

## امکان سنجی وقوع تراک در جریان‌های با سرعت بالا

سید عبدالمهدی هاشمی<sup>۱\*</sup>، مصطفی محمودی<sup>۲</sup>

کاشان - دانشگاه کاشان

\*Email: hashemi@kashanu.ac.ir

(تاریخ وصول: ۹۰/۱۱/۱۰، تاریخ پذیرش: ۹۱/۲/۱۸)

### چکیده

در مقاله حاضر، روشی به منظور بررسی امکان وقوع تراک در جریان‌های با سرعت زیاد مبتنی بر داده‌های تجربی موجود ارائه می‌شود. به این منظور جنبه‌های مختلفی از مسئله که با استفاده از شرایط مورد نیاز برای وقوع موج تراک بدست می‌آیند مورد ارزیابی قرار گرفت. این موارد عبارتند از: محدوده تراک پذیری مخلوط و اثر افزودنی‌های خنثی، نوع انسداد، هندسه و ابعاد، نوع آغازش شامل آغازش مستقیم و آغازش آرام، و ویژگی‌های خاص مخلوط نظیر فشار، دما و سرعت. نمونه اطلاعات موجود در هر یک از موارد فوق و نحوه استفاده از آن‌ها برای تحلیل مسأله مورد نظر ارائه شد. این روش به طور خاص در تخلیه یک جت مافوق صوت حاوی هیدروژن، در اتمسفر هوا در سه حالت مختلف کارکرد اعمال شد. در هر سه حالت مشخص شد که محدوده خطر از نظر نسبت هوا به سوخت در ناحیه ۲ الی ۸ متری دهانه خروجی قرار دارد. از طرفی در روند بررسی داده‌های تجربی موجود مشخص شد که وجود بخار آب (افزودنی موجود در مخلوط) باعث کاسته شدن احتمال وقوع تراک می‌شود و طبق نتایج موجود بیشترین درصد بخار آب مجاز برای تراک پذیر بودن مخلوط ۳۰٪ تعیین شده است. با توجه به درصد بالای بخار آب موجود در محدوده خطر مشخص شد که این ناحیه تراک پذیر نیست.

واژه‌های کلیدی: تراک، محدوده تراک پذیری، قطر لوله بحرانی، طول تشکیل، گذار از شعله به تراک.

### ۱- مقدمه

آرام، نفوذ<sup>۳</sup> جرم و حرارت می‌باشد. موج تراک یک موج ضربه‌ای قوی است که با گذشتن از یک محیط قابل احتراق آن را می‌سوزاند. انرژی ناشی از احتراق، موج ضربه‌ای را تقویت کرده و مانع از میرا شدن آن می‌گردد. موج تراک در محیط‌های گازی با سرعتی حدود ۲۰۰۰ متر بر ثانیه حرکت کرده و نسبت فشاری حدود ۲۰ ایجاد می‌نماید. مشخصه‌های این شعله در مقایسه با شعله معمولی که سرعتی حدود

به‌طور کلی، یک مخلوط قابل احتراق به دو گونه حدی آرام به صورت شعله (دفلگريشن<sup>۴</sup>) و سریع به صورت موج تراک (دتونيشن<sup>۵</sup>) می‌تواند بسوزد. احتراق آرام، همان سوختن معمولی است که در آن موج احتراقی سرعتی زیر صوت دارد. سرعت این امواج در محدوده متر بر ثانیه بوده و تغییر فشار در آن‌ها ناچیز می‌باشد. مکانیزم انتشار شعله

3- Deflagration

4-Detonability limit

5-Diffusion

۱- استادیار

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد

بحرانی<sup>۱۲</sup>، اندازه سلول<sup>۱۳</sup> و ... به صورت تئوری به دست نمی‌آیند و در برخی موارد نیاز به سینتیک شیمیایی غیر تعادلی و انتقال توربولانسی دارند. برای ارزیابی امکان وقوع تراک، نیاز به دانش و توانایی تشریح پارامترهای دینامیکی شعله‌های سرعت بالا و تراک می‌باشد [۱].

در سال‌های اخیر، هیدروژن به عنوان یک سوخت مناسب با میزان آلاینده‌گی بسیار پایین شناخته شده‌است. از آنجا که هیدروژن محدوده شعله‌پذیری وسیعی داشته و در ترکیب با هوا در محدوده گسترده‌ای از غلظت، یک مخلوط تراک پذیر محسوب می‌شود، اطمینان از ایمنی در کاربردهای این سوخت مهم می‌باشد. برای حصول اطمینان از ایمنی، بایستی خطر انفجار در مراحل تولید، استفاده، حمل و ذخیره سازی هیدروژن مورد بررسی قرار گیرد. تاکنون حدود ۷٪ حوادث در صنایع مرتبط با هیدروژن در اروپای غربی و امریکای شمالی به علت احتراق یا انفجار ابر هیدروژن بوده است [۳]. حادثه انفجار کشتی هوایی هیندبرگ (۱۹۳۷م) شاید اولین نمونه از حوادث ناشی از بی‌توجهی در استفاده از هیدروژن است. در این حادثه مخزن پر شده از هیدروژن منفجر شده و کشتی ۲۳۵ متری طی ۳۲ ثانیه سوخت. نشت هیدروژن از یک کمپرسور حاوی هیدروژن به فضای آزاد حین آزمایش یک راکت در سال ۱۹۸۴م در ایالات متحده منجر به یک انفجار شد. علت انفجار گذار شعله به تراک در ابر هیدروژن- هوای تولید شده گزارش شده است. بررسی‌ها نشان داد تنها حدود ۱۰۰ گرم از هیدروژن آزاد شده باعث این انفجار بوده است [۳]. در سال ۱۹۸۴م در آزمایش یک راکت افقی در نوادا ۱۰۰۰ کیلوگرم هیدروژن طی ۳۰ ثانیه در جو تخلیه شد. ۲۶ ثانیه پس از تخلیه، وقوع انفجار باعث تخریب سیستم آزمایش شد. تخمین زده می‌شود در این حادثه تنها حدود ۱۰ کیلوگرم از ۱۰۰۰ کیلوگرم هیدروژن وارد شده به جو در انفجار شرکت داشته است. در سال ۱۹۹۲م در تأسیسات تولید هیدروژن در چین در قسمت ذخیره سازی انفجار مهیبی رخ داد. علت انفجار نشت هوا به داخل مخزن و ایجاد یک جرقه الکترواستاتیکی گزارش شده است [۳].

