

منشاء تشکیل و مکانیزم مصرف بسته‌های نسوخته در تراک‌های با ساختار نامنظم

یاسر محمودی^۱، کیومرث مظاهری^{۲*}

دانشکده فنی و مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* نویسنده مخاطب: kiumars@modares.ac.ir

چکیده

در این مقاله ساختار تراک گازی در مخلوط با انرژی فعال‌سازی بالا که دارای ناحیه واکنش مغشوش و بسته‌های نسوخته بزرگ در پشت جبهه می‌باشد، با استفاده از شبیه‌سازی دوبعدی در یک کانال، مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین مراحل برخورد موج عرضی و نقطه سه‌گانه با دیواره کانال با استفاده از دقت شبیه‌سازی بسیار بالا مورد مطالعه قرار می‌گیرد. منشاء تشکیل بسته‌های نسوخته و مکانیزم مصرف آنها در پشت جبهه تراک مشخص می‌گردد. نتایج نشان می‌دهند که قبل از برخورد با دیواره، هنگامی که نقطه سه‌گانه با دیواره برخورد می‌کند، موج عرضی با بسته نسوخته درگیر می‌باشد. بعد از جدا شدن نقطه سه‌گانه از روی دیواره، موج عرضی با دیواره برخورد می‌کند. بعد از برخورد نقطه سه‌گانه با دیواره، ناحیه واکنش از شوک پیشرو جدا می‌شود و منجر به تشکیل بسته نسوخته بزرگ از گازهای اولیه می‌شود. انرژی آزاد شده از مصرف بسته‌های نسوخته در اثر اختلاط توربولانسی ناشی از ناپایداری‌های هیدرودینامیکی نقش موثری در آغاز دوباره تراک در انتهای سیکل سلولی دارد.

واژه‌های کلیدی: تراک گازی - موج عرضی - ناپایداری‌های هیدرودینامیکی - بسته نسوخته - ساختار ماخ دوتایی.

۱- مقدمه

تراک یک موج احتراقی است که شامل یک شوک پیشرو با یک ناحیه واکنش در پشت شوک می‌باشد. شوک باعث تراکم و احتراق گازهای اولیه می‌گردد و بعد از یک زمان تاخیر کوتاه، انرژی حاصل از واکنش احتراق آزاد می‌گردد [۱]. شوک پیشرو شامل موج ضعیف برخوردی و موج قوی ماخ استم می‌باشد که در نقطه سه‌گانه با یک موج عرضی که در جهت عمود بر انتشار تراک حرکت می‌کند، با هم برخورد دارند. لایه برشی جریان‌های گازی که از قسمت‌های مختلف شوک پیشرو با قدرت‌های مختلف می‌گذرند، را از هم جدا می‌کند. تراک‌ها بر اساس نظم ساختار سلولی به دو دسته تراک منظم و تراک نامنظم تقسیم می‌شوند [۲]. اگر تعداد امواج عرضی در عرض کانال، در مقاطع مختلف از مسیر انتشار تراک ثابت بماند، تراک منظم است. در این صورت ابعاد و اندازه سلول‌های تشکیل شده روی فویل دوده‌اندود بسیار مشابه یکدیگر می‌باشند. تلاش‌های زیادی جهت تعیین ساختار نقطه سه‌گانه در مقاطع مختلف از چرخه سلولی انجام شده است (مانند مراجع [۳-۵]). در تحقیقات گذشته دو دسته‌بندی کلی از ساختار نقطه سه‌گانه مشاهده شده است [۱-۶]. تفاوت‌های مشاهده شده به دو نوع موج عرضی منتسب شده‌اند. یک نوع موج عرضی ضعیف، که در آن فقط یک نقطه سه‌گانه در جبهه تراک به وجود می‌آید. نوع دیگر موج عرضی قوی می‌باشد. در موج عرضی قوی دو نقطه سه‌گانه وجود دارد. در برخی از مراجع این ساختار ثانویه که در پایین دست ساختار اصلی در امتداد موج عرضی تشکیل می‌شود، تراک ثانویه نامیده شده است (مانند مرجع [۷]). بطور کلی زمانی که یک نقطه سه‌گانه در ساختار مشاهده می‌شود، ساختار ماخ تکی^۳ نامیده می‌شود. هنگامی که دو نقطه سه‌گانه در ساختار مشاهده می‌-

۱- دانشجوی دکتری رشته مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار گروه مکانیک دانشگاه تربیت مدرس

³ Single-Mach configuration

شود، ساختار ماخ دوتایی^۱ نامیده می‌شود [۸]. سابوتین [۹] با بررسی تجربی مشاهده نمود که تراک‌های با ساختار منظم دارای امواج عرضی از نوع قوی می‌باشند به‌طوریکه واکنش شیمیایی در پشت این امواج صورت می‌گیرد. اما در تراک‌های با ناپایداری بالا، ساختار سلولی نامنظم و امواج عرضی غیر واکنشی هستند و بسته‌های بزرگ از گازهای نسوخته در پشت جبهه شوک پیشرو تشکیل می‌شود. متأسفانه مطالعات کمی در زمینه برخورد نقاط سه‌گانه با یکدیگر یا با دیواره‌ها، صورت گرفته است. مشاهده تجربی ساختار تراک در هنگام برخورد نقاط سه‌گانه با دیواره‌ها با توجه به زمان بسیار کوتاه برخورد بسیار مشکل می‌باشد [۸]. همچنین در شبیه‌سازی‌های عددی نیز باید گام‌های زمانی بسیار کوچک در نظر گرفته شود تا بتوان ساختار تراک در لحظه برخورد با دیواره‌ها را مشاهده نمود. لغبور و اورن [۱۰] با استفاده از شبیه‌سازی عددی دوبعدی با سینتیک کامل شیمیایی در مخلوط هیدروژن-اکسیژن رقیق‌شده با آرگون گزارش نمودند که بعد از برخورد نقاط سه‌گانه، ساختار تراک از نوع ترکیب ماخ تکی با یک موج عرضی ضعیف در امتداد آن می‌باشد. اما بعد از مدتی ساختار به ترکیب ماخ دوتایی و حتی ترکیب پیچیده‌تر تغییر می‌یابد. شارپ [۷] با استفاده از شبیه‌سازی دوبعدی و دقت ۶۴ سلول در طول نیمه واکنش و سینتیک ساده آرنیوسی برای ساختار تراک منظم در مخلوط هیدروژن اکسیژن رقیق‌شده با آرگون، گزارش نمودند که ساختار تراک از نوع ماخ دوتایی می‌باشد و تغییری در ساختار تراک قبل و بعد از برخورد نقاط سه‌گانه با دیواره‌ها وجود ندارد. وی همچنین بیان نمود که استفاده از دقت شبیه‌سازی بسیار بالا و حل معادلات ناویر-استوکس با در نظر گرفتن نفوذ ملکولی برای بررسی دقیق ساختار لازم می‌باشد. هو و همکاران [۱۱] با شبیه‌سازی عددی و دقت ۴۴۰ سلول در طول ناحیه واکنش و استفاده از سینتیک کامل در مخلوط هیدروژن-اکسیژن رقیق‌شده با آرگون گزارش نمودند که ساختار تراک قبل و بعد از برخورد نقطه سه‌گانه با دیواره تفاوت چندانی با هم ندارند و ساختار از نوع ماخ تکی می‌باشد. اما بعد از مدتی، ساختار تراک به یک ساختار ماخ دوتایی با یک نقطه سه‌گانه ثانویه بر روی موج عرضی، تبدیل می‌شود. به‌طور خلاصه، مطالعات عددی گفته شده در بالا برخورد نقطه سه‌گانه و موج عرضی با دیواره را در مخلوط با انرژی فعال‌سازی پایین مورد بررسی قرار دادند. تمام مشاهدات عددی و تجربی گذشته گزارش نمودند که دو نوع ساختار تراک در مخلوط‌های با انرژی فعال‌سازی مختلف مشاهده شده است [۱]. به‌طوریکه با استفاده از روش فویل دوده‌اندود در مخلوط‌های با انرژی فعال‌سازی بالا، ساختار نامنظم و در مخلوط‌های با انرژی فعال‌سازی پایین، ساختار منظم از تراک مشاهده شده است. نتایج تجربی همچنین گزارش نمودند که، واکنش شیمیایی شدید در نزدیکی نقاط سه‌گانه و در طول لایه برشی در تراک‌های نامنظم مشاهده شده است [۱۲]. روش اشلین [۱۲] و روش‌های عددی [۱۳] در بررسی ساختار ناحیه واکنش در تراک‌های منظم، نشان دادند که شوک پیشرو تمام گازهای عبوری از خود را محترق می‌کند. اما در تراک‌های ناپایدار بسته نسوخته از گازهای اولیه در پشت جبهه مشاهده می‌شود که توسط شوک پیشرو محترق نشدند.

