان و دمای داخل محفظه احتراق استوانه‌ای با سوخت مایع توسط مدل احتراقی مگنسن در ترکیب با سه مدل آشفتگی تنش جبری (ASM)، $k-\epsilon$ استاندارد و RNG $k-\epsilon$ بررسی شده و با مقادیر آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. مقایسه مدل‌های آشفتگی مذکور در پیش‌گویی میدان جریان نشان می‌دهد که مدل توربولنسی ASM نزدیک‌ترین جواب را نسبت به نتایج آزمایشگاهی ارائه می‌کند. بررسی نتایج میدان دما حاصل از ترکیب مدل‌های اغتشاش فوق با مدل احتراق مگنسن حاکی است که هر چند سه مدل پروفیل‌های مناسبی را نسبت به نتایج آزمایشگاهی پیش‌گویی می‌کنند، اما مدل توربولنسی RNG در ترکیب با مدل احتراق مگنسن بهترین شبیه‌سازی را برای میدان دما انجام می‌دهد. افزایش عدد چرخش جریان ورودی تا حدی باعث بهتر شدن میزان اختلاط سوخت و هوا در امتداد محور گردیده و بیشتر شدن دما را به دنبال دارد. در حالی که از این حد به بعد در اثر افزایش جریان برگشتی گازهای خروجی، مقادیر دما در امتداد محور پایین می‌آید.

کلمات کلیدی: مدل آشفتگی، مدل احتراق، محفظه احتراق، مطالعه عددی

مقدمه

اغلب جریان‌ها در محفظه‌های احتراق از نوع مغشوش بوده و بررسی آنها نیاز به مدل‌سازی پدیده احتراق [۱ و ۲] و آشفتگی جریان [۳] دارد. با توجه به تاثیر مدل‌سازی پدیده آشفتگی جریان بر احتراق، پیچیدگی و عدم وجود مدلی منفرد برای شبیه‌سازی جریان‌های احتراقی مغشوش، بررسی توانایی مدل‌های توربولانس مختلف در پیشگویی جریان‌های آشفته [۴] و نیز ترکیب با مدل‌سازی پدیده احتراق، همواره مورد توجه پژوهشگران علم احتراق، قرار داشته است [۵]. از جمله پژوهش‌ها به بررسی آزمایشگاهی و عددی زیبا و همکاران [۶] می‌توان اشاره کرد. نتایج آزمایشات آنها که در حالت هم دما بدست آمده بود حاکی از برتری مدل انتقال تنش رینولدز (RSM)^۱ نسبت به دو مدل $k-\epsilon$ استاندارد و RNG $k-\epsilon$ در پیشگویی میدان جریان چرخشی بود. جرمن و همکاران [۷] نیز

$$C_\mu = \frac{21 - C_2}{3} \frac{C_1}{C_1} \left[1 - \frac{1}{C_1} \left(1 - C_2 \frac{P}{\varepsilon} \right) \right] \left/ \left[1 + \frac{1}{C_1} \left(\frac{P}{\varepsilon} - 1 \right) \right]^2 \right. \quad (6)$$

بطور کلی در جریان‌های چرخشی از عدد چرخش بیان‌گر شار محوری ممنوم زاویه‌ای به شار محوری ممنوم محوری است، استفاده می‌شود. رابطه عدد چرخش در زیر آورده شده است [۱۰].

$$SN = \frac{\int (wr)\rho u dA}{R \int \rho u^2 dA} \quad (7)$$

مدل احتراق مگنسن هرتاگر براساس شکست گردابه‌ها می‌باشد. جریان توربولانس از طیف گسترده‌ای از Eddyها تشکیل شده است. گردابه‌ها روند اضمحلالی را به سمت کوچک شدن طی کرده و در نهایت از بین می‌روند، چون انرژی را به صورت اصطکاکی مصرف می‌کنند (بحث Eddy Breakup model توسط اسپالدینگ [۱۱] بیان شده است). سوخت و هوا که وارد محفظه احتراق می‌شوند، سوخت وارد یک سری Eddyها و هوا نیز وارد سری دیگری از Eddyها و گردابه‌ها می‌شوند. گردابه‌ها شکسته و ریز می‌شوند و بر اثر اصطکاک متوقف و مخلوط می‌شوند. مگنسن نرخ احتراق را با استفاده از رابطه‌ای که مصرف سوخت را بیان می‌کند، ارائه داد.

