

## مطالعه عددی انکسار در تراک گازی با ساختار سلولی منظم

مجید سبزویشانی\*<sup>۱</sup>، محمد حسین خیرخواه<sup>۲</sup>

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 در نظر گرفته شده که حداقل ۵ سلول در پهنای کانال و هنگام انکسار وجود داشته باشد. نتایج به دست 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 در نتیجه 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 آغاز دوباره تراک دارد.

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

### ۱- مقدمه

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 آغاز 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

پدیده انکسار تراک یکی از مهم‌ترین پدیده‌هایی است که در سالیان اخیر به‌دلیل کاربردهای وسیع در صنایع نظامی، ایمنی انتقال مواد تراک‌پذیر و موتورهای تراک ضربانی<sup>۳</sup> 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، شرایط ترمودینامیکی اولیه و هندسه سیستم در یکی از رژیم‌های مادون بحرانی<sup>۴</sup>، بحرانی<sup>۵</sup> و یا مافوق بحرانی<sup>۶</sup> رخ می‌دهد. در

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

5- Critical

6- Super Critical

۱- استادیار

۲- کارشناس ارشد

3- Pulse Detonation Engine

4- Sub Critical

دوباره را فراهم می‌کند [۹]. آنها بیان نمودند که برای مخلوط‌های هیدروژن - اکسیژن و در حضور انبساط سطح، آغازش دوباره به دلیل 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 به هم 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 به خاطر 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<sup>۲</sup> و به تبع 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) به وجود 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 سوخته<sup>۳</sup> 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 دیوارها تشکیل می‌شوند نیز دیده شده است. به عنوان نمونه ماخ و همکارش [۱۰] و نیز سبزپوشانی و همکارش [۱۱]، ایجاد اغتشاش و تأثیر جت‌های داغ به وجود آمده تراک را روی امواج ضربه‌ای پیشرو نشان داده‌اند.

آرینتی و همکارش، انکسار تراک گازی را به صورت شبیه‌سازی عددی بررسی نموده‌اند [۱۲]. آنها دریافتند که جدایی ناحیه واکنش و جبهه امواج ضربه‌ای پیشرو به صورت محلی، هنگامی اتفاق می‌افتد که نرخ تغییرات مادی دما نسبت زمان (مشقت کامل دما) در آن محل صفر شود. به عبارتی هنگامی که یک ذره سیال از امواج ضربه‌ای پیشرو عبور می‌کند، افزایش دما خواهد داشت اما به خاطر اثرات امواج انبساطی نیز با کاهش دما مواجه می‌شود. هنگامی که 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 در حالی که ترم‌های تضعیف‌کننده‌ها<sup>۴</sup> می‌توانند

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 به خصوص 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 به وجود 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 به خاطر انبساط محصولات پرفشار تراک و ایجاد امواج انبساطی شناخته شده است [۵]. این امواج انبساطی، تراک را خنک کرده و موجب جدا شدن موج‌های ضربه‌ای پیشرو از ناحیه واکنش در جبهه تراک می‌شوند. وی بیان داشته که برای مخلوط‌های با انرژی فعال‌سازی بالا (که ناحیه واکنش به شدت نسبت به دما حساس است) یک اغتشاش کوچک، ممکن است باعث میرا شدن تراک شود در حالی 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 سولووخین و همکارش<sup>۱</sup> نشان می‌دهد که در رژیم مادون بحرانی ناحیه واکنش به‌طور کامل از موج ضربه‌ای جدا می‌شود در حالی که در حالت مافوق بحرانی انفجارهای موضعی باعث آغازش دوباره تراک می‌گردد [۶]. مشاهدات تجربی موری و همکارش دو مکانیزم برای آغازش دوباره را بیان می‌کند [۷]. مکانیزم اول آغازش دوباره به دلیل انفجارهای موضعی و مکانیزم دوم به دلیل انعکاس و تقویت امواج عرضی پس از برخورد به یک مرز محدود کننده (دیوار) در اطراف ناحیه انکسار تراک است [۷].