بسته‌های نسوخته یکی از پدیده‌های مهم در ناحیه واکنش تراک‌ها می‌باشند که هم به‌صورت عددی و هم به‌صورت تجربی در بررسی‌های گذشته مشاهده شدند [۱۳-۱۵]. بر طبق تعریف، بسته نسوخته ناحیه‌ای از گازهای محترق نشده اولیه است که از جبهه شوک پیشرو جدا شده است و در پشت آن قرار گرفته است. بسته‌های نسوخته ممکن است به اندازه سائز سلولی در پشت جبهه باقی بمانند. اولین بار این بسته‌های توسط سابوتین [۹] در بررسی تجربی ایشان در تراک‌های ناپایدار مشاهده شده است. وی گزارش نمود که در این نوع تراک‌ها موج عرضی غیر واکنشی و ضعیف می‌باشد. به همین دلیل بسته‌های نسوخته در پشت جبهه تشکیل می‌شود. وی همچنین بیان نمود که در تراک‌های پایدار امواج عرضی واکنشی هستند و بسته نسوخته‌ای در پشت جبهه مشاهده نمی‌شود. سبز پوشانی و مظاهری [۱۵] با شبیه‌سازی دو بعدی ساختار تراک گازی نشان دادند که در اثر برخورد دو نقطه سه‌گانه با یکدیگر بسته نسوخته از گازهای اولیه به پشت جبهه منتقل می‌شود. ایشان همچنین گزارش کردند که با افزایش انرژی فعال‌سازی عمق نفوذ بسته‌ها به پشت جبهه افزایش می‌یابد. اورن و همکاران [۶] بر اساس مشاهدات تجربی و نتایج عددی پیشنهاد نمودند که تاخیر در مصرف بسته‌های نسوخته بر انتشار تراک تاثیر قابل ملاحظه‌ای دارد و

^۱ Double-Mach configuration

ممکن است منجر به خاموشی تراک گردد. گمزو و همکاران [۱۶] با استفاده از شبیه‌سازی عددی دوبعدی پیشنهاد کردند که مکانیزم مصرف بسته‌های نسوخته در تراک به انرژی فعال‌سازی مخلوط وابسته می‌باشد. ایشان بیان کردند که در مخلوط‌های با انرژی فعال‌سازی کم، آغازش خودبخودی بسته‌ها که قبلاً توسط شوک پیشرو متراکم شدند، مکانیزم مصرف بسته‌ها در این نوع تراک‌ها می‌باشد. اما در مخلوط‌های با انرژی فعال‌سازی بالا انتقال حرارت و جرم از گازهای داغ اطراف از طریق نفوذ ملکولی منجر به مصرف این بسته‌ها می‌گردد. شارپ [۷] با استفاده از شبیه‌سازی عددی دوبعدی مشاهده نمود که زمانی که یک نقطه سه‌گانه با دیواره برخورد می‌کند لایه برشی منسوب به نقطه سه‌گانه از جبهه جدا می‌شود که منجر به تشکیل یک بسته نسوخته می‌گردد. مطالعات عددی و تجربی گذشته نشان می‌دهند که ناپایداری‌های هیدرودینامیکی از جمله ناپایداری ریچمیر-مشکوف (RM) و کلون-هلمهولتز (KH) منجر به تشکیل یک ناحیه اختلاط توربولانسی از مواد سوخته و نسوخته در پشت جبهه شوک می‌گردند که نقش مهمی را در انتشار تراک‌های با ناپایداری بالا ایفا می‌کنند [۱۷-۱۸]. لی [۱۹] گزارش نمود که برخورد شوک-شوک، شوک-لایه برشی، شوک-گردابه و لایه برشی-لایه برشی منجر به اختلاط توربولانسی در تراک‌های با ناپایداری بالا می‌شود که نقش مهمی در انتشار این تراک‌ها دارد. شکل‌گیری و رشد ناپایداری RM توسط محققان زیادی بصورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است (مانند مرجع [۲۰]). در این نوع مطالعات، یک شوک، با یک سطح تماس، که دو سیال با چگالی‌های مختلف را از هم جدا می‌کند، برخورد می‌نماید. اگر هر نوع اغتشاش اولیه در سطح تماس دو ماده باشد، عبور شوک باعث تقویت این اغتشاش می‌گردد. مکانیزم اصلی این نوع ناپایداری در اثر مکانیزم تشکیل گردابه باروکلینیک می‌باشد که منجر به تشکیل گردابه‌های بزرگ می‌شود. همزمان با رشد ناپایداری RM، گردابه‌های کوچک در اثر ناپایداری ثانویه KH شکل می‌گیرند. بررسی‌های تجربی و عددی گذشته (به‌طور مثال مراجع [۱۳، ۱۷]) پیشنهاد نمودند که در ناحیه واکنش تراک‌ها در مخلوط‌های با انرژی فعال‌سازی بالا، پدیده نفوذ و اختلاط توربولانسی ناشی از ناپایداری ریچمیر-مشکوف و کلون-هلمهولتز نقش قابل ملاحظه‌ای در مصرف بسته‌های نسوخته دارند. با این وجود تاکنون منشاء تشکیل بسته‌های نسوخته و همچنین مکانیزم مصرف این بسته‌ها و نقش آنها در انتشار تراک‌ها به درستی مشخص نشده است. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی عددی با دقت بسیار بالا به کمک پردازش موازی، جزئیات ساختار تراک در مخلوط‌های با انرژی فعال‌سازی بالا مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین موارد زیر به تفصیل مورد مطالعه قرار می‌گیرد:

الف- ساختار تراک ناپایدار در طی مراحل برخورد نقطه سه‌گانه و موج عرضی منسوب به آن با دیواره‌های کانال.

