مجله علمی - پژوهشی مواد پرانرژی

سال هفتم – شماره ۳ – شماره پیاپی ۱۶ – پاییز ۹۱

مطالعه عددی انکسار در تراک گازی با ساختار سلولی منظم

مجید سبزپوشانی*[۱]، محمد حسین خیرخواه[۲]

کاشان - دانشگاه کاشان

(تاریخ وصول: ۹۰/۱۲/۱، تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۵/۱۱)

چکیده

شبیه‌سازی عددی دوبعدی انکسار تراک در مخلوط گازی با انرژی فعال‌سازی ۱۵ که دارای ساختار سلولی تراک منظم است، از کانالی کوچک به کانالی با پهنای بزرگ‌تر و با نسبت پهنای ۲ انجام شده است. مدل‌سازی براساس معادلات اویلر واکنشی و مدل سینتیکی یک مرحله‌ای آرنیوسی است. پهنای کانال کوچک به اندازه‌ای درنظر گرفته شده که حداقل ۵ سلول در پهنای کانال و هنگام انکسار وجود داشته باشد. نتایج به‌دست آمده از ساختار سلولی تراک در هنگام انتقال تراک از کانال با پهنای کمتر به کانال با پهنای بیشتر نشان دادند که ابتدا ساختارهای سلولی تراک در بالا و پائین جبهه ناپدید می‌شوند. با پیشروی بیشتر جبهه تراک در کانال بزرگ‌تر، تمام ۵ سلول موجود در ابتدای انکسار حذف شده‌اند و بیشترین پیشروی موضعی تراک در هنگام انکسار، روی خط مرکزی کانال است. بررسی جبهه تراک در حین انکسار نیز نشان‌دهنده جدایی موضعی ناحیه واکنش از امواج ضربه‌ای پیشرو در بخش‌های بالایی و پایینی جبهه است. این یافته‌ها که در توافق با نتایج تجربی است، به‌خاطر اثرات گاز دینامیکی و خنک شدن جبهه تراک ناشی از امواج انبساطی به‌وجود آمده در حین انکسار و درنتیجه افزایش فاصله جبهه واکنش از امواج ضربه‌ای پیشرو است. تقابل بین تضعیف تراک توسط امواج انبساطی و تقویت مجدد آن توسط اغتشاشات، نقاط سه‌گانه و امواج عرضی مربوط به آنها، باعث رفتار ناپایدار تراک شده است. نتایج حاضر مشخص نمودند که تقویت نقاط سه‌گانه و امواج عرضی آنها پس از برخورد با دیواره‌های کانال بزرگ‌تر و ایجاد نواحی داغ، نقش اساسی در آغازش دوباره تراک دارد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی عددی، انکسار، تراک گازی، ساختار منظم سلولی، امواج انبساطی.

۱- مقدمه

پدیده انکسار تراک یکی از مهم‌ترین پدیده‌هائی است که در سالیان اخیر به‌دلیل کاربردهای وسیعش در صنایع نظامی، ایمنی انتقال مواد تراک‌پذیر و موتورهای تراک ضربانی[۳] مورد توجه قرار گرفته است. انتشار یک موج تراک هنگام خروج از لوله یا کانال به محیط با پهنای بزرگ‌تر و یا محیط باز انکسار تراک نام دارد که وابسته به ترکیب مخلوط، شرائط ترمودینامیکی اولیه و هندسه سیستم در یکی از رژیم‌های مادون بحرانی[۴]، بحرانی[۵] و یا مافوق بحرانی[۶] رخ می‌دهد. در رژیم مادون بحرانی، تراک میرا می‌شود درحالی که در رژیم مافوق بحرانی، تراک به‌صورت موفقیت‌آمیز از کانال با پهنای کمتر به کانال با پهنای بیشتر منتقل می‌شود. در رژیم بحرانی، ابتدا تراک به‌شدت تضعیف و میرا شده و سپس با پیشروی بیشتر در کانال با پهنای بزرگ‌تر، با آغازش مجدد دوباره به‌وجود می‌آید. براساس انتقال موفقیت‌آمیز تراک از کانال به محیط باز، قطر بحرانی تعریف شده است. حداقل قطر کانال که تراک به‌صورت موفقیت‌آمیز از کانال به محیط باز منتقل شود، قطر بحرانی نام گرفته که به‌عنوان یکی از پارامترهای دینامیکی تراک شناخته می‌شود. به‌منظور بررسی این

* E-mail: spooshan@kashanu.ac.ir

۱- استادیار

۲- کارشناس ارشد

3- Pulse Detonation Engine

4- Sub Critical

5- Critical

6- Super Critical

Archive of SID

www.SID.ir

پدیده مطالعات تحلیلی، تجربی و عددی مختلفی انجام شده است. 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 تا حدودی هم‌خوانی داشت اما در برخی تراک‌ها و به‌خصوص در تراک‌های با ساختار سلولی نامنظم، نتایج تحلیلی و تجربی تفاوت معناداری داشتند. یو [۲] و اکبر [۳] نیز یک بررسی سینماتیک در مورد اندرکنش یک تراک گازی و یک لبه را انجام دادند و به تأثیر امواج انبساطی به‌وجود آمده در لبه روی رفتار تراک تأکید نمودند. پینتگن و همکارش نیز با بررسی انکسار تراک از یک لوله به محیط باز و ناپایداری‌های ایجاد شده در ساختار سلولی تراک، این مطلب را تأیید نمودند [۴].

مکانیزم تضعیف تراک پس از انکسار به‌خاطر انبساط محصولات پرفشار تراک و ایجاد امواج انبساطی شناخته شده است [۵]. این امواج انبساطی، تراک را خنک کرده و موجب جداشدن موج‌های ضربه‌ای پیشرو از ناحیه واکنش در جبهه تراک می‌شوند. وی بیان داشته که برای مخلوط‌های با انرژی فعال‌سازی بالا (که ناحیه واکنش به‌شدت نسبت به دما حساس است) یک اغتشاش کوچک، ممکن است باعث میرا شدن تراک شود درحالی که برای مخلوط‌های با انرژی فعال‌سازی پائین این‌گونه نیست.

ادامه انتشار تراک پس از انکسار و در هنگام انتقال از کانال با پهنای کم به کانال با پهنای بزرگ‌تر، به توانایی موج تراک در غلبه کردن بر اثرات ناشی از امواج انبساطی بستگی دارد. مشاهدات تجربی سولوخین و همکارش [1] نشان می‌دهد که در رژیم مادون بحرانی ناحیه واکنش به‌طور کامل از موج ضربه‌ای جدا می‌شود درحالی که در حالت مافوق بحرانی انفجارهای موضعی باعث آغازش دوباره تراک می‌گردد [۶]. مشاهدات تجربی مورای و همکارش دو مکانیزم برای آغازش دوباره را بیان می‌کند [۷]. مکانیزم اول آغازش دوباره به‌دلیل انفجارهای موضعی و مکانیزم دوم به‌دلیل انعکاس و تقویت امواج عرضی پس از برخورد به یک مرز محدود کننده (دیوار) در اطراف ناحیه انکسار تراک است [۷].