بارتلا 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

2- Mach Stem  
3- Unburnt Pockets  
4- Unsteadiness

1- Soloukhin

## ۲- مدل ریاضی و روش حل عددی

معادلات دینامیک گاز و سینتیک شیمیایی حاکم بر جریان اصلی مسئله با در نظر گرفتن یک سری فرض‌های ساده کننده حل می‌شوند. مدل کردن ساختار غیرخطی تراک با استفاده از معادلات واکنشی دوبعدی اوپلر صورت می‌گیرد. چهار فرض اساسی دوبعدی بودن تحلیل، صرف نظر 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.  $\gamma$  نسبت گرمای ویژه که در این مقاله  $\gamma = 1.2$  فرض شده و  $Q$  گرمای آزاد شده از واکنش شیمیایی که به صورت بی بعد برابر  $Q/RT = 50$  می‌باشد. مدل سینتیکی در نظر گرفته شده در این مطالعه، مدل یک مرحله‌ای آرنیوسی است که به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$W = -k\beta \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (1)$$

که در آن  $E_a$  انرژی فعال‌سازی،  $T$  دما،  $R$  ثابت گازها و  $k$  پیش فاکتور (ثابت) آرنیوسی می‌باشند. کلیه معادلات به صورت بی بعد در نظر گرفته شده‌اند. برای این کار متغیرهای وابسته با توجه به خواص مخلوط نسوخته بی بعد شده‌اند و برای بی بعد 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<sup>۳</sup> و بالا دستی<sup>۴</sup> در فضای دوبعدی می‌باشد [۱۵]. در این روش محاسبه فلاکس‌های عددی روی اضلاع سلول‌های شبکه محاسباتی با در نظر گرفتن تغییرات میدان جریان در هر دو جهت مختصاتی است. برای کاهش هزینه محاسباتی، از روش ریز کردن تطبیقی شبکه<sup>۵</sup>، 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 به وجود 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

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

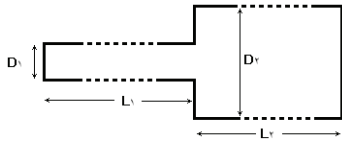
وانگ و همکاران تشکیل ساختار سلولی در انکسار تراک گازی در یک کانال با یک شاخه فرعی ۹۰ درجه (T شکل) را به صورت تجربی بررسی کردند [۱۳]. نتایج آنها نشان می‌دهد که رفتار تراک به طور چشمگیری توسط دیوارهای در محل تقاطع دو کانال آشفته شده و یک سری امواج با ساختاری پیچیده در کانال جانبی ظاهر می‌شود. ساختارهای سلولی نشان می‌دهند که یک فن انبساطی در محل T شکل کانال و یک انعکاس ماخ<sup>۱</sup> در کانال افقی اتفاق می‌افتد، در حالیکه یک انعکاس منظم<sup>۲</sup> 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 [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 در حالی که به خاطر 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 به طور کامل مطالعه نشده است. به عنوان 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. به خاطر خصوصیات ویژه مخلوط‌های با ساختار سلولی منظم، وجود اغتشاشات و تضعیف جزئی، عموماً باعث میرایی تراک نمی‌شود در حالی که در مخلوط‌های با ساختار سلولی نامنظم این گونه 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

3- Unsplit  
4- Upwind  
5- Adaptive Mesh Refinement

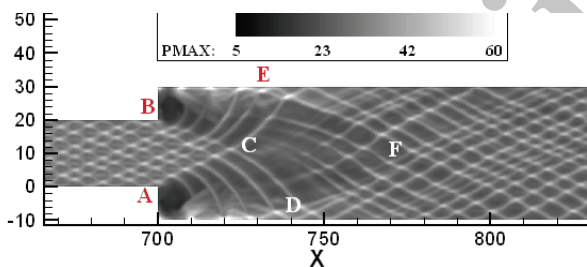
این کانال  $D_1$  و  $L_1$  به ترتیب پهنا و طول کانال کوچک،  $D_2$  و  $L_2$  پهنا و طول کانال بزرگتر است. AR نسبت انبساط کانال ( $D_2/D_1$ ) است. انتشار تراک از چپ به راست و از ابتدای کانال کوچک است.



شکل ۱- طرحواره مدل هندسی کانال (جهت انتشار تراک از سمت چپ به راست و از ابتدای کانال کوچک تر می باشد).

#### ۴- نتایج و بحث

به منظور 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 فعال سازی مخلوط برابر با ۱۵ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که طول اولیه کانال به اندازه ای در نظر گرفته شده که رفتار تراک و ساختار سلولی به دست آمده از آن مستقل از شرایط آغازش ابتدای کانال باشد. با توجه به شکل (۲) مشاهده می شود که در این شرایط، حدود پنج سلول مشخصه در کانال اولیه تشکیل می شود. بلافاصله بعد از کانال اول، کانال دوم با پهنای برابر ۴۰ قرار داده شده است. شکل (۲) تاریخچه فشار بیشینه در کانال را نشان می دهد. با توجه به وجود بیشترین فشار در نقطه سه گانه جبهه تراک، خطوط روشن در شکل (۲) معرف مکان حرکت نقاط سه گانه است.