علی‌رغم حضور جت‌های هیدروژن در پدیده‌های مختلف صنعتی و نظامی، بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی در رابطه با این پدیده چندان گسترش پیدا نکرده است. واسیلوف<sup>۱۴</sup> و همکارانش [۴] پارامترهای اصلی موج تراک نظیر دما، فشار، ابعاد سلولی و انرژی آغازش بحرانی در حالات صفحه‌ای، استوانه‌ای و کروی را برای دو سوخت پراکسید هیدروژن و ازون با استفاده از یک مدل‌سازی کامپیوتری بررسی

۱ متر بر ثانیه دارد، تفاوت زیادی را نشان می‌دهد. قدرت موج ضربه‌ای<sup>۱</sup> در تراک باید به قدری باشد که افزایش دمای پشت موج ضربه‌ای بتواند موجب واکنش احتراق گردد. انرژی حاصل از احتراق نیز باید به اندازه‌ای باشد که بتواند موج ضربه‌ای را تقویت کند، در غیر این صورت تراک از بین می‌رود [۱]. اولین نظریه در مورد تراک توسط چاپمن<sup>۲</sup> (۱۸۹۹م) و جوگت<sup>۳</sup> (۱۹۰۵م) ارائه شد و به تئوری CJ<sup>۴</sup> مشهور گردید. این نظریه ترمودینامیکی با فرض اینکه موج تراک با سرعت ثابت حرکت می‌کند، خواص استاتیکی موج تراک (نظیر سرعت، فشار و ...) را محاسبه می‌کرد که مطابقت بسیار خوبی با نتایج تجربی داشت. خواص محاسبه شده با این تئوری به خواص CJ مشهور است. در این تئوری علاوه بر فرض دائم بودن، ضخامت موج تراک (ضخامت ناحیه واکنش) ناچیز فرض می‌شد. طبق این تئوری جریان در پائین دست موج نسبت به موج ضربه‌ای صوتی<sup>۵</sup> است. با توجه به این که تئوری CJ محاسبات را بر اساس تعادل انجام می‌دهد، نمی‌تواند پارامترهای دینامیکی تراک را که به نرخ واکنش‌های شیمیایی وابسته است (مثل ساختار موج تراک)، پیش بینی کند [۱]. نقطه قوت این نظریه با وجود فرضیات ساده کننده، موفقیت چشمگیر آن در پیش‌گویی خواص استاتیکی بوده است.

نظریه مهم دیگر در این زمینه توسط زلدوویچ<sup>۶</sup> (۱۹۴۰م)، نیومن<sup>۷</sup> (۱۹۴۲م) و دورینگ<sup>۸</sup> (۱۹۴۳م) به‌طور جداگانه ارائه گردید که به مدل ZND مشهور است. در این مدل با فرض دائم بودن تراک (حرکت موج با سرعت CJ)، ضخامتی برای ناحیه واکنش در نظر گرفته می‌شود. با این مدل ساختار یک بعدی دائم برای یک موج تراک به دست می‌آید که شامل یک موج ضربه‌ای، ناحیه تأخیر<sup>۹</sup> و ناحیه واکنش می‌باشد. در انتهای ناحیه واکنش نیز شرط CJ برقرار است [۱]. با پیشرفت تکنیک‌های اندازه‌گیری، دستگاه‌های جدید نشان دادند که تراک با سرعت ثابت حرکت نمی‌کند، هرچند متوسط آن در مسافت معین تقریباً ثابت و حدود مقدار CJ است. به علاوه یک سری مشاهدات تجربی ساختار سه بعدی و پیچیده تراک را نشان می‌دادند [۲].

در حالت کلی مشخصه‌های انفجاری یک مخلوط قابل انفجار به دو دسته پارامترهای استاتیکی (تعادلی) و دینامیکی (غیر تعادلی) طبقه بندی می‌شوند. پارامترهای تعادلی بر پایه ترمودینامیک بوده و با استفاده از کدهای کامپیوتری مبتنی بر روش‌های محاسبات تعادلی، با دقت خوبی به دست می‌آیند [۱]. از سوی دیگر پارامترهای دینامیکی از قبیل محدوده تراک پذیری<sup>۱۰</sup>، انرژی آغازش<sup>۱۱</sup>، قطر

11-Critical Energy  
12-Critical Tube Diameter  
13-Cell Size  
14-Vasil'ev

1-Shock wave  
2-Chapman  
3-Jouguet  
4-C-J Theory  
5-Sonic shock wave  
6-Zeldovich  
7-Neumann  
8-Doring  
9-Induction zone  
10-Detonability limit

از قبیل حدود تراک‌پذیری، محدوده غلظت مخلوط‌های تراک‌پذیر، انتقال از شعله به تراک، طول تشکیل تراک و اثر فشار، دما و سرعت اولیه مخلوط مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل برای مسائل جریان‌های سرعت بالا نظیر جت، تعمیم داده می‌شود.

## ۲- بیان نمونه آزمایشگاهی و روش تحلیل آن

جت‌های پرسرعت، معمولاً در ناحیه خروجی تجهیزاتی نظیر موشک‌ها تشکیل می‌شوند. در این‌گونه نواحی، مخلوط گازهای ناشی از احتراق با سرعت بسیار زیاد خارج شده و به سرعت با هوای اطراف مخلوط می‌شود. دمای بالای این‌گونه مخلوط‌ها و وجود مقادیر زیاد هیدروژن ناشی از احتراق ممکن است منجر به وقوع پدیده تراک گردد. به منظور بررسی امکان وقوع تراک در یک جت پرسرعت باید جنبه‌های مختلفی از مسئله مورد ارزیابی قرار گیرد. این جنبه‌ها با استفاده از شرایط مورد نیاز برای وقوع موج تراک بدست می‌آیند. به منظور بررسی تشکیل یک موج تراک موارد زیر باید در نظر گرفته شوند:

الف- محدوده تراک‌پذیری مخلوط و اثر افزودنی‌های خنثی: محدوده خاصی از غلظت یک مخلوط سوخت و اکسیدکننده قابلیت تشکیل تراک را دارد. اولین و مهم‌ترین شرط برای تشکیل تراک این است که مخلوط مورد نظر در این محدوده باشد. چنانچه به این مخلوط، مواد خنثی افزوده شوند محدوده تراک‌پذیری بسته به نوع افزودنی کوچک‌تر می‌شود.

ب- نوع آغازش تراک: دو نوع آغازش موج تراک وجود دارد که در قسمت بعد توضیح داده می‌شوند. بر حسب اینکه کدام نوع مورد نظر باشد باید ویژگی‌های هر یک بررسی شوند. آغازش مستقیم: منبع آغازش انفجاری عامل اساسی در آغازش مستقیم (انفجاری) تراک است. امکان وجود چنین منبعی و انرژی آزاد شده از آن باید مورد بررسی قرار گیرد؛ آغازش آرام (گذار شعله به تراک): با توجه به مکانیزم شکل‌گیری تراک در این نوع آغازش طول تشکیل و وضعیت مخلوط اهمیت دارند.