بارتلما و همکارش [۸] انکسار یک موج تراک صفحه‌ای در یک گوشه محدب را برای زوایای مختلف دیوار و مخلوط‌های گازی گوناگون مطالعه کردند. آنها نتیجه گرفتند که یک پارامتر قابل توجه در حالت مافوق بحرانی، وجود امواج عرضی تراک است اما لی [۵] بیان داشته است که امواج عرضی در انتشار موفقیت‌آمیز تراک در مخلوط‌های با ساختار سلولی کاملاً منظم تأثیر مهم ندارند. اثر ساختار سلولی روی انتقال تراک توسط جونز و همکاران نیز با روش شبیه‌سازی عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. آنها بیان کردند که طبیعت موج عرضی جبهه برای انکسار تراک بسیار تعیین کننده بوده و مکانیزم آغازش دوباره را فراهم می‌کند [۹]. آنها بیان نمودند که برای مخلوط‌های هیدروژن – اکسیژن و در حضور انبساط سطح، آغازش دوباره به‌دلیل یکی از دو مکانیزم زیر اتفاق می‌افتد. مکانیزم اول شامل برخورد نقاط سه‌گانه در هنگامی است که آنها در امتداد جبهه در حال تضعیف، منبسط می‌شوند. در مکانیزم دوم، آغازش، نتیجه به‌هم پیوستن تعدادی از مناطق کوچک اما نسبتاً پرفشار برجای مانده پس از تضعیف امواج عرضی تضعیف شده است [۹]. تئودورسکی و همکاران با بررسی انتشار تراک در کانال همراه با موانع، نشان دادند که آغازش دوباره تراک به‌خاطر انعکاس امواج ضربه‌ای توسط دیوارها و ایجاد انفجارهای موضعی در مخلوط گازی امکان‌پذیر است [۹]. آنها این پدیده را در انکسار تراک از یک کانال با پهنای کم به کانال با پهنای بزرگ‌تر نیز مشاهده نمودند. نکته مهمی که در تحقیق آنها اشاره شده این است که مشخص نیست که آغازش دوباره تراک توسط بخش ماخ استم[2] و به‌تبع آن فشرده شدن مخلوط گازی و افزایش دمای آن ایجاد می‌شود و یا اینکه توسط اختلاط توربولانسی لایه برشی (مربوط به نقطه سه‌گانه که چسبیده به ماخ استم است) به‌وجود می‌آید. آنها هردو این مکانیزم‌ها را ممکن دانسته‌اند. به هر حال آنها بیان نموده‌اند که اگر قدرت ماخ استم زیاد باشد، آغازش خودبه‌خودی در ناحیه پشت موج ماخ استم می‌تواند ایجاد شود. همچنین اختلاط توربولانسی بسته‌های نسوخته[3] و بخش‌های سوخته شده گاز و ایجاد انفجارهای موضعی نیز می‌تواند باعث آغازش شود. مشابه این مکانیزم در آغازش تراک توسط جت‌های توربولانسی داغ که نزدیک دیواره‌ها تشکیل می‌شوند نیز دیده شده است. به‌عنوان نمونه ماخ و همکارش [۱۰] و نیز سبزپوشانی و همکارش [۱۱]، ایجاد اغتشاش و تأثیر جت‌های داغ به‌وجود آمده تراک را روی امواج ضربه‌ای پیشرو نشان داده‌اند.

آرینتی و همکارش، انکسار تراک گازی را به‌صورت شبیه‌سازی عددی بررسی نموده‌اند [۱۲]. آنها دریافتند که جدایی ناحیه واکنش و جبهه امواج ضربه‌ای پیشرو به‌صورت محلی، هنگامی اتفاق می‌افتد که نرخ تغییرات مادی دما نسبت زمان (مشتق کامل دما) در آن محل صفر شود. به‌عبارتی هنگامی‌که یک ذره سیال از امواج ضربه‌ای پیشرو عبور می‌کند، افزایش دما خواهد داشت اما به‌خاطر اثرات امواج انبساطی نیز با کاهش دما مواجه می‌شود. هنگامی‌که این دو اثر با یکدیگر موازنه شوند، تغییرات دمای ذره سیال صفر شده و این نقطه، محل شروع شدن جدایی ناحیه واکنش از امواج ضربه‌ای پیشرو است. آنها همچنین افزایش انحنا جبهه تراک و کاهش سرعت تراک را در هنگام انکسار، با تئوری شبه یک‌بعدی *Dn-K* مقایسه نموده و توافق بین آنها را نشان دادند. از طرفی نتایج شبیه‌سازی آنها نشان داد که در مخلوط‌های با انرژی فعال‌سازی پائین، انحنا جبهه تراک نقش مؤثری بر میرایی تراک ندارد درحالی که ترم‌های تضعیف‌کننده‌ها[4] می‌توانند

1- Soloukhin

2- Mach Stem
3- Unburnt Pockets
4- Unsteadiness

Archive of SID

www.SID.ir

تأثیرگذار باشند [۱۲]. لازم به‌ذکر است که این یافته آنها برخلاف یافته لی [۵] می‌باشد که انحنا تراک را به‌عنوان یک مکانیزم تضعیف در انکسار تراک‌های با ساختار سلولی منظم و یا مخلوط‌های با انرژی فعال‌سازی کم دانسته است.

وانگ و همکاران تشکیل ساختار سلولی در انکسار تراک گازی در یک کانال با یک شاخه فرعی ۹۰ درجه (T شکل) را به‌صورت تجربی بررسی کردند [۱۳]. نتایج آنها نشان می‌دهد که رفتار تراک به‌طور چشمگیری توسط دیوارهای در محل تقاطع دو کانال 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[1] در کانال افقی اتفاق می‌افتد، درحال یکه یک انعکاس منظم[2] در کانال عمودی مشاهده می‌شود. پاپالکساندریس و همکاران خواص ساختاری انبساط تراک از یک کانال کوچک به کانال بزرگ‌تر را به‌طور عددی و با مدل سینتیکی یک مرحله‌ای مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. آنها اثرات انرژی 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 تأمل در تحقیق آنها استفاده از هندسه متقارن برای شبیه‌سازی انکسار تراک در کانال می‌باشد درحالی که به‌خاطر طبیعت کاملاً نامنظم و سه‌بعدی تراک گازی، تقارن نسبت به یک محور فرضی 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.

علی‌رغم تحقیقات انجام شده تاکنون روی انکسار تراک گازی، هنوز برخی از رفتارهای تراک در حین انبساط به‌طور کامل مطالعه نشده است. به‌عنوان مثال، رفتار تراک گازی برای مخلوط‌های با ساختار سلولی منظم در هنگام انکسار بسیار متفاوت از رفتار تراک در مخلوط‌های با ساختار سلولی نامنظم است. به‌خاطر خصوصیات ویژه مخلوط‌های با ساختار سلولی منظم، وجود اغتشاشات و تضعیف جزئی، عموماً باعث میرایی تراک نمی‌شود درحالی که در مخلوط‌های با ساختار سلولی نامنظم این‌گونه نیست. در این تحقیق تلاش شده است تا با استفاده از روش عددی، ساختار جبهه تراک و رفتار آن در حین انکسار برای یک مخلوط گازی با ساختار سلولی منظم مورد بررسی قرار گرفته و نقش امواج عرضی و نقاط سه‌گانه در آغازش مجدد آن مطالعه شود.

1- Mach Reflection
2- Regular Reflection

۲- مدل ریاضی و روش حل عددی

معادلات دینامیک گاز و سینتیک شیمیائی حاکم بر جریان اصلی مسئله با درنظر گرفتن یک سری فرض‌های ساده کننده حل می‌شوند. مدل کردن ساختار غیرخطی تراک با استفاده از معادلات واکنشی دوبعدی اویلر صورت می‌گیرد. چهار فرض اساسی دوبعدی بودن تحلیل، صرف‌نظر کردن از اثرات نفوذ، استفاده از مدل ساده سینتیک یک مرحله‌ای آرنیوسی و استفاده از معادله حالت گاز کامل برای مواد اولیه و محصولات برای استخراج این مدل اعمال می‌شوند. γ نسبت گرمای ویژه که در این مقاله $\gamma = 1.2$ فرض شده و Q گرمای آزاد شده از واکنش شیمیائی که به‌صورت بی بعد برابر $Q/RT = 50$ می‌باشد. مدل سینتیکی درنظر گرفته شده در این مطالعه، مدل یک مرحله‌ای آرنیوسی است که به‌صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$W = -k\beta \exp(\frac{-Ea}{RT}) \qquad (۱)$$

که در آن E_a انرژی فعال‌سازی، T دما، R ثابت گازها و k پیش فاکتور (ثابت) آرنیوسی می‌باشند. کلیه معادلات به‌صورت بی‌بعد در نظر گرفته شده‌اند. برای این کار متغیرهای وابسته با توجه به خواص مخلوط نسوخته بی‌بعد شده‌اند و برای بی‌بعد کردن متغیرهای مکانی، از طول نیمه واکنش برای مخلوط گازی با مشخصات سینتیکی $E_a / RT_0 = 20$ ، $Q/RT = 50$ استفاده شده است. با توجه به اینکه در ادامه تحقیق حاضر، انکسار تراک در مخلوط‌های با سایر انرژی‌های فعال‌سازی نیز بررسی شده و برای اینکه تمام ساختارهای سلولی، در یک واحد طول مبنا نمایش داده شوند، بنابراین بی-بعدسازی با طول نیمه واکنش برای مخلوط با انرژی فعال‌سازی ۲۰ انجام شده است.