$$R_f = A_m m_f \frac{\varepsilon}{k} \quad (8)$$

بر اساس مدل احتراق مگنسن هر چه میزان اتلاف گردابه‌های سوخت و هوا بیشتر و میزان انرژی جنبشی گردابه‌ها کم‌تر باشد مقدار سوخت مصرفی در هر گره افزایش می‌یابد. در نقاطی از شعله که غلظت سوخت زیاد و غلظت اکسیژن کم است، نرخ احتراق به کاهش (از بین رفتن) گردابه‌های اکسیژن بستگی دارد.

$$R_f = A_m \left(\frac{\bar{m}_{O_2}}{S} \right) \frac{\varepsilon}{k} \quad (9)$$

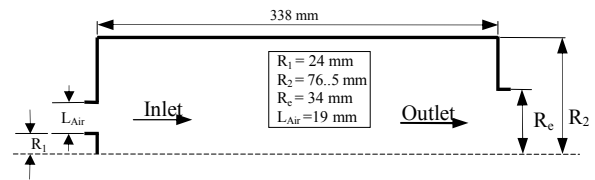
در کد هر دو حالت روابط (۸) و (۹) ابتدا محاسبه شده و سپس مقدار مینیوم برای میزان مصرف سوخت در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۱) ضرائب موجود در مدل‌های RNG و $k-\varepsilon$ استاندارد [۴]

Parameter	RNG $k-\varepsilon$	Standard $k-\varepsilon$
C_1	1.42	1.44
C_2	$1.68 + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta / 4.38)}{1 + 0.012 \eta^3}$	1.92
C_μ	0.0845	0.09
σ_ε	~ 0.7179	1.3
σ_k	~ 0.7179	1.0

نتایج بررسی میدان جریان

شکل (۲) سرعت محوری (U) محاسبه شده در امتداد محور را با استفاده از سه مدل آشفتگی نشان می‌دهد. مدل تنش جبری مقدار سرعت برگشتی را در امتداد محور کمتر از دو مدل پیش‌گویی کرده است. ضمناً این نکته لازم به ذکر است که دو مدل $k-\varepsilon$



شکل ۱: طرح محفظه احتراق مورد مطالعه

مدلسازی ریاضی توربولانس و احتراق

دو مدل اغتشاش $k-\varepsilon$ استاندارد و RNG [۳] برای بدست آوردن تنش‌های رینولدز از تئوری ایزوتروپ بوزینسک استفاده می‌کنند. در این دو مدل مقدار k و ε از دو معادله دیفرانسیل انتقالی بدست می‌آیند، روابط (۱) و (۲)، با این تفاوت که در مدل استاندارد ترم آخر سمت راست رابطه (۲)، وجود ندارد [۱۰]. مدل تنش جبری، علاوه بر حل معادلات دیفرانسیلی انتقال برای k و ε برای بدست آوردن هریک از مؤلفه‌های تنش رینولدز یک معادله جبری را نیز حل می‌کند.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_k) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (2)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

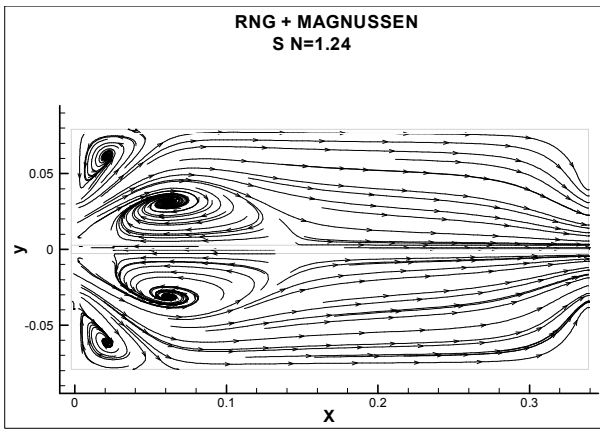
در روابط فوق ρ دانسیته، k انرژی جنبشی توربولانس، μ_t ویسکوزیته دینامیک مغشوش، G_k تولید برشی توربولانس، ε اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی، σ_k و σ_ε اعداد پراوتل مغشوش برای انرژی آشفتگی و اتلاف آن هستند. ضرائب ثابت موجود در روابط فوق برای دو مدل $k-\varepsilon$ استاندارد و RNG متفاوتند و مقادیر آنها در جدول ۱ درج گردیده است. متغیر η در جدول ۱ به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$\eta = \frac{S \sqrt{G_k}}{\varepsilon} \quad (4)$$

