

بررسی اثر افزایش نسبت پهناي کانال در رفتار تراک گازی در حال انکسار

مجید سبزویشانی^{۱*}، محمدحسین خیرخواه^۲

کاشان - دانشگاه کاشان - پژوهشکده انرژی

* نویسنده مخاطب: spooshan@kashanu.ac.ir

چکیده

شبیه‌سازی عددی دوبعدی انکسار تراک در مخلوط گازی با انرژی فعالسازی ۲۰، از کانالی کوچک به کانال با پهناي بزرگتر انجام شده است. مدل‌سازی بر اساس معادلات اویلر واکنشی و مدل سینتیکی یک مرحله‌ای آرنیوسی است. نتایج نشان دادند که اثرات گاز دینامیکی ناشی از امواج انبساطی در هنگام انتقال تراک از کانال با پهناي کمتر به کانال با پهناي بیشتر، نقش اساسی روی رفتار تراک دارند. در حقیقت تقابل بین تضعیف تراک توسط امواج انبساطی و تقویت مجدد آن پس از تضعیف اولیه، بخاطر انعکاس امواج عرضی و افزایش نرخ واکنش می‌باشد. لازم بذکر است که این نتایج برای نسبت‌های مختلف پهناي کانال با اندکی تفاوت برقرار است.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی عددی - انکسار تراک - تغییر پهناي کانال - امواج انبساطی

۱- مقدمه

پدیده انکسار تراک گازی یکی از مهم‌ترین پدیده‌های است که در سالیان اخیر به دلیل کاربردهای وسیع در صنایع نظامی، ایمنی انتقال مواد تراک‌پذیر و موتورهای تراک‌ضربانی^۳ مورد توجه قرار گرفته است. انتشار یک موج تراک هنگام خروج از لوله یا کانال به محیط با پهناي بزرگتر و یا محیط باز، وابسته به ترکیب مخلوط، شرایط ترمودینامیکی اولیه و هندسه سیستم در یکی از رژیم‌های مادون بحرانی^۴، بحرانی^۵ و یا مافوق بحرانی^۶ رخ می‌دهد [۱].

به منظور بررسی این پدیده مطالعات تحلیلی، تجربی و عددی مختلفی انجام شده است [۱-۵]. شولتز یک رابطه تحلیلی برای محاسبه قطر بحرانی ارائه کرده و نتایج حاصل را با نتایج تجربی خود مقایسه کرده است [۱]. اگرچه نتایج مدل تحلیلی او با برخی نتایج تجربی تاحدودی همخوانی داشت اما در برخی تراک‌ها و بخصوص در تراک‌های با ساختار سلولی نامنظم، نتایج تحلیلی و تجربی تفاوت معناداری داشتند. گائو و همکاران سیر تکاملی ساختار سلولی انکسار تراک گازی در یک کانال با یک شاخه فرعی ۹۰ درجه را به صورت تجربی بررسی کردند [۲]. نتایج آنها نشان می‌دهد که رفتار انتشار تراک به طور چشمگیری توسط هندسه دیوار جانبی آشفته شده و یک سری امواج با ساختاری پیچیده در کانال جانبی ظاهر می‌شود. ساختارهای سلولی نشان می‌دهند که یک فن انبساطی در محل T شکل کانال و یک انعکاس ماخ^۷ در کانال افقی اتفاق می‌افتد، در حالیکه یک انعکاس منظم^۸ در کانال عمودی مشاهده می‌شود. پاپالکساندریس و همکاران خواص ساختاری انبساط تراک از یک کانال کوچک به کانال بزرگتر را به طور عددی و با مدل سینتیکی یک مرحله‌ای مورد بررسی قرار دادند [۳]. آنها اثرات انرژی

۱- استادیار، دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی و پژوهشکده انرژی

۲- کارشناس ارشد، دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی

³ Pulse Detonation Engine

⁴ Sub Critical

⁵ Critical

⁶ Super Critical

⁷ Mach reflection

⁸ Regular reflection

فعالسازی و نسبت عرضی کانال را مطالعه کرده و نتیجه گرفتند که مقادیر به اندازه بزرگ این دو پارامتر منجر به جریان‌های بحرانی و حتی مادون بحرانی می‌شود. از نکات قابل تامل در تحقیق آنها استفاده از هندسه متقارن برای شبیه‌سازی انکسار تراک در کانال می‌باشد در حالیکه به خاطر طبیعت کاملاً نامنظم و سه‌بعدی تراک گازی، تقارن نسبت به یک محور فرض منطقی نمی‌باشد. البته آنها شبیه‌سازی سه‌بعدی انکسار تراک را نیز انجام داده و نتیجه گرفتند که رژیم حاکم بر انکسار تراک در حالت سه‌بعدی با رژیم متناظر در حالت دوبعدی یکسان است.

