

تحلیل سه‌بعدی تاثیر شکل هندسی روزنه‌های اولیه خنک‌کاری بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای و تراست محفظه احتراق

مه‌دوی مقدم، حسین^۱ و بهمنی، اسدالله^{۲*}

۱- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

۲- کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

(دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۰۴/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۱۵)

چکیده

هدف از این مقاله، بررسی تأثیر شکل هندسی روزنه‌های ابتدایی بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای و تراست محفظه احتراق می‌باشد. بدین منظور، از روش عددی برای تحلیل و بررسی کانتور دما و محصولات احتراق استفاده گردید و نتایج بدست آمده با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفت و حاکی از تطابق قابل قبولی می‌باشد. جریان به صورت سه‌بعدی، پایا، تراکم‌ناپذیر، لزج، آشفتنه و همراه با تشعشع در نظر گرفته شد. احتراق موجود در محفظه احتراق مورد نظر به صورت یک احتراق غیر-پیش‌آمیخته می‌باشد. در این مقاله از اشکال هندسی دایره، مربع، مستطیل، مثلث متساوی الاضلاع و بیضی استفاده شد. نتایج بدست آمده حاکی از تأثیر قابل توجه شکل هندسی روزنه‌های اولیه خنک‌کاری بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای و تراست تولیدی از محفظه احتراق می‌باشد. مشاهده گردید که با افزایش طول به عرض روزنه‌هایی که برای خنک‌کاری مورد استفاده قرار گرفتند، می‌توان تراست و اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای را به مقدار قابل توجهی افزایش داد و در نهایت توصیه می‌گردد که برای روزنه‌های اولیه سیستم خنک‌کاری، از اشکال هندسی بدون گوشه‌های نوک‌تیز (دایره‌ای و یا بیضی شکل) استفاده گردد.
واژه‌های کلیدی: خنک‌کاری، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای، تراست، محفظه احتراق، شکل هندسی روزنه‌های خنک‌کاری

مقدمه

فرآیند خنک‌کاری لایه‌ای فرآیندی است که در آن با استفاده از تزریق یک جریان هوای ثانویه به داخل یک محفظه احتراق، از طریق تعدادی روزنه که در دیواره محفظه احتراق قرار گرفته است؛ از تماس مستقیم شعله و گازهای داغ ناشی از احتراق با دیواره محفظه احتراق جلوگیری به عمل می‌آید و به این صورت عمل خنک‌کاری بر روی دیواره مورد نظر صورت می‌گیرد. این روش خنک‌کاری برای اولین بار توسط هوتورن^۱، در سال ۱۹۵۵ میلادی ارائه گردید [۱]. از نخستین کارهای صورت گرفته در این مورد می‌توان به کار تجربی ایکرت^۲ و همکاران در سال ۱۹۶۶ م. اشاره کرد. آن‌ها دو گاز هوا و هلیوم را برای خنک‌کاری انتخاب نمودند و بعد از انجام تست‌های متعدد نشان دادند که اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در هنگام استفاده از هلیوم نسبت به هوا به مراتب بیشتر می‌باشد [۲]. در سال ۱۹۶۸ م. تالمور و کارلسون^۳، نشان دادند که شدت توربولانس از تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای

برخوردار است؛ به‌گونه‌ای که عموماً با افزایش شدت توربولانس در نقطه تزریق جریان خنک‌کننده، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای کاهش می‌یابد [۳]. در سال ۱۹۷۵ م. تاسینا و مارک^۴ نشان دادند که توربولانس بالا منجر به تفکیک سریع لایه خنک‌کاری می‌گردد که این امر منجر به کاهش اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای می‌گردد [۴]. در سال ۱۹۸۷ م. یاوزکورت و ویستر^۵، تأثیر نرخ دمش را بر روی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای مورد تحقیق و بررسی قرار دادند [۵]. در سال ۱۹۹۰ م. بیسن^۶ و همکاران، تأثیر دمای سیال تزریق شده از روزنه‌های محفظه احتراق را بر روی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای و درصد گازهای ناشی از احتراق را مورد تحقیق و بررسی قرار دادند [۶]. در سال ۱۹۹۸ م. لیگرانی^۷ و همکاران، خنک‌کاری لایه‌ای را با یک توده جریان نوسان‌دار مورد تحلیل و بررسی قرار دادند و نشان دادند که افزایش فرکانس نوسانات منجر به کاهش اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای می‌گردد [۷]. در سال ۱۹۹۹ م. مایته و جبران^۸، تأثیر زاویه تزریق سیال خنک‌کاری را مورد تحقیق و بررسی

وجود می‌آید، که در ناحیه فشار با افزایش سرعت چرخش، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای آدیاباتیک، ابتدا افزایش پیدا می‌نماید و سپس کاهش می‌یابد و این در حالی است که در ناحیه مکش این اثربخشی، به سرعت چرخش حساسیتی ندارد [۱۴]. در سال ۲۰۰۸م. جوانویچ^{۱۵} و همکاران، تأثیر عیب و نقص در روزنه‌های خنک‌کاری بر روی اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای را به صورت تجربی مورد تحقیق و بررسی قرار دادند و نشان دادند که اگر این نقص در نزدیکی قسمت خروجی جریان خنک‌کننده قرار داشته باشد، در نسبت‌های سرعت پایین، از تأثیر ناچیزی بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای برخوردار است [۱۵]. در سال ۲۰۰۹م. میچل^{۱۶} و همکاران، یک مطالعه تجربی و عددی بر روی پی‌آمدهای یک خنک‌کاری لایه‌ای بر روی یک دیواره با روزنه‌های فراوان در یک محفظه احتراق ساده شده، انجام دادند. آن‌ها نحوه ورود جریان خنک‌کننده را مورد تحقیق و بررسی قرار دادند [۱۶]. در سال ۲۰۰۹م. لی^{۱۷} و همکاران، خنک‌کاری لایه‌ای میکرو را به صورت تجربی مورد تحقیق و بررسی قرار دادند و نشان دادند که اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای میکرو بسیار بالا می‌باشد و این در حالی است که جریان هوایی که برای خنک‌کاری مورد استفاده قرار می‌گیرد، بسیار کم است [۱۷].

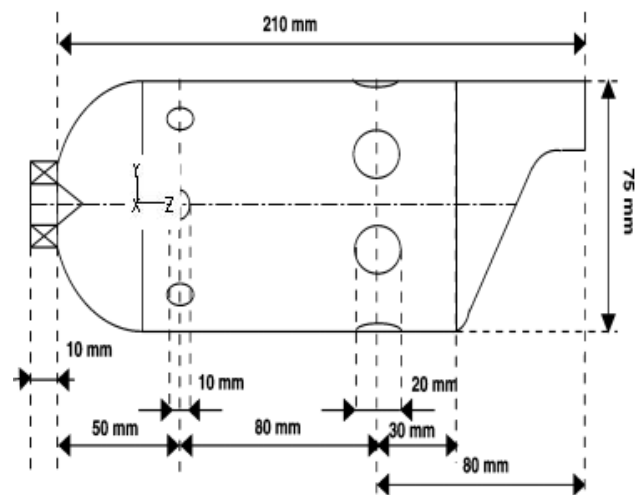
در نهایت با توجه به کارهای انجام شده و کار صورت گرفته در این مقاله می‌توان به این نکته اشاره نمود که در عمده کارهایی که تاکنون انجام شده است، خنک‌کاری لایه‌ای برای خنک‌کاری در مجاورت یک سیال داغ مورد استفاده قرار گرفته است؛ در حالی که در این پایان‌نامه، خنک‌کاری لایه‌ای در یک محفظه احتراق واقعی و به منظور ممانعت از برخورد شعله و محصولات یک احتراق واقعی با دیواره محفظه احتراق مورد استفاده قرار گرفته است. ضمناً در این مقاله تأثیر شکل هندسی روزنه‌های اولیه خنک‌کاری هم بر اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای و هم بر توان و تراست تولیدی محفظه احتراق مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

مدل هندسی و طرح عددی

محفظه احتراق مورد استفاده یک مدل با مقیاس $3/4$ ، از محفظه احتراق یک توربین گازی ساخته شده توسط شرکت رولز-رویز می‌باشد، که در شکل ۱ شمایی از آن نشان داده شده است [۶].

