

بررسی اثر اصطکاک روی پایداری موج یک‌بعدی تراک گازی در مخلوط‌های با انرژی فعالسازی کم

مجید سبزویشانی^{۱*} و حدیثه کریمایی^{۲**}

۱- دانشگاه کاشان، پژوهشکده انرژی

۲- دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

(دریافت: ۱۳۸۹/۷/۱۴، دریافت آخرین اصلاحات: ۸۹/۱۲/۱، پذیرش: ۸۹/۱۲/۱۷)

در این مقاله، رفتار موج تراک در محیط غیرایده‌آل مطالعه شده است. شبیه‌سازی تراک بر اساس معادلات اولر واکنشی یک‌بعدی و با در نظر گرفتن اثر اصطکاک به صورت عبارت چشمه در معادله بقای تکانه انجام شده است. از مدل سینتیکی یک‌مرحله‌ای آرنیوسی برای مدل کردن واکنش شیمیایی استفاده شده است. نتایج حاضر مشخص کردند که در نظر گرفتن اصطکاک در مخلوط با انرژی فعالسازی خیلی کم (برابر ۸) باعث کاهش سرعت تراک و افزایش طول ناحیه واکنش تا یک حد مشخص شده است. با این وجود، رفتار پایدار تراک حتی در مقادیر زیاد اصطکاک دیده شده است. همچنین، نتایج حاضر نشان دادند که در انرژی فعالسازی ۲۲، که نزدیک حد پایداری تراک ایده‌آل است، و در مقادیر کم اصطکاک تراک پایداری خود را حفظ می‌کند، ولی با زیاد شدن اثر اصطکاک تراک ناپایدار شده و رفتار آن نوسانی می‌شود. با افزایش بیشتر اصطکاک، ابتدا تراک با نواسانات دوگانه ظاهر شده و در نهایت هنگامی که ضریب اصطکاک از یک مقدار بحرانی بیشتر می‌شود جدایی ناحیه واکنش از موج ضربه‌ای پیشرو اتفاق می‌افتد و تراک میرا می‌شود. درحقیقت، رفتار تراک غیرایده‌آل توسط رقابت میان نرخ انرژی آزادشده توسط واکنش شیمیایی و نرخ اتلاف تکانه توسط اصطکاک کنترل می‌شود.

کلیدواژه: شبیه‌سازی عددی، تراک غیرایده‌آل، پایداری تراک، اثر اصطکاک

مقدمه

موج تراک درحقیقت یک موج ضربه‌ای است که در یک مخلوط قابل احتراق پیشروی می‌کند و باعث سوختن مخلوط می‌شود. انرژی گرمایی آزادشده توسط احتراق باعث تقویت موج تراک می‌شود و از میرایی آن جلوگیری می‌کند. درحقیقت، موج تراک موجی است که در آن سرعت موج احتراقی بیش از سرعت صوت است. سرعت امواج تراک در مخلوط‌های گازی حدود ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر بر ثانیه بوده و باعث افزایش ۱۵ تا ۲۰ برابری فشار مخلوط اولیه می‌شوند. اهمیت بحث تراک غیرایده‌آل در آگاهی از نحوه رفتار موج تراک، کنترل آن و یا ایجاد و میرا کردن آن است. ایجاد کردن یک موج تراک خوداتکا از نظر نظامی و برخی فرایندهای تولیدی ارزش فراوان دارد و جلوگیری از به وجود آمدن آن از لحاظ مباحث ایمنی حائز اهمیت است. تحقیق پیرامون پدیده تراک، به دلیل اهمیتی که چه از نظر نظامی و چه غیرنظامی داشته، همواره مورد توجه بوده است. در دهه‌های گذشته، با توجه به پیشرفت تجهیزات آزمایشگاهی و کامپیوتری، گام‌های بزرگی در جهت شناخت بیشتر تراک برداشته شد، اما هنوز مسائل و ابهامات بسیاری در این زمینه وجود دارد.

اولین نظریه در مورد تراک ایده‌آل را چاپمن (۱۸۹۹) و جوگت (۱۹۰۵) ارائه کردند و به نظریه CJ (Chapman-Jouguet) مشهور شد. این نظریه ترمودینامیکی با فرض اینکه موج تراک با سرعت ثابت حرکت می‌کند خواص استاتیکی موج تراک (نظیر

* استادیار - نویسنده مخاطب (ایمیل: spooshan@kashanu.ac.ir)

** کارشناس ارشد (ایمیل: h.karimaei@gmail.com)

سرعت و فشار) را محاسبه می‌کرد که مطابقت بسیار خوبی با نتایج تجربی داشت. خواص محاسبه‌شده با این نظریه به خواص CJ مشهور است. در این نظریه علاوه بر فرض پایابودن، ضخامت موج تراک (ضخامت ناحیه واکنش) ناچیز فرض می‌شد [۱]. نظریه مهم دیگری در این زمینه جداگانه توسط زلدویچ (۱۹۴۰)، نیومن (۱۹۴۲) و دورینگ (۱۹۴۳) ارائه شد که به مدل ZND مشهور است. در این مدل با فرض پایابودن تراک (حرکت موج با سرعت CJ)، ضخامتی برای ناحیه واکنش در نظر گرفته می‌شود. با این مدل ساختار یک‌بعدی پایا برای یک موج تراک به‌دست می‌آید که شامل یک موج شاک، ناحیه تأخیر و ناحیه واکنش است [۱]. با این وجود، موج تراک واقعی سه‌بعدی، ناپایدار، غیرایده‌آل و به‌شدت وابسته به زمان است و لذا بررسی‌های بیشتری در این زمینه مورد نیاز بوده است.

از جمله روش‌های مناسب برای بررسی خواص تراک‌های گازی به‌کاربردن تحریک خارجی و مطالعه تأثیر آن روی تراک، نزدیک حدود تراک‌پذیری، است. در نزدیکی حدود تراک‌پذیری، رفتار دینامیکی تراک در طول مشخصه‌های بزرگ‌تری نسبت به تراک‌هایی که دور از حدود تراک‌پذیری هستند عمل می‌کند [۲-۳]. تحریک خارجی روی موج تراک و نزدیک حدود تراک‌پذیری می‌تواند باعث ایجاد شرایطی شود که تراک به خارج از این حدود منتقل شده و یا میرا شود. در این حالت، امکان بررسی متغیرهای موثر در تضعیف و میرایی تراک بیشتر می‌شود. از دیوارهای جاذب تکانه (Momentum) و انرژی می‌توان به‌عنوان عامل تحریک خارجی روی انتشار تراک استفاده کرد. این دیوارها در مسیر انتشار تراک در مرزهای کانال و یا لوله قرار می‌گیرند و انتشار تراک با سرعت‌های کمتر از مقادیر CJ در آن‌ها مشاهده شده است [۳-۷].

در بسیاری از موارد، به خاطر مشکلات موجود در آزمایش‌های تجربی، از روش‌های عددی برای بررسی پدیده‌ها استفاده می‌کنند. روش‌های عددی که بر پایه معادلات اساسی حاکم بر پدیده تراک بنا شده‌اند به فهم برخی از خواص اساسی موج تراک کمک مهمی کرده‌اند. برای مدل کردن اثرات خروج جرم در مدلسازی یک‌بعدی، می‌توان یک جمله چشمه جرم در معادله بقای جرم در نظر گرفت. اثرات اصطکاک، انتقال گرما و یا نیروهای حجمی را نیز می‌توان به صورت جمله‌های چشمه در معادلات بقای تکانه و بقای انرژی لحاظ کرد [۸]. لی بیان داشته است که تعریف تراک ایده‌آل را می‌توان براساس حل معادلات اوپلر بقایی و واکنشی و به همراه شرط CJ، بیان کرد و لذا هر موج تراکی که از این تعریف تبعیت نکند را می‌توان تراک غیرایده‌آل نامید [۷ و ۹]. وارد کردن جمله‌هایی مثل افت جرم، تکانه و یا انرژی به‌عنوان جمله‌های چشمه در معادلات بقا می‌تواند رفتار غیرایده‌آل موج تراک را نمایان کند. شاید بتوان بیان کرد اولین کاری که برای در نظر گرفتن اثرات مرزهای فیزیکی، با وارد کردن جمله‌های چشمه اصطکاک در معادله بقای تکانه و چشمه انرژی در معادله بقای انرژی، به بررسی تراک غیرایده‌آل پرداخته است توسط زلدویچ انجام شده است [۱۰]. وی نشان داد که در نظر گرفتن این جمله‌ها باعث کاهش سرعت تراک نسبت به حالت CJ می‌شود. زلدویچ و همکاران (۱۹۸۷) انتشار تراک در لوله‌های زبر را به صورت تحلیلی بررسی کردند [۱۱]. آن‌ها برای مدلسازی اصطکاک نیروی اصطکاک بر واحد سطح لوله را در معادله بقای تکانه لحاظ کردند و پس از اعمال شرایط مرزی دستگاه معادلات را حل کردند. در تحقیق آنها، بیشتر پیرامون محاسبه ضریب اصطکاک بحث شده است و مشتقات فشار و سرعت بر حسب مکان موج ضربه‌ای به‌دست آمده‌اند، اما روی رفتار تراک به خاطر وجود اصطکاک بحث نشده است. لی و زنگ (۱۹۹۴) رفتار نوسانی تراک پایای یک‌بعدی را در لوله‌های زبر مطالعه کردند که بر اساس معادلات اوپلر یک‌بعدی با پسای (Drag) اصطکاک بود [۱۲]. آن‌ها برای مدلسازی اصطکاک یک رابطه براساس قطر هیدرولیکی ارائه کردند و نشان دادند که رقابت میان نرخ رهاشدن انرژی واکنش شیمیایی و نرخ اتلاف انرژی توسط اصطکاک تراک پایدار را به سوی ناپایداری می‌برد. دایان (۲۰۰۰) رفتار تراک غیرایده‌آل را، با لحاظ کردن عبارت‌های منبع تکانه و انرژی در معادلات یک‌بعدی بقای تکانه و انرژی، مطالعه کرد و تضعیف تراک را در اثر افزایش اصطکاک مشاهده کرد [۸]. با این وجود، وی در زمینه توصیف ساختار جبهه تراک توضیح جامعی ارائه نداده است و در مورد پیش‌بینی میرایی نیز بحثی به میان نیاورده است.

