

بررسی عددی تاثیر نسبت انسداد و هندسه موانع بر شتاب‌گیری شعله و فشار حاصل از انفجار گازی

سبحان امامی کوبائی* و کیومرث مظاهری**

دانشگاه تربیت مدرس، بخش مهندسی مکانیک، آزمایشگاه دینامیک گازها
(دریافت: ۱۳۹۱/۲/۱۰، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۱/۸/۳، پذیرش: ۹۱/۹/۶)

هدف از مقاله حاضر بررسی حضور موانع صلب، با نسبت انسداد و هندسه‌های مختلف، بر روی شتاب‌گیری شعله و فشار حاصل از انتشار شعله پیش‌آمیخته با استفاده از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ است. در این تحقیق، نرخ واکنش زیرشبکه با استفاده از مدل احتراقی چین‌خوردگی سطح شعله و لر محاسبه شده است. در کار حاضر، سه نوع مانع با سطح مقطع دایره‌ای، مربعی و مثلثی با نسبت انسدادهایی در حدود ۱۰ تا ۷۲ درصد مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاضر نشان می‌دهند که موانع مربعی سریع‌ترین شتاب‌گیری شعله و موانع دایره‌ای کندترین شتاب‌گیری را به همراه دارند. همچنین، سرعت فواره جریان عبوری از روی موانع و سطح آشفستگی حاصل از موانع با افزایش نسبت انسداد افزایش یافته و در نتیجه سرعت انتشار شعله افزایش می‌یابد. حجم مواد نسوخته به‌تله‌افتاده در پشت موانع نیز، که نقش بسزایی در فشار بیشینه حاصل از انتشار شعله دارد، برای موانع مثلثی بیشترین مقدار را دارد. بیشینه فشار با افزایش نسبت انسداد افزایش یافته و نرخ افزایش وابسته به هندسه مانع است؛ به طوری که مانع مربعی بیشترین فشار و مانع دایره‌ای کمترین فشار را ایجاد می‌کند. زمان رخداد بیشینه فشار نیز با افزایش نسبت انسداد کاهش یافته و وابسته به هندسه مانع است.

کلیدواژگان: شعله پیش‌آمیخته آشفته، شتاب‌گیری شعله، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، فشار انفجار، موانع صلب

مقدمه

انفجارهای گازی به گروهی از فرایندهای احتراقی پیش‌آمیخته اطلاق می‌شوند که در آن‌ها موج شعله اولیه در اثر اندرکنش با محیط پیرامون (نظیر موانع و مرزهای صلب پیچیده) به سرعت شتاب گرفته و فشار نسبتاً زیادی را تولید می‌کند. شناخت سازوکاری که باعث افزایش سطح فشار حاصل از انفجار می‌شود، از آنجایی که باعث کاهش ریسک خطر و افزایش ایمنی در طراحی سازه‌هایی نظیر سکوه‌های اکتشاف نفت و گاز و صنایع بالادستی و پایین‌دستی صنعت نفت (و هر جایی که در معرض نشستی مواد قابل احتراق قرار دارد) می‌شود، موضوع مطالعات مختلفی قرار گرفته است. در خلال این مطالعات، نقش آشفستگی به‌عنوان سازوکاری برای افزایش سرعت سوزش شعله به‌خوبی شناخته شده است. هنگامی که شعله با یک جریان آشفته برخورد می‌کند، گردابه‌های آشفته بر روی جبهه شعله اثر گذاشته و باعث چین‌وچروک خوردن سطح شعله^۱ و یا حتی، بسته به شدت آشفستگی جریان، موجب تقسیم‌شدن جبهه شعله به جبهه‌های کوچک‌تر می‌شوند [۱]. این موضوع باعث افزایش مساحت سطح شعله و به‌دنبال آن افزایش نرخ سوزش می‌شود. همچنین، با ورود گردابه‌های کوچک مقیاس به ساختار شعله (ناحیه پیش‌گرم و یا حتی ناحیه واکنش)، ضخامت کلی شعله افزایش یافته و نرخ انتقال گرما و جرم به ناحیه پیش‌گرم شدت

* دانشجوی دکتری (ایمیل: S_emami@modares.ac.ir)

** استاد - نویسنده مخاطب (ایمیل: Kiumars@modares.ac.ir)

می‌یابد. البته ورود گردابه‌هایی با سرعت گردش بالا به درون ساختار شعله بسته به نرخ کرنش محلی ایجاد شده ممکن است باعث ایجاد خاموشی‌های محلی نیز بشود [۱].

اندرکنش شعله و آشفته‌گی یک اندرکنش دو طرفه است؛ یعنی احتراق نیز می‌تواند باعث افزایش شدت آشفته‌گی و یا حتی مستهلک کردن آن (آرام‌سازی مجدد جریان) شود. از آنجایی که شعله یک موج انبساطی است، با شروع حرکت جبهه شعله (با شروع انبساط گرمائی) در انتهای بسته محفظه احتراق، گازهای نسوخته در جلو جبهه شعله شتاب گرفته و میدان جریانی در جلو شعله شکل می‌گیرد. در بسیاری از کاربردهای صنعتی که موانع صلب و مرزهای پیچیده‌ای در جلو شعله قرار دارند، اندرکنش بین این جریان گاز و موانع از طریق دو سازوکار باعث افزایش آشفته‌گی در جریان، افزایش سطح شعله و سرعت سوزش شعله می‌شود. اول، ریزش گردابه^۱، که باعث ایجاد گردابه‌هایی در مقیاس‌های گوناگون در جلو شعله می‌شود و سازوکار دوم تشکیل نواحی چرخشی (در پایین دست موانع) که باعث می‌شود شعله به درون گردابه کشیده شده و به دور خود بپیچد. همچنین، با حضور موانع، جریان گازهای نسوخته به صورت یک فواره^۲ به نسبت پرسرعت از روی موانع عبور کرده و باعث افزایش بیشتر آشفته‌گی در جریان پایین دست می‌شود [۲]. البته واضح است که سرعت این فواره تحت تاثیر نسبت انسداد (BR)^۳ حاصل از موانع است. در کنار این موارد با توجه به اینکه دمای واکنشگرها، T ، با عبور شعله به شدت افزایش می‌یابد، لزجت سینماتیکی ν ($\nu \propto T^{1.7}$) و به دنبال آن عدد رینولدز محلی Re نیز تغییر می‌کند که این اثر ممکن است به آرام‌سازی مجدد جریان آشفته منجر شود [۱].

با توجه به مطالب فوق، واضح است که فهم فیزیکی و مدل‌سازی دقیق شعله‌های پیش‌مخلوط آشفته در محفظه‌های بسته و در حضور موانع صلب (انفجار گازی)، به عنوان یک مسئله چالش برانگیز، به ویژه در بیان دقیق نرخ سوزش و ساختار ناحیه واکنش، شناخته می‌شود. اگرچه بحث تاثیر موانع و مرزهای پیچیده بر شتاب‌گیری شعله و فشار حاصل از انفجار در مقیاس‌های بزرگ به اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی باز می‌گردد، اما با پیشرفت وسایل اندازه‌گیری آزمایشگاهی 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 [۲-۹]. از آن جمله می‌توان به مطالعات ابراهیم و همکاران [۲-۴] در بررسی اثر هندسه موانع و نسبت انسداد بر سرعت و فشار حاصل از انتشار شعله پیش‌آمیخته پروپان-هوای استوکیومتری اشاره کرد. در کار آن‌ها موانعی با سطح مقطع دایره‌ای، مثلثی و مربعی در کنار موانعی با سطح مقطع لوزی شکل و مستطیلی (مانع تخت) با نسبت انسدادهای ۱۰ تا ۷۲ درصد مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که فشار بیشینه با افزایش نسبت انسداد افزایش می‌یابد. مانع مستطیلی و پس از آن مانع مربعی بیشترین فشار را ایجاد کرده در حالی که مانع استوانه‌ای کمترین فشار را باعث می‌شود. هارگریو و همکاران [۵] نیز به مطالعه تاثیر هندسه مانع و نسبت هم‌ارزی مخلوط سوخت و هوا بر شتاب‌گیری شعله و فشار حاصل از انفجار پرداختند. در نتایج آن‌ها نیز بین سه مانع با سطح مقطع دایره‌ای، مربعی و مستطیلی (مانع تخت)، بیشینه فشار ایجاد شده در محفظه برای مانع مستطیلی بیشترین مقدار خود را دارد. این موضوع به علت آن است که هندسه مانع مستطیلی بیشترین مقدار حجم مواد نسوخته به تله‌افتاده در پشت مانع را باعث شده و همچنین گوشه‌های تیز در مانع مستطیلی یک دنباله بسیار آشفته با گردابه‌های کوچک در پشت مانع ایجاد کرده و باعث چین‌خوردگی شدیدی در سطح شعله می‌شود. مطالعه تجربی دیگری نیز توسط پاتل و همکاران [۶] بر روی شتاب‌گیری شعله پیش‌آمیخته در حضور موانع صلب متوالی و تاثیر این موانع بر روی رفتار نمودار تاریخچه فشار انجام گرفته است. کنت و همکاران [۷] نیز محفظه جدیدی را برای بررسی انتشار شعله پیش‌آمیخته پروپان-هوای استوکیومتری در حضور موانع مختلف معرفی کردند. در این محفظه به منظور افزایش سطح آشفته‌گی ایجاد شده در جریان پایین دست شعله از چند صفحه مغشوش‌کننده^۴ به صورت متوالی و در نهایت از یک

1. Vortex shedding
2. Jet
3. Blockage Ratio
4. Baffle plate

مانع با سطح مقطع مربعی استفاده شده است. در این مطالعه آن‌ها به بررسی تاثیر مکان و تعداد صفحات مغشوش‌کننده بر ساختار شعله، نرخ سوزش و بیشینه فشار حاصله از انتشار شعله پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که با افزایش تعداد صفحات مغشوش‌کننده (از یک تا سه)، بیشینه فشار داخل محفظه نیز افزایش می‌یابد. همچنین، آن‌ها نشان دادند که قراردادن موانع مشابه در فاصله دورتر از نقطه جرقه باعث افزایش بیشتر فشار بیشینه می‌شود.

مطالعات بیشتر بر روی این محفظه را هال و همکاران [۸] انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که موقعیت موانع تاثیر قابل توجهی بر فشار بیشینه و ساختار شعله دارد. بیشترین فشار محفظه هنگامی اتفاق می‌افتد که صفحات مغشوش‌کننده در فاصله کمتری نسبت به هم قرار داشته باشند تا از زوال آشفته‌گی جریان و شعله جلوگیری شود. از آنجایی که مطالعات تجربی صورت‌گرفته همگی بر روی محفظه‌هایی با نسبت طول به عرض (L/D) بیشتر از ۲ متمرکز بوده‌اند، پارک و همکاران [۹] با معرفی محفظه‌ای با نسبت طول به عرض کوچک ($L/D=0.25$) به بررسی اثر شکل و نسبت انسداد موانع بر شتاب‌گیری شعله و فشار حاصله در محفظه‌ای با سطح خروجی بزرگ پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که برخلاف محفظه‌هایی با نسبت L/D زیاد، فشار انفجار برای هندسه‌های مشابه با افزایش نسبت انسداد کاهش می‌یابد. از طرفی فشار بیشینه برای موانع مربعی کمتر از موانع دایره‌ای گزارش شده است. آن‌ها این نتایج دور از انتظار را به فاصله کم موانع تا خروجی محفظه مربوط دانسته و معتقدند این فاصله کم موانع از توسعه‌یافتگی کامل شعله می‌شود.

به موازات کارهای تجربی اشاره‌شده، مطالعات عددی مختلفی نیز صورت گرفته است [۱۰-۱۹]. در این تحقیقات، مدل‌های عددی مورد استفاده برای شبیه‌سازی انفجارهای گازی در مقیاس آزمایشگاهی، بر اساس دو رویکرد معادلات متوسط‌گیری شده زمانی ناویر-استوکس ناپایا (URANS)^۱ (به‌عنوان نمونه مراجع [۱۰]، [۵] و [۱۱]) و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES)^۲ (برای مثال مراجع [۱۲] تا [۱۹]) بنا شده است. بررسی این مطالعات نشان می‌دهد که رویکرد URANS از دقت لازم در بیان دقیق ویژگی‌های اساسی انتشار شعله نظیر شتاب‌گیری و کاهش سرعت در عبور از موانع، عدم تقارن شکل شعله، چین‌خوردگی جبهه شعله و شکل‌گیری بسته‌های نسوخته در پشت موانع برخوردار نیست. از آنجایی که پیش‌بینی دقیق این ویژگی‌ها بر پیش‌بینی دقیق سرعت شعله و فشار بیشینه تاثیر بسزایی دارد، کاربرد مدل LES برای این گونه مسائل گسترش بیشتری پیدا کرده است. البته یکی از مشکلات موجود در مدل LES نحوه برخورد با جمله نرخ واکنش زیرشبکه می‌باشد. از آنجایی که شعله‌های در حال انتشار در محفظه‌های مورد مطالعه در مقیاس‌های آزمایشگاهی در رژیم‌های احتراقی فلیمنت^۳ و نواحی واکنشی باریک^۴ قرار می‌گیرند، فرض فلیمنت آرام برای مدل‌سازی احتراق در این گونه مسائل مناسب است [۱۲-۱۷]. در این حالت، فرض می‌شود که نرخ واکنش عمدتاً تحت کنترل فرایندهای انتقالی بوده و نقش فرایندهای شیمیایی ناچیز است. از این رو، در تمامی مطالعات LES که بر روی انتشار شعله پیش‌آمیخته ناپایا در عبور از موانع صلب در مقیاس آزمایشگاهی انجام گرفته است [۱۳-۱۹]، از یک واکنش تک‌مرحله‌ای بین واکنشگرها و محصولات استفاده شده و نرخ واکنش زیرشبکه از مدل فلیمنت چگالی سطح شعله FSD^۵ محاسبه می‌شود.

در بسیاری از مطالعات مرور شده [۱۲-۱۵] از یک مدل FSD جبری ساده بهره برده شده است. نتایج حاصله پیش‌بینی‌های قابل قبولی از مکان و ساختار شعله و اندرکنش بین جریان و آشفته‌گی به‌دست می‌دهند. البته فشار بیشینه پیش‌بینی شده در این تحقیقات اختلاف ۲۰ تا ۳۰ درصدی با نتایج تجربی دارد که به علت مدل احتراقی زیرشبکه آنهاست [۱۲]. ابراهیم و همکاران [۱۶]، با استفاده از فرمولاسیون FSD دینامیکی پیش‌بینی‌های بسیار دقیق‌تری از رفتار نمودار تاریخچه فشار به‌دست آوردند.

1. Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes
2. Large Eddy Simulation
3. Flamelet
4. Thin reaction zones
5. Flame Surface Density

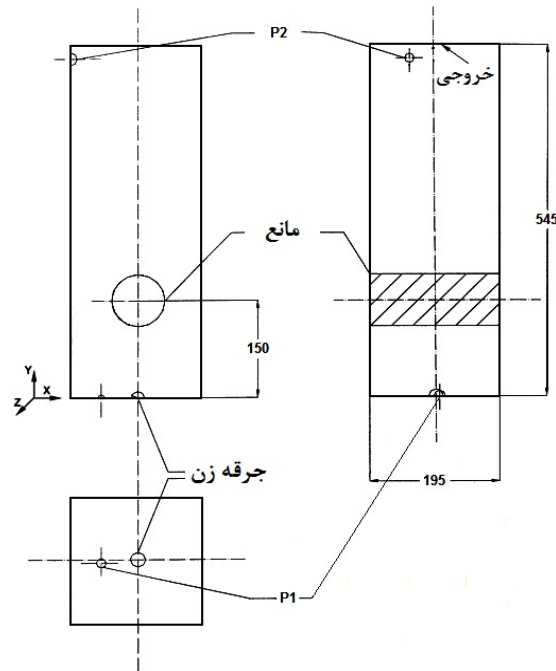
در مطالعات دیگری که توسط دی سارلی و همکاران [۱۷-۱۹] بر روی انتشار شعله ناپایا در عبور از موانع پشت سر هم انجام گرفت، چین خوردگی سطح شعله زیر شبکه با استفاده از قانون توانی^۱ مدل شد. نتایج عددی آن‌ها هم‌خوانی خوبی در زمینه شکل شعله در حال انتشار، زمان رسیدن شعله به موانع، نمودار مکانی سرعت شعله و بردار سرعت در جلو جبهه شعله، با نتایج تجربی دارند. آن‌ها همچنین تاثیر چین خوردگی سطح شعله زیر شبکه بر روی ساختار شعله را مطالعه کردند. برای این کار آن‌ها در شبیه‌سازی خود از چین خوردگی سطح شعله زیر شبکه در طول زمان انتشار شعله صرف نظر کردند. نتایج حاصل نشان داد که گردابه‌های بزرگ مقیاس نقش اصلی را در شکل‌گیری ساختار شعله بازی می‌کنند. به عبارت دیگر گردابه‌های زیر شبکه تاثیری بر رفتارهای کیفی شعله نظیر شکل و ساختار شعله، ترتیب رژیم‌های احتراقی در طول مسیر، افزایش و کاهش سرعت بعد از عبور از موانع و روند نمودار فشار ندارند. با این حال، مدل کردن چین خوردگی‌های سطح شعله زیر شبکه برای رسیدن به پیش‌بینی‌های کمی از سرعت شعله و فشار بیشینه ضروری است [۱۷]. با اینکه استفاده از مدل‌های احتراقی زیر شبکه در کدهای CFD با موفقیت همراه بوده است، اما هنوز دستیابی به مدل زیر شبکه احتراقی بهینه (از لحاظ دقت، هزینه محاسباتی، دامنه کاربرد، به‌کارگیری آسان و کامل بودن) برای مدل‌سازی انفجار گازی با استفاده از روش LES در دست مطالعه است.

با بررسی مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت که اثر پدیده‌های محلی ذکر شده، نظیر ریزش گردابه، تشکیل نواحی چرخشی (جفت گردابه‌ها) در پشت موانع و تاثیر فواره جریان در عبور از اطراف موانع، بر روی فرایند کلی انفجار، سرعت شعله و فشار ایجاد شده در محفظه و همچنین طبیعت اندرکنش بین جبهه شعله پیش‌آمیخته و ساختارهای آشفته حاصل از موانع، هنوز به‌خوبی فهمیده نشده است. از این رو، در مقاله حاضر، سعی شده تا نقش عوامل یاد شده در شتاب‌گیری شعله و ساختار آن، با انتخاب موانعی با نسبت انسدادها و هندسه‌های مختلف، یا به عبارت بهتر موانعی که سطح آشفستگی و مقیاس‌های طولی متفاوتی را ایجاد می‌کنند، بهتر نشان داده شود. در کنار این موضوع، دقت حلگر احتراقی XiFoam از بسته نرم‌افزاری این‌فوم^۲ ویرایش ۱/۷ نیز که در آن از مدل احتراقی زیر شبکه چین خوردگی سطح شعله ولر^۳ [۲۰] استفاده می‌شود، مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطالعه موردی صورت گرفته برای این منظور، انتشار شعله در محفظه احتراق در حضور سه مانع مختلف با سطح مقطع دایره‌ای، مربعی و مثلثی (متساوی‌الاضلاع) با نسبت انسدادهای ۱۰ تا ۷۲ درصد است که نتایج تجربی مربوط به ساختار شعله و سرعت انتشار آن در مرجع ۲ و نتایج مربوط به فشار محفظه در مرجع ۳ گزارش شده است.

مشخصات محفظه احتراق مورد مطالعه

این محفظه، که در حدود ۲۰L حجم دارد، از یک استوانه مربعی با سطح مقطعی به مساحت $195 \times 195 \text{ mm}^2$ و ارتفاع ۵۴۵mm تشکیل شده است. یک انتهای این محفظه، که جرعه در آنجا زده می‌شود، بسته و انتهای دیگر آن به اتمسفر باز است. این محفظه توسط مخلوط پروپان (C_3H_8)-هوای ساکن با نسبت هم‌ارزی ۱/۰ پر شده است. یک مانع صلب نیز در فاصله ۱۵۰mm از محل جرعه 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 ۱۰ تا ۷۲ درصد را شامل می‌شود. طرحواره‌ای از این محفظه در شکل ۱ نمایش داده شده است. همچنین، هندسه موانع مختلف به همراه اندازه آن‌ها در جدول ۱ آورده شده‌اند. نتایج تجربی مربوط به مکان شعله و فشار تولید شده در محفظه در مراجع ۲ و ۳ گزارش شده و در اینجا برای اعتبارسنجی استفاده می‌شود. در مرجع ۳ از دو فشارسنج پیزوالکتریک با دامنه ۰ تا ۱bar، زمان پاسخ ۰/۱ms و خطای کلی کمتر از ۰/۵ درصد برای اندازه‌گیری فشار استفاده شده است. مکان قرارگیری این دو حسگر نیز در شکل ۱ قابل مشاهده است.

1. Power-law
2. OpenFOAM
3. Weller



شکل ۱- نمای سه گانه از پیکربندی محفظه احتراق، تمام اندازه‌ها به میلی‌مترند [۲]

جدول ۱- هندسه موانع مختلف مورد بررسی در کار حاضر [۲]

نوع مانع	نشانه	ابعاد (mm)	نسبت انسداد (درصد)
دایره	C1	قطر = ۱۹۰	۹٫۷
دایره	C2	قطر = ۶۳٫۵	۳۲٫۶
دایره	C3	قطر = ۱۰۶٫۷	۵۴٫۷
دایره	C4	قطر = ۱۳۹٫۶	۷۱٫۶
مربع	S1	ضلع = ۱۷٫۰	۸٫۷
مربع	S2	ضلع = ۵۰٫۸	۲۶٫۰
مربع	S3	ضلع = ۷۹٫۳	۴۰٫۷
مربع	S4	ضلع = ۱۰۸٫۰	۵۵٫۴
مثلث	T1	ضلع = ۲۴٫۵	۱۲٫۶
مثلث	T2	ضلع = ۶۲٫۰	۳۱٫۸
مثلث	T3	ضلع = ۱۰۳٫۰	۵۲٫۸

معادلات حاکم در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

معادلات حاکم در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با فیلترگیری از معادلات بقای لحظه‌ای جرم، تکانه، انرژی و گونه‌ها در فضای مکانی حاصل می‌شوند. در این معادلات کمیت‌های مجهولی وجود دارند که نیازمند مدل‌کردن هستند تا در نهایت دستگاه معادلات حاکم بسته شود. این جمله‌ها شامل تنش‌های زیرشبکه رینولدز $(\tau_{ij}^{SGS} = \bar{\rho}(u_i \tilde{u}_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j))$ که بیانگر اثر مقیاس‌های کوچک (باقی‌مانده) بر مقیاس‌های بزرگ (حل‌شونده) هستند، شارهای گونه‌ها $(\bar{\rho}(\tilde{u}_j \tilde{Y}_k - \tilde{u}_j \tilde{Y}_k))$ و آنتالپی $(q_{SGS} = \bar{\rho}(\tilde{u}_j \tilde{h} - \tilde{u}_j \tilde{h}))$ زیرشبکه و نرخ واکنش شیمیایی فیلترشده $(\bar{\omega})$ هستند. به طوری که ρ ، h و Y_k بیانگر مولفه‌های سرعت، چگالی، آنتالپی کل و کسر جرمی گونه k ام هستند.

با استفاده از مدل لزجت گردابه‌ای اسماگورنسکی^۱، تنش‌های رینولدز در مقیاس زیرشبکه با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آیند:

$$\tau_{ij}^{SGS} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk}^{SGS} = -2\bar{\mu}_{SGS} \left(\tilde{S}_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tilde{S}_{kk} \right)$$

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

μ_{SGS} لزجت گردابه‌ای، S_{ij} تانسور نرخ کرنش، δ_{ij} دلتای کرونکر و τ_{kk}^{SGS} قسمت ایزوتروپیک تانسور تنش زیرشبکه بوده که به انرژی جنبشی زیرشبکه، k_{SGS} ، ربط داده می‌شود:

$$\tau_{kk}^{SGS} = \bar{\rho} (\widetilde{u_k u_k} - \widetilde{\tilde{u}_k \tilde{u}_k}) = 2\bar{\rho} k_{SGS} \quad (2)$$

البته در اینجا این عبارت در جمله فشار فیلترگیری شده ادغام شده [۱] و در نتیجه معادله تکانه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(2(\bar{\mu} + \bar{\mu}_{SGS}) \left[\tilde{S}_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tilde{S}_{kk} \right] \right) \quad (3)$$

در روابط فوق بالانویس‌های (-) و (~) به ترتیب نشانگر فیلترگیری معمولی و فیلترگیری جرمی فاو^۲ هستند. در کار حاضر، برای مدل‌سازی لزجت گردابه‌ای، از مدل آشفتگی تک‌معادله‌ای استفاده می‌شود. در این مدل، لزجت گردابه‌ای به صورت رابطه $\mu_{SGS} = \bar{\rho} C_k \sqrt{k_{SGS}} \Delta$ تعریف می‌شود که در آن C_k ضریب ثابت و Δ پهناي فیلتر، با اندازه شبکه $\Delta = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3}$ ربط داده می‌شود. k_{SGS} نیز از حل معادله انتقال زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial (\bar{\rho} k_{SGS})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j k_{SGS})}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_{SGS} + \mu) \frac{\partial k_{SGS}}{\partial x_j} \right] = P_k - C_e \frac{\bar{\rho} k_{SGS}^{3/2}}{\Delta} \quad (4)$$

ضرایب ثابت C_k و C_e در حدود ۰٫۱ و ۱٫۰ در نظر گرفته شده‌اند [۲۱]. جمله منبع P_k نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_k = -\tau_{ij} : \tilde{S}_{ij} = \left[2\mu_{SGS} \left(\tilde{S}_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tilde{S}_{kk} \right) \right] : \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \bar{\rho} k_{SGS} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \quad (5)$$

علامت ":" ضرب داخلی دوگانه است.

به منظور مدل‌سازی شار آنتالپی زیرشبکه نیز از فرض انتقال گرادیان ساده استفاده می‌شود، به طوری که [۱۵]:

$$q_{SGS} = \widetilde{u_j h} - \tilde{u}_j \tilde{h} \approx -\frac{\mu_{SGS}}{\text{Pr}_t} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} \quad (6)$$

برای جریان مادون صوت حاضر که عدد ماخ آن کوچک است (حداکثر عدد ماخ ۰٫۳ است)، می‌توان از جمله گرمایش لزجی $(\Phi = \tau_{ij} : (\partial u_j / \partial x_i))$ صرف‌نظر کرده [۱] و نهایتاً با فرض عدد لوئیس (Le) برابر ۱ معادله انرژی فیلترشده را به صورت زیر ساده کرد:

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{h})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h}) = \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{\bar{\mu}}{\text{Pr}} + \frac{\bar{\mu}_{SGS}}{\text{Pr}_t} \right) \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} \right) \quad (7)$$

با فرض یک واکنش کلی تک‌مرحله‌ای برگشت‌ناپذیر، معادله بقای گونه‌ها با یک معادله بقا برای متغیر پیشرفت b که بین یک، برای واکنشگرها، و صفر، برای محصولات احتراق، تغییر می‌کند، جایگزین می‌شود:

$$b = \frac{Y_f}{Y_{fu}} \quad (8)$$

1. Smagorinsky
2. Favre

به طوری که Y_f کسر جرمی سوخت و Y_{fu} کسر جرمی سوخت در مخلوط نسوخته (واکنشگرها) است. در این حالت، با فرض انتقال گرادیان ساده، شار متغیر پیشرفت واکنش زیر شبکه به صورت زیر مدل شده:

$$\widetilde{u}_j \bar{b} - \widetilde{u}_j \tilde{b} \approx -\frac{\mu_{SGS}}{Sc_t} \frac{\partial \tilde{b}}{\partial x_j} \quad (9)$$

و در نهایت معادله بقای متغیر پیشرفت واکنش به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{b})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \widetilde{u}_j \tilde{b}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{\bar{\mu}}{Sc} + \frac{\bar{\mu}_{SGS}}{Sc_t} \right) \frac{\partial \tilde{b}}{\partial x_j} \right) + \bar{\rho}_u \bar{\omega} \quad (10)$$

در این رابطه ρ_u چگالی گازهای نسوخته و Pr_t و Sc_t عدد پرنتل و عدد اشمیت آشفته بوده که در اینجا برابر ۰٫۴ در نظر گرفته شده اند [۱۲].