شکل ۲- تاریخچه فشار بیشینه برای انکسار مخلوط با مشخصات  $E_0/RT_0 = 15$  و  $Q/RT = 50$  و  $\gamma = 1.2$  در کانالی با مشخصات  $L_1 = 700, D_1 = 20, AR = 2$ .

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

صفر است. در حقیقت جریان سیال به صورت مماس روی این مرزها حرکت می کنند. برای آغازش مستقیم تراک، از پروفیل موج بلست<sup>۱</sup> 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 شبیه سازی تراک دوبعدی به اثبات رسیده است [۱۷]. در کار حاضر، کد مزبور برای شبیه سازی انتشار تراک در کانال با تغییر سطح مقطع توسعه داده شده است.

یکی از چالش های شبیه سازی عددی تراک، استفاده از سلول های محاسباتی کافی به منظور ایجاد وضوح لازم در ناحیه واکنش تراک می باشد. شارپ و همکارش در شبیه سازی دوبعدی خود نشان دادند که اگر شبکه محاسباتی شامل کمتر از ۲۰ سلول محاسباتی در طول نیمه واکنش (hrf)<sup>۲</sup> باشد، نتایج یکتا نیستند [۱۸]. البته لازم به ذکر است که نتایج محاسباتی به دقت و مرتبه روش عددی نیز بستگی دارند. روش عددی مورد استفاده شارپ و همکارش و همچنین روش عددی به کار رفته در تحقیق حاضر، دارای دقت مرتبه دو می باشند. شارپ و همکارش نتیجه گرفتند که اگر ابعاد سلول های محاسباتی کافی نباشد، اندازه سلولی و درجه منظمی تراک به شدت 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 شبیه سازی شود، نیاز است تا شبکه محاسباتی حدود ۳۰۰ سلول محاسباتی در طول نیمه واکنش باشد. البته لازم به ذکر است که آنها از سیستم پردازشگر موازی استفاده نموده و همچنین پهنای کانالی که شبیه سازی 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 شبکه های 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 نموده اند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که خصوصیات کلی جبهه تراک با دقت کم نیز قابل حصول است هر چند که برای بررسی ساختارهای کوچک تری که در جبهه تراک به وجود می آیند، نیاز به شبکه های محاسباتی بسیار کوچک تر است. با توجه به محدودیت های سخت افزاری موجود، در تحقیق حاضر از ۳۵ سلول محاسباتی در طول نیمه واکنش مخلوط گازی با انرژی فعال سازی ۲۰ که برابر حدود ۷ سلول محاسباتی در طول نیمه واکنش مخلوط با انرژی فعال سازی ۱۵ می باشد، استفاده شده است.

#### ۳- تعریف مدل

شماتیکی از مدل مورد بررسی در شکل (۱) نشان داده شده است. در

$x_c = 721$ ، 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 [۸ و ۱۰۴]. 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 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 پهنای 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 به تدریج 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 پیرامونی 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 تضعیف بودن امواج عرضی برخوردی، امواج انعکاسی نیز ضعیف بوده و باعث آغاز مجدد تراک نشده‌اند. 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 آغاز 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<sup>۱</sup> 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 آغاز 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 آغاز 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.

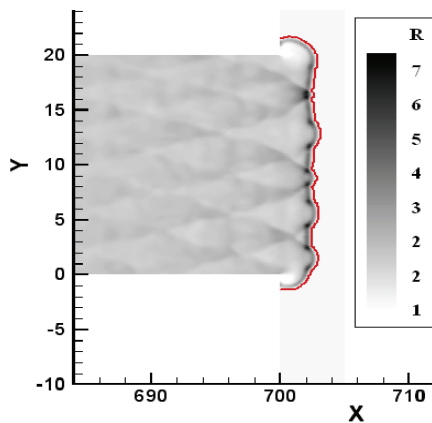
با ادامه انتشار تراک در کانال با پهنای بزرگ‌تر و در شکل ۴، قسمت بیشتری از جبهه تراک با کاهش فشار مواجه شده است که مبین اثر امواج انبساطی است. شکل (۴)، پیشروی جبهه تراک در کانال بزرگ‌تر و قبل از برخورد آن با دیواره‌های بالا و پایین کانال بزرگ‌تر را

حدود دو واحد طولی در کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش شکل (۴) افزایش یافته است. دلیل این پدیده کاهش دمایی پشت جبهه موج ضربه‌ای پیشرو است. این کاهش دما را می‌توان ناشی از اثرات امواج انبساطی ایجاد شده توسط گوشه‌ها دانست.