ب- مکانیزم تشکیل بسته‌های نسوخته در پشت جبهه تراک.

ج- نقش ناپایداری‌های هیدرودینامیکی در مصرف بسته‌های نسوخته.

۲- معادلات حاکم و روش حل عددی

معادلات دینامیک گاز و سینتیک شیمیایی حاکم بر تراک‌های گازی با در نظر گرفتن یک سری فرض‌های ساده کننده حل می‌شوند. تاکنون اکثر مطالعات انجام شده در زمینه شبیه‌سازی ساختار تراک با استفاده از معادلات واکنشی اولر صورت گرفته است. در کار حاضر از سینتیک ساده آرنیوسی یک مرحله‌ای و فرض گاز کامل در نظر گرفته شده است. جزئیات معادلات حاکم، بی‌بعد سازی و روش حل عددی به تفصیل در مرجع [۲۱] آمده است. به منظور دستیابی به حل دقت بالا، از شبکه ریز به طور موضعی در نزدیکی جبهه شوک پیشرو و از شبکه درشت در نواحی دیگر میدان حل استفاده شده است. بدین منظور، در کار حاضر یک نسخه ساده از روش تطبیق شبکه برگر و کوللا [۲۲] استفاده شده است. مدل در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی، انتشار تراک در یک کانال دو بعدی می‌باشد. جهت انتشار تراک از سمت چپ کانال به سمت راست می‌باشد. با توجه به اینکه فرض می‌شود تراک به مرز سمت راست نمی‌رسد، نیازی به در نظر گرفتن شرط مرزی برای سمت راست کانال نمی‌باشد. برای مرزهای بالا، پائین و مرز سمت چپ از شرط مرزی انعکاسی استفاده شده است. برای آغازش مستقیم تراک، از پروفیل موج بلست که در ابتدای کانال (در سمت چپ) قرار داده شده، استفاده گردیده است. برای تسریع در شکل‌گیری

ساختار دوبعدی تراک، نیاز به وارد کردن یک اغتشاش اولیه می‌باشد. اغتشاش اولیه به هر روشی که اعمال گردد، ساختار نهایی تراک در فواصل طولانی از ابتدای کانال مستقل از شرایط اولیه خواهد بود [۷]. در شبیه سازی های ارائه شده در این مقاله، اغتشاش در چگالی که در جلوی جبهه موج بلست اولیه قرار می‌گیرد [۷].

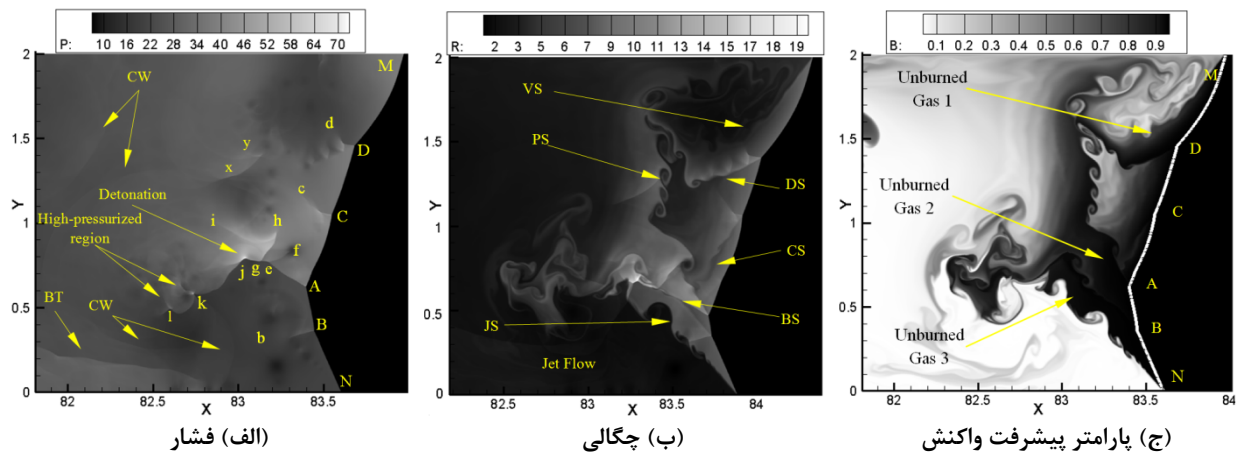
۳- شبکه محاسباتی مورد نیاز

قبل از انجام محاسبات برای بررسی دقیق ساختار تراک در مراحل برخورد نقطه سه‌گانه و موج عرضی با دیواره‌ها، لازم است که ابتدا یک تخمین مناسبی از شبکه مورد نیاز داشته باشیم. تجربه نشان داده است که بررسی عددی ساختار تراک گازی می‌تواند تحت تاثیر شبکه محاسباتی قرار گیرد و استفاده از شبکه نامناسب منجر به نتایج غیر فیزیکی از ساختار تراک می‌گردد [۷]. شارپ ساختار جبهه تراک و امواج عرضی را با حل عددی معادلات دو بعدی اولر با سینتیک یک مرحله ای آرنیوسی مورد بررسی قرار داد و گزارش نمود که برای شبیه سازی دقیق ساختار تراک، حداقل ۲۰ گره محاسباتی در طول نیم واکنش مورد نیاز می‌باشد [۷]. اخیراً محمودی و مظاهری [۱۳] با استفاده از شبیه‌سازی عددی دوبعدی با دقت بسیار بالا، گزارش کردند که در تراک‌های ناپایدار حداقل باید از ۳۰۰ سلول محاسباتی در طول نیمه واکنش استفاده شود تا بتوان ساختار مغشوش ناحیه واکنش در این نوع تراک‌ها را به‌خوبی مدل نمود. ایشان همچنین گزارش نمودند که استفاده از شبکه درشت برای شبیه‌سازی این نوع تراک‌ها منجر به ایجاد ساختار منظم می‌شود. بنابراین در شبیه‌سازی حاضر از دقت ۶۰۰ سلول در طول نیمه واکنش برای بررسی برخورد نقطه سه‌گانه و موج عرضی با دیواره‌ها در انتهای نیم‌چرخه اول و دوم استفاده شده است. از کد اولری دوبعدی به منظور انجام شبیه‌سازی حاضر استفاده شده است. تمام محاسبات بر روی یک کلاستر موازی شامل شش پردازنده بر اساس حافظه پخش شده انجام شده است، به‌طوری‌که میدان محاسباتی به نواحی مختلف تقسیم شده و بین پردازشگرهای مختلف تقسیم شده است. هر پردازشگر دارای مشخصات Intel® Pentium® 4 با قدرت پردازش 3.00 GHz و حافظه 1GBYTE می‌باشد. از کتابخانه MPI به‌منظور موازی‌سازی کد حاضر انتخاب شده است. زمان محاسبات برای دقت ۶۰۰ سلول در طول نیمه واکنش با دقت double precision حدود پنج هفته طول می‌کشد تا تراک به اندازه ۴۰۰ طول نیمه واکنش منتشر شود.