قرار دادند [۸]. در سال ۲۰۰۲م. تاکور^۹ و همکاران، خنک‌کاری لایه‌ای را در جریان مافوق صوت مورد تحقیق و بررسی قرار دادند و نشان دادند که با افزایش عدد ماخ، ضریب اصطکاک پوسته و نرخ انتشار و شدت توربولانس در لایه مرزی مورد نظر کاهش پیدا می‌نماید و توزیع یکنواخت سرعت به وسیله تزریق مماسی از طریق دیواره‌های متخلخل، منجر به کاهش اصطکاک پوسته و کم شدن میزان اختلاط و در نتیجه بهبود اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای می‌گردد. در نهایت اشاره نمودند که با هماهنگ نمودن جزئیات مدل ناویر - استوکس و مدل‌های انتگرالی با ارزیابی‌های تجربی، می‌توان تکنولوژی خنک‌کاری لایه‌ای را برای جریان‌های مافوق صوت به نحو چشمگیری رشد و گسترش داد [۹]. در سال ۲۰۰۳م. ایمیدو^{۱۰} و همکاران، یک بانک اطلاعاتی برای طراحی صحیح و درست پارامترهای روزنه‌های چندمنظوره مورد استفاده در خنک‌کاری لایه‌ای، ارائه دادند که در آن نسبتی مناسب بین هوای سرد مصرفی و سطح مطلوب درجه حرارت دیواره ارائه شده است [۱۰]. در سال ۲۰۰۵م. پنگ^{۱۱} و همکاران، طی مقاله‌ای جریان سیال را به چندین قسمت اصلی تقسیم نمودند که آن مناطق عبارت بودند از: منطقه جریان پشتی، منطقه اختلاط و منطقه پیشرو. در نهایت نشان دادند که ساختار یک جریان سیال می‌تواند متضمن غلظت و تراکم صحیح سوخت در داخل یک محفظه احتراق و تأثیر صحیح و مناسب توزیع هوا در میان روزنه‌های رقیق‌کننده با روزنه‌های کوچک خنک‌کاری باشد [۱۱]. در سال ۲۰۰۶م. لیو^{۱۲} و همکاران ایشان با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی و با استفاده از بخش CFX، نرم‌افزار Ansys احتراق و خنک‌کاری لایه‌ای در یک موتور هواتنفسی را مورد تحقیق و بررسی قرار دادند و نشان دادند که رفتار جریان در بعد از هر کدام از روزنه‌هایی که برای خنک‌کاری لایه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند، به شرایط وزش جریان و تأثیرات جریان اصلی و جریان رقیق‌کننده بسیار وابسته است [۱۲]. در سال ۲۰۰۷م. براون و زونگ^{۱۳} از روش شبیه‌سازی عددی مستقیم برای شبیه‌سازی و حل یک جریان خنک‌کاری با استفاده از روزنه‌های چندمنظوره استفاده نمودند [۱۳]. در سال ۲۰۰۸م. تاو^{۱۴} و همکاران ایشان، تأثیر چرخش بر روی خنک‌کاری لایه‌ای را با استفاده از تست‌های تجربی مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که به خاطر چرخش جریان دو ناحیه فشار و مکش در محفظه احتراق به

در این مقاله از روش عددی برای تحلیل و بررسی کانکتور دما و محصولات احتراق استفاده گردیده و از نرم‌افزار Fluent ۶.۳.۲۶ برای شبیه‌سازی‌های مورد نظر استفاده گردید. جریان به صورت سه بعدی، پایا، تراکم‌ناپذیر، لزج، آشفته و همراه با تشعشع در نظر گرفته شده. احتراق موجود در محفظه احتراق به صورت یک احتراق غیر- پیش‌آمیخته می‌باشد و برای شبیه‌سازی آن در نرم‌افزار فلونت در انتخاب مدل نقل و انتقالات و عکس‌العمل‌ها از مدل احتراق غیر- پیش‌آمیخته استفاده گردید. لازم بذکر است زمانی که این مدل انتخاب می‌گردد، باید یک جدول تابع احتمال چگالی^{۱۸} ایجاد نمود که آن جدول شامل اطلاعات گرما- شیمی^{۱۹} و فعل و انفعالات صورت گرفته می‌باشد. با انتخاب این مدل نرم‌افزار فلونت با استفاده از قانون گازها^{۲۰}، چگالی مخلوط و با استفاده از قانون اختلاط جرم- وزن^{۲۱}، ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط را محاسبه می‌نماید. مدل تشعشعی مورد استفاده، مدل Rosseland radiation می‌باشد. این مدل نسبت به مدل‌های دیگر سریع‌تر می‌باشد و برای تحلیل یک محفظه به حافظه کمتری نیاز دارد که این امر منجر می‌گردد که این مدل نسبت به مدل‌های دیگر مقرون بصرفه‌تر باشد. در این مدل برای بدست آوردن وقایع تابش، احتیاج به حل یک معادله اضافی نمی‌باشد. ضمناً این مدل برای ضخامت‌های نوری متوسط مناسب می‌باشد. مدل آشفتگی مورد استفاده، مدل RNG(k-ε) می‌باشد. این مدل با بکار بردن تکنیک‌های سخت عددی بدست آمده است. در ظاهر شبیه به مدل K-ε استاندارد می‌باشد، که اصلاحاتی در آن صورت گرفته است؛ پاره‌ای از این اصلاحات که منجر به انتخاب این مدل گردید عبارت است از اینکه، این مدل دارای عبارتی اضافی در معادله ε می‌باشد که به طرز عمده‌ای دقت محاسبات را بالا می‌برد. تأثیر چرخش در توربولانس و میزان دقت به دست آمده در این مدل لحاظ شده است. تئوری این مدل، فرمولی تحلیلی برای اعداد پرنتل توربولانس بیان می‌کند. در این مدل یک فرمول دیفرانسیلی تحلیلی برای لزجت موثر وجود دارد که منجر می‌گردد این مدل هم برای اعداد رینولدز بالا و هم اعداد رینولدز پایین کاربرد داشته باشد. برای حل معادلات حاکم از مدل فشار پایه و برای خطی‌سازی معادلات حاکم از فرم ضمنی استفاده گردیده است. در شبیه‌سازی‌ها با توجه به داده‌های موجود، برای روزنه‌های ورودی سیال خنک-کننده و روزنه‌های سوخت از شرط مرزی ورودی جریان

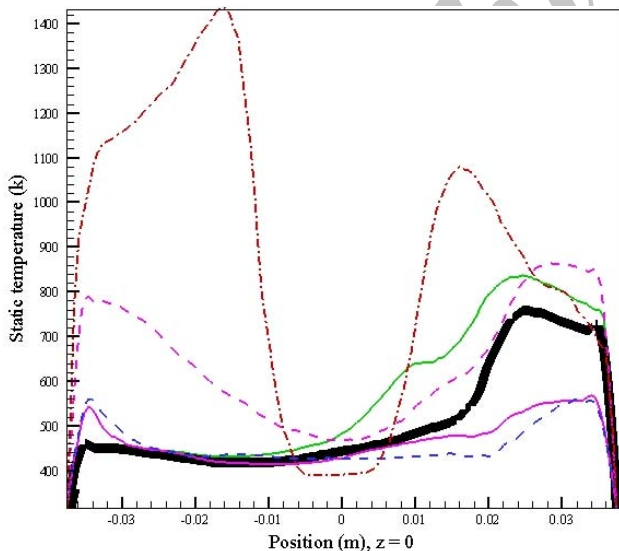


شکل ۱- شمایی از محفظه احتراق مورد استفاده [۶]

همانطور که مشاهده می‌شود، محفظه احتراق این مدل شامل یک سر نیمه کروی، یک قسمت توخالی استوانه‌ای و یک نازل حلقوی (این نازل در انتها متمایل به مستطیل می‌شود) می‌باشد [۶]. در قسمت ابتدایی این محفظه احتراق یک روزنه با قطر حدود ۲۳/۶۴۴۳ میلی‌متر قرار دارد، که از طریق آن هوا با دبی جرمی حدود ۰/۰۰۶۹ کیلوگرم بر ثانیه و درجه حرارت ۳۱۵ کلوین، به صورت چرخشی با زاویه ۴۵ درجه، وارد محفظه احتراق می‌گردد. در پیرامون این روزنه، ۱۰ عدد روزنه با قطر ۱/۷ میلی‌متر قرار دارد، که از طریق آن‌ها سوخت مورد استفاده (پروپان) به داخل محفظه احتراق تزریق می‌گردد. دبی جرمی کلی، پروپانی که از این ۱۰ روزنه وارد محفظه احتراق می‌گردد، در حدود ۰/۰۱۷۶ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد. در پیرامون قسمت استوانه‌ای شکل محفظه احتراق، دو ردیف روزنه قرار گرفته است؛ که از آن‌ها هوایی با دمای اولیه ۳۱۵ کلوین به داخل محفظه احتراق تزریق می‌گردد. لازم بذکر است که قطر منفذهای ردیف دوم دو برابر قطر منفذهای ردیف اول می‌باشد، ضمناً دبی جرمی جریان هوای ورودی از هر یک از روزنه‌ها در قسمت اولیه (روزنه‌هایی که در ردیف اول قرار دارند) و در قسمت رقیق‌ساز (روزنه‌هایی که در ردیف دوم قرار دارند) به ترتیب، ۰/۰۲۹۵۹ و ۰/۰۱۱۵۹۱ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد. در این محفظه، نسبت هوا به سوخت ۵۷ در نظر گرفته شده است [۶].