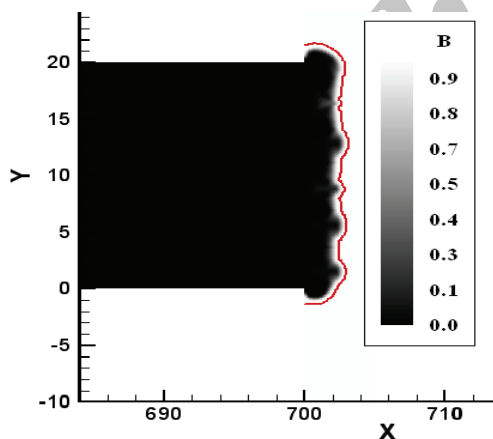
در شکل‌های (۵)، جبهه شاک پیشرو به مرزهای بالا و پایین کانال برخورد کرده و در نتیجه انعکاس امواج موجود در جبهه تراک رخ داده است. شکل (۵-الف) افزایش فشار به صورت موضعی در جبهه تراک پس از برخورد جبهه موج با دیوارها را نشان می‌دهد. همچنین تشکیل یک بسته نسوخته در موقعیت تقریبی  $x=710$  در شکل (۵-د) مشاهده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

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

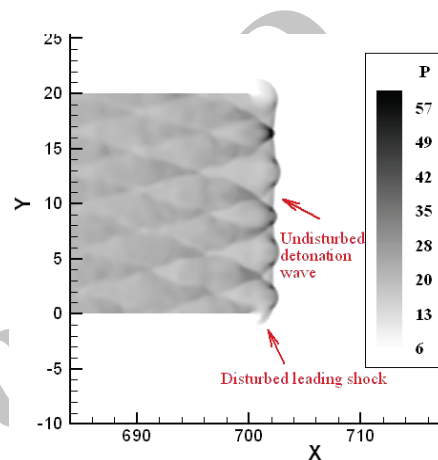
کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش در شکل‌های (۳) و (۴) نشان می‌دهند که با پیشروی تراک در کانال با پهنای بیشتر، فاصله موج ضربه‌ای پیشرو و ناحیه واکنش در بخش‌های دارای انحنا جبهه تراک افزایش یافته و این پدیده باعث تضعیف تراک در این نواحی گردیده است. یعنی در شرایطی که فاصله بین موج ضربه‌ای پیشرو و ناحیه واکنش در بخش فوقانی جبهه تراک در کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش شکل (۳) حدود نیم واحد طولی است، این فاصله به



