

# مطالعه‌ی عددی تأثیر زبری سطح دیواره‌ی داخلی لوله بر طول پیش از انفجار

محسن آزموده\*

مریی، آموزشکده فنی و حرفه‌ای پسران بابایی، قزوین، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، قزوین، ایران

تاریخ دریافت مقاله: تاریخ پذیرش نهایی:

## چکیده

امروزه فرایند گذر از احتراق به انفجار (DDT)، به علت استفاده از موج‌های انفجاری ناشی از این پدیده در موتورهای پالسی انفجاری، کاربردهای فراوانی به خصوص در صنعت یافته و در این میان تأثیر زبری بر این فرایند شایان ملاحظه است. در این پژوهش سعی شده با انتخاب زبری‌های مختلف و بررسی اثر آن بر طول پیش از انفجار، به این پرسش پاسخ داده شود که زبری در پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار چه تأثیراتی دارد. برای پاسخ به این پرسش از روش عددی استفاده شد. به طور کلی سعی شد تا با استفاده از دو نرم‌افزار گمبیت و فلوئنت، فرایند گذر از احتراق به انفجار در لوله‌ی بسته با سطح صاف و پنج سطح زبر مختلف به صورت عددی شبیه‌سازی شده و در نهایت با ترسیم دو نمودار سرعت - مکان و حداکثر انرژی جنبشی آشفستگی در دیواره - مکان این فرایند در شش سطح مذکور مقایسه شود. در نهایت نتیجه گرفته شد که افزایش زبری لوله سبب کاهش زمان لازم برای وقوع پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار و همچنین کاهش طول پیش از انفجار می‌شود. با توجه به تغییرات حداکثر انرژی آشفستگی در دیواره برحسب زبری می‌توان استدلال کرد افزایش زبری سبب افزایش آشفستگی جریان و به سبب آن، افزایش شتاب شعله‌ی آشفته می‌شود و پدیده‌ی گذر را تسهیل می‌کند.

## واژه‌های کلیدی

زبری، طول پیش از انفجار، گذر از احتراق به انفجار.

## ۱. مقدمه

امروزه تحقیقات فراوانی در زمینه‌ی DDT<sup>۱</sup>، عوامل مؤثر بر آن و نحوه‌ی کنترل آن در حال اجراست، زیرا استفاده از موج‌های انفجاری، به‌خصوص موج انفجار ناشی از پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار (DDT) کاربردهای فراوانی یافته است. امروزه به استفاده از موتورهای پالسی انفجاری، توجه فراوانی شده و بر این اساس، بررسی روش‌های گوناگون تسهیل فرایند گذر از احتراق به انفجار که کاربردهای فراوانی در صنعت دارد از اهمیت زیادی برخوردار شده است.

بررسی فرایند گذر از احتراق آشفته به انفجار به دلیل پیچیدگی‌های ذاتی آن بسیار دشوار است و به‌طور معمول از فناوری‌های پیشرفته استفاده می‌شود. مطالعات اخیر نشان داده است که هندسه‌ی مسیر جریان، نوع گاز، شرایط اولیه‌ی گاز (فشار و دمای اولیه) و نسبت هم‌ارزی مخلوط بر محل وقوع این پدیده تأثیر دارند؛ اما پژوهش‌هایی که تاکنون در این زمینه انجام گرفته، بدون در نظر گرفتن تأثیرات زبری بر این پدیده بوده است. از این رو، پژوهش حاضر در نظر دارد تا فرایند گذر از احتراق به انفجار را در لوله‌های با زبری متفاوت به‌صورت عددی بررسی و مقایسه کند. به‌طور کلی اهداف این نوشتار را در قالب موضوعات مورد بررسی، می‌توان به چهار قسمت تقسیم کرد: شرایط کلی لازم برای شروع پدیده‌ی انفجار و وقوع DDT مطالعه؛ شتاب‌گیری شعله در لوله‌های صاف، فرایند شتاب‌گیری آن و عوامل مؤثر بر طول پیش از انفجار بررسی؛ شتاب‌گیری شعله در لوله‌های زبر، فرایند شتاب‌گیری آن و رژیم‌های گوناگون پخش شعله در لوله‌های زبر تشریح؛ و پدیده‌ی آغاز انفجار و روش‌های مختلف آغاز انفجار، معیارها و شرایط لازم برای آغاز انفجار در لوله‌های صاف و در لوله‌های زبر نیز توضیح داده شده است.