در مطالعه حاضر ابتدا معادلات حاکم بر مسئله و روش حل عددی بیان می‌شود. سپس با استفاده از نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی دوبعدی، ساختار تراک و اثر پدیده‌هایی مثل نقش امواج عرضی و امواج انبساطی در حین عبور تراک از محل تغییر سطح مقطع کانال مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- معادلات حاکم

شکل بی بعد معادلات دوبعدی واکنشی اویلر در یک دستگاه مختصات ساکن از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

که بردارهای U, F, G, S به صورت روابط (۲) تعریف شده‌اند:

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \rho w \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho vE + vp \\ \rho v\beta \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uE + up \\ \rho u\beta \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \\ \rho\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

در معادلات (۱) و (۲)، S نماینده عبارت منبع ناشی از احتراق و P, ρ, u و v به ترتیب فشار، چگالی و مولفه‌های سرعت ذره نسبت به یک دستگاه ساکن می‌باشند. β و w به ترتیب نرخ تولید محصولات طی فرایند احتراق و کسر جرمی می‌باشند. در این معادله E انرژی داخلی کل بر واحد جرم است که از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$E = \frac{p}{\rho(\gamma-1)} + \frac{(u^2 + v^2)}{2} + \beta Q \quad (3)$$

که γ نسبت گرمای ویژه و Q گرمای آزاد شده از واکنش شیمیائی می‌باشند. در این مقاله فرض می‌شود که $\gamma = 1.2$ می‌باشد. مدل سینتیکی در نظر گرفته شده در این مطالعه، مدل یک مرحله‌ای آرنیوسی است، که به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$W = -k\beta \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

که در آن E_a انرژی فعال سازی، T دما، R ثابت گازها و k پیش فاکتور (ثابت) آرنیوسی می‌باشند. کلیه معادلات به صورت بی‌بعد در نظر گرفته شده‌اند. برای اینکار متغیرهای وابسته با توجه به خواص مخلوط نسوخته بی‌بعد شده‌اند. برای بی‌بعد کردن متغیرهای مکانی، از طول نیمه‌واکنش برای مخلوط گازی با مشخصات سینتیکی $E_a / RT_0 = 20$ ، $Q / RT = 50$ استفاده شده است.

۳- روش حل عددی

روش عددی مورد استفاده در این مطالعه، یک روش پیوسته^۱ و بالا دستی^۲ می‌باشد [۴]. در این روش محاسبه فلاکس-های عددی روی اضلاع سلول‌های شبکه محاسباتی با در نظر گرفتن تغییرات میدان جریان در هر دو جهت مختصاتی است.

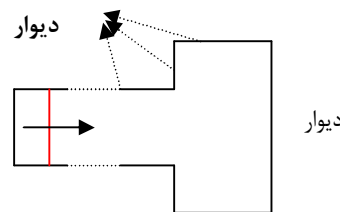
¹ Unsplit

² Upwind

برای کاهش هزینه محاسباتی، از روش ریزکردن تطبیقی شبکه استفاده گردیده است [۵]. با استفاده از روش فوق، یک کد کامپیوتری تهیه شده و قابلیت آن در شبیه‌سازی تراک دوبعدی به اثبات رسیده است [۶]. در کار حاضر، کد مزبور برای شبیه‌سازی انتشار تراک در کانال با تغییر سطح مقطع توسعه داده شده است.

۴- تعریف مدل

شماتیکی از مدل مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این کانال D_1 و L_1 به ترتیب عرض و طول کانال کوچک، L_2 طول کانال با پهنای بیشتر و AR نسبت انبساط کانال می باشد. ایجاد تراک توسط یک موج بلست قوی اولیه که در ابتدای کانال با پهنای کوچکتر قرار داده شده انجام می شود. لذا حرکت جبهه ترا با توجه به شکل (۱) از سمت چپ به راست است.



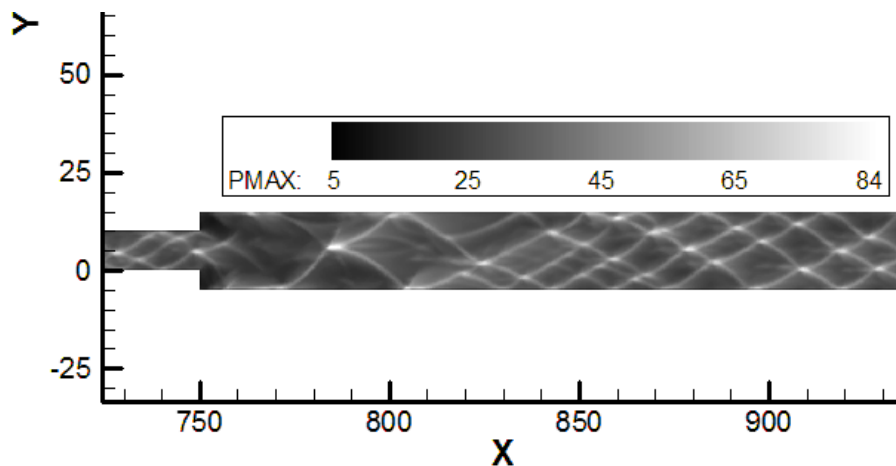
شکل ۱- طرحواره مدل هندسی کانال

۵- نتایج

به منظور بررسی پدیده انکسار تراک گازی در مخلوطی با ساختار سلولی نسبتاً نامنظم در یک کانال با پهنای متفاوت، در ابتدا کانالی با طول اولیه $L_1 = 750$ و پهنای اولیه $D_1 = 10$ و انرژی فعالسازی مخلوط برابر با ۲۰ در نظر گرفته شده است. در این شرایط حداقل یک سلول مشخصه در کانال اولیه تشکیل شده است. با ثابت نگه‌داشتن تمام شرایط دیگر، تنها نسبت پهنای کانال تغییر می‌کند تا اثر این پارامتر بر انکسار تراک در این انرژی فعالسازی بررسی شود.

