

## بررسی عددی تاثیر نسبت انسداد و هندسه موانع بر فشار حاصل از انفجار گازی در کانال مانع‌دار

سبحان امامی کوپائی<sup>۱</sup>، کیومرث مظاهری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، s\_emami@modares.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، KIUMARS@modares.ac.ir

### چکیده

در این مقاله به بررسی عددی اثر نسبت انسداد و هندسه موانع بر فشار حاصل از انتشار شعله پیش‌آمیخته ناپایا با استفاده از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) پرداخته شده است. برای این منظور از موانعی با سطح مقطع دایره‌ای، مربعی و مثلثی، با نسبت انسدادهایی در حدود  $0.78-1.0$  استفاده شده است. نتایج حاضر نشان می‌دهند بیشینه فشار با افزایش نسبت انسداد افزایش یافته اما نرخ افزایش وابسته به هندسه مانع می‌باشد؛ به طوری که مانع مربعی بیشترین فشار و مانع دایره‌ای کمترین فشار را ایجاد می‌کند. همچنین زمان رخداد بیشینه فشار نیز با افزایش نسبت انسداد کاهش یافته و وابسته به هندسه مانع می‌باشد.

### واژه‌های کلیدی

شعله پیش‌آمیخته آشفته - فشار انفجار - شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ - موانع صلب.

### مقدمه

انفجارهای گازی به گروهی از فرآیندهای احتراقی پیش‌مخلوط اطلاق می‌شوند که در آنها موج شعله اولیه در اثر اندرکنش با محیط پیرامون (نظیر موانع و مرزهای پیچیده) به سرعت شتاب‌گرفته و فشار نسبتاً زیادی را تولید می‌کند. در دهه‌های اخیر مطالعات تجربی مختلفی برای بررسی اثر موانع بر روی ساختار شعله و فشار بیشینه حاصل از انفجارهای گازی در مقیاس آزمایشگاهی انجام گرفته است. از این جمله می‌توان به مطالعه ابراهیم (Ibrahim) و مزری (Masri) [۱] در بررسی اثرات هندسه و نسبت انسداد (BR) بر روی فشار حاصل از انتشار شعله پیش‌آمیخته پروپان-هوای استوکیومتری، مطالعه هارگریو (Hargrave) و همکاران [۲] بر روی تاثیر هندسه موانع و نسبت هم‌ارزی مخلوط سوخت و هوا بر شتاب‌گیری شعله و فشار حاصل از انفجار و کار هال (Hall) و همکاران [۳] در بررسی تاثیر مکان و تعداد صفحات مغشوش‌کننده بر ساختار شعله و بیشینه فشار حاصل از اندرکنش شعله با صفحات مغشوش‌کننده متوالی اشاره کرد. این مطالعات نشان می‌دهند که فشار بیشینه ایجاد شده در محفظه تحت تاثیر حجم مواد نسوخته به تله افتاده در پشت موانع و همچنین سطح آشفتنگی ایجاد شده در دنباله موانع بوده [۲] و با افزایش نسبت انسداد افزایش می‌یابد [۱].

به موازات کارهای تجربی اشاره شده، مطالعات عددی مختلفی نیز صورت گرفته است (از جمله مراجع [۴-۷]). در این مطالعات از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای مدل‌سازی جریان آشفته و از مدل چگالی سطح شعله<sup>۱</sup> به منظور مدل‌سازی احتراق زیرشبکه استفاده شده است. برای نمونه دی سارلی (Di Sarli) و همکاران [۷] به ارزیابی دقت چند مدل احتراقی زیرشبکه FSD در پیش‌بینی انتشار شعله پیش‌آمیخته در محفظه‌ای با موانع صلب متوالی پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد که اغلب مدل‌های احتراقی زیرشبکه شکل و ساختار شعله در عبور از موانع را به خوبی پیش‌بینی می‌کنند؛ اما در مورد پیش‌بینی کمی سرعت شعله و فشار بیشینه اکثر مدل‌ها دقیق نبوده و نیازمند کالیبره کردن ثوابت و پارامترها برای هر مساله خاص می‌باشند. مروری بر کارهای عددی فوق نشان می‌دهد که مدل‌های عددی مورد استفاده اگرچه مکان و ساختار شعله و اندرکنش بین جریان و توربولانس را به خوبی پیش‌بینی می‌کنند اما رفتار تاریخچه فشار به خوبی پیش‌بینی نشده که به علت ضعف مدل‌های احتراقی زیرشبکه مورد استفاده دانسته شده است.

