

مقایسه مدل‌های توربولانسی یک معادله‌ای و دو معادله‌ای در تحلیل عددی انتقال حرارت موتورهای سوخت جامد

امیر قائیدرحمتی^{۱*}، جعفر غفوری^۲

سازمان صنایع هوافضا

(* نویسنده مخاطب: Email: a_gh172000@yahoo.com)

چکیده

هدف از این تحقیق، انتخاب مدل توربولانسی مناسب در تحلیل عددی بارگذاری حرارتی موتورهای سوخت جامد می‌باشد. برای این منظور میدان جریان داخلی در یک نمونه موتور سوخت جامد (موتور استاندارد) در زمان‌های مختلف، با استفاده از مدل توربولانسی یک معادله‌ای (Spalart-Allmaras) و دو معادله‌ای ($k-\epsilon$) حل عددی شده‌است. نتایج بدست آمده از روش عددی با نتایج حاصل از داده‌های بدست آمده از آزمایش استاتیک موتور، مقایسه و اعتباردهی شده‌است. براساس فیزیک جریان در داخل موتورهای سوخت جامد، معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، بقای مومنتوم و انرژی بوده که بطور همزمان و بصورت تقارن محوری تحلیل می‌گردد. برای اعمال اثرات هندسی گرین در میدان جریان، شبیه سازی میدان جریان در زمان‌های مختلف انجام شده‌است. به همین منظور در هر زمان ابعاد لحظه‌ای گرین با استفاده از برنامه مجزای شبیه‌سازی سوزش گرین، تعیین شده و در مدل‌سازی عددی جریان لحاظ می‌گردد. از نتایج مهم این تحلیل توزیع پارامترهای مختلف جریان (دما، فشار، عدد ماخ و ..) و نیز تعیین ضریب انتقال حرارت جابجایی برای دیواره‌های موتور می‌باشد. در نهایت برای اعتباردهی به نتایج، با حل گذرای معادله انتقال حرارت هدایت در پوسته موتور، توزیع دما در هر لحظه برای سه موقعیت مختلف، روی بدنه بیرونی به دست آمده که با مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمایش مقایسه شده‌است. مقایسه نتایج حل عددی با استفاده از مدل‌های توربولانسی تک معادله‌ای و دو معادله‌ای، با نتایج حاصل از آزمایش، دقت و کارایی هر مدل را در شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت موتورهای سوخت جامد نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: موتور سوخت جامد- انتقال حرارت- دینامیک سیالات محاسباتی- مدل‌های توربولانسی- آزمایش استاتیک

۱- مقدمه

به منظور ارزیابی و پیش بینی عملکرد یک راکت سوخت جامد، مطالعه دقیق بارهای فشاری و حرارتی ناشی از انتقال حرارت گازهای داغ حاصل از سوزش سوخت بسیار حائز اهمیت می‌باشد. مطالعه انتقال حرارت در جریان داخلی یک موتور سوخت جامد از پیچیدگی خاصی برخوردار است چراکه علاوه بر وجود بخش‌هایی با هندسه پیچیده (از جمله قفسه آتشزنه، پایه نگهدارنده سوخت) هندسه گرین نیز با گذشت زمان همواره در حال تغییر می‌باشد. به همین منظور بایستی برای پیش‌بینی انتقال حرارت در موتورهای سوخت جامد روش مناسبی را انتخاب نمود که ضمن سازگاری با فیزیک مسأله تا حد امکان از خطای کمتری برخوردار باشد. تحلیل انتقال حرارت در نازل این قبیل موشکها توسط محققان متعدد بررسی شده است [۱].

۱- کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، سازمان صنایع هوافضا

۲- دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی تبریز

هاشم‌زاده و همکاران مطالعاتی در زمینه انتقال حرارت نازل در موتور سوخت جامد انجام داده‌اند. نتیجه مطالعات ایشان، تهیه و تدوین یک کد کامپیوتری بوده‌است. در کد مورد نظر با حل معادلات دینامیک گاز در یک نازل همگرا-واگرا توزیع فشار، دما، سرعت، عددماخ و جرم مخصوص بدست می‌آید که با استفاده از این نتایج و بهره‌گیری از یک رابطه تجربی ضریب انتقال حرارت جابجایی در هر مقطع محاسبه شده و در نهایت با حل معادلات گذرای انتقال حرارت هدایت با روش تفاضل محدود و برای یک هندسه دو بعدی تقارن محوری، توزیع دما در پوسته نازل را تعیین می‌کند [۲]. اما تحلیل انتقال حرارت در بدنه موتور و با در نظر گرفتن تحلیل عددی جریان داخلی، کمتر مورد توجه قرار گرفته است و معمولاً طراحی و تحلیل سازه‌ای بدنه موتور با تکیه بر محاسبات مهندسی انتقال حرارت که برای هندسه‌های ساده مانند لوله وجود دارد استوار است [۳].