از آنجایی که ضخامت شعله پیش آمیخته کوچکتر از اندازه شبکه مورد استفاده در LES است، جبهه شعله بر روی شبکه محاسباتی حل نمی شود. بنابراین، شعله یک پدیده زیر شبکه باقی مانده که اندرکنش آن با آشفتگی زیر شبکه باید مدل شود. در اینجا، به منظور مدل سازی جمله نرخ واکنش زیر شبکه، از مدل احتراقی FSW^۱ که برای اولین بار توسط ولر و همکاران [۲۰] به عنوان جایگزینی برای مدل های چگالی سطح شعله (FSD) متداول ارائه شد، استفاده شده است. در این مدل شعله به صورت یک سطح چین خورده، که مواد سوخته و نسوخته را از هم جدا می کند، در نظر گرفته می شود. نرخ واکنش زیر شبکه در این مدل همانند دیگر مدل های چگالی سطح شعله از رابطه $\bar{\omega} = S_u \Xi |\nabla \tilde{b}|$ به دست می آید، به طوری که S_u سرعت سوزش شعله آرام و Ξ ضریب چین خوردگی شعله زیر شبکه اند. Ξ را می توان به صورت نسبت سرعت سوزش آشفته به آرام در نظر گرفته و با چگالی سطح شعله به صورت $\Sigma = \Xi |\nabla \tilde{b}|$ ربط داد. به عبارت دیگر، Ξ چگالی چین خوردگی سطح شعله و بیانگر مساحت سطح شعله در مقیاس زیر شبکه تقسیم بر تصویر آن در جهت انتشار است. روابط مختلفی برای محاسبه کمیت های Ξ و S_u ارائه شده است، اما در مدل ولر از دو معادله انتقال برای محاسبه این کمیت ها به صورت زیر استفاده می شود [۲۲]:

$$\frac{\partial \Xi}{\partial t} + \widetilde{u}_s \cdot \nabla \Xi = G \Xi - R (\Xi - 1) + (\sigma_s - \sigma_t) \Xi \quad (11)$$

به طوری که \widetilde{u}_s سرعت فیلتر شده سطحی شعله محلی، $G \Xi$ و $R(\Xi - 1)$ نرخ های تولید و اضمحلال اغتشاش زیر شبکه و σ_s و σ_t نرخ های کرنش حل شونده (بیانگر تاثیر کرنش و انتشار بر چین خوردگی سطح شعله) هستند. ضرایب R و G جمله های مجهولی اند که با استفاده از رابطه سرعت شعله ارائه شده توسط گولدر [۲۳] به صورت زیر مدل می شوند:

$$G = R \left(\frac{\Xi_{eq} - 1}{\Xi_{eq}} \right), \quad R = \frac{0.28}{\tau_\eta} \frac{\Xi_{eq}^* - 1}{\Xi_{eq}^*} \quad (12)$$

$$\Xi_{eq}^* = 1 + 0.62 \left(\frac{u'_\Delta}{S_u} \right)^{1/2} \text{Re}_\eta \quad (13)$$

$$\Xi_{eq} = 1 + 2(1 - b) (\Xi_{eq}^* - 1) \quad (14)$$

به طوری که τ_η مقیاس زمانی کولموگروف، u'_Δ شدت اغتشاش زیر شبکه و Re_η عدد رینولدز در مقیاس کولموگروف است. با فرض تعادل در نرخ تولید و اضمحلال اغتشاش در مقیاس زیر شبکه، ضریب چین خوردگی تعادلی سطح شعله، Ξ_{eq} معرفی می شود. \widetilde{u}_s نیز به طور مشابه با سرعت فیلتر شده شرطی گاز نسوخته، \tilde{u} ، مربوط می شود:

$$\widetilde{u}_s = \tilde{u} + \left(\frac{\bar{\rho}_u}{\bar{\rho}} - 1 \right) S_u \Xi \tilde{n} - \frac{\nabla \cdot (\bar{\rho} D \nabla \tilde{b})}{\bar{\rho} |\nabla \tilde{b}|} \tilde{n} \quad (15)$$

در اینجا بردار نرمال شعله حل‌شونده به صورت $\hat{n} = \nabla \tilde{b} / |\nabla \tilde{b}|$ محاسبه می‌شود. نرخ کرنش حل‌شونده، σ_t ، از مجموع \tilde{u} و سرعت شعله آشفته زیرشبکه، $S_u \Xi$ ، و با کم کردن قسمت انبساطی^۱ از نرخ کرنش در جهت انتشار \hat{n} به دست می‌آید:

$$\sigma_t = \nabla \cdot (\tilde{u} + S_u \Xi \tilde{n}) - \tilde{n} \cdot \left[\nabla (\tilde{u} + S_u \Xi \tilde{n}) \right] \cdot \tilde{n} \quad (16)$$

باید توجه داشت که در این مدل انبساط گاز در اثر احتراق تنها در جهت \hat{n} فرض می‌شود. σ_s نیز به طور مشابه به دست می‌آید، با این تفاوت که تاثیرات کرنش میدان جریان و کرنش انتشار (در اثر انتشار جبهه شعله خمیده) به طور جداگانه در نظر گرفته شده‌اند تا تاثیر خمیدگی شعله به خوبی مدل شود. در محدوده چین‌خوردگی‌های بسیار زیاد (با فرض همگن بودن)، از تاثیرات انقباض و انبساط میدان جریان صرف‌نظر شده است؛ از این رو تاثیر کرنش انتشار نصف چین‌خوردگی در جهت \hat{n} است [۲۱].

$$\sigma_s = \frac{\nabla \tilde{u} - \hat{n} \cdot (\nabla \tilde{u}) \cdot \tilde{n}}{\Xi} + \frac{(\Xi + 1) \left\{ \nabla \cdot (S_u \tilde{n}) - \hat{n} \cdot \left[\nabla (S_u \tilde{n}) \right] \cdot \tilde{n} \right\}}{2\Xi} \quad (17)$$

همان‌طور که اشاره شد در کد حاضر برای به دست آوردن سرعت شعله آرام نیز، از یک معادله انتقال استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial S_u}{\partial t} + \tilde{u}_s \cdot \nabla S_u = -\sigma_s S_u + \sigma_s S_u^\infty \frac{(S_u^0 - S_u)}{(S_u - S_u^\infty)} \quad (18)$$

$$S_u^\infty = S_u^0 \max(1 - \sigma_s / \sigma_{ext}, 0)$$

σ_{ext} نرخ کرنش خاموشی (از طول مارکشتین^۲ با برون‌یابی $S_u \rightarrow 0$ به دست می‌آید) و S_u^0 سرعت شعله آرام اولیه (در غیاب کشیدگی و چین‌خوردگی) است. در کار حاضر σ_{ext} برابر 4000 s^{-1} انتخاب شده است [۲۴].

روش حل معادلات و مباحث عددی

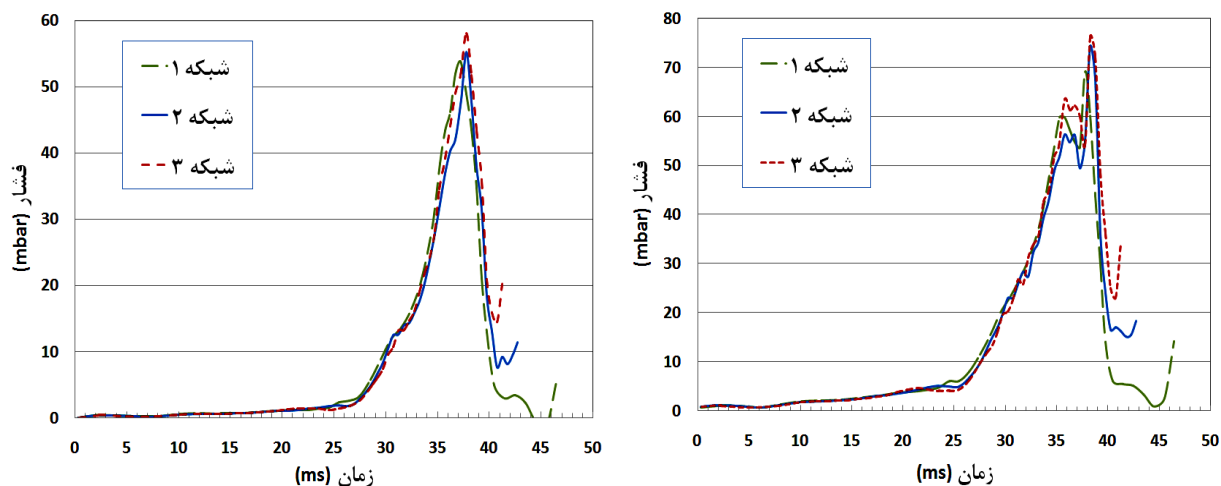
در حلگر XiFoam معادلات ناویر استوکس واکنشی با استفاده از روش حجم محدود بر روی شبکه هم‌مکان^۳ گسسته می‌شوند. انتگرال‌گیری زمانی با استفاده از روش پس‌رو مرتبه دوم ضمنی صورت گرفته است. همچنین، از تقریب تفاضل مرکزی مرتبه دوم برای جمله‌های نفوذ، جابه‌جایی و گرادیان فشار در معادلات تکانه استفاده می‌شود. در معادلات بقای انرژی، گونه‌ها (معادله b) و انرژی جنبشی آشفته (k) از تقریب تفاضل مرکزی مرتبه دوم برای جمله‌های نفوذ، و به‌منظور اجتناب از مشکلات حاصل از نوسانات حل، از یک روش TVD^۴ برای جمله‌های جابه‌جایی استفاده شده است. در این روش، در نزدیکی ناپیوستگی‌ها از روش بالادستی^۵ و در نواحی هموار از تقریب تفاضل مرکزی استفاده می‌شود. این تغییر توسط محدودکننده شار سوپی^۶ انجام می‌گیرد. جمله‌های جابه‌جایی در معادلات Ξ و S_u نیز به‌وسیله روش TVD فوق تقریب زده می‌شوند. برای حل مسئله جفت‌شدگی میدان‌های سرعت و فشار از الگوریتم تصحیح فشار PISO^۷، که یک روش تکراری است، استفاده شده است.

میدان محاسباتی محفظه احتراقی با ابعاد $195 \times 545 \times 195 \text{ mm}$ است که شعله منتشرشده در آن از مانع صلب و در حضور شرایط مرزی دیوار صلب عبور می‌کند. شبیه‌سازی در مختصات کارتزین غیریکنواخت سه‌بعدی برای جریان تراکم‌پذیر صورت گرفته است. شبکه محاسباتی در کنار دیواره‌ها ریزتر و در نزدیکی خروجی محفظه بزرگ‌تر انتخاب شده است. برای

1. Dilatational component
 2. Markstein
 3. Collocated
 4. Total Variation Diminishing
 5. Upwind
 6. Sweby
 7. Pressure Implicit with Splitting of Operators

بررسی دقت شبکه مورد نیاز، به منظور استقلال جواب از شبکه محاسباتی، سه شبکه عددی مختلف با اندازه‌های $98 \times 225 \times 78$ (شبکه ۱)، $120 \times 275 \times 100$ (شبکه ۲) و $142 \times 327 \times 130$ (شبکه ۳) برای حل جریان در حضور مانع S4 (جدول ۱) به کار گرفته شد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، تاریخچه زمانی فشار ثبت‌شده در دو حسگر P1 و P2 برای این سه شبکه محاسباتی با یکدیگر مقایسه شده است. اگرچه رفتار نمودارها اندکی متفاوت است، اما زمان رخداد بیشینه فشار و مقدار آن برای شبکه‌های ۲ و ۳ بسیار به یکدیگر نزدیک است. البته این مقایسه برای نمودار مکان شعله بر حسب زمان نیز انجام گرفته و هر سه نمودار پیش‌بینی‌هایی بسیار شبیه به هم ارائه کرده‌اند. در نهایت، پس از مقایسه نتایج و با توجه به محدودیت‌های سخت‌افزاری، شبکه $120 \times 275 \times 100$ (در حدود ۳ میلیون گره) در جهت‌های x ، y و z به عنوان شبکه محاسباتی انتخاب شده است. برای رسیدن به دقت مناسب، گام‌های زمانی نیز به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که عدد CFL^۱ کمتر از ۰٫۲ (باقی بماند [۲۱])، به طوری که گام‌های زمانی انتخاب‌شده در بازه $1e-5$ تا $1e-6$ ثانیه قرار می‌گیرند. شبیه‌سازی‌های حاضر با استفاده از یک سیستم پردازش موازی خوشه‌ای^۲ انجام گرفته است. این مجموعه شامل ۱۰ گره محاسباتی بوده که هر گره از یک پردازشگر دوهسته‌ای (در مجموع ۲۰ هسته محاسباتی) Intel Pentium D با سرعت پردازش ۳٫۴GHz، به همراه ۳GB حافظه قابل دسترسی (RAM)، تشکیل شده است. مدت زمان شبیه‌سازی برای هر مانع در حدود ۱۰۰ ساعت بوده است.

شرایط اولیه به صورت مواد اولیه ساکن با دمای ۳۰۰K، فشار ۱bar و متغیر پیشرفت واکنش یک است. سرعت سوزش شعله آرام برای مخلوط استوکیومتری پروپان-هوا برابر 0.466 m/s در نظر گرفته می‌شود [۱۳]. جرعه با تنظیم متغیر پیشرفت برابر صفر در نیم‌کره‌ای به شعاع ۱۵mm در مرکز انتهای بسته محفظه مدل می‌شود. شایان ذکر است که شرایط اولیه در نظر گرفته شده برای جرعه (شرایط اولیه برای b) بر زمان‌های به دست آمده و مقدار بیشینه فشار در تحقیق حاضر تاثیرگذار است که بررسی این موضوع و تاثیر مدل‌سازی ناحیه جرعه بر دینامیک شعله نیازمند تحقیقات بیشتری است. شرایط مرزی بی‌دررو و عدم لغزش، برای دیواره‌های عمودی و افقی و سطوح مانع، اعمال شده است. در انتهای باز محفظه احتراق نیز، به منظور جلوگیری از انعکاس امواج تراکمی منتشرشده در جلو شعله و تاثیر آن بر میدان فشار داخل محفظه، از شرط مرزی غیرانعکاسی استفاده می‌شود.



شکل ۲- شبیه‌سازی LES از تاریخچه فشار ثبت‌شده در حسگرهای P1 (سمت راست) و P2 (سمت چپ) در حضور مانع مربعی S4 (BR=۵۵٪) برای شبکه‌های محاسباتی مختلف

1. Courant-Friedrichs-Lewy
2. Beowulf cluster

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 آشفته‌ای است که در طول شبیه‌سازی حل می‌شود. پوپ [۲۵] معتقد است در یک شبیه‌سازی LES باید حداقل ۸۰ درصد از انرژی جنبشی آشفته جریان حل شود. این درصد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{k_{res}}{k_{tot}} = \frac{k_{res}}{k_{res} + k_{SGS}} \quad (19)$$

به طوری که k_{tot} انرژی جنبشی آشفته کل جریان، k_{res} انرژی جنبشی آشفته حل‌شونده و k_{SGS} انرژی جنبشی آشفته زیرشبکه (باقی‌مانده) هستند. در کار حاضر، به k_{SGS} به صورت تابعی از زمان و مکان از حل معادله ۴ به دست می‌آید. برای محاسبه k_{res} نیز از نوسانات سرعت حل‌شونده در جهت‌های x ، y و z یعنی u' ، v' و w' و یا به عبارت بهتر از ریشه دوم متوسط مجذورات^۱ (rms) سرعت‌های نوسانی استفاده می‌شود، به طوری که:

$$k_{res} = \frac{1}{2} (\overline{v'_{rms}{}^2}) = \frac{1}{2} (\overline{u'^2 + v'^2 + w'^2}) = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (20)$$

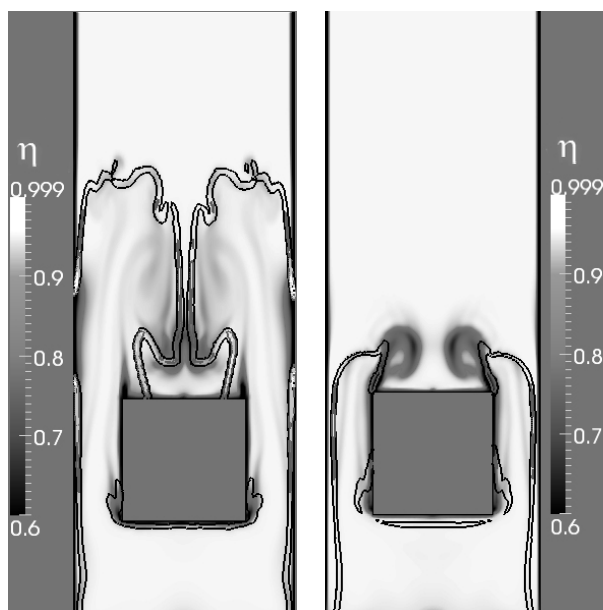
نوسانات سرعت‌های حل‌شونده، از تفاضل سرعت متوسط از سرعت لحظه‌ای حاصل می‌شوند. بنابراین، خواهیم داشت:

$$k_{res} = \frac{1}{2} \overline{(u_i - \bar{u}_i)(u_i - \bar{u}_i)} \quad (21)$$

در اینجا، برای محاسبه مقادیر متوسط سرعت، از متوسط‌گیری زمانی در بازه‌هایی به طول ۰٫۵ms استفاده می‌شود. همان‌طور که از تعریف η مشخص است، مقدار آن بین صفر و یک قرار خواهد داشت، به طوری که با میل کردن η به سمت یک تمامی حرکت‌های آشفته حل‌شده و حل موجود به حل شبیه‌سازی مستقیم عددی DNS^۲ میل می‌کند. مقدار η در شبیه‌سازی LES توسط پهنای فیلتر Δ کنترل می‌شود، به طوری که با کوچک شدن Δ سهم انرژی جنبشی حل‌شونده افزایش یافته و مقدار η افزایش می‌یابد. از آنجایی که در کار حاضر پهنای فیلتر با اندازه شبکه رابطه مستقیم دارد و تغییرات Δ توسط تغییرات اندازه شبکه صورت می‌گیرد، بنابراین اندازه شبکه را می‌توان به عنوان پارامتر کنترل‌کننده η دانست.