روش عددی مورد استفاده در این مطالعه، یک روش پیوسته[3] و بالا دستی[4] در فضای دوبعدی می‌باشد [۱۵]. در این روش محاسبه فلاکس‌های عددی روی اضلاع سلول‌های شبکه محاسباتی با درنظر گرفتن تغییرات میدان جریان در هر دو جهت مختصاتی است. برای کاهش هزینه محاسباتی، از روش ریزکردن تطبیقی شبکه[5]، که توسط برگر و کوللا ارائه شده، استفاده گردیده است [۱۶]. به این منظور، ابتدا موقعیت جبهه دتونیشن مشخص می‌گردد. سپس در محدوده جبهه دتونیشن که تغییرات زیادی در خواص جریان به‌وجود می‌آید، سلول‌های محاسباتی ریز می‌شوند. چگونگی مشخص نمودن موقعیت جبهه دتونیشن در هر لحظه و همچنین جزئیات روش تطبیق شبکه در مرجع [۱۷] ارائه شده‌اند. برای شرایط مرزی دیوارها از شرط مرزی انعکاسی استفاده شده است. منظور از شرط مرزی دیوار انعکاسی یا دیوار لغزشی این است که مؤلفه بردار سرعت جریان عمود بر دیوار

3- Unsplit
4- Upwind
5- Adaptive Mesh Refinement

Archive of SID

www.SID.ir

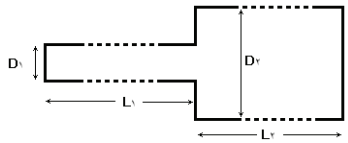
صفر است. در حقیقت جریان سیال به‌صورت مماس روی این مرزها حرکت می‌کنند. برای آغازش مستقیم تراک، از پروفیل موج بلست[1] که در ابتدای کانال با پهنای کم (در سمت چپ) قرار داده شده، استفاده گردیده است. با استفاده از روش فوق، یک کد کامپیوتری تهیه شده و قابلیت آن در شبیه‌سازی تراک دوبعدی به اثبات رسیده است [۱۷]. در کار حاضر، کد مزبور برای شبیه‌سازی انتشار تراک در کانال با تغییر سطح مقطع توسعه داده شده است.

یکی از چالش‌های شبیه‌سازی عددی تراک، استفاده از سلول‌های محاسباتی کافی به‌منظور ایجاد وضوح لازم در ناحیه واکنش تراک می‌باشد. شارپ و همکارش در شبیه‌سازی دوبعدی خود نشان دادند که اگر شبکه محاسباتی شامل کمتر از ۲۰ سلول محاسباتی در طول نیمه واکنش (hrl)[2] باشد، نتایج یکتا نیستند [۱۸]. البته لازم به‌ذکر است که نتایج محاسباتی به دقت و مرتبه روش عددی نیز بستگی دارند. روش عددی مورد استفاده شارپ و همکارش و همچنین روش عددی به‌کار رفته در تحقیق حاضر، دارای دقت مرتبه دو می‌باشند. شارپ و همکارش نتیجه گرفتند که اگر ابعاد سلول‌های محاسباتی کافی نباشد، اندازه سلولی و درجه منظمی تراک به‌شدت به شبکه محاسباتی بستگی دارند [۱۸].

محمودی و همکارش با استفاده از کدی که در این تحقیق نیز استفاده شده است، نشان دادند که برای اینکه جبهه موج تراک با جزئیات کامل شبیه‌سازی شود، نیاز است تا شبکه محاسباتی حدود ۳۰۰ سلول محاسباتی در طول نیمه واکنش باشد. البته لازم به‌ذکر است که آنها از سیستم پردازشگر موازی استفاده نموده و همچنین پهنای کانالی که شبیه‌سازی تراک در آن انجام شده است، نسبتاً کم (برابر ۲) بوده است [۱۹]. با این وجود آنها بیان نمودند که خصوصیات کلی جبهه تراک با شبکه‌های محاسباتی کمتر نیز قابل حصول است. مراجعی مانند [۲۰] نیز از حدود ۲۰ سلول محاسباتی در طول نیمه واکنش استفاده نموده و ساختار جبهه تراک را بررسی نموده‌اند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که خصوصیات کلی جبهه تراک با دقت کم نیز قابل حصول است هرچند که برای بررسی ساختارهای کوچک‌تری که در جبهه تراک به‌وجود می‌آیند، نیاز به شبکه‌های محاسباتی بسیار کوچک‌تر است. با توجه به محدودیت‌های سخت‌افزاری موجود، در تحقیق حاضر از ۳۵ سلول محاسباتی در طول نیمه واکنش مخلوط گازی با انرژی فعال‌سازی ۲۰ که برابر حدود ۷ سلول محاسباتی در طول نیمه واکنش مخلوط با انرژی فعال‌سازی ۱۵ می‌باشد، استفاده شده است.

۳- تعریف مدل

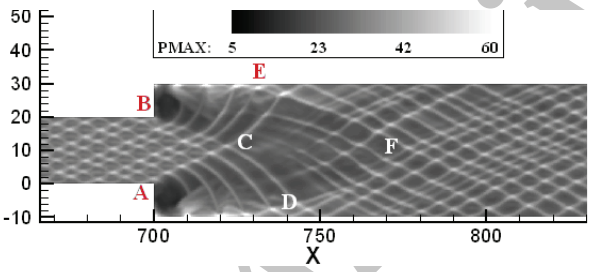
شماتیکی از مدل مورد بررسی در شکل (۱) نشان داده شده است. در این کانال D_1 و L_1 به‌ترتیب پهنا و طول کانال کوچک، D_2 و L_2 پهنا و طول کانال بزرگ‌تر است. AR نسبت انبساط کانال (D_2/D_1) است. انتشار تراک از چپ به راست و از ابتدای کانال کوچک است.



شکل ۱- طرحواره مدل هندسی کانال (جهت انتشار تراک از سمت چپ به راست و از ابتدای کانال کوچک‌تر می‌باشد).

۴- نتایج و بحث

به‌منظور بررسی پدیده انکسار تراک گازی با ساختار سلولی منظم، کانال اول با طول $L_1 = 700$ و پهنای اولیه $D_1 = 20$ و نسبت انبساط کانال، AR=2 و انرژی فعال‌سازی مخلوط برابر با ۱۵ درنظر گرفته شده است. لازم به‌ذکر است که طول اولیه کانال به اندازه‌ای درنظر گرفته شده که رفتار تراک و ساختار سلولی به‌دست آمده از آن مستقل از شرایط آغازش ابتدای کانال باشد. با توجه به شکل (۲) مشاهده می‌شود که در این شرایط، حدود پنج سلول مشخصه در کانال اولیه تشکیل می‌شود. بلافاصله بعد از کانال اول، کانال دوم با پهنای برابر ۴۰ قرار داده شده است. شکل (۲) تاریخچه[3] فشار بیشینه در کانال را نشان می‌دهد. با توجه به وجود بیشترین فشار در نقطه سه‌گانه جبهه تراک، خطوط روشن در شکل (۲) معرف مکان حرکت نقاط سه‌گانه است.



شکل ۲- تاریخچه فشار بیشینه برای انکسار مخلوط با مشخصات $E_a/RT_0 = 15$ و $Q/RT = 50$ و $\gamma = 1.2$ در کانالی با مشخصات $L_1 = 700, D_1 = 20, AR = 2$.