در تحقیق حاضر، سعی شده‌است مدل توربولانسی مناسبی برای تحلیل انتقال حرارت موتورهای سوخت جامد انتخاب شود که از دقت بالایی برخوردار باشد. امروزه روشهای دینامیک سیالات محاسباتی موسوم به CFD جایگاه ویژه‌ای در پیش‌بینی عملکرد سیستم‌ها دارند چراکه ضمن کاهش هزینه و صرفه‌جویی در وقت، از دقت نسبتاً خوبی نیز برخوردار هستند. اندازه‌گیری دقیق ضریب انتقال حرارت در جریانهای پیچیده مانند موتورهای سوخت جامد به سادگی امکان‌پذیر نبوده و مستلزم صرف وقت و هزینه زیادی می‌باشد. در این گونه موارد استفاده از تکنیک‌های عددی بسیار مقرون به صرفه می‌باشد. برای تعیین بارگذاری حرارتی داخلی موتورهای سوخت جامد، میدان جریان داخلی در درون لوله موتور، نازل، قفسه آتشزنه و پایه نگهدارنده سوخت در زمانهای مختلف، بصورت عددی تحلیل شده‌است. در این تحلیل اثرات هندسی گرین بر رژیم جریان نیز لحاظ شده‌است. برای هر مدل توربولانسی، مقادیر ضریب انتقال حرارتی جابجایی برای قسمت‌های مختلف موتور، در زمانهای مختلف استخراج شده‌است. شبکه‌بندی و تحلیل میدان جریان با استفاده از نرم‌افزار تجاری فلوئنت و گمبیت انجام شده‌است. لازم به ذکر است که استفاده از این نرم‌افزار نیازمند بهره‌گیری از دانش کافی در زمینه CFD و مدل‌سازی جریان دارد و اعمال شرایط مرزی و انتخاب روش حل مناسب در آن، مستلزم اشراف کامل بر نرم‌افزار و برخورداری از دانش و تجربه لازم می‌باشد. با استفاده از ضرایب انتقال حرارت بدست آمده از تحلیل عددی جریان، معادله انتقال حرارت هدایت در پوسته موتور به‌صورت گذرا تحلیل شده و توزیع دمای پوسته بیرونی در لحظات مختلف تعیین می‌شود. با نهایی شدن تحلیل انتقال حرارت در موتور استاندارد، نتایج بدست آمده از این روش با روش تقریب مهندسی و نتایج اندازه‌گیری در آزمایش استاتیک موتور، اعتباردهی و مقایسه شده‌است. مراحل مختلف تحلیل عددی انتقال حرارت شامل ساده‌سازی میدان جریان، تولید شبکه، شرایط مرزی، الگوریتم حل و پردازش نتایج، به تفصیل در این مقاله ارائه شده‌است.

۲- معرفی مدل‌های توربولانسی مطالعه شده در این تحقیق

به دلیل وجود جریان‌های کاملاً آشفته در کاربردهای صنعتی، استفاده از روش‌های مناسب مدل‌سازی که علاوه بر دارا بودن دقت بالا، از سرعت حل مناسبی هم برخوردار باشد بسیار حائز اهمیت است. از آنجایی که جریان‌های آشفته به شدت تحت تأثیر وجود دیواره‌ها می‌باشد بنابراین مدل توربولانسی که برای تحلیل عددی انتقال حرارت در موتورهای سوخت جامد به کار گرفته می‌شود بایستی ضمن سازگاری با فیزیک مسأله و شرایط مرزی میدان حل از دقت و سرعت همگرایی مناسبی نیز برخوردار باشد. در این تحقیق، دقت و سرعت همگرایی مدل‌های توربولانسی یک معادله‌ای (Spalart-Allmaras) و دو معادله‌ای ($k-\epsilon$) در تحلیل عددی جریان در موتورهای سوخت جامد مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌است. در مدل توربولانسی یک معادله‌ای (Spalart-Allmaras) فقط یک معادله انتقال تعریف می‌شود در صورتی که در مدل‌های توربولانسی دو معادله‌ای دو معادله انتقال مجزا برای k و ϵ در نظر گرفته می‌شود. مدل توربولانسی دو معادله‌ای $k-\epsilon$ خود شامل سه مدل مجزای Standard, RNG و Realizable می‌باشد. اگرچه سه مدل توربولانسی دو معادله‌ای، از فرم کلی یکسانی برخوردار هستند ولیکن

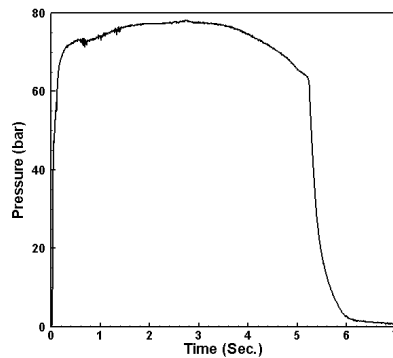
اختلاف اصلی آنها در روش محاسبه ویسکوزیته توربولنت، محاسبه اعداد پرناتل و ترم‌های تولید و اتلاف در معادله ϵ می‌باشد [۴].