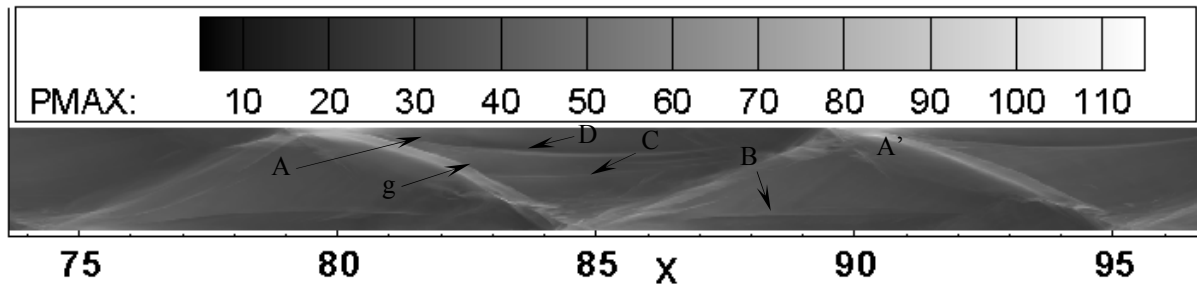
۴- ساختار تراک نامنظم

به منظور بررسی ریزساختارها و ناپایداری‌های هیدرودینامیکی موجود در جبهه تراک، کانتورهای فشار، چگالی، دما و متغیر پیشرفت واکنش جبهه تراک برای مخلوط با خواص ترمو-سینتیکی $E_a/RT_0=20$ ، $Q/RT_0=50$ و $\gamma=1.2$ دقت شبیه‌سازی ۶۰۰ سلول در طول نیمه واکنش در شکل‌های (۱-الف-ج) نشان داده شده است. شکل‌ها نشان می‌دهند که جبهه تراک مجموعه‌ای از شوک‌ها، لایه‌های برشی و امواج فشاری مختلف می‌باشد که باهم اندرکنش دارند. در شکل (۱-الف) نقطه سه‌گانه اولیه، با حرف A نشان داده شده است که محل برخورد ماخ استم اصلی AM، موج برخوردی اولیه AN و موج عرضی اولیه AI می‌باشد. نقاط سه‌گانه ثانویه (مودهای ثانویه) B، C و D که هر کدام موج عرضی، لایه برشی، ماخ استم و شوک برخوردی مربوط به خود را دارند، در شکل مشخص می‌باشند. CD و AC به ترتیب ماخ استم و موج برخوردی مربوط به نقطه سه‌گانه ثانویه C می‌باشد. AB و BN دو قسمت موج برخوردی می‌باشند که به ترتیب ماخ استم و موج برخوردی مربوط به نقطه سه‌گانه ثانویه B می‌باشند. برخورد نقاط سه‌گانه با دیواره، یک ناحیه با دما و فشار بسیار بالا بوجود می‌آورد که این باعث ایجاد یک جت پر سرعت می‌گردد [۱۲، ۱۳، ۲۳] که در شکل (۱-ب) نشان داده شده است. قسمت‌های دیگر ساختار نمایش داده شده در شکل‌های (۱) بصورت زیر می‌باشند: ۱- BT قسمت دم موج عرضی مربوط به نقطه سه‌گانه ثانویه B می‌باشد. ۲- در شکل (۱-ب)، JS لایه برشی جریان جت می‌باشد که گازهای داغ درون جریان جت را از گازهای سردی که از قسمت BN موج برخوردی می‌گذرند، جدا می‌کند. ۳- BS لایه برشی مربوط به نقطه سه‌گانه B می‌باشد که گازهای عبوری از دو قسمت موج

برخوردی AB و BN را از هم جدا می‌کند. ۵-۵ VS لایه برشی مربوط به چرخش بزرگ نزدیک به دیواره بالا می‌باشد که گاز-های سوخته درون گردابه را از گازهای عبوری از قسمت ضعیف ماخ استم DM می‌گذراند جدا می‌کند. ۶-۶ PS لایه برشی اولیه می‌باشد که گازهای عبوری از ماخ استم اولیه AM و موج برخوردی اولیه AN را از هم جدا می‌کند. ۷-۷ AI موج عرضی اولیه می‌باشد. شکل (۱-۱-ج) نشان می‌دهد که مقدار پارامتر پیشرفت واکنش و انحنای شوک در قسمت MD ماخ استم بیشتر از قسمت DC ماخ استم می‌باشد، بنابراین MD ضعیف‌تر از DC می‌باشد. به همین دلیل یک ناحیه نسوخته از گازهای اولیه در پشت موج MD مشاهده می‌گردد که با گازهای نسوخته 1 (Unburned Gas 1) مشخص شده است که بین لایه‌های برشی VS و DS محصور شده است همچنین گازهای نسوخته 2 (Unburned Gas 2)، مربوط به گازهای پیش گرم عبوری از قسمت AB از موج برخوردی می‌باشد. ناحیه نسوخته 3 (Unburned Gas 3) شامل گازهای عبوری از قسمت BN موج برخوردی می‌باشد. مقدار پارامتر پیشرفت واکنش گازهای نسوخته 2 که در پشت قسمت قوی موج برخوردی (AB) قرار دارند، کمتر از مقدار پارامتر پیشرفت واکنش گازهای ناحیه 3 می‌باشند که در پشت قسمت ضعیف از موج برخوردی (BN) قرار دارند.



مشاهده می‌شود که در تراک‌های نامنظم، قسمت زیادی از گازهای اولیه توسط شوک پیشرو محترق نمی‌شوند و به صورت بسته نسوخته در پشت جبهه تراک قرار می‌گیرند. نتایج فوق نشان می‌دهد که در مخلوط‌های با انرژی فعال‌سازی بالا، جبهه تراک بسیار پیچیده و شامل ریزساختارهای مختلف و مودهای تراک ثانویه می‌باشد، که منجر به بی‌نظمی ساختار تراک در این مخلوط‌ها می‌گردد. همچنین شوک پیشرو به تنهایی نمی‌تواند تمام گازهای عبوری از خود را محترق کند که این منجر به تشکیل گازهای نسوخته در پشت جبهه شوک می‌شود. شکل (۲) ساختار سلولی تراک در مخلوط مورد نظر را نشان می‌دهد که بر اساس تاریخچه فشار بیشینه در میدان حل که بیانگر خط اثر نقطه سه‌گانه اصلی است، بدست آمده است. مسیر حرکت نقطه سه‌گانه اصلی (A)، نقطه سه‌گانه دوم روی موج عرضی (g) و نقاط سه‌گانه ثانویه (B، C و D) در این شکل کاملاً مشخص می‌باشد. در ادامه به منظور تعیین نوع موج عرضی (به عبارت دیگر ترکیب ماخ تکی یا دوتایی)، نحوه شکل‌گیری و مصرف بسته‌های نسوخته و همچنین جزئیات ساختار تراک در مراحل برخورد نقطه سه‌گانه با دیواره در نقطه A مورد بررسی قرار می‌گیرد.