هدف از کار حاضر بررسی عددی تاثیر نسبت انسداد و هندسه موانع بر روی فشار حاصل از انفجار گازی در کانال مانع‌دار بوده تا علاوه بر بررسی دقت مدل‌سازی عددی حاضر برای مسائل مختلف فهم بهتری از عوامل موثر بر فشار بیشینه حاصل شود. شبیه‌سازی‌های عددی حاضر به کمک حلگر احتراقی XiFoam از بسته نرم‌افزاری OpenFOAM و برایش  $1.7$  انجام شده است.

### مشخصات محفظه احتراق مورد مطالعه

این محفظه که در حدود  $20L$  حجم دارد، از یک استوانه مربعی با سطح مقطعی به مساحت  $195 \times 195 \text{mm}^2$  و ارتفاع  $545 \text{mm}$  تشکیل شده است [۱]. یک طرف این محفظه که جرقه در آنجا زده می‌شود، بسته و طرف دیگر آن به اتمسفر باز می‌باشد. این محفظه توسط مخلوط هوا-پروپان استوکیومتری پر شده و یک مانع صلب نیز در فاصله  $150 \text{mm}$  از نقطه جرقه قرار داده شده است. هندسه و اندازه این مانع متفاوت بوده به طوری که سطح مقطع مربعی، دایره‌ای و مثلثی و نسبت انسدادهایی در حدود  $0.72-1.0$  را شامل می‌شود. نتایج تجربی برای بیشینه فشار تولید شده در این محفظه در مرجع [۱] گزارش شده و در اینجا برای اعتبارسنجی استفاده می‌شود.

<sup>۱</sup> Flame Surface Density (FSD)

## شبیه‌سازی LES انتشار شعله‌های پیش‌آمیخته

معادلات حاکم برای شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با فیلتر کردن معادلات بقای لحظه‌ای تراکم‌پذیر جرم، مومنتوم، انرژی و گونه‌ها در فضای مکانی در کنار معادلات حالت و نرخ واکنش حاصل می‌شوند. با فرض یک واکنش کلی تک مرحله‌ای برگشت ناپذیر معادله بقای گونه‌ها با یک معادله‌ی بقا برای متغیر پیشرفت  $b$  که بین یک، برای واکنشگرها، و صفر برای محصولات احتراق، تغییر می‌کند، جایگزین می‌شود. در این معادلات کمیت‌های مجهولی نظیر: تنش‌های زیرشبکه رینولدز، شارهای متغیر پیشرفت واکنش و آنتالپی زیرشبکه، نرخ واکنش فیلتر شده و غیره باید مدل شوند.

در کار حاضر برای مدل‌سازی تنش‌های رینولدز زیر شبکه از مدل توربولانسی تک معادله‌ای و به‌منظور مدل‌سازی شارهای زیرشبکه آنتالپی و متغیر پیشرفت واکنش از فرض انتقال گرادیان استفاده شده است. عدد پرنتل آشفته  $Pr_t$  و عدد اشمیت آشفته  $Sc_t$  نیز برابر  $0.4$  در نظر گرفته شده‌اند [۴]. همچنین نرخ واکنش شیمیایی فیلتر شده توسط مدل احتراقی چین‌خوردگی سطح شعله<sup>۲</sup> مدل شده است [۸]. در این مدل شعله به‌صورت یک سطح چین خورده که مواد سوخته و نسوخته را از هم جدا می‌کند در نظر گرفته شده و یک معادله‌ی انتقال برای متغیر پیشرفت واکنش  $\tilde{b}$  به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{b})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}\tilde{u}\tilde{b}) - \nabla \cdot (\bar{\rho}D\nabla\tilde{b}) = -\bar{\rho}_u S_u \Xi |\nabla\tilde{b}| \quad (1)$$