شکل (۲) نشان می‌دهد که در هنگام انتقال تراک از کانال با پهنای کم به کانال با پهنای بزرگ‌تر، به‌تدریج از تعداد سلول‌های موجود در ساختار سلولی تراک کاسته می‌شود. در حقیقت حذف هر یک از خطوط روشن، بیانگر حذف نقطه سه‌گانه و موج عرضی مربوط به آن است. این حذف مبین کاهش فشار در نقطه سه‌گانه است. در شرایطی که تعداد ۵ سلول قبل از ورود تراک به کانال با پهنای بزرگ‌تر ایجاد شده است، به مرور زمان در نقطه‌ی C و به موقعیت طولی تقریبی

1- Blast Wave
2- Half Reaction Length
3- History

Archive of SID

www.SID.ir

$x_c = 721$، ساختار سلولی کاملاً حذف شده است. این یافته نشان می‌دهد که انتشار موفقیت‌آمیز جبهه تراک، روی محور تقارن کانال (ناحیه مرکزی جبهه تراک) نسبت به سایر جهات انتشار تراک در کانال با پهنای بیشتر، تا فاصله بیشتری انجام می‌شود که در توافق با سایر نتایج تجربی است [۸و۴،۱]. انتشار موفق تراک بیانگر کوپل بودن امواج ضربه‌ای و ناحیه واکنش در جبهه تراک است. بنابراین نتیجه می‌شود که با توجه به حذف تدریجی ساختارهای سلولی تا قبل از نقطه C، ناحیه واکنش به‌طور موضعی از جبهه امواج ضربه‌ای پیشرو فاصله گرفته است. این مطلب در کانتورهای جبهه واکنش نیز نشان داده خواهد شد. دلیل این پدیده، تضعیف تراک به‌خاطر امواج انبساطی به‌وجود آمده در جبهه تراک و در هنگام انبساط ناگهانی کانال است. شکل (۲) نشان می‌دهد که موج تراک حدود ۲۲ واحد طولی را در کانال با پهنای بزرگ‌تر طی می‌کند تا تمام آن به‌طور کامل تحت تأثیر امواج انبساطی ناشی از انبساط ناگهانی کانال قرار گیرد. در حقیقت امواج انبساطی ایجاد شده در محل تغییر پهنا که از گوشه‌ها شروع می‌شوند و در کانال منتشر می‌شوند، باعث تضعیف تدریجی تراک می‌گردد. همچنین دنبال نمودن خطوط روشن که معرف مکان حرکت نقطه سه‌گانه است، مشخص می‌کند که نقاط سه‌گانه در هنگام انکسار تراک به‌تدریج با کاهش فشار مواجه شده و تضعیف می‌شوند. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که این تضعیف نقاط سه‌گانه تا هنگام برخورد آنها با دیوارهای بالایی و پایینی کانال بزرگ‌تر ادامه یافته است.

ساختارهای سلولی به‌دست آمده در شکل (۲) مشخص می‌کند که برخورد و انعکاس پی‌درپی بخش‌های مختلف جبهه تراک از جمله نقاط سه‌گانه و امواج عرضی با دیواره‌های تحتانی و فوقانی کانال با پهنای ۴۰، باعث ایجاد چندین ناحیه بسیار پرفشار در مجاورت این مرزها شده است. پس از برخورد جبهه تراک منکسر شده با دیواره‌های کانال با پهنای بیشتر، انعکاس امواج ضربه‌ای در نقاطی مانند نقاط E و D با طول تقریبی $x = 740$ اتفاق افتاده است. لازم به‌ذکر است که نقاط E و D، مربوط به انعکاس امواج عرضی هستند که از نقطه C به وجود آمده‌اند. همان‌گونه که از شکل (۲) مشخص است، اگرچه در قبل از نقاط E و D نیز برخورد امواج عرضی با دیواره کانال انجام شده است اما با توجه به ضعیف بودن امواج عرضی برخوردی، امواج انعکاسی نیز ضعیف بوده و باعث آغازش مجدد تراک نشده اند. در ساختار سلولی با توجه به شکل مشاهده می‌شود که محل برخورد اولین امواج عرضی به دیوار که باعث ایجاد نواحی پرفشار شده‌اند، حدود موقعیت x=710 می‌باشد. نواحی پرفشار ایجاد شده که به‌صورت انفجارهای موضعی می‌باشند، باعث جلوگیری از میرایی تراک و یا به‌عبارت دیگر باعث آغازش دوباره تراک شده‌اند. با توجه به شکل (۲) روی خطوط DF و EF، مسیر حرکت نقاط سه‌گانه در کانال با پهنای بزرگ‌تر آشکار است. در دو طرف این خطوط شکل و اندازه سلول‌ها متفاوت هستند. به‌عبارت دیگر سلول‌های تشکیل شده درون ناحیه CDFE در شکل (۲) بزرگ‌تر و نامنظم‌تر از سلول‌های تشکیل شده پس از نقطه F می‌باشند. در شرایطی که سلول‌های تشکیل شده درون ناحیه CDFE دارای متوسط اندازه سلولی حدود ۸ می‌باشند، سلول‌های ریز ایجاد شده پس از نقطه F دارای اندازه سلولی تقریبی ۲ هستند. به هر حال، سلول‌های کوچک‌تر تشکیل شده پس از نقطه F، دلیلی برای اثبات وجود امواج عرضی تراک فوق‌رانشی[1] را فراهم می‌کند. نکته بسیار مهم دیگری که از شکل (۲) می‌توان دریافت نمود، ایجاد و تقویت نقاط سه‌گانه در جبهه موج تراک (بعد از نقطه C) به‌خاطر انعکاس امواج ضعیف تراک برخوردی اولیه در محدوده x=710 دیوار فوقانی کانال بزرگتر است. در حقیقت با وجود اینکه نقاط سه‌گانه ابتدا بسیار ضعیف شده و در حد یک اغتشاش در جبهه موج به دیوار برخورد کرده است، اغتشاش قوی‌تر برخوردی باعث ایجاد یک نقطه سه‌گانه نسبتاً ضعیف در جبهه شده است. با انتشار بیشتر جبهه تراک و برخورد این نقاط سه‌گانه ضعیف با نقاط سه‌گانه قوی‌تر مجاور خود، نقاط سه‌گانه ضعیف نیز مجدداً تقویت شده و باعث تقویت تراک شده‌اند. انعکاس این امواج و برخورد آنها با یکدیگر و بنابراین ایجاد نواحی پرفشار، باعث افزایش دما نیز شده که منجر به تشکیل نقاط داغ شده است. نقاط داغ یکی از مهم‌ترین عوامل آغازش دوباره تراک پس از انکسار آن در نتایج حاضر می‌باشد.

برای مطالعه دقیق‌تر جزئیات حاکم بر رفتار جبهه تراک پس از انکسار آن، در شکل‌های (۷-۳) کانتورهای فشار، دما، چگالی و پارامتر پیشرفت واکنش از لبه خروجی کانال کوچک تا نقطه‌ای پس از نقطه آغازش دوباره و در چند زمان متوالی نشان داده شده است. با توجه به شکل (۳)، مشاهده می‌شود که به محض اینکه تراک در اطراف گوشه‌های ۹۰ درجه (نقاط A و B در شکل ۲) منکسر می‌شود، به‌دلیل اثرات امواج انبساطی صادر شده از این نقاط، فشار پشت شاک به‌صورت موضعی افت کرده و جبهه موج با افزایش انحنا مواجه شده است. به‌طور هم‌زمان نقاط سه‌گانه و امواج عرضی موجود در جبهه تراک در این ناحیه تضعیف می‌شوند. شکل‌های (۳-ج) و (۳-د) به‌ترتیب کانتورهای دما و پارامتر پیشرفت واکنش را نشان می‌دهند. با توجه به اینکه شکل (۳) لحظات ابتدایی ورود تراک به کانال با پهنای بزرگ‌تر است، از این لحظه به بعد، افزایش طول ناحیه واکنش و یا کاهش دما در بخشی از جبهه تراک که به سمت دیواره‌های کانال بزرگ‌تر حرکت می‌کند، اتفاق خواهد افتاد که با مقایسه با شکل (۴) مشخص می‌شود.