سیلک و همکاران [۲۶] نشان دادند که برای جریان‌هایی با رینولدز بالا حل کردن ۷۵ تا ۸۵ درصد از انرژی جنبشی آشفته جریان توسط شبیه‌سازی LES کفایت کرده و در این صورت شبکه محاسباتی به اندازه کافی ریز خواهد بود. کمپ و همکاران [۲۷] نیز در شبیه‌سازی LES جریان احتراقی غیرپیش‌آمیخته نشان دادند که اگر کمتر از ۷۰ درصد از انرژی جنبشی جریان بر روی شبکه محاسباتی حل شود، کیفیت شبیه‌سازی ناکافی است. گابا و همکاران [۱۵] نیز، با توجه به این یافته‌ها در شبیه‌سازی LES انتشار شعله پیش‌آمیخته در لوله مانع‌دار، از شبکه‌ای استفاده کردند که بیش از ۷۰ درصد از انرژی جنبشی جریان در جبهه شعله را حل کند. در اینجا نیز، به منظور نشان دادن کیفیت شبیه‌سازی LES حاضر بر روی شبکه محاسباتی انتخاب شده، کانتور پارامتر η برای مانع S4، که بیشترین سطح آشفته‌گی را در بین موانع مختلف ایجاد می‌کند، در شکل ۳ نشان داده شده است. در این تصاویر، کانتور متغیر η در پس زمینه (در بازه‌ای از ۰٫۶ تا ۰٫۹۹۹) و خطوط هم‌نرخ واکنش، که نشانگر جبهه شعله هستند، قابل مشاهده‌اند. در اکثر نواحی جریان و به ویژه در جبهه شعله، مقدار η بیشتر از ۰٫۷ بوده که این موضوع کیفیت نسبتاً مناسب شبکه محاسباتی انتخابی را نشان می‌دهد.

1. Root mean square
2. Direct Numerical Simulation



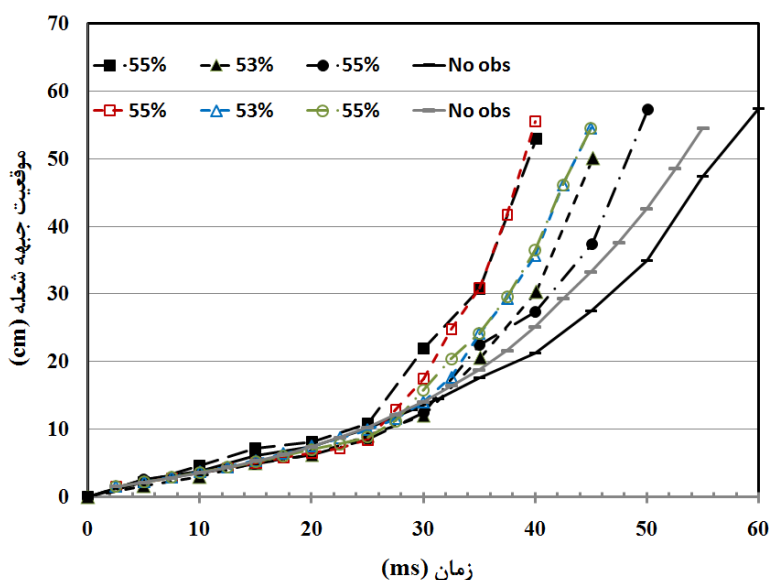
شکل ۳- کانتورهای متغیر η در کنار خطوط هم‌نرخ واکنش برای دو زمان 30ms و 35ms (از راست به چپ) به‌دست آمده از شبیه‌سازی LES حاضر در حضور مانع مربعی S4 ($BR=55\%$)، جهت انتشار شعله از پایین به بالاست

ارزیابی و اعتبارسنجی نتایج حاضر

در شکل ۴، مکان جبهه شعله در زمان‌های مختلف برای موانع دایره‌ای (C3)، مربعی (S4) و مثلثی (T3)، که دارای نسبت انسدادهایی بین ۵۳ تا ۵۵ درصدند، نشان داده شده است. در شبیه‌سازی LES حاضر، همانند مراجع [۱۳] تا [۱۶]، مکان شعله با اندازه‌گیری دورترین نقطه لبه حمله شعله (جایی که متغیر پیشرفت برابر ۰٫۵ است) نسبت به انتهای بسته محفظه تعریف می‌شود. به‌منظور ارزیابی دقت شبیه‌سازی حاضر، نمودارهای به‌دست آمده در کنار نتایج تجربی مزری و همکاران [۲] رسم شده‌اند. در این شکل، نتایج شبیه‌سازی LES حاضر با نشانه‌های توخالی و نتایج تجربی با نشانه‌های توپر مشخص شده‌اند. از آنجایی که در کار تجربی جرعه تنها حجم کوچکی از مخلوط را مشتعل می‌کند، بنابراین تاخیری قبل از شروع انتشار شعله به‌وجود می‌آید. از آنجایی که در کار عددی شروع انتشار شعله از یک ناحیه نیم‌کره‌ای با متغیر پیشرفت صفر شروع می‌شود، این تاخیر زمانی در نظر گرفته نمی‌شود. با مقایسه نتایج عددی و تجربی برای حالت بدون مانع، مشاهده می‌شود که اگر این زمان تاخیر در حدود 2.5ms در نظر گرفته شود، زمان به‌دست آمده از کار حاضر برای موقعیت شعله 150mm (مکان قرارگیری موانع) با نتایج تجربی برابری می‌کند. با توجه به این موضوع، کلیه زمان‌های گزارش‌شده در این مقاله 2.5ms جابه‌جا شده‌اند. این روش در کار عددی کرک‌پاتریک و همکاران [۱۲] نیز به‌کار گرفته شده، به‌طوری که زمان‌های به‌دست آمده در کار آن‌ها برای مقایسه با نتایج تجربی به اندازه 12.5ms جابه‌جا شده است.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، برای تمامی هندسه‌های مانع (با نسبت انسدادهای بین ۵۳ تا ۵۵ درصد)، شعله در زمانی حدود 20 تا 25ms به مانع می‌رسد؛ به‌عبارت دیگر طی مراحل اولیه شتاب‌گیری شعله تا حدود 20 تا 25ms بعد از جرعه، مکان شعله به مقدار اندکی تحت تاثیر حضور موانع قرار داشته و شعله با سرعتی در حدود 4.5m/s به مسیر خود ادامه می‌دهد. پس از برخورد شعله با مانع، فاز شتاب‌گیری شعله به سمت انتهای باز محفظه آغاز می‌شود. شتاب‌گیری برای مانع مربعی بیشترین مقدار را دارد. برای این مانع شعله بعد از حدود 40ms از محفظه خارج می‌شود، در حالی که برای موانع مثلثی و دایره‌ای این مقدار برابر 45ms است. این موضوع نشان می‌دهد که سرعت شعله در حضور مانع مربعی نسبت به دو مانع دیگر بیشتر افزایش یافته است. البته در نتایج تجربی زمان خروج شعله برای هندسه‌های فوق به‌ترتیب در حدود 40ms ،

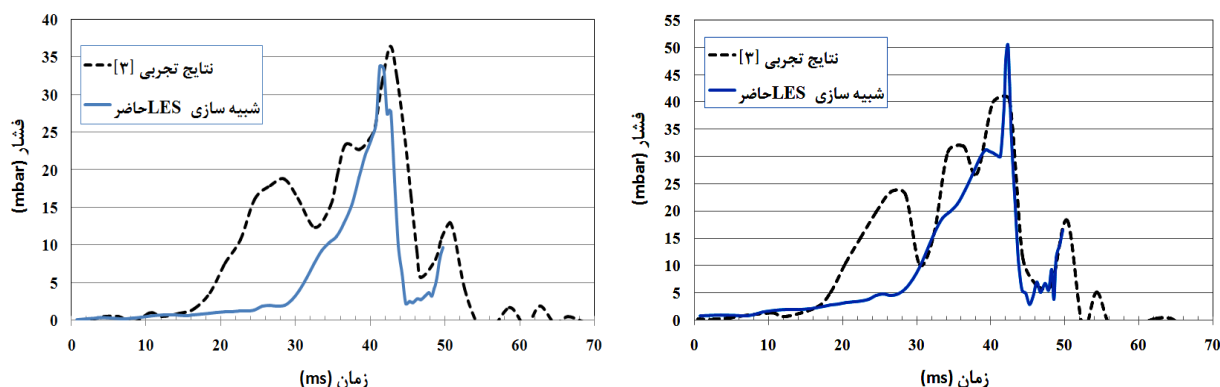
۴۷ms و ۵۰ms گزارش شده است. این موضوع نشان می‌دهد که سرعت شعله در کار حاضر برای موانع مثلثی و دایره‌ای بیشتر از واقعیت پیش‌بینی شده است. هنگامی که هیچ مانعی در لوله وجود ندارد، شبیه‌سازی حاضر نشان می‌دهد که شعله در حدود زمان ۵۵ms به انتهای باز محفظه می‌رسد، این در حالی است که نتایج تجربی ۶۰ms را گزارش می‌کنند. البته مقداری از این اختلاف به شرایط اولیه در نظر گرفته شده برای ناحیه جرقه باز می‌گردد. به علت ماهیت انبساطی شعله، لبه حمله شعله با سرعت θS_u (سرعت سوزش شعله آرام و θ ضریب انبساط حرارتی است، $\theta = T_b/T_u \approx \rho_u/\rho_b$) در جهت طولی منتشر می‌شود. بنابراین، انتخاب دما (که در اینجا وابسته به انتخاب متغیر پیشرفت است) برای ناحیه جرقه بر شتاب‌گیری شعله و جریان تاثیرگذار خواهد بود. با توجه به اینکه در کار تجربی نسبت چگالی گازهای سوخته به نسوخته در حدود ۱ به ۷ گزارش شده، به نظر انتخاب متغیر پیشرفت صفر برای ناحیه جرقه مناسب نیست، زیرا با انتخاب این متغیر پیشرفت نسبت چگالی گازهای سوخته به نسوخته در حدود ۱ به ۸/۵ تنظیم می‌شود.



شکل ۴- موقعیت جبهه شعله در زمان‌های مختلف برای موانع دایره‌ای (C3)، مربعی (S4) و مثلثی (T3) با نسبت انسدادهای ۵۳ تا ۵۵ درصد، نتایج شبیه‌سازی‌های عددی حاضر با نشانه‌های توخالی و نتایج تجربی مزی و همکاران [۲] با نشانه‌های توپر مشخص شده‌اند. نشانه‌های مربعی، مثلثی و دایره‌ای به ترتیب بیانگر موانع مربعی، مثلثی و دایره‌ای‌اند.

در شکل ۵ تاریخچه فشار ثبت‌شده در حسگرهای P1 و P2 به دست آمده از کار حاضر و نتایج تجربی ابراهیم و مزی [۳] با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این نتایج در حضور مانع S3 به دست آمده‌اند. نتایج تجربی برای مانع S3، سه بیشینه نسبتاً زیاد را نشان می‌دهند. با شروع جرقه، شعله شکل گرفته به صورت آرام به طرف مانع منتشر می‌شود. در طول همین دوره، به علت محدود شدن گازهای نسوخته به وسیله پوشش پلاستیکی قرار گرفته بر روی خروجی محفظه، فشار تا کمتر از ۲۵mbar افزایش می‌یابد. در این زمان پوشش پلاستیکی پاره شده و فشار تا حدود ۱۰mbar افت می‌کند. به هنگام عبور شعله از مانع، به علت اندرکنش شعله و میدان جریان آشفته حاصل از ریزش گردابه در پشت مانع، نرخ واکنش به شدت افزایش یافته و فشار تا حدود ۳۰mbar افزایش می‌یابد. در نهایت بیشینه سوم در نمودار تاریخچه فشار مربوط به برگشت شعله به درون ناحیه به تله‌افتاده در پشت مانع و سوزاندن حجم گازهای نسوخته آن ناحیه است [۳]. با این حال 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 محاسبه‌شده در

حدود ۲۵ درصد و برای حسگر P2 در حدود ۷ درصد بیشتر از نتایج تجربی گزارش شده است. همچنین، زمان‌های رخداد بیشینه فشار برای حسگر P1 کمتر از یک درصد و برای حسگر P2 در حدود ۳ درصد با نتایج تجربی تفاوت دارد. البته اختلاف نتایج حاضر با نتایج تجربی با افزایش نسبت انسداد بیشتر می‌شود. به طوری که مثلاً برای مانع S4، این اختلاف به حدود ۵۰ درصد می‌رسد. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش سطح آشفتگی ایجاد شده توسط مانع، مدل‌های زیرشبکه از توانایی کمتری در بیان فیزیک مسئله برخوردارند.