$\rho_u$  چگالی گازهای نسوخته،  $S_u$  سرعت سوزش شعله آرام و  $D$  ضریب نفوذ زیرشبکه می‌باشند.  $\Xi$  چین‌خوردگی شعله زیرشبکه را می‌توان به‌صورت نسبت سرعت سوزش شعله آشفته به آرام ( $S_u/S_{u0}$ ) در نظر گرفت. عبارت سمت راست تساوی نیز برابر نرخ واکنش زیرشبکه  $\dot{\omega} = \bar{\rho}_u S_u \Xi |\nabla\tilde{b}|$  می‌باشد. برای محاسبه  $\Xi$  از یک معادله انتقال استفاده می‌شود که جزئیات آن را می‌توان در مرجع ۸ یافت.

## شبیه‌سازی عددی و میدان محاسباتی

میدان محاسباتی، محفظه احتراقی با ابعاد  $195 \times 545 \times 195 \text{ mm}^3$  می‌باشد که توسط شبکه‌ای با تعداد  $120 \times 275 \times 100$  گره پوشش داده شده است. برای رسیدن به دقت مناسب، گام‌های زمانی نیز به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که عدد CFL کمتر از  $0.2$  باقی بماند.

شرایط اولیه به‌صورت مواد اولیه ساکن با دمای  $300 \text{ K}$ ، فشار  $1 \text{ bar}$  و متغیر پیشرفت واکنش یک می‌باشد. سرعت سوزش شعله آرام برای مخلوط استوکیومتری پروپان-هوا برابر  $0.446 \text{ m/s}$  در نظر گرفته می‌شود [۵]. جرقه نیز با تنظیم متغیر پیشرفت برابر  $0$  و برگزیدن دمای آدیاباتیک شعله در نیم‌کره‌ای به شعاع  $15 \text{ mm}$  در مرکز انتهای بسته محفظه مدل می‌شود.

## نتایج و بحث پیرامون آن

### محاسبه انرژی جنبشی آشفته حل شونده

بر اساس تعریف LES کیفیت هر شبیه‌سازی LES، وابسته به درصدی از انرژی جنبشی آشفته ایست که در طول شبیه‌سازی حل می‌شود. این درصد به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{k_{res}}{k_{tot}} = \frac{k_{res}}{k_{res} + k_{SGS}} \quad (2)$$

$k_{tot}$  انرژی جنبشی آشفته کل جریان،  $k_{res}$  انرژی جنبشی آشفته حل شونده و  $k_{SGS}$  انرژی جنبشی آشفته زیرشبکه (باقی مانده) می‌باشند. در کار حاضر  $k_{SGS}$  به صورت تابعی از زمان و مکان از حل یک معادله انتقال حاصل می‌شود. برای محاسبه  $k_{res}$  نیز از نوسانات سرعت حل شونده (rms سرعت‌های آشفته) در جهت‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  یعنی:  $u'$ ،  $v'$  و  $w'$  استفاده می‌شود به طوری که:

$$k_{res} = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) = \frac{1}{2}\overline{u'_i u'_i} \quad (3)$$

نوسانات سرعت‌های حل شونده، از تفاضل سرعت متوسط از سرعت لحظه‌ای حاصل می‌شوند. بنابراین خواهیم داشت:

$$k_{res} = \frac{1}{2}(\overline{u_i - \bar{u}_i})(\overline{u_i - \bar{u}_i}) \quad (4)$$

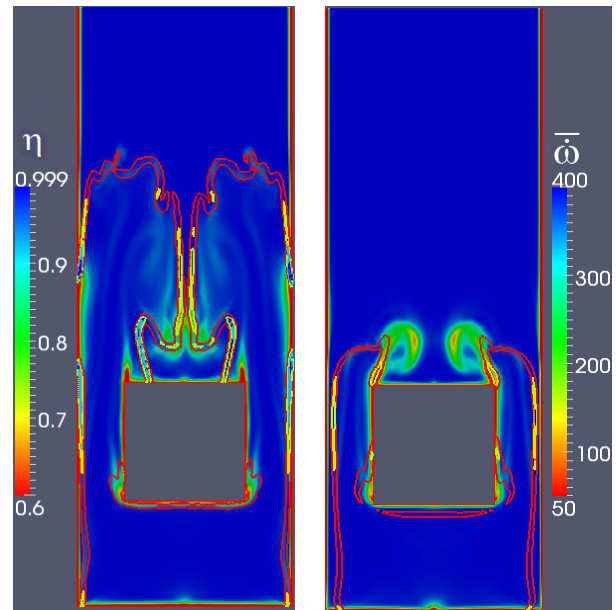
در اینجا برای محاسبه مقادیر متوسط سرعت، از متوسط‌گیری زمانی در بازه‌هایی به طول  $0.5 \text{ ms}$  استفاده می‌شود.