اثر تعداد نقاط موجود در مش می‌تواند به وجود بیاید، بگونه‌ای که اگر تعداد نقاط موجود از حد مورد نیاز بیشتر باشد، خطای برشی رخ می‌دهد و اگر تعداد نقاط موجود کمتر از حد مورد نیاز باشد در آن زمان خطای گرد کردن رخ می‌دهد. در واقع با بهینه نمودن مش مورد استفاده، تلاش می‌شود که خطاهای وابسته به تعداد نقاط موجود در مش به حداقل مقدار برسند. مش‌بندی محفظه احتراق توسط نرم‌افزار Gambit ۲.۳.۱۶ انجام شد. برای ایجاد مش بهینه، ۶ مش مختلف تولید گردید، و بروی هر کدام از آن‌ها یک شبیه‌سازی انجام گردید و پلات‌های حاصل از آن‌ها ذخیره شد و همه آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار Tecplot بر روی هم قرار گرفت. در نهایت پلات‌های ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفت.

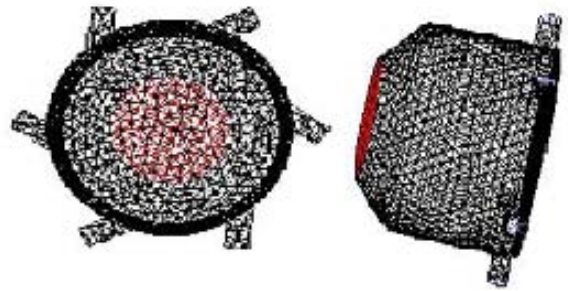
در این مقاله به منظور تعیین مش بهینه، پلات دمای استاتیک در مش‌های تولید شده مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در شکل ۳، پلات دمای استاتیک بر صفحه میانی افقی در محل تقاطع قسمت کروی با قسمت استوانه‌ای محفظه احتراق نمایش داده می‌شود. در پلات حاصل، نمودارهایی که از اختلاف فاحشی با دیگر نمودارها برخوردار بودند، حذف گردیدند. در بین نمودارهای باقیمانده که نمایانگر مش‌های باقیمانده می‌باشند، با توجه به زمان کارگذاری و هزینه محاسباتی، مش بهینه برای انجام شبیه‌سازی‌های مورد نظر انتخاب گردید.



شکل ۳- پلات دمای استاتیک بر صفحه میانی افقی در محل تقاطع قسمت کروی با قسمت استوانه‌ای محفظه احتراق

جرمی^{۲۲} و برای قسمت ورودی هوای اصلی از شرط مرزی ورودی سرعت^{۲۳} و برای قسمت خروجی محفظه احتراق از شرط مرزی جریان خروجی^{۲۴} (گرادیان فشار ناچیز در نظر گرفته شده است) استفاده گردید.

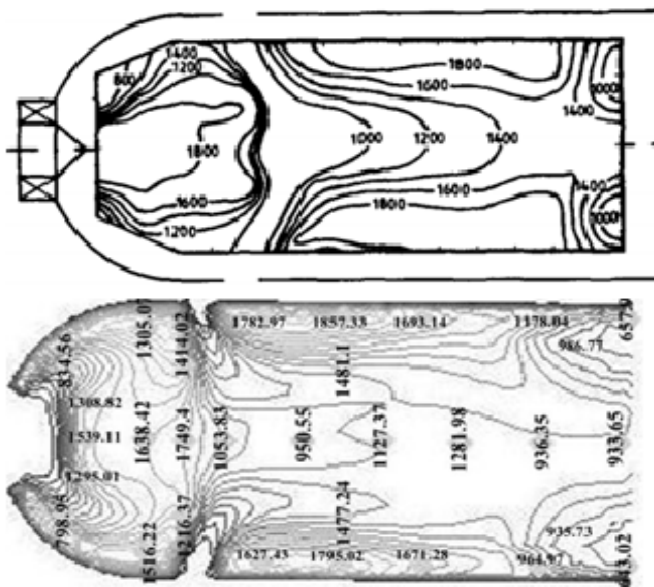
در محفظه احتراق مورد نظر جریان هوای ورودی اصلی می‌باید به صورت چرخشی با زاویه ۴۵ درجه وارد محفظه احتراق گردد، که برای ایجاد این جریان چرخشی با زاویه مورد نظر از یک شکل هندسی خاص استفاده گردید. شکل هندسی مورد نظر از یک استوانه تشکیل شده است، که از یک طرف به یک مخروط و از طرف دیگر به شش عدد استوانه کوچک‌تر ختم می‌گردد؛ که استوانه‌های کوچکتر با زاویه ۴۵ درجه نسبت به استوانه بزرگتر (نسبت به محور افقی) قرار گرفته‌اند و از طریق آن‌ها جریانی به مقدار جریان مورد نیاز در ورودی اصلی هوا، به داخل استوانه تزریق می‌گردد. در ابتدا شکل هندسی ذکر شده مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد و خروجی حاصل از آن به صورت یک پروفایل ذخیره می‌گردد و در هنگام شبیه‌سازی محفظه احتراق از پروفایل ایجاد شده برای تعریف مشخصات شرط مرزی جریان هوای اصلی استفاده می‌گردد. در شکل ۲، نمایی از شکل هندسی مورد استفاده برای ایجاد چرخش با زاویه ۴۵ درجه در جریان هوای اصلی نشان داده می‌شود.



شکل ۲- شکل هندسی مورد استفاده برای ایجاد جریان چرخشی با زاویه ۴۵ درجه

در انتخاب مش و شبکه مورد استفاده برای انجام شبیه‌سازی‌ها باید ملاحظات خاصی را مدنظر قرار داد که از جمله آن‌ها می‌توان به زمان کارگذاری مش و هزینه محاسبات اشاره نمود. در هنگام انتخاب مش و شبکه مورد استفاده باید بهینه‌ترین مش موجود را مورد استفاده قرار داد. به طور کلی هدف از بهینه نمودن مش مورد استفاده کاهش میزان خطاهایی است که بر

مقدار نزدیک به یکدیگر می باشند و اختلاف عددی بین آنها اندک می باشد.



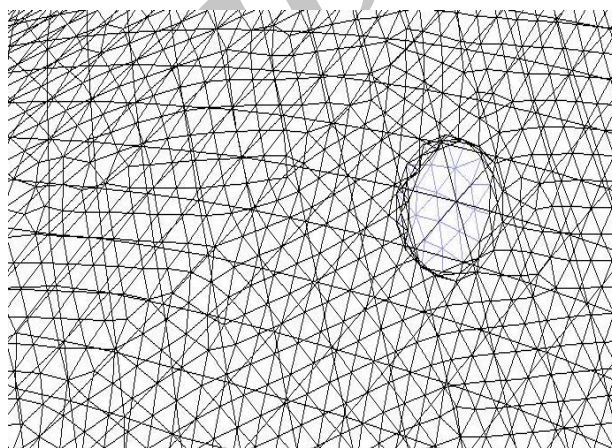
شکل ۵ - کانتور دمای استاتیک در صفحه میانی افقی (تصویر اول مربوط به مقاله مرجع [۶] و تصویر دوم مربوط به شبیه سازی عددی صورت گرفته می باشد)

