



FCCI2012-1005



مطالعه عددی تاثیر نسبت انسداد و هندسه موانع بر شتاب‌گیری شعله پیش‌آمیخته در حضور موانع صلب

سبحان امامی کوپائی^۱، کیومرث مظاهری^{*۲}

دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مکانیک، آزمایشگاه دینامیک گازها

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

چکیده

هدف از مقاله حاضر بررسی اثر آشفته‌گی‌های حاصل از حضور موانع صلب مختلف با نسبت انسداد و هندسه‌های گوناگون، بر روی ساختار و شتاب‌گیری شعله با استفاده از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) می‌باشد. برای این منظور سه نوع مانع با سطح مقطع دایره‌ای، مربعی و مثلثی با نسبت انسدادهایی در حدود ۷۲٪-۱۰٪ 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 جت جریان عبوری از روی موانع و سطح آشفته‌گی جریان با افزایش نسبت انسداد افزایش یافته و در نتیجه سرعت انتشار شعله افزایش می‌یابد. حجم مواد نسوخته به تله افتاده در پشت موانع نیز، که سهم به‌سزایی در فشار بیشینه حاصل از انتشار شعله دارد، برای موانع مثلثی بیشترین مقدار خود را دارد.

واژه‌های کلیدی: شعله پیش‌آمیخته آشفته - شتاب‌گیری شعله - شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ - موانع صلب.

۱- مقدمه

انفجارهای گازی به گروهی از فرآیندهای احتراقی پیش‌آمیخته اطلاق می‌شوند که در آنها موج شعله اولیه در اثر اندرکنش با محیط پیرامون (نظیر موانع و مرزهای پیچیده) به سرعت شتاب گرفته و فشار نسبتاً زیادی را تولید می‌کند. شناخت مکانیزمی 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 پائین دستی 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 توربولانس به‌عنوان مکانیزمی 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 چین و چروک خوردن سطح شعله (Flame wrinkling) و یا حتی بسته به شدت آشفته‌گی جریان موجب تقسیم شدن جبهه شعله به جبهه‌های کوچک‌تر می‌شوند. این موضوع باعث افزایش مساحت سطح شعله و به دنبال آن افزایش نرخ سوزش می‌شود.

اندرکنش شعله و توربولانس یک اندرکنش دو طرفه می‌باشد؛ یعنی احتراق نیز می‌تواند باعث افزایش شدت آشفته‌گی و یا حتی مستهلک نمودن آن (آرام سازی مجدد جریان) شود [۱]. از آنجایی که شعله یک موج انبساطی می‌باشد، با شروع حرکت جبهه شعله (با شروع آزادسازی گرما) از انتهای بسته محفظه، گازهای نسوخته موجود در پیش‌روی شعله شتاب گرفته و یک میدان جریان در محفظه شکل می‌گیرد. از آنجایی که در اکثر کاربردهای صنعتی موانع صلب و مرزهای پیچیده‌ای در جلو شعله قرار دارند، اندرکنش بین این جریان گاز و موانع از طریق دو مکانیزم باعث افزایش آشفته‌گی در جریان، افزایش سطح شعله و سرعت سوزش شعله می‌شود. مکانیزم اول، ریزش گردابه، که باعث ایجاد گردابه‌هایی در مقیاس‌های مختلف در جلو

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار گروه مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

FCCI2012-1005

شعله می‌شود و مکانیزم دوم تشکیل نواحی چرخشی در پشت 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 جت نسبتاً پر سرعت از روی موانع عبور کرده و باعث افزایش بیشتر آشفته‌گی در جریان پائین دست می‌شود. البته واضح است که قدرت این جت تحت تاثیر نسبت انسداد (Blockage Ratio (BR)) حاصل از موانع می‌باشد. در کنار این موارد از آنجایی که دمای مواد 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 می‌کنند که این اثر ممکن است به آرام سازی مجدد جریان آشفته منجر شود [۱].

با توجه به مطالب فوق واضح است که فهم فیزیکی و مدل سازی دقیق شعله‌های پیش مخلوط آشفته در محفظه‌های نیمه بسته و در حضور موانع صلب، به عنوان یک مساله چالش برانگیز - به ویژه در بیان دقیق نرخ سوزش و ساختار ناحیه واکنش - شناخته می‌شود. در سال‌های اخیر مطالعات عددی و تجربی مختلفی برای فهم این مساله پیچیده در مقیاس‌های آزمایشگاهی صورت گرفته است. از جمله کارهای تجربی صورت گرفته در دهه اخیر می‌توان به مطالعات ابراهیم (Ibrahim) و همکاران بر روی اندرکنش شعله و مانع صلب با هندسه‌ها و نسبت انسدادهای مختلف [۲] و [۳]، مطالعه تجربی پاتل (Patel) و همکاران بر روی شتاب‌گیری شعله در حضور موانع صلب متوالی [۴]، مطالعه هارگریو (Hargrave) و همکاران [۵] بر روی تاثیر هندسه مانع و نسبت هم ارزی مخلوط سوخت و هوا بر شتاب‌گیری شعله و فشار حاصل از انفجار، کار کنت (Kent) و همکاران [۶] و هال (Hall) و همکاران [۷] در بررسی تاثیر مکان و تعداد صفحات مغشوش کننده متوالی بر ساختار شعله و بیشینه فشار حاصله از اندرکنش شعله با صفحات مغشوش کننده و مطالعه پارک (Park) و همکاران [۸] در بررسی اثر شکل موانع بر شتاب‌گیری شعله در یک محفظه با سطح خروجی بزرگ، اشاره کرد.

به موازات کارهای تجربی اشاره شده، مطالعات عددی مختلفی نیز صورت گرفته است [۹-۱۸]. در اکثر این مطالعات از روش LES برای بررسی رفتار انتشار شعله پیش آمیخته ناپایا در عبور از موانع صلب در مقیاس آزمایشگاهی و از مدل چگالی سطح شعله (Flame Surface Density) FSD به منظور مدل سازی احتراق زیرشبکه استفاده شده است [۱۱-۱۸]. در اکثر این کارها [۱۱-۱۴] از مدل چگالی سطح شعله جبری بهره برده شده است. علارغم اینکه در این مدل احتراقی زیرشبکه، وابستگی کمی بین نرخ واکنش و گردابه‌های حل نشده وجود دارد، نتایج حاصله پیش‌بینی‌های قابل قبولی از مکان و ساختار شعله و اندرکنش بین جریان و توربولانس به دست می‌دهند. البته فشار بیشینه پیش‌بینی شده در این تحقیقات اختلاف ۲۰ تا ۳۰ درصدی با واقعیت داشته که به علت مدل احتراقی زیرشبکه آنها می‌باشد [۱۱]. ابراهیم و همکاران [۱۵]، با استفاده از فرمولاسیون FSD دینامیکی پیش‌بینی‌های بسیار دقیق‌تری به دست آوردند. در مطالعات دیگری که توسط دی‌سارلی و همکاران [۱۶-۱۸] بر روی انتشار شعله ناپایا در عبور از موانع پشت سر هم انجام گرفت، نشان داده شد که گردابه‌های بزرگ مقیاس نقش اصلی را در شکل‌گیری ساختار شعله بازی می‌کنند. به عبارت دیگر گردابه‌های زیرشبکه تاثیری بر رفتارهای کیفی شعله (نظیر شکل و ساختار شعله، ترتیب رژیم‌های احتراق در طول مسیر، افزایش و کاهش سرعت بعد از عبور از موانع و روند نمودار فشار) ندارند. با این حال مدل کردن تاثیر آنها بر نرخ واکنش برای رسیدن به پیش‌بینی‌های کمی دقیق از سرعت شعله و فشار بیشینه ضروری می‌باشد [۱۶]. با اینکه استفاده از مدل‌های احتراقی زیرشبکه در کدهای CFD با موفقیت همراه بوده است اما هنوز دست یابی به مدل زیرشبکه احتراقی بهینه (از لحاظ دقت، هزینه محاسباتی، دامنه کاربرد، بکارگیری آسان و کامل بودن) برای مدل سازی انفجار گازی با استفاده از روش LES در دست مطالعه می‌باشد.

