دومین کنفرانس انجمن پیشرانش هوافضایی ایران
۳۰-۲۹ آبان ماه ۱۳۹۲ دانشگاه تربیت مدرس

شبیه‌سازی عددی پدیده دتونیشن در موتور تراک ضربه‌ای با سوخت هیدروژن

مصطفی قربان حسینی[۱]، امیر مردانی[۲]، محیی حاجی حسن پور[۳]
دانشگاه صنعتی شریف-دانشکده مهندسی هوافضا

چکیده

این تحقیق به تحلیل و بررسی عددی پدیده دتونیشن درون یک موتور تراک ضربه‌ای می‌پردازد. سوخت و اکسیدکننده به ترتیب هیدروژن و اکسیژن انتخاب گردیده است. میدان جریان به صورت دوبعدی و در محدوده داخلی یک لوله با یک سر باز و یک سر بسته تعیین گردیده است. میدان جریان که شامل فضای داخلی موتور تراک ضربه‌ای می‌باشد به دو بخش تقسیم می‌شود. یکی محدوده کوچکی با دما و فشار بالا که برای شبیه‌سازی جرقه زن در سیستم Ignition تعیین گردیده است و دیگر فضای داخلی لوله که به دلیل ارتباط با محیط پیرامونی شرایط استاندار محیط را دارا می‌باشد. همچنین از حل گذرا و واکنش‌های شیمیایی با سرعت محدود (Finite Rate) در محفظه احتراق همراه با ۸ فرآورده و ۲ واکنش میانی برای فرآیند احتراقی اکسیژن با هیدروژن در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی جریان از معادلات ناویر-استوکس دو بعدی استفاده شده است. انتخاب هندسه مدل به دلیل حجم محاسباتی بالا و باهدف مدل‌سازی دتونیشن تنها بخشی از لوله دتونیشن در موتور تراک ضربه‌ای می‌باشد که در آن محدوده دتونیشن قطعاً دیده می‌شود. شبکه‌بندی توسط نرم‌افزار گمبیت و حل میدان درون نرم‌افزار فلوئنت صورت گرفته است. تمامی فرآیندهای موجود در موتور تراک ضربه‌ای بر اساس تئوری CJ مدل‌سازی شده است. برای مدل‌سازی فرآیند دتونیشن از یک جرقه زن همراه با دما و فشار بالا استفاده شده است. همین طور دمای دیواره تراست در حدود ۲۰۰۰ درجه کلوین برآورد شده است.

واژه‌های کلیدی: پدیده دتوینشن – موتور تراک ضربه‌ای - معادلات ناویر-استوکس

مقدمه

موتورهای تراک ضربه‌ای از انواع موتورهای گرمایی می‌باشد که در آن‌ها از موج دتونیشن برای ایجاد نیروی پیشران استفاده می‌شود. دتونیشن نوعی فرآیند احتراقی با سرعت و فشار بالا است که به دلیل بازه ترمودینامیکی بالا و قدرت تبدیل به انرژی شیمیایی و حرارتی بسیار جذاب و مورد توجه است. این موتورها توانایی کارکرد در تراست ثابت را دارا می‌باشند و همچنین با تولید فرکانس بالا در موج دتونیشن کار مکانیکی تولید می کنند. موتورهای تراک ضربه‌ای به دو نوع هوا تنفسی و موتورهای راکت تراک ضربه‌ای تقسیم بندی می‌شود [۱] . در یک ساختار ساده از موتورهای PDE که در آن از اثرات لزجت و انتقال حرارت صرف نظر می‌شود، یک لوله با نسبت طول به قطر بالا با یک سر باز به عنوان محفظه احتراق که توسط مواد محرکه (اکسیدکننده و سوخت) در فشار محیط پر شده است در نظر گرفته می‌شود که در آن موج دتونیشن به صورت آنی آغاز می‌شود. در ساختار پیچیده تر سیستم های اشتعال، تغذیه و کنترل نیز به آن افزوده می‌شود .

