

# بررسی ساختار دوبعدی جبهه دتونیشن گازی و انتشار آن در یک کانال با استفاده از شبیه‌سازی عددی

مجید سبزویشانی<sup>۱</sup>، کیومرث مظاهری<sup>۲</sup>

تهران - دانشگاه تربیت مدرس - دانشکده فنی و مهندسی - بخش مهندسی مکانیک  
kiumars@modares.ac.ir

## چکیده

در این مقاله با استفاده از یک روش عددی با دقت درجه دو، به همراه الگوریتم تطبیق شبکه و تعقیب جبهه شاک، به شبیه‌سازی دتونیشن گازی در یک کانال پرداخته شده است. مدل سینتیکی بکار رفته، مدل یک مرحله‌ای آرنیوس است. آغاز دتونیشن با استفاده از مدل موج بلست صفحه‌ای به عنوان یک شرط اولیه انجام گرفته است. سپس این موج بلست یک بعدی، توسط اغتشاشی در چگالی، که در جلوی موج بلست قرار داده شده ناپایدار گردیده است. با انتشار دتونیشن در ماده نسوخته، جبهه دتونیشن دو بعدی در کانال شکل گرفته است. این جبهه که شامل نقاط سه گانه، امواج عرضی، موج وابسته و موج اصلی ماخ است مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین ساختار سلولی که از دنبال کردن مسیر نقاط سه گانه حاصل می‌شود بدست آمده است.

واژه‌های کلیدی: دتونیشن گازی، شبیه‌سازی، دوبعدی، ساختار سلولی.

## ۱- مقدمه

در حالت کلی یک مخلوط قابل احتراق به دو گونه شعله آرام (Laminar Deflagration) و دتونیشن (Detonation) می‌تواند بسوزد. گونه اول که دفلاگریشن یا شعله آرام می‌باشد، همان سوختن معمولی است که در آن موج احتراقی سرعتی زیر صوت دارد و در آن رادیکالهای حاصل از احتراق و نیز گرمای ایجاد شده می‌تواند به ناحیه مواد نسوخته نفوذ کند. گونه دیگر، دتونیشن است که در آن سرعت موج احتراقی بیش از سرعت صوت است و نفوذ گرما و رادیکال به مواد نسوخته امکان پذیر نیست. بین این دو گونه حدی نیز احتراقهایی وجود دارند که در آنها توربولانس نقش اساسی را دارد. به طور کلی دتونیشن یک موج شاک قوی است که با گذشتن از یک محیط قابل احتراق آن را می‌سوزاند. انرژی ناشی از احتراق، شاک را تقویت کرده و مانع از میرا شدن آن می‌گردد. موج دتونیشن در محیط‌های گازی با سرعتی حدود  $2000\text{ m/s}$  حرکت کرده و نسبت فشاری حدود ۲۰ ایجاد می‌نماید. بنابراین دتونیشن در مقایسه با شعله آرام معمولی که سرعتی در مرتبه ۱ متر بر ثانیه دارد تفاوت زیادی را نشان می‌دهد. انتشار دتونیشن به توانایی و قدرت شاک (موج ضربه ای) که مخلوط گازی نسوخته را فشرده میکند بستگی تام دارد. قدرت موج شاک در دتونیشن باید به قدری باشد که افزایش دمایی پشت شاک بتواند موجب واکنش احتراق گردد. مکانیزم این احتراق نیز باید به گونه ای باشد که بتواند موج شاک را تقویت کند. عبارتی نرخ آزاد شدن انرژی توسط واکنش شیمیایی باید به اندازه ای باشد که بر نرخ خنک شدن مخلوط گازی توسط امواج انبساطی ایجاد شده (و علاوه بر آن در صورت وجود دیواره غیر آدیاباتیک، نرخ خنک شدن مخلوط گازی توسط دیواره) غلبه کند. در غیر این صورت دتونیشن میرا می‌شود.

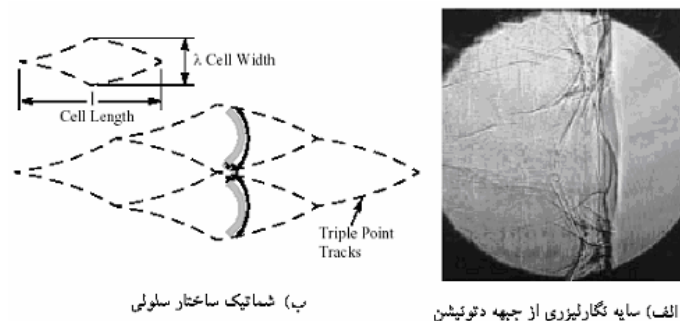
۱- دانشجوی دکترا

۲- دانشیار

برای مطالعه پدیده دتونیشن، لازم است که فرایندهای موجود در آن شناخته شود. با توجه به نتایج بدست آمده توسط محققین مختلف تاکنون، در دتونیشن سه ناحیه نسبتاً مجزا تشخیص داده شده است. یک موج شاک که دما و فشار را به اندازه کافی افزایش می‌دهد، یک ناحیه تاخیر (Induction Zone) که فشار و دما در آن تقریباً ثابت می‌ماند و یک ناحیه واکنش (Reaction Zone) که متعاقب شاک حرکت میکند و در آن واکنشهای شیمیایی گرمازا انجام می‌شود. مشخصه اصلی برای پیشرفت و انتشار موج دتونیشن، کوپل بودن ناحیه واکنش و شاک پیشرو است. عبارتی اگر شاک و ناحیه واکنش از یکدیگر فاصله بگیرند، دتونیشن از بین خواهد رفت.