گابا و همکاران [۶] نشان دادند که در شبیه‌سازی LES انتشار شعله پیش‌آمیخته در کانال مانع دار اگر کمتر از  $70$  درصد از انرژی جنبشی جریان بر روی شبکه محاسباتی قابل حل باشد، کیفیت شبیه‌سازی ناکافی می‌باشد. در اینجا نیز به منظور نشان دادن کیفیت شبیه‌سازی LES حاضر بر روی شبکه محاسباتی انتخاب شده، کانتر پارامتر  $\eta$  برای مانع مربعی S4 با نسبت انسداد  $0.55$ ، که بیشترین سطح آشفستگی را در بین موانع مختلف ایجاد می‌کند، در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در اکثر نواحی جریان و به‌خصوص در جبهه شعله مقدار  $\eta$  بیشتر از  $0.7$  بوده که این موضوع کیفیت نسبتاً مناسب شبکه محاسباتی را نشان می‌دهد.

### مقایسه نتایج حاضر با نتایج تجربی ابراهیم و همکاران

به منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی LES حاضر، به مقایسه تاریخچه‌های فشار (نسبی) ثبت شده در کار حاضر و کار تجربی ابراهیم و مزی [۱] پرداخته می‌شود. در شکل ۲ تاریخچه فشار ثبت شده در حسگر P1 (نصب شده در انتهای بسته محفظه) به‌دست آمده از کار حاضر و نتایج تجربی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این نتایج در حضور مانع مربعی S3 با نسبت انسداد  $0.41$  به‌دست آمده است. نتایج تجربی برای مانع S3، سه بیشینه نسبتاً زیاد را نشان می‌دهند. بیشینه اول که در حدود  $25 \text{ mbar}$  می‌باشد، مربوط به فشار لازم برای ترکاندن پوشش پلاستیکی نصب شده در انتهای بسته محفظه در کار تجربی می‌باشد که قبل از رسیدن شعله به مانع اتفاق می‌افتد. به هنگام عبور شعله از مانع به علت اندرکنش شعله و میدان جریان آشفته حاصل از ریزش گردابه در پشت مانع، نرخ واکنش به‌شدت

افزایش یافته و فشار تا حدود ۳۰ mbar افزایش می‌یابد. در نهایت بیشینه سوم در نمودار تاریخچه فشار مربوط به برگشت شعله به درون ناحیه به تله افتاده در پشت مانع و سوزاندن حجم گازهای نسوخته آن ناحیه می‌باشد [۱].



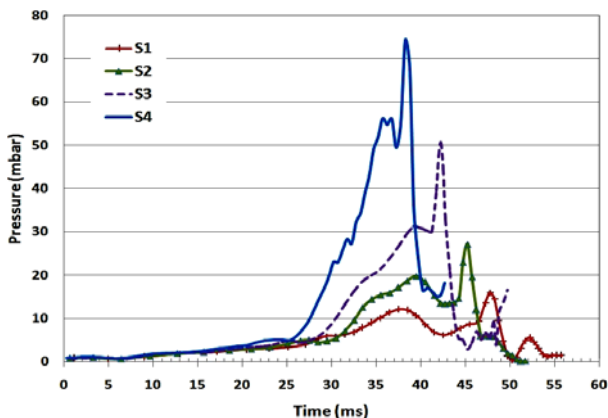
شکل ۱: کانتورهای متغیر  $\eta$  در کنار خطوط هم نرخ واکنش برای دوزمان ۳۰ ms و ۳۵ ms (از راست به چپ) در حضور مانع مربعی S4 (BR=۰/۵۵). جهت انتشار شعله از پایین به بالا می‌باشد.