۵-۱- نسبت پهنای کانال ۲

شکل ۲ نتیجه حاصل از شبیه‌سازی عددی انکسار تراک برای مخلوطی با انرژی فعالسازی ۲۰ و کانالی با شرایط هندسی $L_1 = 750, D_1 = 10, AR = 2$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، یک سلول مشخصه در کانال با پهنای کمتر ایجاد شده است. در این شکل آغاز دوباره تراک پس از انکسار آن در کانال با پهنای بیشتر اتفاق افتاده است. در هنگام انتقال تراک از کانال با پهنای کم به کانال با پهنای بزرگ، ابتدا ساختارهای سلولی حذف شده و سپس در محلی با مختصات تقریبی $x = 785, y = 6$ ایجاد شده‌اند.



شکل ۲- تاریخچه فشار بیشینه برای انکسار مخلوط با مشخصات $E_a / RT_0 = 20$ و $Q / RT = 50$ و $\gamma = 1.2$ در کانالی با مشخصات $L_1 = 750, D_1 = 10, AR = 2$

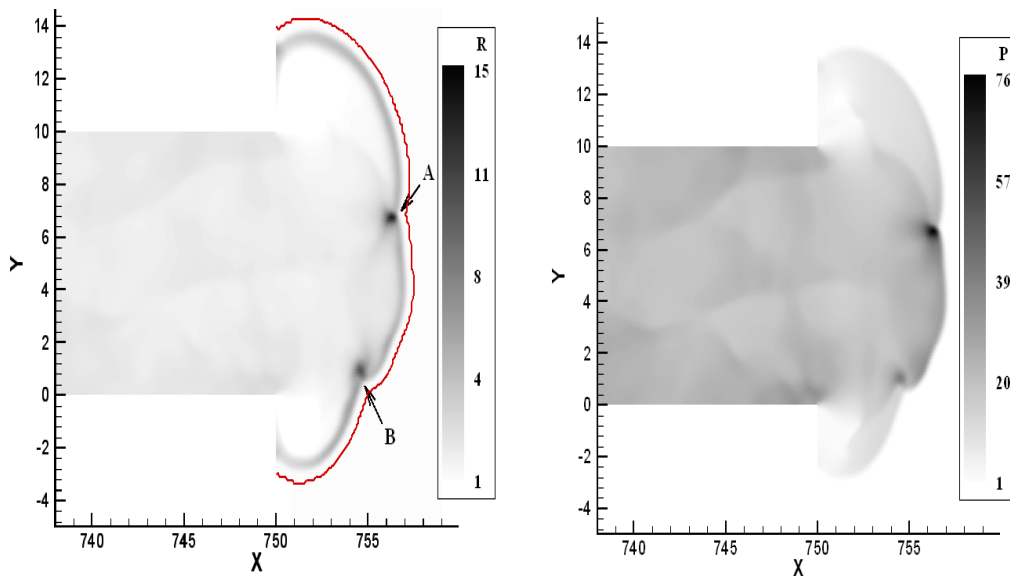
نتایج بدست آمده مشخص می‌کند که تراک در هنگام انکسار، ابتدا تضعیف شده و سپس با ایجاد یک نقطه داغ^۱ در نزدیکی خط مرکزی کانال بزرگتر و در موقعیت تقریبی $x=785$ ، آغاز دوباره آن اتفاق افتاده است. ایجاد نقطه داغ در اثر برخورد دو نقطه سه‌گانه ضعیف موجود در جبهه تراک می‌باشد. این نقاط سه‌گانه ضعیف در اثر برخورد اغتشاشات موجود در جبهه تراک با دیوارهای بالایی و پائینی کانال بزرگتر و تقویت آنها پس از منعکس شدن بوجود آمده‌اند. حذف ساختارهای سلولی در این ناحیه را می‌توان ناشی از اثر امواج انبساطی بر جبهه تراک و ایجاد انحنا در آن و در نهایت خنک شدن تراک دانست. به دلیل کاهش دمای جبهه امواج پیشرو، نرخ واکنش کاهش یافته و فاصله بین موج ضربه‌ای پیشرو و ناحیه واکنش نیز افزایش یافته است. موقعیت تقریبی حذف ساختار سلولی در کانال بزرگتر، تقریباً $x=760$ است که از مرتبه پهنای کانال کوچکتر است. پس از نقطه آغازش و در موقعیت مکانی حدود ۸۰۰، اندازه سلول ایجاد شده در کانال، از اندازه سلول ایجاد شده در کانالی با همین شرایط و بدون انبساط ناگهانی بیشتر است که بیانگر تضعیف بودن تراک در ابتدای انتشار دوباره است. لذا می‌توان دریافت که علی‌رغم آغاز دوباره تراک، جبهه تراک هنوز به حالت رفتار شبه‌پایدار نرسیده است. با پیشروی بیشتر تراک در کانال با پهنای بزرگتر، تراک به حالت شبه‌پایدار رسیده و اندازه سلول‌های ایجاد شده در کانال با اندازه سلول‌های ایجاد شده در کانالی بدون انبساط ناگهانی برابر می‌شود.