ج- نوع انسداد، هندسه و ابعاد: این که یک مخلوط در فضای باز باشد یا در یک ناحیه بسته (مخزن)، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در آغازش موج تراک دارد. هندسه و ابعاد مخلوط نیز نقش مهمی در آغازش موج ایفا می‌کند. اثر ابعاد لوله حاوی مخلوط بر خواص تراک نیز از مواردی است که بدان اشاره خواهد شد.

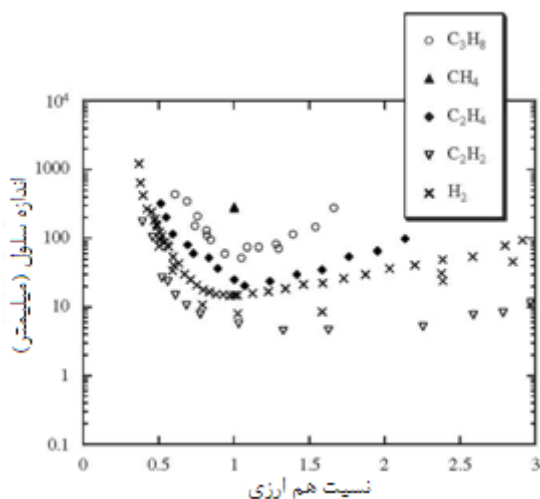
د- ویژگی‌های خاص مخلوط نظیر فشار، دما و سرعت: داده‌های تجربی موجود برای شرایط اولیه محدودی بدست آمده‌اند که ممکن است شامل ویژگی‌های مخلوط مورد نظر نباشند. در این خصوص یک سری تحلیل‌های تئوری به منظور ارزیابی اثر این شرایط خاص و نتیجه‌گیری بر اساس داده‌های موجود لازم است.

کردند. آن‌ها دریافتند که با کاهش فشار اولیه یا غلظت پراکسید هیدروژن، پارامترهای سرعت، دما، نسبت فشار و انرژی آزاد شده کاهش می‌یابند، اما اندازه سلول‌ها، انرژی آغازش بحرانی و قطر بحرانی افزایش می‌یابد. دیمبل<sup>۱</sup> و همکارانش [۵] یک مطالعه عددی را به منظور شبیه‌سازی جت هیدروژن در هوای آزاد انجام دادند و توزیع دما، فشار و غلظت گونه‌ها را با نتایج موجود آزمایشگاهی مقایسه کردند. آن‌ها با شبیه‌سازی ساختار الماسی شکل موج‌های ضربه‌ای در خروجی جت، از نتایج بدست آمده به عنوان داده‌های ورودی مسئله شبیه‌سازی جت آزاد استفاده کردند. با بررسی ساختار جت در فشارهای مختلف، فاصله‌ی ایمن برای حضور در کنار جت پیشنهاد شد. در پایین دست ساختار موج‌های ایجاد شده، ناحیه‌ای مشاهده شد که در آن سرعت و غلظت هیدروژن تقریباً ثابت بود. پس از این ناحیه به علت ورود هوا به داخل جت سرعت کاهش می‌یابد. زالوش<sup>۲</sup> [۶] انفجار یک تانکر حاوی هیدروژن فشرده (۳۴.۳ مگا پاسکال) در معرض شعله مستقیم پروپان را به صورت تجربی بررسی کرد. توزیع فشار و مقادیر حداکثر فشار ثبت شد. مقدار حداکثر فشار از ۱۴۰ کیلو پاسکال در فاصله ۱/۲ متری محل انفجار به ۱۲ کیلو پاسکال در فاصله ۱۵ متری تنزل یافت. با آزاد شدن سریع هیدروژن در اتمسفر آزاد، ممکن است حجم زیادی از مخلوط قابل انفجار با اختلاط هیدروژن و هوا به وجود آید. گذار از شعله به تراک نیز ممکن است در مخلوط‌های هیدروژن و هوا رخ دهد که در نتیجه آن موج ضربه‌ای شدیدی به وجود آمده و باعث خسارت خواهد شد. در محیط‌های بسته و مجاری انتقال نیز امکان وقوع تراک وجود دارد. برای مجاری طویل با نسبت طول به قطر ( $L/D$ ) بزرگ، شتاب‌گیری شعله باعث ایجاد شعله‌ای با سرعت بالا شده و امکان ایجاد تراک وجود دارد. اگر انتهای لوله باز باشد، تحت شرایط خاصی این موج می‌تواند در فضای آزاد بیرون نیز به انتشار ادامه دهد و باعث آسیب بیشتری شود. بنابراین بسیار مهم است که در بررسی یک مسئله کلیه حالت‌های وقوع تراک، مورد توجه قرار گیرد.

در تحقیق حاضر، یک روش به منظور بررسی خطر وقوع تراک در جریان‌های با سرعت زیاد مبتنی بر داده‌های تجربی و تحلیل‌های تئوری ارائه می‌شود. در خصوص این‌گونه جریان‌ها داده‌های تجربی به طور مستقیم موجود نیستند و یا حتی امکان آزمون به دلیل مخرب بودن آن وجود ندارد. به صورت کاربردی، روش ارائه شده در خروجی یک جت مافوق صوت حاوی هیدروژن اعمال می‌شود. مواد خروجی در این جت، اکسید منیزیم به صورت ذرات ریز جامد معلق، هیدروژن و بخار آب و مقدار بسیار جزئی اجزای دیگر می‌باشند. با توجه به سرعت زیاد مخلوط خروجی، این مخلوط به سرعت با هوای اطراف مخلوط می‌شود. در بررسی حاضر، امکان وقوع موج تراک از جنبه‌های متفاوت

1-Dembele  
2-Zalosh

اندازه سلول را نسبت به سایر سوخت‌ها دارند. باید توجه داشت که اندازه کوچک‌تر سلول تراک نشان دهنده حساسیت بیشتر مخلوط نسبت به تراک‌پذیری است. به عبارت دیگر هرچه اندازه سلول کوچک‌تر باشد امکان وقوع تراک در آن بیشتر است. بنابراین با توجه به شکل، در میان مخلوط‌های هوا-سوخت، استیلن و هیدروژن حساس‌ترین مخلوط‌ها از نظر تراک‌پذیری هستند [۱۱].



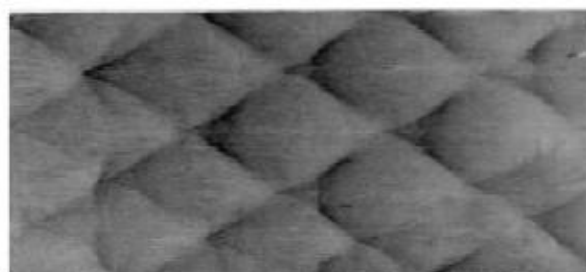
شکل ۳- تغییرات اندازه سلول تراک نسبت به تغییرات نسبت هم‌ارزی برای چند سوخت مختلف در فشار اتمسفر و دمای استاندارد محیط [۸].