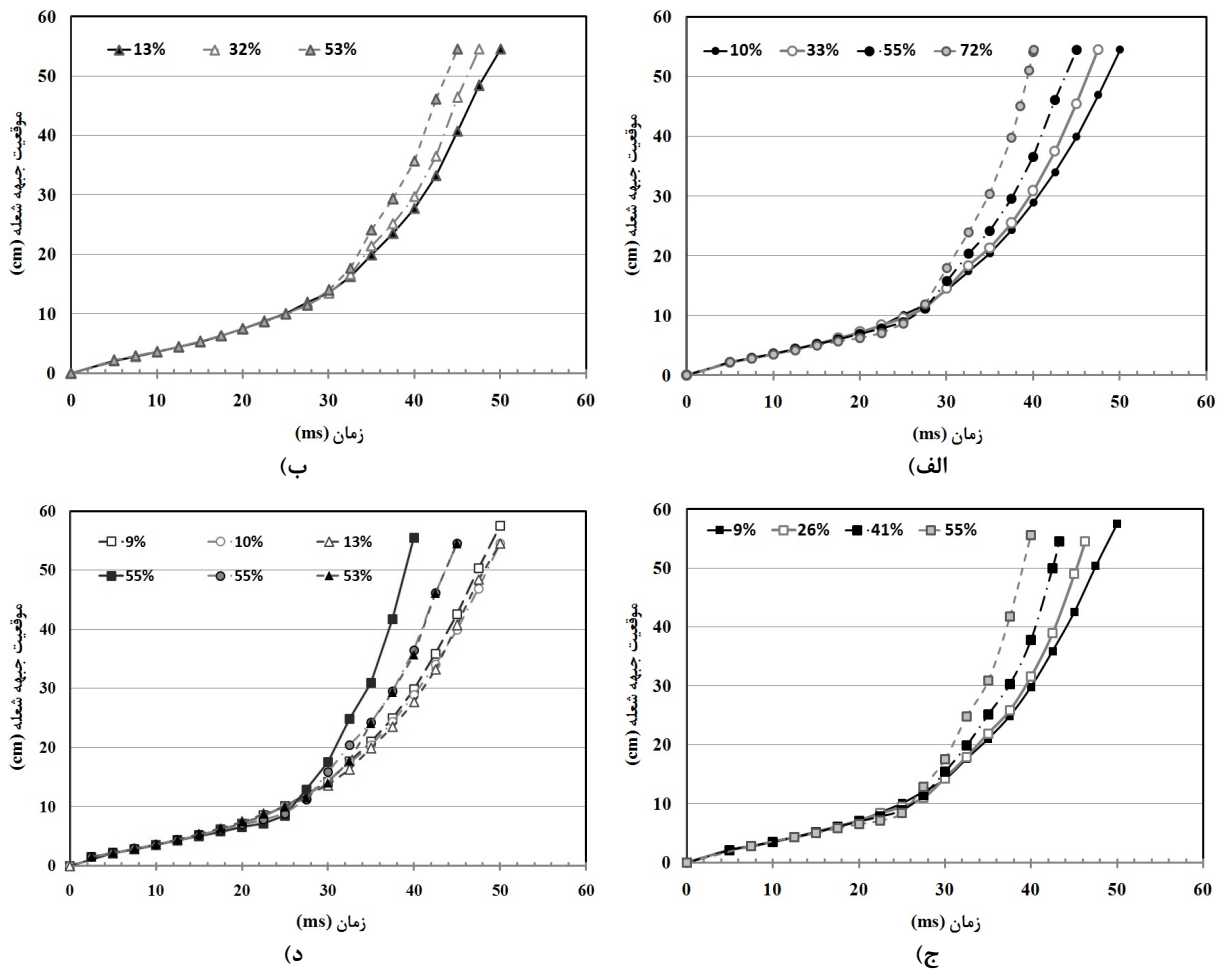


شکل ۵- تاریخچه فشار ثبت شده در حسگرهای P1 (سمت راست) و P2 (سمت چپ) در حضور مانع مربعی S3 (BR=۰.۴۱)، منحنی خط چین نتایج تجربی ابراهیم و مزی [۳] و منحنی خط پر نتایج LES حاضر است.

کرک پاتریک و همکاران [۱۲] نیز به شبیه‌سازی LES انتشار شعله متان-هوا 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. شایان ذکر است که مطالعات حاضر نشان می‌دهد که شرایط اولیه در نظر گرفته شده برای ناحیه جرقه بر روی فشار بیشینه و زمان رخداد آن نیز 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. مطالعه دقیق تاثیر خواص ناحیه جرقه بر دینامیک شعله و سطح فشار ایجاد شده نیازمند بررسی سیستماتیک جداگانه‌ای است. نامانسن و همکاران [۱۰] نیز به شبیه‌سازی عددی URANS مسئله حاضر پرداخته‌اند. آن‌ها تنها فشارهای بیشینه را برای موانع مختلف گزارش کرده‌اند و نموداری از تاریخچه فشار محفظه برای مانع S3 ارائه نکرده‌اند. شبیه‌سازی آن‌ها بیشینه فشار در حضور مانع S3 را با اختلافی بیشتر از ۱۰۰ درصد نسبت به نتایج تجربی گزارش کرده است.

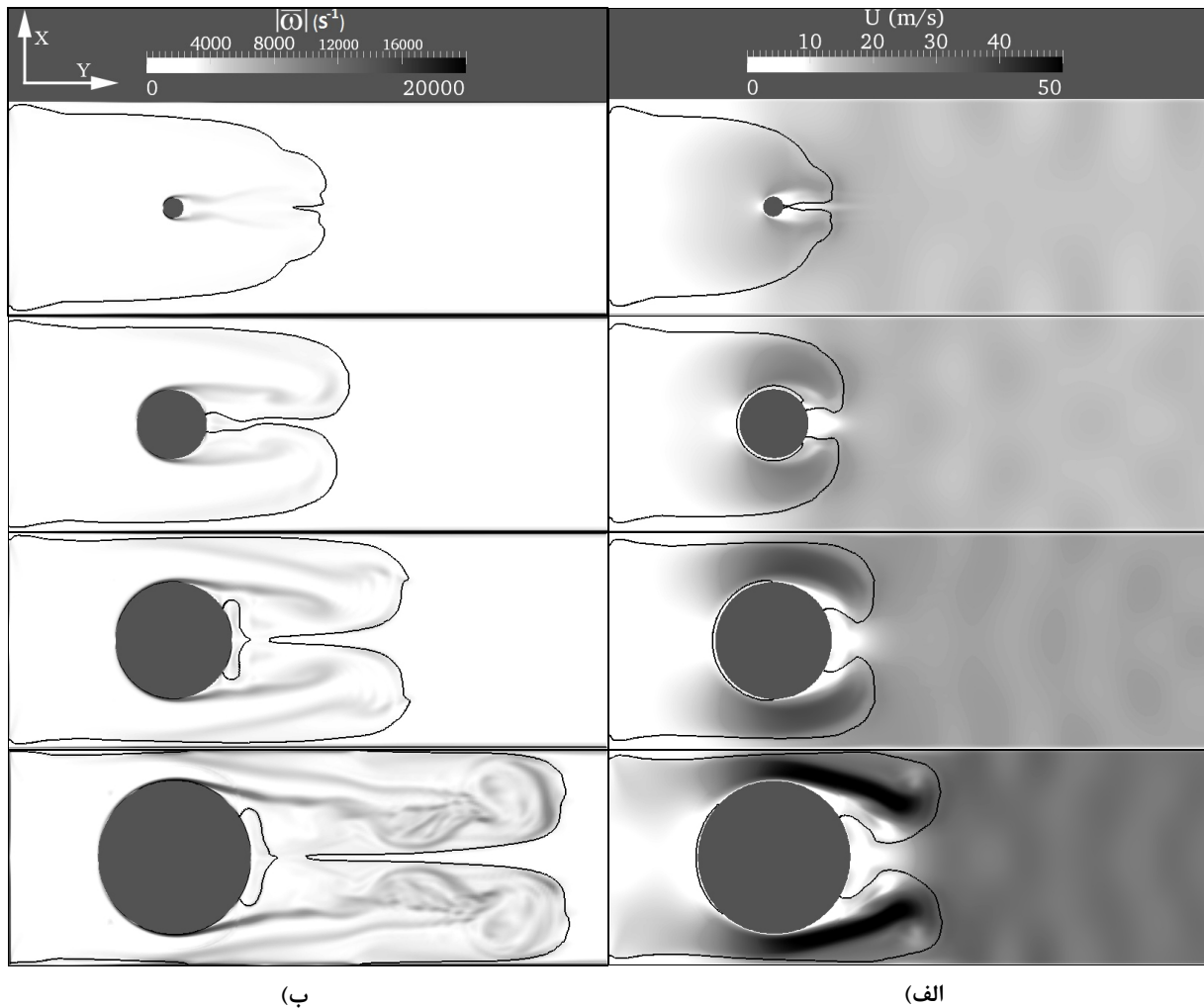
اثر هندسه موانع و نسبت انسداد بر سرعت انتشار شعله

در شکل ۶، تاثیر نسبت انسداد موانع بر روی موقعیت جبهه شعله، برای موانع دایره‌ای، مثلثی و مربعی بررسی شده است. این نمودارها نشان می‌دهند که سرعت شعله با افزایش نسبت انسداد افزایش می‌یابد. اگرچه نتایج حاضر سرعت انتشار شعله را بیشتر از نتایج تجربی پیش‌بینی می‌کنند، اما رفتار نمودارها تطابق خوبی با نتایج تجربی مرجع [۲] دارند. طبق نتایج حاصل، بیشترین تاثیر افزایش نسبت انسداد هنگامی که از مانع مربعی استفاده می‌شود روی می‌دهد. از طرفی، با افزایش نسبت انسداد، تاثیر هندسه موانع به خوبی خود را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۶-د مشاهده می‌شود نمودارهای موقعیت جبهه شعله بر حسب زمان برای موانع مربعی، مثلثی و دایره‌ای در نسبت انسدادهایی در حدود ۱۰ و ۵۵ درصد در کنار یکدیگر رسم شده است. برای نسبت انسداد تقریبی ۱۰ درصد رفتار نمودارهای مربوط به هر سه مانع بسیار شبیه به هم است، اما با افزایش نسبت انسداد تا حدود ۵۵ درصد تاثیر هندسه مانع مربعی به وضوح مشخص می‌شود.



شکل ۶- الف) موقعیت جبهه شعله در زمان‌های مختلف برای موانع دایره‌ای C1 (BR=٪۱۰)، C2 (BR=٪۳۳)، C3 (BR=٪۵۵) و C4 (BR=٪۷۲)؛ ب) موقعیت جبهه شعله در زمان‌های مختلف برای موانع مثلثی T1 (BR=٪۱۳)، T2 (BR=٪۳۲) و T3 (BR=٪۵۳)؛ ج) موقعیت جبهه شعله در زمان‌های مختلف برای موانع مربعی S1 (BR=٪۹)، S2 (BR=٪۲۶)، S3 (BR=٪۴۱) و S4 (BR=٪۵۵)؛ د) بررسی تاثیر نسبت انسداد بر موقعیت جبهه شعله برای هندسه‌های مختلف

به‌منظور بررسی اثر نسبت انسداد (اندازه موانع) بر شتاب‌گیری شعله، کانتورهای سرعت و ورتیسیتی در شکل ۷ برای موانع C1، C2، C3 و C4 آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۷-الف مشاهده می‌شود، جریان در عبور از فاصله بین موانع و دیواره‌های محفظه به‌شدت سرعت می‌گیرد. سرعت این فواره جریان با افزایش نسبت انسداد افزایش می‌یابد. برای نمونه سرعت این فواره برای موانع C1 تا C4 در زمان ۳۵ms به ترتیب به ۱۳/۷m/s، ۱۹/۵m/s، ۳۳m/s و ۵۵m/s می‌رسد. این موضوع باعث جابه‌جایی بیشتر جبهه شعله شده و نهایتاً بیانگر این موضوع است که افزایش نسبت انسداد سرعت شعله را افزایش می‌دهد. در شکل ۷-ب اثر نسبت انسداد بر میدان ورتیسیتی شکل‌گرفته در پشت موانع نیز نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت انسداد میدان ورتیسیتی تقویت شده و ریزش گردابه در دنباله ایجادشده در پشت مانع افزایش می‌یابد. در اثر اندرکنش این گردابه‌ها با جبهه شعله و گاهی ورود آن‌ها به ناحیه پیش‌گرم، فرایند اختلاط شدت گرفته و به دنبال آن، نرخ واکنش و سرعت انتشار شعله افزایش می‌یابد. درحقیقت، از آنجایی که شدت ریزش گردابه در پایین‌دست مانع وابسته به رینولدز محلی است، با افزایش نسبت انسداد و افزایش سرعت جریان فواره‌مانند، رینولدز محلی افزایش یافته و ریزش گردابه نیز تقویت می‌شود.

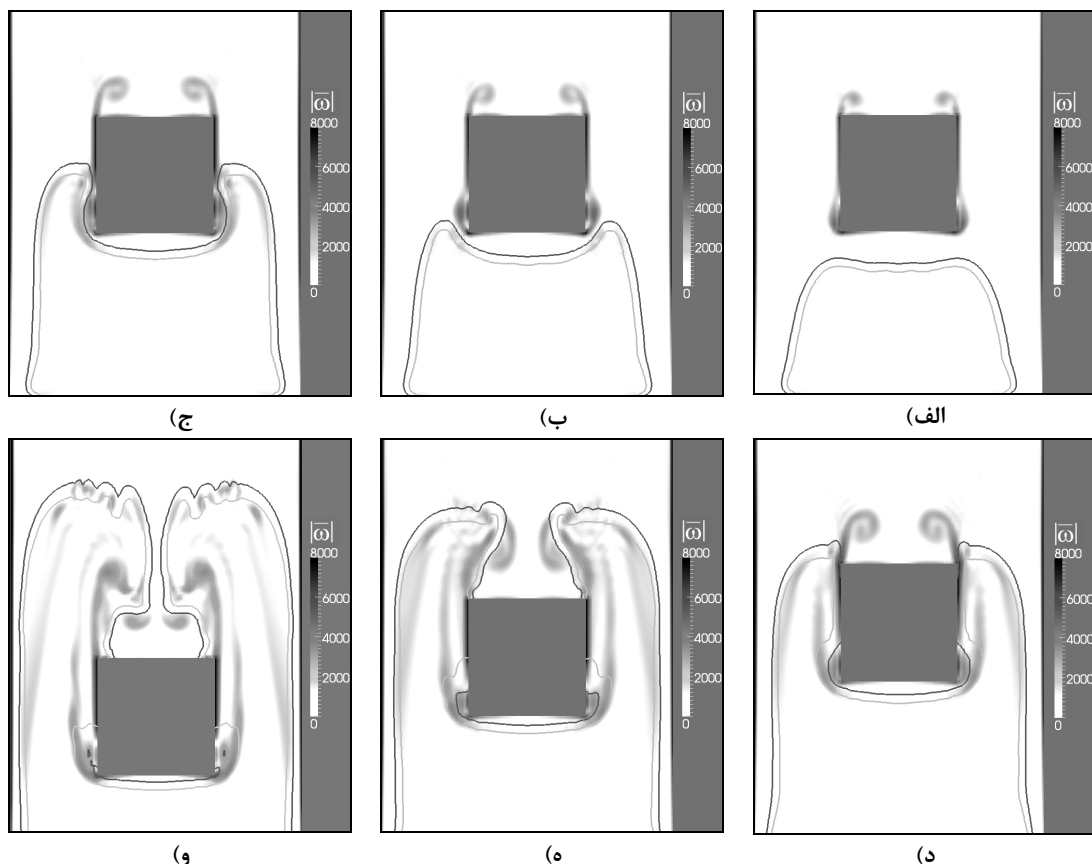


شکل ۷- الف) میدان مقدار سرعت برای موانع دایره‌ای C1 ($BR=10\%$)، C2 ($BR=33\%$)، C3 ($BR=55\%$) و C4 ($BR=72\%$) به ترتیب از بالا به پایین در زمان $35ms$ ، ب) میدان مقدار ورتیسیتی ($|\omega| (1/s)$) برای موانع دایره‌ای C1، C2، C3 و C4 به ترتیب از بالا به پایین در حدود $40ms$ ، در این تصاویر خط تیره‌رنگ بیانگر جبهه شعله (خط $b=0.5$) بوده که از سمت چپ به راست منتشر می‌شود.