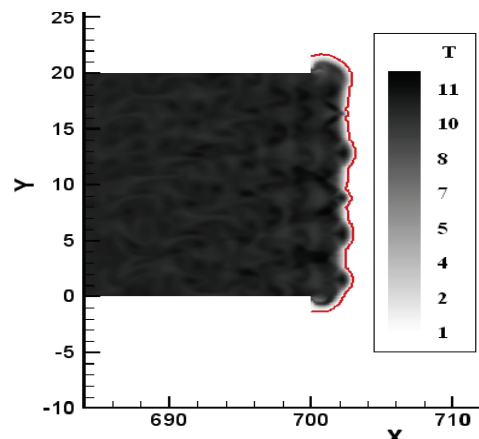
ب) کانتورهای چگالی



د) کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش

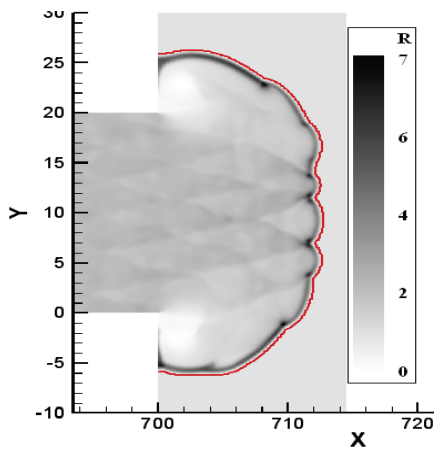


الف) کانتورهای فشار

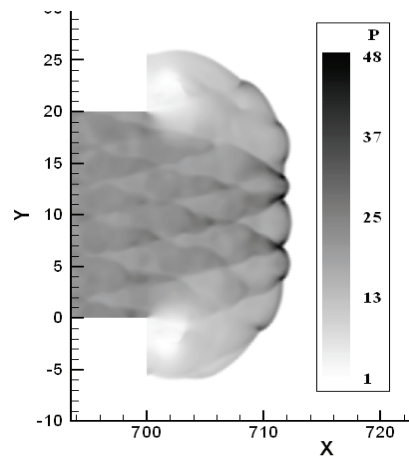


ج) کانتورهای دما

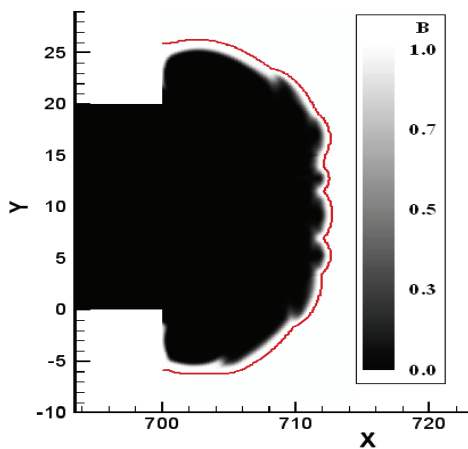
شکل ۳- انکسار تراک در کانال هنگام ورود جبهه تراک به کانال با پهنای بزرگ‌تر، جبهه تراک در موقعیت حدود  $x=703$  (خطوط قرمز رنگ معرف جبهه تراک می‌باشند).