برای این منظور در مقاله حاضر به بررسی دقت حلگر احتراقی XiFoam از بسته نرم‌افزاری OpenFOAM ویرایش ۱/۷ که در آن از مدل احتراقی زیرشبکه چین خوردگی سطح شعله ولر (Weller) [۱۹] استفاده می‌شود، در مدل سازی انتشار شعله‌های پیش‌آمیخته در عبور از موانعی با اندازه‌ها و هندسه‌های مختلف پرداخته شده است. البته دقت این حلگر در شبیه‌سازی انتشار و شتاب‌گیری شعله‌های پیش‌آمیخته در عبور از موانع مغشوش کننده با چیدمان‌های مختلف، پیشتر با مقایسه با نتایج عددی مراجع ۱۳ و ۱۴ و نتایج تجربی مرجع ۶ مورد ارزیابی قرار گرفته است [۲۰]. در کنار این موضوع، از

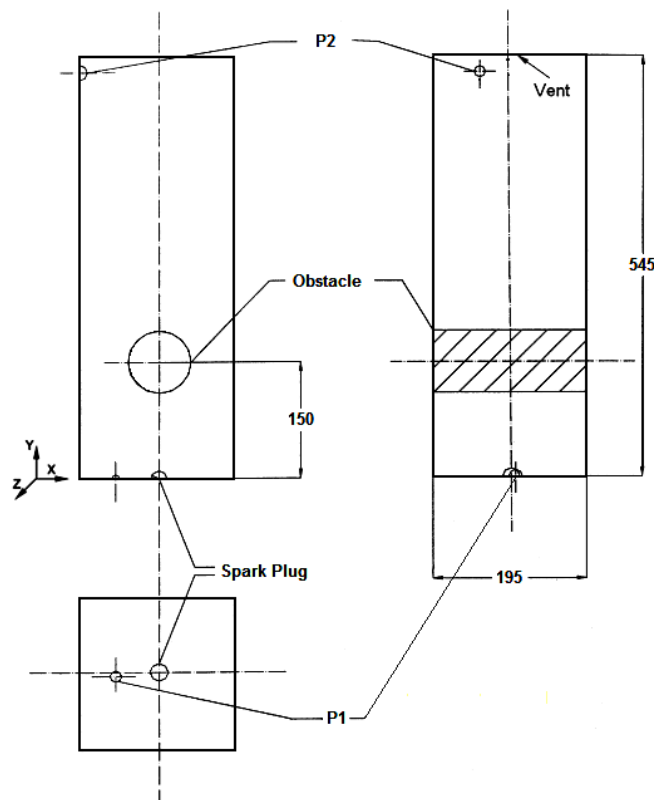
FCCI2012-1005

آنجائی که اثر پدیده‌های محلی ذکر شده (نظیر ریزش گردابه، تشکیل نواحی چرخشی (جفت گردابه‌ها) در پشت موانع و تاثیر جت جریان در عبور از اطراف موانع) بر روی فرآیند کلی انفجار و سرعت شعله هنوز به خوبی فهم نشده است، در مقاله حاضر با انتخاب موانعی با هندسه‌ها و نسبت انسدادهای مختلف سعی شده تا نقش عوامل یاد شده در شتاب گیری شعله و ساختار آن بهتر نشان داده شود.

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 ۷۲٪-۱۰٪ می‌باشد. نتایج تجربی این بررسی توسط مزری (Masri) و همکاران [۲] گزارش شده است. آنها با استفاده از تصاویر ویدئویی پرسرعت، موقعیت جبهه شعله و حجم مخلوط به تله افتاده در پائین دست موانع را در لحظات مختلف مورد بررسی قرار داده‌اند.

۲- 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 جرقه در آنجا زده می‌شود، بسته و انتهای دیگر آن به اتمسفر باز می‌باشد. این محفظه توسط مخلوط هوا-پروپان (C_3H_8) ساکن با نسبت هم‌ارزی ۱/۰ پر شده است. یک مانع صلب نیز در فاصله ۱۵۰mm از محل 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 ۷۲٪-۱۰٪ 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 که به طریق تجربی توسط مزری و همکاران ([۲]) به دست آمده است برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی استفاده می‌شود.



شکل ۱- نمای سه گانه از پیکربندی محفظه احتراق، تمام اندازه‌ها به mm می‌باشند.

۳- شبیه‌سازی عددی و روش حل معادلات

معادلات حاکم در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با فیلتر گیری جرمی از 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 [۱]:

$$b = \frac{Y_f}{Y_{fu}} \quad (1)$$

به طوری که Y_f کسر جرمی سوخت و Y_{fu} کسر جرمی سوخت در مخلوط نسوخته (واکنشگرها) می‌باشند. در معادلات بقای فیلتر شده کمیت‌های مجهولی وجود دارند که نیازمند مدل کردن هستند تا در نهایت دستگاه معادلات حاکم بسته شود.

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

نسبت انسداد (%)	ابعاد (mm)	نشانه	نوع مانع
۹٫۷	قطر = ۱۹٫۰	C1	دایره
۳۲٫۶	قطر = ۶۳٫۵	C2	دایره
۵۴٫۷	قطر = ۱۰۶٫۷	C3	دایره
۷۱٫۶	قطر = ۱۳۹٫۶	C4	دایره
۸٫۷	ضلع = ۱۷٫۰	S1	مربع
۲۶٫۰	ضلع = ۵۰٫۸	S2	مربع
۴۰٫۷	ضلع = ۷۹٫۳	S3	مربع
۵۵٫۴	ضلع = ۱۰۸٫۰	S4	مربع
۱۲٫۶	ضلع = ۲۴٫۵	T1	مثلث
۳۱٫۸	ضلع = ۶۲٫۰	T2	مثلث
۵۲٫۸	ضلع = ۱۰۳٫۰	T3	مثلث

۱-۳- مدل‌های زیرشبکه برای تانسور تنش و شارهای اسکالر

در اینجا به منظور مدل‌سازی تانسور تنش زیرشبکه از مدل لزجت گردابه‌ای اسماگورینسکی (Smagorinsky) استفاده شده و لزجت گردابه‌ای به صورت رابطه $\mu_{SGS} = \bar{\rho} C_k \sqrt{k_{SGS}} \Delta$ تعریف می‌شود که در آن C_k ضریب ثابت بوده و Δ پهناي فیلتر، با اندازه شبکه $\Delta = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3}$ ربط داده می‌شود. k_{SGS} یا انرژی جنبشی زیرشبکه نیز از حل یک معادله انتقال به دست می‌آید [۲۰]. به منظور مدل‌سازی شارهای زیرشبکه حرارت و متغیر پیشرفت واکنش از فرض انتقال گرادیان استفاده شده است. عدد پرنتل آشفته Pr_t و عدد اشمیت آشفته Sc_t نیز برابر ۰٫۴ در نظر گرفته شده‌اند [۱۱].