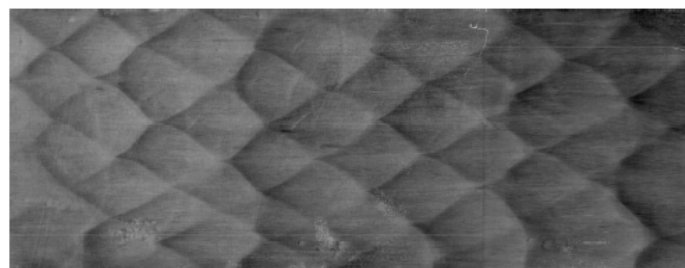
کارهای بسیار زیادی در زمینه دتونیشن چه بصورت تجربی و چه بصورت تحلیلی و عددی انجام شده است. اولین نظریه در مورد دتونیشن توسط چاپمن (Chapman) و جوگت (Jouguet) ارائه شد و به تئوری CJ مشهور گردید [۱]. این تئوری به ساختار خود موج دتونیشن و پارامترهای مربوط به آن نیاز ندارد و فقط به محاسبه پارامترهای ترمودینامیکی و در حال تعادل دتونیشن می‌پردازد. خواص محاسبه شده با این تئوری به خواص CJ یا خواص استاتیکی مشهور است. در این تئوری علاوه بر فرض دائم بودن، ضخامت موج دتونیشن (ضخامت ناحیه واکنش) نیز ناچیز فرض می‌شد. طبق این تئوری جریان در پائین دست موج نسبت به شاک صوتی است و موج دتونیشن نیز با سرعت ثابت CJ حرکت می‌کرد.

بعد از تئوری CJ، نظریه کاملتری ارائه شد که به نظریه ZND مشهور گشت. در این نظریه برخلاف نظریه CJ نرخ واکنش شیمیایی بی‌نهایت نیست. نتایج تجربی نشان داده‌اند که دتونیشن یک پدیده بشدت سه بعدی و وابسته به زمان است. شکل (۱-الف) سایه نگار لیزری از جبهه دتونیشن را نشان می‌دهد [۲]. با توجه به این شکل پیچیده بودن ساختار جبهه دتونیشن مشخص است. بنابراین در بسیاری از موارد فرضیات ساده کننده برای بررسی‌های تحلیلی و یا عددی، باعث حذف بعضی از خواص دتونیشن و یا برداشتهای نادرست می‌گردد. برای مشخص شدن رفتار دتونیشن، تحقیقات بسیاری با روشهای تجربی، عددی و یا تحلیلی انجام شده است. در این تحقیقات بحثهای زیادی روی پدیده دتونیشن و ساختار آن صورت گرفته است ولی هنوز پرسشهایی در این زمینه وجود دارد که بررسی روی آنها ادامه دارد.



ب) شماتیک ساختار سلولی

الف) سایه نگار لیزری از جبهه دتونیشن



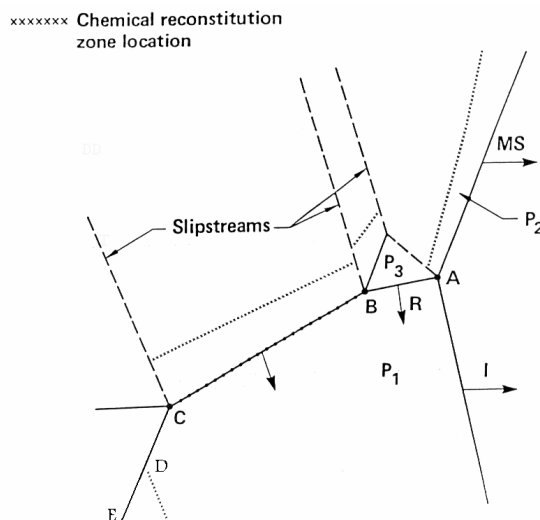
ج) ساختار سلولی روی یک فویل دوده آندود شده

شکل ۱- ساختار سلولی (شماتیک و واقعی) [۲]

از جمله خصوصیات موج دتونیشن، ساختار جبهه دتونیشن است. جبهه دتونیشن شامل سه موج ضربه‌ای متمایز است. یک موج ضربه‌ای قوی که موج اصلی ماخ (Mach Stem) نام دارد و در جهت انتشار دتونیشن حرکت می‌کند، یک موج ضربه‌ای ضعیف‌تر که موج وابسته (Incident Shock) نام دارد و مشابه موج ضربه‌ای ماخ، در جهت انتشار دتونیشن حرکت

می‌کند. موج سوم که یک موج ضعیف‌تر نسبت به دو موج قبلی است، موج عرضی (Transverse Wave) می‌باشد. موج عرضی برخلاف دو موج ماخ و وابسته، در جهت عمود بر انتشار دتونیشن حرکت می‌کند. این سه موج در یک نقطه که نقطه سه‌گانه (Triple Point) نامیده می‌شود با یکدیگر برخورد می‌کنند. اثر این نقطه سه‌گانه است که روی فویل دوده‌اندود شده روی دیواره کانال، باعث ایجاد ساختار سلولی دتونیشن می‌گردد. نمونه‌ای از این اثر در شکل (۱-ب) بصورت شماتیک و در شکل (۱-ج) بصورت واقعی نشان داده شده است.

در نتایج تجربی دو نوع ساختار سلولی متفاوت (از جمله توسط فیکت و دیویس (Fickett and Davis)) مشاهده شده است [۱]. این محققان تفاوتی را که در ساختار سلولی دیدند، ناشی از دو نوع امواج عرضی دانستند. یک نوع امواج عرضی ضعیف که در آن فقط یک نقطه سه‌گانه در جبهه شاک و در محل برخورد ماخ استم و شاک برخوردی وجود دارد و موج عرضی از این نقطه آغاز می‌شود و به قسمت پشت جبهه شاک گسترش می‌یابد. نوع دیگر امواج عرضی قوی می‌باشند که در آنها دو نقطه سه‌گانه وجود دارد و موج عرضی از نقطه سه‌گانه دوم به بعد تعریف می‌شود (BCDE در شکل ۲). در حقیقت در نقطه سه‌گانه دوم یک دتونیشن ثانویه ایجاد شده است. در دتونیشن‌هایی که دو نقطه سه‌گانه دارند امواج عرضی قویتری نسبت به دتونیشن‌های با یک نقطه سه‌گانه ایجاد می‌گردد. بنابراین نقش امواج عرضی در انتشار دتونیشن‌های با دو نقطه سه‌گانه بیشتر است و تضعیف این امواج می‌تواند روی انتشار دتونیشن تاثیر بسزایی داشته باشد. با مطالعه این نوع دتونیشن، می‌توان نقش امواج عرضی را آشکار ساخت.