ضمناً مشاهده می گردد که در هر دو کانتور دمای استاتیک در نزدیک به دیواره ها و در قسمت مرکزی قسمت کروی شکل محفظه احتراق، نسبت به سایر نقاط ماکزیمم مقدار می باشد و مقدار آنها در کانتور مرجع ۱۸۰۰ کلوین و در کانتور حاصل از شبیه سازی، در نزدیکی دیواره ها بین ۱۶۹۳ تا ۱۸۹۲ کلوین و ۱۶۲۷ تا ۱۷۹۵ کلوین و در قسمت کروی شکل بین ۱۶۳۸ تا ۱۷۴۹ کلوین می باشد. از طرفی مشاهده می گردد، که در دو کانتور موجود، دمای استاتیک در قسمت خروجی محفظه احتراق نیز به یکدیگر نزدیک می باشد و مقدار آن در کانتور مرجع ۱۰۰۰ کلوین و در کانتور حاصل از شبیه سازی بین ۹۳۵ تا ۹۸۶ کلوین می باشد. همچنین در قسمت میانی کانتورها نیز دمای استاتیک به یکدیگر نزدیک می باشد و مقدار آن در کانتور مرجع بین ۱۰۰۰ تا ۱۴۰۰ کلوین و در کانتور حاصل از شبیه سازی بین ۹۵۰ تا ۱۲۸۱ کلوین می باشد. با توجه به اینکه مقدار و مکان شکل گیری، ماکزیمم دمای استاتیک در هر دو کانتور به یکدیگر نزدیک است و شرایط هر دو کانتور در قسمت خروجی محفظه احتراق به یکدیگر نزدیک می باشد؛ می توان نتیجه گرفت که کانتور حاصل از شبیه سازی،

در شکل ۳، نموداری که نسبت به سایر نمودارها ضخیم تر می باشد، مربوط به مش بهینه انتخاب شده است. لازم بذکر است که برای محفظه احتراق از یک مش یکنواخت استفاده شد و فقط در قسمت ورودی سیال ها، مش مورد استفاده تصحیح گردید. در نهایت مش مورد استفاده عبارت بود از:

Nodes = ۵۲۰۹۳
Element = The/hybrid
Type = hex core

در شکل ۴، نمایی از مش مورد استفاده در کنار یکی از روزنه های اولیه نشان داده می شود.

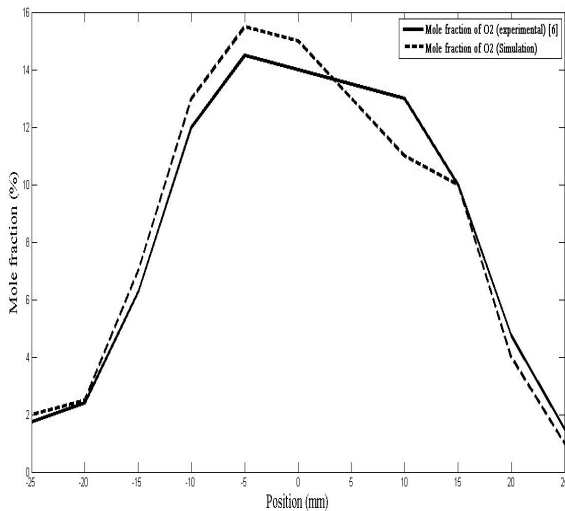


شکل ۴ - نمایی از مش مورد استفاده

صحت سنجی شبیه سازی عددی صورت گرفته

حداکثر دمای تولیدی در محفظه احتراق مرجع، ۱۸۰۰ کلوین می باشد [۶] و این در حالی است که در شبیه سازی عددی صورت گرفته، حداکثر دمای تولیدی ۱۸۹۲/۱۹۶ کلوین می باشد و از طرفی دیگر در مقاله مرجع، پارامتری با نام فاکتور الگو (که در بردارنده ویژگی های کلی محفظه احتراق می باشد)، تعریف شده که مقدار آن در مقاله مرجع، ۰/۴۶ می باشد [۶] در حالی که در شبیه سازی عددی صورت گرفته مقدار این پارامتر ۰/۴۳۹۴ می باشد. در ضمن می توان در شکل ۵، کانتور دما در صفحه میانی افقی در مقاله مرجع با کانتور حاصل از شبیه سازی عددی صورت گرفته را مورد مقایسه و بررسی قرار داد. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود، کانتور حاصل از شبیه سازی در تعداد زیادی از مناطق با کانتور مقاله مرجع از لحاظ

های مقاله مرجع شبیه می‌باشند و از طرفی مقادیر آن‌ها در هر نقطه نیز به یکدیگر نزدیک است. برای حصول اطمینان بیشتر، در شکل ۷، نمودارهای کسر مولی اکسیژن، ایجاد شده از شبیه سازی و مقاله مرجع؛ در یک پلات نشان داده می‌شوند.



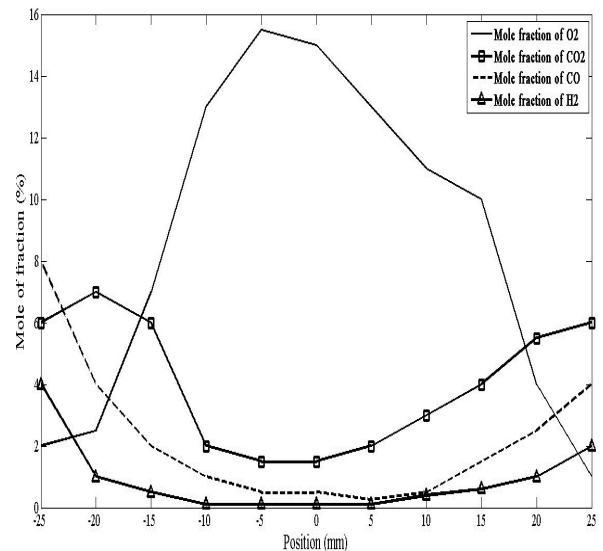
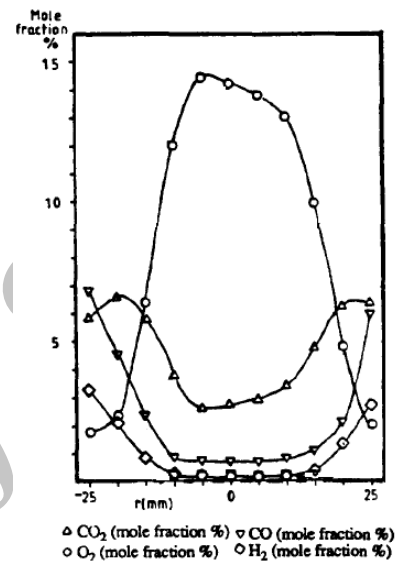
شکل ۷- مقایسه میان پلات کسر مولی O₂ در مقاله مرجع [۶] با پلات حاصل از شبیه‌سازی عددی صورت گرفته

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، دو نمودار به یکدیگر شبیه و تقریباً مقدار آن‌ها در هر نقطه به یکدیگر نزدیک می‌باشد. لازم به ذکر است که درصد خطا در پلات مربوط به کسر مولی اکسیژن ۳/۷۳۷ درصد می‌باشد. در نهایت با توجه به مطالب ارائه شده، می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی عددی صورت گرفته از دقت قابل قبولی برخوردار بوده است.

نتایج

در این قسمت شکل هندسی روزنه‌های ورودی اولیه تغییر داده می‌شود و نتایج مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. در محفظه احتراق مورد نظر زاویه روزنه‌های اولیه تزریق جریان خنک-کننده، زاویه ساده با مقدار صفر درجه می‌باشد. شکل روزنه‌های تزریق جریان خنک‌کننده رقیق‌ساز، دایره‌ای شکل و ثابت می‌باشد. در این بررسی از اشکال مربع، مستطیل، دایره، مثلث متساوی الاضلاع و بیضی برای روزنه‌های اولیه استفاده گردیده است، که این انتخاب به گونه‌ای صورت گرفت که مساحت آن اشکال با یکدیگر برابر و مقدار ثابت ۷۶/۵۴ میلیمتر مربع باشد. در شکل ۸، نمایی از اشکال مورد استفاده نمایش داده می‌شود.

از دقت قابل قبولی برخوردار است. از طرفی می‌توان در شکل ۶- پلات کسر مولی اکسیژن، هیدروژن، مونوکسیدکربن و دی-اکسیدکربن؛ ایجاد شده از شبیه‌سازی را با پلات ایجاد شده از نتایج تجربی مورد مقایسه و بررسی قرار داد. لازم بذکر است که این پلات‌ها مربوط به منطقه‌ای در راستای افقی محفظه احتراق و عمود بر جهت جریان و به فاصله ۸۰ میلیمتری از مبداء مختصات می‌باشند.