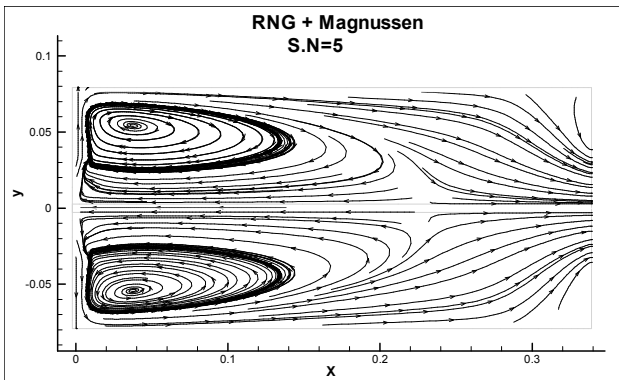
در G_k رابطه بالا به صورت زیر تعریف می‌شود. که در آن S تانسور نرخ کرنش متوسط می‌باشد.

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (5)$$

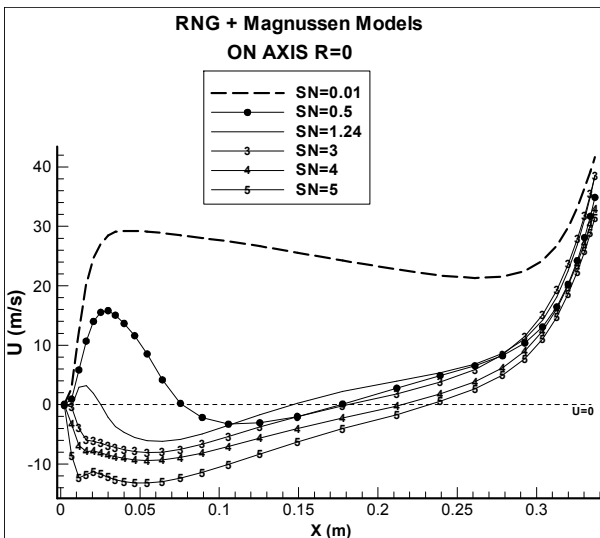
هزینه محاسباتی بسیار بالای مدل RSM باعث شد تا سعی در ارائه مدلی شود که برای تعیین تنش‌های رینولدز از معادلات جبری استفاده کند. کار اصلی برای ارائه یک مدل جبری از تبدیل معادله (۳) یعنی معادله انتقال برای تانسور تنش‌های رینولدز به یک شکل جبری می‌باشد. مقدار C_μ در معادله ASM از رابطه زیر محاسبه می‌شود. در رابطه $C_1 C_2$ بترتیب ۰/۴ و ۱/۵ می‌باشند.



