

## بررسی تشکیل جت پرسرعت در تراک های گازی و تأثیر آن روی جبهه تراک

مجید سبزویشانی<sup>۱</sup> و کیومرث مظاهری<sup>۲\*</sup>

۱- دانشگاه کاشان- دانشکده مهندسی - گروه مهندسی مکانیک

۲- تهران- دانشگاه تربیت مدرس- دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی مکانیک

### چکیده

یکی از پدیده های قابل توجه در تراک های گازی، تشکیل جت جریان با سرعت بالا از محصولات انفجار و تأثیر آن روی جبهه تراک می باشد. در این مقاله با استفاده از روش عددی با دقت درجه دو، به همراه الگوریتم های تطبیق شبکه و تعقیب جبهه شاک، به شبیه سازی دوبعدی تراک در مخلوط گازی پرداخته شده است. مدل سینتیکی بکار رفته، مدل یک مرحله ای آرنیوسی است. آغازش تراک با استفاده از شرایط اولیه مدل موج انفجار صفحه ای انجام گرفته است. با پیشروی موج ایجاد شده در ماده نسوخته و تقویت اغتشاشات عرضی، جبهه تراک دو بعدی (شامل نقاط سه گانه، امواج عرضی، موج ضربه ای برخوردی، و موج اصلی ماخ) در کانال شکل گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می دهند که برخورد دو موج عرضی و نقاط سه گانه متناظر آنها با یکدیگر و یا یک نقطه سه گانه یا دیوار، باعث ایجاد یک جریان با سرعت زیاد از محصولات می گردد. تأثیر جت جریان ایجاد شده روی تغییر شکل امواج ضربه ای پیشرو و افزایش اختلاط ماده نسوخته و محصولات در جبهه تراک بررسی شده است.

واژه های کلیدی: تراک گازی، شبیه سازی دوبعدی، جت پرسرعت، امواج عرضی

### ۱. مقدمه

در حالت کلی یک مخلوط قابل احتراق به دو گونه حدی شعله آرام<sup>۱</sup> و تراک<sup>۲</sup> می تواند بسوزد. شعله آرام همان سوختن معمولی است که در آن موج احتراقی سرعتی زیر صوت دارد و رادیکالهای حاصل از احتراق و گرمای ایجاد

شده می توانند به ناحیه مواد نسوخته نفوذ کنند. سرعت این امواج از مرتبه متر بر ثانیه بوده و تغییر فشار در آنها ناچیز می باشد. گونه حدی دیگر، موج تراک است که در آن سرعت موج احتراقی بیش از سرعت صوت است. سرعت امواج تراک در مخلوط های گازی حدود ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر بر ثانیه می باشد. این امواج باعث افزایش ۱۵ تا ۲۰ برابری فشار مخلوط اولیه می گردند. بین این دو گونه حدی، طیف وسیعی از امواج احتراقی وجود دارند که در آنها

1- Laminar Deflagration  
2- Detonation  
\* E-mail: kuimars@modares.ac.ir

توربولانس نقش اساسی را دارد. موضوع این مقاله بررسی یک پدیده موجود در تراک که جت پرسرعت<sup>۱</sup> نامیده شده است می باشد.

مطالعات زیادی در زمینه تراک بصورت تجربی، تحلیلی و عددی انجام شده است. اولین نظریه در مورد تراک توسط چاپمن و جوگت<sup>۲</sup> ارائه شد و به تئوری CJ مشهور گردید [۱]. در این تئوری علاوه بر فرض دائم بودن، ضخامت موج تراک (ضخامت ناحیه واکنش) نیز ناچیز فرض می شد. اما نتایج تجربی نشان داده اند که تراک یک پدیده بشدت سه بعدی و وابسته به زمان است. بنابراین فرضیه CJ برای بررسی تراک کافی نیست. شکل (۱-الف) سایه نگار لیزری از جبهه تراک را نشان می دهد [۲]. با توجه به این شکل پیچیده بودن ساختار جبهه تراک مشخص است.

جبهه تراک شامل سه موج ضربه ای متمایز است. شکل (۲) طرحواره ساختار جبهه تراک را نشان می دهد. این جبهه شامل سه موج ضربه ای اساسی است. یک موج ضربه ای قوی که موج اصلی ماخ<sup>۳</sup> نام دارد و در جهت انتشار تراک حرکت می کند. یک موج ضربه ای ضعیف تر که موج ضربه ای برخوردی<sup>۴</sup> نام دارد و مشابه موج اصلی ماخ، در جهت انتشار تراک حرکت می کند. این دو موج ضربه ای، موج های پیشرو در جبهه تراک نامیده شده اند (شکل ۲). موج سوم که یک موج ضعیف تر نسبت به دو موج قبلی است، موج عرضی<sup>۵</sup> می باشد. موج عرضی برخلاف موج های پیشرو، در جهت عمود بر انتشار تراک حرکت می کند. محل برخورد سه موج تشکیل دهنده جبهه تراک نقطه سه گانه<sup>۶</sup> نامیده می شود. اثر نقطه سه گانه روی فویل دوده اندود شده دیواره کانال، ساختار سلولی تراک را بوجود می آورد. نمونه ای از این اثر در شکل (۱-ب) بصورت شماتیک و در شکل (۱-ج) بصورت واقعی نشان داده شده است.

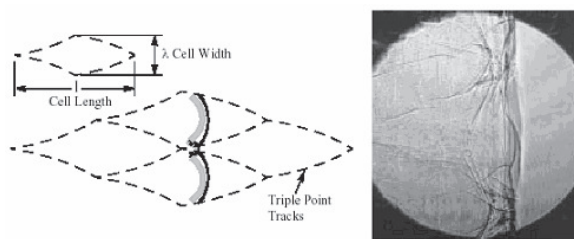
در جبهه تراکهای گازی، هنگامی که دو نقطه سه گانه به یکدیگر (و یا یک نقطه سه گانه به دیوار) برخورد می کنند، یک ناحیه پرفشار و با سرعت بالا شکل می گیرد و اصطلاحاً یک انفجار ثانوی ایجاد می گردد. تشکیل ناحیه پرسرعت در نتایج تجربی مرجع [۲] مورد اشاره قرار گرفته است. شکل (۳) نمونه ای از نتایج تجربی و جت پرسرعت ایجاد شده را نشان می دهد [۲]. جبهه تراک نشان داده شده در این شکل، اندکی بعد از برخورد دو نقطه سه گانه با یکدیگر است. در بسیاری از موارد بررسی تراک تنها به کمک نتایج تجربی امکان پذیر نمی باشد. استفاده از شبیه سازی عددی تراک بر اساس