شکل ۲- شماتیک ساختمان موج دتونیشن (با دو نقطه سه‌گانه، A و B به ترتیب نقطه سه‌گانه اول و دوم، I موج وابسته، MS موج ماخ اصلی، خط BCDE موج عرضی)

روشهای عددی که بر پایه معادلات اساسی حاکم بر پدیده دتونیشن بنا شده‌اند، توانسته‌اند که به فهم برخی از خواص اساسی موج دتونیشن کمک اساسی نمایند. محققان زیادی در زمینه کاربرد روشهای عددی در دتونیشن کار کرده‌اند. از جمله کارهای مهمی که روی شبیه‌سازی دوبعدی دتونیشن انجام شده، کار بورلیوکس (Bourlioux) [۳] می‌باشد. بورلیوکس با استفاده از مدل یک مرحله‌ای کلی برای سینتیک واکنش علاوه بر شبیه‌سازی یک بعدی، به شبیه‌سازی دوبعدی دتونیشن پرداخت و ساختار سلولی را مشاهده کرد. بحث دیگری که در شبیه‌سازی دتونیشن مطرح بود، تاثیر ابعاد سلولهای محاسباتی در نتایج است. شارپ و فال (Sharpe and Falle) در شبیه‌سازی دو بعدی خود پی بردند که اگر وضوح کمتر از ۲۰ سلول محاسباتی در طول ناحیه نصفه واکنش (Half Reaction Length) باشد، اندازه سلولی و درجه منظمی آنها بشدت به شبکه محاسباتی وابستگی دارند [۴]. در تحقیقی دیگر شارپ به مطالعه امواج عرضی قوی در دتونیشن پرداخت و با استفاده از یک وضوح مناسب (۶۴ سلول محاسباتی در طول ناحیه نصفه واکنش) ساختار موج عرضی قوی و نیز بسته‌های نسوخته در پشت جبهه شاک پیشرو را شبیه‌سازی نمود [۵]. هو و همکاران (Hu et al.) به شبیه‌سازی ساختار سلولی دتونیشن در مخلوط اکسیژن-هیدروژن-آرگون پرداختند. آنها در شبیه‌سازی خود که با وضوح ۴۴۰ سلول محاسباتی در  $h_{rl}$  (طول نصفه واکنش)

انجام گرفت، توانستند در این مخلوط دتونیشن با دو نقطه سه گانه را پیش بینی کنند و ساختار دقیق تری از جبهه دتونیشن را ارائه کنند [۶].

در این مقاله با استفاده از یک روش گودونفی مرتبه دو، که با الگوریتم‌های تطبیق شبکه و تعقیب جبهه شاک کوپل شده است، به شبیه‌سازی دو بعدی دتونیشن گازی پرداخته می‌شود. ابتدا معادلات اساسی حاکم بر پدیده دتونیشن ارائه می‌گردد. سپس مختصری در مورد روش عددی بکار برده شده توضیح داده می‌شود. در نهایت با استفاده از کد عددی نوشته شده، شبیه‌سازی دتونیشن در یک کانال دو بعدی برای یک مخلوط خاص انجام شده و روی نتایج حاصل بحث می‌گردد.

## ۲- معادلات اساسی

مدل کردن ساختار غیرخطی دتونیشن، با استفاده از معادلات اساسی حاکم بر جریان که شامل معادله بقای جرم، بقای مومنتوم، بقای انرژی و معادلات واکنش شیمیایی می‌باشد صورت می‌گیرد. برای مدل کردن دتونیشن واقعی، باید معادلات اساسی بصورت کامل در نظر گرفته شوند. اما به دلیل مشکلاتی مثل عدم تکافوی سرعت و حافظه رایانه‌ها و مشخص نبودن سینتیک کامل واکنش‌های شیمیایی، لازم است که چند فرض اساسی برای ساده سازی معادلات حاکم اعمال گردد. اولین فرض، دو بعدی بودن تحلیل است. میدانیم که دتونیشن واقعی ساختاری پیچیده و سه بعدی دارد. لذا در صورتی که هدف مدل سازی دتونیشن واقعی باشد، تحلیل باید سه بعدی باشد. اما بخاطر مشکلات موجود و با ساده سازی معادلات حاکم، شبیه سازی بصورت دوبعدی انجام می‌گیرد. دومین فرض، صرفنظر کردن از اثرات نفوذ است. از نظر زمانی پدیده نفوذ بسیار کندتر از فرایندهای مطرح در دتونیشن است. با این فرض معادلات کامل ناویر-استوکس به معادلات اولر واکنشی تبدیل می‌شوند که بصورت رابطه (۱) است:

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

که در آن بردارهای  $U, F, G, S$  بصورت

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

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

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

که  $\beta$  نسبت گرمای ویژه و  $Q$  گرمای آزاد شده از واکنش شیمیایی می‌باشند. فرض بعدی استفاده از مدل مناسب سینتیک شیمیایی است. در این مقاله از مدل سینتیکی یک مرحله‌ای آرنیوسی استفاده شده که بصورت زیر می‌باشد:

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

که در آن  $E_a$  انرژی اکتیواسیون،  $T$  دما،  $R$  ثابت گازها و  $k$  یک ثابت می‌باشند. فرض دیگری که در حل معادلات حاکم به کار می‌رود استفاده از معادله حالت گاز کامل برای مواد اولیه و محصولات است:

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

معادلات اساسی و همچنین معادله حالت گاز ایده‌ال بصورت بی‌بعد در نظر گرفته شده‌اند. برای اینکار متغیرهای وابسته با توجه به خواص مخلوط نسوخته بی‌بعد شده‌اند. فشار با  $p_0$  و چگالی با  $\rho_0$  بی‌بعد شده‌اند. برای سرعت در میدان، سرعت صوت  $C_0$  در مخلوط نسوخته به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است. طول مشخصه میدان، طولی است که در ساختار مدل ZND، ذره سیال مسیر از جبهه دتونیشن تا جائیکه نصف واکنش انجام شده است را می‌پیماید. این طول به طول نصف واکنش مشهور است که در مقدمه نیز به آن اشاره شده است. این طول مشخصه برای مخلوط با خواص  $\frac{Q}{RT_0} = 50$  و  $\frac{E_a}{RT_0} = 20$  محاسبه شده است. زمان مشخصه بصورت نسبت طول مشخصه hrl به سرعت صوت  $C_0$  در مخلوط نسوخته تعریف می‌گردد.

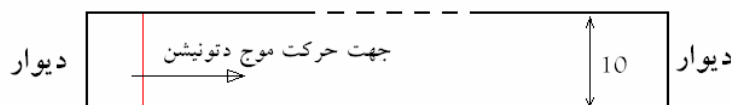
### ۳- روش عددی

روش عددی مورد استفاده برای شبیه‌سازی دتونیشن، یک روش پیوسته (Unsplit) در فضای دوبعدی می‌باشد. این روش بصورت Upwind است و بطور خاص برای شبیه‌سازی مسائلی که در آنها امواج ضربه‌ای نقش اساسی را ایفا می‌کنند مناسب است [۷]. در این روش محاسبه فلاکسهای عددی روی اضلاع سلولهای شبکه بصورت همزمان انجام میگردد. مزیت این روش تصحیح فلاکسهای عددی روی اضلاع سلولهای شبکه محاسباتی با در نظر گرفتن تغییرات میدان جریان در هر دو جهت مختصاتی است. در این روش برای بالا بردن دقت در ناپیوستگیهای میدان حل، از حل مسئله ریمن روی مرزهای سلولهای محاسباتی استفاده می‌گردد. کاربرد این روش برای جریانهای تراکم‌پذیر و بدون واکنش شیمیایی در مرجع [۸] نشان داده شده است. برای کاهش هزینه محاسباتی، از روش تطبیق شبکه استفاده شده است [۹]. برای این کار ابتدا موقعیت جبهه دتونیشن مشخص می‌گردد. سپس در محدوده جبهه دتونیشن که تغییرات زیادی در خواص جریان بوجود می‌آید، سلولهای محاسباتی ریز می‌شوند.

### ۴- شرایط مرزی و اولیه

مدل در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی انتشار دتونیشن در یک کانال با ارتفاع بی‌بعد ۱۰، بطور شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است. جهت انتشار دتونیشن از سمت چپ کانال به سمت راست می‌باشد. برای مخلوط نسوخته اولیه مشخصات  $\frac{E_a}{RT_0} = 20$  و  $\frac{Q}{RT_0} = 50$  در نظر گرفته شده است. برای این مخلوط شبیه‌سازیهای یک‌بعدی و همچنین آنالیز پایداری خطی، دتونیشن یک بعدی را پایدار پیش‌بینی می‌کند [۱۰]. مرزهای سمت چپ و راست کانال دیوار در نظر گرفته شده‌اند. برای مرزهای بالا و پایین از شرط مرزی انعکاسی استفاده است.

#### دیواره انعکاسی



#### دیواره انعکاسی

شکل ۲- شماتیک مدل هندسی کانال

برای آغازش مستقیم دتونیشن، از پروفیل موج بلست که در ابتدای کانال (در سمت چپ) قرار داده شده استفاده گردیده است. جبهه موج بلست در موقعیت  $x=5.0$  در نظر گرفته شده است. برای تسریع در شکل‌گیری ساختار دوبعدی دتونیشن، در جلوی موج بلست اولیه، اغتشاشی در چگالی بصورت رابطه زیر به چگالی اولیه ماده نسوخته اضافه شده است [۴]:

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

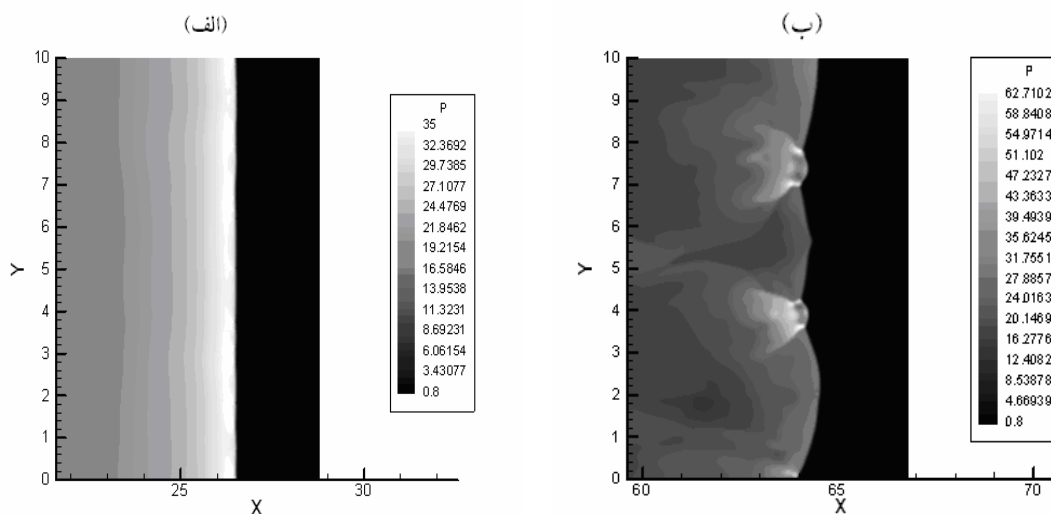
با توجه به اینکه شارپ [۴] حداقل ابعاد سلولهای محاسباتی شبکه را ۲۰ سلول در hrl دانسته است، برای شبیه‌سازی حاضر از ۲۵ سلول محاسباتی در hrl استفاده شده است. شبکه درشت دارای سلولهای مربعی شکل با ابعاد  $hrl/4$  (معادل  $hrl/25$  سلول در hrl) می‌باشد. روی هر سلول محاسباتی شبکه درشت در ناحیه تطبیق شبکه، ۱۰۰ سلول ریز (با  $10 \times 10$ ) قرار داده شده است.