۳- تحلیل عددی انتقال حرارت در موتورهای سوخت جامد

تحلیل جریان داخلی موتورهای سوخت جامد یکی از پیچیده‌ترین مسائل مهندسی می‌باشد. به منظور تحلیل دقیق میدان جریان بایستی یک جریان توربولانس، تراکم پذیر و چند جزئی که شامل چشمه‌های ناشی از احتراق سوخت بوده بر روی یک شبکه متحرک سه بعدی همراه با انتقال حرارت تشعشع و جابجایی به دیواره‌های موتور تحلیل گردد. حتی در نظر گرفتن برخی از عوامل دیگر از قبیل دمای اولیه، سوزش فرسایشی سوخت و... سبب پیچیده‌تر شدن تحلیل نیز خواهد شد. بنابراین تحلیل دقیق با در نظر گرفتن همه پدیده‌ها عملاً امکان پذیر نبوده و یا در صورت انجام، نیازمند وقت و هزینه بالای محاسباتی می‌باشد. البته می‌توان با ساده‌سازی‌های مناسب که بتواند پدیده‌های غالب را در تحلیل جریان و انتقال حرارت موتور در نظر بگیرد، تحلیل عددی میدان جریان را انجام داد که این موضوع، هدف مورد نظر مؤلفین می‌باشد. المانهای مختلفی که در مسیر جریان قرار می‌گیرند بر روی سرعت و مشخصه‌های جریان تأثیرگذار هستند و بطور موضعی می‌توانند افزایشی را در ضریب انتقال حرارت داشته باشند که بایستی در مدل‌سازی در نظر گرفته شوند. اما مشکل به این المانهای ثابت که با زمان هندسه آنها تغییر نمی‌کند ختم نمی‌شود بلکه مشکل اساسی، اثرات هندسی گرین بر رژیم جریان در لحظات اولیه عملکرد موتور است که قابل ملاحظه نیز می‌باشد چراکه دائماً هندسه با زمان تغییر می‌کند. برای اعمال اثرات هندسی گرین در میدان جریان، شبیه‌سازی میدان جریان در زمانهای مختلف انجام شده‌است و در هر زمان ابعاد لحظه‌ای سوخت که از شبیه‌سازی سوزش سوخت حاصل شده، مدل‌سازی می‌گردد. لازم به ذکر است که شرایط مرزی نیز متناسب با نرخ سوزش سوخت در حال تغییر است که در این شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. می‌توان جمع بندی نمود که در این تحلیل بجای تحلیل میدان جریان بر روی شبکه متحرک، میدان جریان بر روی چند شبکه ثابت در زمانهای مختلف که ابعاد هندسی گرین متناسب با نرخ سوزش سوخت تغییر یافته تحلیل می‌شود. با این روش اثرات هندسی گرین که سبب تغییر پورت عبور جریان می‌شود شبیه‌سازی شده است. در ضمن با توجه به اینکه نرخ سوزش و دبی ورودی جریان از نمودارهای تجربی محاسبه می‌گردد، نتایج شبیه‌سازی می‌تواند با دقت قابل قبولی با فیزیک جریان سازگار باشد و با این روش صرفه‌جویی زیادی در زمان و هزینه محاسباتی خواهد شد. در تحقیق حاضر، این روند تحلیل برای موتور استاندارد به عنوان یک موتور نمونه که نتایج آزمایش استاتیک آن وجود دارد ارائه می‌گردد.

۴- معرفی موتور استاندارد

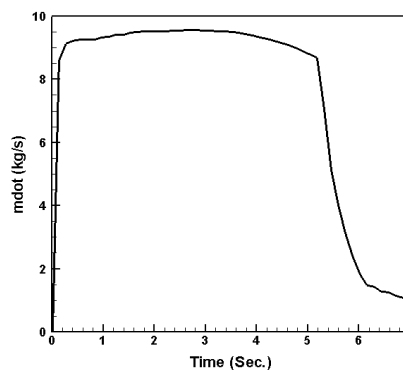
موتور استاندارد یک موتور تحقیقاتی است که به منظور تعیین ضربه ویژه و نرخ سوزش سوخت، با ابعاد هندسی مشخص و تحت شرایط ویژه‌ای که در مراجع بیان شده، طراحی و ساخته می‌شود. موتور استاندارد شامل اجزای اصلی، از جمله بدنه موتور، مجموعه نازل (همگرا، گلوگاه و واگرا)، درپوش نازل و آتش‌زنه می‌باشد [۵]. فشار داخل محفظه موتور استاندارد بر حسب زمان برای شرایط آزمایش در دمای محیط (۱۵ سانتی‌گراد) که توسط سیستم داده‌برداری ثبت شده در شکل ۱، ارائه شده است. در آزمایش استاتیک این موتور دمای پوسته بیرونی نیز در سه موقعیت مختلف توسط سنسور دما و سیستم داده‌برداری ثبت می‌گردد که نتایج آن در بخش نتیجه‌گیری، ارائه شده‌است.



شکل ۱- تغییرات فشار در موتور استاندارد (ثبت شده در آزمایش گرم موتور)

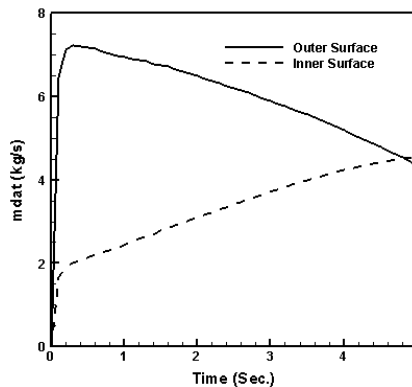
۵- شبیه‌سازی سوزش گرین

با استفاده از نمودار فشار- زمان موتور در دماهای مختلف (سرد، گرم و محیط) که از آزمایشات تجربی اندازه‌گیری شده و مشخصات ترموفیزیکی سوخت، به راحتی می‌توان نرخ سوزش سوخت (دبی جرمی موتور) و ابعاد هندسی گرین را در لحظات مختلف محاسبه نمود. برای این منظور برنامه شبیه‌سازی سوزش گرین با استفاده از سیمولینک نرم‌افزار (Matlab)، با نام Grain.mdl تهیه شده که خروجی‌های آن می‌تواند برای شبیه‌سازی عددی میدان جریان استفاده شود. گرین این موتور، درون- بیرون سوز بوده و سطوح داخلی و خارجی آن با نرخ سوزشی که متناسب با فشار لحظه‌ای درون محفظه می‌باشد بطور یکنواخت عقب نشینی می‌کند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی سوزش گرین، تغییرات زمانی دبی جرمی موتور در شکل ۲، ارائه شده‌است.