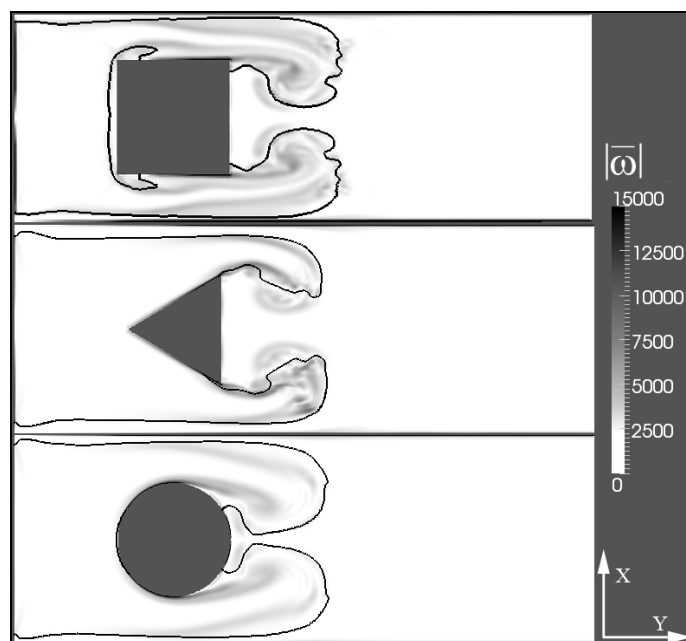
به‌منظور فهم بهتر اندرکنش گردابه‌ها با جبهه شعله، در شکل ۸ جبهه شعله و میدان ورتیسیتی برای مانع مربعی S3 در زمان‌های مختلف نشان داده شده است. در شکل ۸-الف، جبهه شعله در حال نزدیک شدن به مانع است. در همین زمان، در اثر اندرکنش جریان جلو شعله با مانع، حرکت‌های برشی و همچنین چرخشی در پایین دست گوشه‌های تیز مانع شکل می‌گیرد که در کانتور ورتیسیتی قابل مشاهده است. با نزدیک تر شدن جبهه شعله به مانع (شکل ۸-ب) جبهه شعله به سمت داخل خمیده شده و به‌صورت یک شعله دوشاخه از دوطرف مانع انتشار می‌یابد (شکل ۸-ج). در این لحظه، اندرکنش میدان ورتیسیتی حاصل از گوشه‌های پایینی مانع با جبهه شعله اتفاق می‌افتد. در شکل ۸-د، با عبور فواره‌مانند جریان و جبهه شعله از گذرگاه بین مانع و دیواره‌های محفظه، عدد رینولدز محلی افزایش یافته و میدان ورتیسیتی تقویت می‌شود؛ در نتیجه مقیاس طولی گردابه‌های آشفته کاهش یافته و گستره آن‌ها بیشتر می‌شود. در تصویر ۸-ه مشاهده می‌شود که با خروج جبهه شعله از گذرگاه، گردابه‌های شکل گرفته در پایین دست مانع به درون ساختار شعله نفوذ کرده و چین‌خوردگی‌هایی در جبهه شعله ایجاد می‌کنند. در این شکل مشاهده می‌شود که با ورود گردابه‌ها به جبهه شعله ضخامت شعله نسبت به حالت آرام اولیه افزایش یافته است. به‌طوری‌که ضخامت شعله به‌طور تقریبی از حدود یک سلول محاسباتی تا ۴ سلول محاسباتی در طی این مسیر

افزایش می‌یابد. باید توجه داشت که با عبور جبهه شعله از روی مانع، شعله بلافاصله وارد جفت‌گردابه‌های شکل‌گرفته در پایین‌دست مانع نمی‌شود، بلکه ابتدا در جهت لایه برشی شکل‌گرفته بین جفت‌گردابه‌ها و جریان فواره، منتشر شده و پس از کاهش قدرت لایه برشی (کم‌شدن گرادیان سرعت)، همانند تصویر ۸-و، به سمت پشت مانع برگشته و وارد جفت‌گردابه‌ها می‌شود. در این لحظه، چین‌خوردگی‌های شدیدی در جبهه شعله قابل مشاهده است که در اثر اندرکنش گردابه‌ها با جبهه شعله شکل گرفته است. در این مسئله، ضریب چین‌خوردگی سطح شعله زیر شبکه Ξ از مقدار $1,05$ در زمان $27,5\text{ms}$ (شکل ۸-ب) تا $1,5$ در زمان $37,5\text{ms}$ (شکل ۸-و) و نرخ واکنش زیر شبکه از $67,84\text{ s}^{-1}$ تا $104,67\text{ s}^{-1}$ در همین زمان‌ها افزایش می‌یابد. این مقادیر با متوسط‌گیری از داده‌های محاسبه‌شده بر روی لبه حمله شعله (خط $b=0,5$) و به‌اندازه کافی دور از دیواره‌های محفظه محاسبه شده‌اند. همچنین، سرعت انتشار شعله از 14m/s در زمان $27,5\text{ms}$ تا 25m/s در زمان $37,5\text{ms}$ افزایش می‌یابد.

برای بررسی اثر هندسه بر میدان ورتیسیتی، در شکل ۹، میدان ورتیسیتی برای سه مانع مختلف با نسبت انسدادهای تقریباً مشابه رسم شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، توزیع گردابه‌ها برای موانع مربعی و مثلثی، به‌علت داشتن گوشه‌های تیز، از شدت و گستردگی بیشتری برخوردار است. برای مانع مربعی دو گردابه کوچک نیز در جلو مانع شکل می‌گیرد. این موضوع باعث می‌شود که مقداری از مخلوط محترقه به صورت نسوخته در قسمت جلو مانع باقی بماند. همچنین، به‌علت شکل مانع مربعی، سرعت جریان در عبور از گذرگاه برای مدت بیشتری در مقدار بیشینه خود قرار دارد. این موضوع باعث می‌شود که سرعت فواره جریان و همچنین طول اثر فواره افزایش یافته و آشفتگی بیشتری در اثر آن ایجاد شود.



شکل ۸- کانتور مقدار ورتیسیتی ($|\omega| \text{ s}^{-1}$) برای مانع $S3$ ($BR=41\%$)، در زمان‌های 25 ، $27,5$ ، 30 ، $32,5$ ، 35 و $37,5$ میلی‌ثانیه، خطوط رسم‌شده در شکل‌ها، خطوط b ثابت $0,9$ (خط بالایی) و $0,1$ (خط پایینی) هستند. در این شکل‌ها شعله از سمت پایین به بالا در حال انتشار است.



شکل ۹- کانتور مقدار ورتیسیتی ($|\omega| \text{ s}^{-1}$) برای موانع S4 ($BR=0.55$)، T3 ($BR=0.53$) و C3 ($BR=0.55$) از بالا به پایین در زمان‌های ۳۵، ۳۷/۵ و ۳۷/۵ میلی‌ثانیه، در این تصاویر خط تیره‌رنگ بیانگر جبهه شعله (خط $b=0.5$) بوده که از سمت چپ به راست حرکت می‌کند.

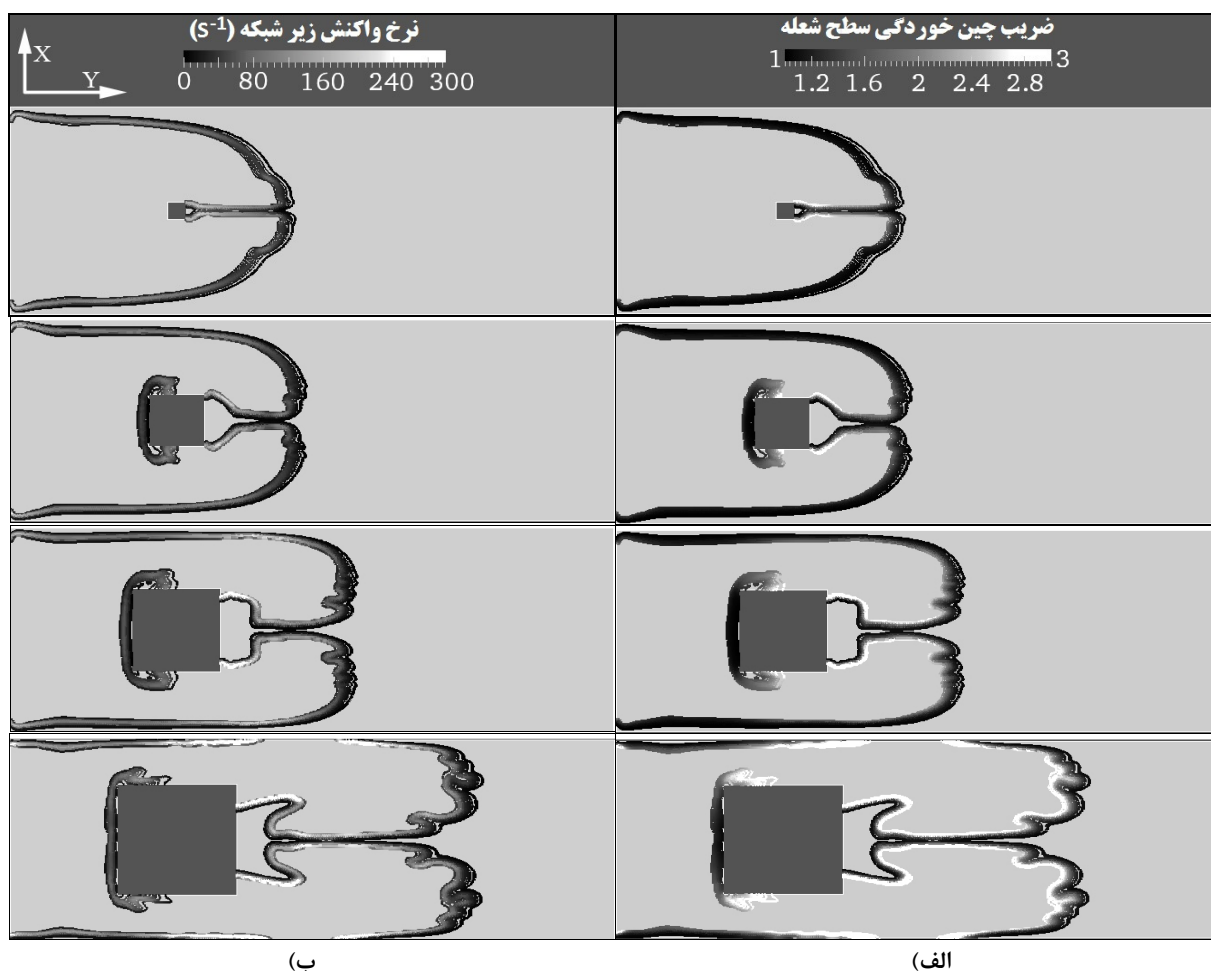
اثر نسبت انسداد بر چین‌خوردگی شعله و نرخ واکنش زیرشبکه

در شکل ۱۰، مقادیر ضریب چین‌خوردگی شعله زیرشبکه و نرخ واکنش زیرشبکه بر روی خطوط b ثابت (در بازه ۰٫۱ تا ۰٫۹۸) برای موانع S1، S2، S3 و S4 نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود چین‌خوردگی سطح شعله، چه در مقیاس‌های بزرگ و چه در مقیاس‌های زیرشبکه، تحت تاثیر ریزش گردابه از لبه‌های تیز مانع مربعی است. از آنجایی که با افزایش نسبت انسداد مقدار ورتیسیتی در دنباله موانع افزایش می‌یابد، مقدار ضریب چین‌خوردگی سطح شعله نیز تقویت می‌شود که این موضوع به‌خوبی در شکل ۱۰-الف قابل مشاهده است. در شکل ۱۰-ب نیز افزایش نرخ واکنش زیرشبکه با افزایش نسبت انسداد نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشترین نرخ واکنش در پشت موانع و یا در کنار دیواره‌های محفظه روی می‌دهد. در این دو شکل، تاثیر دیواره‌های محفظه بر روی افزایش چین‌خوردگی سطح شعله و نرخ واکنش نیز قابل مشاهده است که اهمیت مدل‌سازی دقیق اثر دیواره‌ها را یادآوری می‌کند.