راکت های PDE برای پرتاب ماهواره‌ها به مدارهای بالا طراحی می‌شوند. با پیشرفت تکنولوژی این راکت ها، می‌توان از آن‌ها برای مأموریت‌های نشستن بر روی سیاره و قمر و همچنین برای مسائل گشت زنی که برای آرام نشستن نیاز به تراست دارند، استفاده نمود. از دیگر کاربردهای پیشنهادشده برای استفاده از موتورهای تراک ضربه‌ای می‌توان به ترکیب با انواع توربوماشین ها برای افزایش بازه عملکرد آن‌ها و همین طور هواپیماهای بدون سرنشین و ماهواره برها و پیشران‌های فضایی اشاره کرد[۳].

آقای جیرو کاساهارا به همراه گروه تحقیقاتی خود در بررسی تجربی خود با طراحی یک سیستم سوخت‌رسانی ویژه در سال ۲۰۱۲ توانستند به فرکانس عملیاتی ۱۶۰ هرتز دست یابند. البته به دلیل عدم کنترل مناسب انتقال حرارت این سیستم دچار مشکل گردید [۴]. آقای هوشنگ ابراهیمی و همکارش در دانشگاه تنسی در سال ۲۰۰۲ به بررسی عددی موتور پالس دتونیشن توسط سوخت هیدروژن می‌پردازند. اکسیدکننده در این بررسی اکسیژن انتخاب شده است. در این مدل‌سازی دو حالت دو بعدی و یک بعدی مورد بررسی قرار گرفته است [۵]. این بررسی باهدف ایجاد شبیه‌سازی مناسب برای مطالعه تجربی از موتور تراک ضربه‌ای که در دانشگاه صنعتی شریف در حال انجام است صورت پذیرفته است.

معادلات حاکم

بیان شد که معادلات حاکم در این تحقیق معادلات دو بعدی ناویر-استوکس می‌باشد که شبکه مورد نظر آن توسط نرم‌افزار گمبیت تولید شده است. فیزیک خاص میدان موجب می‌شود که بتوان یک شبکه سازمان‌یافته مربعی در تمامی فضای میدان ایجاد کرد. در بخشی از میدان که دما و فشار را برای ایجاد دتونیشن بسیار بالا در نظر می‌شود شبکه ریزتر می‌شود. این کار در نرم‌افزار فلوئنت انجام می‌گیرد. به دلیل حجم محاسباتی بالا تنها بخشی از لوله دتونیشن از موتور تراک ضربه‌ای که در آن به طور قطع دتونیشن مشاهده می‌شود، در نظر گرفته شده است (شبکه‌بندی میدان در شکل ۱ نمایش داده شده است.).

شرایط خروجی به صورت فشار خروجی با دبی ۰/۰۳۶۸ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است که این مقدار از داده‌های تجربی مدل جیروکاساهارا استخراج شده است. همچنین به دلیل محدودیت محاسباتی تنها بخشی از مدل به عنوان ورودی دتونیشن برای مدل‌سازی جرقه زن در دما و فشار بالا در نظر گرفته شده است. این در بخش مقدار دما ۳۰۰۰ کلوین و فشار ۳۰ بار به عنوان بهترین حالت بر اساس نتایج بررسی آقای ابراهیمی انتخاب شده است. در ضمن محاسبات در ابعاد شبکه‌بندی ۲، ۰/۸، ۰/۴، ۰/۲ و ۰/۱ میلی‌متر مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین در این مدل‌سازی از واکنش دو مرحله‌ای تحت عنوان واکنش فراگیر مورد استفاده قرار گرفته است. واکنش دو مرحله‌ای مورد استفاده در زیر نمایش داده شده است.

$$H_2 + O_2 \rightarrow 2OH$$
$$H_2 + 2OH \rightarrow 2H_2O$$

روش حل

برای انجام حل، مدل لوله دتونیشن و شبکه‌بندی آن با استفاده از نرم‌افزار گمبیت ساخته‌شده و شبکه در ریزترین حالت دارای ۶۴۵۵۶ نقطه محاسباتی می‌باشد. به منظور یافتن شبکه‌ی بهینه و به دست آوردن جواب های قابل‌اعتماد، شبکه‌بندی طی چند مرحله ریزتر شد و جواب‌های حاصل باهم مقایسه گردید و مطابق با شکل ۱، شبکه با اندازه سلول ۰/۲ به عنوان