۲-۳- مدل احتراق زیرشبکه

از آنجایی که ضخامت شعله پیش‌آمیخته کوچکتر از اندازه شبکه مورد استفاده در LES می‌باشد، جبهه شعله بر روی شبکه محاسباتی حل نمی‌شود. بنابراین شعله یک پدیده زیرشبکه باقی مانده که اندرکنش آن با توربولانس زیرشبکه باید مدل شود. در اینجا به منظور مدل‌سازی جمله نرخ واکنش زیرشبکه از مدل احتراقی (Flame Surface Wrinkling) FSW که برای

FCCI2012-1005

اولین بار توسط ولر و همکاران [۱۹] به عنوان جایگزینی برای مدل‌های 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 می‌کند در نظر گرفته می‌شود. نرخ واکنش زیرشبکه در این مدل همانند دیگر مدل‌های چگالی سطح شعله از رابطه $\bar{\omega} = \bar{\rho}_u S_{II} \Xi |\nabla \bar{b}|$ به دست می‌آید. در این رابطه ρ_u چگالی گازهای نسوخته، S_{II} سرعت سوزش شعله آرام و Ξ ضریب چین خوردگی شعله زیرشبکه می‌باشند. Ξ را می‌توان به صورت نسبت سرعت سوزش آشفته به آرام در نظر گرفته (S_{II}/S_{II}) و با چگالی سطح شعله به صورت $\Sigma = \Xi |\nabla \bar{b}|$ ربط داد. به عبارت دیگر Ξ چگالی چین خوردگی سطح شعله و بیانگر مساحت سطح شعله در مقیاس زیرشبکه تقسیم بر تصویر آن در جهت انتشار می‌باشد. روابط مختلفی برای محاسبه کمیت‌های Ξ و S_{II} ارائه شده است اما در مدل ولر از دو معادله انتقال برای محاسبه این کمیت‌ها استفاده می‌شود [۲۱].

۴- شبکه محاسباتی، شرایط مرزی و اولیه

میدان محاسباتی دارای ابعاد $195 \times 545 \times 195 \text{ mm}^3$ (محفظه احتراق) می‌باشد؛ که شعله منتشر شده در آن از روی مانع صلب و در حضور شرایط مرزی دیوار صلب عبور می‌کند. شبیه‌سازی در مختصات کارتزین غیر یکنواخت سه بعدی برای جریان تراکم پذیر صورت گرفته است. به منظور استقلال جواب از شبکه محاسباتی، ۳ شبکه عددی مختلف با اندازه‌های $98 \times 225 \times 78$ ، $120 \times 275 \times 100$ و $142 \times 327 \times 130$ برای حل جریان در حضور مانع S4 به کار گرفته شده است. پس از مقایسه نتایج، و با توجه به محدودیت‌های سخت‌افزاری موجود، شبکه $120 \times 275 \times 100$ در جهت‌های x ، y و z به عنوان شبکه محاسباتی انتخاب شده است. برای رسیدن به دقت مناسب، گام‌های زمانی نیز به گونه‌ای انتخاب می‌شود که عدد CFL کمتر از ۰/۲ باقی بماند.

شرایط اولیه به صورت میدان ساکن با متغیر پیشرفت یک در نظر گرفته می‌شود. سرعت سوزش آرام برای مخلوط استوکیومتری پروپان-هوا برابر $0/446 \text{ m/s}$ در نظر گرفته می‌شود. جرقه با تنظیم متغیر پیشرفت برابر ۰ و اعمال دمای آدیاباتیک در نیم‌کره‌ای به شعاع 15 mm در مرکز انتهای بسته محفظه مدل می‌شود. البته شرایط اولیه در نظر گرفته شده برای کره جرقه بر زمان‌های به دست آمده در تحقیق حاضر تاثیر گذار خواهد بود، که بررسی این موضوع و تاثیر آن 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 منتشر شده در جلو شعله و تاثیر آن بر میدان فشار داخل محفظه، از شرط مرز غیر انعکاسی استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که دیگر مباحث عددی به تفصیل در مرجع ۲۰ آورده شده است.

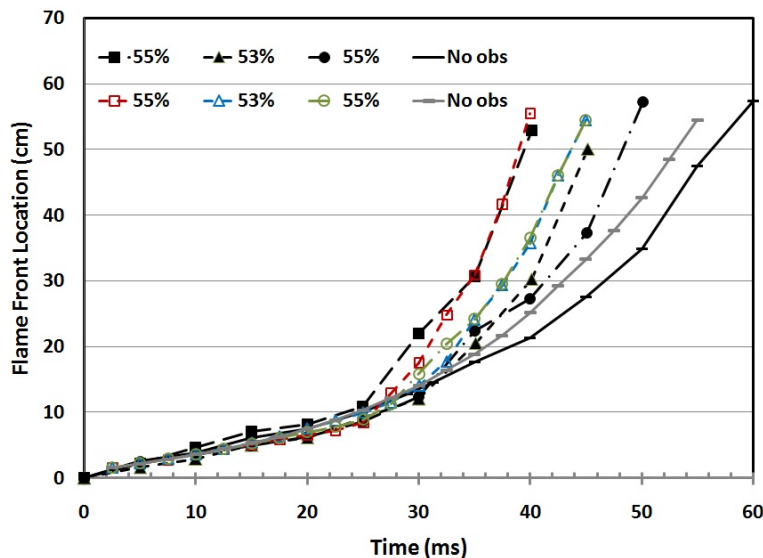
۴- نتایج و بحث پیرامون آن

۴-۱- اثر هندسه موانع و نسبت انسداد بر سرعت انتشار شعله

در شکل (۲) مکان جبهه شعله در زمان‌های مختلف برای موانع دایره‌ای (C3)، مربعی (S4) و مثلثی (T3) که دارای نسبت انسدادهای بین $55\% - 53\%$ می‌باشند، نشان داده شده است. در شبیه‌سازی LES حاضر، همانند مراجع ۱۵-۱۲، مکان شعله با اندازه‌گیری دورترین نقطه لبه حمله شعله (جایی که متغیر پیشرفت برابر ۰/۵ می‌باشد) از انتهای بسته محفظه تعریف می‌شود. به منظور ارزیابی دقت شبیه‌سازی حاضر نمودارهای به دست آمده در کنار نتایج تجربی مرزی و همکاران [۲] رسم شده‌اند. در این شکل نمودارهای رنگی با نشانه‌های توخالی نتایج شبیه‌سازی LES حاضر و نمودارهای سیاه سفید با نشانه‌های توپر نتایج تجربی می‌باشند. از آنجایی که در کار تجربی، جرقه تنها حجم کوچکی از مخلوط را مشتعل می‌کند، بنابراین تاخیری قبل از شروع انتشار شعله به وجود می‌آید. از آنجایی که در کار عددی، شروع انتشار شعله از یک ناحیه نیم کره‌ای پیش گرم شده با متغیر پیشرفت صفر شروع می‌شود این تاخیر زمانی در نظر گرفته نمی‌شود. با مقایسه نتایج عددی و تجربی

FCCI2012-1005

برای حالت بدون مانع، مشاهده می‌گردد که اگر این زمان تاخیر در حدود ۲/۵ms در نظر گرفته شود زمان به‌دست آمده از کار حاضر برای موقعیت شعله ۱۵۰mm (مکان قرار گیری موانع) با نتایج تجربی برابری می‌کند. با توجه به این موضوع کلیه زمان‌های گزارش شده در این مقاله ۲/۵ms شیفت داده شده‌اند. این روش در کار عددی کیرک‌پاتریک و همکاران [۱۱] نیز به‌کار گرفته شده به‌طوری که زمان‌های به دست آمده در کار آنها برای مقایسه با نتایج تجربی به اندازه ۱۲/۵ms شیفت داده شده است.