برای مطالعه دقیق‌تر جزئیات حاکم بر رفتار تراک پس از انکسار آن، کانتورهای مختلف از لبه خروجی کانال کوچک تا نقطه‌ای پس از نقطه آغازش دوباره، در چند زمان مختلف بررسی شده است.

شکل ۳ کانتورهای فشار، چگالی، دما و پارامتر پیشرفت واکنش را در ادامه انتشار تراک در کانال با پهنای بیشتر نشان می‌دهد. این شکل مشخص می‌کند که جبهه تراک در خط مرکزی کانال نسبت به مکان تغییر سطح مقطع، حدود ۱۷ واحد طول پیشروی کرده درحالی‌که مقدار پیشروی جبهه تراک در راستای پهنای کانال (به طرف بالا) حدود ۴ واحد طول است. دلیل این پدیده را در دو نکته می‌توان بیان نمود. نکته اول قوی‌تر بودن بخش مرکزی جبهه تراک در هنگام ورود به کانال با پهنای بیشتر است که در شکل ۲ مشخص است. دلیل دوم انحنای بیشتر تراک در نزدیکی گوشه‌ها در محل تغییر سطح مقطع و تضعیف تراک توسط امواج انبساطی و در نتیجه افزایش انحنا جبهه تراک می‌باشد.

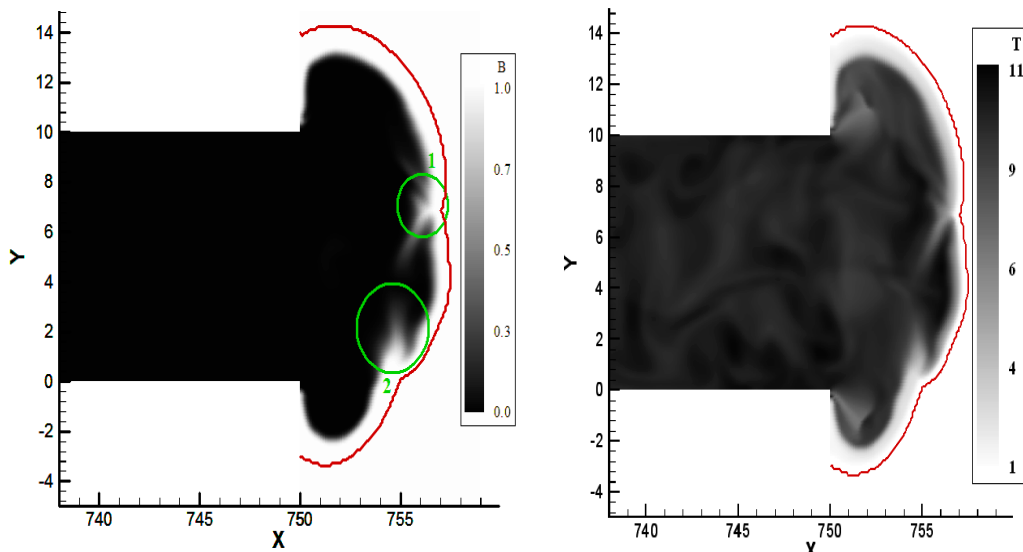
¹ Hot Spot

نقاط A و B مشخص شده در کانتورهای چگالی شکل (۳-ب)، نقاط سه‌گانه‌اند که درحقیقت محل برخورد امواج عرضی با امواج ضربه‌ای پیشرو در جبهه تراک می‌باشند. با گذشت زمان و پیشروی بیشتر جبهه تراک در کانال بزرگتر، نقاط سه‌گانه (نقاط A و B) از دو طرف به دیواره‌های کانال نزدیک می‌شوند. از طرفی کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش در این شکل نشان می‌دهند که در بخش‌های دارای داخل رفتگی در موج اصلی ماخ (بخش‌های ۱ و ۲)، طول ناحیه واکنش یعنی فاصله بین موج ضربه‌ای پیشرو و ناحیه واکنش نسبت به این طول در بخش‌های دیگر بیشتر می‌باشد که این امر نشان دهنده کاهش قدرت موج اصلی ماخ در این نواحی است. در حقیقت در شرائی که فاصله بین موج ضربه‌ای پیشرو و ناحیه واکنش در نواحی ۱ و ۲ حدود دو واحد طولی است، این فاصله در ناحیه میانی جبهه کمتر از یک واحد می‌باشد.