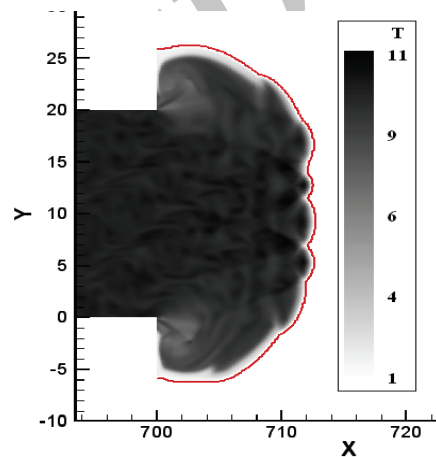
ب) کانترهای چگالی



الف) کانترهای فشار



د) کانترهای پارامتر پیشرفت واکنش



ج) کانترهای دما

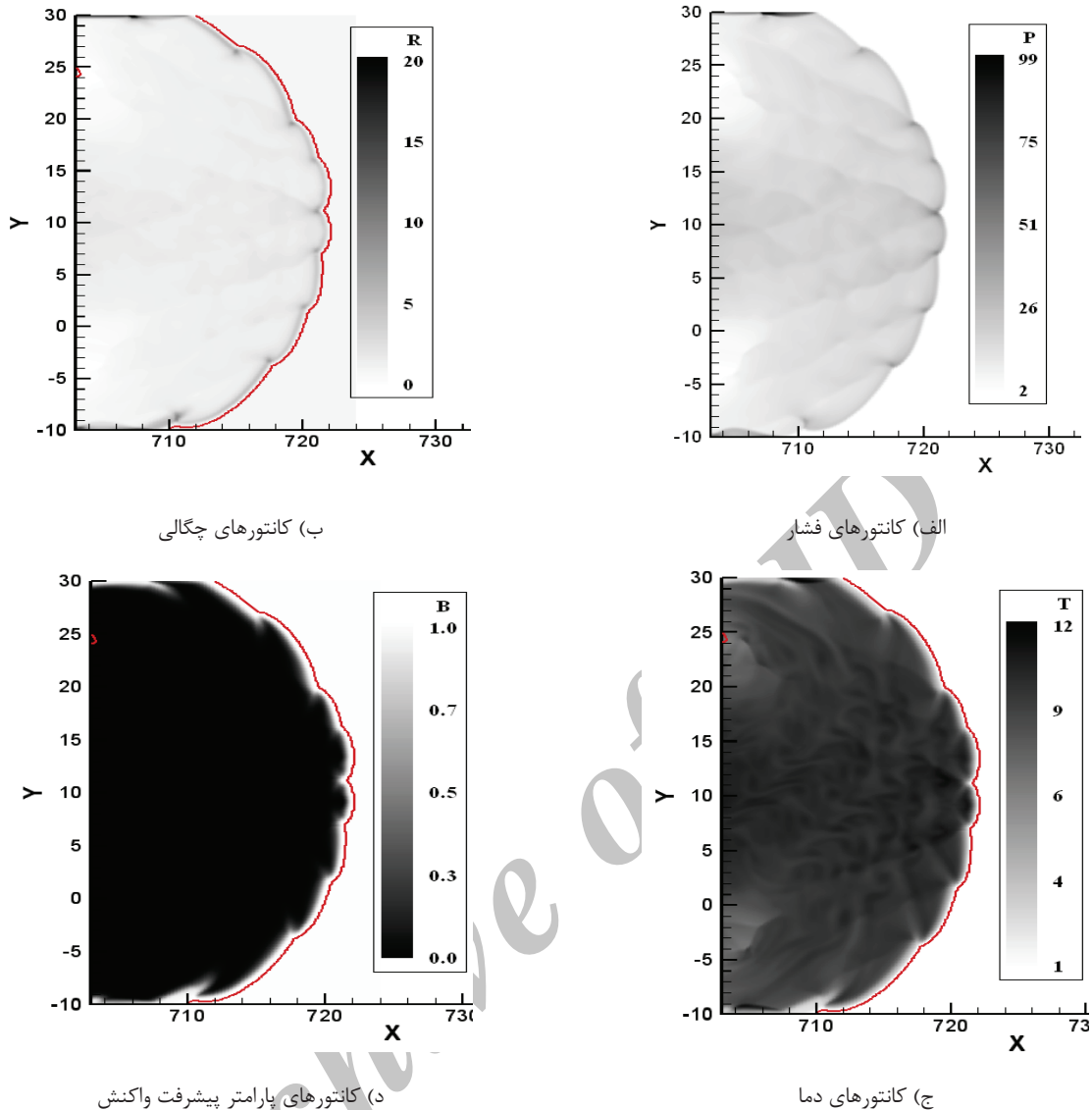
شکل ۴- انکسار تراک در کانال هنگام ورود جبهه تراک به کانال با پهنای بزرگتر، جبهه تراک در موقعیت حدود  $x = 712$  (خطوط قرمز رنگ معرف جبهه تراک می‌باشند).

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) کانترهای 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.

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

با توجه به کانترهای 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). کانترهای 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 در نتیجه تقویت جبهه موج کمک کند.

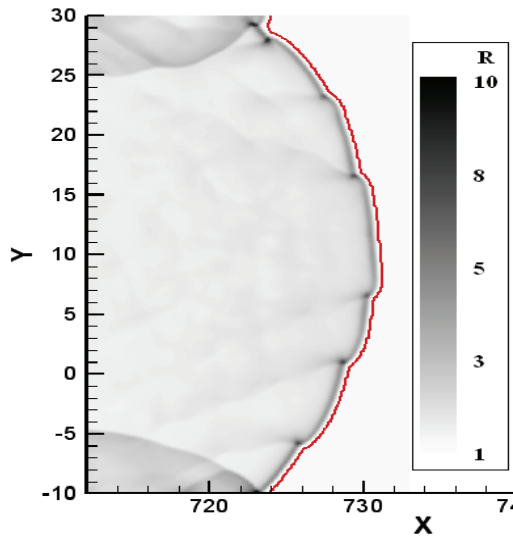


**شکل ۵-** انکسار تراک در کانال هنگام ورود جبهه تراک به کانال با پهنای بزرگتر، جبهه تراک در موقعیت حدود  $x=722$  (خطوط قرمز رنگ معرف جبهه تراک می‌باشند).

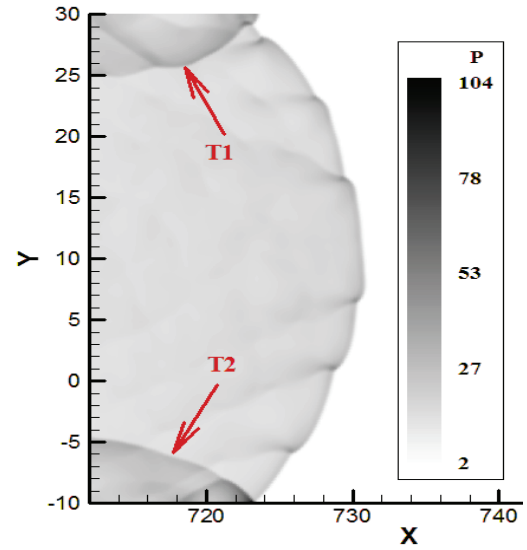
پیشروی جبهه موج منکسر شده و پس از برخورد جبهه تراک با دیواره‌های کانال بزرگتر و انعکاس آن، این فاصله کاهش یافته و تراک مجدداً تقویت می‌شود. نکته دیگر که در کانتورهای دمای این شکل‌ها قابل مشاهده است، دمای پایین‌تر در مناطقی که جبهه و ناحیه واکنش از یکدیگر فاصله گرفته‌اند و دمای بالاتر در مناطقی که این 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.