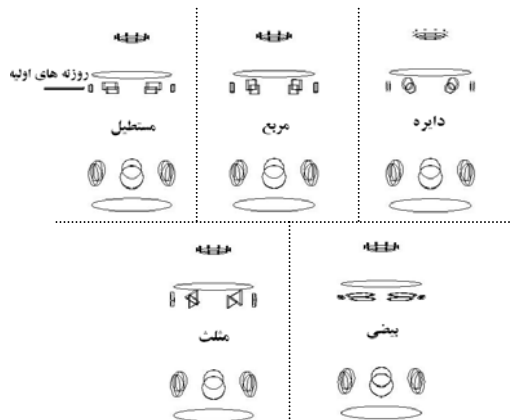


شکل ۶- پلات‌های کسر مولی (تصویر اول مربوط به مقاله مرجع [۶] و تصویر دوم مربوط به شبیه‌سازی عددی صورت گرفته می‌باشد)

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، شکل پلات‌های حاصل از شبیه‌سازی انجام شده، تقریباً تا حدود زیادی به شکل پلات-

جدول ۱ - اطلاعات مستطیل‌های مورد استفاده

ردیف	طول	عرض	راستای قرارگیری طول مستطیل
۱	۱۹/۶۳۴۹	۴	عمود بر جهت حرکت جریان
۲	۱۵/۷۰۷۹	۵	عمود بر جهت حرکت جریان
۳	۱۳/۰۸۹۹	۶	عمود بر جهت حرکت جریان
۴	۱۹/۶۳۴۹	۴	در راستای جهت حرکت جریان
۵	۱۵/۷۰۷۹	۵	در راستای جهت حرکت جریان
۶	۱۳/۰۸۹۹	۶	در راستای جهت حرکت جریان



شکل ۸ - نمایی از اشکال مورد استفاده

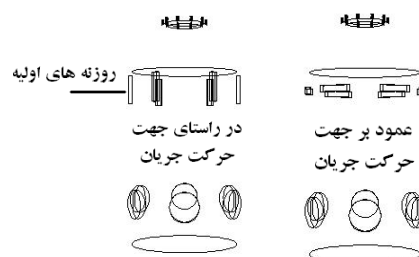
بعد از انجام شبیه‌سازی‌های مورد نظر، جدول و پلات‌های زیر حاصل گردید.

جدول ۲ - پاره‌ای از نتایج حاصل

ردیف	متوسط دمای استاتیک خروجی (کلوین)	متوسط دمای استاتیک دیواره استوانه‌ای شکل محفظه احتراق (کلوین)	اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای
۱	۶۰۵/۶۰۳۲	۱۰۳۹/۴۶۲۵	۰/۴۰۶۱
۲	۶۰۲/۲۳۴۴	۱۰۷۶/۱۹۸۵	۰/۳۸۳۵
۳	۶۰۰/۹۲۲۱	۱۰۸۱/۴۶۰۷	۰/۳۵۹۷
۴	۵۹۳/۲۶۵۷	۱۰۸۸/۰۱۲۲	۰/۳۷۵۸
۵	۵۹۳/۶۳۵۱	۱۱۰۷/۲۶۵	۰/۳۵۸۱
۶	۵۹۹/۲۳۵۲	۱۰۹۸/۵۸۶۳	۰/۳۶۳۵

با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که، متوسط دمای استاتیک خروجی و اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای در مستطیل ردیف ۱ نسبت به سایر مستطیل‌ها بیشتر می‌باشد و از طرفی متوسط دمای استاتیک دیواره استوانه‌ای شکل محفظه احتراق در مستطیل ردیف ۱ از سایر مستطیل‌ها کمتر می‌باشد. ضمناً مشاهده می‌گردد که، اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای و متوسط دمای استاتیک خروجی؛ در مستطیل ردیف ۱ نسبت به مستطیل ردیف ۴، مستطیل ردیف ۲ نسبت به مستطیل ردیف ۵ و مستطیل ردیف ۳ نسبت به مستطیل ردیف ۶، به مراتب بیشتر می‌باشند. در شکل ۱۰، نمودار مربوط به دمای استاتیک در مستطیل‌های مورد نظر در تقاطع صفحه افقی میانی با صفحه انتهایی محفظه احتراق نشان داده می‌شود.

نکته قابل توجه در باب اشکال هندسی مورد استفاده، در این می‌باشد که در اشکال هندسی مستطیل و بیضی، می‌توان با اعداد متفاوت به مساحت مورد نظر رسید. مثلاً در مورد مستطیل می‌توان از طول و عرض‌های $۴ * ۱۹/۶۳۴۹$ و یا $۵ * ۱۵/۷۰۷۹$ و یا $۶ * ۱۳/۰۸۹۹$ استفاده نمود. از طرفی لازم به بررسی است که، نحوه قرارگیری آن‌ها بهتر است که به چه صورت باشد؟ طول مستطیل مورد استفاده در راستای جهت حرکت جریان باشد و یا اینکه عمود بر جهت حرکت جریان باشد؟ در شکل ۹، نحوه‌های قرارگیری طول روزنه‌های اولیه مستطیل شکل نشان داده شده است.

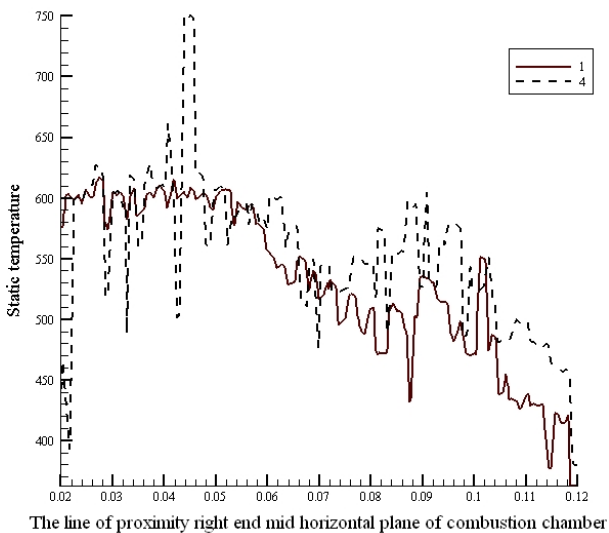


شکل ۹ - نحوه‌های قرارگیری طول روزنه‌های اولیه مستطیل شکل

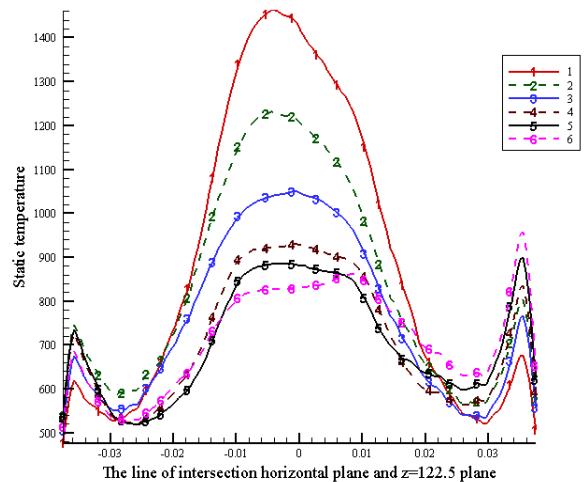
برای رسیدن به یک بینش لازم در این جریان، بر روی ۶ مستطیل، شبیه‌سازی عددی صورت می‌گیرد و بعد از انجام بررسی‌های مورد نظر در باب آن‌ها نظر داده می‌شود. در جدول ۱، اطلاعات مستطیل‌های مورد استفاده نشان داده می‌شود.

(مستطیل‌های ردیف ۱ و ۲ و ۳)، با افزایش نسبت طول به عرض مستطیل، درصد سیال خنک‌کننده بسیار کمتری به داخل محدوده شعله تزریق می‌گردد، که در انتها منجر به افزایش توان و تراست ناشی از محفظه احتراق می‌گردد. علت را می‌توان به این صورت بیان نمود که با افزایش نسبت طول به عرض، مقدار سیال خنک‌کننده‌ای که در راستای سیال اصلی قرار می‌گیرد، کمتر می‌گردد و در نتیجه در هنگام برخورد این دو جریان با یکدیگر، احتمال نفوذ سیال خنک‌کننده به داخل جریان اصلی کمتر می‌گردد که در نتیجه، سیال خنک‌کننده در مجاورت دیواره محفظه احتراق باقی می‌ماند؛ که منجر به افزایش توان و تراست می‌گردد. البته لازم بذکر است که افزایش نسبت طول به عرض، نباید از حد خاصی بیشتر گردد، چون در این صورت دبی جرمی سیال خنک‌کننده به حداقل میزان خود می‌رسد که این امر مطلوب نمی‌باشد.

در شکل ۱۱ و شکل ۱۲، دمای استاتیک در مجاورت دیواره محفظه احتراق، در مستطیل‌های ردیف ۱ و ردیف ۴، مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم بذکر است که در مستطیل‌های ردیف ۱ و ۴، نسبت طول به عرض ثابت می‌باشد و تفاوت آن‌ها در راستای قرارگیری طول مستطیل‌ها می‌باشد؛ به گونه‌ای که در مستطیل ردیف ۱، طول مستطیل عمود بر جهت حرکت جریان و در مستطیل ردیف ۴، طول مستطیل در راستای حرکت جریان قرار دارد.