## ۲. پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار

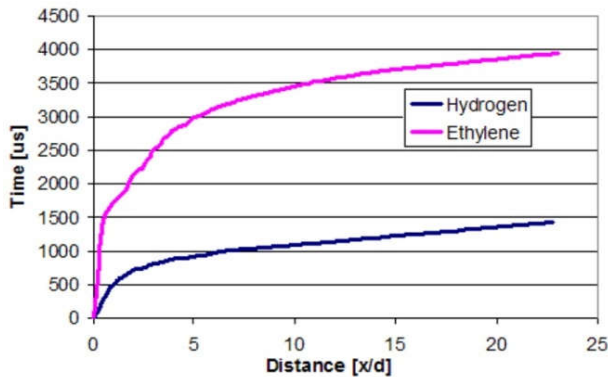
برای وقوع پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار، دو شرط اساسی باید رعایت شود:

۱. به‌منظور آغاز پدیده‌ی انفجار، قبل از هر چیز باید شعله باید به‌قدری شتاب بگیرد که به‌سرعت بسیار زیاد مورد نیاز برای وقوع پدیده‌ی انفجار برسد. این سرعت دست‌کم باید به اندازه‌ی سرعت صوت در محصولات احتراق باشد؛

۲. قطر روزنه‌ی اوریفیس‌ها باید به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد (دست‌کم به‌اندازه‌ی سلول انفجاری متناظر با مخلوط مورد آزمایش)، تا وقوع انفجار امکان‌پذیر شود.

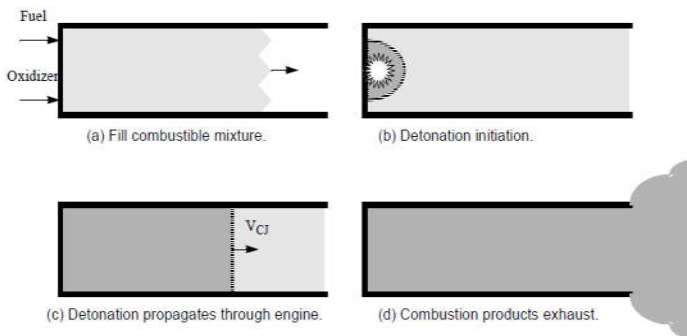
فرایند گذر از احتراق به انفجار قانونمند نیست و پدیده‌ای بسیار پیچیده است که عوامل مختلفی بر آن اثر

دارد که از مهم‌ترین آنها می‌توان به عوامل نوع سوخت، نسبت هم‌ارزی مخلوط، قطر لوله‌ی انفجاری، دما و فشار اولیه اشاره کرد: (Chapin, 2005; Schultz, 2001; Wingerden, 2006).



شکل ۱. اثر نوع سوخت بر زمان وقوع گذر از احتراق به انفجار در شرایط یکسان

در شکل ۱ مراحل مختلف ایجاد پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار دیده می‌شود. در مرحله‌ی a لوله از مخلوط پر می‌شود، در مرحله‌ی b جرقه زده شده و احتراق آغاز می‌شود، در مرحله‌ی c احتراق مسیر خود را در لوله طی می‌کند. در مرحله‌ی d محصولات احتراق لوله را ترک می‌کنند (Chapin, 2005).



شکل ۲. مراحل ایجاد فرایند گذر از احتراق به انفجار

در ایجاد پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار، زمان از عوامل بسیار مهم است و در بیشتر تحقیقات بررسی می‌شود، زیرا در فاصله‌های زمانی مختلف فرایند سوختن و شتاب‌گیری شعله متفاوت است (Bollinger et al., 1961). بعد از ایجاد یک جرقه‌ی کوچک در انتهای لوله، یک شعله‌ی آرام ایجاد می‌شود و پس از گذشت اندک زمانی از تشکیل این شعله، چین‌خوردگی‌هایی در جلوی شعله به‌واسطه‌ی ناپایداری‌های محلی  $RT^2$  ایجاد می‌شود. این چین‌خوردگی‌ها ممکن است به‌واسطه‌ی تأثیرات پخشی — حرارتی پایدار شوند یا از بین بروند.

همچنین نتیجه‌ی مطالعات، بیانگر این مطلب است که هر چقدر زبری دیواره‌ی لوله بیشتر باشد، رشد لایه‌ی مرزی سریع‌تر خواهد بود. در واقع، زبری دیواره‌ی لوله، پارامتری مهم و تأثیرگذار در میزان نرخ شتاب شعله است. در لوله‌هایی که در آنها از موانع استفاده شده و در آنهایی که نسبت انسداد، کوچک است (کمتر از ۱۰ درصد) ساختار شعله و نیز نحوه‌ی شتاب‌گیری شعله، بسیار شبیه به لوله‌ی ساده خواهد بود (Ciccarelli & Dorofeev, 2008).