با ادامه انتشار تراک در کانال با پهنای بزرگ‌تر و در شکل ۴، قسمت بیشتری از جبهه تراک با کاهش فشار مواجه شده است که مبین اثر امواج انبساطی است. شکل (۴)، پیشروی جبهه تراک در کانال بزرگ‌تر و قبل از برخورد آن با دیواره‌های بالا و پایین کانال بزرگ‌تر را

1- Overdriven

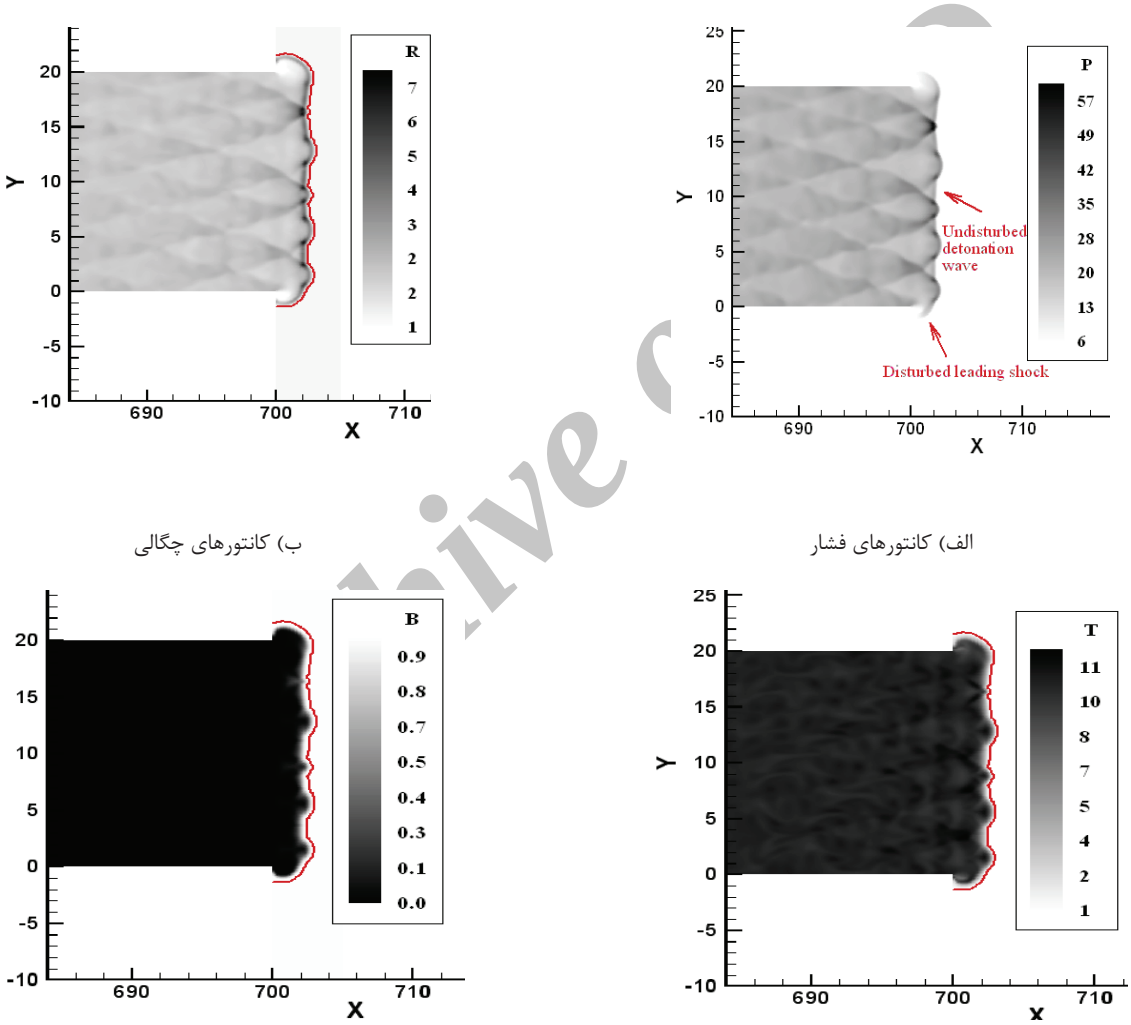
Archive of SID

www.SID.ir

نشان می‌دهد. در حقیقت امواج عرضی بیشتری در جبهه تراک به‌دلیل اثرات امواج انبساطی ناپدید می‌شوند که به تضعیف بیشتر تراک منجر می‌شود.

کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش در شکل‌های (۳) و (۴) نشان می‌دهند که با پیشروی تراک در کانال با پهنای بیشتر، فاصله موج ضربه‌ای پیشرو و ناحیه واکنش در بخش‌های دارای انحنای جبهه تراک افزایش یافته و این پدیده باعث تضعیف تراک در این نواحی گردیده است. یعنی در شرایطی که فاصله بین موج ضربه‌ای پیشرو و ناحیه واکنش در بخش فوقانی جبهه تراک در کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش شکل (۳) حدود نیم واحد طولی است، این فاصله به حدود دو واحد طولی در کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش شکل (۴) افزایش یافته است. دلیل این پدیده کاهش دمای پشت جبهه موج ضربه‌ای پیشرو است. این کاهش دما را می‌توان ناشی از اثرات امواج انبساطی ایجاد شده توسط گوشه‌ها دانست.

در شکل‌های (۵)، جبهه شاک پیشرو به مرزهای بالا و پایین کانال برخورد کرده و درنتیجه انعکاس امواج موجود در جبهه تراک رخ داده است. شکل (۵- الف) افزایش فشار به‌صورت موضعی در جبهه تراک پس از برخورد جبهه موج با دیوارها را نشان می‌دهد. همچنین تشکیل یک بسته نسوخته در موقعیت تقریبی x=710 در شکل (۵- د) مشاهده می‌شود.