- 1- High Velocity Jet
- 2- Chapman and Jouguet
- 3- Mach Stem
- 4- Incident Shock
- 5- Transverse Wave
- 6- Triple Point

فرضیات ساده کننده می تواند کمک بسیاری به روشن ساختن فرایندهای موجود در تراک نماید. از جمله مهمترین شبیه سازی های دوبعدی تراک، می توان به کار بوریوکس<sup>۷</sup> [۳] اشاره کرد. بوریوکس با استفاده از مدل سینتیکی یک مرحله ای، به شبیه سازی دوبعدی تراک پرداخت و ساختار سلولی تراک را بدست آورد. با اینحال درنتایج بوریوکس، جت پرسرعت مورد اشاره مطالعه نشده است. در تحقیقی دیگر شارب<sup>۸</sup> به مطالعه امواج عرضی قوی در تراک پرداخت و با استفاده از یک وضوح مناسب، ساختار موج عرضی قوی را شبیه سازی نمود [۴]. در نتایج ارائه شده توسط شارب<sup>۹</sup> [۴] و همچنین شارب و فال<sup>۱۰</sup> [۵]، جت پرسرعت محصولات دیده شده است. شارب و فال، ایجاد جت پرسرعت را بخاطر انفجارهای موضعی در بسته های نسوخته دانسته اند اما بررسی کاملی روی این پدیده انجام ندادند. گمزو و همکاران<sup>۱۱</sup> با مدل سینتیکی یک مرحله ای، به بررسی تراک با انرژیهای فعال سازی مختلف پرداختند. در بررسی آنها بدون آنکه اثرات جت پرسرعت روی موجهای ضربه ای پیشرو در جبهه تراک مورد توجه قرار گیرد، تنها به وجود آن اشاره شده است [۶]. هو و همکاران<sup>۱۱</sup> به شبیه سازی ساختار سلولی تراک در مخلوط اکسیژن- هیدروژن- آرگون با مدل سینتیکی کامل پرداختند. آنها در شبیه سازی خود که با وضوح ۴۴۰ سلول محاسباتی در hrl (طول نیمه واکنش) انجام گرفت، توانستند در این مخلوط تراک قوی و با دو نقطه سه گانه را مشاهده کرده و ساختار دقیق تری از جبهه تراک ارائه نمایند [۷]. در نتایج آنها نیز جت پرسرعت شبیه سازی شده ولی تأثیر آن روی موجهای ضربه ای پیشرو بررسی نشده است.

در این مقاله انتشار تراک در کانال شبیه سازی شده و چگونگی تشکیل جت جریان پرسرعت و اثر آن روی جبهه تراک، مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا در بخش دوم، معادلات اساسی حاکم بر پدیده تراک ارائه می شود. در بخش سوم روش عددی بکار برده شده بطور مختصر مورد بررسی قرار می گیرد. در بخش چهارم شرایط مرزی و اولیه برای شبیه سازی عددی توضیح داده می شوند. در بخش پنجم نتایج شبیه سازی انتشار تراک در کانال دو بعدی ارائه شده و اثر جت پرسرعت روی جبهه تراک مورد بررسی قرار می گیرد. در انتها و در بخش ششم، نتیجه گیری نهایی مقاله ارائه می گردد.

- 7- Bourlioux
- 8- Sharpe
- 9- Sharpe and Falle
- 10- Gamezo et. al.
- 11- Hu et. al.



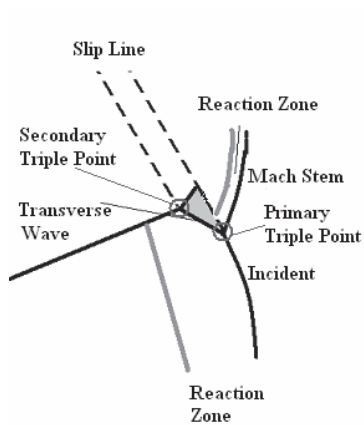
(ب) شماتیک ساختار سلولی

(الف) سایه نگار لیزری از جبهه تراک

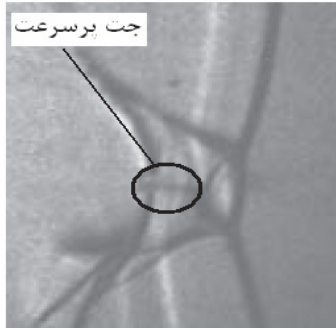


(ج) ساختار سلولی روی یک فویل دوده اندود شده

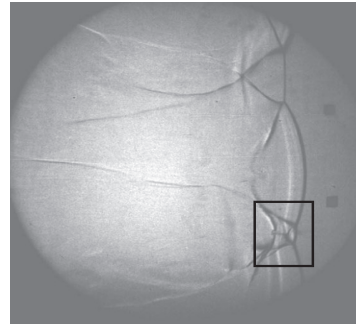
شکل ۱- نمونه ای از ساختار سلولی در تراکهای گازی (طرحواره و واقعی) [۲]



شکل ۲- طرحواره ساختار تراک با دو نقطه سه گانه (جهت حرکت جبهه تراک از سمت چپ به راست می باشد)



(ب)



(الف)

شکل ۲- نمونه ای از جت پرسرعت ایجاد شده در نتایج تجربی، سایه نگار از چپه تراک در مخلوط گازی  $H_2-O_2-17Ar$  [۲]

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \\ \rho \beta \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho u E + u p \\ \rho u \beta \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho v E + vp \\ \rho v \beta \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \rho W \end{bmatrix}$$

تعریف شده‌اند.  $S$  نماینده عبارت چشمه ناشی از احتراق و  $p$ ،  $u$  و  $v$  به ترتیب فشار، چگالی و مولفه های سرعت ذره نسبت به یک دستگاه ساکن می باشند. اندیسهای  $x$  و  $y$  به ترتیب نشان دهنده مشتق نسبت به زمان، جهت  $x$  و جهت  $y$  محورهای مختصات دکارتی میباشند. در این معادله  $E$  انرژی داخلی کل بر واحد جرم است که بصورت زیر تعریف می شود:

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

$\gamma$  نسبت گرمای ویژه و  $Q$  گرمای آزاد شده از واکنش شیمیایی می باشد.