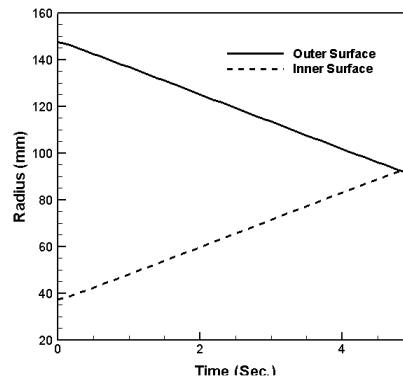
شکل ۲- تغییرات دبی جرمی کل تولید شده در موتور استاندارد (شبیه‌سازی سوزش گرین)

در شکل ۳، دبی جرمی تولید شده از سطوح داخلی و خارجی گرین در زمانهای مختلف عملکرد موتور ارائه شده‌است. این مقادیر به عنوان شرایط مرزی در شبیه‌سازی عددی میدان جریان داخلی روی سطوح گرین تعریف می‌شود.



شکل ۳- دبی جرمی تولید شده از سطوح داخلی و خارجی گرین (شبیه‌سازی سوزش گرین)

در شکل ۴، ابعاد هندسی لحظه‌ای گرین در مدت زمان عملکرد موتور ارائه شده‌است. از این مقادیر برای تولید شبکه در زمانهای مختلف استفاده می‌شود. بطور کلی اطلاعات مورد نیاز برای شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت که از برنامه شبیه‌سازی سوزش گرین نتیجه شده‌است، در جدول ۱، ارائه گردیده‌است.



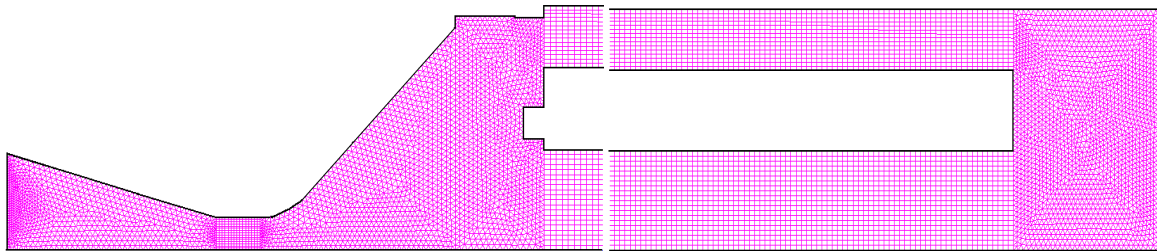
شکل ۴- تغییرات شعاع داخلی و خارجی گرین (شبیه‌سازی سوزش گرین)

جدول ۱- مشخصات هندسی گرین و برخی پارامترهای عملکردی موتور استاندارد در زمان‌های مختلف (شبیه‌سازی سوزش گرین)

زمان (ثانیه)					واحد	مشخصه
۴/۵	۳/۵	۲/۵	۱/۵	۰/۵		
مقدار						
۷۰/۹	۷۷/۰	۷۷/۸	۷۶/۴	۷۲/۹	(bar)	فشار متوسط محفظه
۹/۱۹	۹/۵۶	۹/۶۱	۹/۵۳	۹/۳۱	(kg/s)	دبی جرمی موتور
۸۸/۸۵	۷۷/۴۵	۶۵/۷۷	۵۴/۰۶	۴۲/۵۷	(mm)	شعاع داخلی گرین
۹۶/۱۵	۱۰۷/۶	۱۱۹/۲	۱۳۰/۹	۱۴۲/۴	(mm)	شعاع بیرونی گرین
۴/۴۲	۴/۰۰	۳/۴۲	۲/۷۸	۲/۱۴	(kg/s)	دبی جرمی از سطح داخلی گرین
۴/۷۸	۵/۵۶	۶/۱۹	۶/۷۴	۷/۱۷	(kg/s)	دبی جرمی از سطح بیرونی گرین

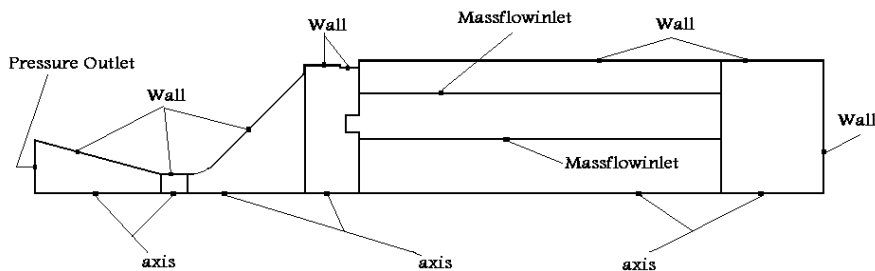
۶- تولید شبکه، شرایط مرزی و الگوریتم حل

با توجه به ماهیت تقارن محوری میدان جریان در داخل موتور، شبکه به صورت تقارن محوری ایجاد شد که ضمن لحاظ کردن اثرات همه‌المان‌های داخلی موتور، بویژه پایه سوخت، قفسه آتشزنه و گرین بتواند با دقت مناسبی رفتار جریان در نزدیک دیواره را منطبق با مدل توربولانسی انتخاب شده، مدل‌سازی نماید. شبکه تقارن محوری تولید شده برای موتور استاندارد در شکل ۵، ارائه شده است.



شکل ۵- شبکه تقارن محوری ایجاد شده داخل موتور در زمان ۱ ثانیه

تعیین نوع شرایط مرزی و تنظیم آنها یکی از مهمترین مراحل در تحلیل‌های دینامیک سیالات محاسباتی بوده که براساس فیزیک مسأله انتخاب می‌شود. در شکل ۶، شرایط مرزی استفاده شده در تحلیل عددی این موتور آورده شده است.