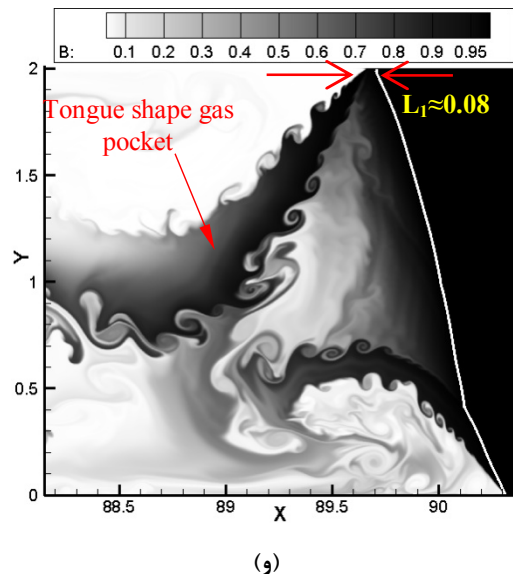
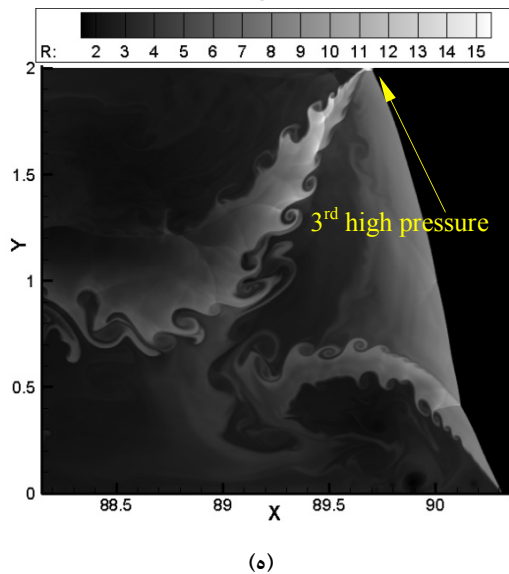
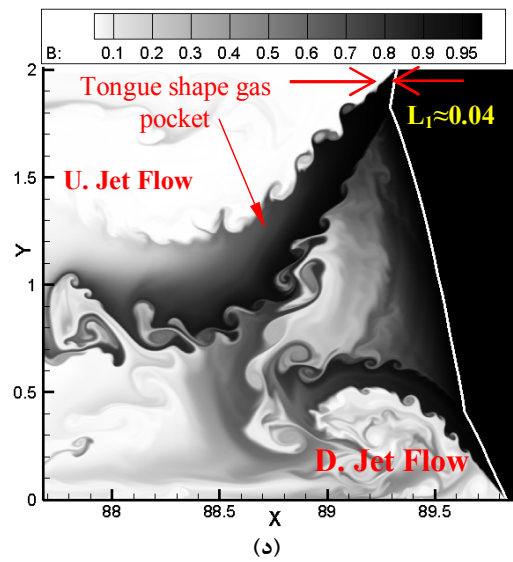
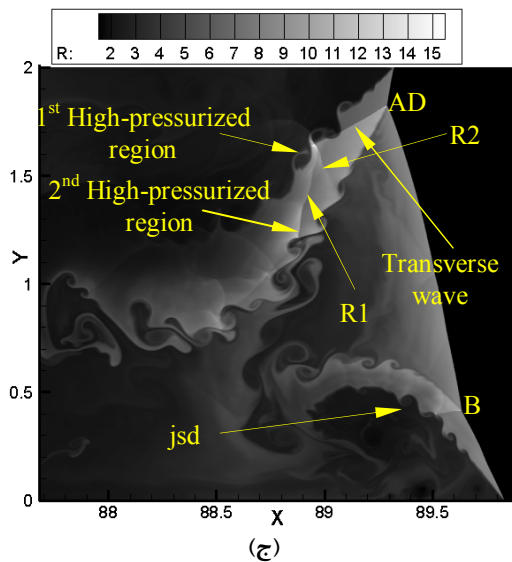
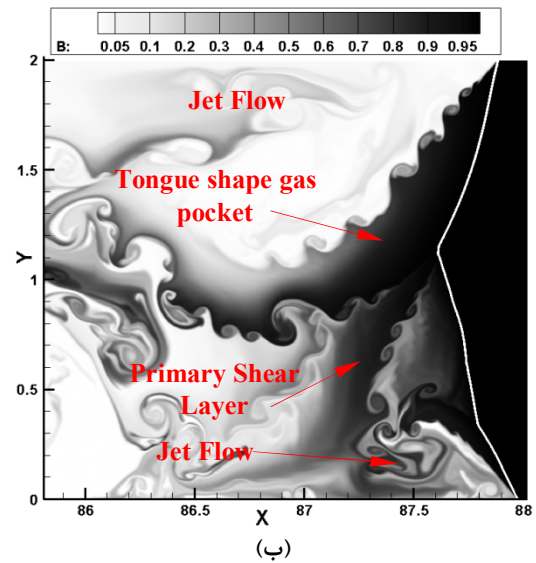
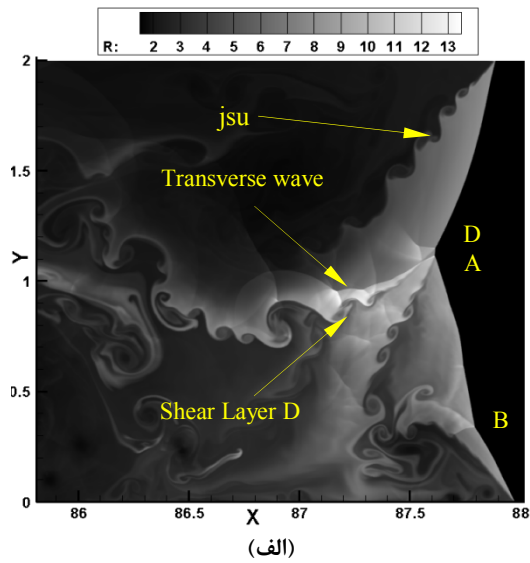