۱- کارشناسی ارشد پیشرانش، نویسنده، mostafa.ghhosseini@gmail.com
۲- استادیار
۴- کارشناس ارشد ایرودینامیک

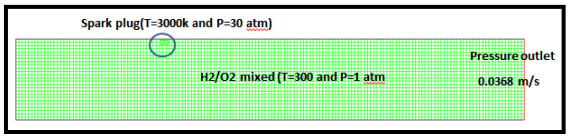
شبکه بهینه انتخاب شد. بر اساس سرعت موج دتونیشن (در حدود ۳۰۰۰ متر بر ثانیه) و ابعاد شبکه (۰/۲ میلی متر) گام زمانی ثابت 10^{-7} انتخاب گردید. حل به صورت دوبعدی، ناپایا، صریح و با استفاده از مدل اغتشاشی دو معادله ای K-ε و همچنین گسسته سازی از نوع بالادست مرتبه سوم است.

نتیجه‌گیری

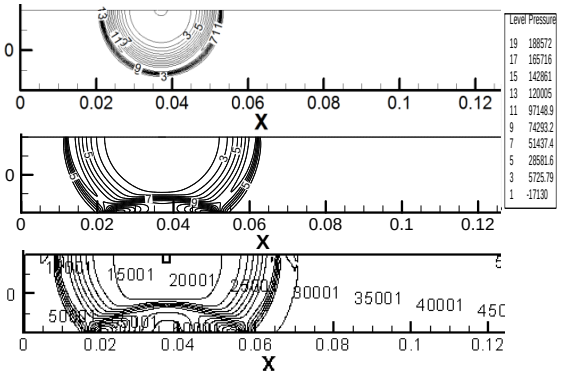
همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، کانتورهای فشار در سه حالت قبل، در حین و پس از تشکیل دتونینشن نمایش داده شده است. ترکیب گاز اکسیدکننده و سوخت در مجاورت دما و فشار بالا آغازگر فرآیند احتراق می‌باشد و بر این اساس فشار و دما به شدت افزایش پیدا می‌کنند (فشار از ۳۰ به ۵۰ اتمسفر افزایش می‌یابد) که از آن به فرآیند دفلگریشن تعبیر می‌شود. سپس در زمان $1/8 \times 10^{-6}$ ثانیه با برخورد موج فشاری تشکیل‌شده از فرآیند احتراق به سطح دیواه پایینی، موج دتونیشن تشکیل می‌شود. فشار بسیار بالا و انتقال حرارت بسیار پایین از ویژگی‌های بارز این موج می‌باشد که از این حیث بسیار مورد توجه است. فشار موج دتونیشن برابر با ۲۰ بار و دمای آن برابر با ۳۰۰K مشاهده می‌شود که با مشخصات موج دتونیشن بسیار سازگاری دارد. کانتور دما در حین تشکیل موج دتونیشن در شکل ۳ نمایش داده شده است. با مقایسه نتایج به دست آمده از این مقاله و مدل آقای ابراهیمی می‌توان به شباهت بسیار زیاد نتایج واقف شد اگر چه تفاوت‌هایی نیز وجود دارد ولی این تفاوت‌ها به دلیل تفاوت در مدل‌سازی می‌باشد. برای مثال همان طور که در شکل ۴ نمایش داده شده است زمان تشکیل دتونیشن در مدل عددی آقای ابراهیمی 2×10^{-6} ثانیه می‌باشد که این تفاوت ناشی از اختصاص بخش زیادی از میدان حل به دما و فشار بالا برای ورودی دتونیشن در مدل ایشان است که موج دتونیشن بسیار زودتر اتفاق می‌افتد ولی فشار موج دتونیشن در این حالت با مدل ارائه‌شده در این تحقیق ۶ درصد (فشار موج دتونیشن در مدل آقای ابراهیمی ۲۲ اتمسفر است) تفاوت دارد که قابل پیش‌بینی می‌باشد. با مقایسه مدل تجربی آقای عطار (فشار موج دتونیشن در مدل ایشان ۱۹،۴۲ اتمسفر است) این تفاوت ۳ درصد و با مدل آقای جیرو کاساهارا (فشار موج دتونیشن در این مدل ۲۰،۴ اتمسفر است) ۲ درصد تفاوت دارد که نشان‌دهنده مطابقت نتایج حاصله با مدل های تجربی می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود امواج فشاری با برخورد به دیواره‌های لوله دتونیشن از انتهای لوله خارج می‌شوند. در نمای کلی برخورد امواج فشاری به بالا و پایین دیواره لوله دتونیشن باعث تشکیل سلول‌های دتونیشن می‌شود که در شکل ۵ بر اساس مرجع [۶] نمایش داده می‌شود. این سلول‌ها برای مشاهده نیاز به شبکه‌بندی بسیار کوچکی دارد که به دلیل محدودیت‌های محاسباتی در نتایج این بررسی به طور کامل مشاهده نمی‌شود.