الف) کانتورهای فشار

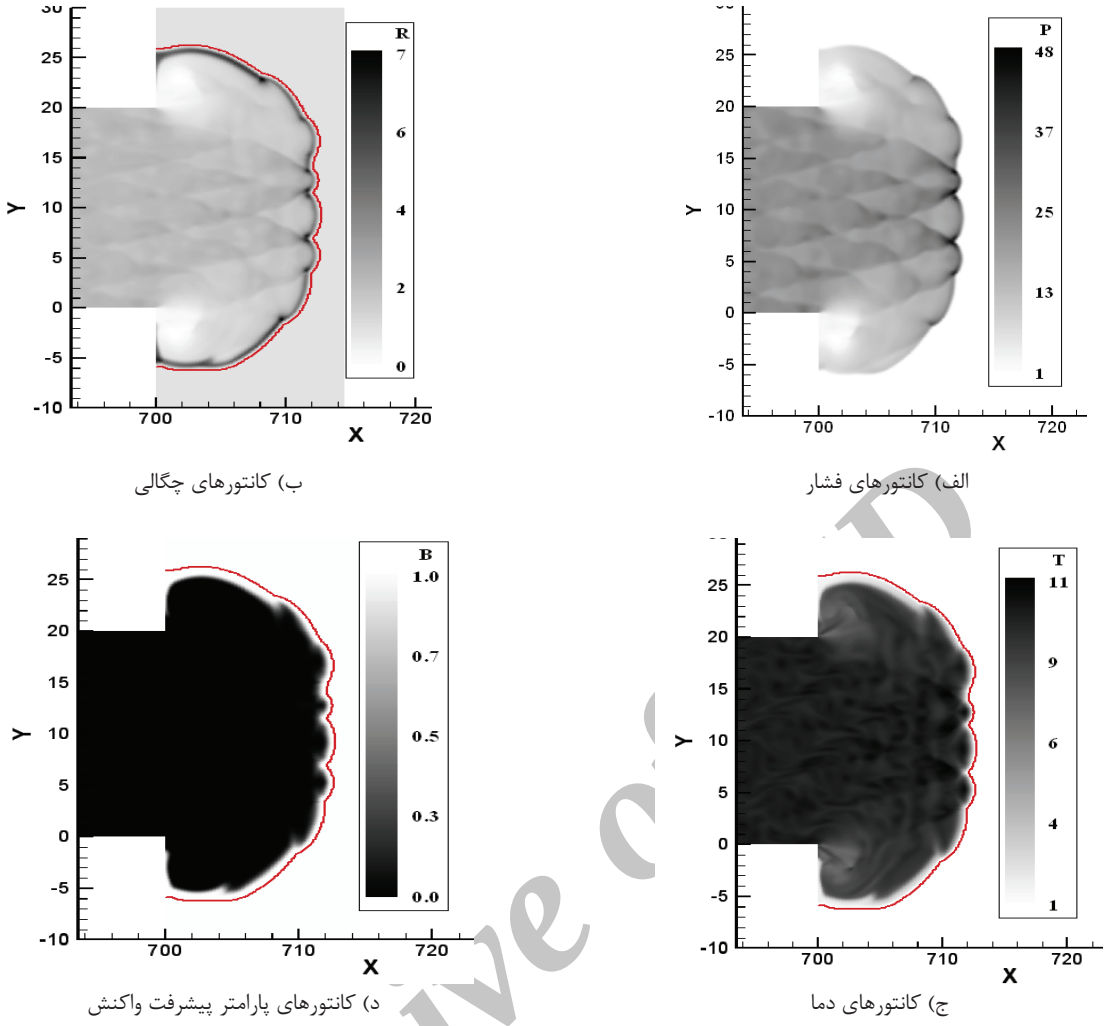
ب) کانتورهای چگالی

ج) کانتورهای دما

د) کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش

شکل ۳- انکسار تراک در کانال هنگام ورود جبهه تراک به کانال با پهنای بزرگ‌تر، جبهه تراک در موقعیت حدود x= 703 (خطوط قرمز رنگ معرف جبهه تراک می‌باشند).

www.SID.ir



الف) کانتورهای فشار

ب) کانتورهای چگالی

ج) کانتورهای دما

د) کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش

شکل ۴- انکسار تراک در کانال هنگام ورود جبهه تراک به کانال با پهنای بزرگ‌تر، جبهه تراک در موقعیت حدود x= 712 (خطوط قرمز رنگ معرف جبهه تراک می‌باشند).

در شکل (۶) انعکاس امواج ضربه‌ای در مرزهای کانال رخ داده و موج منعکس شده به‌وضوح در اطراف نقطه‌ای در موقعیت حدود $x = 723$ در مجاورت دیوارهای کانال با پهنای بیشتر قابل تشخیص است.

با توجه به کانتورهای داده شده در شکل (۶) مشاهده می‌شود که پس از برخورد نقطه سه‌گانه و موج عرضی مربوط به آن با دیوار، یک موج عرضی منعکس شده و تا محل تغییر سطح مقطع کانال گسترش یافته است (امواج T1 و T2 در شکل ۶). کانتورهای فشار نشان می‌دهند که در دو طرف این موج عرضی تغییرات فشار قابل توجه است.

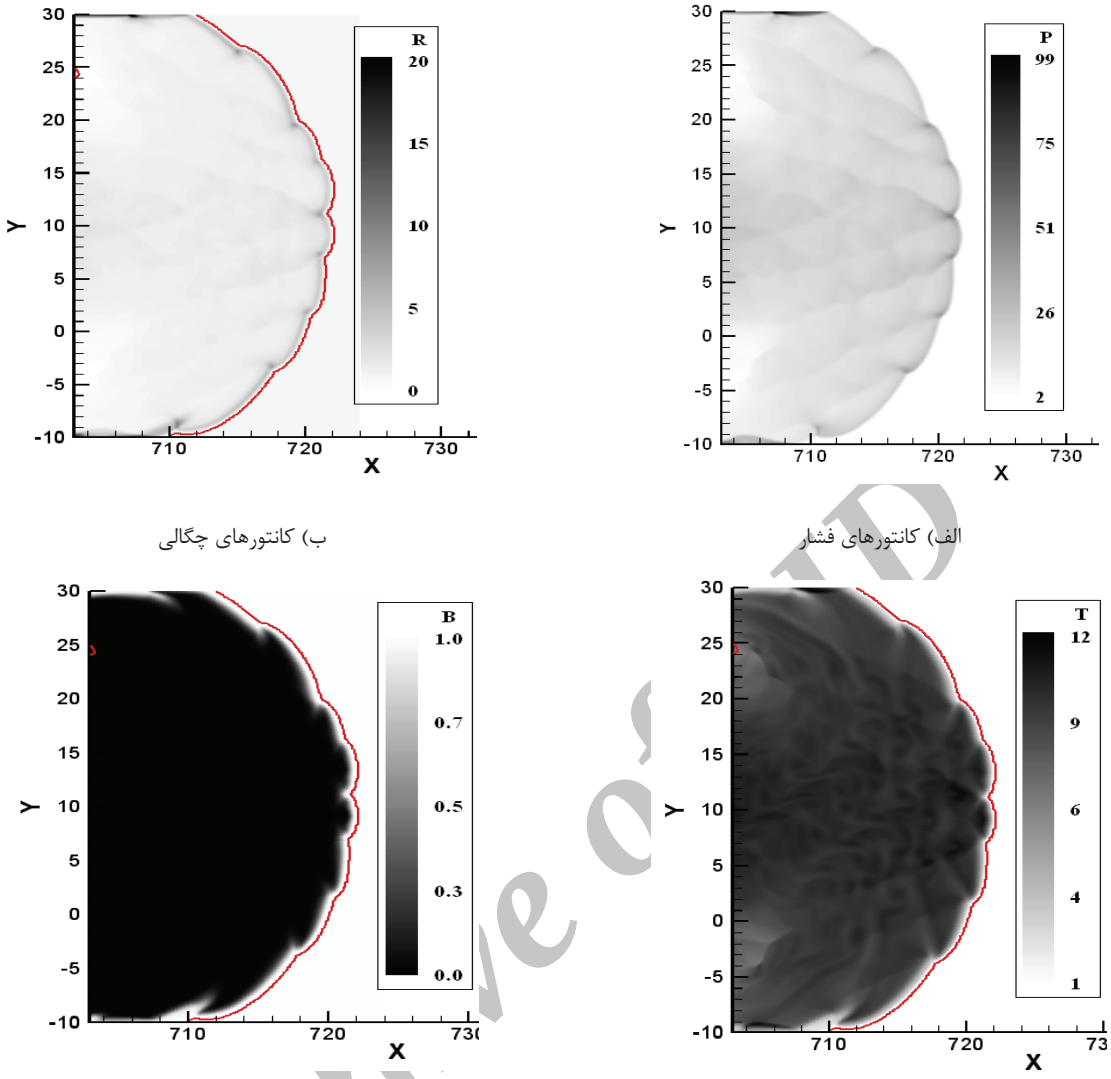
در حقیقت بخشی از این موج عرضی که در نزدیکی جبهه موج ضربه‌ای پیشرو و در محدوده ناحیه واکنش قرار دارد، می‌تواند با افزایش دما به افزایش نرخ واکنش و درنتیجه تقویت جبهه موج کمک کند.

اضافه بر این، ایجاد ناحیه با فشار نسبتاً بالا پس از برخورد نقطه سه‌گانه با دیوار، مشابه یک انفجار موضعی عمل نموده و به تقویت و انتشار تراک کمک می‌کند.

شکل (۷) کانتورهای مربوط به جبهه موج را در زمان بعد نسبت به شکل قبل نشان می‌دهد. مقایسه این شکل با شکل (۶) نمایان می‌کند که امواج عرضی منعکس شده توسط دیوارهای کانال بزرگ‌تر، با حرکت به سمت مرکز کانال و با افزایش دما و فشار در نواحی پشت جبهه تراک، باعث تقویت آن شده‌اند. برخورد این امواج منعکس شده با امواج عرضی ضعیف موجود در بخش‌های دیگر جبهه، مانند برخورد امواج ۱ و ۲ با یکدیگر و همچنین برخورد موج ۳ با ۴ در شکل‌های (۷)، یکی دیگر از عوامل مهم در تقویت تراک پس از انکسار آن می‌باشند. تقویت اغتشاشات ایجاد شده در جبهه موج ضربه‌ای پیشرو و تبدیل آنها به نقاط سه‌گانه جدید، باعث ایجاد امواج عرضی جدید مانند امواج ۱ تا ۴ شده‌اند.