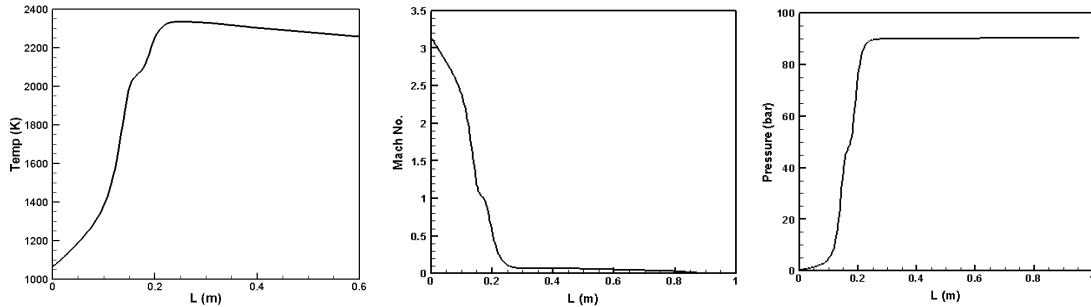


شکل ۶- میدان جریان و مرزهای مرتبط با آن

به منظور مقایسه دقت مدل‌های توربولانسی در تحلیل جریان داخلی موتور، شبکه میدان حل و نیز نوع شرایط مرزی معرفی شده در این بخش برای همه مدل‌های توربولانسی بکار گرفته می‌شود. برای تحلیل میدان جریان داخل موتور نیاز به مشخصات گازهای حاصل از احتراق نیز می‌باشد که مشخصات و خواص گازهای حاصل از احتراق با استفاده از نرم‌افزار احتراق تعادلی CEC استخراج شده است. انتخاب الگوریتم مناسب که بتوان با استفاده از آن تحلیل عددی انتقال حرارت در درون موتور را با دقت مطلوب انجام داد اهمیت ویژه‌ای دارد چراکه با وجود تحلیل کل میدان جریان، مقادیر ضریب انتقال حرارت جابجایی در نزدیکی دیواره‌ها از حساسیت بیشتری برخوردار می‌باشد. با مطالعات انجام شده برای الگوریتم‌های مختلف دیده شد که تحلیل عددی معادلات جریان بصورت کوپل شده (Coupled) نتایج منطقی‌تر و دقیق‌تری را ارائه می‌دهد. از طرفی انتخاب روش حل معادلات بصورت کوپل شده (Coupled) موجب می‌شود که زمان همگرایی حل، طولانی‌تر شود ولیکن همانطوریکه گفته شد به دلیل دقیق‌تر بودن نتایج، این مشکل قابل چشم‌پوشی است. در نتیجه معادلات پیوستگی، بقای مومنتوم و انرژی بطور همزمان و با استفاده از هر دو مدل توربولانسی یک معادله‌ای (Spalart-Allmaras) و دو معادله‌ای ($k-\epsilon$) حل شده و نتایج آنها ارائه گردیده است. گسسته‌سازی معادلات جریان به صورت ضمنی می‌باشد. لازم به ذکر است برای هر دو مدل توربولانسی، از توابع دیوار استاندارد که برای جریان‌های تراکم‌پذیر مناسب است، استفاده شده است.

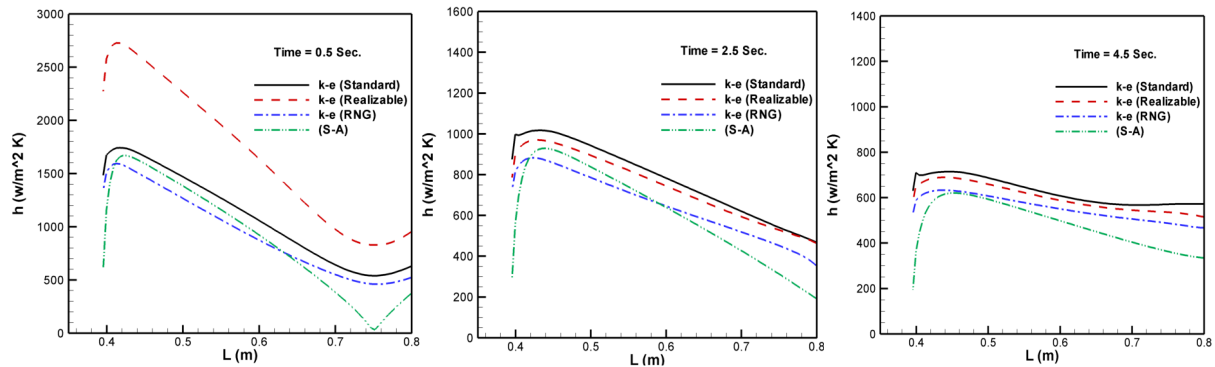
۷- نتایج تحلیل میدان جریان

از نتایج مهم شبیه‌سازی میدان جریان توزیع دما، فشار و عدد ماخ می‌باشد. بطور نمونه برای زمان ۰/۵ ثانیه، تغییرات فشار، دما و عدد ماخ به ترتیب در راستای طولی لوله موتور و نازل در شکل ۷، ارائه شده‌است.