## ۲. معادلات حاکم

مدل کردن ساختار غیرخطی تراک، با استفاده از معادلات اساسی حاکم بر جریان که شامل معادله بقای جرم، بقای مومنتم، بقای انرژی و معادلات واکنش شیمیایی می باشد صورت می گیرد. برای مدل کردن تراک واقعی، باید معادلات اساسی بصورت کامل در نظر گرفته شوند. اما به دلیل مشکلاتی مانند عدم تکافوی سرعت و حافظه رایانه ها و مشخص نبودن سینتیک کامل واکنش های شیمیایی، لازم است که چند فرض اساسی برای ساده سازی معادلات حاکم اعمال گردد.

اولین فرض، دو بعدی بودن تحلیل است. تراک واقعی ساختاری پیچیده و سه بعدی دارد. لذا در صورتی که هدف مدل سازی تراک واقعی باشد، تحلیل باید سه بعدی باشد. اما بخاطر مشکلات موجود سخت افزاری، شبیه سازی بصورت دوبعدی انجام می گیرد. این فرض تأثیری روی تشکیل و یا عدم تشکیل پدیده مورد نظر (جت پرسرعت) ندارد. دومین فرض، صرفنظر کردن از اثرات نفوذ است. از نظر زمانی پدیده نفوذ بسیار کندتر از فرایندهای مطرح در تراک است. با این فرضیات، معادلات کامل ناویر- استوکس به معادلات اولر واکنشی تبدیل می شوند:

$$U_t + F(U)_x + G(U)_y = S \quad (1)$$

که در آن بردارهای  $F$ ،  $G$  و  $S$  بصورت

فرض بعدی استفاده از مدل مناسب سینتیک شیمیایی است. در این مقاله از مدل سینتیکی یک مرحله‌ای آرتیوسی استفاده شده است:

$$W = -k\beta \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (2)$$

که در آن  $E_a$  انرژی اکتیواسیون،  $T$  دما،  $R$  ثابت گازها و  $k$  ثابت واکنش می‌باشد.

فرض چهارم 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 می‌باشد [۱].

$$p = \rho RT \quad (4)$$

معادلات اساسی و همچنین معادله حالت گاز ایده‌آل بصورت بی‌بعد در نظر گرفته شده‌اند. برای اینکار متغیرهای وابسته با توجه به خواص مخلوط نسوخته بی‌بعد شده‌اند. فشار با  $p/p_0$  و چگالی با  $\rho/\rho_0$  بی‌بعد شده‌اند. برای سرعت، سرعت صوت  $C_0$  در مخلوط نسوخته به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است. متغیرهای مکانی میدان با طول نیمه واکنش برای مخلوط اولیه با خواص  $Q/RT_0 = 25$  و  $E_a/RT_0 = 25$  بی‌بعد شده‌اند. زمان مشخصه بصورت نسبت طول مشخصه نیمه واکنش (hrl) به سرعت صوت  $C_0$  در مخلوط نسوخته تعریف شده است.

### ۳. روش عددی

روش عددی مورد استفاده برای شبیه‌سازی تراک، یک روش بالا دستی<sup>۲</sup> و با دقت مرتبه دو است که بطور خاص برای شبیه‌سازی مسائلی که در آنها امواج ضربه‌ای نقش اساسی را ایفا می‌کنند توسعه داده شده است [۸]. در این روش که اصطلاحاً روش پیوسته<sup>۳</sup> نامیده می‌شود، محاسبه فلاکسهای عددی روی اضلاع سلولهای شبکه بصورت همزمان انجام می‌گردد. مزیت اصلی این روش تصحیح شارهای عددی روی اضلاع سلول های شبکه محاسباتی با در نظر گرفتن تغییرات میدان جریان در هر دو جهت مختصات می‌باشد. در این روش برای بالا بردن دقت در ناپیوستگی های میدان حل مثل امواج ضربه‌ای، از حل مسئله ریمن روی مرزهای سلولهای محاسباتی استفاده می‌گردد. با توجه به طبیعت غیردائم معادلات اساسی، از روش

جداسازی زمانی<sup>۵</sup> و برای کاهش هزینه محاسباتی از روش تطبیق شبکه استفاده شده است [۹]. برای این کار ابتدا موقعیت جبهه تراک مشخص گردیده است. الگوریتم بدست آوردن موقعیت جبهه تراک در هر لحظه در مراجع [۱۰ و ۱۱] توضیح داده شده است. در محدوده موقعیت جبهه تراک، که تغییرات زیادی در خواص جریان بوجود می‌آید، شبکه سلولهای محاسباتی ریز قرار داده می‌شود.

بر اساس روش بیان شده، یک برنامه کامپیوتری با زبان فرترن نوشته شده است. صحت عملکرد این کد برای چند جریان گازی بدون واکنش شیمیایی به اثبات رسیده است [۱۲]. همچنین شبیه‌سازی تراک گازی (شکل‌گیری و انتشار آن) در یک کانال با کد توسعه داده شده مورد بررسی قرار گرفته است [۱۰ و ۱۱].

### ۴. شرایط مرزی و اولیه

مدل در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی انتشار تراک در کانال دوبعدی، بطور شماتیک در شکل (۳) نشان داده شده است. جهت انتشار تراک از سمت چپ کانال به سمت راست می‌باشد. برای مخلوط نسوخته اولیه مشخصات  $Q/RT_0 = 20$  و  $E_a/RT_0 = 20$  در نظر گرفته شده است. برای تمام مرزهای کانال از شرط مرزی دیواره انعکاسی استفاده می‌شود.