(ب) کانتورهای چگالی

(الف) کانتورهای فشار

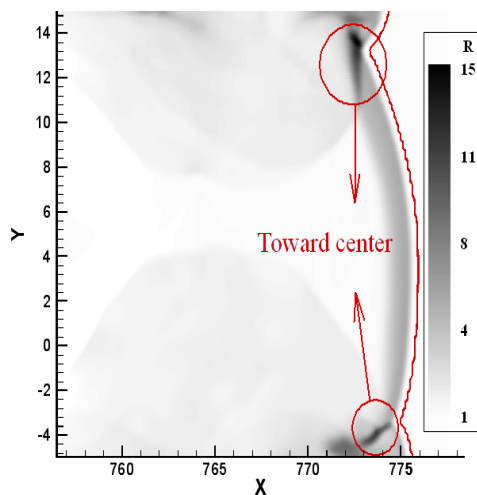


(د) کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش

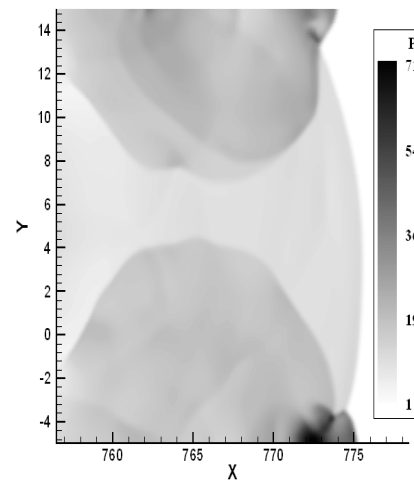
(ج) کانتورهای دما

شکل ۳- انکسار تراک در کانالی با مشخصات $L_1 = 750, D_1 = 10, AR = 2$ برای مخلوطی با خصوصیات $E_a/RT = 20, Q/RT = 50, \gamma = 1.2$ (خطوط معرف جبهه تراک می‌باشند)

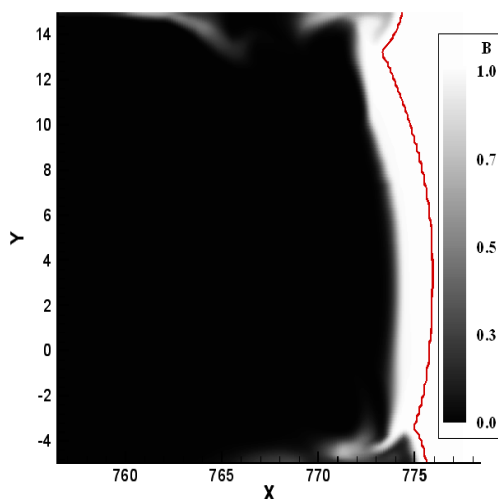
هنگامی که نقطه A به دیواره فوقانی کانال با پهنای بیشتر برخورد می‌کند، باعث می‌شود تا طی مکانیزمی گاز دینامیکی بسته‌ای نسوخته در مجاورت دیوار، از جبهه تراک جدا گردد. پس از برخورد نقاط سه‌گانه و امواج عرضی مربوط به آنها به دیوار، امواج عرضی به سمت محور کانال منعکس می‌شوند (شکل ۴). البته به دلیل عدم تقارن جبهه، این اتفاقات در قسمت فوقانی کانال با پهنای بیشتر سریع‌تر اتفاق می‌افتد. می‌توان پیش‌بینی نمود که برخورد این امواج انعکاسی در نواحی مرکزی کانال با پهنای بیشتر و ایجاد نواحی نسبتاً پرفشار ناشی از آن نقش موثری در ادامه انتشار تراک در کانال بزرگتر داشته باشد. با تعقیب جبهه تراک در حال انتشار، تاثیر یا عدم تاثیر این پدیده بر آغازش دوباره تراک بررسی خواهد شد. ضمن اینکه اگر امواج عرضی موجود در جبهه تراک با بسته نسوخته‌ای که در مجاورت دیوار فوقانی کانال با پهنای بیشتر تشکیل شده، برخورد نماید با سوزاندن آن باعث نزدیکی شدن موج ضربه‌ای پیشرو و ناحیه واکنش و در نتیجه تقویت دوباره تراک می‌شود.