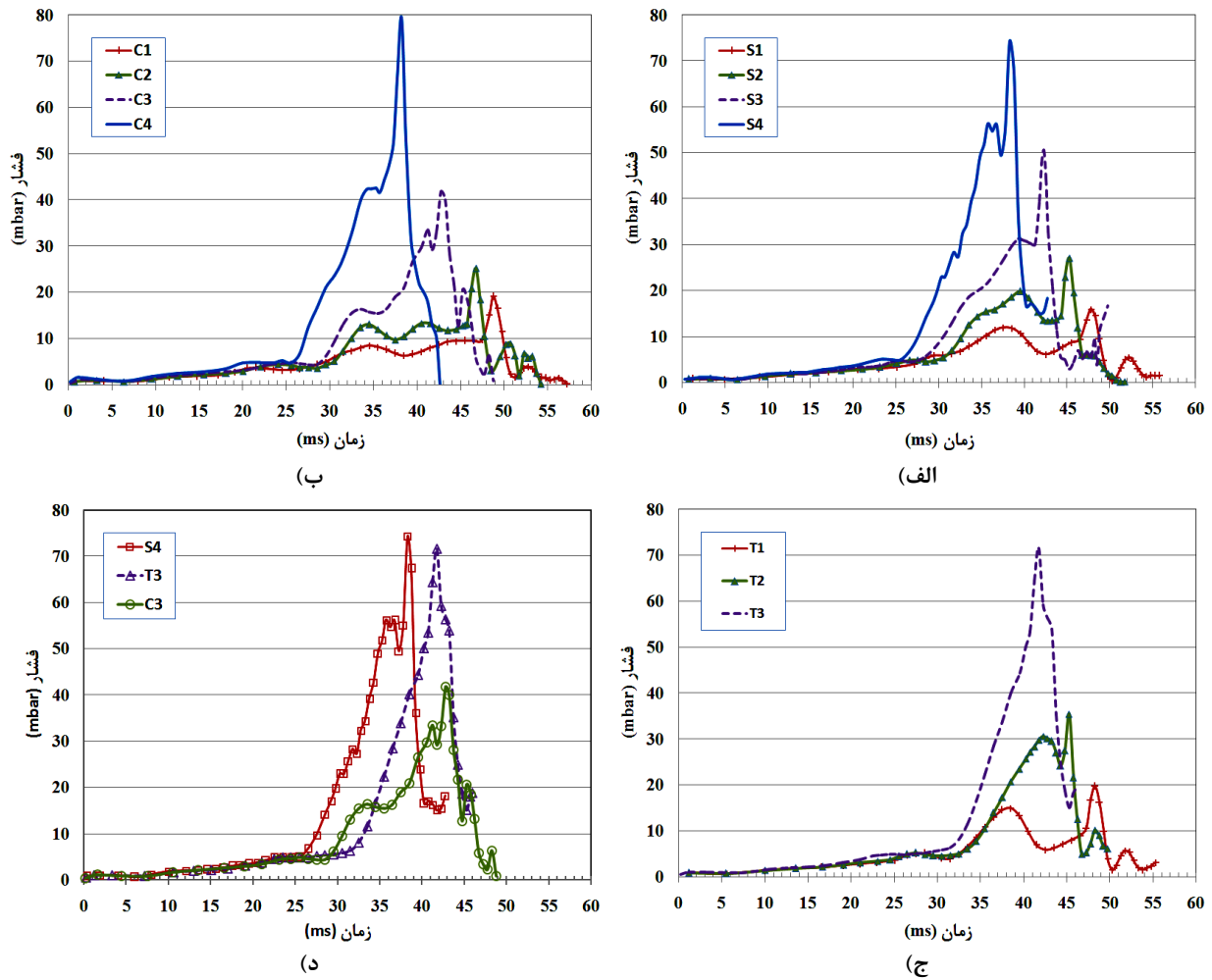
بررسی اثر نسبت انسداد بر فشار حاصل از انتشار شعله پیش‌آمیخته

در بین مطالعات انجام‌گرفته بر روی انتشار شعله در حضور موانع، چند عامل به‌عنوان سازوکار اصلی در ایجاد فشار بیشینه معرفی شده‌اند. برای مثال، بعضی از محققان افزایش سطح شعله و نرخ سوزش در اثر اندرکنش بین شعله و گردابه‌های آشفته حاصل از موانع را به‌عنوان پدیده موثر معرفی کرده‌اند [۴،۶،۹]. مطالعات دیگری به سوختن بسته‌های گاز نسوخته به‌تله‌افتاده در پشت موانع به‌عنوان پدیده موثر اشاره کرده‌اند [۲،۳،۵،۱۴]. مراجعی نیز بر نقش عبور فواره‌مانند شعله از گذرگاه تاکید کرده‌اند [۴،۶،۹]. دی‌سارلی و همکاران [۱۸] نیز معتقدند که بیشینه فشار تحت تاثیر رقابت بین نرخ احتراق و نرخ تخلیه گاز از محفظه است. به‌منظور مطالعه بیشتر این موضوع در شکل ۱۱ به بررسی اثر نسبت انسداد و هندسه موانع بر فشار حاصل از انتشار شعله پیش‌آمیخته پرداخته می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۱-الف تا ج مشاهده می‌شود، نسبت انسداد اثرات قابل توجهی بر فشار بیشینه حاصل از انتشار شعله دارد؛ به‌طوری که فشار بیشینه، با افزایش نسبت انسداد، افزایش می‌یابد. این موضوع به‌خاطر آن

است که با افزایش اندازه مانع سرعت فواره جریان عبوری از روی مانع و به دنبال آن سطح آشفته‌گی جریان (به‌ویژه در دنباله مانع) و اندازه چین‌خوردگی سطح شعله افزایش یافته و نهایتاً، با افزایش نرخ واکنش، شدت آزاد شدن انرژی و در نتیجه سطح فشار افزایش می‌یابد. البته موضوع مهم دیگر حجم مواد نسوخته به‌تله‌افتاده در پایین دست موانع است، که با افزایش اندازه مانع افزایش می‌یابد. از آنجایی که فشار بیشینه معمولاً 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. همان‌طور که در شکل ۱۰-الف تصویر آخر مشاهده می‌شود، شعله به‌هنگام بازگشت به سمت مواد نسوخته به‌تله‌افتاده دارای بیشترین سطح است که این موضوع باعث افزایش نرخ آزادسازی انرژی می‌شود. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که نرخ افزایش فشار بیشینه با افزایش نسبت انسداد، وابسته به هندسه مانع است. همچنین، زمان مورد نیاز برای رسیدن به بیشینه فشار با افزایش نسبت انسداد کاهش می‌یابد. به‌طوری که زمان رخداد بیشینه فشار برای موانع مربعی S1، S2، S3 و S4 به‌ترتیب برابر ۴۷/۷۵، ۴۵/۲۵، ۴۲/۲۵ و ۳۸/۲۵ میلی‌ثانیه، برای موانع دایره‌ای C1، C2، C3 و C4 به‌ترتیب برابر ۴۸/۲۵، ۴۶/۷۵، ۴۲/۷۵ و ۳۸/۲۵ میلی‌ثانیه و برای موانع مثلثی T1، T2 و T3 به‌ترتیب برابر ۴۸/۲۵، ۴۵/۲۵ و ۴۱/۷۵ میلی‌ثانیه به‌دست آمده است.



شکل ۱۰-الف) میدان ضریب چین‌خوردگی سطح شعله (a) برای موانع مربعی S1 (BR=۰/۹)، S2 (BR=۰/۲۶)، S3 (BR=۰/۴۱) و S4 (BR=۰/۵۵)، به‌ترتیب از بالا به پایین در زمان ۳۷/۵ms، مقادیر موجود برای ξ بر روی خطوط b ثابت نمایش داده شده‌اند. (ب) میدان نرخ واکنش زیر شبکه (s⁻¹) برای موانع مربعی S1، S2، S3 و S4، به‌ترتیب از بالا به پایین در زمان ۳۷/۵ms، مقادیر موجود برای نرخ واکنش بر روی خطوط b ثابت نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱۱- نتایج LES حاضر برای تاریخچه فشار ثبت شده در حسگر P1. الف) برای موانع مربعی S1 (BR=۰.۹)، S2 (BR=۰.۲۶)، S3 (BR=۰.۴۱) و S4 (BR=۰.۵۵)، ب) برای موانع دایره‌ای C1 (BR=۰.۱۰)، C2 (BR=۰.۳۳)، C3 (BR=۰.۵۵) و C4 (BR=۰.۷۲)، ج) برای موانع مثلثی T1 (BR=۰.۱۳)، T2 (BR=۰.۲۲) و T3 (BR=۰.۵۳) و د) در حضور موانع دایره‌ای (C3)، مربعی (S4) و مثلثی (T3) با نسبت انسدادهای ۵۳ تا ۵۵ درصد

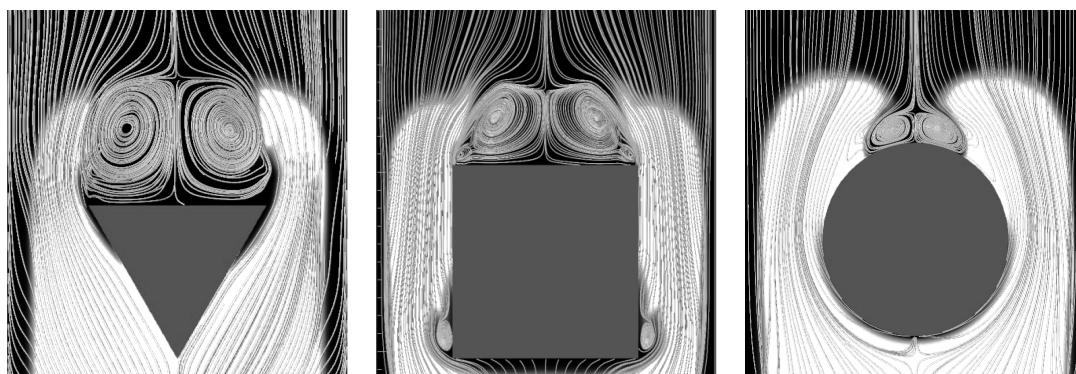
در شکل ۱۱-ب مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت انسداد از حدود ۵۵ درصد برای مانع C3 تا ۷۲ درصد برای مانع C4 فشار بیشینه تا دو برابر افزایش یافته است. درحقیقت افزایش سرعت جریان فواره و به دنبال آن افزایش سرعت شعله، با افزایش نسبت انسداد، نقش قابل توجهی در این افزایش فشار ایفا می‌کند. به عبارت بهتر، افزایش شدید سرعت شعله باعث افزایش نرخ آزادسازی گرما در واحد حجم شده و در نهایت فشار بیشینه رشدی دوبرابری را تجربه می‌کند.

بررسی اثر هندسه بر فشار حاصل از انتشار شعله پیش‌آمیخته

در شکل ۱۱-د 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 برابرند، 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 است. از طرفی همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده شد، هندسه دایره‌ای، به علت نداشتن گوشه‌های تیز و داشتن شکل (تحدودی) 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 بسیار کمتر از دو مانع دیگر است. حجم مخلوط نسوخته متناسب با طول جفت‌گردابه‌های تشکیل شده در پشت موانع است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، اندازه جفت‌گردابه‌ها وابسته به هندسه مانع بوده و برای مانع مثلی بیشترین مقدار خود را دارد. طول این جفت‌گردابه‌ها در بیشترین حالت برای مانع دایره‌ای (C3)، مربعی (S4) و مثلی (T3) به ترتیب برابر ۲۰، ۴۷ و ۷۲ میلی‌متر است. این موضوع باعث می‌شود تا بیشینه فشار ایجاد شده توسط مانع مثلی قابل مقایسه با بیشینه فشار حاصل از مانع مربعی، که بیشترین سطح آشفته‌گی جریان را القا می‌کند، باشد. در شکل ۱۱-د فشار حاصل با عبور شعله از مانع دایره‌ای افت اندکی را نشان می‌دهد. به عبارت بهتر، هندسه مانع دایره‌ای باعث می‌شود تا سطح آشفته‌گی شعله بعد از عبور از مانع برای مدت کوتاهی کاهش یافته در نتیجه یک مرحله کوتاه کاهش سرعت و افت فشار با عبور از مانع دایره‌ای مشاهده شود.

در این زمینه، دی‌سارلی و همکاران [۱۸] نیز به مطالعه عددی انتشار شعله پیش‌آمیخته متان-هوا در عبور از موانعی با سطح مقطع‌های متفاوت مربعی، مستطیلی (صفحه تخت) و دایره‌ای با نسبت انسدادهای ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد در محفظه احتراقی به حجم $150 \times 150 \times 500 \text{ mm}^3$ پرداختند. آن‌ها نیز نشان دادند که فشار ناشی از انفجار تحت تاثیر هندسه موانع و نسبت انسداد است. در بین سه مانع مورد مطالعه آن‌ها بیشترین فشار حاصل از انفجار به ترتیب مربوط به موانع مربعی، مستطیلی (صفحه تخت) و دایره‌ای بوده و همچنین با افزایش نسبت انسداد این فشار نیز افزایش می‌یابد. البته نتایج تجربی هارگریو و همکاران [۵] که بر روی محفظه مشابه انجام شده است نشان می‌دهد که فشار حاصل از مانع مستطیلی بیشتر از مانع مربعی است که خلاف نظر مرجع [۱۸] است.



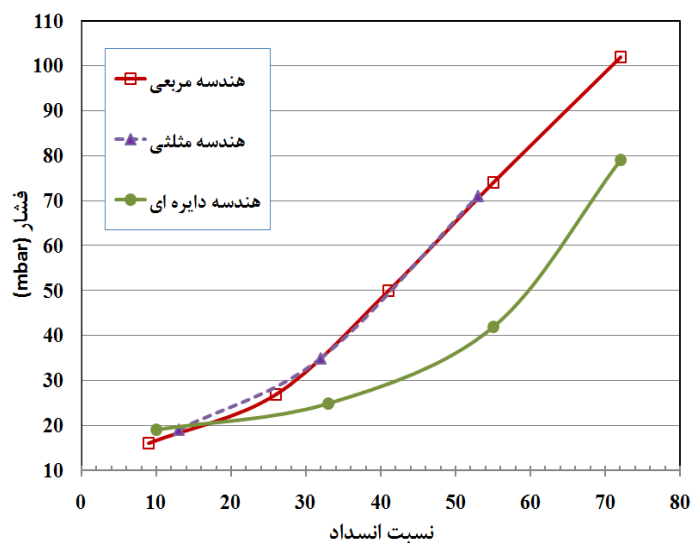
شکل ۱۲- شکل‌گیری جفت‌گردابه در پشت موانع C3 (BR=٪۵۵)، S4 (BR=٪۵۵) و T3 (BR=٪۵۳) به ترتیب در زمان‌های ۳۵، ۳۰ و ۳۶ میلی ثانیه، در این تصاویر کانتور متغیر پیشرفت واکنش b به همراه خطوط جریان رسم شده‌اند و شعله از سمت پایین به بالا در حال انتشار است. مقدار b از یک برای مواد نسوخته جلو جبهه شعله (ناحیه سیاه‌رنگ) تا صفر برای مواد کاملاً سوخته (ناحیه سفیدرنگ) تغییر می‌کند.

بحث

همان‌طور که قبلاً بیان شد، محققان مختلفی به بررسی تاثیر موانع با هندسه‌ها و نسبت انسدادهای مختلف بر روی شتاب‌گیری شعله و نهایتاً فشار حاصل از انفجار گازی پرداخته‌اند. آن‌ها معتقدند که اندرکنش بین جریان گاز و موانع از طریق دو سازوکار ریزش گردابه و تشکیل نواحی چرخشی در پایین دست موانع باعث تولید آشفته‌گی، افزایش مساحت سطح شعله و تشدید نرخ سوزش می‌شود [۳-۶]. البته اثر این عوامل محلی بر روی فرایند انفجار و فشار حاصل هنوز هم به خوبی مشخص نیست. در کنار این موضوع، هنگامی که نسبت انسداد افزایش می‌یابد، سرعت گاز در فاصله بین مانع و دیواره‌ها افزایش یافته و به دنبال آن

سطح آشفستگی نیز افزایش می‌یابد. این موضوع باعث افزایش سرعت شعله و در نتیجه افزایش نرخ واکنش و نهایتاً فشار بیشینه می‌شود [۳]. به طور کلی مزری و همکاران [۳،۲] تاثیرات حضور موانع بر روی شعله را به دو دسته اثرات مستقیم و غیرمستقیم تقسیم کرده‌اند. اثرات غیرمستقیم از تغییر کلی میدان جریان در اثر نیروی پسا، تولید آشفستگی، ریزش گردابه و تشکیل جفت-گردابه‌ها در پشت موانع حاصل می‌شود. در حالی که اثرات مستقیم در اثر برخورد شعله با موانع و عبور فواره‌مانند شعله از دو طرف مانع و اندرکنش آن با گردابه‌های شکل‌گرفته در پایین‌دست مانع ایجاد می‌شوند. البته در این مطالعات هیچ بحثی بر روی اهمیت هر کدام از این دو اثر در شرایط مختلف موانع (نظیر هندسه‌های مختلف یا نسبت انسدادهای متفاوت) انجام نگرفته است. نامانسن و همکاران در مطالعات عددی خود نقش حائز اهمیت برای فواره جریان قائل شده‌اند. به نظر آن‌ها عبور فواره‌مانند شعله از گذرگاه بین مانع و دیواره‌های جانبی محفظه باعث افزایش سرعت شعله شده که آن‌ها این اثر را اثر جابه-جایی خالص نامیدند [۱۰].