#### ۲-۱-۱- اثر افزودنی‌های خنثی بر محدوده تراک‌پذیری

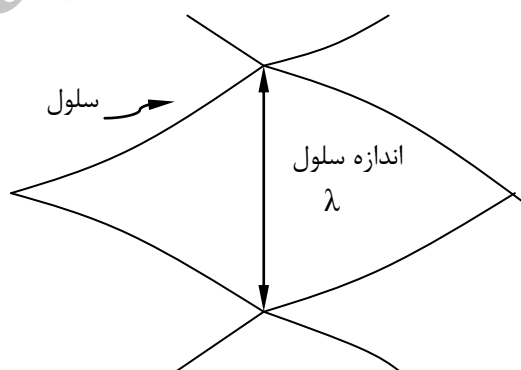
ممکن است علاوه بر هوا و سوخت اصلی، افزودنی‌هایی نیز در مخلوط وجود داشته باشد که در این صورت این افزودنی‌ها خواص دینامیکی مخلوط قابل انفجار را تحت تأثیر قرار می‌دهد. گل [۱۲] نشان داده است که وجود مقدار کمی هیدروکربن در جت رقیق هیدروژن-هوا، محدوده تراک‌پذیری را وسیع‌تر می‌کند. شکل (۴)، اثر مواد افزودنی خنثی را بر اندازه سلول مخلوط هوا-هیدروژن نشان می‌دهد. شکل (۴-الف) مربوط به اثر افزایش دی‌اکسید کربن است. همان‌گونه که پیداست، افزودن دی‌اکسید کربن باعث افزایش پهنای سلول می‌شود و با افزایش درصد این ماده، اندازه سلول نیز بزرگ‌تر خواهد شد. با توجه به بحث ارائه شده در قسمت قبل، این افزایش اندازه سلول به معنی کاهش حساسیت مخلوط و تراک‌پذیری آن است. شکل (۴-ب) مربوط به اثر افزایش بخار آب است. برای بررسی اثر افزایش بخار آب بر اندازه سلول تراک از لوله گرم شونده استفاده شده است. دمای مخلوط آزمایش ۱۰۰ درجه سلسیوس است [۱۳]. مشاهده می‌شود که با افزایش میزان بخار آب، پهنای سلول بیشتر شده و به علاوه، محدوده نسبت هم‌ارزی که در آن تراک رخ می‌دهد نیز کاهش یافته است.

#### ۲-۱- محدوده تراک‌پذیری مخلوط و اثر افزودنی‌های خنثی

برای تبیین حدود تراک‌پذیری لازم است معیار مشخصی تعریف شود. پهنای سلول تراک ( $\lambda$ ) به عنوان یک مشخصه ساختار سلولی و به عنوان یک پارامتر دینامیکی مهم تراک شناخته شده است که می‌تواند به عنوان یک پارامتر مناسب در تشخیص حدود تراک‌پذیری مورد استفاده قرار گیرد [۱۱-۷]. نتایج تجربی نشان داده‌اند که تراک در هنگام انتشار در یک مخلوط گازی تراک‌پذیر، روی ورقه‌ای که قبل از آزمایش با دوده پوشانده شده است، تشکیل یک ساختار سلولی می‌دهد که یک نمونه از آن در شکل (۱) نشان داده شده است. شکل (۲) طرح واره امواج تشکیل دهنده جبهه تراک را نشان می‌دهد که اندازه سلول تراک نیز در آن نشان داده شده است.



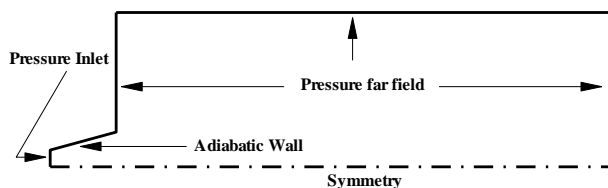
شکل ۱- ساختار سلولی تشکیل شده روی صفحه دوداندود [۱].



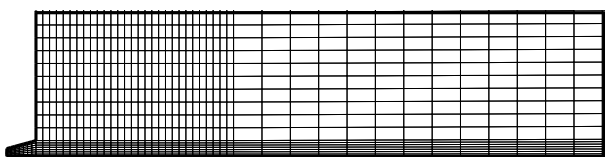
شکل ۲- نمایی از یک سلول تشکیل شده و معرفی اندازه سلول.

حجم وسیعی از داده‌های آزمایشگاهی از اندازه سلول تراک‌های مخلوط هیدروژن در دسترس‌اند [۷-۱۰]. نکته‌ای که باید در این زمینه به آن توجه داشت این است که مقادیر متفاوتی از اندازه سلول مخلوط‌های حاوی هیدروژن در منابع مختلف ارائه شده است. هرچند که آزمایش ورق دوداندود را می‌توان به راحتی اجرا نمود، اما تفسیر نتایج برای تشخیص اندازه سلول تراک نیاز به دقت زیادی دارد [۱۱]. شکل (۳) تغییرات اندازه سلول تراک نسبت به تغییرات نسبت هم‌ارزی برای سوخت‌های گازی مرسوم در فشار اتمسفر و دمای محیط را نشان می‌دهد. مخلوط‌های هیدروژن-هوا و استیلن-هوا، کوچک‌ترین

گازهای خروجی خواهد شد. با ورود هوا به درون جت، مخلوط هوا و هیدروژن تشکیل یک مخلوط قابل انفجار را می‌دهد که با توجه به نسبت اختلاط آن، احتمال وقوع تراک در آن وجود دارد. بخار آب موجود در مخلوط هیدروژن و هوا نیز به عنوان یک ماده افزودنی در مخلوط در نظر گرفته می‌شود. برای تعیین غلظت و میزان مواد موجود در هر منطقه از گازهای خروجی، از نتایج شبیه سازی عددی مربوط به جت که با آزمایشات تجربی تأیید اعتبار شده است، استفاده می‌شود. سه حالت مختلف آزمون که منجر به سه ترکیب مختلف از مواد در خروجی جت می‌گردد در نظر گرفته شده و با استفاده از شبیه سازی عددی، غلظت‌ها در خروجی به دست می‌آیند.