## ۵- نتایج

در این قسمت به بررسی شکل گرفتن جبهه دتونیشن و پیش‌بینی ساختار آن از نتایج حاصل از شبیه‌سازی پرداخته می‌شود. در ابتدا نحوه شکل‌گیری اولیه جبهه دتونیشن مورد توجه قرار می‌گیرد. سپس ساختار جبهه دتونیشن و امواج تشکیل دهنده آن بررسی می‌گردد. در نهایت ساختار سلولی بدست آمده از شبیه‌سازی عددی ارائه می‌گردد.

### ۵-۱- فرم گرفتن ساختار جبهه دتونیشن

نتایج عددی نشان می‌دهند که اغتشاش اولیه در زمانهای آغازین انتشار دتونیشن، تاثیر ناچیزی روی جبهه دتونیشن دارند. کانتورهای فشار که در شکل (۳-الف) داده شده است، نشان می‌دهند که پس از انتشار دتونیشن تا فاصله  $x=27$ ، هنوز جبهه دتونیشن تقریباً یک بعدی است. بهر حال با انتشار بیشتر جبهه دتونیشن، اغتشاش ایجاد شده تقویت شده و نواحی غیریکنواختی در جبهه دتونیشن بوجود می‌آیند. در ادامه و در شکل (۳-ب) مشاهده می‌گردد که با انتشار بیشتر دتونیشن در کانال دوبعدی، امواج عرضی، موج وابسته و موج ماخ اصلی به همراه نقطه سه‌گانه در حال شکل‌گیری می‌باشند.

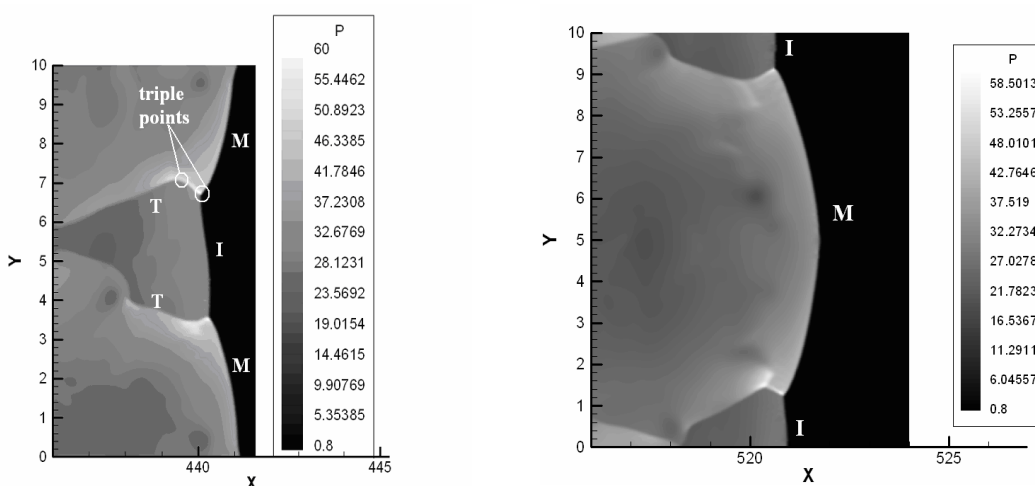


شکل ۳- کانتورهای فشار در موقعیت‌های ابتدایی جبهه دتونیشن

پس از ایجاد ناپایداری در جبهه دتونیشن و شکل‌گیری نقاط سه‌گانه، به مرور امواج تشکیل دهنده جبهه دتونیشن قوی‌تر می‌گردد. در نهایت با پیش‌روی بیشتر جبهه دتونیشن در کانال، ساختار جبهه دتونیشن بطور کامل شکل می‌گیرد که در بخش بعد به آن پرداخته می‌شود.