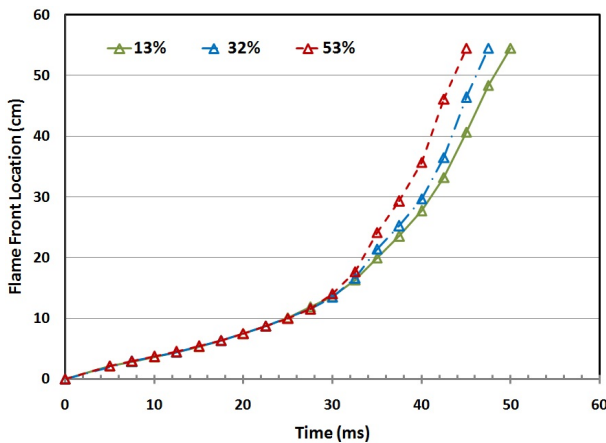
شکل ۲- موقعیت جبهه شعله در زمان‌های مختلف برای موانع دایره‌ای (C3)، مربعی (S4) و مثلثی (T3) با نسبت انسدادهای ۵۵٪-۵۳٪، نمودارهای رنگی با نشانه‌های توخالی نتایج شبیه‌سازی عددی حاضر و منحنی‌های سیاه با نشانه‌های توپر نتایج تجربی مزی و همکاران [۱] می‌باشند. نشانه‌های مربعی، مثلثی و دایره‌ای به ترتیب بیانگر موانع مربعی، مثلثی و دایره‌ای می‌باشند.

همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، برای تمامی هندسه‌های مانع (با نسبت انسدادهای بین ۵۵٪-۵۳٪)، شعله در زمانی حدود ۲۵-۲۰ms به مانع می‌رسد؛ به عبارت دیگر طی مراحل اولیه شتاب‌گیری شعله تا حدود ۲۵-۲۰ms بعد از جرقه، مکان شعله به مقدار کمی تحت تاثیر حضور موانع قرار داشته و شعله با سرعتی در حدود ۴/۵m/s به مسیر خود ادامه می‌دهد. پس از برخورد شعله با مانع، فاز شتاب‌گیری شعله به سمت انتهایی باز محفظه آغاز می‌شود. شتاب‌گیری برای مانع مربعی بیشترین مقدار را دارد. برای مانع مربعی شعله بعد از حدود ۴۰ms از محفظه خارج می‌شود؛ در حالی که برای موانع مثلثی و دایره‌ای این مقدار برابر ۴۵ms می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که سرعت شعله در حضور مانع مربعی نسبت به دو مانع دیگر بیشتر افزایش یافته است. البته در نتایج تجربی خروج شعله برای هندسه‌های فوق به ترتیب در حدود ۴۷ms، ۴۰ms 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 ۵۵ms به انتهایی 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 با می‌گردد. به علت ماهیت انبساطی شعله، لبه حمله شعله با سرعت θS_{fl} (سرعت سوزش شعله آرام و θ ضریب انبساط حرارتی، $\theta = T_b/T_{fl} \approx \rho_b/\rho_b$ می‌باشند) در جهت طولی منتشر می‌شود، بنابراین انتخاب دما برای ناحیه جرقه بر شتاب‌گیری اولیه شعله و جریان تاثیر گذار خواهد بود. با توجه به اینکه در کار تجربی نسبت چگالی گازهای سوخته به نسوخته در حدود ۱:۷ گزارش شده به نظر انتخاب دمای شعله آدیاباتیک برای ناحیه جرقه مناسب

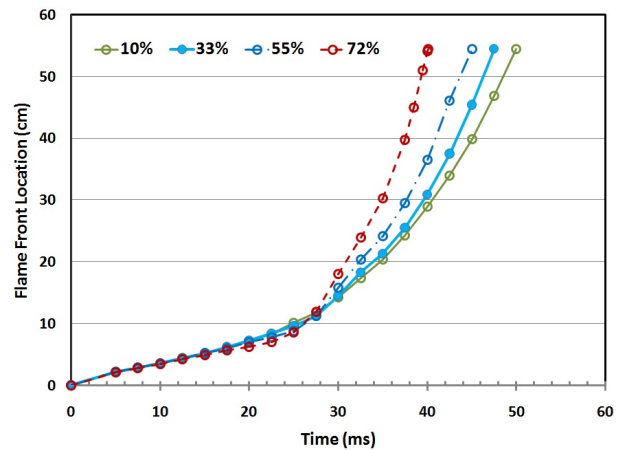
FCCI2012-1005

نمی‌باشد. زیرا با انتخاب این دما نسبت چگالی گازهای سوخته به نسوخته در حدود ۸/۵:۱ تنظیم می‌شود. مطالعه دقیق تاثیر خواص ناحیه جرقه بر دینامیک شعله و سطح فشار ایجاد شده نیازمند بررسی‌های عددی بیشتری می‌باشد.

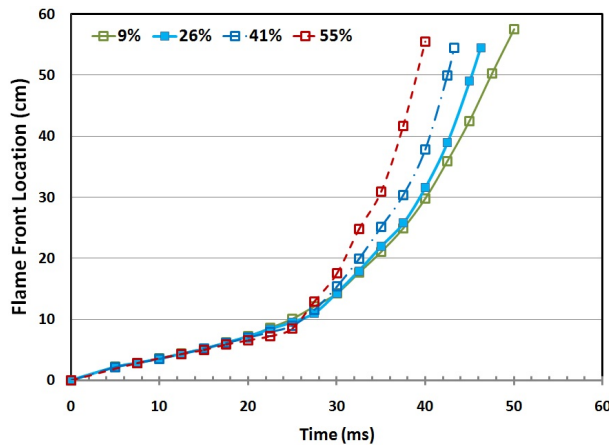
در شکل (۳) تاثیر نسبت انسداد موانع بر روی موقعیت جبهه شعله، برای موانع دایره‌ای، مثلثی و مربعی مورد بررسی قرار گرفته است. این نمودارها نشان می‌دهند که سرعت شعله با افزایش نسبت انسداد افزایش می‌یابد. اگرچه نتایج حاضر سرعت انتشار شعله را بیشتر از نتایج تجربی نشان می‌دهند، اما رفتار نمودارها تطابق خوبی با نتایج تجربی مرجع ۲ دارند. طبق نتایج حاصله 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.



(ب)



(الف)



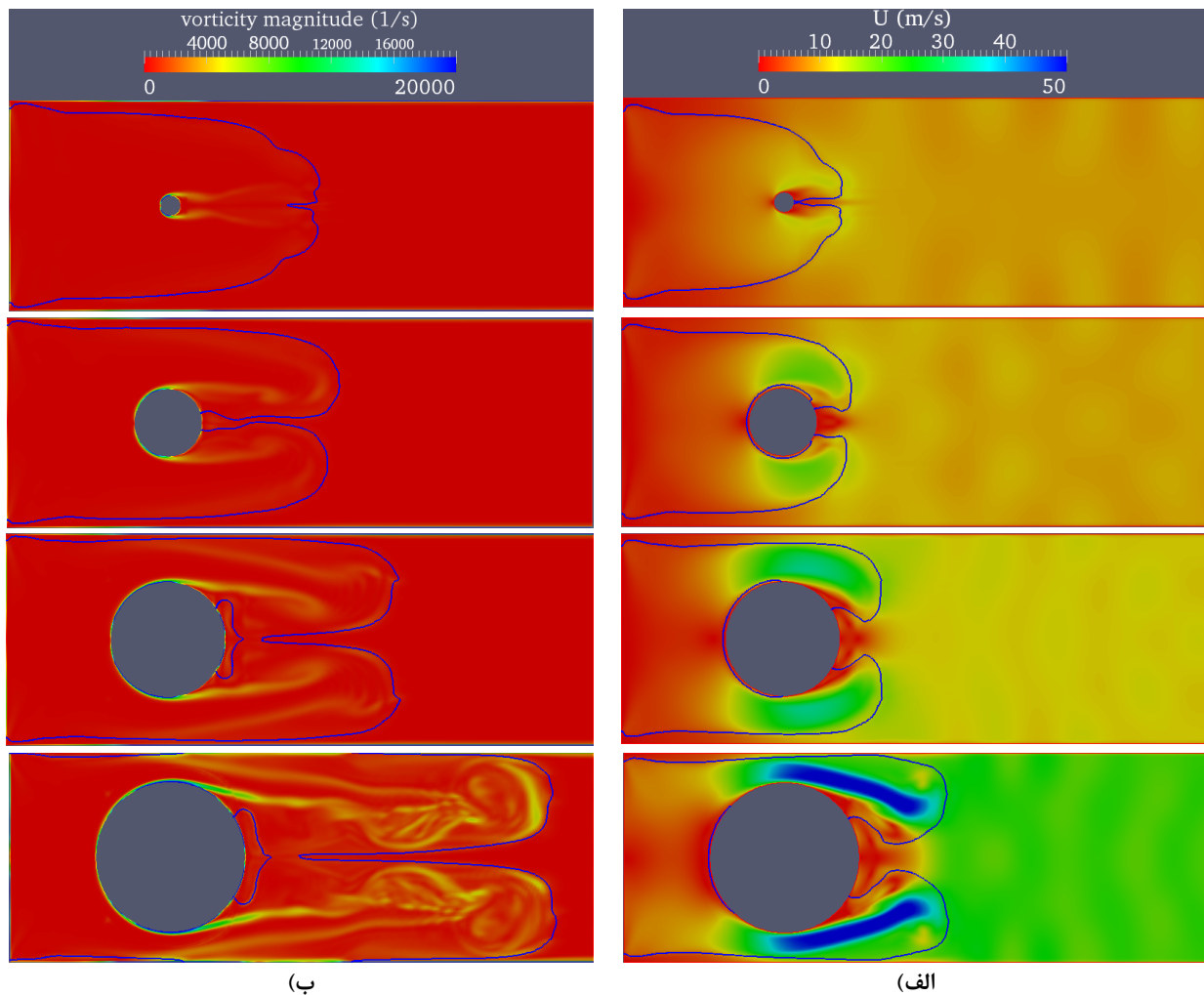
(ج)