شکل ۳: میدان جریان داخل محفظه احتراق با عدد چرخش ۱/۲۴



شکل ۴: میدان جریان داخل محفظه احتراق با عدد چرخش ۵

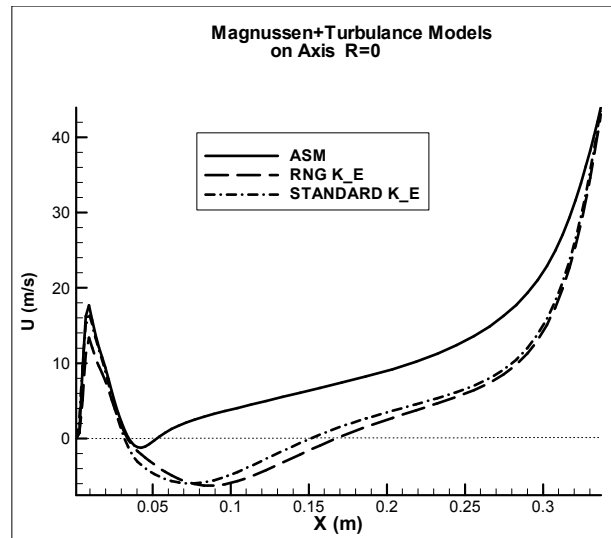


شکل ۵: نمودارهای تأثیر عدد چرخش بر سرعت محوری در امتداد محور

نتایج بررسی میدان دما

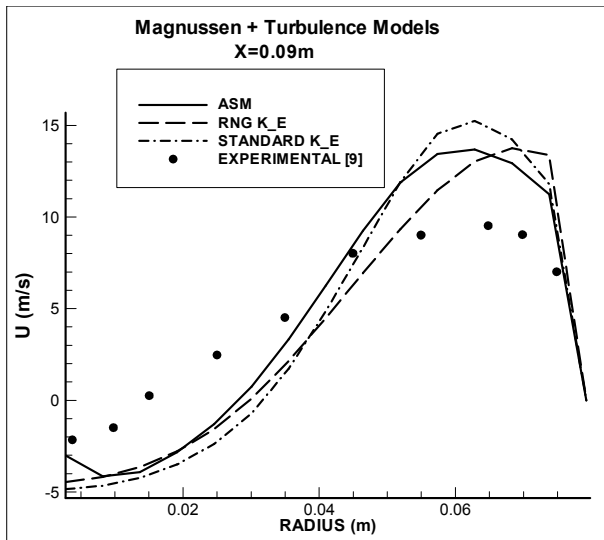
با توجه به تعریف مدل احتراق مگنسن مبنی بر مد نظر قرار گرفتن اختلاط و مستهلک شدن گردابه های سوخت و هوا در انجام احتراق و آزاد شدن انرژی شیمیایی سوخت، در عدد چرخش ۱/۲۴ دما در محور و نزدیکی آن بیشینه بوده و با دورتر شدن از محور و نزدیک شدن به دیواره ها مقدار آن کاهش می یابد. در شکل ۶ با افزایش افزایش عدد چرخش تا ۱۲۴ مقادیر دما به خاطر افزایش میزان گردابه ها و در نتیجه افزایش اختلاط سوخت و هوا بالا می رود. ولی با

استاندارد و RNG k_ε در امتداد محور سرعت محوری جریان را نزدیک به هم محاسبه کرده اند.



شکل ۶: بررسی سرعت محوری بدست آمده در امتداد محور توسط سه مدل آشفتگی

جریان با سرعت محوری و دورانی معین (با توجه به وجود عدد چرخش) وارد محفظه احتراق می شود. پس از ورود جریان، در نزدیکی دیواره به علت تغییر ناگهانی در سطح مقطع جریان و نیز در بخشی از محور استوانه جریان برگشتی بوجود می آید (شکل ۳). جریان برگشتی (با سرعت محوری منفی) در قسمتی از محفظه در نزدیکی محور مشاهده می شود. علت این برگشت جریان، چرخشی بودن جریان ورودی و متراکم شدن سیال ورودی به سمت دیواره (به علت ایجاد نیروی گریز از مرکز) می باشد. در نتیجه یک خلأ نسبی در نزدیکی محور بوجود آمده و باعث برگشت جریان می شود. در شکل شماره ۴ میدان جریان داخل محفظه احتراق را با عدد چرخش ۵ نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود مقدار جریان برگشتی و اندازه گردابه ایجاد شده به شدت افزایش یافته است. با افزایش عدد چرخش نیروی گریز از مرکز حاصل از چرخش جریان بیشتر شده و میزان جریان برگشتی به شدت افزایش یافته و این برگشت جریان در منطقه نزدیک محور به حدی است که جریان برگشتی ناشی از تغییر ناگهانی سطح در ورودی جریان کنار دیواره محفظه که در شکل ۳ وجود دارد از بین رفته است. در شکل ۵ مقادیر سرعت محوری بر اثر تغییر عدد چرخش از مقدار صفر تا ۵ نشان داده شده است. با افزایش عدد چرخش، مقدار سرعت برگشتی در امتداد محور از لحاظ مقدار و وسعت محدوده، افزایش می یابد.