### ۵-۲- بررسی ساختار جبهه دتونیشن

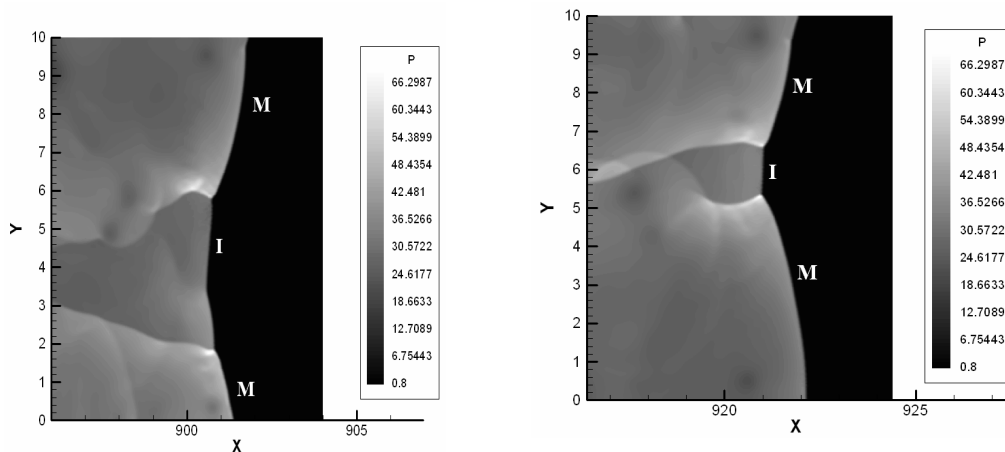
شکل‌های (۴) تا (۶) کانتورهای فشار در موقعیت‌های مختلف جبهه دتونیشن نشان می‌دهند. با توجه به شکل (۴) می‌توان مشاهده نمود که جبهه دتونیشن شکل گرفته و امواج ماخ اصلی، شاک وابسته و امواج عرضی کاملاً تشکیل شده‌اند. برای جبهه دتونیشن در موقعیت  $x=441$  موج شاک وابسته در وسط و دو موج ماخ اصلی در بالا و پایین آن تشکیل شده‌اند. در این موقعیت جهت حرکت امواج عرضی تشکیل شده، به سمت هم می‌باشد. نکته دیگر که در این ساختار مشاهده می‌شود، تشکیل دو نقطه سه‌گانه در جبهه دتونیشن می‌باشد. از نتایج تجربی و عددی قبلی مشاهده شده است که جبهه دتونیشن می‌تواند دارای یک نقطه سه‌گانه و یا دو نقطه سه‌گانه باشد. البته لازم بذکر است که این نوع جبهه دتونیشن مستقل از عرض کانال است و مثل سایر پارامترهای دینامیکی دتونیشن، جزو خصوصیات مخلوط گازی مشخص شده می‌باشد. شبیه‌سازی حاضر برای مخلوط در نظر گرفته شده با مشخصات سینتیکی  $\frac{Q}{RT_0} = 50$  و  $\frac{E_a}{RT_0} = 20$ ، نشان دهنده دتونیشن از نوع دو نقطه سه‌گانه در جبهه آن است.



شکل ۴- کانتورهای فشار جبهه دتونیشن در موقعیت‌های  $x=441$  و  $x=521$

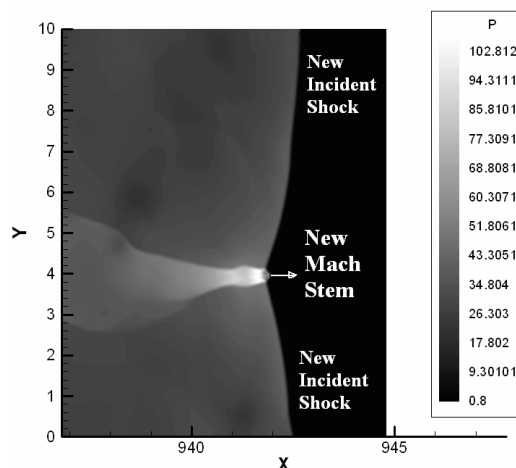
در شکل (۴) برای موقعیت جبهه دتونیشن در  $x=521$  مشاهده می‌گردد که یک موج ماخ اصلی در وسط کانال و دو موج شاک وابسته در طرفین موج ماخ اصلی تشکیل شده است. تشکیل دو نقطه سه‌گانه در محل تقاطع موج ماخ اصلی و موج شاک وابسته نیز دیده می‌شود. همچنین از برخورد موج عرضی به دیواره کانال، یک موج برگشتی نیز ایجاد شده است. همچنین بیشترین فشار میدان که مربوط به نقطه سه‌گانه است، در حدود ۶۰ محاسبه شده است.

با انتشار جبهه دتونیشن در مخلوط نسوخته و به سمت انتهای کانال، به تناوب امواج ماخ اصلی و شاک وابسته در وسط کانال قرار می‌گیرند. شکل (۵) و در موقعیت  $x=901$  دوباره موج شاک وابسته در وسط کانال قرار گرفته است و موجهای ماخ اصلی در بالا و پایین آن تشکیل شده‌اند. با پیش‌روی بیشتر جبهه دتونیشن و در موقعیت  $x=922$ ، ملاحظه می‌گردد که موج شاک وابسته کوچکتر شده و موجهای ماخ اصلی که در بالا و پایین موج شاک وابسته قرار دارند بزرگتر شده‌اند. درحقیقت با حرکت امواج عرضی به سمت یکدیگر این اتفاق رخ داده است.



شکل ۵- کانتورهای فشار جبهه دتونیشن در موقعیت‌های  $x=901$  و  $x=922$

علاوه بر آن در موقعیت  $x=922$  ملاحظه می‌شود که ابتدا دنباله اواج عرضی با یکدیگر برخورد می‌کنند. بیشترین فشار نیز همچنان در نقاط سه‌گانه است که مقدار تقریبی آن ۶۶ می‌باشد.