شکل ۳- 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٪).

به منظور بررسی اثر نسبت انسداد (اندازه موانع) بر شتاب‌گیری شعله، کانتورهای سرعت و ورتیسیتی، در شکل (۴) برای موانع C1، C2، C3 و C4 آورده شده‌است. همانطور که در شکل (۴-الف) مشاهده می‌شود، جریان در عبور از فاصله بین موانع و دیواره‌های محفظه به شدت سرعت می‌گیرد. سرعت این جت جریان با افزایش نسبت انسداد افزایش می‌یابد. برای نمونه سرعت این جت 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

FCCI2012-1005

جابه‌جائی بیشتر جبهه شعله شده و نهایتاً بیانگر این موضوع است که افزایش نسبت انسداد سرعت شعله را افزایش می‌دهد. در شکل (۴-ب) اثر نسبت انسداد بر میدان ورتیسیتی شکل گرفته در پشت موانع نیز نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت انسداد (و افزایش سرعت جت) میدان ورتیسیتی تقویت شده و ریزش گردابه در دنباله ایجاد شده در پشت مانع افزایش می‌یابد. در اثر برهمکنش این گردابه‌ها با جبهه شعله، و گاهی ورود آنها به ناحیه پیش‌گرم، فرآیند اختلاط شدت گرفته و به دنبال آن، نرخ واکنش و سرعت انتشار شعله افزایش می‌یابد.

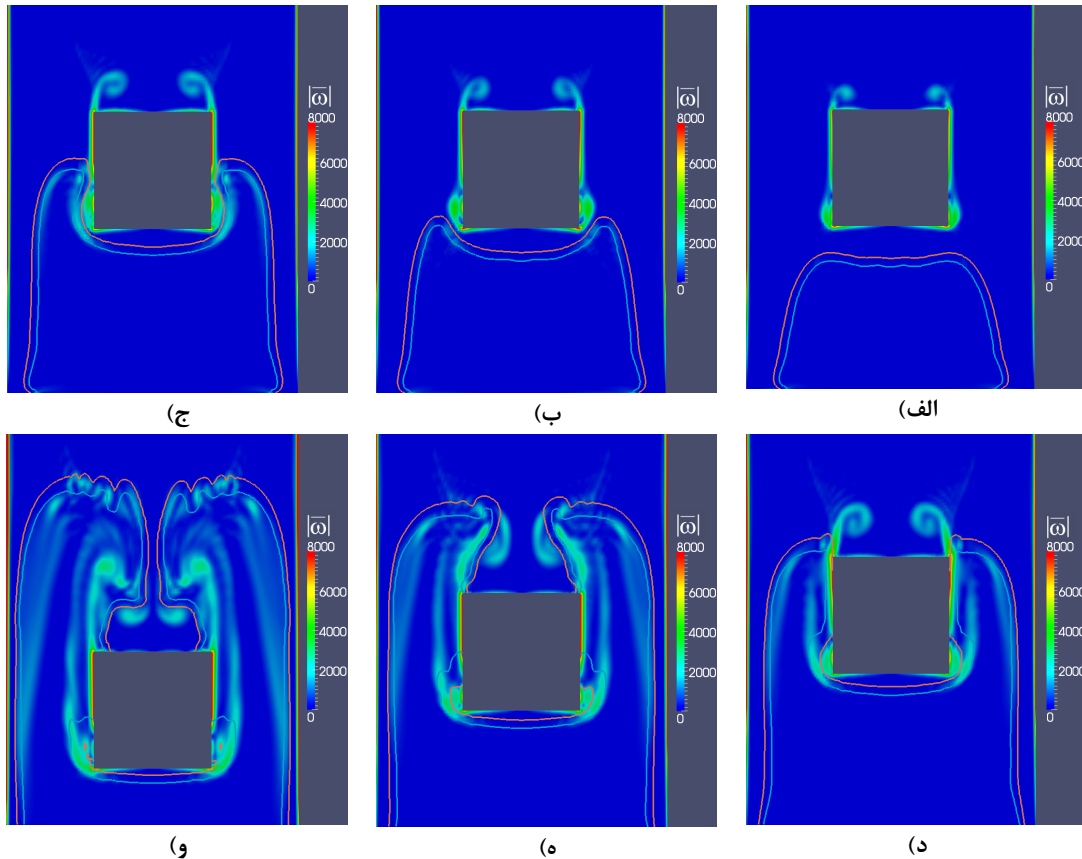


شکل ۴- الف) میدان مقدار سرعت برای موانع دایره‌ای C1 ($BR=0.10$), C2 ($BR=0.33$), C3 ($BR=0.55$) و C4 ($BR=0.72$) به ترتیب از بالا به پائین در زمان 35ms . ب) میدان مقدار ورتیسیتی ($|\omega|$ (1/s)) برای موانع دایره‌ای C1, C2, C3 و C4 به ترتیب از بالا به پائین در حدود 40ms . در این تصاویر خط تیره رنگ بیانگر جبهه شعله (خط $b=0.5$) بوده که از سمت چپ به راست منتشر می‌شود.