در این مقاله، با شبیه‌سازی عددی یک‌بعدی به بررسی رفتار تراک غیرایده‌آل و توصیف ساختار آن در مخلوط‌های با انرژی فعالسازی کم (برابر ۸) و انرژی فعالسازی ۲۲، که کمی کمتر از حد پایداری تراک ایده‌آل (انرژی فعالسازی ۲۵/۲۵) است،

پرداخته شده است. ابتدا معادلات حاکم بیان شده و سپس توضیحی برای روش عددی به کاررفته داده شده است. براساس روش عددی بیان شده، کد رایانه‌ای موجود برای تراک ایدئال [۱۳] با لحاظ کردن اثر اصطکاک توسعه داده شده و سپس بر روی نتایج بحث شده است.

معادلات حاکم

مدل کردن ساختار غیرخطی تراک با استفاده از معادلات اساسی حاکم بر جریان که شامل معادله بقای جرم، بقای تکانه، بقای انرژی و معادلات واکنش شیمیایی است صورت می‌گیرد. برای مدل کردن تراک واقعی، باید معادلات اساسی به صورت کامل در نظر گرفته شوند. اما به دلیل مشکلاتی مانند سرعت پایین و حافظه رایانه‌ها و مشخص نبودن سینتیک کامل واکنش‌های شیمیایی لازم است که چند فرض اساسی برای ساده‌سازی معادلات حاکم اعمال شود.

اولین فرض یک‌بعدی بودن تحلیل است. تراک واقعی ساختاری پیچیده و سه‌بعدی دارد. لذا در صورتی که هدف مدل‌سازی تراک واقعی باشد، تحلیل باید سه بعدی باشد. اما به خاطر مشکلات موجود سخت‌افزاری شبیه‌سازی به صورت یک‌بعدی انجام می‌گیرد. آزمایش‌های تجربی نشان داده است که روند رفتار موج تراک با شبیه‌سازی یک‌بعدی به رفتار واقعی تراک نزدیک است. از طرفی، با توجه به اینکه تنها به بررسی اثر اصطکاک روی رفتار و پایداری موج تراک پرداخته می‌شود شبیه‌سازی یک‌بعدی به طور مشخص برای این منظور کفایت می‌کند. لذا شبیه‌سازی یک‌بعدی می‌تواند پاسخ روشن و صحیحی را در پیش‌بینی برخی از رفتارهای جبهه موج ارائه کند. دومین فرض صرف‌نظر کردن از اثرات نفوذ است. با توجه به اینکه از نظر زمانی پدیده نفوذ بسیار کندتر از فرایندهای دینامیک گازی و سینتیکی در تراک است، این فرض در مطالعات تراک گازی به طور وسیع مورد استفاده محققین قرار گرفته است [۱-۵]. اگرچه در تراک‌های با ساختار سلولی کاملاً نامنظم و یا تراک‌هایی که اثرات دیواره در آن‌ها مهم است امکان تاثیر پدیده نفوذ وجود دارد [۳]، در نظر گرفتن اثرات نفوذ و جمله‌های مربوط به آن معادل تعریف تراک غیرایده‌آل است. لذا با توجه به هدف خاص کار حاضر که اثر اصطکاک روی رفتار تراک است عبارت منبع تکانه در معادله بقای یک‌بعدی تکانه قرار داده می‌شود:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} = S \quad (1)$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ f \\ 0 \\ \rho W \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho u E + u p \\ \rho u \beta \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho E \\ \rho \beta \end{bmatrix}$$

در این معادلات، S چشمه ناشی از احتراق و p ، ρ و u به ترتیب فشار، چگالی و سرعت ذره نسبت به یک دستگاه ساکن اند. f ترم چشمه تکانه به خاطر در نظر گرفتن اصطکاک است که در ادامه توضیح داده خواهد شد. x محور مختصات دکارتی و t زمان است. E انرژی کل بر واحد جرم است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E = \frac{p}{\rho(\gamma-1)} + \frac{u^2}{2} + \beta Q \quad (2)$$

γ نسبت گرمای ویژه و Q گرمای آزاد شده از واکنش شیمیایی است.

فرض بعدی استفاده از مدل مناسب سینتیک شیمیایی است. با توجه به پیچیدگی سینتیک‌های کامل تر و اهمیت نداشتن نوع سینتیک در اهداف کار حاضر، در اینجا از مدل سینتیکی یک مرحله‌ای آرنیوسی استفاده شده است:

$$W = -k\beta \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

که در آن E_a انرژی فعال‌سازی، T دما، R ثابت جهانی گازها و k ثابت واکنش است. β متغیر واکنش است که بین یک (برای واکنش‌دهنده‌ها که نسوخته‌اند) و صفر (برای محصولات) تغییر می‌کند.

فرض بعدی استفاده از معادله حالت گاز کامل برای مواد اولیه و محصولات است. استفاده از این فرض در دما و فشارهای موجود در تراک‌های گازی منطقی است [۱]:

$$p = \rho RT \quad (۴)$$

اتلاف اصطکاکی در لوله‌ها به صورت عبارت منبع f در معادله بقای تکانه مدل می‌شود که پیشنهاداتی برای رابطه آن موجود است. زدوویچ فرم معادله (۵) را پیشنهاد کرد [۱۰]. در این تحقیق، از همین رابطه استفاده شده است:

$$f = -k_f \rho u_{abs} |u_{abs}| \quad (۵)$$

که در آن u_{abs} سرعت ذره در دستگاه مختصات ساکن و k_f ضریب اصطکاک است. علامت منفی در رابطه بالا به خاطر مخالف بودن جهت جریان و نیروی اصطکاک است. در این تحقیق، برای مدلسازی اتلاف اصطکاکی از رابطه بالا استفاده شده و با تغییر متغیر k_f اثرات افت‌های اصطکاکی در پدیده تراک مدل شده است.

معادلات اساسی و همچنین معادله حالت گاز ایدئال به صورت بی‌بعد در نظر گرفته شده‌اند. برای این کار متغیرهای وابسته با توجه به خواص مخلوط نسوخته بی‌بعد شده‌اند. فشار با p_0 و چگالی با ρ_0 بی‌بعد شده‌اند. برای سرعت، سرعت صوت C_0 در مخلوط نسوخته به‌عنوان مرجع در نظر گرفته شده است. متغیرهای مکانی میدان با طول نیمه واکنش برای تراک در مخلوط اولیه با خواص $Q/RT_0 = 50$ و $E_a/RT_0 = 25$ بی‌بعد شده‌اند. زمان مشخصه به صورت نسبت طول مشخصه نیمه واکنش (hrl- Half reaction length) به سرعت صوت C_0 در مخلوط نسوخته تعریف شده است. در این مقاله، نسبت گرماهای ویژه و گرمای واکنش مخلوط به ترتیب $\gamma = 1.2$ ، $Q/RT_0 = 50$ در نظر گرفته شده است.

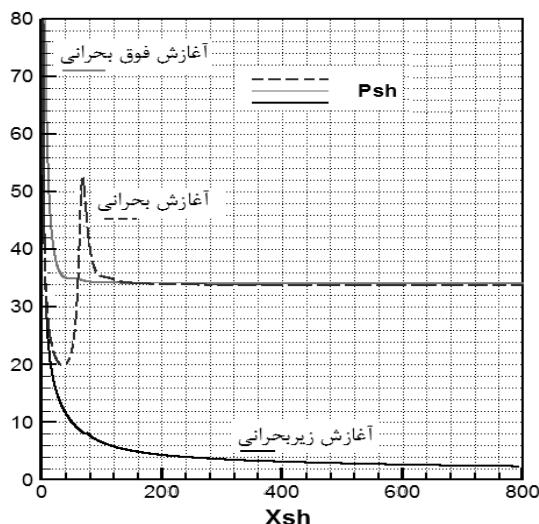
روش حل عددی

روش‌های عددی زیادی در چند دهه گذشته برای شبیه‌سازی دینامیک گازهای تراکم‌پذیر ارائه شده است. در این تحقیق، برای شبیه‌سازی جریان و حل معادلات اولر از روش PPM، که یک روش با دقت مرتبه سه است، استفاده می‌شود. منابع متعددی از این روش برای شبیه‌سازی تراک استفاده کرده‌اند (به عنوان مثال منابع ۱۳، ۸ و ۱۴). این روش در زمره روش‌های مرتبه بالای روش کلی‌تر گدنف است [۱۵]. در این روش، به جای استفاده از مقدار ثابت برای هر متغیر در طول یک سلول (روش کلاسیک گدنف) از شکل مقطع (Profile) سهموی برای محاسبه متغیرها در هر سلول استفاده می‌شود. برای تعقیب موقعیت لحظه‌ای تراک، روش بقای تعقیب شاک به کار می‌رود [۱۶]. برای افزایش دقت، از روش تطبیق شبکه در محل جبهه تراک استفاده شده است [۱۷]. کد رایانه‌ای استفاده‌شده در این تحقیق در بردارنده ترکیبی از روش‌های بالا است. کد مزبور برای مدلسازی تراک ایدئال توسط مظاهری در سال ۱۹۹۷ تهیه و آزمون‌های متعددی برای بررسی قابلیت اعتماد کد انجام شده است [۱۳] و در کار حاضر برای مدلسازی تراک غیرایدئال توسعه داده شده است. عدم وابستگی نتایج به شبکه محاسباتی کنترل‌شده و شبکه بهینه استفاده شده است. بدین منظور، از حداقل ۸۰ سلول محاسباتی در طول مشخصه نیمه واکنش (hrl) مخلوط با مشخصات استفاده شده است. برای آغاز مستقیم تراک، از شکل مقطع موج تراکنشی (Blast wave) یک‌بعدی استفاده شده است.