Archive of SID

www.SID.ir



الف) کانتورهای فشار

ب) کانتورهای چگالی

ج) کانتورهای دما

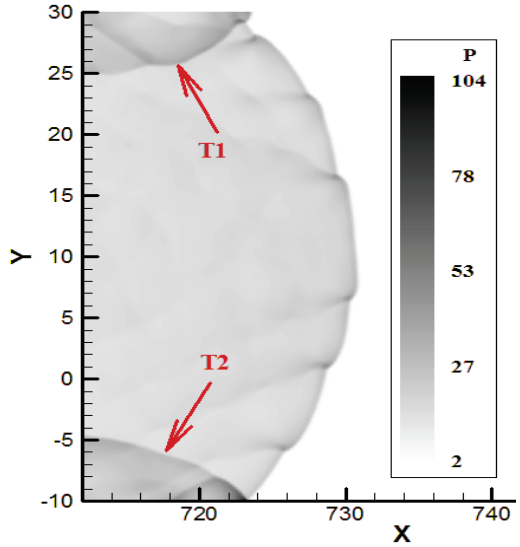
د) کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش

شکل۵- انکسار تراک در کانال هنگام ورود جبهه تراک به کانال با پهنای بزرگ‌تر، جبهه تراک در موقعیت حدود x= 722 (خطوط قرمز رنگ معرف جبهه تراک می‌باشند).

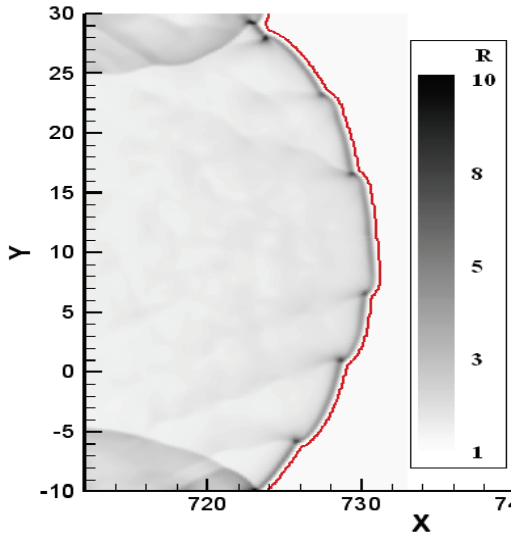
بررسی کلی کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش در شکل‌های (۷-۳) نشان می‌دهند که با پیشروی تراک در کانال با پهنای بیشتر در ابتدا فاصله بین موج ضربه‌ای پیشرو و ناحیه واکنش در نواحی منحنی شکل جبهه تراک از حدود ۰/۵ واحد طول به بیش از ۲ واحد طول افزایش یافته است، درحالی که در بخش‌های مرکزی این فاصله تقریباً در حدود ۰/۵ واحد طول ثابت مانده است. بنابراین به‌راحتی می‌توان نتیجه گرفت که بخش‌های مرکزی جبهه تراک، در ابتدای ورود به کانال با پهنای بیشتر، تحت تأثیر امواج انبساطی قرار نگرفته است. با پیشروی جبهه موج منکسر شده و پس از برخورد جبهه تراک با دیواره‌های کانال بزرگ‌تر و انعکاس آن، این فاصله کاهش یافته و تراک مجدداً تقویت می‌شود. نکته دیگر که در کانتورهای دمای این شکل‌ها قابل مشاهده است، دمای پایین‌تر در مناطقی که جبهه و ناحیه واکنش از یکدیگر فاصله گرفته‌اند و دمای بالاتر در مناطقی که این دو به یکدیگر نزدیکترند، است. این پدیده باعث کم شدن نرخ آزاد شدن حرارت در نواحی با دمای کم و بالعکس می‌شود. بنابراین تضعیف تراک در اثر امواج انبساطی در حین انکسار آن به‌وجود آمده است.

Archive of SID

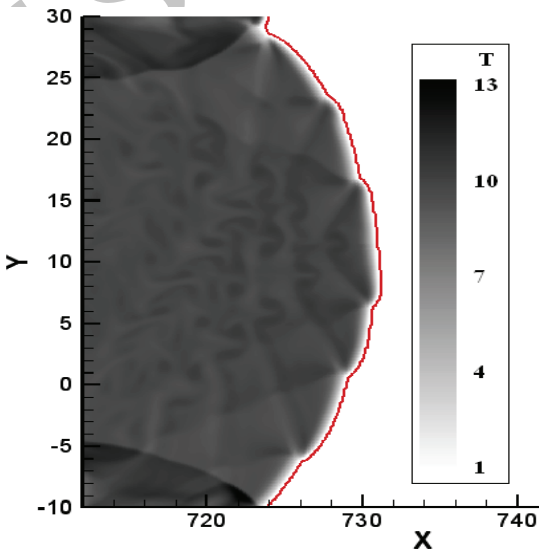
www.SID.ir



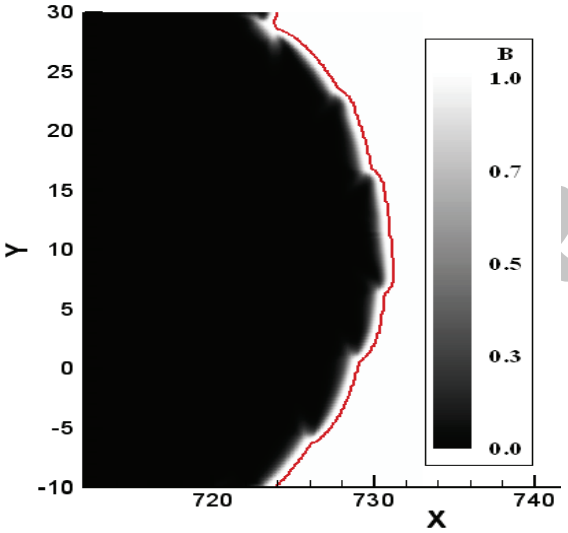
الف) کانتورهای فشار



ب) کانتورهای چگالی



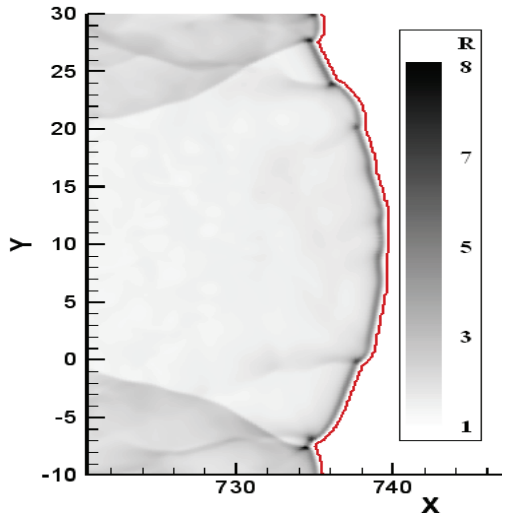
ج) کانتورهای دما



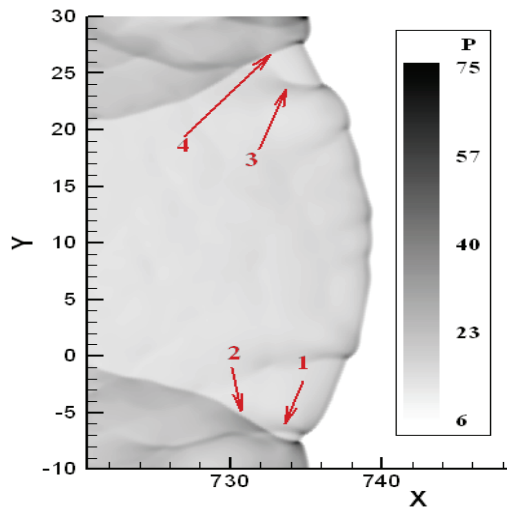
د) کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش

شکل ۶- انکسار تراک در کانال هنگام ورود جبهه تراک به کانال با پهنای بزرگ‌تر، جبهه تراک در موقعیت حدود x= 731 (خطوط قرمز رنگ معرف جبهه تـراک می‌باشند).