به منظور درک بهتر از اندرکنش گردابه‌های ایجاد شده در دنباله موانع با جبهه شعله، در شکل (۵) اندرکنش جبهه شعله و میدان ورتیسیتی برای مانع مربعی S3 نشان داده شده است. در تصاویر اولیه با سرعت گرفتن جبهه شعله و افزایش سرعت جریان، عدد رینولدز افزایش یافته و میدان ورتیسیتی تقویت می‌شود؛ در نتیجه مقیاس طولی گردابه‌های آشفته کاهش یافته و تعداد آنها بیشتر می‌شود و نهایتاً در تصاویر پایانی اندرکنش شعله با گردابه‌ها، نفوذ آنها به درون ساختار شعله، چین و چروک برداشتن جبهه شعله و برگشتن جبهه شعله به سمت پشت مانع قابل مشاهده است. در این مساله ضریب چین‌خوردگی سطح

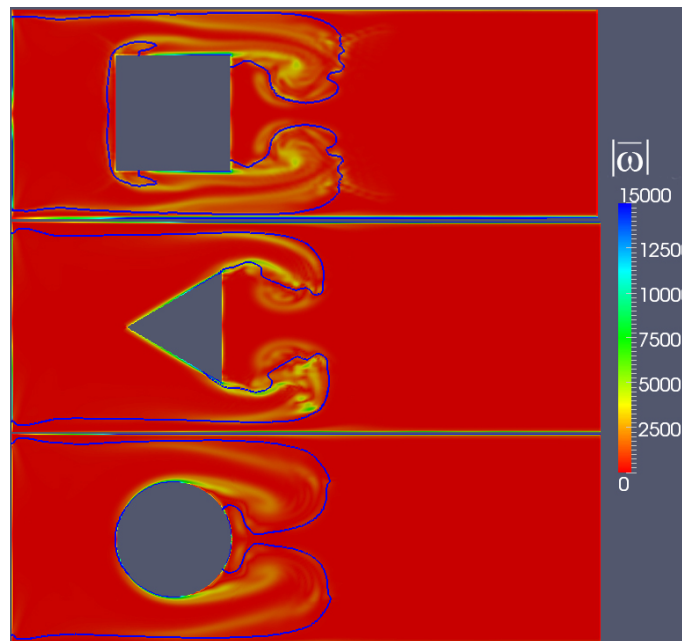
FCCI2012-1005

شعله زیرشبکه Ξ از مقدار $1/0.5$ در زمان 27.5ms تا $1/5$ در زمان 37.5ms و نرخ واکنش زیرشبکه از $67.84(1/s)$ تا $(1/s)$ در همین زمانها افزایش می‌یابد. این مقادیر با متوسط‌گیری از داده‌های محاسبه شده بر روی لبه حمله شعله (خط $b=0.5$) و به اندازه کافی دور از دیواره‌های محفظه، محاسبه شده‌اند. همچنین سرعت شعله از 14m/s در زمان 27.5ms تا 25m/s در زمان 37.5ms افزایش می‌یابد.



شکل ۵- کانتور مقدار ورتیسیتی $(|\omega| (1/s))$ برای مانع S3 ($BR=0.41$)، در زمان‌های 25 ، 27.5 ، 30 ، 32.5 ، 35 و 37.5 میلی ثانیه. خطوط رسم شده در شکل‌ها، خطوط b ثابت 0.9 (خط بالائی) و 0.1 (خط پائینی) می‌باشند. در این شکل‌ها شعله از سمت پائین به بالا در حال انتشار است.

برای بررسی اثر هندسه بر میدان ورتیسیتی در شکل (۶) میدان ورتیسیتی برای سه مانع مختلف با نسبت انسدادهای تقریباً مشابه رسم شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت توزیع گردابه‌ها برای مانع مربعی از شدت و گستردگی بیشتری برخوردار است.



شکل ۶- کانتور مقدار ورتیسیتی ($|\omega|$ (1/s)) برای موانع S4 ($BR=0.55$), T3 ($BR=0.53$) و C3 ($BR=0.55$) از بالا به پائین در زمان های ۳۵، ۳۷/۵ و ۳۷/۵ میلی ثانیه. در این تصاویر خط تیره رنگ بیانگر جبهه شعله (خط $b=0.5$) بوده که از سمت چپ به راست حرکت می کند.

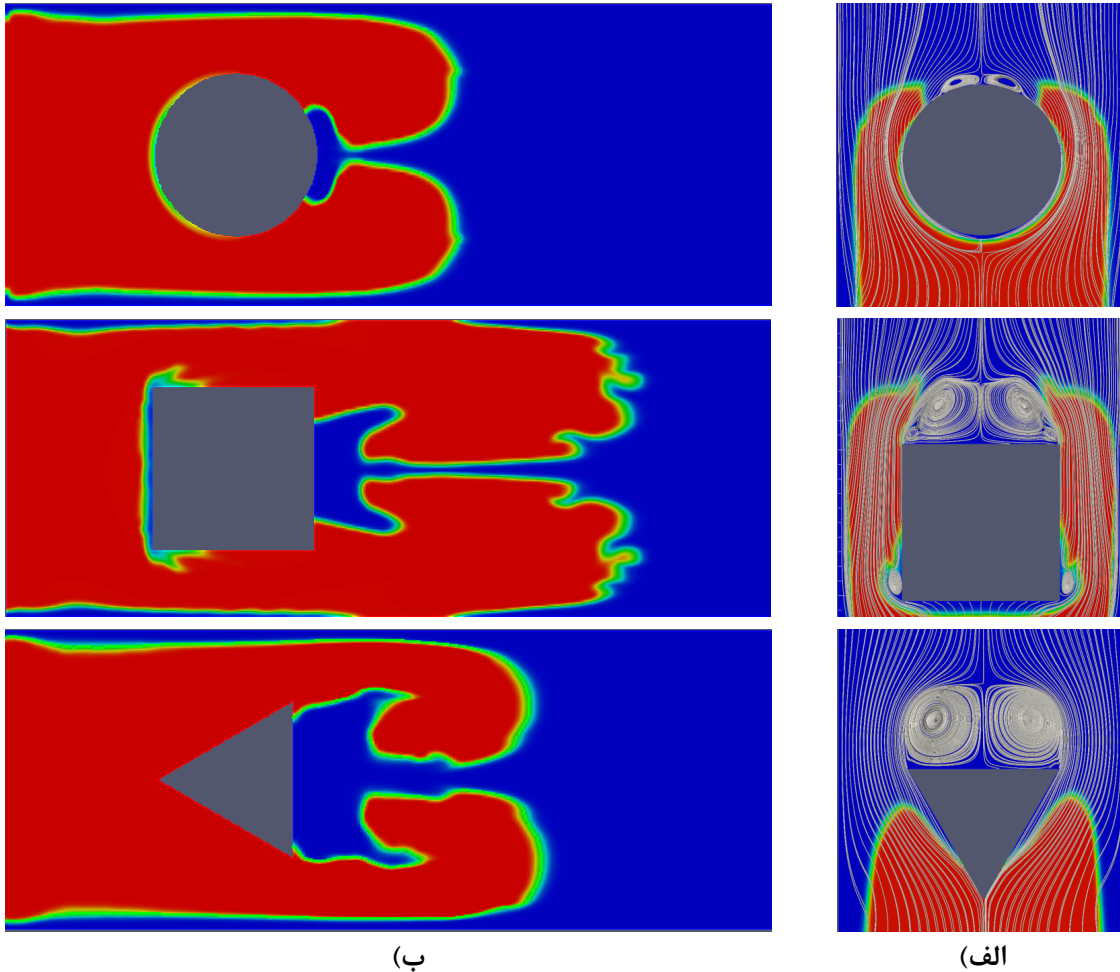
۲-۴- اثر اندازه جفت گردابه ها بر حجم گازهای نسوخته

همانطور که گفته شد با شروع انتشار شعله، جریانی در پائین دست شعله شکل می گیرد. این جریان با عبور از ناحیه بین مانع و دیوارهای محفظه به شکل یک جت نسبتاً پر سرعت در می آید. از طرفی به علت حضور مانع یک جفت گردابه در پائین دست موانع شکل می گیرد که با شتابگیری شعله و افزایش سرعت جریان این گردابه ها رشد می کنند. کاهش سطح مقطع بین مانع و دیواره باعث شتابگیری سریع جریان و نتیجتاً شعله می شود (اثر جابه جایی خالص). بنابراین شعله در جهت لایه برشی بین گردابه و جریان جت حرکت کرده و به درون گردابه وارد نمی شود. از این رو مقداری از مخلوط نسوخته در پشت مانع به تله می افتد. مقدار این مخلوط نسوخته با اندازه جفت گردابه های تشکیل شده در پشت موانع، که برای هندسه های مختلف متفاوت است، متناسب می باشد. همان طور که در شکل (۷) مشاهده می شود، حجم مخلوط نسوخته به تله افتاده در پشت موانعی با نسبت انسداد یکسان برای موانع با سطح مقطع مثلثی و مربعی به مراتب بیشتر می باشد.