برای آغاز مستقیم تراک، از پروفیل موج انفجار<sup>۴</sup> یک بعدی که در ابتدای کانال (در سمت چپ) قرار داده شده استفاده گردیده است. برای تسریع در شکل‌گیری ساختار دوبعدی تراک، در جلوی موج انفجار اولیه، اغتشاشی در چگالی بصورت رابطه زیر به چگالی اولیه ماده نسوخته اضافه شده است [۴ و ۵].

$$\rho' = \begin{cases} 0 & x < 5.0 \\ 0.25[1 + \cos(\pi y/L)] \sin(\pi(1-x)), & 5.0 \leq x \leq 6.0 \\ 0 & x > 6.0 \end{cases} \quad (5)$$

در رابطه فوق  $L$  پهنای کانال بوده و  $x$  از ابتدای کانال اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به اینکه شارپ [۵] حداقل ابعاد سلولهای محاسباتی شبکه را ۲۰ سلول در hrl دانسته است، در شبیه‌سازی حاضر از ۲۲ سلول محاسباتی در hrl و در هر دو جهت مختصات استفاده شده است.

5- Time Splitting  
6- Blast Wave

۱- فاصله مکانی از ناحیه واکنش از جبهه شاک که در آن نصف مواد اولیه گازی سوخته باشد.

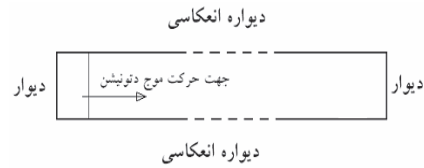
2- Half Reaction Length  
3- Upwind  
4- Unsplit

برای مخلوط اولیه با خواص  $Q/RT_0 = 50$  و  $E_0/RT_0 = 25$  بی بعد شده‌اند. به عبارتی واحد طول در همه نتایج حاضر، طول نیمه واکنش مخلوط اولیه با خواص  $Q/RT_0 = 50$  و  $E_0/RT_0 = 25$  می باشد. در نهایت تأثیر جت روی جبهه تراک مورد بحث قرار می‌گیرد.

#### ۵.۱. شکل گرفتن جبهه تراک و ساختار سلولی

نتایج عددی نشان می‌دهند که اغتشاش اولیه، تأثیر ناچیزی روی رفتار جبهه تراک دارد. کانتورهای فشار که در شکل (۵-الف) داده شده است، نشان می‌دهند که پس از انتشار تراک تا فاصله  $x=32$ ، هنوز جبهه تراک تقریباً یک بعدی است. با انتشار جبهه تراک، اغتشاش ایجاد شده تقویت شده و جبهه تراک از یکنواختی اولیه فاصله می‌گیرد. با انتشار بیشتر تراک در کانال دوبعدی، امواج عرضی، امواج ضربه ای برخوردی، موج ماخ اصلی و نقاط سه‌گانه شکل می‌گیرند (شکل ۵-ب).

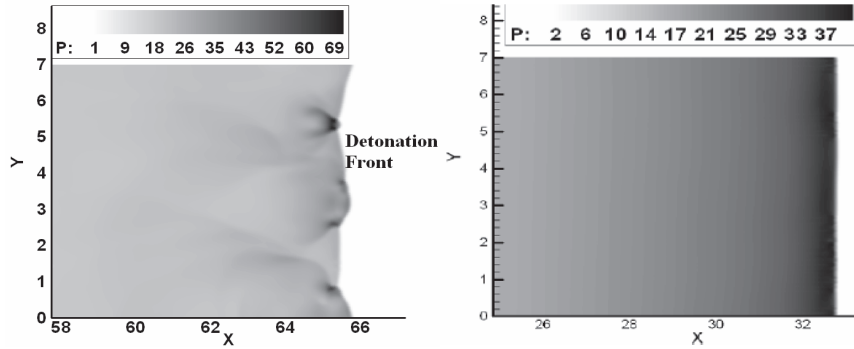
پس از ایجاد ناپایداری در جبهه تراک و شکل‌گیری اولیه نقاط سه‌گانه و امواج ضربه ای، امواج تشکیل دهنده جبهه تراک مستقل از شرایط آغازش تراک می‌گردند. شکل (۶) جبهه تراک را در موقعیت  $x=844$  نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌گردد که امواج ضربه ای جبهه تراک، شامل موج اصلی ماخ، موج ضربه ای برخوردی و موج عرضی تشکیل شده اند. موج اصلی ماخ در وسط کانال و دو موج ضربه ای برخوردی در مجاورت مرزهای بالا و پائین تشکیل شده اند. ساختار بدست آمده در جبهه تراک حاضر از نوع ساختار دارای دو نقطه سه‌گانه (نقاط سه‌گانه اول و دوم) می باشد. این نوع ساختار به تراک های قوی متناسب شده اند [۱].