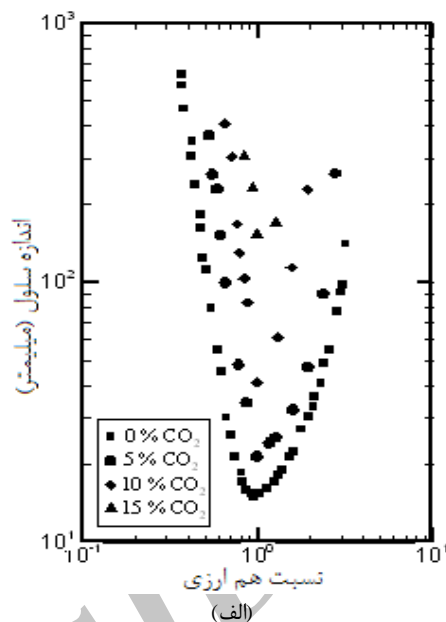
(الف)



(ب)

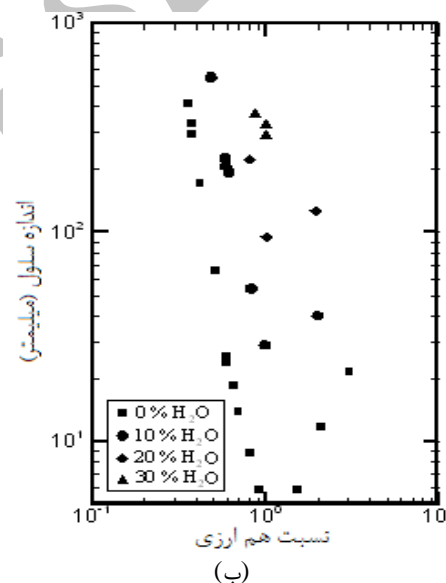
شکل ۵- نمایی از هندسه و شرایط مرزی (الف) و شبکه بندی در نواحی نزدیک خروجی نازل (ب).

در شکل (۶) نمودارهای مربوط به سه حالت مختلف آزمون ترسیم شده است. این نمودارها محدوده‌ای از نسبت هم ارزی که در آن مخلوط، تراک پذیر است را نشان می‌دهند. همچنین کسر مولی بخار آب در محدوده مرزی نشان داده شده است. بدیهی است که با دور شدن از دهانه خروجی، مقدار هوای نفوذ یافته به درون مواد خارج شده بیشتر شده، که در نتیجه آن، مخلوط رقیق تر و نسبت هم ارزی کوچک تر خواهد شد. با توجه به شکل (۴-ب) برای مخلوط هیدروژن و هوا بدون افزودنی، در مقادیر نسبت هم ارزی کمتر از ۰/۳۵، مقداری برای پهنای سلول ذکر نگردیده که به معنی عدم وقوع تراک در این ناحیه می‌باشد. در واقع این قسمت حد پایین تراک پذیری است و برای  $\phi$  های کمتر، تراک در مخلوط تشکیل نمی‌شود. همچنین با افزایش ۳۰٪ بخار آب به مخلوط، محدوده تراک پذیری بسیار کوچک شده است، که نشان می‌دهد با افزایش بیشتر بخار آب، مخلوط از حالت تراک پذیری خارج می‌گردد. لذا ناحیه‌ای تراک پذیر قلمداد می‌شود که نسبت هم ارزی آن بیش از ۰/۳۵ و کمتر از ۲، و درصد بخار آب موجود در آن هم کمتر از ۳۰ درصد باشد، این ناحیه در شکل (۶) نشان داده شده است. بدیهی است با توجه به درصد بخار آب



نسبت هم ارزی

(الف)



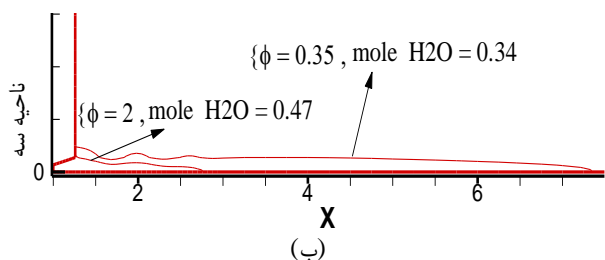
نسبت هم ارزی

(ب)

شکل ۴ - تغییرات اندازه سلول تراک مخلوط هیدروژن-هوا-همراه با (الف) دی اکسید کربن (ب) بخار آب [۱۰].

## ۲-۱-۲- بررسی مسأله جت حاوی هیدروژن

شکل (۵- الف) شماتیک هندسی و شرایط مرزی نازل مورد نظر را نشان می‌دهد. به دلیل تقارن، شبیه سازی فقط در یک نیمه انجام شده است. طول میدان انجام آزمایش در حدود ۷ متر و عرض آن در حدود ۱ متر می‌باشد. محصولات احتراق با سرعت و دمای بالا از دهانه خروجی نازل وارد محیط می‌شوند. در موتور مورد نظر از منیزیم به عنوان سوخت و از آب به عنوان اکسید کننده استفاده شده است. جت خروجی که ناشی از واکنش منیزیم با آب است، شامل هیدروژن، بخار آب و ذرات اکسید منیزیم است. سرعت بالای جت خروجی و وجود لایه برشی با هوای اطراف، موجب اختلاط سریع هوای اطراف با



شکل ۶- (الف) ناحیه مستعد تراک در جت خروجی بر حسب فاصله (متر) از جت که به صورت ناحیه تیره نمایش داده شده است (ب) نمایش مقدار نسبت هم ارزی و کسر مولی بخار آب در مرز ناحیه.

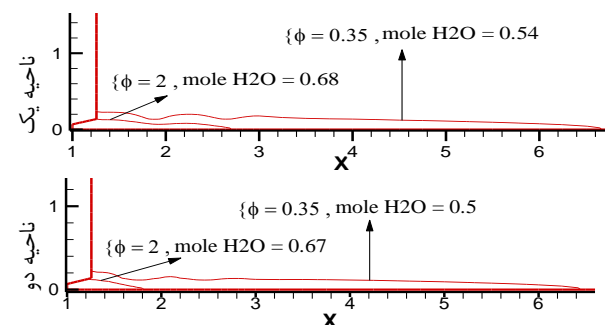
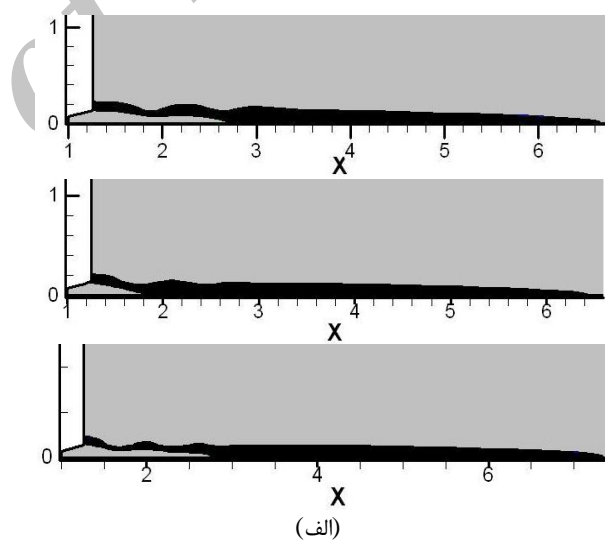
## ۲-۲- انواع آغازش