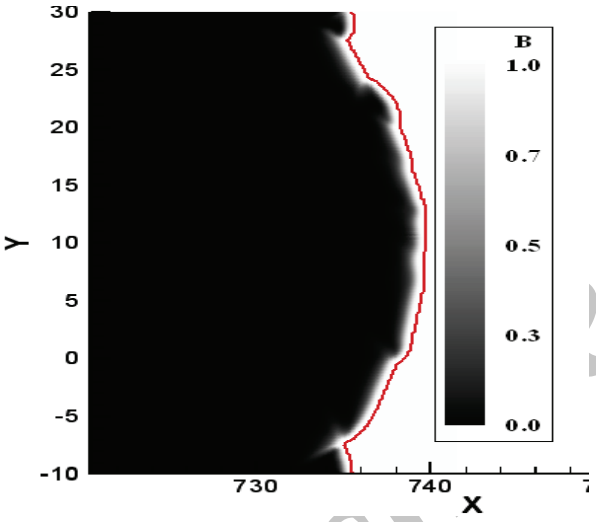
www.SID.ir



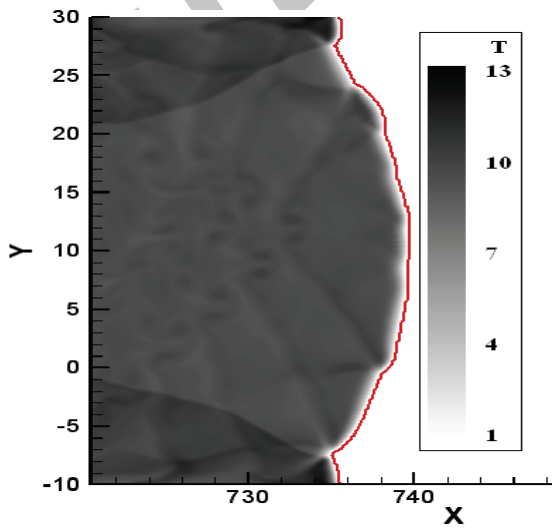
ب) کانتورهای چگالی



الف) کانتورهای فشار



د) کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش



ج) کانتورهای دما

شکل ۷- انکسار تراک در کانال هنگام ورود جبهه تراک به کانال با پهنای بزرگ‌تر، جبهه تراک در موقعیت حدود x= 740 (خطوط قرمز رنگ معرف جبهه تراک می‌باشند)

۶- نتیجه گیری

شبیه‌سازی عددی دوبعدی انکسار تراک از کانالی کوچک به کانالی با پهنای بزرگ‌تر برای مخلوطی با مشخصات $E_a/RT = 15, Q/RT = 50, \gamma = 1.2$ انجام شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده در مقاله حاضر، می‌توان بیان نمود که در کانال و مخلوط گازی درنظر گرفته شده با ساختار سلولی منظم، اثرات امواج انبساطی روی جبهه تراک در هنگام انکسار باعث تضعیف و میرایی موضعی تراک شده است. اگرچه میرایی کلی در جبهه تراک به‌وجود نیامده و تراک پس از تقویت به خاطر برخورد نقاط سه‌گانه و امواج عرضی به دیواره‌های کانال بزرگ‌تر به‌صورت موفقیت‌آمیز در کانال با پهنای بیشتر منتشر شده است. برخورد نقاط سه‌گانه و امواج عرضی با دیواره‌های کانال بزرگ‌تر، باعث ایجاد نقاط داغ و امواج عرضی انعکاسی با قدرت بیشتر شده که به تقویت جبهه تراک کمک نموده و باعث عدم میرایی آن شده است. همچنین اغتشاشات ایجاد شده در جبهه تراک هنگام انکسار، با برخورد با نقاط سه‌گانه مجاور خود، تقویت و باعث ایجاد نقاط سه‌گانه جدید و درنتیجه تقویت تراک شده‌اند.

www.SID.ir

مراجع

[1] Schultz, E. “Detonation Diffraction Through an Abrupt Area Expansion.”; Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, 2000.

[2] Yu, Q. “Experimental and Numerical Study of Unsteady Shock and Detonation Waves.”; Ph.D. Thesis, Aachen Polytechnic Institute, Aachen, Germany, 1996.

[3] Akbar, R. “Mach Reflection of Gaseous Detonations.”; Ph.D. Thesis, Dept. of Aeronautical Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA, 1997.

[4] Pintgen, F.; Shepherd, J. E. “Detonation Diffraction in Gases.”; Combust. Flame 2009, 156, 665–677.

[5] Lee, J. H. S. “Detonation Waves in Gaseous Explosives.”; Hand Book of Shock Waves 2001, 3, 309-415.

[6] Soloukhin, R. I.; Ragland, K. W. “Ignition Processes in Expanding Detonations.”; Combust. Flame 1969, 13, 295-302.

[7] Murray, S. B.; Lee, J. H. S. “On the Transformation of Planar Detonation to Cylindrical Detonation.”; Combust. Flame 1983, 52, 269-289.

[8] Bartlmä, F.; Schröder, K. “The Diffraction of a Plane Detonation Wave at a Convex Corner.”; Combust. Flame 1986, 66, 237–248.

[9] Jones, D. A.; Kemister, G.; Oran, E. S.; Sichel, M. “The Influence of Cellular Structure on Detonation Transmission.”; Shock Waves 1996, 6, 119-127.

[10] Teodorczyk, A.; Lee, J. H. S.; Knystautas, R. “Propagation Mechanism of Quasi-detonations.”; Symposium (International) on Combustion 1988, 21, 1723-1731.

[11] Mach, P.; Radulescu, M. I. “Mach Reflection Bifurcation as a Mechanism of Cell Multiplication in Gaseouse Detonations.”; Proceedings of the Combustion Institute 2011, 33, 2279-2285.

[۱۲] سبزپوشانی، مجید و مظاهری، کیومرث "بررسی تشکیل جت پرسرعت در تراک‌های گازی و تأثیر آن روی جبهه تراک" نشریه مواد پرانرژی، پائیز و زمستان ۱۳۸۶، سال دوم، شماره ۲، ۳۷- ۲۵.

[13] Arienti, M.; Shepherd, J. E. “A Numerical Study of Detonation Diffraction.”; J. Fluid Mechanics 2005, 529, 117-146.

[14] Wang, C. J.; Xu, S. L.; Guo, C. M. “Gaseous Detonation Propagation in a Bifurcated Tube.”; J. Fluid Mechanics 2008, 599, 81-110.

[15] Papalexandris, M. V.; Thomas, J. F.; Jacobs, C.; Deledicque, V. “Structural Characteristics of Detonation Expansion from a Small Channel to a Larger One.”; J. Proceedings of the Combustion Institute 2007, 31, 2407–2414.

[16] Colella, P. “Multidimensional Upwind Methods for Hyperbolic Conservation Laws.”; J. Comput. Phys. 1990, 87, 171-200.

[17] Berger, M. J.; Colella, P. “Local Adaptive Mesh Refinement for Shock Hydrodynamics.”; J. Comput. Phys. 1989, 82, 64-84.

[18] Sabzpooshani, M.; Mazaheri, K. “Formation of Unburnt Pockets in Gaseous Detonations.”; Combustion, Explosion, and Shock Waves 2009, 45, 182–193.

[19] Sharpe, G. J.; Falle, S. A. E. “Two-Dimensional Numerical Simulations of Idealized Detonations.”; Proc. Royal Soc. London 2000, A 456, 2081-2100.

[20] Mahmoodi, Y.; and Mazaheri, K. “High Resolution Numerical Simulation of the Structure of 2-D Gaseous Detonations.”; J. Proceedings of the Combustion Institute 2011, 33, 2187–2194.

[21] Jiang, Z.; Han, G.; Wang, C.; Zhang, F. “Self-Organized Generation of Transverse Waves in Diverging Cylindrical Detonations.”; Combust. Flame 2009, 156, 1653-1661.

Archive of SID

www.SID.ir