رفتار نمودار فشار پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی عددی برای مانع S3 با توجه به عدم در نظر گرفتن پوشش پلاستیکی و همچنین ثبت مقادیر فشار تنها تا وقتی که جبهه شعله درون محفظه احتراق قرار دارد، روند نسبتاً مشابهی را پیش‌بینی می‌کند. البته برای حسگر P1 بیشینه فشار محاسبه شده در حدود ۲۴٪ و برای حسگر P2 (نصب شده در نزدیکی انتهای باز محفظه) در حدود ۷٪ بیشتر از نتایج تجربی مرجع ۱ می‌باشد. همچنین زمان‌های رخداد بیشینه فشار برای حسگر P1 کمتر از یک درصد و برای حسگر P2 در حدود ۳٪ با نتایج تجربی تفاوت دارد.

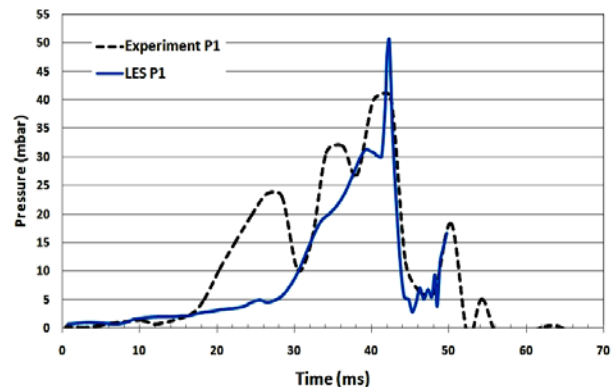
کرک‌پاتریک و همکاران [۴] نیز به شبیه‌سازی LES انتشار شعله پیش‌آمیخته در حضور مانع S3 پرداخته‌اند. در نتایج آنها فشار حاصل از شتاب‌گیری شعله در حضور مانع S3 در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد کمتر از نتایج تجربی گزارش شده است. مطالعات حاضر نشان می‌دهد که شرایط اولیه در نظر گرفته شده (متغیر پیشرفت و دما) برای ناحیه جرعه بر روی فشار بیشینه حاصل از انفجار و زمان رخداد آن تاثیر قابل توجهی دارد؛ به طوری که با بیشتر انتخاب کردن متغیر پیشرفت واکنش (کمتر شدن دما) فشار بیشینه نیز کاهش یافته و زمان رخداد آن نیز افزایش می‌یابد. از آنجایی که در مرجع ۴ شرط اولیه برای ناحیه جرعه به صورت  $b=0/5$  در نظر گرفته شده (ناحیه نیم سوخته)، پس قابل انتظار است که فشار محاسبه شده کمتر از نتایج تجربی به دست آمده باشد. اختلاف نتایج حاضر با نتایج تجربی با افزایش نسبت انسداد بیشتر می‌شود. به طوری که مثلاً برای مانع S4، این اختلاف به حدود ۵۰٪ می‌رسد.

#### بررسی اثر نسبت انسداد بر فشار حاصل از انتشار شعله

در شکل ۳ تاثیر نسبت انسداد بر فشار حاصل از انتشار شعله پیش‌آمیخته در حضور موانع مربعی مورد مطالعه قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می‌شود، نسبت انسداد اثرات قابل توجهی بر فشار بیشینه حاصل از انتشار شعله دارد؛ به طوری که فشار بیشینه با افزایش نسبت انسداد، افزایش می‌یابد. این موضوع به خاطر آن است که با افزایش اندازه مانع سرعت جت جریان عبوری از روی مانع و به دنبال آن سطح آشفستگی جریان (به خصوص در دنباله مانع) و اندازه چین‌خوردگی سطح شعله افزایش یافته و نهایتاً با افزایش نرخ واکنش، نوسانات فشاری و سطح فشار حاصله نیز افزایش می‌یابد. البته موضوع مهم دیگر حجم مواد نسوخته به تله افتاده در پایین دست موانع می‌باشد، که با افزایش اندازه مانع افزایش می‌یابد. از آنجایی که فشار بیشینه هنگامی که جبهه شعله به سمت مواد نسوخته برگشته و باعث سوزاندن آنها می‌شود، روی می‌دهد، پس با افزایش حجم این مواد نسوخته، انرژی آزاد شده در این مرحله بیشتر بوده و فشار بیشینه افزایش می‌یابد.