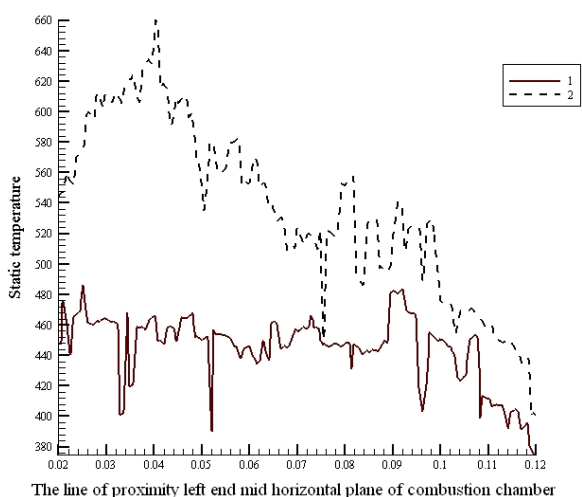
شکل ۱۱- مقایسه دمای استاتیک در مجاورت دیواره سمت راست محفظه احتراق در مستطیل‌های ردیف ۱ و ۴



شکل ۱۰- دمای استاتیک در تقاطع صفحه افقی میانی با صفحه انتهایی محفظه احتراق

با توجه به شکل ۱۰، مشاهده می‌شود که در مستطیل ردیف ۱، دمای استاتیک در نزدیکی دیواره‌های محفظه احتراق نسبت به سایر مستطیل‌ها کمتر می‌باشد، در حالی که دمای استاتیک در قسمت مرکزی محفظه احتراق در مستطیل ردیف ۱، نسبت به سایر مستطیل‌ها به مراتب بیشتر می‌باشد. این بدان معنا می‌باشد که در مستطیل ردیف ۱، درصد بسیار کمتری از هوایی که به منظور خنک‌کاری لایه‌ای به داخل محفظه احتراق وارد می‌گردد؛ وارد محدوده شعله می‌شود و قسمت اعظم آن در مجاورت دیواره محفظه احتراق باقی می‌ماند که در نهایت منجر به ایجاد یک خنک‌کاری لایه‌ای بهینه می‌گردد. از طرفی هنگامی که درصد هوای کمتری وارد محدوده شعله گردد، دمای استاتیک شعله کاهش کمتری پیدا می‌کند که منجر به افزایش دمای استاتیک گازهای داغ ناشی از احتراق در قسمت خروجی محفظه احتراق می‌گردد که در نهایت منجر به افزایش توان و تراست ناشی از محفظه احتراق می‌گردد.

در نهایت با توجه به جدول ۲ و شکل ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت، که اگر راستای قرارگیری طول مستطیل، عمود بر جهت حرکت جریان باشد؛ درصد سیال خنک‌کننده بسیار کمتری به داخل محدوده شعله محفظه احتراق تزریق می‌گردد، که این امر باعث افزایش دمای شعله و در نتیجه افزایش متوسط دمای استاتیک گازهای داغ ناشی از احتراق در قسمت خروجی محفظه احتراق می‌گردد؛ که در نتیجه میزان توان و تراست تولیدی افزایش می‌یابد. از طرفی مشاهده می‌شود در مستطیل‌هایی که راستای قرارگیری طول آن‌ها، عمود بر جهت حرکت جریان می‌باشد



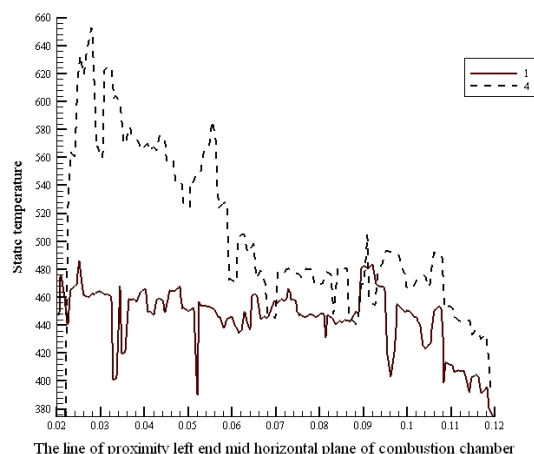
شکل ۱۴- مقایسه دمای استاتیک در مجاورت دیواره سمت چپ
محفظه احتراق در مستطیل های ردیف ۱ و ۲

با توجه به شکل ۱۳ و شکل ۱۴ می توان دریافت، که با افزایش نسبت طول به عرض مستطیل های مورد نظر، درصد بیشتری از سیال خنک کننده در مجاورت دیواره محفظه احتراق قرار می گیرد، که این امر منجر به کاهش دمای استاتیک دیواره و در نتیجه افزایش اثربخشی خنک کاری لایه ای می گردد. حال بعد از حصول نتایج فوق در این قسمت شکل هندسی روزه های اولیه خنک کننده محفظه احتراق تغییر داده می شود؛ تا بتوان دریافت که شکل هندسی روزه های خنک کاری تا چه اندازه در اثربخشی خنک کاری لایه ای و تراست می تواند تأثیرگذار باشد. در جدول ۳ مشخصات اشکال مورد استفاده نشان داده می شود.

جدول ۳- مشخصات اشکال مورد استفاده

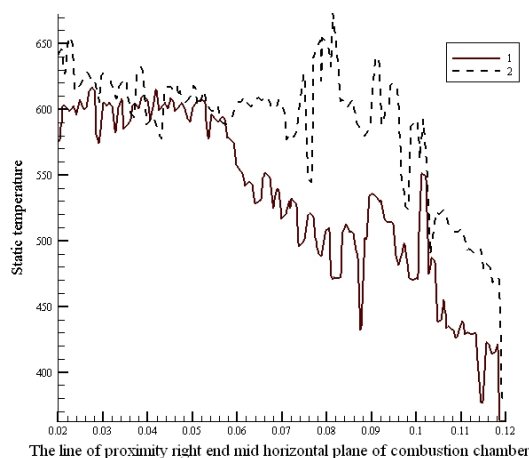
شعاع = δ	دایره
طول هر ضلع = $8/86229$	مربع
طول = $19/6349$ عرض = 4	مستطیل
طول هر ضلع = $13/4677$	مثلث متساوی الاضلاع
قطر بزرگ = 20 قطر کوچک = δ	بیضی

بعد از انجام شبیه سازی های مورد نیاز، جدول و پلات های زیر حاصل گردید.



شکل ۱۲- مقایسه دمای استاتیک در مجاورت دیواره سمت چپ
محفظه احتراق در مستطیل های ردیف ۱ و ۴

با توجه به شکل ۱۱ و شکل ۱۲، می توان دریافت که اگر راستای قرارگیری طول مستطیل، عمود بر جهت حرکت جریان باشد؛ درصد بیشتری از سیال خنک کننده در مجاورت دیواره محفظه احتراق قرار می گیرد و باعث می گردد که دمای سیال در مجاورت دیواره محفظه احتراق کاهش یابد؛ که در نهایت منجر به افزایش اثربخشی خنک کاری لایه ای می گردد. در شکل ۱۳ و شکل ۱۴، دمای استاتیک در مجاورت دیواره محفظه احتراق در مستطیل های ردیف ۱ و ردیف ۲، مورد بررسی قرار می گیرد. در این دو مستطیل راستای قرارگیری طول مستطیل ها یکسان می باشد و در هر دو عمود بر جهت حرکت جریان می باشد و تفاوت آن ها در میزان نسبت طول به عرض مستطیل هاست، به گونه ای که این نسبت در مستطیل ردیف ۱ نسبت به مستطیل ردیف ۲ بیشتر می باشد.