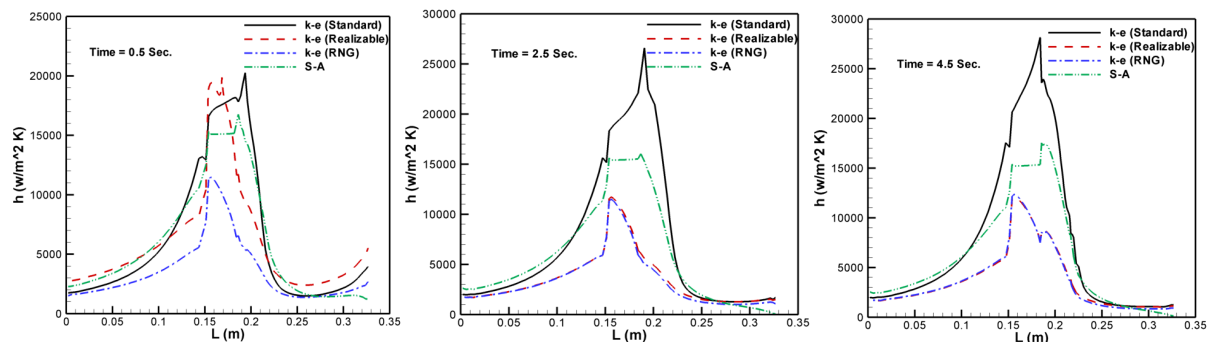


شکل ۷- تغییرات فشار، عدد ماخ و دما در راستای طولی لوله موتور و نازل برای زمان ۰/۵ ثانیه

در این شبیه‌سازی، شبکه تولید شده به نحوی است که سطح خروجی نازل در مختصات صفر قرار می‌گیرد. از دیگر نتایج مهم این تحلیل تعیین ضریب انتقال حرارت جابجایی برای قسمت‌های مختلف موتور می‌باشد. در شکل ۸ و شکل ۹، به ترتیب نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی لوله موتور و نازل در راستای طولی با استفاده از مدل‌های مختلف ارائه شده‌است.



شکل ۸- تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط لوله موتور در راستای طولی موتور برای زمانها و مدل‌های مختلف

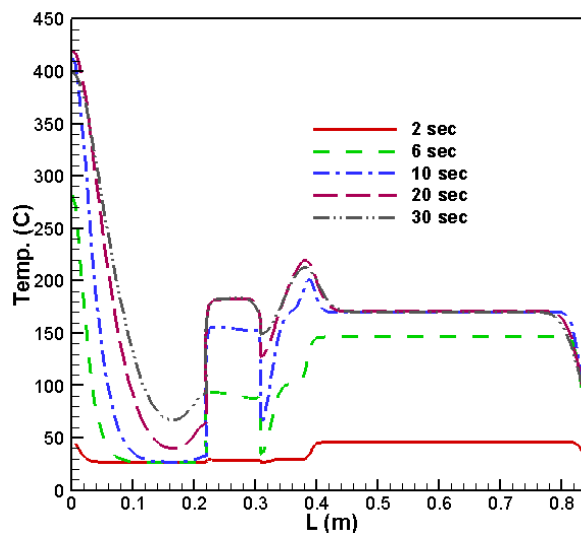


شکل ۹- تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط در راستای طولی نازل برای زمانها و مدل‌های مختلف

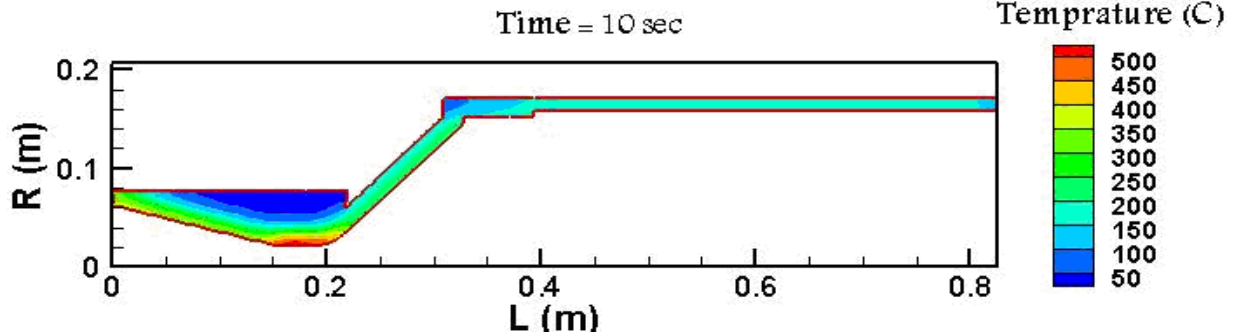
در نمودارهای ارائه شده در شکل ۸ و شکل ۹ مقدار ضریب انتقال حرارت محاسبه شده با استفاده از هر مدل توربولانسی در طول زمان کارکرد موتور و برای موقعیت‌های مختلف قابل مقایسه است.

۸- تحلیل انتقال حرارت هدایت در پوسته موتور

بر اساس مقادیر ضریب انتقال حرارت جابجایی که از تحلیل عددی میدان جریان داخلی موتور با استفاده از مدل‌های توربولانسی مختلف (در طول زمان کارکرد موتور) برای کلیه دیواره‌ها (لوله موتور، نازل و پایه نگهدار سوخت) استخراج شد، انتقال حرارت هدایت در پوسته موتور بصورت گذرا تحلیل عددی می‌گردد. با توجه به مقادیر استنتاج شده برای ضریب انتقال حرارت جابجایی در زمان‌های مختلف، برنامه `hstandard.c` نوشته شده است که به صورت `udf` (user define function) برای تمام دیواره‌های مختلف، مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی تعریف می‌شود. برای تمامی دیواره‌های خارجی پوسته موتور نیز با توجه به وجود انتقال حرارت جابجایی با هوای محیط، ضریب انتقال حرارت ثابتی معادل $20 \text{ W/m}^2\text{K}$ در نظر گرفته شده است. الگوریتم تحلیل عددی پوسته موتور شامل حل عددی گذرای معادله انرژی می‌باشد. هدف از تحلیل انتقال حرارت پوسته موتور استاندارد، استخراج تغییرات دمای دیواره‌های خارجی پوسته موتور نسبت به زمان و تعیین دقت مدل‌های مختلف توربولانسی می‌باشد. این روند نشان داد که مقادیر ضریب انتقال حرارت جابجایی که با استفاده از مدل توربولانسی دو معادله‌ای-RNG تعیین شده است نسبت به سایر مدل‌های دو معادله‌ای و یک معادله‌ای از دقت بالاتری برخوردار است. نتایج تحلیل عددی با استفاده از مدل توربولانسی دو معادله‌ای-RNG در این بخش ارائه گردیده است. در شکل ۱۰، تغییرات دما در پوسته خارجی موتور برای چند زمان مختلف، با استفاده از مدل RNG ارائه شده است. برای همین حالت، توزیع دما در پوسته موتور استاندارد برای زمان ۱۰ ثانیه در شکل ۱۱، نشان داده است.