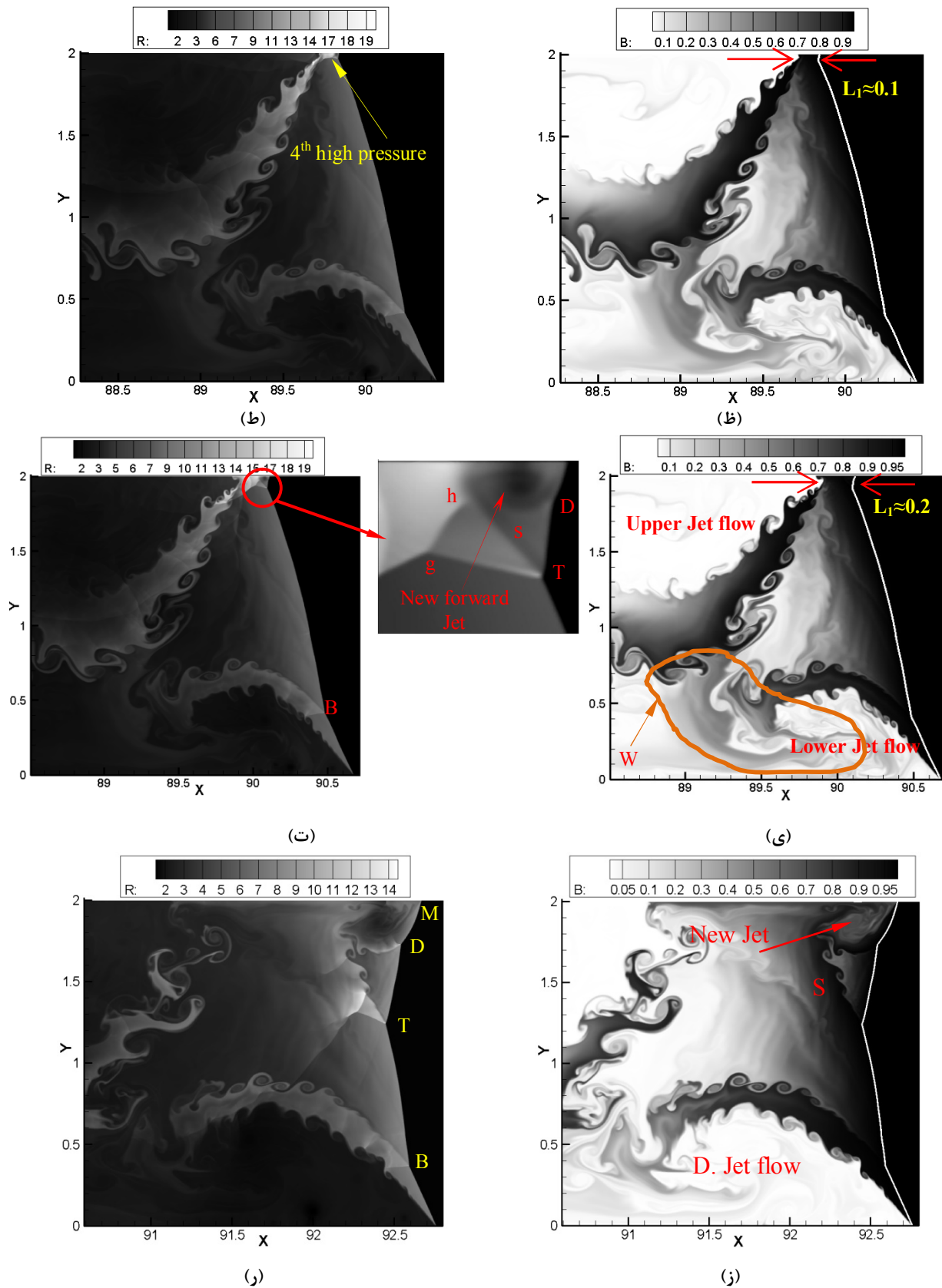
شکل ۲- ساختار سلولی تراک بر اساس تاریخچه فشار بیشینه در مخلوط با $E_a/RT_0=20$ ، $Q/RT_0=50$ و $\gamma=1.2$

۵- برخورد موج عرضی با دیواره و تشکیل بسته نسوخته

در این قسمت برخورد نقاط سه گانه با دیواره در تراک با ساختار نامنظم با دقت ۶۰۰ سلول محاسباتی در طول نیمه واکنش مورد بررسی قرار می گیرد. شکل های (۳) جزئیات ساختار تراک در طی مراحل برخورد با دیواره (نقطه A' مطابق شکل (۲)) را نشان می دهند. به منظور مشاهده مراحل برخورد امواج عرضی با لایه برشی و تشکیل بسته های نسوخته، کانتورهای چگالی و پارامتر پیشرفت واکنش در این شکل ها نشان داده شده اند. در شکل (۳-الف) مشاهده می شود که قبل از برخورد نقطه سه گانه با دیواره، نقطه سه گانه اصلی A به طرف بالا حرکت می کند و در آستانه برخورد با نقطه سه گانه ثانویه B قرار دارد. موج عرضی مربوط به نقطه سه گانه A با لایه برشی منسوب به D برخورد می نماید. چنین برخوردی منجر به ایجاد نواحی پرفشار ($p \approx 50$) موضعی می گردد. ناحیه نسوخته زبانی شکل که شامل گازهای نسوخته ($\beta=0.97$) می باشد که به درون گازهای کاملاً سوخته در پشت جبهه گسترش یافته است در شکل (۳-ب) کاملاً مشخص می باشد. لایه برشی منسوب به نقطه سه گانه D و لایه برشی منسوب به جت بالا (jsu) این بسته را احاطه کرده اند. جریان جت که در اثر برخورد نقطه سه گانه با دیواره پایین در نیم چرخه قبل بوجود آمده نیز در این شکل مشخص می باشد. مطابق شکل (۳-ج) نقطه سه گانه اصلی A به نقطه سه گانه ثانویه D می رسد و به صورت نقطه سه گانه ترکیبی AD به سمت بالا حرکت می کند تا با دیواره بالایی برخورد کند. مقایسه شکل (۳-د) با شکل (۳-ج) نشان می دهد که اندازه جریان جت نزدیک دیواره پایین بزرگتر شده است. این بیانگر رشد سریع ناپایداری ریچمیر-مشکوف (RM) در بزرگ شدن اندازه جت می باشد. بزرگ شدن جت، منجر به کشاندن شدن بیشتر گازهای نسوخته لایه برشی به درون جت شده است و مشاهده می شود که در شکل (۳-د) تقریباً تمام گازهای درون لایه برشی مصرف شده اند. به علاوه با توجه به شکل (۳-ج)، برخورد موج عرضی با بسته نسوخته باعث شکسته شدن موج عرضی اصلی به چند شوک کوچک می شود و همچنین انفجارهای ضعیفی در اثر این برخورد بوجود می آید. برخورد قسمت واکنشی و قوی موج عرضی با لایه برشی جریان جت بالایی (jsu) در شکل (۳-ه) منجر به انفجار موضعی اولی می شود. از طرفی برخورد اول با بسته نسوخته، منجر به تشکیل امواج انعکاسی R1 و R2 می شود. برخورد موج R1 با لایه برشی اصلی، ناحیه فشار بالای دوم در بسته نسوخته را ایجاد می کند. اگرچه نواحی فشار بالا، در محل برخورد موج عرضی با مرز بسته های نسوخته مشاهده می شود، با این وجود در شکل (۳-د)، مشاهده می شود که این انفجارها تاثیر چشمگیری در نرخ سوختن گازهای درون بسته و شکل بسته نسوخته ندارند. در نتایج تجربی رادلسکو و همکاران [۱۸] افزایش واکنش شیمیایی در نواحی برخورد موج عرضی با لایه های برشی مشاهده شد، ولی آنها گزارش کردند که برخورد امواج عرضی با بسته های نسوخته شکل آنها را تغییر نمی دهد و تاثیر قابل ملاحظه ای در مصرف بسته ها ندارند. بر طبق شکل (۳-ه) هنگامی که نقطه سه گانه ترکیبی AD با دیواره برخورد می کند یک ناحیه پرفشار موضعی ($p \approx 70$) در دیواره بالا رخ می دهد که با "3rd high pressure" در شکل مشخص شده است. در این لحظه موج عرضی با بسته نسوخته درگیر می باشد و هنوز با دیواره برخورد نکرده است. مطابق شکل (۳-و) ناحیه واکنش پشت جبهه نزدیک دیوار بالایی برابر با $L_1 \approx 0.08$ است که دو برابر مقدار آن در زمان قبل در شکل (۳-د) می باشد. این می تواند بیانگر جدایی ناحیه واکنش از جبهه شوک پیشرو قبل از برخورد نقطه سه گانه با دیواره باشد. در این لحظه مطابق