شکل ۳: تاریخچه فشار ثبت شده در حسگر P1 در حضور موانع مربعی S1 (BR=۰/۹)، S2 (BR=۰/۲۶)، S3 (BR=۰/۴۱) و S4 (BR=۰/۵۵).



شکل ۲: تاریخچه فشار ثبت شده در حسگر P1 در حضور مانع مربعی S3 (BR=۰/۴۱)، منحنی خط‌چین نتایج تجربی [۱] و منحنی خط پر نتایج حاضر می‌باشند.

سطح فشار و بیشینه فشار حاصل از انفجار را افزایش می‌دهد. همچنین این افزایش فشار تحت تاثیر هندسه موانع می‌باشد. به‌طور کلی فشار بیشینه حاصل از انفجار تحت تاثیر اغتشاشات حاصل از حضور موانع، که به‌صورت یک دنباله بسیار آشفته ظاهر می‌شود، و همچنین حجم مواد نسوخته به تله افتاده در پشت موانع می‌باشد. در بین موانع مورد مطالعه مانع دایره‌ای کمترین فشار را در محفظه ایجاد می‌کند که این موضوع به‌خاطر حجم کم مواد نسوخته به تله افتاده و همچنین سطح کم آشفته‌گی القا شده در جریان توسط این مانع می‌باشد. از آنجایی که مقدار فشار بیشینه تحت تاثیر آزاد سازی انرژی حاصل از انجام واکنش می‌باشد، پیش‌بینی دقیق نرخ واکنش زیرشبکه مهم‌ترین چالش مطالعات عددی در این حیطه می‌باشد. البته همانطور که اشاره شد، شرایط اولیه در نظر گرفته شده برای ناحیه جرقه نیز تاثیر به‌سزایی بر فشار بیشینه دارد، که بررسی سیستماتیک این موضوع نیازمند مطالعه مستقلی می‌باشد.