در کار حاضر، به‌منظور بررسی اثرات مستقیم و غیرمستقیم حضور موانع بر روی شتاب‌گیری شعله، در شکل ۱۳، نمودار تغییرات فشار بیشینه در نسبت انسدادهای مختلف و برای موانع مربعی، مثلثی و دایره‌ای رسم شده است. برای ترسیم نمودار مربوط به موانع مربعی، شبیه‌سازی حاضر یک بار هم برای مانعی با نسبت انسداد ۷۲ درصد اجرا شده است. این مانع جزء موانع موجود در کار تجربی ابراهیم و مزری [۳] که در جدول ۱ آورده شده‌اند نیست و تنها برای بررسی اثر موانع بر شتاب‌گیری شعله در نسبت انسدادهای بزرگ صورت گرفته است. نکته قابل توجه در این شکل نزدیک شدن بیشینه فشار حاصل از مانع دایره‌ای در نسبت انسداد ۷۲ درصد به مانع مربعی در همین نسبت انسداد است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نسبت انسدادهای پایین (در حدود ۱۰ درصد) فشار بیشینه ایجادشده در محفظه خیلی تحت تاثیر شکل موانع نیست. اما با افزایش نسبت انسداد تاثیر هندسه موانع به‌خوبی قابل مشاهده است، به طوری که در حدود نسبت انسداد ۵۵ درصد این اختلاف به حداکثر خود می‌رسد. به نظر در این نسبت انسدادهای میانی عواملی نظیر ریزش گردابه، تشکیل جفت‌گردابه‌ها و همچنین شدت آشفستگی ایجادشده در جریان پایین‌دست، یعنی در حقیقت اثرات غیرمستقیم مانع، بیشتر تحت تاثیر هندسه و شکل موانع‌اند. به‌عبارت دیگر، با افزایش بیشتر نسبت انسداد این اثرات مستقیم حضور موانع نظیر سرعت فواره جریان است که تاثیر بیشتری بر میدان آشفته شکل‌گرفته در پشت موانع داشته و نهایتاً باعث افزایش سرعت شعله، افزایش نرخ واکنش و افزایش فشار بیشینه می‌شود.



شکل ۱۳- تغییر فشار بیشینه ایجادشده در محفظه در نسبت انسدادهای مختلف و برای موانع سه‌گانه مربعی، مثلثی و دایره‌ای

جمع بندی و نتیجه گیری

همان طور که مشاهده شد، شعله به هنگام برهم کنش با موانع شتاب می گیرد، به طوری که برای نمونه سرعت شعله در حضور مانع مربعی S3 از حدود 4 m/s در زمان رسیدن به مانع تا 50 m/s در زمان خروج از محفظه افزایش می یابد. نتایج حاضر نشان دادند که مانع مربعی، به علت داشتن گوشه های تیز و همچنین گذرگاه باریک طولانی، بیشترین شتاب گیری را باعث شده و کمترین شتاب گیری مربوط به مانع دایره ای است. شکل گیری جفت گردابه در پشت مانع باعث می شود که مخلوطی از گازهای نسوخته در پشت مانع به تله افتاده که این مخلوط پس از اتصال دوباره شعله در پشت گردابه مصرف می شود. اتصال مجدد شعله در پشت گردابه در پشت مانع دایره ای سریع تر روی می دهد. هندسه مانع دایره ای باعث می شود تا سطح آشفته گی جریان احتراقی بعد از عبور از مانع برای مدت کوتاهی کاهش یافته، در نتیجه یک مرحله کوتاه کاهش سرعت با عبور از مانع دایره ای مشاهده شود. نسبت انسداد نیز اثرات قابل توجهی بر شتاب گیری شعله دارد. در حقیقت افزایش نسبت انسداد باعث افزایش سرعت فواره جریان، رشد آشفته گی ها و افزایش چین خوردگی شعله و نهایتاً نرخ سوزش می شود.

در حالت کلی، نتایج عددی سه بعدی حاضر در توصیف شکل کلی شعله، شتاب گیری شعله در عبور از موانع و درون لوله و بیان تاثیرات نسبت انسداد و هندسه موانع بر انتشار شعله هم خوانی خوبی با نتایج تجربی داشتند؛ مخصوصاً که نتایج عددی به خوبی اندرکنش شعله و گردابه های آشفته حاصل از موانع را نشان دادند. البته همان طور که اشاره شد، نتایج حاضر سرعت انتشار شعله را بیشتر از مقادیر تجربی پیش بینی می کنند.

در این مقاله، اثر نسبت انسداد و هندسه موانع بر روی رفتار تاریخچه فشار و فشار بیشینه نیز مطالعه شد. نتایج عددی حاضر به خوبی نشان دادند که افزایش نسبت انسداد، سطح فشار و بیشینه فشار حاصل از انفجار را افزایش می دهد. همچنین، این افزایش فشار تحت تاثیر هندسه موانع است. به طور کلی فشار بیشینه حاصل از انفجار تحت تاثیر اغتشاشات حاصل از حضور موانع، که به صورت یک دنباله بسیار آشفته ظاهر می شود، و همچنین حجم مواد نسوخته به تله افتاده در پشت موانع است. در بین موانع مورد مطالعه با نسبت انسداد مشابه مانع دایره ای کمترین فشار را در محفظه ایجاد می کند که این موضوع به خاطر حجم کم مواد نسوخته به تله افتاده و همچنین سطح کم آشفته گی القاشده در جریان توسط این مانع است. از آنجایی که مقدار فشار بیشینه تحت تاثیر آزادسازی انرژی حاصل از انجام واکنش است، پیش بینی دقیق نرخ واکنش زیر شبکه مهم ترین چالش مطالعات عددی در این حیطه است. همان طور که مشاهده شد، پیش بینی بیشتر فشار بیشینه نسبت به نتایج تجربی بیانگر این موضوع است که مدل احتراقی زیر شبکه حاضر نرخ واکنش را بیشتر از واقعیت پیش بینی کرده است. البته شرایط اولیه در نظر گرفته شده برای ناحیه جرقه نیز تاثیر بسزایی بر فشار بیشینه دارد که بررسی سیستماتیک این موضوع نیازمند مطالعه مستقلی است. در نهایت نیز، در این مقاله، به مقایسه بین تاثیر اثرات مستقیم و غیرمستقیم حضور موانع بر روی شتاب گیری شعله و بیشینه فشار ایجاد شده در محفظه پرداخته شد. نتایج حاضر نشان دادند که در نسبت انسداد های میانی (۲۰ تا ۶۰ درصد) این هندسه موانع است که بر روی میدان جریان آشفته شکل گرفته در دنباله موانع تاثیری بیشتری داشته و برای نسبت انسداد های بیشتر از این حد این اندازه موانع است که با تاثیر مستقیم بر روی سرعت فواره جریان آشفته گی حاصل در دنباله موانع و به دنبال آن نرخ واکنش را افزایش می دهد.

منابع

1. T. Poinso and D. Veynante, *Theoretical and Numerical Combustion*. Second Edition, R.T. Edwards, Inc., Philadelphia, USA, 2005.
2. A. R. Masri, S. S. Ibrahim, N. Nehzat and A. R. Green, "Experimental Study of Premixed Flame Propagation Over Various Solid Obstructions," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 21, 2000, pp. 109-116.
3. S. S. Ibrahim and A. R. Masri, "The Effects of Obstructions on Overpressure Resulting from Premixed Flame Deflagration," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 14, 2001, pp. 213-221.

4. S. S. Ibrahim, G. K. Hargrave and T. C. Williams, "Experimental Investigation of Flame/Solid Interactions in Turbulent Premixed Combustion," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 24, 2001, pp. 99-106.
5. G. K. Hargrave, S. Jarvis and T. C. Williams, "A Study of Transient Flow Turbulence Generation during Flame/Wall Interactions in Explosions," *Measurement Science and Technology*, 13, 2002, pp. 1036-1042.
6. S. Patel, S. Jarvis, S. S. Ibrahim and G. K. Hargrave, "An Experimental and Numerical Investigation of Premixed Flame Deflagration in a Semiconfined Explosion Chamber," *Proceedings of the Combustion Institute*, 29, 2002, pp. 1849-1854.
7. J. E. Kent, A. R. Masri and S. H. Starner, "A New Chamber to Study Premixed Flame Propagation Past Repeated Obstacles," 5th Asia-Pacific Conference on Combustion, the University of Adelaide, Australia, July 2005.
8. R. Hall, A. R. Masri, P. Yaroshchuk and S. S. Ibrahim, "Effects of Position and Frequency of Obstacles on Turbulent Premixed Propagating Flames," *Combustion and Flame*, 156, 2009, pp. 439-446.
9. D. J. Park, A. R. Green, Y. S. Lee and Y. Chen, "Experimental Studies on Interactions between a Freely Propagating Flame and Single Obstacles in a Rectangular Confinement," *Combustion and Flame*, 150, 2007, pp. 27-39.
10. P. Naamansen, D. Baraldi, B. H. Hjertager, T. Solberg and S. Cant, "Solution Adaptive CFD Simulation of Premixed Flame Propagation Over Various Solid Obstructions," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 15, 2002, pp. 189-197.
11. S. Patel, S. S. Ibrahim, M. A. Yehia and G. K. Hargrave, "Investigation of Premixed Turbulent Combustion in a Semi-confined Explosion Chamber," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 27, 2003, pp. 355-361.
12. M. P. Kirkpatrick, S. W. Armfield, A. R. Masri and S. S. Ibrahim, "Large Eddy Simulation of a Propagating Turbulent Premixed Flame," *Flow, Turbulence and Combustion*, 70, 2003, pp. 1-19.
13. A. R. Masri, S. S. Ibrahim and B. J. Cadwallader, "Measurements and Large Eddy Simulation of Propagating Premixed Flames," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30, 2006, pp. 687-702.
14. S. R. Gubba, S. S. Ibrahim, W. Malalasekera and A. R. Masri, "LES Modeling of Premixed Deflagrating Flames in a Small-scale Vented Explosion Chamber with a Series of Solid Obstructions," *Combustion Science and Technology*, 180, 2008, pp. 1936-1955.
15. S. R. Gubba, S. S. Ibrahim, W. Malalasekera and A. R. Masri, "An Assessment of Large Eddy Simulations of Premixed Flames Propagating Past Repeated Obstacles," *Combustion Theory and Modelling*, 13, No. 3, 2009, pp. 513-540.
16. S. S. Ibrahim, S. R. Gubba, A. R. Masri and W. Malalasekera, "Calculations of Explosion Deflagrating Flames using a Dynamic Flame Surface Density Model," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22, 2009, pp. 258-264.
17. V. Di Sarli, A. Di Benedetto, G. Russo, S. Jarvis, E. J. Long and G. K. Hargrave, "Large Eddy Simulation and PIV Measurements of Unsteady Premixed Flames Accelerated by Obstacles," *Flow, Turbulence and Combustion*, 83, 2009, pp. 227-250.
18. V. Di Sarli, A. Di Benedetto and G. Russo, "Using Large Eddy Simulation for Understanding Vented Gas Explosions in the Presence of Obstacles," *Journal of Hazardous Materials*, 169, 2009, pp. 435-442.
19. V. Di Sarli, A. Di Benedetto and G. Russo, "Sub-grid Scale Combustion Models for Large Eddy Simulation of Unsteady Premixed Flame Propagation around Obstacles," *Journal of Hazardous Materials*, 180, 2010, pp. 71-78.
20. H. G. Weller, "The Development of a New Flame Area Combustion Model using Conditional Averaging," Thermo-Fluids Section report TF/9307, Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, March 1993.
21. A. Yoshizawa and K. Horiuti, "A Statistically-Derived Subgrid-Scale Kinetic Energy Model for the Large-Eddy Simulation of Turbulent Flows," *Journal of the Physical Society of Japan*, 54, 1985, pp. 2834-2839.
22. H. G. Weller, G. Tabor, A. D. Gosman and C. Fureby, "Application of a Flame-Wrinkling LES Combustion Model to a Turbulent Mixing Layer," *Proceedings of the Combustion Institute*, 27, 1998, pp. 899-907.
23. O. L. Gulder, "Turbulent Premixed Flame Propagation Models for Different Combustion Regimes," *Proceedings of the Combustion Institute*, 23, 1990, pp. 743-750.
24. I. K. Nwagwe, H. G. Weller, G. R. Tabor, A. D. Gosman, M. Lawes, C. G. W. Sheppard and R. Wooley, "Measurements and Large Eddy Simulations of Turbulent Premixed Flame Kernel Growth," *Proceedings of the Combustion Institute*, 28, 2000, pp. 59-65.
25. S. B. Pope, *Turbulent Flows*, First Edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.
26. I. B. Celik, Z. N. Cehreli and I. Yavuz, "Index of Resolution Quality for Large Eddy Simulations," *Journal of Fluids Engineering*, 127, 2005, pp. 949-958.
27. A. Kempf, R. P. Lindstedt and J. Janicka, "Large-Eddy Simulation of a Bluff-body Stabilized Nonpremixed Flame," *Combustion and Flame*, 144, 2006, pp. 170-189.

English Abstract

Numerical Investigation of the Effects of Blockage Ratio and Obstruction Geometry on Flame Acceleration and Overpressure of Gas Explosion

S. Emami Koopaei and K. Mazaheri

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(Received: 2012.4.29, Received in revised form: 2012.10.24, Accepted: 2012.11.26)

The aim of the present paper is to investigate the effects of obstacles with different blockage ratio and geometry on flame acceleration and overpressure of premixed flame propagation using large eddy simulation. The subgrid-scale reaction rate is represented by the Flame-wrinkling combustion model developed by Weller. For the purposes of this paper, three different obstacles with circular, triangular and square cross-sections are studied here covering blockage ratios ranging from 10% to 72%. It is found that square and circular obstacles, result the fastest and the slowest flame acceleration, respectively. Velocity of jet-like flow around the obstacles and the level of turbulence generated by obstacles are increased with increasing blockage ratio and caused an increase in flame speed. The amount of unburned mixture trapped behind the obstacles, that plays a significant role in the overpressure, is found to be the highest for triangular obstacles. The maximum overpressure increases with increasing blockage ratio, but the rate of increase depends on the obstacle geometry. The square obstacles lead to highest overpressures while the circular ones produce the lowest overpressure. The time needed to reach the maximum overpressure decreases with increasing blockage ratio and depends on the obstacle geometry.

Keywords: Turbulent premixed flame, Flame acceleration, Large eddy simulation, Explosion overpressure, Obstacles