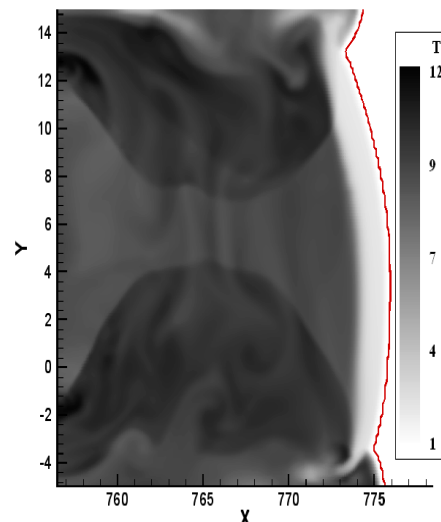
ب) کانتورهای چگالی



الف) کانتورهای فشار



د) کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش

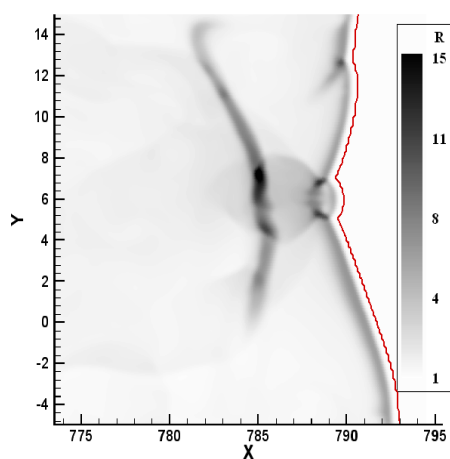


ج) کانتورهای دما

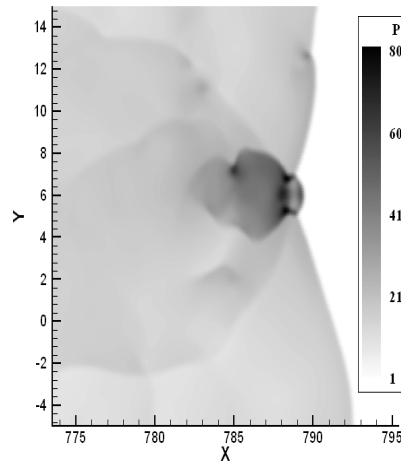
شکل ۴- انکسار تراک در کانالی با مشخصات $L_1 = 750, D_1 = 10, AR = 2$ برای مخلوطی با خصوصیات $E_a / RT = 20, Q / RT = 50, \gamma = 1.2$ (خطوط معرف جبهه تراک می‌باشند)

با پیشروی بیشتر جبهه تراک، نقاط سه‌گانه منعکس شده از دیوار کانال در موقعیت $x=785$ به یکدیگر برخورد نموده و تشکیل یک ناحیه با فشار بسیار بالا می‌دهند. این ناحیه بسیار کوچک که نقطه داغ هم نامیده شده، باعث تقویت و آغاز سربعتر تراک شده است. بنابراین نقش موثر امواج عرضی منعکس شده از دیواره‌های کانال با پهنای بیشتر در تقویت تراک پس از انکسار آن کاملاً مشهود است. برخورد دو نقطه سه‌گانه و امواج عرضی مربوط به آنها با یکدیگر، علاوه بر ایجاد نقطه داغ، باعث تشکیل یک بسته نسوخته نسبتاً بزرگ نیز شده است.

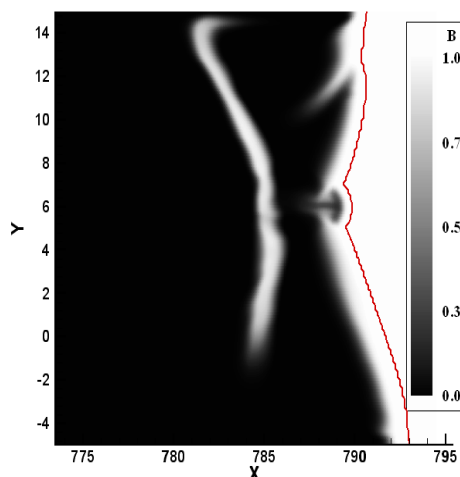
با پیشروی بیشتر تراک و مطابق شکل ۵، ناحیه نسوخته از جبهه اصلی تراک جدا شده و نقاط سه‌گانه جدید نیز بوجود آمده‌اند. دو نقطه سه‌گانه که در نزدیک خط مرکزی کانال تشکیل شده‌اند، از یکدیگر دور شده و به سمت دیواره‌های کانال در حال حرکت می‌باشند. همچنین یک نقطه سه‌گانه جدید نیز در نزدیکی مرز بالایی کانال بوجود آمده است. این نقاط سه‌گانه، باعث افزایش فشار و دما و در نتیجه افزایش انرژی گرمایی آزاد شده توسط واکنش شیمیایی می‌شوند. لذا تراک با پیشروی بیشتر در حال تقویت شدن است.