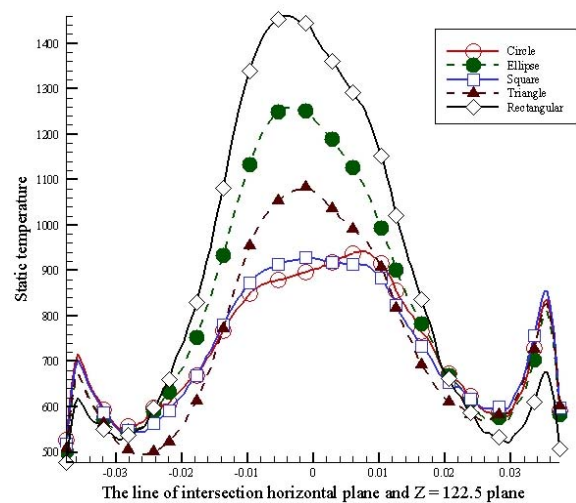


شکل ۱۳- مقایسه دمای استاتیک در مجاورت دیواره سمت راست
محفظه احتراق در مستطیل های ردیف ۱ و ۲

جدول ۴ - پاره‌ای از نتایج حاصل

ردیف	متوسط دمای استاتیک خروجی (کلوین)	متوسط دمای استاتیک دیواره استوانه‌ای شکل محفظه احتراق (کلوین)	اثر بخشی خنک کاری لایه‌ای
دایره	۶۰۲/۹۷۹۷۴	۱۰۹۱/۸۷۸۸	۰/۳۷۲۸
مربع	۵۹۶/۶۹۷۴۵	۱۰۹۵/۷۲۸۵	۰/۳۶۹۴
مستطیل	۶۰۵/۶۰۳۲۱	۱۰۳۹/۴۶۲۵	۰/۴۰۶۱
مثلث متساوی الاضلاع	۵۹۹/۸۸۸۳۱	۱۰۸۸/۶۲۵۱	۰/۳۷۰۸
بیضی	۶۰۳/۰۹۶۴۴	۱۰۷۷/۱۳۸۷	۰/۳۷۸۹

با توجه به جدول ۴، مشاهده می‌شود که اثر بخشی خنک کاری لایه‌ای و متوسط دمای استاتیک خروجی، در شکل مستطیل از بقیه اشکال بیشتر می‌باشد و بعد از آن به ترتیب اشکال بیضی، دایره، مثلث متساوی الاضلاع و مربع قرار دارند.



شکل ۱۵- دمای استاتیک در تقاطع صفحه افقی میانی با صفحه انتهایی محفظه احتراق

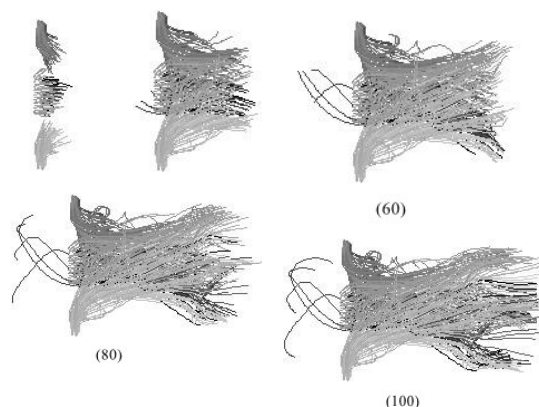
همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، دمای استاتیک در شکل مستطیل نسبت به سایر اشکال بیشتر می‌باشد. با توجه به جدول ۴ و شکل ۱۵ می‌توان نتیجه گرفت که، در اشکال مستطیل و بیضی، دمای استاتیک و متوسط دمای

استاتیک خروجی، نسبت به سایر اشکال به مراتب بیشتر می‌باشد، که در نتیجه توان و تراست تولیدی در این اشکال نسبت به سایر اشکال به مراتب بیشتر می‌باشد. البته لازم بذکر است که در این دو شکل نسبت طول به عرض بسیار مهم می‌باشد، به گونه‌ای که اگر نسبت طول به عرض آن‌ها کاهش یابد، دمای استاتیک و متوسط دمای استاتیک خروجی در آن‌ها به شدت کاهش می‌یابد، و تحت چنین شرایطی شکل هندسی دایره می‌تواند از متوسط دمای استاتیک خروجی به مراتب بیشتری نسبت به سایر اشکال برخوردار باشد. البته لازم بذکر است که تحت هر شرایطی، متوسط دمای استاتیک خروجی و اثر بخشی خنک کاری لایه‌ای در شکل هندسی دایره نسبت به اشکال مربع و مثلث متساوی الاضلاع بیشتر می‌باشد. در مقایسه میان دو شکل هندسی دایره و مثلث متساوی الاضلاع، می‌توان دریافت که تحت هر شرایطی نسبت طول به عرض در شکل هندسی دایره نسبت به مثلث متساوی الاضلاع بیشتر است، بطوریکه مقدار این نسبت در دایره برابر با یک و در مثلث متساوی الاضلاع کمتر از یک می‌باشد. از طرفی در مقایسه میان دو شکل دایره و مربع مشاهده می‌گردد که نسبت طول به عرض، در هر دو شکل هندسی با یکدیگر برابر می‌باشد، اما در دایره مقدار طول و عرض نسبت به مربع بیشتر می‌باشد.

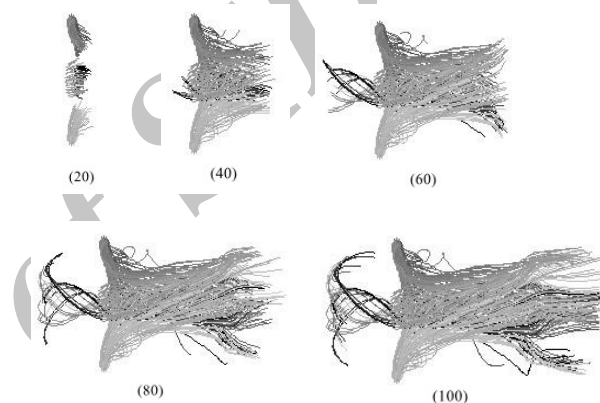
نکته جالب توجه در مقایسه میان دو شکل بیضی و مستطیل می‌باشد. با وجود اینکه شکل بیضی مورد استفاده، در راستای طولی نسبت به مستطیل بلندتر است، ولی اثر بخشی خنک کاری لایه‌ای در آن نسبت به مستطیل کمتر می‌باشد و دمای استاتیک محدوده شعله در بیضی نسبت به مستطیل کمتر می‌باشد، که منجر به کاهش تراست محفظه احتراق با روزه‌های اولیه بیضی شکل نسبت به مستطیل شکل می‌گردد. برای بررسی در مورد علت این امر، مسیر سیال خنک‌کننده روزه‌های اولیه در مراحل مختلف در مورد این دو شکل مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم بذکر است که در این قسمت کل فرآیند احتراق از ابتدا تا به انتها به ۵۰۰ مرحله تقسیم می‌گردد، که در هر مرحله فرآیند احتراق تا حدودی پیش می‌رود. در شکل ۱۶ و شکل ۱۷، ۵ مرحله از فرآیند تزریق سیال خنک‌کننده از روزه‌های ابتدایی سیستم خنک کاری نشان داده می‌شود، که شماره مرحله مربوطه در زیر هر شکل قرار گرفته است.

در روزنه‌هایی با سطح مقطع بیضی، شکل‌گیری این دو منطقه در محفظه احتراق، منجر به بازگشت مقداری از جریان خنک-کننده به داخل قسمت نیمه‌کروی محفظه احتراق می‌گردد. در نهایت مقدار به نسبت زیادی از سیالی که برای خنک کاری تزریق شده است از دیواره محفظه احتراق جدا می‌گردد، که این امر منجر به کاهش اثربخشی خنک کاری لایه‌ای می‌گردد و از طرفی سیال تزریق شده به داخل محدوده شعله، باعث کاهش دمای شعله می‌گردد؛ که در نتیجه متوسط دمای استاتیک در قسمت خروجی محفظه احتراق کاهش می‌یابد، که منجر به کاهش توان و تراست تولیدی می‌گردد. اما در روزنه‌هایی با سطح مقطع مستطیل، در گوشه‌های نوک تیز ورتکسی به وجود می‌آید، که منجر به کاهش سرعت سیال خنک‌کننده می‌گردد، که در نتیجه، نسبت سرعت تزریق جریان خنک‌کننده کاهش پیدا می‌کند و باعث می‌گردد که درصد کمتری از سیال خنک-کننده به داخل محدوده شعله تزریق گردد و درصد بیشتری از آن در مجاورت دیواره محفظه احتراق باقی بماند، که در نهایت منجر به افزایش اثربخشی خنک کاری لایه‌ای و افزایش توان و تراست تولیدی محفظه احتراق می‌گردد.