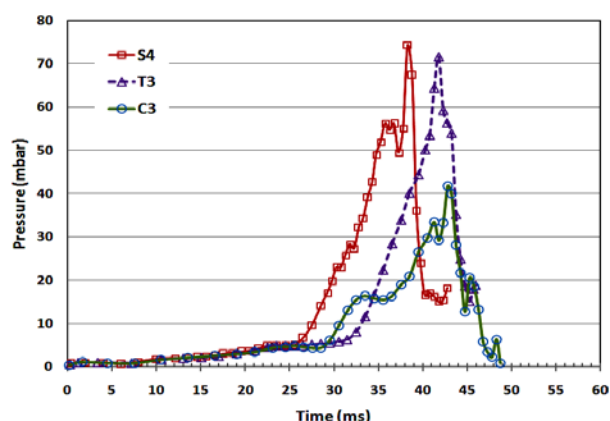
#### مراجع

- [1] Ibrahim, S.S., and Masri, A.R., 2001. "The Effects of Obstructions on Overpressure Resulting from Premixed Flame Deflagration". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 14, pp. 213–221.
- [2] Hargrave, G.K., Jarvis, S., and Williams, T.C., 2002. "A Study of Transient Flow Turbulence Generation during Flame/Wall Interactions in Explosions". *Measurement Science and Technology*, 13, pp. 1036–1042.
- [3] Hall, R., Masri, A.R., Yaroshchik, P., and Ibrahim, S.S., 2009. "Effects of Position and Frequency of Obstacles on Turbulent Premixed Propagating Flames". *Combustion and Flame*, 156, pp. 439–446.
- [4] Kirkpatrick, M.P., Armfield, S.W., Masri, A.R., and Ibrahim, S.S., 2003. "Large Eddy Simulation of a Propagating Turbulent Premixed Flame". *Flow, Turbulence and Combustion*, 70, pp. 1–19.
- [5] Masri, A.R., Ibrahim, S.S., and Cadwallader, B.J., 2006. "Measurements and Large Eddy Simulation of Propagating Premixed Flames". *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30, pp. 687–702.
- [6] Gubba, S.R., Ibrahim, S.S., Malalasekera, W., and Masri, A.R., 2009. "An Assessment of Large Eddy Simulation of Premixed Flames Propagating Past Repeated Obstacles". *Combustion Theory and Modelling*, 13(3), pp. 513–540.
- [7] Di Sarli, V., Di Benedetto, A., and Russo, G., 2010. "Sub-grid Scale Combustion Models for Large Eddy Simulation of Unsteady Premixed Flame Propagation around Obstacles". *Journal of Hazardous Materials*, 180, pp. 71–78.
- [8] Weller, H.G., Tabor, G., Gosman, A.D., and Fureby, C., 1998. "Application of a Flame-Wrinkling LES Combustion Model to a Turbulent Mixing Layer". *Proceedings of the Combustion Institute*, 28, pp. 899–907.

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود زمان مورد نیاز برای رسیدن به بیشینه فشار با افزایش نسبت انسداد کاهش می‌یابد. زمان رخداد بیشینه فشار برای موانع مربعی S1 (BR=/.۹)، S2 (BR=/.۲۶)، S3 (BR=/.۴۱) و S4 (BR=/.۵۵)، به ترتیب برابر ۴۷، ۴۵، ۴۲، ۳۸ میلی‌ثانیه، برای موانع دایره‌ای C1 (BR=/.۱۰)، C2 (BR=/.۳۳)، C3 (BR=/.۵۵) و C4 (BR=/.۷۲) به ترتیب برابر ۴۸، ۴۶، ۴۲، ۳۸ میلی‌ثانیه و برای موانع مثلثی T1 (BR=/.۱۳)، T2 (BR=/.۳۲) و T3 (BR=/.۵۳) به ترتیب برابر ۴۸، ۴۵، ۴۱ میلی‌ثانیه به‌دست آمده است.

#### بررسی اثر هندسه موانع بر فشار حاصل از انتشار شعله

در شکل ۴ نتایج عددی حاضر برای تاریخچه فشار ثبت شده در حسگر P1 در حضور موانعی با سطح مقطع دایره‌ای (C3)، مربعی (S4) و مثلثی (T3) که دارای نسبت انسدادهایی تقریباً برابر هستند با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشینه فشار برای مانع C3 بسیار کمتر از دو مانع دیگر است. این موضوع تحت تاثیر دو عامل می‌باشد. از طرفی هندسه دایره‌ای به علت نداشتن گوشه‌های تیز و داشتن شکل (تأحدودی) آیرودینامیکی سطح آشفته‌گی جریان را کمتر از دو مانع دیگر بالا برده و از طرف دیگر در این مانع حجم مخلوط نسوخته به تله افتاده در پشت مانع بسیار کمتر از دو مانع دیگر می‌باشد. حجم مخلوط نسوخته متناسب با طول جفت گردابه‌های تشکیل شده در پشت موانع می‌باشند. طول این جفت گردابه‌ها در بیشترین حالت برای مانع دایره‌ای (C3)، مربعی (S4) و مثلثی (T3) به ترتیب برابر ۱۷، ۴۷ و ۸۰ میلی‌متر می‌باشد. این موضوع باعث می‌شود تا بیشینه فشار ایجاد شده توسط مانع مثلثی قابل مقایسه با بیشینه فشار حاصل از مانع مربعی، که بیشترین سطح آشفته‌گی جریان را القا می‌کند، باشد.



شکل ۴: تاریخچه فشار ثبت شده در حسگر P1 در حضور موانع دایره‌ای (C3)، مربعی (S4) و مثلثی (T3) با نسبت انسدادهای ۰.۵۳-۰.۵۵.

#### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر نسبت انسداد و هندسه موانع بر روی تاریخچه فشار و فشار بیشینه حاصل از انفجارهای گازی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج عددی حاضر به خوبی نشان دادند که افزایش نسبت انسداد،