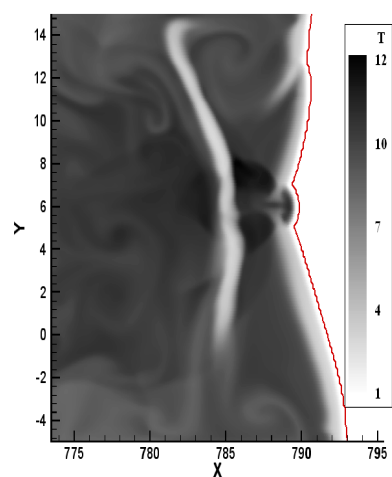
ب) کانتورهای چگالی



الف) کانتورهای فشار



د) کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش



ج) کانتورهای دما

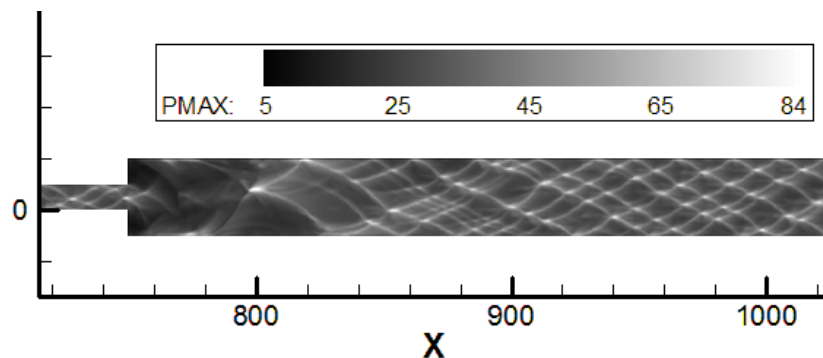
شکل ۵- انکسار تراک در کانالی با مشخصات $L_1 = 750, D_1 = 10, AR = 2$ برای مخلوطی با خصوصیات $E_a/RT = 20, Q/RT = 50, \gamma = 1.2$ (خطوط معرف جبهه تراک می‌باشند)

پس از برخورد دو نقطه سه‌گانه در موقعیت تقریبی $x=785$ همان‌طور که در ساختار سلولی داده شده در شکل ۲ نیز مشاهده می‌شود، ابتدا یک سلول با اندازه بزرگ تشکیل شده است. اندازه بزرگ این سلول مشخص می‌کند که نقاط سه‌گانه و امواج عرضی آنها در جبهه تراک، نسبتاً ضعیف بوده و لذا سرعت کمتری هم دارند. پیشروی بیشتر تراک در کانال همراه با تقویت بیشتر تراک است تا هنگامیکه تراک به حد کافی از محل انکسار دور شده و اثرات تضعیف تراک توسط امواج انبساطی ایجاد شده حذف گردد.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پس از انکسار تراک، برخورد امواج عرضی و نقاط سه‌گانه تراک با دیواره کانال و انعکاس آنها، مهم‌ترین پارامتر موثر در آغازش دوباره تراک می‌باشد. در ابتدای آغازش دوباره تراک در کانال با پهنای بزرگتر، ابتدا تراک تحت تاثیر انکسار بوجود آمده ضعیف بوده و پس از پیشروی بیشتر، تراک تقویت شده و به حالت شبه پایدار می‌رسد.

۲-۵- نسبت پهنای کانال ۳ و ۴

برای بررسی تاثیر پهنای کانال بزرگتر روی انکسار تراک، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در کانال با نسبت پهنای ۳ و ۴ نیز بدست آمده است. ساختار سلولی در نسبت پهنای ۳ در شکل ۶ نشان داده شده است. با افزایش نسبت پهنای کانال به بررسی نقش امواج عرضی در آغازش دوباره تراک، هنگام انعکاس از دیواره‌های کانال با پهنای بزرگتر پرداخته می‌شود. همچنین مکانیزم‌های موثر در ایجاد و تقویت تراک با توجه به ساختار جبهه تراک ارائه می‌شود.



شکل ۶- تاریخچه فشار بیشینه برای انکسار مخلوط با مشخصات $E_a / RT_0 = 20$ و $Q / RT = 50$ و $\gamma = 1.2$ در

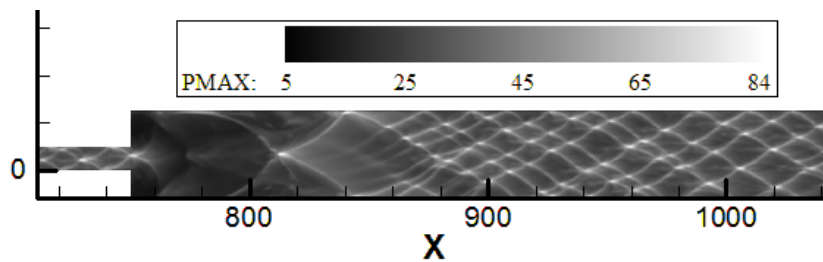
$$L_1 = 750, D_1 = 10, AR = 3$$

کانالی با مشخصات

در این حالت نیز محل محو شدن کامل ساختارهای سلولی تراک از مرتبه پهنای کانال کوچکتر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نقطه آغازش دوباره تراک به نقطه‌ای با مختصات $x = 800.54, y = 8.42$ منتقل شده است. این فاصله حدود ۱۵ واحد طول بیشتر از فاصله آغازش دوباره در کانالی با نسبت پهنای ۲ می‌باشد. در این حالت نیز همانند حالت قبل و به دلیل عدم تقارن جبهه تراک در هنگام ورود به کانال با پهنای بزرگتر، محل آغازش دوباره به دیوار فوقانی کانال نزدیکتر است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی انکسار تراک در کانالی با نسبت پهنای ۳ که البته از ارائه کانتورهای مختلف آن صرف‌نظر شده است، مشخص کردند که عوامل تاثیرگذار روی مکانیزم آغازش دوباره تراک مثل، ایجاد انحنا در جبهه، برخورد جبهه و امواج ضربه‌ای با دیواره‌های فوقانی و تحتانی کانال با پهنای بزرگتر و ایجاد نواحی پرفشار، تشکیل بسته نسوخته در کنار مرزها، انعکاس و حرکت امواج منعکس شده به سمت مرکز کانال بزرگتر و درنهایت برخورد این امواج انعکاسی با یکدیگر در نواحی