با رسیدن جبهه شعله به انتهای گردابه، شعله به آرامی وارد ناحیه چرخشی پشت مانع شده و شروع به سوزاندن بسته گازهای نسوخته می کند. در حقیقت مصرف این گازهای نسوخته در مراحل آخر انتشار شعله روی می دهد؛ البته زمان مورد نیاز برای سوختن بسته گازهای نسوخته برای موانع دایره ای کوتاه تر می باشد؛ زیرا که به علت اندازه کوچک گردابه ها در پشت مانع دایره ای جبهه شعله به مجرد عبور از مانع وارد جفت گردابه می شود.

طول جفت گردابه ها (در بیشترین حالت) برای سطح مقطع دایره ای (C3)، مربعی (S4) و مثلثی (T3) به ترتیب برابر ۱۷، ۴۷ و ۸۰ میلی متر می باشد. این نتایج نشان می دهند که اندازه جفت گردابه ها وابستگی شدیدی به هندسه مانع دارد و برای مانع مثلثی بیشتر است. تفاوت در اندازه جفت گردابه ها در اثر به هم ریختگی جریان گاز نسوخته جلو شعله می باشد که تحت تاثیر عبور جت مانند جریان جلو شعله از فاصله بین مانع و دیواره است. همانطور که در شکل (۷-الف) مشاهده می شود برای مانع مربعی دو گردابه کوچک در جلو مانع (قسمت پائینی مانع) نیز شکل می گیرد. این موضوع باعث می شود که مقداری از مخلوط محترقه به صورت نسوخته در قسمت جلو مانع باقی بماند.

FCCI2012-1005

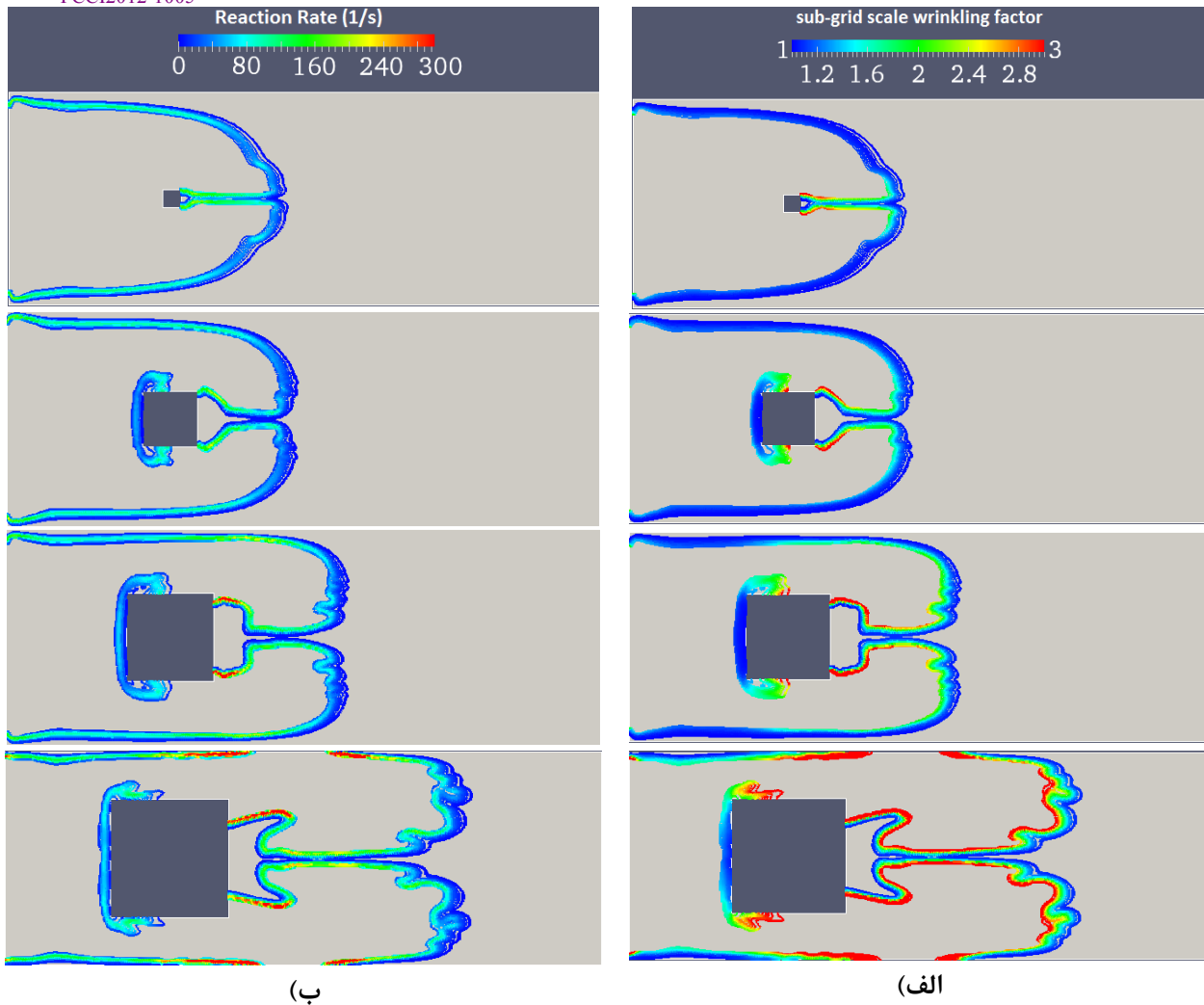


شکل ۷- الف) شکل‌گیری جفت گردابه در پشت موانع C3 (BR=۰.۵۵)، S4 (BR=۰.۵۵) و T3 (BR=۰.۵۳) در زمان ۳۰ms. در این تصاویر کانتور متغیر پیشرفت واکنش b به همراه خطوط جریان رسم شده‌اند. در این شکل‌ها شعله از سمت پائین به بالا در حال انتشار است. ب) کانتور متغیر پیشرفت واکنش b برای موانع C3، S4 و T3 به ترتیب از بالا به پائین در زمان‌های ۳۷/۵ms، ۳۷/۵ms و ۴۰ms. مقدار b از ۱ برای مواد نسوخته جلو جبهه شعله تا ۰ برای مواد کاملاً سوخته تغییر می‌کند.

۳-۴- اثر نسبت انسداد بر چین خوردگی شعله و نرخ واکنش زیرشبکه

در شکل (۸) مقادیر ضریب چین خوردگی شعله زیرشبکه و نرخ واکنش زیرشبکه بر روی خطوط b ثابت (در دامنه ۰/۹۸ - ۰/۰۲) برای موانع S1، S2، S3 و S4 نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود چین خوردگی سطح شعله، چه در مقیاس‌های بزرگ و چه در مقیاس‌های زیرشبکه، تحت تاثیر ریزش گردابه از لبه‌های تیز مانع مربعی می‌باشد. از آنجایی که با افزایش نسبت انسداد مقدار ورتیسیتی در دنباله موانع افزایش می‌یابد، مقدار ضریب چین خوردگی سطح شعله نیز تقویت می‌شود که این موضوع به خوبی در شکل (۸-الف) قابل مشاهده است. در شکل (۸-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 دوشکل تاثیر دیواره‌های محفظه بر روی افزایش چین خوردگی سطح شعله و نرخ واکنش نیز قابل مشاهده است که اهمیت مدل‌سازی دقیق اثر دیواره‌ها را یادآوری می‌کند.