نتایج

انرژی فعالساز از جمله مهم‌ترین متغیرهایی است که ناپایداری تراک یک‌بعدی را کنترل می‌کند. نقش مهم ناپایداری تراک روی متغیرهای دینامیکی تراک است. متغیرهای لازم برای درک ساختار جریان و نرخ واکنش‌های شیمیایی، مانند انرژی بحرانی آغازش، به‌عنوان متغیرهای دینامیکی تراک شناخته شده‌اند [۱۸]. با تأمین انرژی مورد نیاز برای آغازش تراک، آغازش تراک با توسعه پالس فشار میان جبهه واکنش و جبهه شاک شروع می‌شود. شکل (۱) سه رژیم متفاوت آغازش را براساس مقدار انرژی آغازش برای یک تراک پایدار نشان می‌دهد. در آغازش زیربحرانی، انرژی موج تراکنشی اولیه برای ایجاد و انتشار

تراک کافی نبوده است؛ بنابراین تراک تشکیل نشده است. در آغازش بحرانی و فوق بحرانی، انرژی موج تراکنشی اولیه برای ایجاد و انتشار تراک کفایت می‌کند با این تفاوت که در آغازش بحرانی موج تراکنشی ابتدا به یک موج ضربه‌ای ضعیف‌تر از تراک CJ تبدیل شده و سپس مجدداً تقویت شده و یک تراک ایجاد می‌شود. در این تحقیق، انرژی موج تراکنشی اولیه به حدی در نظر گرفته شده است که آغازش و انتشار تراک در مخلوط گازی به وجود آید. از آنجا که در مطالعه حاضر هدف بررسی رفتار موج حین پیشروی است و مرحله پس از آغازش مورد نظر است، تفاوتی نمی‌کند که آغازش به صورت بحرانی و یا فوق بحرانی انجام شده باشد.



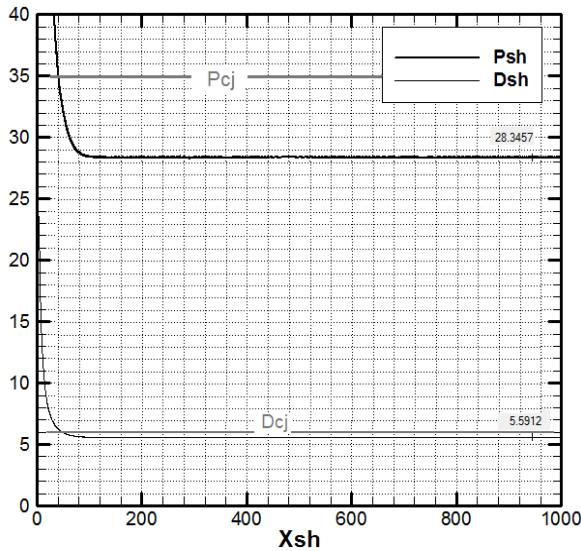
شکل ۱- رژیم‌های متفاوت آغازش برای تراک پایدار [۱۳]

برای تراک‌های ایدئال در مخلوط با مشخصات $\gamma = 1.2$, $Q/RT_0 = 50$ حد انرژی فعالسازی برای پایداری برابر $25/25$ است [۱۳]. در مسئله تراک غیرایده‌آل حاضر، مخلوط‌های با انرژی فعالسازی ۸ و ۲۲ در نظر گرفته شده است که در حالت ایدئال تراک در آن‌ها کاملاً پایدار است.

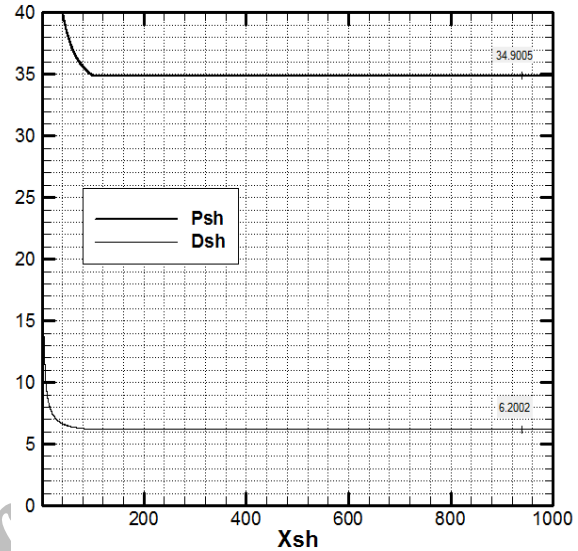
بررسی ساختار و رفتار موج تراک غیرایده‌آل در انرژی فعالسازی ۸

شکل‌های (۲) تا (۵) نمودار فشار موج ضربه‌ای (Psh) و سرعت موج ضربه‌ای (Dsh) بر حسب مکان موج ضربه‌ای (Xsh) را برای مخلوط با انرژی فعالسازی ۸ و در ضرایب اصطکاک مختلف نشان می‌دهند. در هر نمودار، چند منحنی از قبیل فشار، سرعت و غیره ارائه شده‌اند؛ به همین دلیل عنوان محور عمودی تمامی منحنی‌ها در درون نمودار مشخص شده است تا گویای منحنی مربوطه باشد. همچنین، علاوه بر منحنی فشار موج ضربه‌ای منحنی سرعت موج ضربه‌ای نیز در کنار آن آورده شده تا نشان دهد سرعت و فشار دارای روند مشابه هستند. شکل (۲) نمودار فشار موج ضربه‌ای و سرعت موج ضربه‌ای بر حسب مکان موج ضربه‌ای را در محیط با ضریب اصطکاک $K_f = 0$ و یا همان حالت ایدئال در مخلوط با انرژی فعالسازی ۸ نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که در مخلوط در نظر گرفته شده رفتار موج تراک کاملاً پایدار است و فشار و سرعت موج ضربه‌ای پس از دور شدن تراک از محل آغازش به مقادیر فشار و سرعت CJ نزدیک شده‌اند. شکل (۳) رفتار موج را برای مخلوط با انرژی فعالسازی ۸ و با ضریب اصطکاک برابر $0/05$ نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار، مقادیر فشار و سرعت موج ضربه‌ای به کمتر از مقدار CJ رسیده‌اند، ولی پایداری تراک حفظ شده است. درحقیقت، وجود اصطکاک باعث تضعیف جبهه تراک و کاهش فشار و دمای آن شده است. کاهش دما روی نرخ واکنش شیمیایی اثر گذاشته و باعث کاهش آن می‌شود. با این وجود و با توجه به

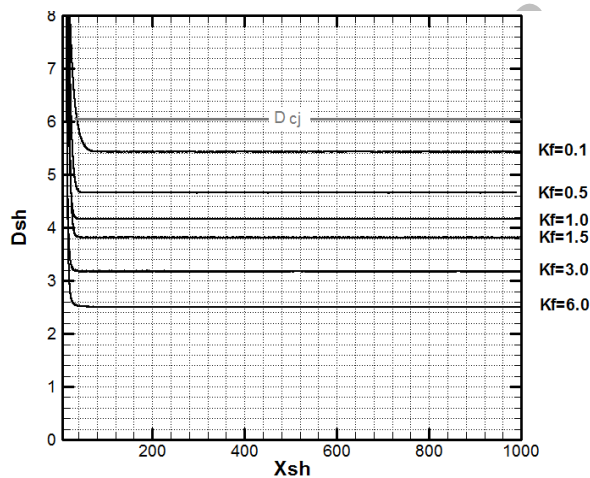
شکل (۳)، ملاحظه می‌شود که علی‌رغم کاهش نرخ آزاد شدن انرژی توسط واکنش شیمیایی تراک خوداتکاست. لذا در این حالت با وجود اینکه اصطکاک باعث تضعیف تراک شده است، پایداری تراک حفظ شده و میرایی اتفاق نیفتاده است.



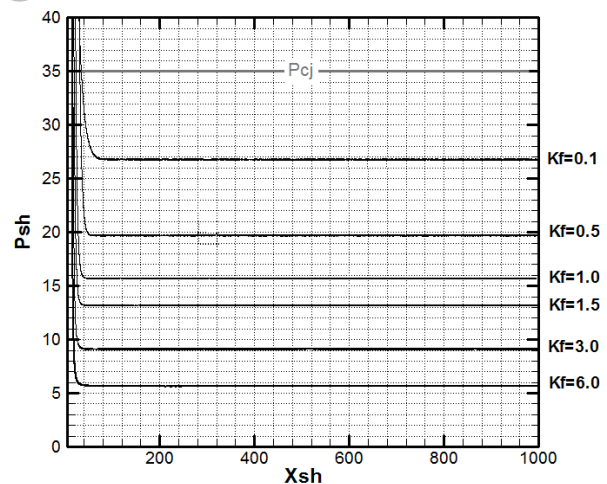
شکل ۳- نمودار فشار و سرعت موج ضربه‌ای بر حسب مکان موج ضربه‌ای در محیط با ضریب اصطکاک $Kf=0.05$ و $Ea=8$



شکل ۴- نمودار فشار و سرعت موج ضربه‌ای بر حسب مکان موج ضربه‌ای در محیط با ضریب اصطکاک $Kf=0$ و $Ea=8$



شکل ۵- نمودار سرعت موج ضربه‌ای بر حسب مکان موج ضربه‌ای در محیط با ضریب اصطکاک از 0.1 تا 6.0 و $Ea=8$

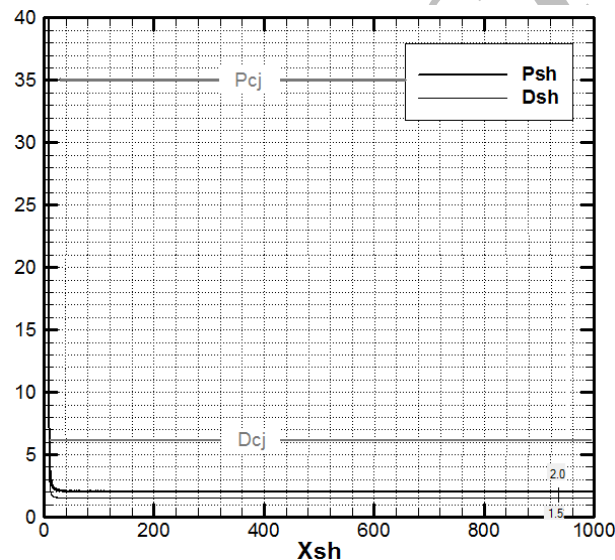


شکل ۶- نمودار فشار موج ضربه‌ای بر حسب مکان موج ضربه‌ای در محیط با ضریب اصطکاک از 0.1 تا 6.0 و $Ea=8$