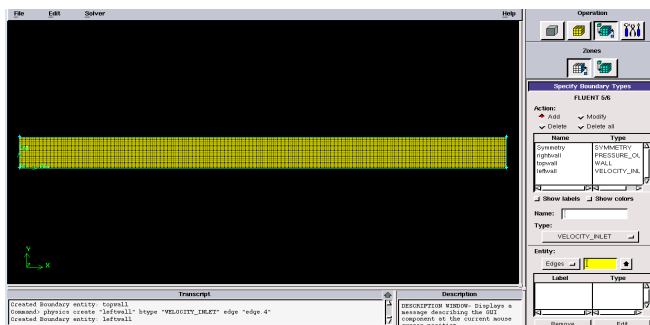
لی و همکاران (Lee et al., 1985) برای اولین بار نشان دادند که برای لوله‌های با مانع، چندین رژیم پخش شعله‌ی گوناگون، می‌تواند وجود داشته باشد که براساس سرعت نهایی محاسبه شده، چهار نوع آن شامل خاموش‌شونده، اختناقی، شبه‌انفجاری و انفجاری چاپمن — جوگت است. از سوی دیگر نتایج آزمایش‌های جیو و همکاران (Gu et al., 1988) که در آنها فاصله‌ی بین صفحات روزنه‌دار،  $0/5$ ،  $1$  و  $2$  برابر قطر لوله بود نشان می‌دهد که کمبود سرعت با فاصله‌ی بین صفحات سوراخ‌دار نسبت عکس دارد.

در لوله‌های صاف که در آنها از موانع استفاده نشده، کسری سرعت  $2-1$  درصد است که در اثر به‌وجود آمدن لایه‌ی مرزی ایجاد می‌شود. بنابراین یکی از نتایج این آزمایش این است که این مقدار کسری سرعت به‌واسطه‌ی بالا رفتن اتلاف اندازه حرکت و اتلاف حرارت ناشی از زبری، شاپان توجه دیواره است. فرایند آغاز پدیده‌ی انفجار به شیوه‌های بسیار متنوعی قابل مشاهده است، ولی در کل به دو دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شود: آغاز انفجار به‌واسطه‌ی انعکاس موج ضربه یا متمرکز شدن موج ضربه و آغاز انفجار به‌واسطه‌ی ناپایداری‌ها یا فرایندهای اختلاط. دسته‌ی اول ذاتاً دربرگیرنده‌ی یک فرایند آغاز انفجار مستقیم است، زیرا در آنها قدرت موج ضربه به اندازه‌ی قوی است که گاز را محترق می‌کند و سبب شروع انفجار می‌شود. دسته‌ی دوم از روش‌های آغاز انفجار بسیار پیچیده است، زیرا بسیاری از ناپایداری‌ها و فرایندهای اختلاط را دربرمی‌گیرد. به‌طور معمول این نوع آغاز انفجار در لوله‌های صاف اتفاق می‌افتد؛ در

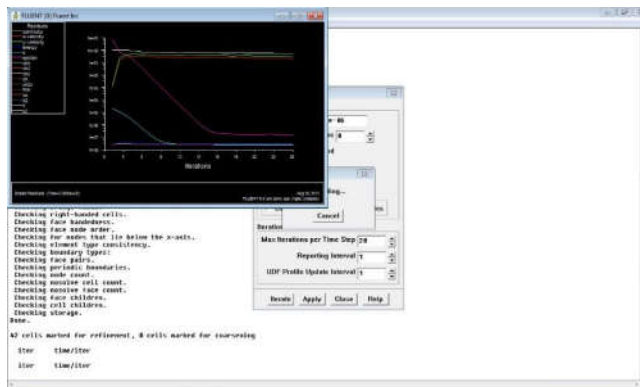
این لوله‌ها آغاز انفجار ممکن است در جلوی شعله‌ی آشفته، نوک موج ضربه‌ی پیشین، داخل شعله (Moen, 1982) یا در لایه‌ی مرزی (Soloukhin, 1961 & Kuznetsov, 2005) رخ دهد.

### ۳. مدل کردن مسئله

مدل مورد نظر یک لوله‌ی ساده‌ی دوبعدی به طول ۷۰ سانتی‌متر و قطر ۱۰ سانتی‌متر را شبیه‌سازی می‌کند. این مدل ابتدا در نرم‌افزار گمبیت<sup>۳</sup> طراحی شده و سپس وارد نرم‌افزار فلوئنت<sup>۴</sup> می‌شود. اندازه‌ی سلول‌های ساخته شده ۱×۱ میلی‌متر است. برای به‌دست آوردن اندازه‌ی درست جهت سلول‌های شبکه‌ی ساخته شده از روش آزمون و خطا استفاده شده است. هر چه تعداد سلول‌ها کمتر باشد (شبکه درشت باشد)، زمان کمتری برای محاسبات لازم است، اما از دقت حل کاسته می‌شود. ریز کردن بیش از حد شبکه هم موجب افزایش چشمگیر زمان حل می‌شود.