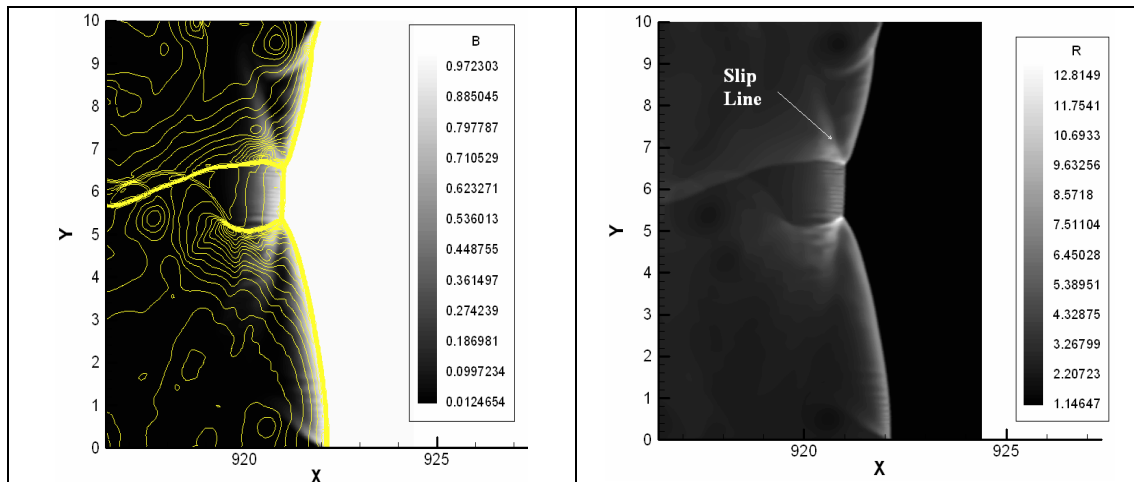


شکل ۶- کانتورهای فشار جبهه دتونیشن در موقعیت  $x=943$

شکل (۶) لحظه‌ای پس از برخورد دو نقطه سه‌گانه را به یکدیگر نشان می‌دهد. شکل‌گیری موج ماخ اصلی جدید پس از برخورد دو نقطه سه‌گانه مشاهده می‌شود. در این لحظه، موج‌های ماخ اصلی که قبل از برخورد وجود داشتند، در نقش موجهای شاک وابسته جدید ظاهر می‌گردند. در پشت موج ماخ اصلی جدید، یک ناحیه کوچک ولی بسیار پرفشار شکل گرفته است. نکته قابل توجه در این شکل، افزایش فشار نقطه سه‌گانه جدید به حدود  $10^3$  است. بنابراین این ناحیه پرفشار کوچک، می‌تواند مانند یک نقطه داغ (Hot Spot) عمل کرده و در مواردی از میرا شدن دتونیشن جلوگیری کند. همچنین می‌توان انتظار داشت که در پدیده آغاز دوباره دتونیشن (Reinitiation) این نقاط داغ نقش مهمی را داشته باشند.

برای مشخص شدن بیشتر ساختار جبهه دتونیشن، کانتورهای چگالی و پارامتر پیشرفت واکنش در شکل (۷) نشان داده شده‌اند. این شکل برای جبهه دتونیشن در موقعیت  $x=922$  می‌باشد. در کانتورهای فشار رسم شده، خط لغزش (Slip Line) بطور واضح مشاهده می‌گردد.



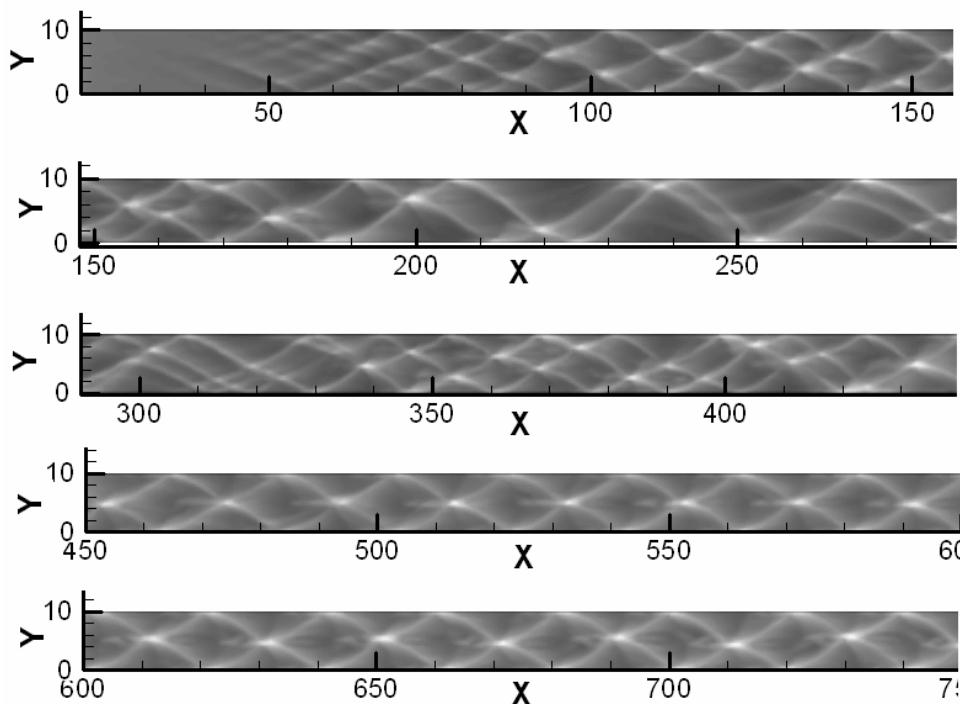


شکل ۷- کانتورهای چگالی و پارامتر پیشرفت واکنش جبهه دتونیشن در موقعیت  $x=922$  (شکل سمت راست چگالی و سمت چپ پارامتر پیشرفت واکنش است)

خطوط لغزشی نشان دهنده تغییرات در چگالی می‌باشند درحالی‌که فشار در طرفین آنها چندان تغییری نمی‌کند. در شکل (۷)، کانتورهای نمودار سمت چپ پارامتر پیشرفت واکنش را به همراه خطوط فشار ثابت نشان می‌دهند. با استفاده از خطوط فشار ثابت می‌توان به راحتی موقعیت جبهه شاکهای پیشرو در دتونیشن را مشخص نمود. ملاحظه می‌گردد نواحی روشن‌تر که بیان‌کننده وجود مخلوط نسوخته است و مشخص‌کننده طول ناحیه واکنش می‌باشد، در پشت موج شاک وابسته (که در وسط قرار دارد) بیشتر از پشت امواج ماخ اصلی می‌باشد. این پدیده بخاطر ضعیف‌تر بودن قدرت شاک وابسته قابل انتظار بود. هرچه قدرت شاک در دتونیشن گازی بیشتر باشد، افزایش فشار و دمای پشت شاک بیشتر می‌گردد. در نتیجه واکنش شیمیایی سریع‌تر و در فاصله کمتری نسبت به جبهه شاک انجام می‌گردد. شکل (۷) نیز این مطلب را تایید می‌کند. همچنین مشاهده می‌گردد که جهت حرکت امواج عرضی نیز بصورتی است که به انجام واکنش در محیط نسوخته پشت شاک وابسته کمک می‌کند. به عبارتی نقش امواج عرضی در جهت تقویت جبهه دتونیشن است.