در شکل‌های (۴) و (۵)، رفتار موج در محیطی با ضریب اصطکاک‌های مختلف از 0.1 تا 6.0 نشان داده شده است. فشار و سرعت موج ضربه‌ای در همه آن‌ها همچنان رفتاری پایدار دارد و تنها تفاوت آن‌ها در این است که با افزایش ضریب اصطکاک تراک مرحله به مرحله ضعیف‌تر شده است. این نتایج نیز مشخص می‌کنند که با افزایش اصطکاک نرخ انرژی موثر در تقویت تراک، که به تعبیری برآیند نرخ انرژی گرمایی شیمیایی و نرخ کسر اتلافات اصطکاکی است، برای نگهداری، تقویت و انتشار موج تراک کاهش یافته و باعث کاهش فشار و سرعت موج تراک شده است. درحقیقت، به خاطر کم‌بودن انرژی فعالسازی، نرخ

انرژی آزاد شده ناشی از واکنش شیمیایی زیاد بوده و حتی، علی‌رغم وجود اصطکاک زیاد، انرژی آزاد شده از واکنش شیمیایی برای خوداتکابودن تراک کفایت می‌کند. لذا نیروی اصطکاک علی‌رغم تضعیف کردن تراک باعث ناپایداری و یا میرا کردن آن نشده است. این مطلب در توافق با نتایج دیان است که وی این نوع تراک را که در حضور اثرات قوی اصطکاک است تراک سرعت کم نامیده است [۸].

در شکل (۶) ضریب اصطکاک تا مقدار ۲۵ افزایش داده شده است، اما مشاهده می‌شود که پایداری تراک حفظ شده و سرعت آن تا حالت خفگی (Choked) جریان مافوق صوت یا درحقیقت به عدد ماخ موضعی برابر یک نزدیک شده است. در حقیقت، در این حالت تراک سرعت کم بسیار ضعیف مشاهده می‌شود. لذا مشاهده شده است که در انرژی فعالسازی ۸، علی‌رغم افزایش اثر اصطکاک در تراک منتشر شده، پایداری تراک تحت تاثیر قرار نگرفته است. این مطلب با مشاهدات تجربی مختلف نیز در توافق است [۲-۶]. نتایج تجربی نشان داده‌اند که در مخلوط‌های گازی با انرژی موثر فعالسازی کم تحریک خارجی تاثیر کمتری روی تراک دارد و به عبارتی تراک در مخلوط با انرژی فعالسازی کم حساسیت کمتری به تحریک خارجی دارد.



شکل ۶- نمودار فشار و سرعت موج ضربه‌ای بر حسب مکان موج ضربه‌ای در محیط با ضریب اصطکاک $Ea=8$ و $Kf=25$

برای بررسی بیشتر، در جدول (۱) فاصله موج ضربه‌ای پیشرو تا جایی که مخلوط گازی تقریباً به طور کامل سوخته است (متغیر پیشرفت واکنش برابر ۰/۰۱ است) در ضرایب اصطکاک مختلف داده شده است. مطابق این جدول، فاصله بیان شده در ضریب اصطکاک صفر تا حدود ضریب اصطکاک یک از مقدار ۰/۴۰ تا حدود ۰/۵۰ افزایش یافته و در ضرایب اصطکاک بیشتر از یک تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشته است. با توجه به این یافته، مشخص می‌شود که در مخلوط با انرژی فعالسازی ۸ جدایی ناحیه واکنش از موج ضربه‌ای پیشرو عامل تضعیف تراک نیست، بلکه تضعیف تراک به خاطر افت بیش از حد فشار و سرعت موج ضربه‌ای به دلیل اتلاف تکانه است.

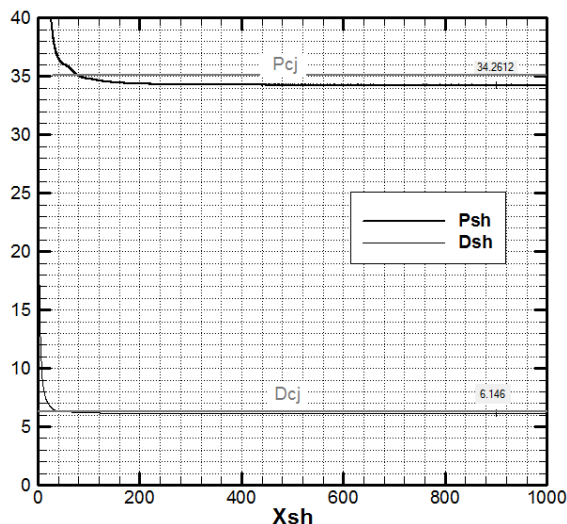
جدول ۱- فاصله جبهه موج ضربه‌ای پیشرو تا انتهای ناحیه واکنش (d) در چند ضریب اصطکاک برای مخلوط با انرژی فعالسازی ۸

Kf	۰	۰/۰۵	۰/۱	۰/۵	۱	۱/۵	۳	۶	۲۰	۲۵
d	۰/۴۰	۰/۴۳	۰/۴۶	۰/۴۸	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰

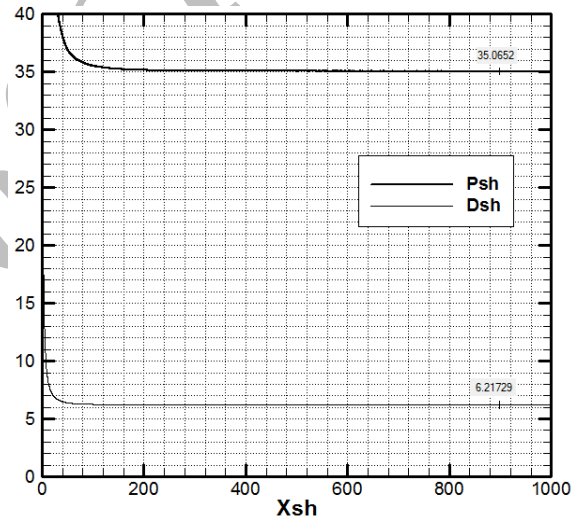
بررسی ساختار و رفتار موج تراک غیرایده‌آل در انرژی فعالسازی ۲۲

شکل (۷) نمودار فشار موج ضربه‌ای و سرعت موج ضربه‌ای بر حسب مکان موج ضربه‌ای در محیط با ضریب اصطکاک $Kf=0$ و برای مخلوط با انرژی فعالسازی ۲۲ را نشان می‌دهد. این در واقع همان حل حالت ایده‌آل در انرژی‌های فعالسازی زیر مرز پایداری ($Ea/RT_0=25/25$) است و مقادیر سرعت و فشار به مقادیر CJ نزدیک شده‌اند. لذا در این مخلوط رفتار موج تراک کاملاً پایدار است که شکل (۷) نیز موید آن است.

شکل (۸) رفتار موج را برای همان مخلوط قبلی، اما در محیطی با زبری کم دیواره در ضریب اصطکاک برابر 0.001 ، نشان می‌دهد. با توجه به این شکل و مطابق انتظار، مقادیر فشار و سرعت موج ضربه‌ای به زیر مقدار CJ کاهش پیدا کرده‌اند که به ترتیب برابر با $34/14$ و $6/14$ هستند و رفتار موج نیز همچنان پایدار است. تحلیل شبیه‌سازی‌ها برای ضرایب اصطکاک 0.001 تا 0.01 هم انجام شده‌اند و مشاهده شده است که با افزایش ضریب اصطکاک، فشار و سرعت موج ضربه‌ای در هر مرحله به مقادیر پایین‌تری رسیده‌اند، اما رفتار موج همچنان پایدار بوده و به عبارتی انرژی آزاد شده از سینتیک شیمیایی اتلافات پسای اصطکاکی را جبران کرده است.



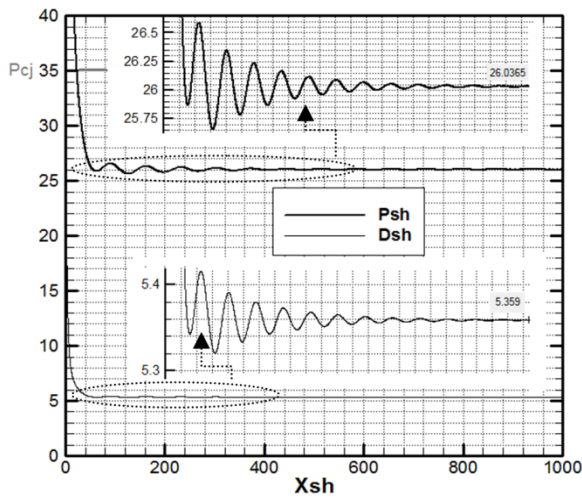
شکل ۸- نمودار فشار و سرعت موج ضربه‌ای بر حسب مکان موج ضربه‌ای در محیط با ضریب اصطکاک $Kf=0.001$ و $Ea=22$



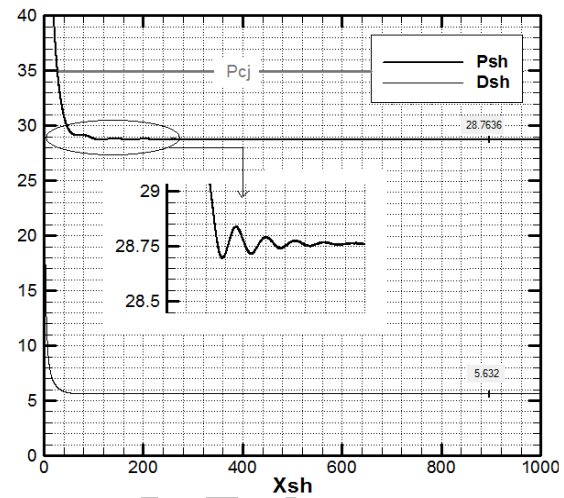
شکل ۷- نمودار فشار و سرعت موج ضربه‌ای بر حسب مکان موج ضربه‌ای در محیط با ضریب اصطکاک $Kf=0$ و $Ea=22$

در شکل (۹)، رفتار موج در محیطی با ضریب اصطکاک 0.002 نشان داده شده است که نوسانات بسیار کوچکی در ابتدای پیشروی موج ضربه‌ای قابل مشاهده است که بعداً میرا شده است؛ یعنی اغتشاش درون سیستم رشد نکرده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، دامنه نوسانات فشار و سرعت موج ضربه‌ای بسیار کوچک است و تراک نهایتاً پایدار می‌شود. فشار و سرعت موج ضربه‌ای در این مرحله به ترتیب برابر $28/76$ و $5/63$ هستند. لازم به تذکر است بخش‌هایی از نمودار که درون بیضی‌های نقطه‌چین قرار داده شده‌اند برای وضوح بیشتر بزرگنمایی شده‌اند.