شکل ۳. تعیین شرایط مرزی در نرم‌افزار گمبیت



شکل ۴. پانل کنسول و پنجره‌ی گرافیکی در حال محاسبات

برای حل معادلات حاکم بر جریان، از روش حجم محدود استفاده شده است. در این روش ناحیه‌ی حل به حجم‌های کنترلی جداگانه‌ای تفکیک می‌شود. میدان محاسباتی به چند حجم کنترلی تقسیم می‌شود، به گونه‌ای که هر گره را یک حجم کنترلی احاطه کند و حجم کنترلی نباید دارای حجم‌های مشترک با یکدیگر باشد. به همین منظور از معادلات دیفرانسیلی حجم کنترل، انتگرال گرفته می‌شود. برای محاسبه‌ی انتگرال‌های لازم از پروفیل‌های قطعه به قطعه استفاده می‌شود که تغییر متغیر وابسته را در بین گره‌ها بیان می‌کند.

معادله‌ی پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

معادله‌ی بقای اندازه‌ی حرکت:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho B_i \quad (2)$$

معادله‌ی بقای انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h) = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial h}{\partial x_j} - \frac{\lambda}{C_p} \dot{q}_j^R \right) \quad (3)$$

معادله‌ی حالت:

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

معادله‌ی بقای گونه‌ها:

$$(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \bar{Y}_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i + S_i \quad (5)$$

معادلات آشفتگی (مدل k-ε استاندارد):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \dot{\nu} - Y_M + S_k \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \dot{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \dot{\nu} u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\dot{\nu}_0} \right) \frac{\partial \dot{\nu}}{\partial x_j} \right] + C_{10} \frac{\dot{\nu}}{k} (G_k + C_{30} G_b) - C_{20} \rho \frac{\dot{\nu}^2}{k} + S_{\dot{\nu}} \end{aligned} \quad (6)$$

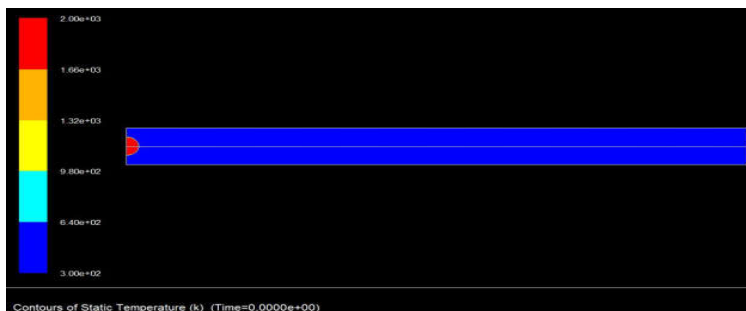
زبری سطوح به‌طور چشمگیری دارای اشکال پیچیده و متنوع است. به‌عنوان یک نتیجه‌ی کلی غیرممکن است که بتوان هر سطح زبر را انحصاری توصیف کرد، زیرا هر سطح شامل تعداد بسیار زیاد و در عین حال طیف متنوعی از مقیاس‌های زبری<sup>۵</sup> بوده و در نتیجه برای تعریف شکل زبری‌ها، به گستره‌ی وسیعی از اندازه‌های مقیاس نیاز است.

روش عددی به‌کار رفته برای حل معادلات، مرتبه‌ی اول است و برای گام‌های زمانی از روش کاملاً ضمنی<sup>۶</sup> استفاده شده است (پاتانکار، ۱۳۸۲).

#### ۴. مقایسه‌ی عددی و تجربی DDT

برای مدل‌سازی گذر از احتراق به انفجار در لوله‌های زبر، فشار اولیه در همه‌ی نواحی  $100 \text{ kPa}$  و دمای اولیه در کلیه‌ی نواحی یکسان و  $300 \text{ K}$  در نظر گرفته شد. دما در ناحیه‌ی شروع احتراق بیشتر از دمای لازم برای احتراق خودبه‌خودی ترکیب بود و برابر  $2000 \text{ K}$  تنظیم شد. با این دما مخلوط متان و اکسیژن به آرامی شروع به سوختن کرده و شعله داخل لوله شروع به حرکت می‌کند.

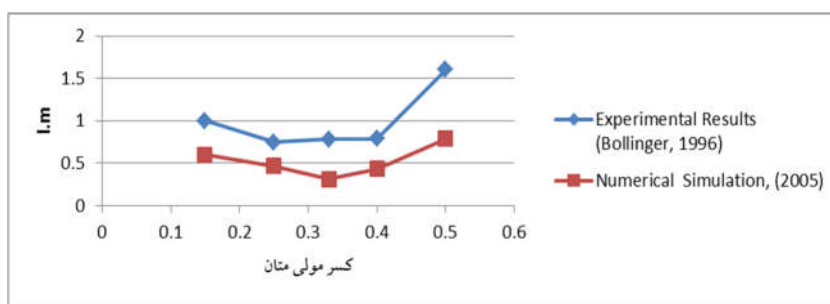
با گذشت اندک زمانی، جبهه‌ی شعله و امواج ایجاد شده در جلوی شعله و در ناحیه‌ی مواد نسوخته با هم کوپل می‌شوند و شروع به حرکت می‌کنند. با بررسی مدل‌های مختلف مشخص شد دمای اولیه در ناحیه‌ی گرم و اندازه‌ی ناحیه‌ی گرم شده، تأثیر بسیار اندکی بر طول پیش از انفجار دارند. البته دمای اولیه‌ی کل مخلوط و نیز فشار اولیه تأثیر به‌سزایی بر طول پیش از انفجار دارند. اندازه‌ی ناحیه‌ی با دمای زیاد، در همه‌ی آزمایش‌ها یک قوس کوچک به شعاع ۱ سانتی‌متر در مرکز و سمت چپ لوله است، مانند آنچه در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. خطوط هم‌دما در مدل ساخته شده پیش از آغاز حل