شکل (۳-و)، همچنان بسته نسوخته به جبهه تراک متصل می‌باشد و از آن جدا نشده است. هنگامی که نقطه سه‌گانه از دیواره جدا می‌شود به خاطر برخورد قسمت‌های قوی موج عرضی با دیواره، ناحیه پرفشار موضعی چهارم $p \approx 65$ در دیواره بوجود می‌آید که با "4th high pressure" در شکل (۳-ط) مشخص شده است. طبق شکل (۳-ظ) در این لحظه بسته نسوخته از جبهه جدا می‌شود و پشت جبهه قرار می‌گیرد. این بسته دارای شکل مثلثی می‌باشد که در تطابق بسیار خوبی با توصیف بسته نسوخته در بررسی تجربی سابوتین [۹] می‌باشد. علاوه بر این به خاطر جدایی جت از جبهه شوک، طول ناحیه واکنش پشت جبهه نزدیک دیوار بالایی افزایش می‌یابد، $L_1 \approx 0.1$. این مطلب جدایی ناحیه واکنش از جبهه شوک پیشرو بعد از برخورد نقطه سه‌گانه با دیواره را نشان می‌دهد. بعد از برخورد، نقطه سه‌گانه اصلی جدید (T) با لایه برشی (S) و موج عرضی (Tg) منسوب به خود تشکیل می‌شود. ناحیه پرفشار منجر به ایجاد یک جفت جت پرسرعت عقب رو و جلو رو نزدیک دیوار بالایی می‌شود. وقتی نقطه سه‌گانه از دیوار دور می‌شود اندازه جت پیشرو و عقب رو افزایش می‌یابد. نهایتاً قیفی از مواد سنگین به درون مواد سبک نفوذ می‌کنند که سر این قیف به صورت "قارچ‌مانند" می‌باشد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که حباب از مواد سبک به درون مواد سنگین نفوذ می‌کند. با افزایش ناپایداری RM، ناپایداری ثانویه کلون-هلمهولتز (KH) منجر به ایجاد گردابه‌های کوچک روی مرز گردابه بزرگ می‌شود. این دو ناپایداری نهایتاً منجر به ایجاد ناحیه توربولانسی و اختلاط مواد سبک و سنگین می‌گردند. برخورد جت جلورو با ماخ استم جدید منجر به ایجاد شکستگی جدید k در آن می‌شود. در صورتی که جت عقب‌رو به درون مواد داغ و کاملاً سوخته می‌رود و از بین می‌رود و در شکل (۳-ت) مشاهده نمی‌شود. طبق شکل (۳-ت) نقطه سه‌گانه جدید که از دیواره جدا می‌شود دارای موج عرضی قوی می‌باشد که شوک اضافی gh روی آن مشاهده می‌شود. این بیانگر این موضوع می‌باشد که ساختار تراک در این زمان از نوع ترکیب ماخ دوتایی می‌باشد. مطابق شکل (۳-ی) جت بالایی از جبهه شوک پیشرو فاصله می‌گیرد. این فاصله گرفتن باعث می‌شود که گازهای داغ درون ناحیه چرخشی جت از جبهه شوک فاصله بگیرند که این می‌تواند باعث افزایش طول ناحیه واکنش پشت شوک می‌شود. از این‌رو طول ناحیه واکنش نزدیک دیوار بالایی برابر با $L_1 \approx 0.1$ می‌باشد که در مقایسه با اندازه آن در شکل قبل (۳-ظ) به اندازه دو برابر افزایش یافته است. مقایسه شکل (۳-ی) با شکل (۳-ظ) نشان می‌دهد که اندازه جت پایینی بزرگتر شده است. کشانده شدن حجم زیادی از گازهای نسوخته درون بسته نسوخته زبانی شکل به درون ناحیه چرخشی جت (w) در شکل (۳-ی) نشان داده شده است. مطابق شکل‌های (۳-ر) و (۳-ز)، هنگامی که نقطه سه‌گانه T به طرف دیوار پایین حرکت می‌کند، اندازه جت بالایی افزایش می‌یابد. این به دلیل رشد سریع جت تحت اثر ناپایداری ریچمیر-مشکوف (RM) می‌باشد. چنین رشد سریعی منجر به نزدیک شدن گازهای داغ درون جت به پشت ماخ استم می‌گردد. به همین دلیل طول ناحیه واکنش پشت ماخ استم در مقایسه با مقدار آن در شکل قبل (۳-ی) کاهش می‌یابد. MD قسمت ضعیف ماخ استم جدید می‌باشد که در شکل (۳-ر) نشان داده شده است. همچنین ناحیه نسوخته زبانی شکل نیز در پشت MD در حال شکل‌گیری می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری نمود که منشاء تشکیل بسته‌های نسوخته در پشت قسمت ضعیف ماخ استم می‌باشد. در طی انتشار تراک، گازهای نسوخته بیشتری درون این بسته نسوخته جمع می‌شوند، به‌طوریکه در چرخه بعدی، قبل از برخورد دوباره نقطه سه‌گانه با دیواره در انتهای نیم چرخه اول، این بسته به بیشینه اندازه خود می‌رسد. مقایسه شکل‌های (۳-ی) با (۳-ز) نشان می‌دهد که، وقتی نقطه سه‌گانه به طرف پایین حرکت می‌کند، فاصله بسته نسوخته از جبهه تراک و همچنین از جت بیشتر می‌شود. بنابراین از مقدار گازهای نسوخته‌ای که به درون ناحیه چرخشی جت کشانده می‌شوند، کاسته می‌شود و به این ترتیب ناحیه روشن‌تری درون جت مشاهده می‌شود.