شکل ۱۰- تغییرات دمایی دیواره خارجی موتور استاندارد برای چند زمان مختلف (نتایج حاصل از تحلیل عددی با کاربرد مدل توربولانسی دو معادله‌ای RNG)

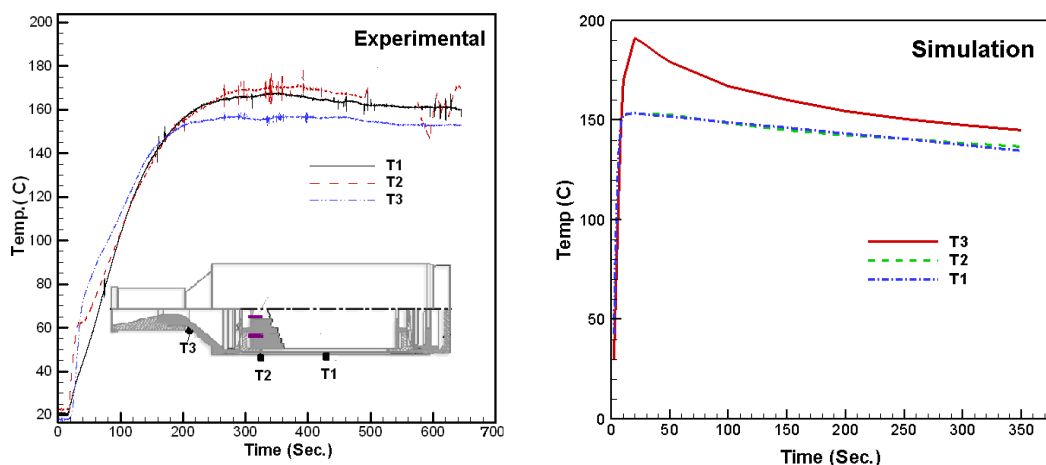


شکل ۱۱- توزیع دما در پوسته موتور استاندارد برای زمان ۱۰ ثانیه

(نتایج حاصل از تحلیل عددی با کاربرد مدل توربولانسی دو معادله‌ای (RNG))

۹- اعتباردهی به نتایج شبیه‌سازی

به منظور اعتباردهی به نتایج شبیه‌سازی، در آزمایش استاتیک موتور استاندارد از سه موقعیت مکانی مختلف بر روی دیواره خارجی پوسته موتور داده‌برداری دمایی انجام شد که نتایج حاصل از این داده‌برداری به همراه موقعیت سنسورهای دمایی در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱۲، ارائه شده‌است. با توجه به فیزیک جریان در داخل موتور انتظار می‌رود که در ابتدا دمای دیواره داخلی موتور در اثر انتقال حرارت با گازهای داغ حاصل از سوزش گرین، افزایش یافته و با گذشت زمان، شار حرارتی بیشتری در پوسته نفوذ کرده و موجب می‌شود که دمای دیواره خارجی رفته رفته افزایش یابد و به یک مقدار ماکزیمم برسد. در نهایت از طریق تبادل حرارت جابجایی پوسته، با هوای محیط دمای آن شروع به کاهش یافتن می‌کند. همه این فرآیند در شکل ۱۲، برای سه موقعیت مجزای T1، T2 و T3 روی دیواره خارجی پوسته موتور با استناد به نتایج شبیه‌سازی (مدل دو معادله‌ای-RNG) و آزمایش قابل مشاهده‌است. در نمودار تجربی شکل ۱۲، ملاحظه می‌گردد که تغییرات دما در موقعیت‌های سه‌گانه با نرخ زمانی کمتری در مقایسه با شبیه‌سازی در حال افزایش است این مسأله ناشی از زمان تأخیر سنسور دما و نحوه اتصال پروب آن به بدنه می‌باشد. با توجه به اینکه اطلاعات دقیق زمان تأخیر پروب سنسور و پارامترهای عملکردی آن در دسترس نیست، اطلاعات آن در شبیه‌سازی اعمال نشد.



شکل ۱۲- تغییرات دمایی دیواره خارجی موتور استاندارد نسبت به زمان

(نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی و تحلیل عددی با کاربرد مدل توربولانسی دو معادله‌ای (RNG))



بنابراین مقایسه لحظه‌ای دما در نمودارهای شبیه‌سازی با آزمایش منطقی نبوده ولیکن مقایسه مقدار ماکزیمم دو نمودار بدون توجه به زمان آن قابل استناد می‌باشد. مقایسه این پارامتر در دو حالت شبیه‌سازی و آزمایش تطابق رضایت بخشی را نشان می‌دهد. می‌توان نتایج حاصل از تحلیل عددی با استفاده از مدل دو معادله‌ای RNG را با نتایج حاصل از روابط مهندسی (که غالباً بصورت تجربی استخراج می‌شود) نیز مقایسه کرد. با توجه به هندسه لوله موتور می‌توان برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی بطور تقریبی از رابطه زیر استفاده نمود [۶].

$$Nu_d = 0.026 Re_d^{0.8} Pr^{0.4} \quad (1)$$

$$h = \frac{Nu.k}{D_H} \quad (2)$$

با استفاده از روابط ۱ و ۲ ضریب انتقال حرارت جابجایی برای زمان‌های مختلف محاسبه می‌شود و نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از تحلیل عددی در جدول ۲، مقایسه می‌گردد.