با افزایش اصطکاک، مطابق شکل (۱۰) که مربوط به ضریب اصطکاک 0.003 است دامنه نوسانات و گام‌های بزرگ‌تر می‌شود. شکل (۱۰) نشان می‌دهد که با پیشروی موج، به تدریج و با تاخیر بیشتری نسبت به شکل (۹)، از دامنه نوسانات کاسته شده و فشار و سرعت موج ضربه‌ای به مقدار $26/03$ و $5/36$ نزدیک می‌شود. هرچند که در فاصله‌های دور از اثرات آغازش رفتار پایدار تراک وجود دارد، برآورد می‌شود که این ضریب اصطکاک در نزدیکی حد پایداری باشد و با بیشتر شدن آن رفتار تراک ناپایدار شود.

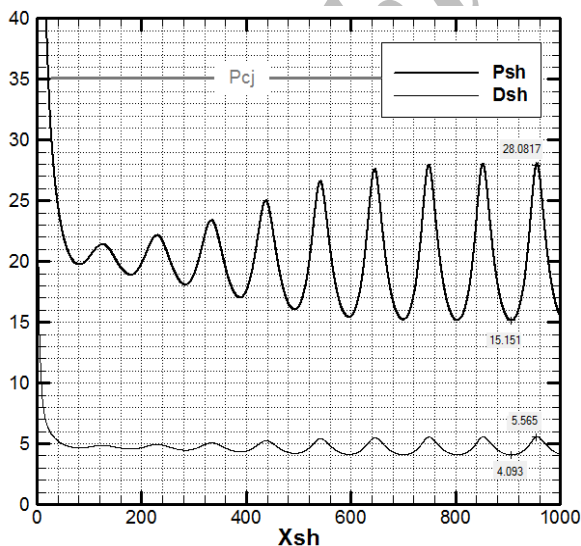


شکل ۱۰- نمودار فشار و سرعت موج ضربه‌ای بر حسب مکان موج ضربه‌ای در محیط با ضریب اصطکاک $Ea=22$ و $Kf=0.03$

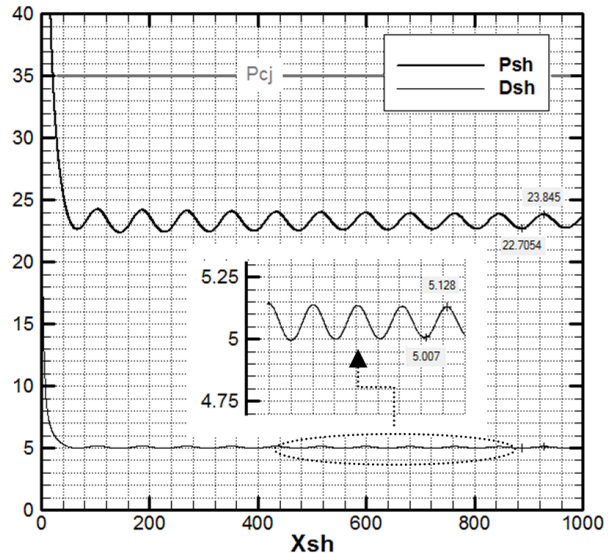


شکل ۹- نمودار فشار و سرعت موج ضربه‌ای بر حسب مکان موج ضربه‌ای در محیط با ضریب اصطکاک $Ea=22$ و $Kf=0.02$

شکل (۱۱) رفتار تراک در مخلوط با ضریب اصطکاک $0.4/0$ را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار، ملاحظه می‌شود که موج تراک کاملاً ناپایدار شده و در جبهه تراک نوساناتی با دامنه و تناوب کوچک پدید آمده است. نوسانات پدید آمده کاملاً منظم و یکنواخت‌اند و میرایی تراک هم وجود ندارد. بیشینه و کمینه نوسانات فشار به ترتیب برابر $23/84$ و $22/70$ و نوسانات سرعت به ترتیب برابر $5/13$ و $5/00$ هستند. سازوکار شکل‌گیری نوسانات ایجاد پالس‌های فشاری در جبهه تراک و دور و نزدیک شدن آن به موج ضربه‌ای پیشرو و در نتیجه تقویت و عدم تقویت تراک است که این سازوکار توسط مظاهری به طور کامل توضیح داده شده است [۱۳]. مقادیر میانگین فشار و سرعت نوسانی تراک در این حالت از حالت مربوط به ضریب اصطکاک $0.3/0$ کمتر شده و برابر با $23/25$ و $5/06$ است.

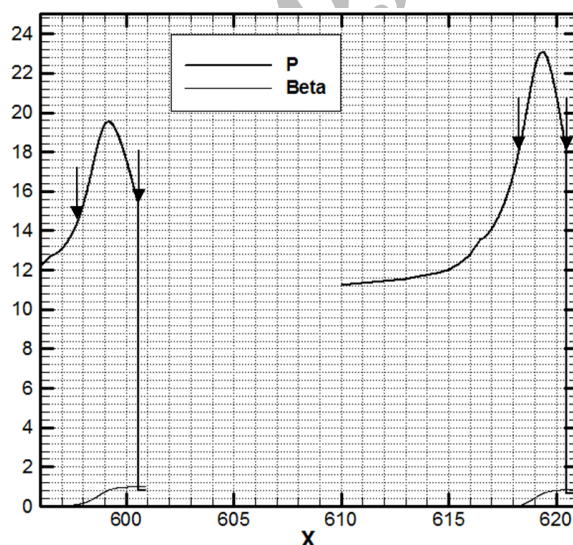


شکل ۱۲- نمودار فشار و سرعت موج ضربه‌ای بر حسب مکان موج ضربه‌ای در محیط با ضریب اصطکاک $Ea=22$ و $Kf=0.05$



شکل ۱۱- نمودار فشار و سرعت موج ضربه‌ای بر حسب مکان موج ضربه‌ای در محیط با ضریب اصطکاک $Ea=22$ و $Kf=0.04$

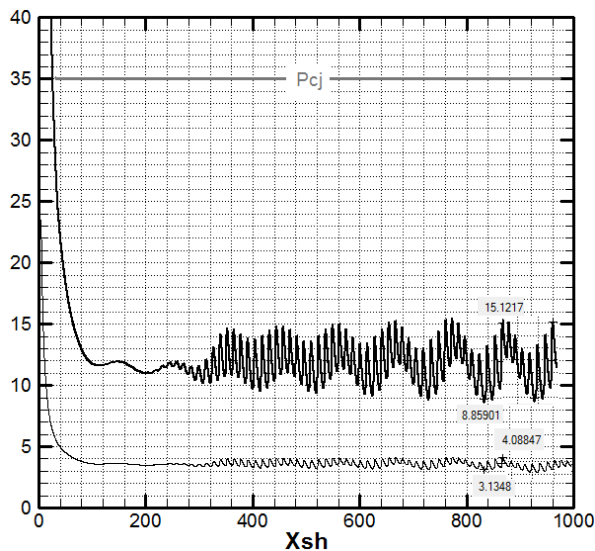
در شکل (۱۲) و برای ضریب اصطکاک 0.05 ، مشاهده می‌شود که نوسانات با دامنه و تناوب بزرگ‌تری نسبت به شکل (۱۱) در جبهه تراک پدید آمده است. بنابراین، مشاهده می‌شود که با افزایش بیشتر اصطکاک ناپایداری باز هم افزایش یافته است. نتایج به دست آمده تاکنون نشان می‌دهند که اثر افزایش ضریب اصطکاک در انرژی فعالسازی 22 روی پایداری تراک مشابه اثر افزایش انرژی فعالسازی در تراک ایدئال است با این تفاوت که افزایش ضریب اصطکاک، علاوه بر ایجاد ناپایداری، متوسط فشار و سرعت تراک را نیز کاهش داده است در حالی که در تراک ایدئال افزایش انرژی فعالسازی تنها روی پایداری تراک اثر دارد و متوسط فشار و سرعت آن در حد مقادیر CJ باقی می‌ماند. افزایش انرژی فعالسازی در تراک ایدئال باعث افزایش طول ناحیه واکنش ($0 \leq \beta \leq 0.95$) نیز می‌شود و اصطکاک نیز همین اثر را بر تراک غیرایدئال می‌گذارد. شکل (۱۳) شکل مقطع فشار و متغیر پیشرفت واکنش برای ضریب اصطکاک 0.05 را نشان می‌دهد که در $X=600$ و $X=620$ ترسیم شده است. حد فاصل بردارهای (عمودی روبه پایین و توپر) روی نمودار موقعیت موج ضربه‌ای پیشرو و انتهای ناحیه واکنش را نشان می‌دهند. انتهای ناحیه واکنش محلی تعریف شده است که متغیر پیشرفت واکنش برابر 0.1 باشد. هرچه ناحیه واکنش به جبهه موج ضربه‌ای پیشرو تراک نزدیک‌تر باشد و یا به عبارتی فاصله دو فلش نشان داده شده در شکل (۱۳) کمتر باشد تقویت تراک توسط انرژی شیمیایی آزاد شده بیشتر می‌شود و بالعکس. گرمای آزاد شده از واکنش شیمیایی باعث تقویت پالس فشاری و در نتیجه تقویت تراک می‌شود. همان‌طور که از شکل (۱۳) نمایان است، در $X=600$ ناحیه واکنش بزرگ‌تر و بیشینه پالس فشاری کمتر و در $X=620$ ناحیه واکنش کوچک‌تر و بیشینه پالس فشاری بیشتر شده است که به معنی قوی‌تر شدن موج تراک با پیشروی از $X=600$ تا $X=620$ است که مطابق شکل (۱۲) مقادیر فشار و سرعت موج ضربه‌ای از مینیمم به سمت بالا در حال سوق دادن است.