با گذشت زمان، دما، فشار و سرعت افزایش می‌یابد و شعله شتاب می‌گیرد. سرانجام در ناحیه‌ای از لوله پس از شتاب‌گیری لازم، پدیده‌ی DDT رخ می‌دهد. یکی از عوامل تأثیرگذار بر مکان DDT، درصد سوخت نسبت به اکسیژن است.

در این آزمایش ترکیبات مختلف از متان و اکسیژن بررسی و نتایج با داده‌های موجود در منابع (Bollinger et al., 1961) مقایسه شده و نتایج در شکل ۶ نشان داده شده است.



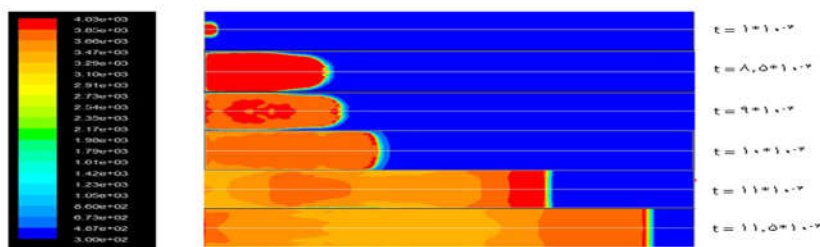
شکل ۶. مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای طول پیش از انفجار با نتایج تجربی

## ۵. گذر از احتراق به انفجار در لوله‌های زبر

برای بررسی رفتار شعله و فرایند گذر از احتراق به انفجار، ابتدا نحوه‌ی گسترش شعله در یک لوله با سطح صاف و سپس در یک لوله با بیشترین زبری آزمایش شده در این پژوهش (لوله‌ی با زبری ۵ میلی‌متر)، بررسی شده است.

### ۵-۱. بررسی رفتار شعله در یک لوله با سطح صاف

رفتار شعله در یک سطح صاف در شکل ۷ نشان داده شده است:



شکل ۷. فرایند گذر از احتراق به انفجار در لوله‌ی با زبری ۵ میلی‌متر

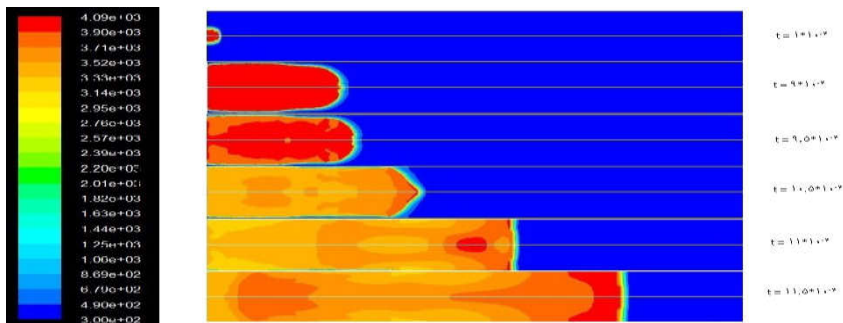


در لوله‌ای با زبری ۵ میلی‌متر پدیده‌ی انفجار در  $t=0.0007$  (s) رخ می‌دهد یعنی انفجار 0.0002 ثانیه زودتر از لوله با سطح صاف رخ می‌دهد؛ و منحنی انتهای شعله در زمان  $t=0.0008$  (s) به‌صورت خط صاف درمی‌آید.