به‌طور کلی دو روش برای آغازش وجود دارد: نوع اول آغازش مستقیم است که با ایجاد یک موج ضربه‌ای قوی، ناگهان موج تراک ایجاد می‌شود. با توجه به اینکه در این روش برای ایجاد تراک نیاز به یک منبع انفجاری قوی می‌باشد و وجود چنین منبعی در نزدیکی آزمون غیر محتمل است لذا از بررسی این نوع آغازش صرف‌نظر می‌شود. نوع دوم آغازش آرام است که در آن ابتدا توسط یک منبع نسبتاً ضعیف انرژی، یک شعله تشکیل می‌شود و با طی شدن مسافتی که طول تشکیل نام دارد، یک موج ضربه‌ای با موج احتراقی جفت شده<sup>۲</sup> و موج تراک را تشکیل می‌دهد. معمولاً نوع غیر مستقیم ایجاد تراک را گذر از شعله به تراک<sup>۳</sup> (DDT) می‌گویند (در ادامه بحث به اختصار از واژه گذار استفاده می‌شود). در این نوع آغازش، فاصله‌ای بین مکان شروع احتراق تا شروع تراک وجود دارد که همان طول تشکیل خواهد بود. برای شتاب گیری سریع‌تر شعله، معمولاً از موانعی مثل فنر درون لوله استفاده می‌کنند که تلاطم و آشفتگی جریان را افزایش دهد. با به‌کارگیری موانع مذکور، طول تشکیل کاهش خواهد یافت. چون با کاهش طول تشکیل، احتمال وقوع تراک افزایش می‌یابد لذا کاهش این طول به معنی افزایش خطر ایجاد تراک در مخلوط خواهد بود، لذا به منظور بررسی امکان ایجاد تراک در یک مخلوط، در ابتدا لازم است طول تشکیل مورد بررسی قرار گیرد.

در این بخش نتایج تجربی مربوط به این نوع آغازش بررسی خواهند شد. عمده نتایج مربوط به این آزمایش‌ها، اندازه گیری فاصله بین نقطه آغازش احتراق و جرقه اولیه تا نقطه تشکیل تراک است. در حقیقت هدف این آزمایش‌ها بررسی این پدیده است که اگر قرار باشد گذار از شعله به تراک رخ دهد باید حداقل طول لازم از نقطه آغازش اشتعال تا گذار شعله به تراک چقدر باشد. به این فاصله اصطلاحاً طول تشکیل  $X_D$  گفته می‌شود. به ازای طول‌های کمتر از این مقدار اطمینان حاصل خواهد شد که تراک ایجاد نخواهد شد.

موجود در مخلوط، ناحیه تراک پذیری به مراتب کوچک‌تر از ناحیه نشان داده شده خواهد بود.

البته خطرپذیر بودن ناحیه فوق‌الذکر، با فرض مخلوط خالص هوا و هیدروژن می‌باشد. با توجه به شکل (۴)، وجود بخار آب، تراک‌پذیری را کاهش داده به‌طوری که کوچک‌ترین محدوده‌ی تراک پذیری برای بیشترین غلظت بخار آب (غلظت ۳۰٪ بخار آب) رخ می‌دهد. همچنین مقادیر کسر مولی بخار آب در ابتدا و انتهای مرزهای ناحیه خطر برای هر سه حالت در شکل (۶-ب) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر کسر مولی در مرزها بیشتر از مقادیری است که در شکل (۴) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این کسر مولی با وجود اکسید منیزیم (MgO) به‌دست آمده که فاز جامد می‌باشد. برای مقایسه بهتر نمونه آزمایشگاهی با شکل (۴) باید فاز جامد از اندازه گیری حذف شود. با نادیده گرفتن فاز جامد از مجموع مواد در نظر گرفته شده برای محاسبه مقادیر کسر مولی، مقدار کسر مولی بخار آب از این مقدار هم بیشتر خواهد بود و عملاً می‌توان گفت احتمال وقوع تراک با توجه به غلظت بالای بخار آب در این ناحیه منتفی است.

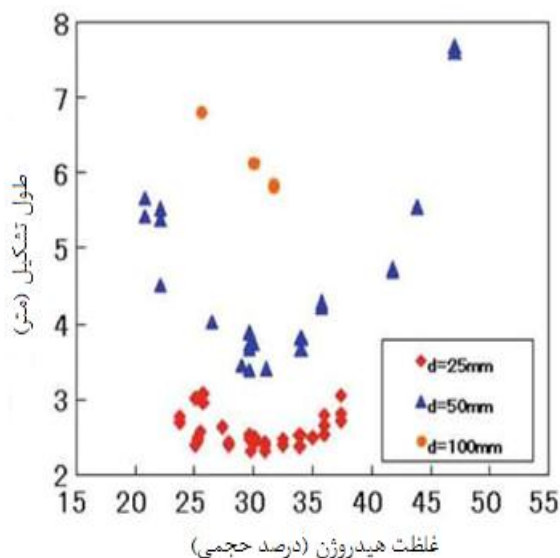


1-Induction Length  
2-Coupled combustion wave  
3-Deflagration to Detonation Transition (DDT)

## ۲-۲-۱- بررسی اثر ابعاد بر طول تشکیل

داده‌های تجربی فراوانی در مورد اثر دما، فشار اولیه و قطر لوله بر  $X_D$  وجود دارد [۱۷-۱۴]. آیزاوا<sup>۱</sup> و همکاران [۱۸] تأثیرات قطر لوله، غلظت مخلوط و سرعت جریان را بر طول تشکیل بررسی کردند. این گزارش یکی از آخرین یافته‌های علمی مربوط به پارامتر طول تشکیل می‌باشد. لازم به ذکر است که این آزمون‌ها بدون استفاده از موانع شتاب‌دهنده شعله در لوله انجام شده‌اند. شکل (۷) طول تشکیل مخلوط هوا و هیدروژن را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش قطر موجب افزایش طول تشکیل مخلوط هیدروژن و هوا خواهد شد. همچنین با توجه به جداول (۱) و (۲) می‌توان نتیجه گرفت که، افزایش قطر تا ۱۰۰ mm علاوه بر افزایش شدید طول تشکیل، موجب کاهش تراک پذیری مخلوط نیز خواهد شد.

از آنجا که اطلاعاتی در مورد طول تشکیل در مخلوط‌های آزاد در دسترس نبود، بدین منظور از نتایج مربوط به لوله با بزرگ‌ترین قطر (۷ متر) استفاده شد. چون افزایش قطر موجب افزایش طول تشکیل می‌شود، پس انتظار می‌رود که طول تشکیل مربوط به مخلوط در فضای آزاد بزرگ‌تر از این مقدار باشد. چنانچه از آشفتگی جریان صرف‌نظر شود، برای گذار بایستی هفت متر فضا حاوی مخلوط تراک پذیر وجود داشته باشد. با توجه به سه دهانه خروجی در شکل ۶، فضای حاوی مخلوط تراک پذیر برابر با ۴ الی ۵ متر است که کمتر از طول تشکیل ذکر شده می‌باشد. البته باید توجه داشت که این داده‌ها مربوط به یک مخلوط ساکن و بدون آشفتگی می‌باشد و این در حالی است که در جت با سرعت بالا اثرات آشفتگی جریان می‌تواند جدی باشد که در قسمت ۲-۳-۵ مورد بحث قرار گرفته است.