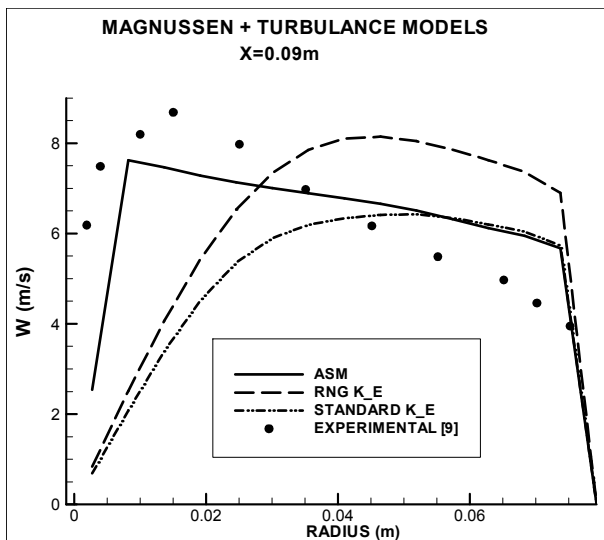


شکل ۸: مقایسه مولفه محوری سرعت در امتداد شعاع برای حل عددی و آزمایشگاهی

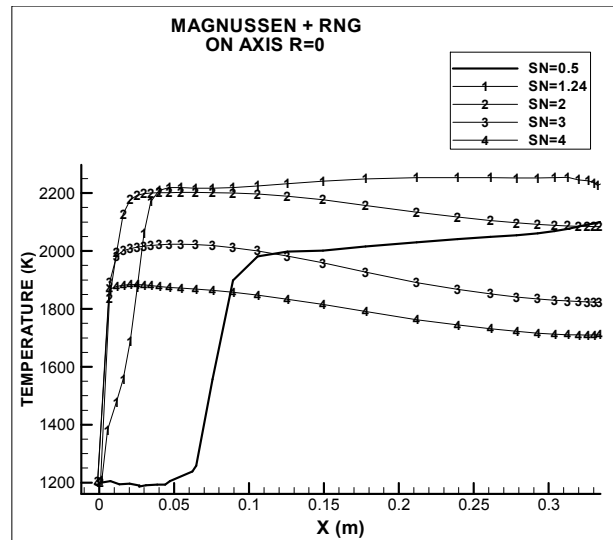
بررسی نتایج در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

شکل ۸ پروفیل مولفه محوری سرعت را در مقطع یک سوم از طول کوره برای سه مدل توربولانسی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود انحنای نمودار برای هر سه مدل آشفتگی با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارند و مدل تنش جبری مناسب‌ترین جواب را نسبت به نتایج آزمایشگاهی داده است.

شکل ۹ نتایج سرعت دورانی را که از حل میدان جریان با سه مدل توربولانسی مذکور بدست آمده در مقطع یک سوم از طول کوره نشان می‌دهد. مدل احتراقی مورد استفاده برای حل معادله انرژی در این حالت مدل مگنسن می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود مقادیر سرعت دورانی و انحنای نمودار برای هر سه مدل آشفتگی با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارند. مقادیر مدل شده توسط مدل ASM از لحاظ مقدار و سیر نمودار به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر است.



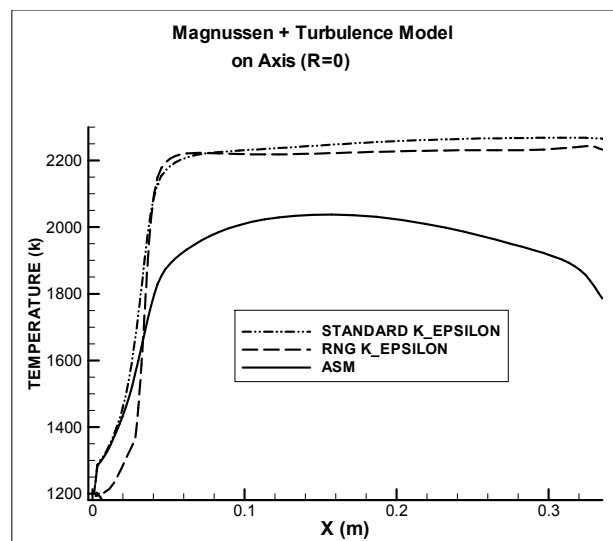
شکل ۹: مقایسه مولفه سرعت دورانی در امتداد شعاع برای حل عددی و آزمایشگاهی



شکل ۶: نمودارهای تأثیر عدد چرخش بر دما در امتداد محور

افزایش عدد چرخش به بیش از ۲، دما در امتداد طول محور کاهش یافته است و علت آن افزایش سرعت دورانی (W)، و در نتیجه افزایش نیروی گریز از مرکز سیال ورودی و تراکم بیشتر سیال به سمت دیواره و در نتیجه ایجاد خلاء نسبی در طول محور و افزایش جریان برگشتی با دمای پایین‌تر در امتداد آن می‌باشد و بنابراین با ایجاد جریان برگشتی بیشتر، دما در طول محور پایین‌تر می‌آید.