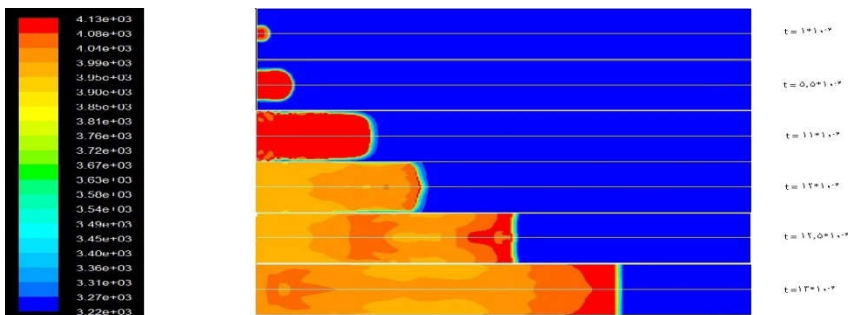
مقایسه‌ی سطح صاف با زبری ۵ میلی‌متر نشان می‌دهد که زبری سطح بر افزایش سرعت شعله تأثیر مستقیم دارد و موجب شتاب بیشتر جبهه‌ی شعله می‌شود و در نتیجه پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار زودتر رخ می‌دهد.

### ۵-۲. بررسی رفتار شعله در لوله‌هایی با زبری میانی

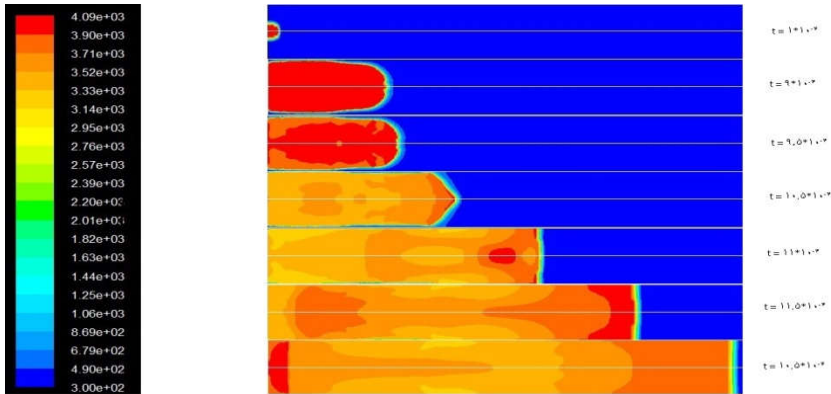
در ادامه شکل فرایند شعله و گذر آن از احتراق به انفجار در لوله‌های دیگر با زبری‌های متفاوت — که در این پروژه بررسی شده و پیشتر ذکر شده‌اند — جداگانه ارائه شده است:



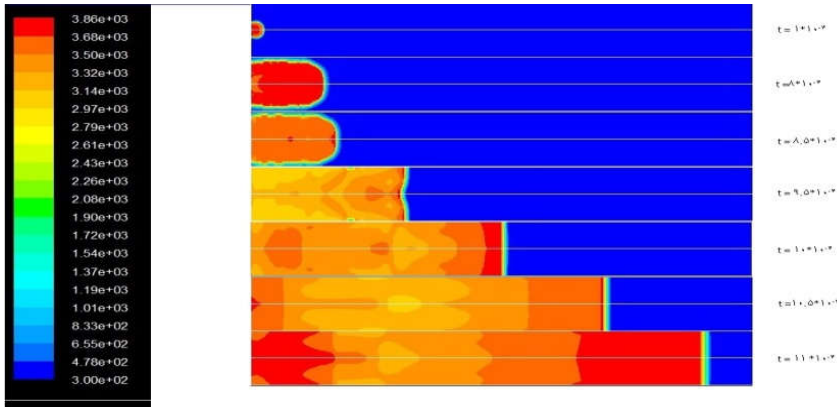
شکل ۸. فرایند گذر از احتراق به انفجار در لوله‌ی با زبری ۴ میلی‌متر



شکل ۹. فرایند گذر از احتراق به انفجار در لوله‌ی با زبری ۸ میلی‌متر



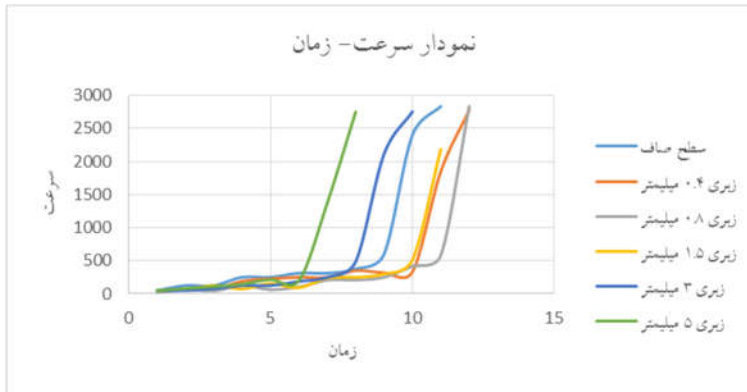
شکل ۱۰. فرایند گذر از احتراق به انفجار در لوله‌ی با زبری ۱/۵ میلی‌متر