جدول ۲- مقایسه ضریب انتقال حرارت جابجایی محاسبه شده به دو روش تحلیل عددی و روابط مهندسی (برای لوله موتور)

ضریب انتقال حرارت جابجایی $(\frac{W}{m^2k})$			زمان (sec)
درصد اختلاف (%)	روابط مهندسی	تحلیل عددی (مدل دو معادله‌ای RNG)	
۹/۷	۱۹۵۵	۲۱۴۵	۰/۵
۱/۵	۸۸۷	۹۰۰	۲/۵
۲۳	۵۵۱	۶۸۰	۴/۵

با توجه به جدول ۲، ملاحظه می‌شود که بین مقادیر محاسبه شده برای دو روش تحلیل عددی و روابط مهندسی اختلاف فاحشی وجود ندارد. اما با توجه به اینکه روابط مهندسی از نتایج تجربی استنتاج می‌شوند این مقدار اختلاف، دور از انتظار نیست.

۱۰- نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق، انتخاب مدل توربولانسی مناسب در تحلیل عددی بارگذاری حرارتی موتورهای سوخت جامد می‌باشد. تعیین دقیق بارگذاری حرارتی موتورهای سوخت جامد در تحلیل سازه‌ای بخش‌های مختلف موتور و نیز طراحی و انتخاب عایق‌های حرارتی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این تحقیق، میدان جریان داخلی در یک نمونه موتور سوخت جامد (موتور استاندارد) در زمان‌های مختلف، با استفاده از مدل توربولانسی یک معادله‌ای (Spalart-Allmaras) و دو معادله‌ای ($k-\epsilon$) حل عددی شده‌است. با استفاده از نتایج حل عددی جریان آشفته درون موتور، مقادیر ضریب انتقال حرارت جابجایی برای بخش‌های مختلف تعیین شده و در گام بعدی معادله انتقال حرارت هدایت برای پوسته موتور به صورت گذرا حل عددی شده و تغییرات دمایی در پوسته موتور تعیین گردیده‌است. براساس فیزیک جریان آشفته درون موتورهای سوخت جامد، حل عددی جریان شامل حل معادلات پیوستگی، بقای مومنتوم و انرژی بوده که بطور همزمان و بصورت تقارن محوری تحلیل می‌گردد. در این تحقیق، اثرات هندسی گرین در میدان جریان نیز در نظر گرفته شده‌است. بطوریکه، در هر زمان ابعاد لحظه‌ای گرین با استفاده از برنامه مجزای شبیه‌سازی سوزش گرین، تعیین شده‌است و در مدل‌سازی عددی جریان لحاظ می‌گردد. در نهایت برای اعتباردهی به نتایج حل عددی و تعیین دقت مدل‌های توربولانسی تک معادله‌ای و دو معادله‌ای، مقادیر بدست آمده با نتایج آزمایش گرم موتور، مقایسه شده‌است. نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر، نشان می‌دهد هر چند سرعت همگرایی حل عددی، در مدل‌های توربولانسی دو معادله‌ای نسبت به مدل توربولانسی یک معادله‌ای پایین‌تر می‌باشد ولیکن مدل توربولانسی دو معادله‌ای RNG نسبت به سایر مدل‌های یک معادله‌ای و دو معادله‌ای دیگر از دقت بالاتری برخوردار است.

در این تحقیق دیده شد بین نتایج حاصل از تحلیل عددی و نتایج بدست آمده از آزمایش استاتیک موتور، تطابق رضایت‌بخش وجود دارد. آنچه اهمیت دارد آنست که ضمن انتخاب الگوریتم حل مناسب، (مطابق با روند بیان شده در این تحقیق) برای زمان‌های مختلف بر تناسب شبکه حل با مدل توربولانسی انتخاب شده، بویژه در نزدیک دیواره‌ها و نیز بالانس جرم و بالانس انرژی در میدان حل بسیار تأکید می‌شود. برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر و واقعی‌تر استفاده از مدل‌سازی عددی بر روی شبکه متحرک سه بعدی (Dynamic mesh) پیشنهاد می‌شود. با کاربرد شبکه متحرک سه بعدی می‌توان مدل‌سازی سوزش گرین را بطور دقیق منطبق با مدل واقعی سوزش و نیز با در نظر گرفتن سوزش فرسایشی شبیه‌سازی نمود. هر چند که استفاده از شبکه متحرک سه بعدی مستلزم صرف وقت و هزینه بالاتری می‌باشد.

مراجع

- 1- Diezer, H., and Huang, H., "Design of Liquid Propellant Rocket Engines", 2nd ed., NASA SP.125, 1968.
- ۲- هاشم زاده اهرنجانی، غ.، "انتقال حرارت گذرای دو بعدی در شیپوره همگرا-واگرا"، پنجمین کنفرانس مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، ۱۳۷۶.
- 3- Sutton, G., "Rocket Propulsion Elements an Introduction to the Engineering of Rockets", 6th ed., John Wiley & Sons, 2001.
- 4- Biswas, G., "Turbulent Flows", Alpha Science International Ltd., 2002.
- 5- Davenas, A., "Solid Rocket Propulsion Technology", Pergamon Press, 1990.
- ۶- هلمن، ف.، "انتقال حرارت"، ترجمه ملک‌زاده و کاشانی حصار، انتشارات فرید، ۱۳۷۰.