پروفیل دما در امتداد طول محور در شکل ۷ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در امتداد محور و در ابتدای آن از یک جایی به بعد مقدار دما به خاطر ایجاد احتراق به صورت سریع بالا می‌رود. نتایج حاصل از دو مدل توربولانسی ϵ -K استاندارد و RNG به یکدیگر نزدیک بوده و تغییرات دما را در امتداد محور از طول $X = 0.05m$ به بعد ناچیز پیش‌بینی می‌کنند. ولی مدل ASM دما را نسبت به دو مدل دیگر پایین‌تر محاسبه و تغییرات دما را در امتداد محور بیشتر از دو مدل دیگر محاسبه کرده است.



شکل ۷: نمودارهای دما در امتداد محور

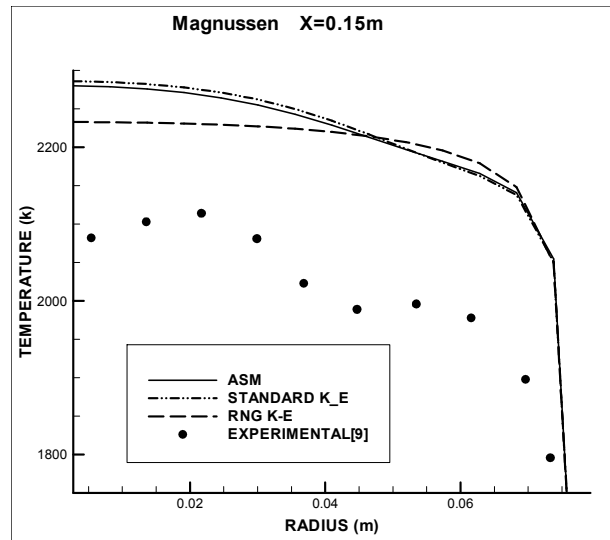
- مدل تنش جبری دقت بیشتری در پیش‌گویی میدان جریان نسبت به دو مدل $k-\epsilon$ استاندارد و $k-\epsilon$ RNG برای محفظه احتراق دارد.
- در ترکیب مدل‌های آشفته‌گی با مدل احتراق مگنسن جهت پیش‌گویی میدان دما در محفظه احتراق مشاهده شد که هر سه مدل جواب‌هایی مطابق با نتایج تجربی ارائه می‌دهند اما مدل توربولانسی $k-\epsilon$ RNG در مقایسه با نتایج تجربی جواب‌های بهتری را ارائه می‌دهد.
- در ترکیب مدل آشفته‌گی RNG با مدل احتراق مگنسن ملاحظه می‌شود که با افزایش عدد چرخش از صفر تا $1/24$ میزان دما به علت ایجاد گردابه‌های بیشتر و اختلاط بهتر سوخت و هوا و در نتیجه افزایش بیشتر راندمان احتراق، بالا می‌رود. ولی با افزایش عدد چرخش به بیش از ۲ اثر جریان برگشتی در امتداد محور بر اختلاط بهتر سوخت و هوا، برتری یافته و با توجه به پایین‌تر بودن دمای جریان برگشتی دمای محاسبه‌شده در امتداد محور کاهش می‌یابد.