در این تحقیق میدان احتراقی در یک لوله دتونیشن در موتور تراک ضربه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است، نتایج نشان می‌دهد که موج دتونیشن به وضوح قابل مشاهده است و بین نتایج تجربی و عددی انجام‌گرفته مطابقت نسبتاً خوبی وجود دارد. علاوه بر این و با حل میدان، توزیع فشار و دما در داخل لوله دتونیشن در زمان‌های متفاوت به دست آمد. از نتایج این بررسی می‌توان در طراحی انواع موتورهای تراک ضربه‌ای استفاده کرد. در ضمن بررسی تجربی این مدل در حال انجام است که نتایج آن در مقالات آینده ارائه می‌گردد.

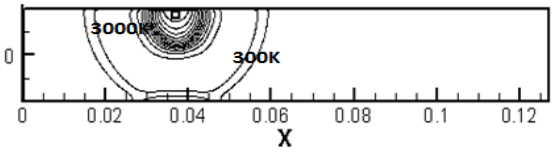
شکل‌ها و نمودارها



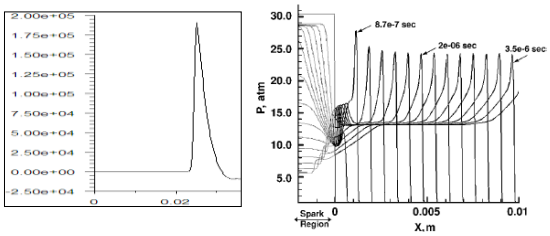
شکل ۱- هندسه مدل



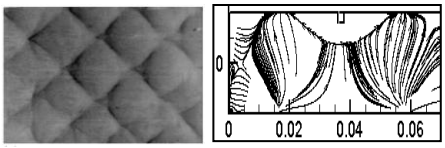
شکل ۲- نمایش کانتور های فشار در سه حالت قبل، در حین و بعد از تشکیل دتونیشن



شکل ۳- نمایش کانتور دما در حین تشکیل دتونیشن



شکل ۴- نمایش نمودار فشار مدل آقای ابراهیمی و مدل ارائه‌شده



شکل ۵- نمایش سلول‌های دتونیشن مرجع [۵] و مدل مورد بررسی

مراجع

[1] J.A. Nicholls, H.R. Wilkinson, R.B. Morrison, Jet Propul. 27 (5) (1957) 534–541.

[2] Carnett, J. B., “How It Works: Pulse Detonation”, Popular Science, 263:3, 53 , 2003

[3]Ken Matsuoka, Motoki Esumi, Ken Bryan Ikeguchi , Jiro Kasahara ,Akiko Matsuo, Ikkoh Funaki, Optical and thrust measurement of a pulse detonation combustor with acoaxial rotary valve,2012

[4]Houshang B. Ebrahimi, Charles L.merkle, Nemerical Simulation of a pulse detonation engine whith hydrogen fuels.

[5] Wintenberger, E., “Application of Steady and Unsteady Detonation Waves to Propulsion”, Ph.D. Thesis in California Institute of Technology, Pasadena , California, 2003