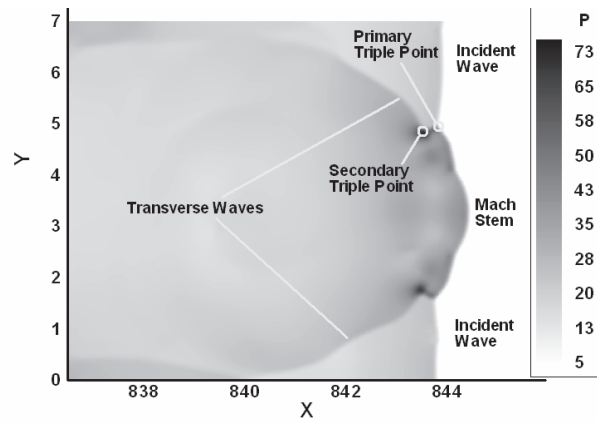
شکل ۴- شماتیک مدل هندسی کانال

#### ۵. نتایج و بحث

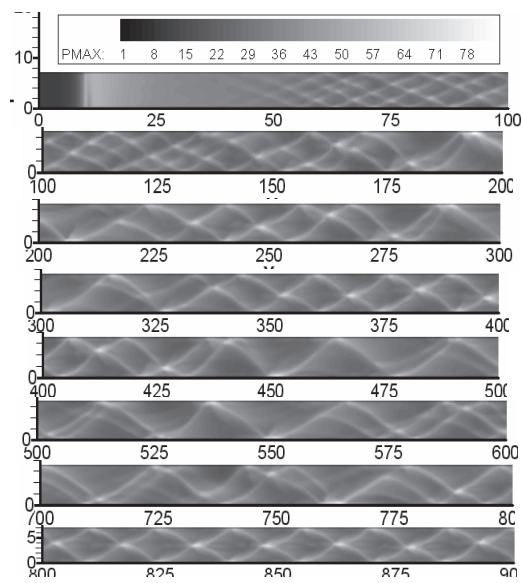
برای مخلوط نوسخته اولیه مشخصات  $Q/RT_0 = 50$  و  $E_0/RT_0 = 20$  در نظر گرفته شده است. در شبیه سازی های انجام شده برای مخلوط های اولیه با مشخصات متفاوت از مخلوط فوق نیز پدیده تشکیل جت پرسرعت مشاهده شده است. بنابراین در این مقاله تنها نتایج مخلوط اولیه ذکر شده ارائه می‌گردند. برای مخلوط در نظر گرفته شده شبیه‌سازیهای یک‌بعدی و همچنین تحلیل پایداری خطی، تراک یک بعدی را پایدار پیش‌بینی می‌کند [۱۳]. اما در شبیه سازیهای دوبعدی، رفتار تراک کاملاً متفاوت است. در این بخش ابتدا شکل گیری جبهه تراک و ساختار آن در یک کانال و سپس چگونگی تشکیل پدیده جت پرسرعت نشان داده می‌شود. با توجه به اینکه تشکیل پدیده جت پرسرعت مستقل از پهنای کانال است (مشروط به اینکه پهنای کانال از طول مشخصه سلول تراک کمتر نباشد و یا حداقل یک موج عرضی در جبهه تراک تشکیل گردد) پهنای کانال ۷ در نظر گرفته شده است. لازم به یادآوری است متغیرهای مکانی میدان، با طول نیمه واکنش



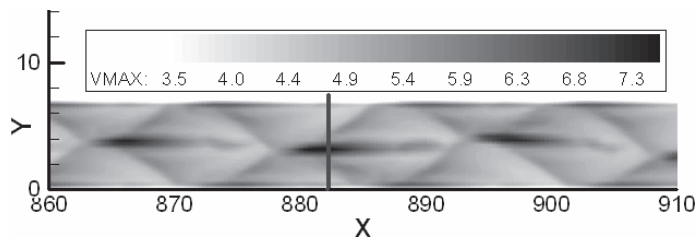
شکل ۵- کانتورهای فشار در موقعیت‌های ابتدایی جبهه تراک، کانال با پهنای ۷، مخلوط گازی با مشخصات  $Q/RT_0 = 50$ ،  $E_0/RT_0 = 20$  و  $\gamma = 1.2$ . جهت انتشار تراک از سمت چپ به سمت راست می باشد.



شکل ۶- جبهه تراک و موج‌های تشکیل دهنده آن، کانال با پهنای ۷، مخلوط گازی با مشخصات  $E_a/RT_0 = 20$ ،  $Q/RT_0 = 50$  و  $\gamma = 1/2$ . جهت انتشار تراک از سمت چپ به سمت راست می‌باشد.



شکل ۷- ساختار سلول‌های بر اساس تاریخچه فشار ماکزیمم، کانال با پهنای ۷، مخلوط گازی با مشخصات  $E_a/RT_0 = 20$ ،  $Q/RT_0 = 50$  و  $\gamma = 1/2$ .



شکل ۸- ساختار سلولی با استفاده از تاریخچه سرعت ماکزیمم، کانال با پهنای ۷، مخلوط گازی با مشخصات  $Q/RT_0 = 50$ ،  $E_a/RT_0 = 20$ ، و  $\gamma = 1/2$  (خط عمودی توپر نشان دهنده موقعیت جبهه تراک نشان داده در شکل های ۹ است)

تا [۷]، جت پرسرعت مشاهده شده است. اما تأثیر این جت روی جبهه تراک و شاک پیشرو تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است. در این بخش چگونگی ایجاد جت پرسرعت و تأثیر آن روی جبهه تراک مورد بررسی قرار می گیرد. برای بررسی این پدیده، انتشار تراک در کانال با پهنای ۷ در نظر گرفته شده است. شکل (۸) ساختار سلولی در محدوده مکانی ۸۶۰ تا ۹۱۰ کانال، که بر اساس تاریخچه سرعت پیشینه در هر سلول محاسباتی بدست آمده است را نشان می دهد. در موقعیت  $x=880$  دو نقطه سه گانه با یکدیگر برخورد نموده اند. بعد از این موقعیت، دو نقطه سه گانه جدید بوجود آمده است که در حال دور شدن از یکدیگر می باشند. محل برخورد این دو نقطه، ابتدای سلول جدید است. این سلول تقریباً تا  $x=894$  امتداد یافته است. در محل برخورد دو نقطه سه گانه، یک جت جریان با سرعت بالا بوجود آمده است. جت های ایجاد شده در ابتدای هر ساختار سلولی تراک، بصورت یک ناحیه پرسرعت یا رنگ تیره و در محدوده خط مرکزی کانال مشخص می باشند. در شکل های (۹-الف) تا (۹-د)، ساختار جبهه تراک در موقعیت تقریبی  $x=882$  که کمی بعد از محل برخورد دو نقطه سه گانه است، نشان داده شده است. شکل (۹-الف) کانتورهای فشار جبهه تراک در موقعیت مشخص شده را نشان می دهد. در ناحیه موج ضربه ای اصلی ماخ (بین دو نقطه سه گانه  $T1$  و  $T2$ ) حداقل سه تغییر شکل (نقاط  $A$ ،  $B1$  و  $B2$ ) قابل مشاهده است. این تغییر شکل ها بخاطر برخورد جت پرسرعت ایجاد شده در هنگام برخورد دو نقطه سه گانه در چند لحظه قبل (هنگامیکه جبهه تراک در موقعیت تقریبی  $x=880$  قرار دارد) می باشد. مشابه نتایج حاضر، نتایج شبیه سازی شارپ نیز این تغییر شکل های ناشی از ناحیه پرسرعت را پس از برخورد یک نقطه سه گانه با دیوار نشان داده اند [۴].