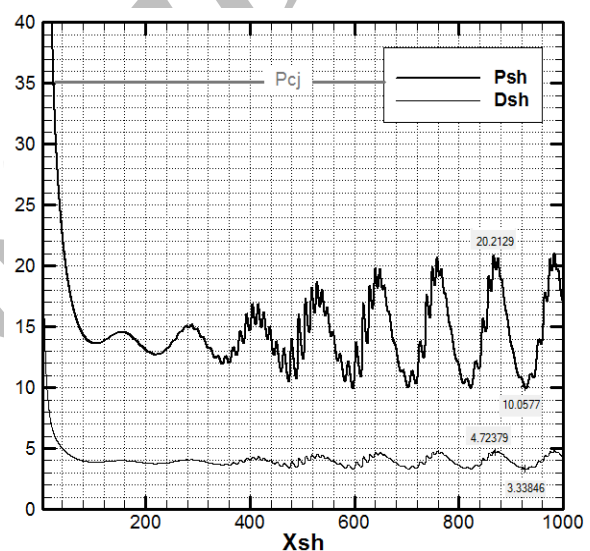
شکل ۱۳- نمودار شکل مقطع فشار موج ضربه‌ای و متغیر پیشرفت واکنش بر حسب مکان در دو موقعیت مختلف و برای محیط با ضریب اصطکاک $Kf=0.05$ و $Ea=22$

در شکل‌های (۱۴) و (۱۵)، رفتار تراک در مخلوط با ضرایب اصطکاک 0.08 و 0.1 داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که رفتار تراک به صورت نوساناتی که از شکل هارمونیک ساده خارج شده‌اند تمایل پیدا کرده است. یک نوع نوسان با دامنه کوچک در رفتار موج ضربه‌ای دیده می‌شود که خود این نوسانات کوچک در درون نوسانات بزرگ‌تری با تناوبی متفاوت مشاهده می‌شوند. مشابه این رفتار در جبهه تراک در شبیه‌سازی تراک با مدل چهارمرحله‌ای دیده شده است [۱۹] در حالی که در

مدلسازی با مدل یک مرحله‌ای این نوع رفتار تاکنون گزارش نشده است. این نوسانات با تناوب دوگانه که در رفتار فشار و سرعت موج ضربه‌ای مشاهده می‌شوند به دلیل دور و نزدیک شدن پیاپی جبهه واکنش از جبهه موج ضربه‌ای است در حالی که در بخش قبل، برای انرژی فعالسازی ۸ و مطابق جدول (۱)، مشاهده شد که فاصله موج ضربه‌ای پیشرو از جبهه واکنش با افزودن اصطکاک ثابت ماند. لذا نتیجه می‌شود که در تراک غیرایده‌آل، با افزایش ضریب اصطکاک تا مقادیر بیان شده، رفتار موج تراک در یک سطح بالاتر از ناپایداری قرار گرفته است. مقایسه رفتار ناپایدار تراک در اصطکاک ۰/۸ و ۰/۱ مشخص می‌کند که با افزایش اصطکاک دامنه نوسانات ریزتر افزایش و دامنه نوسانات بزرگ‌تر کاهش یافته است. در واقع، با افزایش دامنه و تناوب نوسانات کوچک، نوسانات بزرگ به تدریج در حال حذف شدن و نوسانات کوچک در حال غالب شدن به رفتار تراک هستند. به هر حال، با افزایش ضریب اصطکاک، کاهش سرعت و فشار متوسط تراک نیز مشاهده می‌شود. این مطلب ثابت می‌کند که اثر اصطکاک کماکان باعث تضعیف تراک به خاطر کاهش نرخ موثر انرژی گرمایی آزاد شده از واکنش شیمیایی شده است.



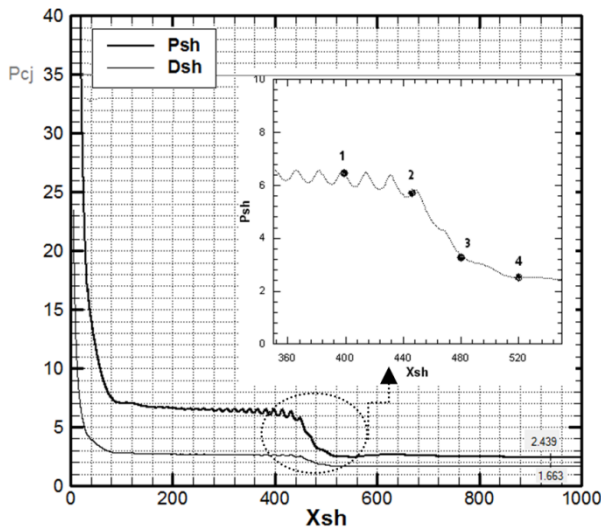
شکل ۱۵- نمودار فشار و سرعت موج ضربه‌ای بر حسب مکان موج ضربه‌ای در محیط با ضریب اصطکاک $Ea=22$ و $Kf=0.1$



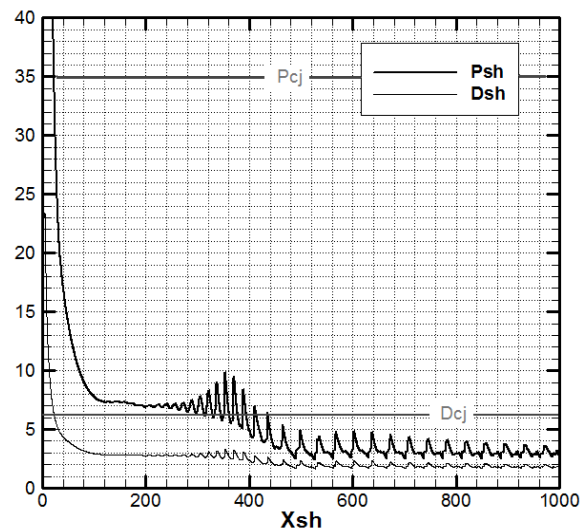
شکل ۱۴- نمودار فشار و سرعت موج ضربه‌ای بر حسب مکان موج ضربه‌ای در محیط با ضریب اصطکاک $Ea=22$ و $Kf=0.08$

شکل‌های (۱۶) و (۱۷) رفتار موج در محیط با ضریب اصطکاک ۰/۱۵ و ۰/۲ را نشان می‌دهند. با توجه به این شکل‌ها، مشاهده می‌شود که تراک اولیه که تحت تاثیر موج آغازش تراکنشی ایجاد شده است در یک موقعیت مکانی خاص (حدود $X=450$ در شکل ۱۶) میرا شده است. در هنگام میرایی تراک، سرعت موج تراک تا حد زیادی کم شده و به سرعت حدی بی‌بعد برابر مقدار عددی یک نزدیک شده است. شایان ذکر است که برای اطمینان از وجود میرایی در این حالت‌ها آغازش تراک با موج‌های تراکنشی قوی‌تر هم ایجاد شد و نتایج نشان دادند میرایی در فواصل دورتری اتفاق افتاده است. لذا میرایی پیش‌بینی شده مستقل از موج تراکنشی اولیه برای آغازش تراک است.

یادآوری این نکته لازم است که با مدل سینتیک یک مرحله‌ای در تراک ایده‌آل (بدون اصطکاک) میرایی تراک قابل پیش‌بینی نبوده است [۱۳]. لذا، در مقایسه با کار حاضر، می‌توان نتیجه گرفت که برای پیش‌بینی میرایی تراک سازوکاری جهت تضعیف تراک باید وجود داشته باشد. این مطلب هم توسط سازوکارهای ائتلافی مثل لحاظ کردن اثر اصطکاک و هم توسط در نظر گرفتن مدل‌های سینتیک کامل‌تر قابل مشاهده است [۱۹].

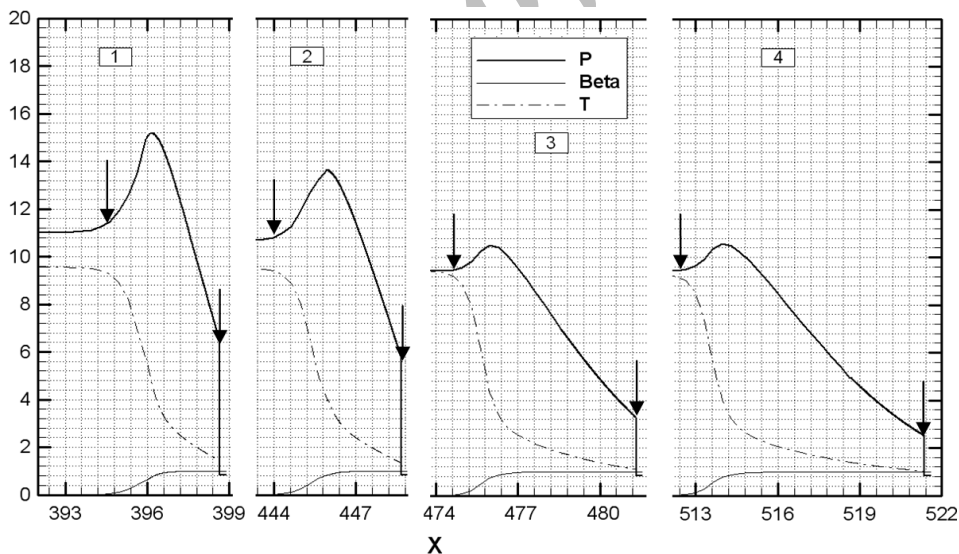


شکل ۱۷- نمودار فشار و سرعت موج ضربه‌ای بر حسب مکان موج ضربه‌ای در محیط با ضریب اصطکاک $Ea=22$ و $Kf=0.2$



شکل ۱۶- نمودار فشار و سرعت موج ضربه‌ای بر حسب مکان موج ضربه‌ای در محیط با ضریب اصطکاک $Ea=22$ و $Kf=0.15$

برای مطالعه ساختار تراک در لحظه میرایی آن، شکل مقطع فشار، دما و متغیر پیشرفت واکنش برای نقاط مختلف مشخص شده در شکل (۱۷)، به صورت متناظر، در شکل (۱۸) نشان داده شده است.