FCCI2012-1005



شکل ۸- الف) میدان ضریب چین خوردگی سطح شعله (Ξ) برای موانع مربعی S1 (BR=٪۹)، S2 (BR=٪۲۶)، S3 (BR=٪۴۱) و S4 (BR=٪۵۵)، به ترتیب از بالا به پایین در زمان ۳۷/۵ms. مقادیر موجود برای Ξ بر روی خطوط b ثابت نمایش داده شده‌اند. ب) میدان نرخ واکنش زیرشبکه برای موانع مربعی S1، S2، S3 و S4، به ترتیب از بالا به پایین در زمان ۳۷/۵ms. مقادیر موجود برای نرخ واکنش بر روی خطوط b ثابت نمایش داده شده‌اند.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

همانطور که مشاهده شد، شعله به‌هنگام برهم کنش با موانع شتاب می‌گیرد؛ به‌طوری که برای نمونه سرعت شعله در حضور مانع مربعی S3 از حدود ۴m/s در زمان رسیدن به مانع تا ۵۰m/s در زمان خروج از محفظه افزایش می‌یابد. نتایج حاضر نشان دادند که مانع مربعی به علت داشتن گوشه‌های تیز، که ریزش گردابه بیشتری را ایجاد می‌کند، بیشترین شتاب‌گیری را باعث شده و کمترین شتاب‌گیری مربوط به مانع دایره‌ای است. شکل‌گیری جفت گردابه در پشت مانع باعث می‌شود که مخلوطی از گازهای نسوخته در پشت مانع به تله افتاده که این مخلوط پس از اتصال دوباره شعله در پشت گردابه مصرف می‌شود. اتصال مجدد شعله در پشت گردابه در پشت مانع دایره‌ای سریعتر روی می‌دهد. نسبت انسداد نیز اثرات قابل توجهی بر شتاب‌گیری شعله دارد. در حقیقت افزایش نسبت انسداد باعث افزایش سرعت جت جریان، رشد آشفتگی‌ها و افزایش چین‌خوردگی شعله و نهایتاً نرخ سوزش می‌شود.



FCCI2012-1005

در حالت کلی نتایج عددی سه بعدی حاضر، در توصیف شکل کلی شعله، شتاب‌گیری شعله در عبور از موانع و درون لوله و بیان تاثیرات نسبت انسداد و هندسه موانع بر انتشار شعله همخوانی خوبی با نتایج تجربی داشتند؛ مخصوصاً که نتایج عددی به خوبی اندرکنش شعله و گردابه‌های آشفته حاصل از موانع را نشان دادند. البته همانطور که اشاره شده نتایج حاضر سرعت انتشار شعله را بیشتر از مقادیر تجربی پیش‌بینی می‌کنند. از آنجایی که محاسبه دقیق سرعت شعله و نرخ واکنش تحت تاثیر گردابه‌های کوچک مقیاس و احتراق زیر شبکه می‌باشد، اختلاف مشاهده شده می‌تواند به دلیل عدم توانایی مدل احتراقی در پیش‌بینی دقیق اندرکنش شعله با میدان جریان آشفته حاصل از موانع باشد که این موضوع یکی از اصلی‌ترین چالش‌های موجود در این زمینه می‌باشد.

مراجع

- 1- Poinso, T., and Veynante, D., *Theoretical and Numerical Combustion*, 2nd Edition, R.T. Edwards, Inc., 2005.
- 2- Masri, A.R., Ibrahim, S.S., Nehzat, N., and Green, A.R., "Experimental study of premixed flame propagation over various solid obstructions", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 21, pp. 109-116, 2000.
- 3- Ibrahim, S.S., Hargrave, G.K., and Williams, T.C., "Experimental investigation of flame/solid interactions in turbulent premixed combustion", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 24, pp. 99-106, 2001.
- 4- Patel, S., Jarvis, S., Ibrahim, S.S., and Hargrave, G.K., "An experimental and numerical investigation of premixed flame deflagration in a semiconfined explosion chamber", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, pp. 1849-1854, 2002.
- 5- Hargrave, G.K., Jarvis, S., and Williams, T.C., "A study of transient flow turbulence generation during flame/wall interactions in explosions", *Measurement Science and Technology*, Vol. 13, pp. 1036-1042, 2002.
- 6- Kent, J.E., Masri, A.R., and Starner, S.H., "A new chamber to study premixed flame propagation past repeated obstacles", *5th Asia-Pacific Conference on Combustion*, pp. 173-176, 2005.
- 7- Hall, R., Masri, A.R., Yaroshchuk, P., and Ibrahim, S.S., "Effects of position and frequency of obstacles on turbulent premixed propagating flames", *Combustion and Flame*, Vol. 156, pp. 439-446, 2009.
- 8- Park, D.J., Green, A.R., Lee, Y.S., and Chen, Y., "Experimental studies on interactions between a freely propagating flame and single obstacles in a rectangular confinement", *Combustion and Flame*, Vol. 150, pp. 27-39, 2007.
- 9- Naamansen, P., Baraldi, D., Hjertager, B.H., Solberg, T., and Cant, S., "Solution adaptive CFD simulation of premixed flame propagation over various solid obstructions", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 15, pp. 189-197, 2002.
- 10- Patel, S., Ibrahim, S.S., Yehia, M.A., and Hargrave, G.K., "Investigation of premixed turbulent combustion in a semi-confined explosion chamber", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 27, pp. 355-361, 2003.
- 11- Kirkpatrick, M.P., Armfield, S.W., Masri, A.R., and Ibrahim, S.S., "Large eddy simulation of a propagating turbulent premixed flame", *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 70, pp. 1-19, 2003.
- 12- Masri, A.R., Ibrahim, S.S., and Cadwallader, B.J., "Measurements and large eddy simulation of propagating premixed flames", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 30, pp. 687-702, 2006.
- 13- Gubba, S.R., Ibrahim, S.S., Malalasekera, W., and Masri, A.R., "LES modeling of premixed deflagrating flames in a small-scale vented explosion chamber with a series of solid obstructions", *Combustion Science and Technology*, Vol. 180, pp. 1936-1955, 2008.



انجمن احتراق ایران

چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

کاشان - دانشگاه کاشان - بهمن ماه ۱۳۹۰



دانشگاه کاشان

FCCI2012-1005

- 14- Gubba, S.R., Ibrahim, S.S., Malalasekera, W., and Masri, A.R., "An assessment of large eddy simulations of premixed flames propagating past repeated obstacles", Combustion Theory and Modelling, Vol. 13:3, pp. 513-540, 2009.
- 15- Ibrahim, S.S., Gubba, S.R., Masri, A.R., and Malalasekera, W., "Calculations of explosion deflagrating flames using a dynamic flame surface density model", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 22, pp. 258-264, 2009.
- 16- Di Sarli, V., Di Benedetto, A., Russo, G., Jarvis, S., Long, E.J., and Hargrave, G.K., "Large eddy simulation and PIV measurements of unsteady premixed flames accelerated by obstacles", Flow, Turbulence and Combustion, Vol. 83, pp. 227-250, 2009.
- 17- Di Sarli, V., Di Benedetto, A., and Russo, G., "Using large eddy simulation for understanding vented gas explosions in the presence of obstacles", Journal of Hazardous Materials, Vol. 169, pp. 435-442, 2009.
- 18- Di Sarli, V., Di Benedetto, A., and Russo, G., "Sub-grid scale combustion models for large eddy simulation of unsteady premixed flame propagation around obstacles", Journal of Hazardous Materials, Vol. 180, pp. 71-78, 2010.
- 19- Weller, H.G., "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, 1993.
- ۲۰- امامی کوپائی، س. و مظاهری، ک.، "شبیه‌سازی عددی شتاب‌گیری شعله پیش‌آمیخته در لوله مانع‌دار با استفاده از روش LES/FSW"، دهمین کنفرانس هوافضای ایران، ۱۳-۱۱ اسفند، ۱۳۸۹.
- 21- Weller, H.G., Tabor, G., Gosman, A.D., and Fureby, C., "Application of a flame-wrinkling LES combustion model to a turbulent mixing layer", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 28, pp. 899-907, 1998.