شکل ۱۱. فرایند گذر از احتراق به انفجار در لوله‌ی با زبری ۳ میلی‌متر

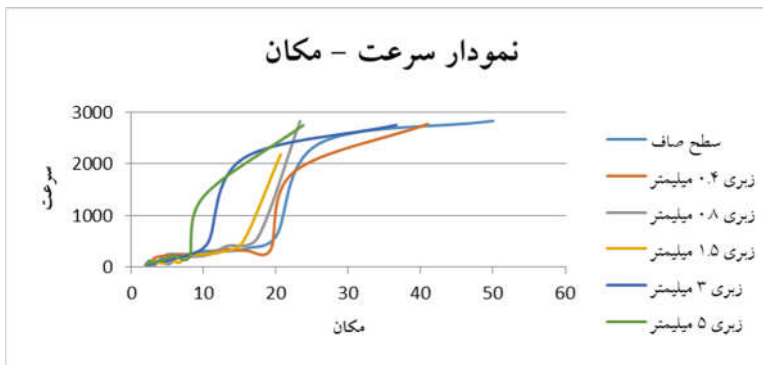
### ۶. نتیجه‌گیری

نتیجه‌ی آزمایش‌های عددی و محاسبات انجام گرفته، براساس دو مولفه بررسی و استخراج می‌شود: تغییرات سرعت شعله و همچنین انرژی جنبشی بیشینه نمودارهای زیر براساس محاسبات و نتایج تجزیه و تحلیل‌های نرم‌افزاری در چهار موضوع ارائه شده است: سرعت — مکان؛ سرعت — زمان؛ حداکثر انرژی جنبشی آشفته‌گی دیواره — مکان؛ حداکثر انرژی جنبشی آشفته‌گی دیواره — زمان.



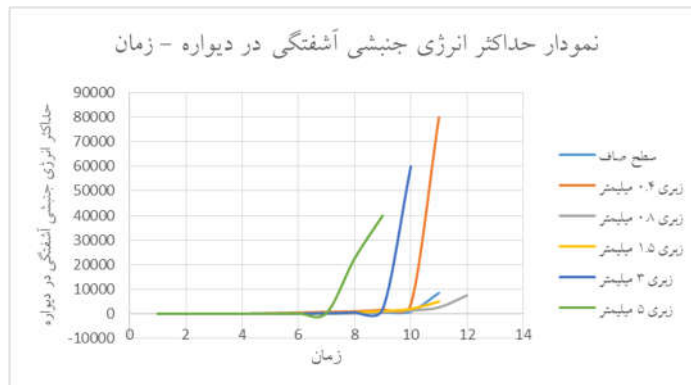
شکل ۱۲. نمودار سرعت شعله برحسب زمان در لوله‌هایی با زبری متفاوت

بررسی رابطه‌ی میان زمان و سرعت شعله در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که در لوله‌ی با زبری ۵ میلی‌متر (بیشترین زبری تحت آزمایش)، شعله در کوتاه‌ترین زمان به حداکثر سرعت خود می‌رسد و در لوله‌ی با زبری ۰/۴ میلی‌متر (کمترین زبری تحت آزمایش) این حداکثر سرعت در طولانی‌ترین زمان اتفاق می‌افتد. برای شعله در لوله‌های دیگر می‌توان گفت، شعله در لوله‌ی با زبری ۳ میلی‌متر، لوله‌ی با زبری ۱/۵ میلی‌متر و لوله‌ی با زبری ۰/۸ میلی‌متر به ترتیب از فاصله‌ی زمانی کم به زیاد، به بیشترین سرعت خود می‌رسد. بنابراین می‌توان مشاهده کرد که از زبری زیاد به کم، زمان رسیدن به حداکثر سرعت شعله بیشتر می‌شود. اگرچه شایان ذکر است که شعله در سطح صاف نسبت به سطوح زبر نظم یکسانی ندارد و در حد فاصل لوله‌های زبر ۱/۵ و ۳ میلی‌متر به بیشترین سرعت خود می‌رسد.



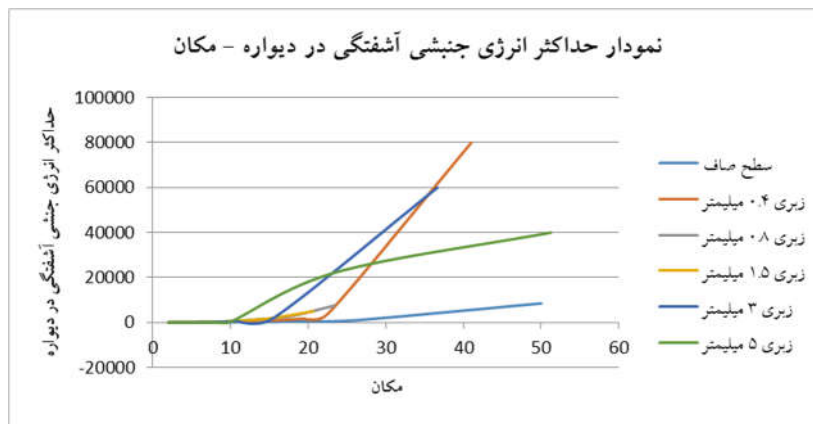
شکل ۱۳. نمودار سرعت شعله برحسب مکان در لوله‌هایی با زبری متفاوت

بررسی سرعت شعله — مکان در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که طول پیش از انفجار در لوله‌ی با زبری ۵ میلی‌متر کوتاه است و در سطح صاف، بیشترین حد را دارد. همچنین در همه‌ی زبری‌ها سرعت حداکثر یکسان است.