شکل (۹-ب) کانتورهای دما را نشان می دهد. نواحی روشن تر در این شکل، مشخص کننده دمای کمتر می باشند. با مقایسه موقعیت این نواحی با

یکی از مشخصه های مهم ناپایداری تراک های واقعی، ساختار سلولی تشکیل شده روی فویل دوده اندود می باشد. دلیل ایجاد این ساختار سلولی را اثر نقطه سه گانه دانسته اند [۱]. برای پیش بینی ساختار سلولی توسط شبیه سازی عددی، از تاریخچه فشار پیشینه استفاده شده است. شکل (۷) تاریخچه فشار بیشینه در کانال را نشان می دهد. با توجه به اینکه در نقطه سه گانه بیشترین فشار موجود در جبهه تراک ایجاد می گردد، مکان هایی از کانال که نقاط سه گانه از آنها عبور کرده اند دارای فشار بیشتری نسبت به بقیه مکانهای کانال می باشد. در نتیجه ساختار سلولی تراک مشابه آنچه که در فویل دوده اندود نتایج تجربی دیده شده است، در شکل (۷) تشکیل شده است.

در شکل (۷) مشاهده می گردد که ساختار سلولی تقریباً در  $x=45$  شروع به تشکیل شدن کرده است. در ابتدا و تا فاصله  $x=60$ ، سلول در پهنای کانال تشکیل شده است. ساختار سلولی بدست آمده نشان می دهد که تا موقعیت تقریبی  $x=200$ ، جبهه تراک متأثر از شرایط آغاز تراک در ابتدای کانال می باشد. در ادامه ساختار سلولی نامنظم شده تا اینکه از حدود  $x=800$  به بعد یک سلول در پهنای کانال ایجاد شده است. البته در صورت ادامه شبیه سازی تا موقعیت های مکانی دورتر، امکان نامنظم شدن دوباره ساختار سلولی وجود دارد. این نکته در نتایج تجربی نیز دیده شده است [۲]. دو ضلع ابتدای سلولهای تشکیل شده، مقعر شکل و دو ضلع انتهایی آن محدب شکل می باشند. این مطلب در توافق کیفی با ساختارهای سلولی بدست آمده توسط نتایج تجربی می باشد.

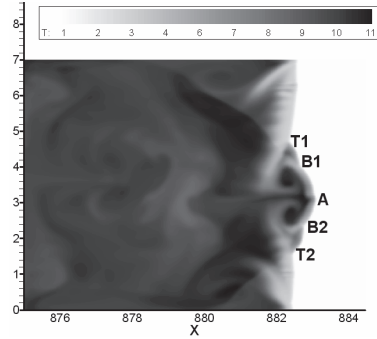
## ۲.۵ جت پرسرعت

یکی از پدیده های موجود در تراک های گازی، جت با سرعت بالا می باشد. در شبیه سازیهای عددی که تاکنون انجام شده است (از جمله در مراجع [۴])

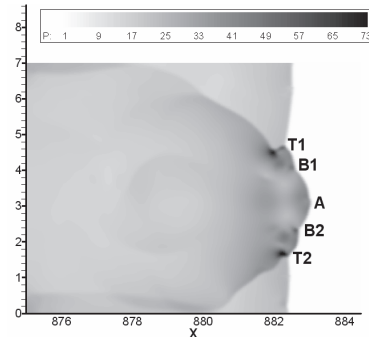


است، برخورد کرده و باعث تغییر شکل جبهه تراک شده است. از طرفی جت جریان داغ ایجاد شده از محصولات، به قسمتی از نواحی روشن (که بیانگر وجود مقداری ماده نسوخته است) نیز برخورد کرده و باعث اختلاط بیشتر محصولات و مواد نسوخته اولیه شده است. این موضوع در شکل (۹-ج) که کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش در جبهه تراک را نشان می‌دهد نیز مشخص می‌باشد.

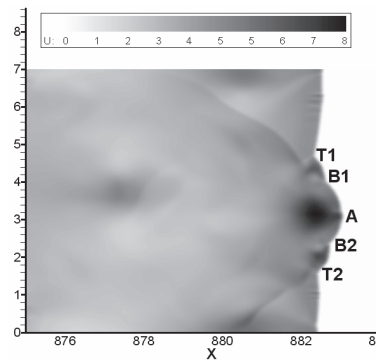
کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش در شکل (۹-ج)، مشخص می‌گردد که در نواحی روشن و با دمای نسبی کم، مقداری مواد نسوخته گازی وجود دارد. به عبارتی این نواحی مربوط به ناحیه واکنش پشت امواج ضربه‌ای و یا بسته‌های نسوخته ایجاد شده می‌باشند. در نواحی تیره که دمای بالاتری دارند، محصولات احتراقی قرار دارند. شکل (۹-ب) به وضوح نشان می‌دهد که جت جریان داغ از محصولات به موج ضربه ای پیشرو که در اینجا موج اصلی ماخ



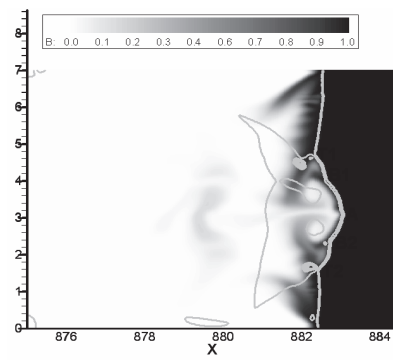
ب) کانتورهای دما



الف) کانتورهای فشار



د) کانتورهای سرعت



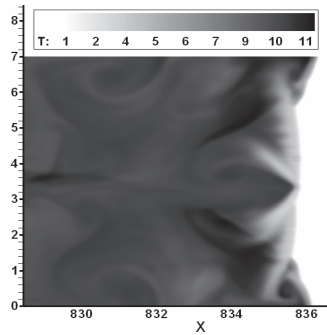
ج) کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش

(خطوط توپر کانتورهای فشار هستند که بیان گر جبهه شاک پیشرو می‌باشند)

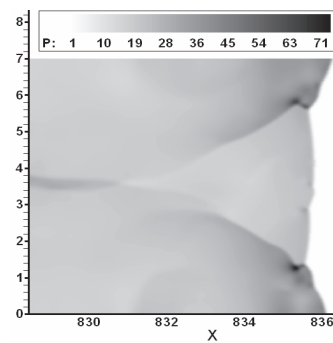
شکل ۱۰- ساختار و کانتورهای خواص جبهه تراک در موقعیت  $x=882$  از کانال با پهنای ۷، مخلوط گازی با مشخصات  $50 = Q/RT_0$  و  $1/2 = \gamma = E_a/RT_0$

(۹-۵) کانتورهای سرعت را نشان می‌دهد. در ناحیه پشت نقطه A بطور واضح یک ناحیه با سرعت بالا که نشان دهنده جت جریان محصولات است دیده می‌شود. این ناحیه پرسرعت دقیقاً منطبق با ناحیه محصولات در کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش است. در صورتیکه جت ایجاد شده به اندازه کافی پرسرعت باشد، حتی می‌تواند به موج ضربه‌ای برخوردی در جلوی خود نیز برخورد کند. در این صورت جت پرسرعت بیش از نصف طول سلول مشخصه (که در ساختار سلولی شکل (۸) نمایان است) را طی کرده است. در شکل (۱۰) نمونه‌ای از برخورد جت پرسرعت به ناحیه واکنش پشت موج ضربه‌ای برخوردی نشان داده شده است.