شکل ۷- طول تشکیل مخلوط هیدروژن-هوا در سه لوله با قطرهای متفاوت [۱۸].

جدول ۱ - کم‌ترین طول تشکیل مخلوط هیدروژن-هوا بازای سه لوله با قطرهای متفاوت [۱۵].

قطر لوله (mm)	۲۵	۵۰	۱۰۰
طول تشکیل (m)	۲/۳	۳/۶	۵/۸

جدول ۲- بیشترین و کم‌ترین غلظت مخلوط منجر به وقوع تراک در لوله [۱۵].

قطر لوله (mm)	۲۵	۵۰
کم‌ترین غلظت (درصد حجمی هیدروژن)	۳۷/۱	۱۹
بیشترین غلظت (درصد حجمی هیدروژن)	۲۳/۷	۵۲

## ۲-۳- ویژگی‌های خاص مخلوط

شرایط اولیه مخلوط نظیر فشار، دما و سرعت آن می‌تواند خواص تراک را تحت تأثیر قرار دهد.

## ۲-۳-۱- اثر سرعت اولیه

پارامترهای مورد بررسی تاکنون مربوط به تراک در مخلوط‌های ساکن بود. از آنجا که جت مورد بررسی سرعت بالایی دارد، پارامترهایی همچون سرعت موج تراک، طول تشکیل و غیره، نسبت به مخلوط ساکن تفاوت خواهد داشت [۱۱]. در این قسمت به بررسی گزارشاتی که به این نوع تراک‌ها اشاره دارند، پرداخته می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که وجود آشفتگی جریان در مخلوط‌های با سرعت اولیه، موجب کاهش طول تشکیل می‌شود [۱۹]. برای بررسی اثر سرعت بر پارامترهای دینامیکی از عدد رینولدز<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. این عدد از حاصل ضرب سرعت متوسط جریان در سطح مقطع لوله بخش بر ویسکوزیته مخلوط هیدروژن-هوا محاسبه می‌شود [۲۰].

## ۲-۳-۱-۱- اثر سرعت اولیه بر طول تشکیل

مطابق با شکل (۸)، آیزاوا و همکاران [۱۸] نشان دادند که، طول تشکیل در مقادیر بالای اعداد رینولدز کاهش می‌یابد. عدد رینولدز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

که در این رابطه  $\rho$ ،  $V$ ،  $D$  و  $\mu$  به ترتیب چگالی، سرعت مخلوط، قطر و ضریب لزجت مخلوط می‌باشد. در جریان جت پر سرعت مورد بررسی سرعت جریان زیاد بوده و عدد رینولدز چنانچه بر مبنای قطر جت و متوسط سرعت جریان محاسبه شود بسیار بیشتر از مقادیر ارائه شده در شکل ۸ است (از مرتبه  $10^6$ ). از سویی مافوق صوت بودن جریان و حضور متناوب امواج فشاری و انبساطی در الگوی الماسی بر پیچیدگی جریان می‌افزاید. نبودن اطلاعات مربوط به طول تشکیل در

2-Reynolds number

1-Aizawa



## ۲-۳-۲- اثر فشار اولیه

لی نشان داد که برای مخلوط‌های تراک پذیر در داخل لوله، با افزایش فشار اولیه، امکان وقوع تراک افزایش می‌یابد [۱]. در مورد مسئله‌ی جت فشار در خروجی جت بیش از فشار محیط است (به دلیل شرایط کارکرد خاص) و در خروجی جت یک موج انبساطی موجب کاهش فشار و دمای مواد خروجی خواهد شد. البته نواحی انبساطی و تراکمی به طور متناوب در خروجی جت به وجود می‌آیند و تشکیل الگوی الماسی شکل<sup>۱</sup> را می‌دهند که با توجه به اینکه در خروجی جت فشار بیش از محیط است لذا در هیچ ناحیه‌ای فشار بیش از فشار صفحه خروجی نخواهد بود.

## ۲-۳-۳- اثر دمای اولیه

تغییر دمای اولیه در آزمایشات مختلف، نتایج پیچیده و غیر همسانی بر جای گذاشته است. به نظر می‌رسد تغییر این پارامتر به دلیل اثرات وابسته بر سایر متغیرهای موثر بر جریان آزمایش باید به طور خاص برای هر مورد آزمایشگاهی صورت گیرد [۳]. دما در خروجی جت در حدود ۴۰۰ کلوین است و این دما با مخلوط شدن جت با هوای خروجی کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه دمای مخلوط نسبت به دمای محیط چندان بالا نیست می‌توان انتظار داشت که شرایط دمایی نسبت به دمای محیط انحراف ناچیزی داشته باشد. این دما نسبت به دمای اشتعال مخلوط هیدروژن که در شرایط استوکیومتری (کم‌ترین دمای اشتعال) حدود ۸۰۰ کلوین است، بسیار کمتر است و امکان اشتعال از این جهت وجود ندارد. همچنین به دلیل حضور موج انبساطی در خروجی و نیز نفوذ هوای اطراف در جریان خروجی که باعث کاهش دما می‌شوند، افزایش دمای جریان تا دمای اشتعال محتمل نیست. البته چنانچه در حالت کلی دمای مخلوط در حد دمای اشتعال باشد در این صورت باید احتمال ایجاد تراک در مخلوط را جدی دانست.

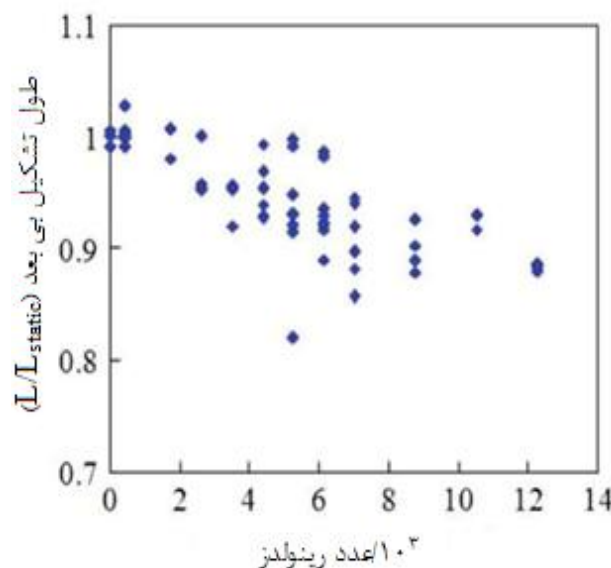
## ۲-۳-۴- اثر حضور ذرات اکسید منیزیم

یکی از ویژگی‌های جت پرسرعت مورد بررسی، وجود ذرات جامد اکسید منیزیم در آن است که از دو جنبه باید مورد توجه قرار گیرد. یکی غلظت اکسید منیزیم که حدود تراک‌پذیری را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در قسمت ۲-۱-۲ در مورد آن بحث شد. دیگری اثر حضور این ذرات در جت و نقش آن در آغازش تراک است. از آنجا که دما در خروجی جت حدود ۴۰۰ کلوین است و این دما به مراتب کمتر از دمای اشتعال مخلوط هیدروژن (حدود ۸۰۰ کلوین) می‌باشد و از سویی جت در فضای آزاد تخلیه می‌شود که امکان برخورد ذرات به