شکل ۱۴. نمودار حداکثر انرژی جنبشی آشفته‌گی شعله در دیواره برحسب زمان در لوله‌هایی با زبری متفاوت

بررسی بعدی به رابطه‌ی حداکثر انرژی جنبشی آشفته‌گی شعله در دیواره، زمان و مکان مربوط می‌شود. تغییر شیب حداکثر انرژی جنبشی آشفته‌گی، معیاری از وقوع پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار است. همان‌طور که در شکل ۱۵ مشخص است، در زبری ۵ میلی‌متر این تغییر شیب زودتر رخ داده و به‌طور تقریبی با کاهش زبری، زمان وقوع تغییر شیب افزایش یافته است.



شکل ۱۵. نمودار حداکثر انرژی جنبشی آشفته‌گی شعله در دیواره برحسب مکان در لوله‌هایی با زبری متفاوت

تغییر شیب حداکثر انرژی آشفستگی در دیواره برحسب مکان، معیاری از وقوع پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار و به‌نوعی طول پیش از انفجار است. همان‌طور که شکل ۱۶ نشان می‌دهد، این تغییر شیب در زبری ۵ میلی‌متر زودتر رخ می‌دهد و تقریباً با کاهش زبری به تأخیر می‌افتد. در مجموع، با بررسی نمودارهای بالا می‌توان نتیجه گرفت:

- افزایش زبری لوله، سبب کاهش زمان لازم برای وقوع پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار می‌شود؛
- افزایش زبری لوله سبب کاهش طول پیش از انفجار می‌شود.
- با توجه به تغییرات حداکثر انرژی آشفستگی در دیواره برحسب زبری می‌توان استدلال کرد که افزایش زبری، سبب افزایش آشفستگی جریان و به سبب آن، افزایش شتاب شعله‌ی آشفته می‌شود و پدیده‌ی گذر را تسهیل می‌کند.

### پی‌نوشت‌ها

1. Deflagration to detonation transition (DDT)
2. Richtmyer-Meshkov
3. Gambit
4. Fluent
5. Roughness
6. Implicit

### منابع

۱. پاتانکار، س. (۱۳۸۲)، «محاسبات عددی - کامپیوتری انتقال حرارت و حرکت سیالات»، ترجمه محمد مقیمیان، مشهد، انتشارات دانشگاه فردوسی.
2. Bollinger, L.E.; Fong, M.C. & Edse, R. (1961). "Experimental measurements and
3. Chapin, M.D. (2005), "Thesis: A study of deflagration to detonation transition in a pulsed detonation engine", A thesis presented to the academic faculty, Georgia Institute of Technology.
4. Ciccarelli, G. & Dorofeev, S. (2008), "Flame acceleration and transition to detonation in ducts progress in energy and combustion science".
5. Gu, L.S.; Knystautas, R. & Lee, J.H.S. (1988), "Influence of obstacle spacing on the propagation of quasi-detonation", In: Kuhl AL., et al., Editors dynamics of explosions, Vol. 104. Washington, DC: AIAA progress of astronautics and aeronautics; p. 230-47.
6. Kuznetsov, M.; Matsuk, I. Alekseev, V.; Breitung, W. & Dorofeev, S. (2005), "DDT in a smooth tube filled with a hydrogen-oxygen mixture", Shock waves.
7. Lee, J.H.; Knystautas, R. & Chan, C.K. (1985), "Turbulent flame propagation in obstacle-filled tubes", Proc. combuts Inst.; 20: 1663-72.

8. Moen, I.O. (1982), "The influence of turbulence on flame propagation in obstacle environments", First international specialist meeting on fuel-air explosions, Montreal, University of Waterloo Press SM study No. 16, p. 101-13.
9. Schultz, E.; Wintenberger, E. & Shepherd, J. (2001), "Investigation of deflagration to detonation transition for applications to pulse detonation engine ignition systems", Source: Proceedings of the 16<sup>th</sup> JANNAF propulsion symposium, Chemical propulsion.
10. Soloukhin, R.I. (1961), "Deflagration to detonation transition in gases", Soviet Prikladn Mech Tech Phys. 4: 128.
11. Wingerden, K.; Bjerketvedt, V.D. & Bakke, J.R. (2006), "Detonation in pipes and in the open-source", <http://www.safetynet.de/Publications/articles/CMRNov99.pdf>.