مرکزی کانال بزرگتر و ایجاد نقطه داغ و ناحیه نسوخته، در این حالت نیز مانند انکسار تراک در کانالی با نسبت پهنا ۲ می-باشد، با این تفاوت که در این شرایط با توجه به بیشتر بودن نسبت پهنا کانال، برخورد و انعکاس امواج عرضی با دیواره‌ها در نقاط دورتری نسبت به صفحه خروجی کانال با پهنا کمتر اتفاق افتاده و در نتیجه آغاز دوباره تراک دیرتر اتفاق می‌افتد. شکل ۷ تاریخچه فشار بیشینه برای انکسار تراک در مخلوطی با مشخصات $E_a / RT_0 = 20, Q / RT = 50, \gamma = 1.2$ و کانالی با شرایط هندسی $L_1 = 750, D_1 = 10, AR = 4$ را نشان می‌دهد. آن‌طور که انتظار می‌رفت نقطه آغاز دوباره تراک به نقطه‌ای با مختصات $x = 814.24, y = 6.97$ منتقل شده است. این فاصله حدود ۱۴ واحد طولی بیشتر از فاصله آغاز دوباره در کانالی با نسبت پهنا ۳ و حدود ۲۹ واحد طولی بیشتر از کانالی با نسبت پهنا ۲ می‌باشد.



شکل ۷- تاریخچه فشار بیشینه برای انکسار مخلوط با مشخصات $E_a / RT_0 = 20$ و $Q / RT = 50$ و $\gamma = 1.2$ در کانالی با مشخصات $L_1 = 750, D_1 = 10, AR = 4$

با توجه به نتایج بدست آمده در کار حاضر، ملاحظه می‌شود که افزایش نسبت پهنا باعث تضعیف کلی جبهه تراک در هنگام ورود آن از کانال با پهنا کوچکتر به کانال با پهنا بزرگتر شده و آغاز مجدد تراک در کانال با پهنا بزرگتر، در فواصل دورتری نسبت به تغییر سطح مقطع اتفاق افتاده است.

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

شبیه‌سازی عددی دوبعدی انکسار تراک از کانالی کوچک به کانالی با پهنا بزرگتر برای مخلوطی با مشخصات $E_a / RT_0 = 20, Q / RT = 50, \gamma = 1.2$ انجام شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که امواج انبساطی در محل تغییر پهنا کانال باعث تضعیف تراک می‌شود. پس از انکسار تراک، برخورد امواج عرضی و نقاط سه‌گانه تراک با دیواره کانال و انعکاس آنها، مهم‌ترین پارامتر موثر در آغاز دوباره تراک می‌باشد. در ابتدای آغاز دوباره تراک در کانال با پهنا بزرگتر، ابتدا تراک تحت تاثیر انکسار بوجود آمده ضعیف بوده و پس از پیشروی بیشتر، تراک تقویت شده و به حالت شبه پایدار می‌رسد. لازم به ذکر است که در کانال با نسبت پهنا بزرگتر، برخورد و انعکاس امواج عرضی با دیواره‌ها و در نتیجه آغاز دوباره تراک دیرتر اتفاق می‌افتد. این مطلب که در توافق با نتایج تجربی است، بیانگر تضعیف کلی جبهه تراک با افزایش نسبت پهنا کانال است.

مراجع

- 1- Schultz, E., "Detonation diffraction through an abrupt area expansion". Ph.D thesis, California institute of technology, 2000.
- 2- Changming, G., Changjian, W., Shengli, X., and Hanhong, Z., "Cellular pattern evolution in gaseous detonation diffraction in a 90°-branched channel", *Combustion and Flame*, Vol. 148, pp. 89-99, 2007.

- 3- Papalexandris, M.V. , Thomas, J.F., Jacobs, C., and Deledicque, V., 2007. "*Structural characteristics of detonation expansion from a small channel to a larger one*". Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, pp. 2407–2414, 2007.
- 4- Colella, P., "*Multidimensional Upwind Methods for Hyperbolic Conservation Laws*", Comput. Phys., Vol. 87, pp. 171-200, 1990.
- 5- Berger, and M.J., Colella, P., "*Local Adaptive Mesh Refinement for Shock Hydrodynamics*", Comput. Phys., Vol. 82, pp. 64-84, 1989.
- 6- Sabzpooshani, M., and Mazaheri, K., "*Formation of Unburnt Pockets in Gaseous Detonations*", Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol. 45(2), pp. 182–18, 2009.