بررسی کلی کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش در شکل‌های (۳-۷) 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  $0.5$  واحد طول به بیش از  $2$  واحد طول افزایش یافته است، درحالی که در بخش‌های مرکزی این فاصله تقریباً در حدود  $0.5$  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

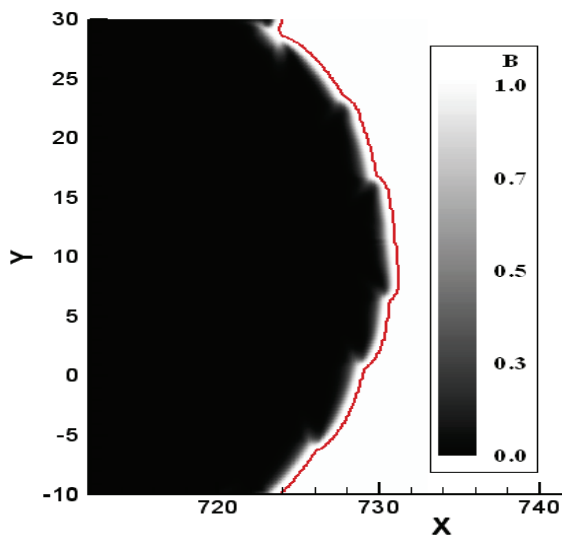




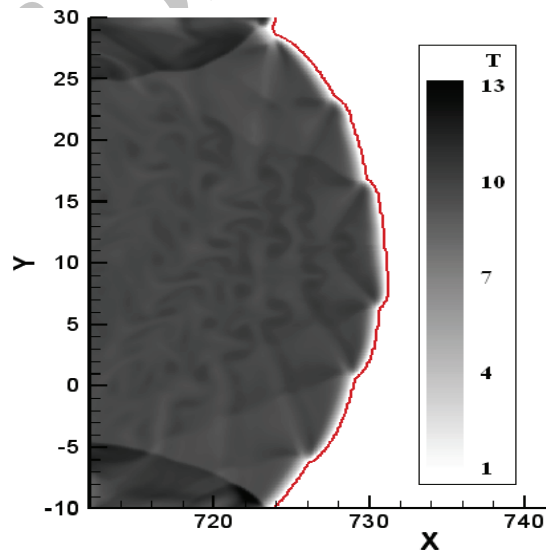
ب) کانتورهای چگالی



الف) کانتورهای فشار

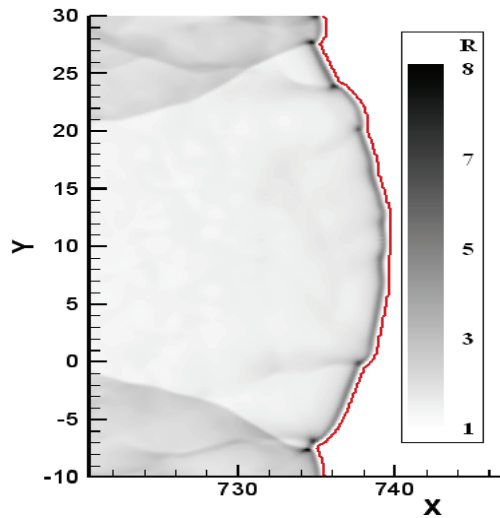


د) کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش

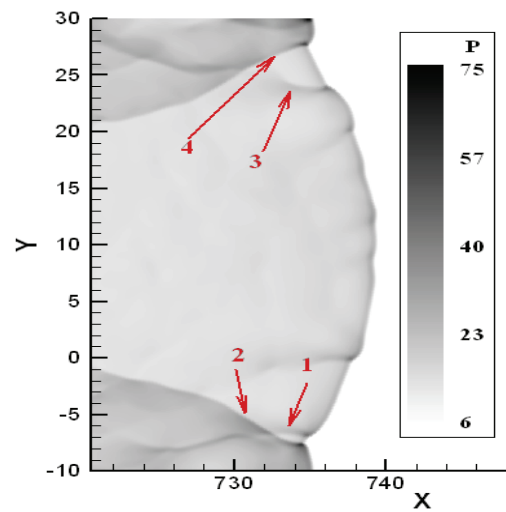


ج) کانتورهای دما

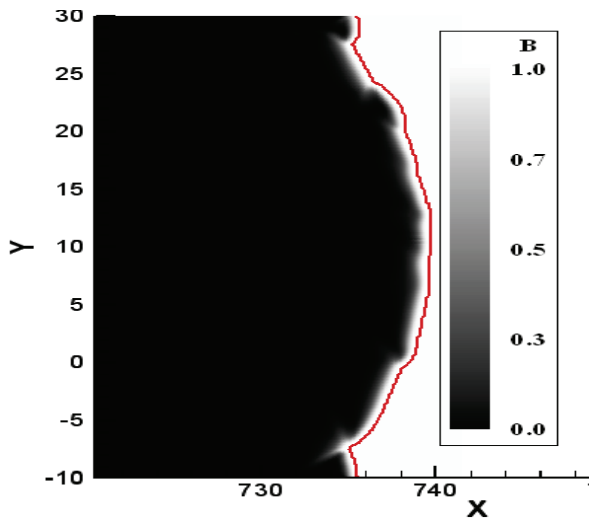
شکل ۶- انکسار تراک در کانال هنگام ورود جبهه تراک به کانال با پهنای بزرگ‌تر، جبهه تراک در موقعیت حدود  $x = 731$  (خطوط قرمز رنگ معرف جبهه تراک می‌باشند).



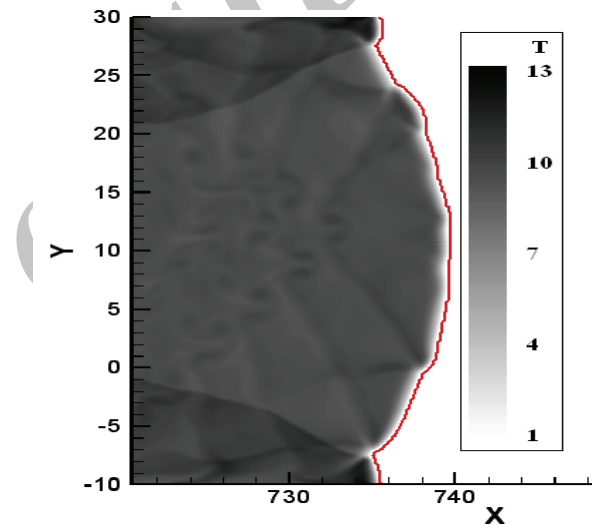
ب) کانتورهای چگالی



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 بزرگ تر، جبهه تراک در موقعیت حدود  $x=740$  (خطوط قرمز رنگ معرف جبهه تراک می باشند)