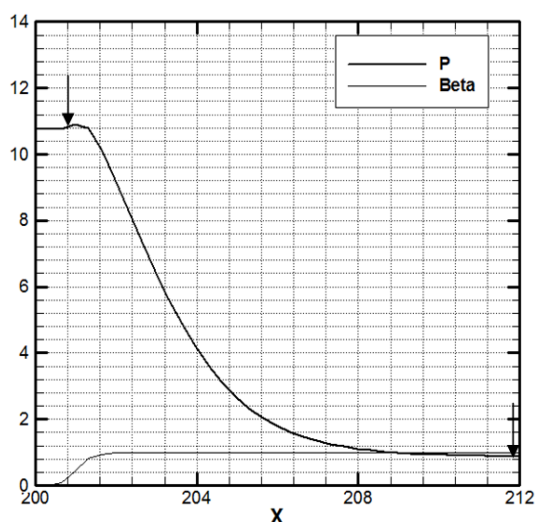


شکل ۱۸- شکل مقطع فشار موج ضربه‌ای و متغیر واکنش بر حسب مکان در محیط با ضریب اصطکاک $Ea=22$ و $Kf=0.2$ (وضعیت میرایی)

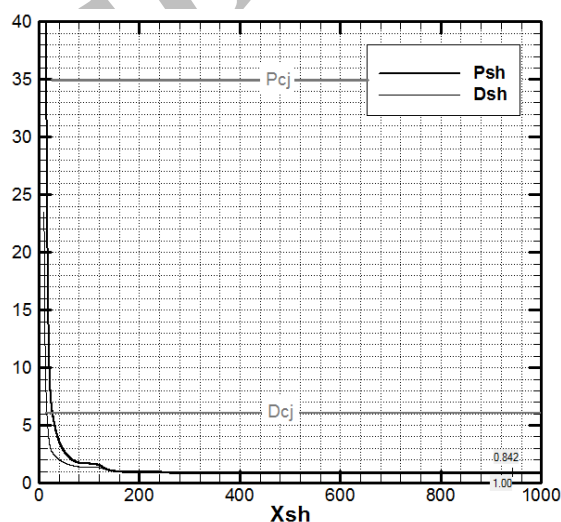
زمانی که موج ضربه‌ای در موقعیت ۱ قرار دارد میرایی تراک هنوز آغاز نشده است و جبهه موج ضربه‌ای توسط امواج فشاری نه‌چندان قوی ایجاد شده در جبهه واکنش تقویت می‌شود. با پیشروی تراک و در پی کاهش فشار و دمای موج ضربه‌ای پیشرو، نرخ واکنش نیز کاهش یافته و در نتیجه فاصله جبهه واکنش از موج ضربه‌ای پیشرو بیشتر می‌شود. فاصله جبهه واکنش از موج ضربه‌ای پیشرو از حد فاصل بردارهای عمودی روی منحنی مشخص است. ناحیه تاخیر، ناحیه‌ای با دمای تقریباً ثابت، بین موج ضربه‌ای پیشرو و ابتدای ناحیه واکنش، که متغیر پیشرفت واکنش در آن 0.99 است، می‌باشد. شکل مقطع دما نشان می‌دهد که با فاصله گرفتن ناحیه واکنش از موج ضربه‌ای پیشرو دما در ناحیه تاخیر افزایش کمی یافته است و بیشترین شیب

افزایش دما در ناحیه واکنش، که مخلوط گازی در حال سوختن و آزاد کردن انرژی است، می‌باشد. لذا هرچه طول ناحیه تاخیر و به تبع آن فاصله ناحیه واکنش از موج ضربه‌ای پیشرو بیشتر شود، گرمای آزاد شده نمی‌تواند باعث تقویت موج ضربه‌ای پیشرو شود؛ بنابراین این جدایش منجر به میرایی تراک می‌شود. شکل مقطع فشار در موقعیت‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهند بیشینه فشار در حال کاهش بوده و توسط گرمای ایجاد شده تقویت نمی‌شود. لذا این پالس فشاری تضعیف شده نتوانسته باعث تقویت موج ضربه‌ای پیشرو شود؛ بنابراین افت فشار موج ضربه‌ای بیشتر شده تا نهایتاً میرایی اتفاق افتاده است.

با افزایش ضریب اصطکاک به مقادیر ۰/۵ و ۱ و ۱/۵ دیگر هیچ نوسانی مشاهده نشده و تراک پس از طی مسافتی از مکان آغازش اولیه میرا شده است. به عنوان نمونه، در شکل (۱۹) شکل مقطع فشار برای تراک در مخلوط با ضریب اصطکاک ۱/۵ داده شده است. شکل (۲۰) شکل مقطع فشار و متغیر پیشرفت واکنش را نشان می‌دهند که مشاهده می‌شود فاصله مکانی جبهه واکنش از جبهه موج ضربه‌ای خیلی زیاد شده است و میرایی تراک رخ داده است، چون عملاً هیچ‌گونه موج فشاری از ناحیه واکنش به سمت موج ضربه‌ای ارسال نشده است. در پی کاهش فشار و دمای موج ضربه‌ای، نرخ واکنش نیز کاهش یافته و در نتیجه فاصله جبهه واکنش از موج ضربه‌ای بیشتر می‌شود و این جدایش منجر به میرایی تراک می‌شود.



شکل ۲۰- نمودار شکل مقطع فشار موج ضربه‌ای و متغیر واکنش بر حسب مکان در محیط با ضریب اصطکاک $Kf=1.5$ و $Ea=22$



شکل ۱۹- نمودار فشار و سرعت موج ضربه‌ای بر حسب مکان موج ضربه‌ای در محیط با ضریب اصطکاک $Kf=1.5$ و $Ea=22$

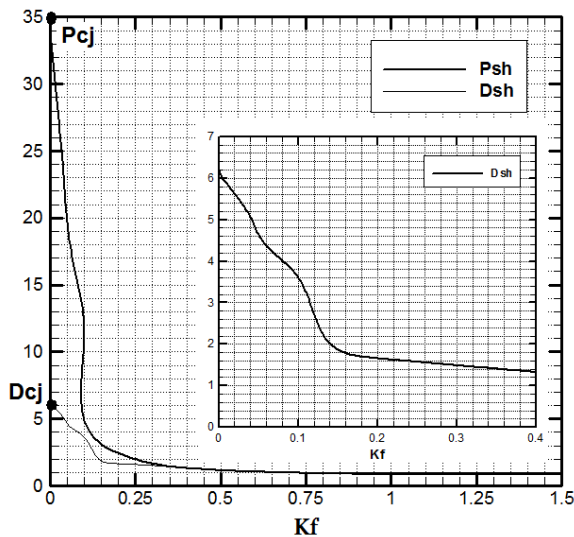
جدول (۲) متوسط فاصله بی‌بعد جبهه موج ضربه‌ای پیشرو تا انتهای جبهه واکنش در ضرایب اصطکاک مختلف و برای انرژی فعالسازی ۲۲ را نشان می‌دهد. این فاصله برای حالت‌هایی که تراک رفتار نوسانی دارد، به صورت متوسط دو مقدار بیشترین فاصله بی‌بعد جبهه موج ضربه‌ای پیشرو تا انتهای جبهه واکنش (در زمانی که فشار تراک کمترین مقدار را دارد) با کمترین فاصله بی‌بعد جبهه موج ضربه‌ای پیشرو تا انتهای جبهه واکنش (در زمانی که فشار تراک بیشترین مقدار را دارد) محاسبه شده است. به عنوان مثال، برای مخلوط با ضریب اصطکاک $Kf=1.5$ و $Ea=22$ ، در شکل (۱۳) کمترین فاصله مذکور حدود ۲/۳ و بیشترین آن ۳/۹ است که متوسط آن مقدار ۳/۱ در جدول داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود که در انرژی فعالسازی ۲۲، با افزایش اصطکاک، فاصله بیان شده نیز افزایش یافته است در حالی که در مقایسه با انرژی فعالسازی ۸، بعد از یک ضریب اصطکاک مشخص، طول ناحیه تاخیر ثابت باقی مانده است. این نکته مشخص می‌سازد که سازوکار تضعیف تراک در انرژی فعالسازی ۲۲، علاوه بر تضعیف تراک به خاطر کاهش فشار و به تبع آن دما، منتج از اتلافات تکانه و جدایی ناحیه واکنش از موج ضربه‌ای پیشرو نیز می‌باشد.