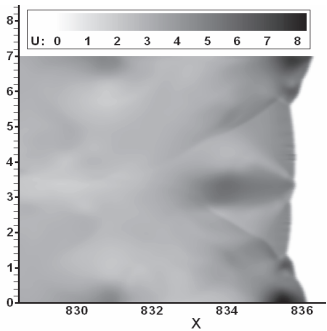
در شکل (۹-ج) موقعیت امواج ضربه‌ای پیشرو (موج اصلی ماخ و موج ضربه‌ای برخوردی) با کانتورهای خطی فشار نشان داده شده است. در حالت کلی، با توجه به قوی‌تر بودن موج اصلی ماخ نسبت به موج ضربه‌ای برخوردی، طول ناحیه واکنش در پشت موج اصلی ماخ کوچکتر از طول ناحیه واکنش در پشت موج ضربه‌ای برخوردی است [۱]. شکل قارچ مانند ایجاد شده در پشت موج اصلی ماخ (که در وسط کانال قرار دارد) بیانگر تأثیر جت پرسرعت محصولات روی ناحیه واکنش پشت موج ضربه‌ای ماخ اصلی می‌باشد. در حقیقت محصولات تراک توسط جت ایجاد شده، از پائین دست جبهه اصلی واکنش به سمت موج ضربه‌ای پیشرو رانده شده است. شکل



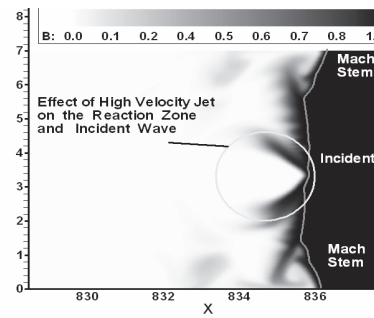
ب) کانتورهای دما



الف) کانتورهای فشار



د) کانتورهای سرعت



ج) کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش

(خطوط توپر کانتورهای فشار هستند که بیان گر جبهه شاک پیشرو می‌باشند)

شکل ۱۰- ساختار و کانتورهای خواص جبهه تراک در موقعیت  $x=836$  از کانال با پهنای ۷. مخلوط گازی با مشخصات  $Q/RT_0 = 50$ ،  $E_0/RT_0 = 20$  و  $\gamma = 1/3$

شکل (۱۰-الف) کانتورهای فشار را نشان می‌دهد. در این شکل ایجاد تغییر شکل در موج ضربه ای برخوردی که در وسط کانال قرار دارد مشاهده می‌گردد. در شکل (۱۰-ب) کانتورهای دما، بیانگر وجود یک ناحیه تیره مثلثی شکل در پشت موج ضربه ای برخوردی است. این مطلب نشان دهنده برخورد جت پرسرعت از محصولات با دمای بالا به ناحیه واکنش موج ضربه ای برخوردی که دمای کمتری دارد می‌باشد. شکل (۱۰-ب) کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش را نشان می‌دهد. در این شکل محدوده تقریبی از جبهه تراک که در اثر جت پرسرعت تغییرشکل یافته است توسط یک دایره نشان داده شده است. شکل (۱۰-د) نیز نشان می‌دهد که در پشت موج ضربه ای برخوردی یک ناحیه با سرعت بالا وجود دارد. این ناحیه در مقایسه با نواحی با سرعت بالای ایجاد شده در پشت امواج اصلی از سرعت کمتری برخوردار هستند. این مطلب نشان می‌دهد که با پیشروی جت پرسرعت، که بعد از برخورد دونقطه سه‌گانه ایجاد می‌شود، از سرعت آن کاسته می‌شود. ایجاد جت جریان از محصولات احتراق، علاوه بر محل برخورد دو نقطه سه‌گانه، در محل برخورد یک نقطه سه‌گانه با دیوار لغزشی نیز مشاهده شده است. تاثیر جت جریان روی جبهه تراک در مجاورت دیوار مشابه تأثیر آن در هنگام برخورد دو نقطه سه‌گانه با یکدیگر است. در شکلهای (۱۰-ج) و (۱۰-د) روی دیوارهای بالا و پایین، تاثیر برخورد جت جریان ایجاد شده (از برخورد نقطه سه‌گانه به دیوار) روی موج ضربه ای پیشرو (که در اینجا موج اصلی ماخ است) دیده می‌شود. در شکل (۱۰-ج)، روی دیوار بالایی دیده می‌شود که محصولات سوخته شده در ناحیه واکنش پشت موج ضربه ای ماخ اصلی نفوذ کرده و روی خود موج ضربه ای نیز تأثیر گذاشته‌اند.

### ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی عددی، فرایندهای تشکیل جت جریان و تاثیر آن روی شاک پیشرو بررسی شده است. رفتار تراک در یک کانال با پهنای مشخص شبیه‌سازی شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که مخلوط اولیه در نظر گرفته شده با مشخصات سینتیکی  $Q/RT_0 = 50$  و  $E_a/RT_0 = 20$  دارای ساختار سلولی نسبتاً نامنظم می‌باشد و تراک ایجاد شده در این مخلوط، از نوع تراک قوی و با دو نقطه سه‌گانه بدست آمد. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده شد که در هنگام برخورد دو نقطه سه‌گانه با یکدیگر و یا یک نقطه سه‌گانه با دیوار، یک جت جریان پرسرعت از محصولات داغ تراک بوجود می‌آید. هرچند که ایجاد این جت پرسرعت از

محصولات در شبیه‌سازی‌های عددی قبلی [۴] تا [۸] گزارش شده است، اما تاکنون به اثر این جت روی موجهای تشکیل دهنده جبهه تراک (موج اصلی ماخ و موج ضربه ای برخوردی) پرداخته نشده بود. نتایج بدست آمده در این مقاله نشان دادند که جریان جت پرسرعت ایجاد شده، می‌تواند بخشی از محصولات داغ احتراق را که در ناحیه کاملاً سوخته شده در پشت امواج ضربه‌ای پیشرو قرار دارند، به سمت امواج ضربه‌ای پیشرو رانده و حتی به آنها برخورد کند. این پدیده حداقل دو تاثیر مهم در جبهه تراک دارد. اول آنکه ناحیه واکنش قرار گرفته در مسیر جت پرسرعت و یا بسته‌های سوخته، بسرعت با محصولات داغ احتراق مخلوط شده و در نتیجه دمای آن افزایش پیدا می‌کند.

گمزو و همکاران (۱۹۹۹) یکی از مکانیزمهای واکنش در بسته‌های سوخته را انتقال جرم و گرما با محصولات داغ اطراف آن ذکر نموده‌اند [۶]. افزایش دما باعث تسریع در نرخ واکنش شیمیایی گردیده و در نهایت موجب تقویت تراک می‌گردد. با توجه به اینکه زمان مشخصه مکانیزمهای نفوذ در پدیده تراک بسیار کمتر از زمان مشخصه تراک است، بنابراین حتی اگر نفوذ و انتقال جرم و گرما به بسته سوخته انجام گیرد، جبهه تراک بسیار دورتر از بسته سوخته شده و انرژی آزاد شده آن نمی‌تواند به جبهه تراک برسد. در نتیجه بنظر می‌رسد که مکانیزم مصرف بسته سوخته توسط پدیده نفوذ که توسط گمزو و همکاران بیان شده است، روی انتشار تراک تأثیری نداشته باشد. اما پدیده برخورد جت پرسرعت به بسته سوخته و خصوصاً به ناحیه واکنش پشت امواج ضربه‌ای پیشرو به عنوان مکانیزمی که باعث اختلاط بیشتر ماده سوخته با محصولات داغ اطراف آن می‌گردد می‌تواند بسیار مهم باشد.

لازم بذکر است که در نظر گرفتن اثرات توربولانسی در مدل برای شبیه‌سازی، می‌تواند به توصیف واقعی‌تر این پدیده خصوصاً در مخلوط‌های با انرژی فعالسازی بالا کمک نماید. دومین تأثیر جت پرسرعت این است که با برخورد به امواج ضربه‌ای های پیشرو، امکان تقویت آنها را در مواقعی که امواج ضربه ای پیشرو تضعیف می‌گردند، بوجود می‌آورد. با توجه به اینکه جت پرسرعت از محصولات داغ تشکیل شده است، افزایش دمای موضعی امواج ضربه‌ای پیشرو توسط جت پرسرعت و داغ، در هنگامیکه موج ضربه‌ای توانایی افزایش دمای کافی جهت ایجاد نرخ واکنش کافی برای خوداتکا بودن تراک را ندارد، می‌تواند تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی آغازش دوباره تراک داشته باشد. به عنوان نتیجه گیری کلی می‌توان جت های پرسرعت را - که به خاطر وجود امواج عرضی و برخورد نقاط سه‌گانه شکل می‌گیرند- یک مکانیزم برای تقویت و انتشار جبهه تراک معرفی نمود.

۷. مراجع

- [1]. Fickett, W. & Davis, W.C., Detonation, University of California Press.(1979).
- [2]. Arienti, M., "A Numerical and Analytical Study of Detonation Diffraction," Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, (2003).
- [3]. Bourlioux, A., "Numerical Studies of Unstable Detonations," Ph.D. Thesis, Department of Applied and Computational Mathematics, Princeton University. (1991).
- [4]. Sharpe, G.J., "Transverse Wave In Numerical Simulations of Cellular Detonation," J. Fluid Mech, Vol. 447, pp. 31-51 (2001).
- [5]. Sharpe, G.J., Falle S.A.E., "Two-Dimensional Numerical Simulations of Idealized Detonations," Proc. R. Soc. Lond., Vol. A 456, pp. 2081-2100 (2000).
- [6]. Gamezo, V.N., Desbordes, D., and Oran E.S., "Formation and Evolution of Two-dimensional Cellular Detonations," Combustion and Flame, Vol. 116, pp. 154-165 (1999).
- [7]. Hu, X.Y., Zhang D.L., "The Cellular Structure of a Two-Dimensional H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Ar Detonation Wave," Combustion Theory and Modeling, Vol. 8, pp. 339-359 (2004).
- [8]. Colella, P., "Multidimensional Upwind Methods for Hyperbolic Conservation Laws," J. Comput. Phys., Vol. 87, pp. 171-200 (1990).
- [9]. Berger, M.J., Colella, P., "Local Adaptive Mesh Refinement for Shock Hydrodynamics," J. Comput. Phys., Vol. 82, pp. 64-84 (1989).
- [۱۰]. سبزویشانی، مجید و مظاهری، کیومرث " بررسی ساختار دوبعدی جبهه دتونیشن گازی و انتشار آن در یک کانال با استفاده از شبیه‌سازی عددی " اولین کنفرانس اختراقی ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، بهمن ۱۳۸۴.
- [11]. Sabzpooshani M, and Mazaheri, K., "Numerical Investigation of Two-Dimensional Gaseous Detonation and its Propagation in a Channel," *Iranian Journal of Energetic Material*, Vol. 1, No. 2, pp. 59-67 (2006).
- [۱۲]. سبزویشانی، مجید و مظاهری، کیومرث " استفاده از یک روش پیوسته برای حل معادلات بقایی در فضای دوبعدی " سیزدهمین کنفرانس سالانه (بین‌المللی) مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اردیبهشت ۱۳۸۴.
- [13]. Mazaheri, K., Mechanism of the Onset of Detonation in Direct Initiation, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, McGill University, Canada ( 1997 ).