## ۶- نتیجه گیری

دیواره های کانال بزرگ تر به صورت موفقیت آمیز در کانال با پهنای بیشتر منتشر شده است. برخورد نقاط سه گانه و امواج عرضی با دیواره های کانال بزرگ تر، 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 سه گانه مجاور خود، تقویت و باعث ایجاد نقاط سه گانه جدید و در نتیجه تقویت تراک شده اند.

شبیه سازی عددی دوبعدی انکسار تراک از کانالی کوچک به کانالی با پهنای بزرگ تر برای مخلوطی با مشخصات  $E_a/RT = 15, Q/RT = 50, \gamma = 1.2$  به دست آمده در مقاله حاضر، می توان بیان نمود که در کانال و مخلوط گازی در نظر 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 به وجود نیامده و تراک پس از تقویت به خاطر برخورد نقاط سه گانه و امواج عرضی به

- [11] Mach, P.; Radulescu, M. I. "Mach Reflection Bifurcation as a Mechanism of Cell Multiplication in Gaseous Detonations."; Proceedings of the Combustion Institute 2011, 33, 2279-2285.
- [۱۲] سبزویشانی، مجید و مظاهری، کیومرث "بررسی تشکیل جت پرسرعت در تراک‌های گازی و تأثیر آن روی جبهه تراک" نشریه مواد پراثرژی، 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.
- [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.

Archive