جدول ۲- فاصله جبهه موج ضربه‌ای پیشرو تا انتهای ناحیه واکنش (d) در چندین حالت در انرژی فعالسازی ۲۲

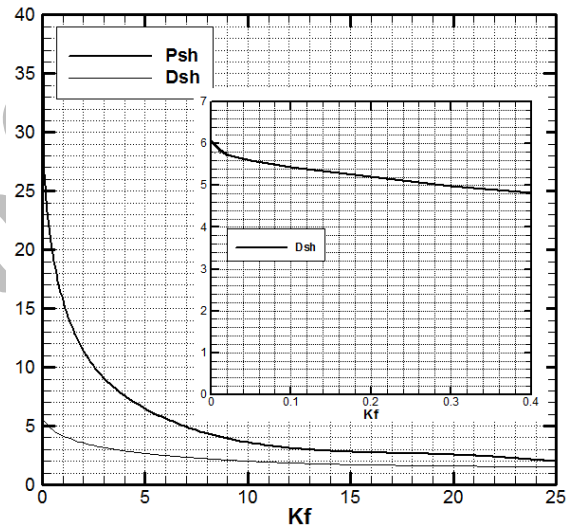
(برای حالات نوسانی، میانگین گرفته شده است)

Kf	۰	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۰/۵	۱/۰	۱/۵
d	۰/۶۱	۱/۸۳	۱/۹۷	۲/۰۵	۲/۱۷	۲/۱۸	۳/۱	۳/۳	۳/۳	۸/۶	۹/۳۱	۱۰/۵۱	۱۰/۹	۱۱/۱۱

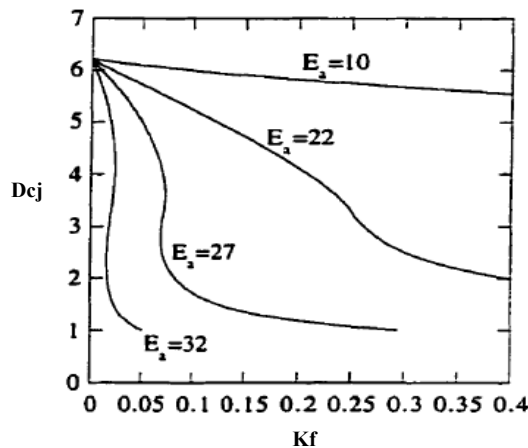
برای مقایسه روند کیفی نتایج حاضر با مراجع، نمودار تغییرات فشار و سرعت موج ضربه‌ای بر حسب متغیر ضریب اصطکاک در دو انرژی فعالسازی ۸ و ۲۲ به ترتیب در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) نشان داده شده است. در شکل (۲۳)، تغییرات سرعت موج ضربه‌ای بر حسب ضریب اصطکاک برای چندین انرژی فعالسازی متفاوت، از حل تحلیلی که توسط دایان انجام گرفته، نشان داده شده است [۸]. یکسان بودن روند کیفی و رفتاری در نتایج حل عددی در این تحقیق با حل تحلیلی (نمودارهای مربوط به انرژی فعالسازی ۱۰ و ۲۲ در شکل ۲۳) مشاهده می‌شود. تفاوت‌های موجود در مقادیر عددی نمودار ۲۳ با نمودارهای ۲۱ و ۲۲ به خاطر تفاوت در بی‌بعدسازی معادلات و انرژی فعالسازی در کار حاضر و نتایج مرجع [۸] است.



شکل ۲۲- نمودار تغییرات فشار و سرعت موج ضربه‌ای بر حسب ضریب اصطکاک برای $E_a=22$



شکل ۲۱- نمودار تغییرات فشار و سرعت موج ضربه‌ای بر حسب ضریب اصطکاک برای $E_a=8$



شکل ۲۳- نمودار تغییرات سرعت موج ضربه‌ای بر حسب ضریب اصطکاک از حل تحلیلی در چند انرژی فعالسازی [۸]

نتیجه گیری

در این مطالعه، رفتار تراک غیر ایدئال در مخلوط‌های با انرژی فعالسازی کم و در کانال‌های زبر با مدلسازی عبارت منبع اصطکاک در معادله تکانه بررسی شده است. از جمله نتایج به دست آمده می‌توان موارد زیر را بیان کرد:

- برای تراک با اصطکاک، حد پایداری کاهش می‌یابد و اصطکاک یا اتلاف تکانه باعث کاهش سرعت متوسط و فشار متوسط تراک نسبت به مقدار CJ می‌شود.
- افزایش اصطکاک در انرژی فعالسازی خیلی کم (برابر ۸ در این تحقیق) تنها باعث تضعیف تراک شده و روی پایداری تراک تأثیری نداشته است.
- اصطکاک در انرژی فعالسازی ۲۲ سبب نوسانی شدن رفتار تراک می‌شود. با بیشتر شدن اصطکاک تا حدود ۰/۰۵، دامنه نوسانات و گام‌هایش بزرگ‌تر می‌شود. در ضرایب اصطکاک بیشتر از ۰/۰۵، تراک با نوسانات دوگانه مشاهده شده است.
- در انرژی فعالسازی ۲۲، اثر افزایش اصطکاک مشابه اثر افزایش سطح انرژی فعالسازی است با این تفاوت که میرایی با افزایش اثر اصطکاک مشاهده می‌شود، ولی با افزایش انرژی فعالسازی واکنش یک مرحله‌ای، میرایی تراک قابل پیش‌بینی نیست. رفتار ساختار تراک در فاصله‌های دورتر و تا مقدار بی بعد ۵۰۰۰ از محل آغازش تراک نیز بررسی شده و نتایج نشان دادند که آغازش دوباره اتفاق نیفتاده است.
- تضعیف و میرایی تراک در انرژی فعالسازی ۸ به خاطر اتلافات اصطکاک و کاهش سرعت تراک است در حالی که در انرژی فعالسازی ۲۲ تضعیف و میرایی، علاوه بر سازوکار فوق، به خاطر جدایی ناحیه واکنش از موج ضربه‌ای پیشرو نیز می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از معاونت پژوهشی دانشگاه کاشان و پژوهشکده انرژی دانشگاه کاشان به خاطر حمایت از این پژوهش نهایت سپاسگزاری را دارند. همچنین، از آقای دکتر کیومرث مظاهری به خاطر در اختیار قرار دادن کد اولیه و راهنمایی‌های ارزنده‌شان در طول انجام پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

1. W. Fickett and W.C. Davis, *Detonation*, University of California Press, 1979.
2. M. I. Radulescu and J. H. S. Lee, "The Failure Mechanism of Gaseous Detonations: Experiments in Porous Wall Tubes," *Combustion and Flame*, 131, pp. 29-46, 2002.
3. J. J. Lee, G. Dupre, R. Knystautas and J. H. Lee, "Doppler Interferometry Study of Unstable Detonations," *Shock Waves*, 5, pp. 175-181, 1995.
4. G. Dupre, O. Peraldi, J. H. Lee and R. Knystautas, "Propagation of Detonation Waves in an Acoustic Absorbing Walled Tube," *AIAA Prog. Astronaut Aeronaut*, 114, pp. 248-263, 1988.
5. C. Guo, G. Thomas, J. Li and D. Zhang, "Experimental Study of Gaseous Detonation Propagation Over Acoustically Absorbing Walls," *Shock Waves*, 11, pp. 353-359, 2002.
6. M. W. Evans, F. I. Given and W. E. Richeson, "Effects of Attenuating Materials on Detonation Induction Distances in Gases," *J Appl. Phys*, 26, pp. 1111-1113, 1955.
7. J. H. S. Lee, *The Detonation Phenomenon*, Cambridge University Press, 2008.
8. J. P. Dionne, "Theoretical Study of the Propagation of Non-Ideal detonation," PhD Thesis, McGill University, 2000.
9. J. H. S. Lee, "Detonation Waves in Gaseous Explosives," *Handbook of Shock Waves*, 3, pp. 309-415, 2001.
10. Y. B. Zeldovich, "On the Theory of the Propagation of Detonation in Gaseous System," *Zh. Eksp. Teor. Fiz*, 10, pp. 542-568, 1940. Also in NACA TM 1261, 1960.
11. Y. B. Zeldovich, B. E. Gelfand, Ya. M. Kazhdan and S. M. Frolov, "Detonation Propagation in Rough Tube Taking Account of Deceleration and Heat Transfer," *Sov. J. Chem. Phys.*, 4, No. 2, pp. 103-112, 1987.
12. J. H. S. Lee and F. Zhang, "Friction-Induced Oscillatory Behaviour of One Dimensional Detonation," *Proc. R. Soc-Land.*, A 446, pp. 87-105, 1994.
13. K. Mazaheri, "Mechanism of the Onset of Detonation," PhD Thesis, McGill University, 1997.

14. A. Bourlioux, "Numerical Studies of Unstable Detonations," PhD Thesis, Department of Applied and Computational Mathematics, Princeton University, U.S.A., 1991.
15. P. Colella and P. R. Woodward, "The Piecewise Parabolic Method (PPM) for Gas-Dynamical Simulations," *J. Comput. Phys.*, 54, pp. 174-201, 1984.
16. I. L. Chern and P. Colella, "A Conservative Front Tracking Method for Hyperbolic Conservation Laws," Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL 97200, 1987.
17. M. J. Berger and P. Colella, "Local Adaptive Mesh Refinement for Shock Hydrodynamics," *J. Comput. Phys.*, 82, pp. 64-84, 1989.
18. J. H. S. Lee, "Dynamic Parameters of Gaseous Detonations," *Ann. Rev. Fluid. Mech.*, 16, pp. 311-336, 1984.
19. S.A. Hashemi, "Numerical Study of the Role of Kinetic Parameters on Instability of Gaseous Detonations," PhD Thesis, Department of Mechanic, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Iran, 2004, (In Farsi).

English Abstract

Investigation of the Friction Effects on Instability of the One-Dimensional Gaseous Detonation Waves in the Mixtures with Low Activation Energy

M. Sabzpooshani^{1,2} and H. Karimaei²

1- Energy Research Institute, University of Kashan

2- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan,

(Received: 2010/10/6, Received in revised form: 2011/2/20, Accepted: 2011/3/7)

In this paper, behavior of the non-ideal detonation wave is studied. Simulation of detonation is performed based on the one-dimensional Euler equations, taking into consideration the friction effects by additional momentum source term in the momentum conservation equation. One-step Arrhenius reaction model is utilized for modeling of the chemical reactions. The yielded results indicated that in the very low activation energy (equal to 8), considering the friction caused a reduction in detonation velocity and an extension in length of the reaction zone up to a specific value. Nevertheless, stable behavior of detonation wave is observed even at higher values of friction factor. The results also show that in the activation energy of 22 (which is close to stability limit in the ideal detonation) and with low values of the friction factor, detonation wave retains its stability; but with increasing the friction factor, detonation wave leads to unstable and pulsating detonation. For higher values of the friction factor, at first, double oscillation detonation is appeared and finally, when friction factor exceeds the critical value, separation of the reaction zone and precursor shock wave occurs and then the detonation will be attenuated. Indeed, the behavior of detonation waves is controlled by the competition between the rate of energy release from chemical reaction and the rate of momentum dissipation by friction effect.

Keywords: Numerical simulation, Non-ideal detonation, Detonation stability, Friction effect