### ۵-۳- ساختار سلولی

یکی از مشخصه‌های ناپایداری دتونیشن دو بعدی، ساختار سلولی تشکیل شده می‌باشد. آزمایشات تجربی نشان داده‌اند که اگر دیواره کانال دوده‌اندود شود، بعد از عبور جبهه دتونیشن یک ساختار پولک ماهی مانند روی دیواره دوده‌اندود باقی می‌ماند. یک نمونه از نتایج تجربی قبلا در شکل (۱-ج) نشان داده شده است. این ساختار سلولی شکل را بخاطر اثر نقطه سه‌گانه روی فویل دوده‌اندود دانسته‌اند. در شبیه‌سازی حاضر نیز با دنبال کردن نقاط سه‌گانه ساختار سلولی شکل گرفته است. این ساختار در شکل (۸) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۸) ملاحظه می‌گردد که ساختار سلول تقریباً در  $x=40$  شروع به تشکیل شدن کرده است. در ابتدا و تا فاصله  $x=60$  سه سلول در عرض کانال تشکیل شده است. در ادامه و در موقعیت تقریبی  $x=80$  دو سلول در عرض کانال مشاهده می‌گردد. پس از موقعیت  $x=80$ ، تعداد سلولهای ایجاد شده در عرض کانال به  $1/5$  سلول کاهش یافته است. این وضعیت تا موقعیت تقریبی  $x=160$  ادامه یافته است. پس از آن و تا  $x=200$  یک سلول در عرض کانال دیده می‌شود. پس از موقعیت  $x=200$  یک نامنظمی نسبتاً شدید در ساختار سلولی دیده می‌شود. این بی‌نظمی تا موقعیت تقریبی  $x=320$  ادامه دارد. پس از آن تا موقعیت تقریبی  $x=420$  دوباره  $1/5$  سلول در عرض کانال تشکیل شده است. بعد از موقعیت  $x=420$ ، یک ساختار منظم سلولی با یک سلول در عرض کانال تشکیل شده است. این نظم تا انتهای کانال که بطول ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده بود، مشاهده شده است.



شکل ۸- ساختار سلولی تشکیل شده در طول کانال

با توجه به منظم شدن ساختار سلولی از موقعیت  $x=420$  به بعد، می‌توان نتیجه گرفت که برای کانال با عرض ۱۰، ساختارهای نامنظم اولیه بخاطر درحال شکل‌گیری بودن جبهه دتونیشن می‌باشد. البته برای همین مخلوط در نظر گرفته شده و با کانال با عرض ۳۰، نتایج شبیه‌سازی شارپ و فال نشان داده است که یک تعداد مشخص از سلولها در عرض کانال شکل نمی‌گیرد و امکان تبدیل یک سلول به  $1/5$  و دو سلول در عرض کانال هم وجود دارد [۵]. نکته قابل توجه دیگری هم در ساختار سلولی بدست آمده ملاحظه می‌شود. این نکته که با نتایج تجربی هم سازگاری دارد، حالت مقعر بودن دو ضلع ابتدایی ساختار سلولی و محدب بودن دو ضلع انتهایی آن است.

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از روش عددی پیوسته در فضای دوبعدی، به شبیه‌سازی دتونیشن گازی در یک کانال پرداخته شد. با استفاده از یک موج بلست صفحه ای و یک بعدی اولیه و همچنین ایجاد اغتشاش در چگالی، انتشار دتونیشن در یک کانال دوبعدی مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که پس از یک مسافت کوتاه، ساختار جبهه دتونیشن شکل می‌گیرد. تغییرات این ساختار بصورت نامنظم تا موقعیت تقریبی  $x=420$  ادامه پیدا می‌کند. پس از آن تغییرات در جبهه دتونیشن منظم می‌گردد بطوریکه ساختار سلولی حاصل با یک سلول در عرض کانال تا انتهای کانال تکرار می‌گردد. امواج تشکیل دهنده جبهه دتونیشن که شامل موج ماخ اصلی، موج عرضی و موج شاک وابسته می‌باشند و همچنین نقطه تلاقی آنها که نقطه سه‌گانه نامیده می‌شود نیز بدست آمده‌اند. همچنین مشاهده شد که در لحظه برخورد دو نقطه سه‌گانه، یک ناحیه کوچک با فشار بسیار بالا شکل می‌گیرد که می‌تواند به عنوان یک نقطه داغ به انتشار دتونیشن کمک کند.

## مراجع

- [1] Fickett, W. & Davis, W.C., Detonation, University of California Press. (1979)  
 [2] Schultz, E., Detonation Diffraction Trough an Abrupt Area Expansion, Ph.D. Thesis, California Institute of Technology (2000)

- [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] 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)
- [7] Colella, P., "Multidimensional Upwind Methods for Hyperbolic Conservation Laws," J. Comput. Phys., Vol. 87, pp. 171-200 (1990)
- ۸- سبزوoshانی، مجید و مظاهری، کیومرث " استفاده از یک روش عددی پیوسته برای حل جریانهای تراکم پذیر دو بعدی، " سبزوoshمین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک، اصفهان، آریبهشت ۱۳۸۴
- [9] Berger, M.J., Colella, P. "Local Adaptive Mesh Refinement for Shock Hydrodynamics," J. Comput. Phys., Vol. 82, pp. 64-84 (1989)
- [10] Mazaheri, K., Mechanism of the Onset of Detonation in Direct Initiation, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, McGill University, Canada ( 1997 )