شکل ۳- ساختار تراک در مراحل برخورد نقطه سه گانه با دیواره در مخلوط با $E_a/RT_0=20$ ، $Q/RT_0=50$ و $\gamma=1.2$. شکل های سمت چپ:

کانتورهای فشار، سمت راست: کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله ساختار تراک گازی در طی مراحل برخورد نقطه سه گانه با دیواره در مخلوط با انرژی فعال سازی بالا با شبکه محاسباتی بسیار ریز مورد بررسی قرار گرفت. باتوجه به نتایج بدست آمده، وجود شوک انعکاسی اضافی روی موج عرضی حاکی از قوی بودن ساختار تراک در مخلوط مورد بررسی در این شبیه سازی بوده است. مراحل برخورد نقطه سه گانه با دیواره مورد بررسی دقیق قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد:

الف- ساختار تراک از نوع ماخ دوتایی است و تفاوتی بین ساختار تراک قبل و بعد از برخورد وجود ندارد. همچنین وقتی نقطه سه گانه با دیواره برخورد می کند، موج عرضی با لایه برشی درگیر می باشد و هنوز به دیواره نرسیده است. بعد از جدا شدن نقطه سه گانه از روی دیواره، موج عرضی با دیواره برخورد می کند. در اثر برخوردهای نقطه سه گانه و موج عرضی با دیواره ناحیه پرفشاری در دیواره ایجاد می گردد.

ب- برخورد نقطه سه گانه و موج عرضی با دیواره منجر به ایجاد نواحی پرفشار می گردد. چنین نواحی پرفشاری منجر به ایجاد یک جفت جریان جت پرسرعت پیشرو و عقبرو می گردد. این جتها تحت تاثیر ناپایداری ریچمیر-مشکوف رشد می کنند.

د- قسمت انتهایی موج عرضی با دیواره برخورد نمی کند. به خاطر ضعیف بودن قسمت انتهایی موج عرضی برخورد آن با لایه های برشی منجر به شکسته شدن این موج به شوک های کوچکتر می گردد.

ه- در مراحل برخورد نقطه سه گانه با دیواره، یک بسته نسوخته زبانی شکل از جبهه جدا می شود. اختلاط توربولانسی ناشی از ناپایداری های هیدرودینامیکی (ناپایداری ریچمیر-مشکوف و کلون-هلمهولتز) منجر به مصرف این بسته ها می گردد. نتایج حاضر حاکی از آن است که این بسته ها در نیمه دوم سیکل سلولی قبل از برخورد نقطه سه گانه با دیواره، مصرف می شوند. بنابراین می توان نتیجه گیری نمود که در نیم چرخه دوم سلولی که قدرت شوک پیشرو به شدت کاهش می یابد، انرژی حاصل از مصرف این بسته به انتشار شوک کمک کرده و مانع از میرایی آن می شود.

مراجع

- 1- Fickett, W., and Davis, W.C., *Detonation*, University of California Press, 1979.
- 2- Austin, J.M., *The Role of Instability in Gaseous Detonation*, Ph.D Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, 2003.
- 3- Edwards, D.H., Hooper, G., Job, E.M. and Parry, D.J., "The Behavior of Frontal and Transverse Shocks in Gaseous Detonation Waves", *Astronautica Acta.*, Vol. 15, pp. 323-333, 1970.
- 4- Pintgen, F., Eckert, C.A., Austin, J.M., and Shepherd J.E., "Direct Observations of Reaction Zone Structure in Propagating Detonations", *Combustion and Flame*, Vol. 133, pp. 211-229, 2003.
- 5- Strehlow, R.A., "The Nature of Transverse Waves in Detonations", *Astronaut. Acta.*, Vol. 14, pp. 539-548, 1969.
- 6- Oran, E., Young, T., Boris, J., and Picone, J., "A Study of Detonation Structure: The Formation of Unreacted Gas Pockets", *proc. Combust. Inst.*, pp. 573-582, 1982.
- 7- Sharpe, G.J., "Transverse Wave In Numerical Simulations of Cellular Detonation", *J. Fluid Mech*, Vol. 447, pp. 31-51, 2001.
- 8- Lee, J.H.S., "Dynamic Parameters of Gaseous Detonations", *Ann. Rev. Fluid. Mech.*, Vol. 16, pp. 311-336, 1984.

- 9- Subbotin, V., "Two Kinds of Transverse Wave Structures in Multi-Front Detonation", Fiz. Gor. Vzryva, Vol. 11, pp. 96-102, 1975.
- 10- Lefebvre, M.H., and Oran, E.S., "Analysis of the shock structures in a regular detonation", Shock Waves Vol. 4, pp. 277-283, 1995.
- 11- Hu, X.Y., Khoo, B.C., Zhang, D.L., and Jiang, Z.L., "The Cellular Structure of a Two-Dimensional $H_2/O_2/Ar$ Detonation Wave", Combust. Theory and Modeling, Vol. 8, pp. 339-359, 2004.
- 12- Radulescu, M.I., Papi, A., and Quirk, J.J., "The Origin of Shock Bifurcations in Cellular Detonations", 22nd ICEDRS, Minsk, Belarus, 2009.
- 13- Mahmoudi, Y., and Mazaheri, K., "High resolution numerical simulation of the structure of 2-D gaseous detonations", Proc. Combust. Ins, Vol. 33, pp. 2187-2194, 2010.
- 14- Gamezo, V.N., Desbordes, D., and Oran, E.S., "Formation and evolution of two-dimensional cellular detonations", Combust. Flame, Vol. 116, pp. 154-165, 1999.
- 15- Sabzpooshani, M., and Mazaheri, K., "Formation of Unburnt Pockets in Gaseous Detonation", Combust. Exp. Shock Wave, Vol. 45, pp. 182-189, 2009.
- 16- Gamezo, V.N., Desbordes, D., and Oran, E.S., "Two-Dimensional Reactive Flow Dynamics in Cellular Detonation Waves", Shock Wave, Vol. 9, pp. 11-17, 1999.
- 17- Radulescu, M.I., Sharpe, G.J., Lee, J.H.S., Kiyanda, C.B., Higgins, A.J., and Hanson, R.K., "The Ignition Mechanism in Irregular Structure Gaseous Detonations", Proc. Combust. Ins., Vol. 30, pp. 1859-1867, 2005.
- 18- Radulescu, M.I., Sharpe, G.J., Law, C.K., and Lee, J.H.S., "The hydrodynamic structure of unstable cellular detonations", J. Fluid Mech., Vol. 580, pp. 31-81, 2007.
- 19- Lee, J.H.S., "The propagation mechanism of cellular detonation", Proc. of the 24th International Symposium on Shock Waves, Vol. 1, pp. 19-30, 2005.
- 20- Brouillette, M., "The Richtmyer-Meshkov instability", Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 34, pp. 445-468, 2002.
- ۲۱- سبزوoshانی، م.، "بررسی نقش امواج عرضی در دتوئیشن‌های گازی با استفاده از شبیه‌سازی عددی دو بعدی"، رساله دکتری مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵.
- 22- Berger, M.J., and Colella, P., "Local Adaptive Mesh Refinement for Shock Hydrodynamics", J. Comput. Phys., Vol. 82, pp. 64-84, 1989.
- 23- Mach, P., and Radulescu, M.I., "Mach reflection bifurcations as a mechanism of cell multiplication in gaseous detonations", Proc. Combust. Ins, Vol. 33, pp. 2279-2285, 2010.