فهرست علائم

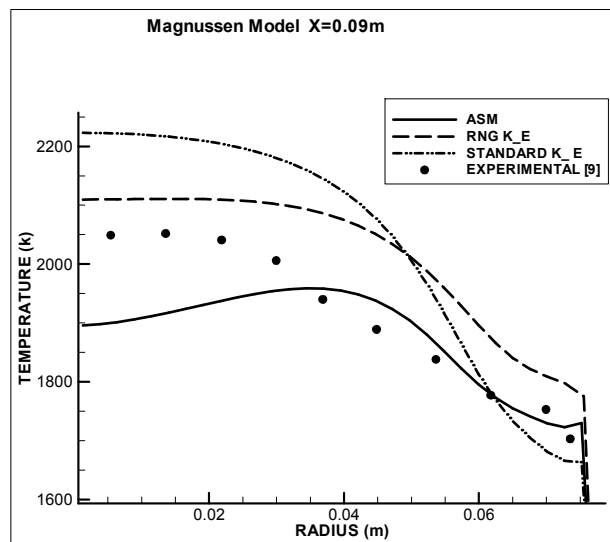
علائم لاتین	علائم یونانی
A_m	ثابت مگنسن
m_f	کسر جرمی سوخت
\bar{m}_{O_2}	غلظت اکسیژن
s	ضریب اکسیژن در معادله استوکیومتری سوخت و هوا
u, v, w	وقتی ضریب سوخت برابر یک باشد.
G_k	مؤلفه سرعت لحظه ای
G_b	ترم تولید برشی توربولانس
S	ترم تولید توربولانس در اثر شناوری
K	اندازه تانسور نرخ کرنش
SN	انرژی جنبشی توربولانس
T	عدد چرخش
	درجه حرارت
ϵ	اتلاف انرژی جنبشی آشفته‌گی
μ_t	ویسکوزیته دینامیک مغشوش
σ_k و σ_ϵ	اعداد پراختل مغشوش برای انرژی آشفته‌گی و اتلاف آن
ρ	دانسیته

مراجع

- [1]-Gran, I. R., Ertesvag, I. S., Magnussen, B. F., "Influence of turbulence modeling on predictions of turbulent combustion", *AIAA Journal*, Vol. 35, No. 1, pp. 106-110, 1997.
- [2]- Magnussen, B. F. and Hjertager, B. H., "Mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion",



شکل ۱۰: مقایسه پروفیل دما در امتداد شعاع برای حل عددی و آزمایشگاهی در $X=0.15m$



شکل ۱۱: مقایسه پروفیل دما در امتداد شعاع برای حل عددی و آزمایشگاهی در $X=0.09m$

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نمودارهای دما را در امتداد شعاع در مقطع $X = 0.15m$ و $X = 0.09m$ از طول محور محفظه احتراق با استفاده از ترکیب مدل احتراقی مگنسن با مدل‌های آشفته‌گی $k-\epsilon$ استاندارد، RNG و ASM نشان می‌دهند. هر سه مدل آشفته‌گی جواب‌های نزدیک به نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی کرده‌اند. با مقایسه این پروفیل‌ها توانایی بیشتر مدل $k-\epsilon$ RNG در پیش‌گویی دما از لحاظ شباهت منحنی و جواب مناسب نتیجه می‌شود.

نتیجه‌گیری

مدل‌سازی میدان جریان و دما با استفاده از ترکیب سه مدل آشفته‌گی با مدل احتراق مگنسن برای یک محفظه احتراق استوانه‌ای با سوخت مایع مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. بر این اساس نتایج نشان می‌دهند که:

- 16th Symposium (International) on Combustion, p.719, 1976.
- [3]- Yakhot, V., Orszag, S. A., "Renormalization group analysis of turbulence: I. Basic theory", *J. scientific computing*, Vol. 1, 1-51, 1986.
- [۴]- مقیمان، محمد و واله، حسین، "بررسی و مقایسه مدل‌های توربولانس ایزوتروپ و غیر ایزوتروپ در پیشگویی جریان مغشوش در محفظه احتراق چرخشی"، شانزدهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک، ISME2008، ایران، کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان، اردیبهشت ۱۳۸۷.
- [5]- Bilger, R. W., "Future progress in turbulent combustion research", *Progress in energy and combustion science*, Vol. 26, 376-380, 2000.
- [6]- Xia, J. L., Yadigaroglu, G., "Numerical and experimental study of swirling flow in a model combustor", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41, No. 11, 1485-1497, 1998.
- [7]- German, A. E., Mahmud, T., "Modeling of nonpremixed swirl burner flows using a Reynolds-stress turbulence closure", *Fuel*, Vol. 84, P. 583-594, 2005.
- [8]- Tabet-Helal, F., Sarh, B., Birouk, M. and Gökalp, I., "A comparative of turbulence modeling and combustion modeling in hydrogen-air nonpremix turbulent flame", *Computational Combustion 2007, Eccomas Thematic Conference*, 18-20 July 2007, Delft, The Netherlands.
- [9]- Khalil, E. E., "Modeling of furnaces and combustors", *CAIRO university press*, 1982.
- [10]- Fluent 6.1.22, User's Guide
- [11]- Spalding., D. B., "Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames", *13th Symp. (Int'l.) on Combustion, The Combustion Institute*, 1970.