با توجه به مطالب ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که اثربخشی خنک کاری لایه‌ای و توان و تراست تولیدی از محفظه احتراق در شرایطی که شکل هندسی روزنه‌های اولیه به صورت مستطیل و یا بیضی می‌باشد، نسبت به سایر اشکال بیشتر است؛ اما لازم بذکر است که در مستطیل و بیضی نسبت طول به عرض بسیار مهم و حائز اهمیت می‌باشد، بگونه‌ای که اگر از یک مقدار خاصی کمتر باشد، میزان اثربخشی خنک کاری لایه-ای و توان و تراست تولیدی محفظه احتراق به شدت کاهش می‌یابد. از طرفی دیگر در هنگام استفاده از شکل هندسی مستطیل و بیضی، نحوه قرارگیری آن‌ها در محفظه احتراق نیز بسیار مهم می‌باشد. ضمناً در شکل‌هایی که گوشه‌های نوک تیز دارند، تنش حرارتی قابل توجهی به وجود می‌آید، که این تنش حرارتی می‌تواند منجر به ایجاد ترک در گوشه‌های نوک تیز گردد. به همین خاطر با توجه به مطالب ارائه شده، پیشنهاد می‌گردد، که از اشکال هندسی بدون گوشه‌های نوک تیز (دایره-ای شکل) برای روزنه‌های اولیه سیستم خنک کاری استفاده گردد.



شکل ۱۶- مسیر جریان سیال خنک‌کننده با روزنه‌های اولیه مستطیل شکل در مراحل مختلف پیشروی



شکل ۱۷- مسیر جریان سیال خنک‌کننده با روزنه‌های اولیه بیضی شکل در مراحل مختلف پیشروی

با توجه به شکل ۱۶ و شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، زمانی که سطح مقطع روزنه‌های اولیه، به شکل بیضی می‌باشد، نسبت به شکل مستطیل، درصد بیشتری از سیال خنک‌کننده به داخل محدوده شعله تزریق می‌گردد و تزریق جریان خنک کاری اولیه منجر به ایجاد یک جریان چرخشی می‌گردد. در سطح مقطع بیضی چون درصد به نسبت زیادی از جریان خنک‌کننده اولیه به داخل محدوده شعله تزریق می‌گردد، توان چرخشی سیال چرخشی حاصل، بیشتر می‌گردد که در نتیجه آن دو منطقه فشار و مکش ایجاد می‌گردد.

در منطقه فشار، مسیر لایه جریان در سرعت‌های چرخش پایین، به سمت مایل و در سرعت‌های چرخش بالا به سمت گریز از مرکز منحرف می‌شود و این در حالی است که در منطقه مکش، مسیر لایه جریان به سمت گریز از مرکز منحرف می‌گردد [۱۴].

نتیجه گیری

با توجه به اشکال و جداول ارائه شده، نتایج زیر حاصل می شود:

۱- با افزایش طول به عرض روزنه‌ای که برای خنک کاری مورد استفاده قرار می گیرد، می توان تراست و اثربخشی خنک کاری لایه‌ای محفظه احتراق را افزایش داد.

۲- توصیه می گردد که نحوه قرارگیری روزنه‌های خنک کننده به گونه‌ای باشد که طول آن‌ها عمود بر جهت حرکت جریان باشد؛ که منجر به افزایش قابل ملاحظه تراست و اثربخشی خنک کاری لایه‌ای می گردد.

۳- گوشه‌های نوک تیز در روزنه‌های تزریق سیال خنک کننده، بر اثربخشی خنک کاری لایه‌ای و توان و تراست تولیدی محفظه احتراق بسیار تأثیرگذار می باشند.

۴- پیشنهاد می گردد که برای روزنه‌های اولیه سیستم خنک کاری، از اشکال هندسی بدون گوشه‌های نوک تیز (دایره‌ای شکل) استفاده گردد.

۵- اثربخشی خنک کاری لایه‌ای و تراست محفظه احتراق، بسیار وابسته به شکل هندسی روزنه‌های اولیه خنک کاری می باشد.

پی نوشت

- ۱ Hawthorne
- ۲ Eckert
- ۳ Talmor , Carlson
- ۴ Tacina , Marek
- ۵ Yavuzkurt , Webster
- ۶ Bicen
- ۷ Ligrani
- ۸ Maitech , Jubran
- ۹ Thakur
- ۱۰ Emidio
- ۱۱ Peng
- ۱۲ Liu
- ۱۳ Brown , Zhong
- ۱۴ Tao

مراجع

- [۱] Michal karcz , Janusz badur , “An alternative turbulent heat flux modeling for gas turbine cooling application”, Transactions of the institute of fluid-flow machinery , ۱۱۳ , ۲۰۱- , ۲۰۰۳.
- [۲] R.J.Goldstein , R.B.Rask , E.R.G.Eckert, “Film cooling with helium injection into an incompressible air flow”, International Journal of heat and mass transfer , ۹ , ۱۳۴۱-۱۳۵۰ , ۱۹۶۶.
- [۳] L.W.Carlson , E.Talmor , “Gaseous film cooling at various degrees of hot-gas acceleration and turbulence leveles”, International Journal of heat and mass transfer , ۱۱ , ۱۶۹۵-۱۷۱۳ , ۱۹۶۸.
- [۴] Cecil J.marek , Robert R. Tacina , “Effect of free-stream turbulence on film cooling” , Nasa technical note , ۱۹۷۵.
- [۵] W.P.Webster , S.Yavuzkurt , “Measurements of mass transfer coefficient and effectiveness in the recovery region of a film cooled surfaced” , International Journal of heat and mass transfer , ۳۰ , ۷۸۱-۷۸۹ , ۱۹۸۷.
- [۶] A.F.Bicen , D.G.N. TSE , J.H. Whitelaw, “Combustion characteristics of a model can-type combustor” , Combustion and flame , ۸۰ , ۱۱۱-۱۲۵ , ۱۹۹۰.
- [۷] H.J.Seo , J.S.Lee , P.M.Ligrani , “The effect of injection hole length on film cooling with bulk flow pulsations” , International Journal of heat and mass transfer , ۴۱ , ۳۵۱۵-۳۵۲۸ , ۱۹۹۸.
- [۸] B.A.Jubran , B.Y.Maitech , “Film cooling and heat transfer from a combination of two rows of simple and/or compound angle holes in inline and/or staggered configuration” , International

- [۹] Journal of heat and mass transfer , ۳۴ , ۴۹۵-۵۰۲ , ۱۹۹۹.
V.Schuchkin , M.Osipov , W.Shyy , S.Thakur ,
[۱۰] “ *Mixing and film cooling in supersonic duct flows*” , International Journal of heat and mass transfer , ۴۵ , ۴۴۵۱-۴۴۶۱ , ۲۰۰۲.
B.Leger , P.Miron , J.M.Emidio , “*Geometric and aero-thermal influences on multiholed plate temperature: application on combustor wall*” ,
[۱۱] International Journal of heat and mass transfer , ۴۶ , ۱۲۱۵-۱۲۲۲ , ۲۰۰۳.
L.Li , T.Liu , X.F.Peng , “*Flow characteristics in an annular burner with fully cooling*” ,
[۱۲] Applied thermal engineering , ۲۵ , ۳۰۱۳-۳۰۲۴ , ۲۰۰۵.
L.Li , X.F.Peng , T.Liu , “*Combustion and cooling performance in an aero-engine annular combustor*” , Applied thermal engineering , ۲۶ , ۱۷۷۱-۱۷۷۹ , ۲۰۰۶.
Fengquan Zhong , Garry L.Brown , “*A ۳-dimensional, coupled, DNS, heat transfer model and solution for multi-hole cooling*” ,
[۱۴] International Journal of heat and mass transfer , ۵۰ , ۱۳۲۸-۱۳۴۳ , ۲۰۰۷.
Zhi Tao , Xiaojun Yang , Shuiting ding , Guoqiang Xu , Hongwei Wu , Hongwu Deng ,
[۱۵] Xiang Luo , “*Experimental study of rotation effect on film cooling over the flat wall with a single hole*” , Experimental thermal and fluid science , ۳۲ , ۱۰۸۱-۱۰۸۹ , ۲۰۰۸.
M.B.Jovanovic , H.C. De lange , A.A. Van steenhoven , “*Effect of hole imperfection on adiabatic film cooling effectiveness*” ,
[۱۶] International Journal of heat and fluid flow , ۲۹ , ۳۷۷-۳۸۶ , ۲۰۰۸.
Brice Michel , Pierre Gajan , Alain Strzelecki ,
[۱۷] Nicolas Savary , Azeddine kourta , Henri-Claude Boisson , “*Full coverage film cooling using compound angle*” , C.R.Mecanique , ۳۳۷ , ۵۶۲-۵۷۲ , ۲۰۰۹.
P.L.Li , H.S.Ko , D.Z. Jeng , C.W. Liu , C.Gau , “*Micro film cooling performance*” , International Journal of heat and mass transfer , ۵۲ , ۵۸۸۹-۵۸۹۴ , ۲۰۰۹.

•