چنین مواردی قضاوت در این خصوص را چنانچه مخلوط تراک‌پذیر باشد مشکل می‌سازد. لذا در چنین شرایطی چنانچه مخلوط در شرایط تراک‌پذیری قرار داشته باشد نباید روی بلندی طول تشکیل به عنوان یک عامل کاهش خطر تراک‌پذیری حساب کرد و خطر وقوع تراک را جدی قلمداد کرد.

## ۲-۳-۱-۲- اثر سرعت اولیه بر خواص تراک

در یک بررسی آزمایشگاهی دیگر، ایشی و همکاران [۲۱] به بررسی سرعت و نحوه شکل‌گیری موج تراک در مخلوط‌های با سرعت بالا پرداخته‌اند. عدد ماخ در این آزمایش‌ها ۰/۹ الی ۱/۲ بوده است. سرعت انتشار موج تراک در یک مخلوط ساکن برابر با  $V_{CI}$  است. در این آزمایش‌ها نشان داده شده است که اثر برهم نهدی در مورد مخلوط‌های با سرعت بالا صادق است، بدین معنی که در یک مخلوط با سرعت اولیه  $U$ ، سرعت موج تراک در راستای جریان بالادست برابر با  $V_{CI}+U$  و در راستای جریان پایین دست برابر با  $V_{CI}-U$  می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که سرعت مخلوط اثر قابل ملاحظه‌ای بر سرعت نسبی تراک ندارد. با توجه به اینکه خواص دتونیشن تابع سرعت آن می‌باشد [۱]، لذا خواص تراک در مخلوط‌های دارای سرعت اولیه تغییری نخواهد کرد. بررسی تراک در مخلوط‌های با سرعت بالا در سال‌های اخیر مورد توجه واقع شده است و هنوز اطلاعات زیادی در این زمینه حاصل نشده است [۲۱].



شکل ۸- تغییرات طول تشکیل بی بعد نسبت به عدد رینولدز [۱۸].



جایی وجود ندارد لذا این ذرات نمی‌توانند نقش آغاز کننده تراک داشته باشند.

### ۲-۳-۵- اثر آشفستگی

آشفستگی طول تأخیر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اما باید توجه داشت که آشفستگی جایی تأثیرگذار است که سرعت از حدود مافوق صوت کاهش یافته باشد [۱]. به وضوح می‌توان دریافت که این نواحی دور از جت بوده و اساساً از حدود تراک پذیری بسیار دور هستند و لذا آشفستگی در این مورد اثر چندانی ندارد.

### ۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای بررسی میزان تراک‌پذیری در جریان‌های سرعت بالا بر مبنای استفاده از داده‌های تجربی موجود ارائه شد. به این منظور جنبه‌های مختلفی از مسئله که با استفاده از شرایط مورد نیاز برای وقوع موج تراک به دست می‌آیند، مورد ارزیابی قرار گرفت. این موارد عبارتند از: محدوده تراک‌پذیری مخلوط و اثر افزودنی‌های خنثی، نوع انسداد، هندسه و ابعاد، نوع آغازش شامل آغازش مستقیم و آغازش آرام، و ویژگی‌های خاص مخلوط نظیر فشار، دما و سرعت. نمونه اطلاعات موجود در هر یک از موارد فوق و نحوه استفاده از آن‌ها برای تحلیل مسأله مورد نظر ارائه شدند. این روش به طور خاص در خصوص یک جت مافوق صوت حاوی هیدروژن که در هوای

اتمسفر تخلیه می‌شود در سه حالت مختلف کارکرد اعمال گردید. در هر سه حالت، محدوده خطر که نسبت هم‌ارزی در آن بین  $0.35 < \phi < 2$  است، با فرض مخلوط خالص هیدروژن و هوا، مشخص شد که در ناحیه ۲ الی ۸ متری دهانه خروجی قرار داشت. از طرفی در روند بررسی داده‌های تجربی موجود مشخص شد که وجود بخار آب (افزودنی موجود در مخلوط) باعث کاسته شدن احتمال وقوع تراک می‌شود. بیشترین درصد بخار آب مجاز برای تراک پذیر بودن مخلوط ۳۰٪ است و کسر مولی بخار آب در ناحیه خطر بیشتر از این مقدار است. با وجود این کسر مولی بخار آب در ناحیه خطر، عملاً احتمال وقوع تراک در این ناحیه منتفی است. از سویی با توجه به نتایج تجربی، قرار گرفتن مخلوط در یک ناحیه باز و بدون انسداد، میزان احتمال وقوع تراک را در مخلوط به شدت کاهش می‌دهد. نوع آغازش در بررسی خطر وقوع تراک، احتمالاً از نوع آرام آن است. در نوع آرام، پارامتر مهم، طول تشکیل است که داده‌های موجود در این زمینه نیز مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های موجود عمدتاً مربوط به مخلوط‌های ساکن یا مخلوط‌هایی با سرعت کم هستند که با تقریب زیاد می‌توان از آن‌ها برای مخلوط‌های با سرعت بالا استفاده کرد. ویژگی‌های خاص مخلوط نظیر سرعت و فشار اولیه و تشکیل تناوبی امواج انبساطی و تراکمی و شرایطی که در آزمون‌های مربوط به داده‌های تجربی وجود ندارند نیز مورد بحث قرار گرفتند.

### مراجع

- [1] Lee, John H. S. "The Detonation Phenomenon."; Cambridge University Press, 2008.
- [2] Guirao, C. M.; Knystautas, R.; Lee, J.H. "A Summary of Hydrogen-Air Detonation Experiments."; Office of nuclear Regulatory Research.
- [3] "National Aeronautics and Space Administration (NASA)."; Office of Safety and Mission Assurance Washington, DC 20546, Safety Standard For Hydrogen And Hydrogen Systems, NSS 1740.16.
- [4] Vasil'ev, A.A.; Valishev, A.; Vasil'ev, V. A. "Detonation hazard of combustible mixtures."; Ozone, hydrogen peroxide. Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, SB RAS, Novosibirsk State University, 630090 Novosibirsk, Russia, 1997.
- [5] Dembele, S.; Zhang, J.; Wen, J.X. "Exploratory study of under-expanded sonic hydrogen jets and jet flames", Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Seminar on Fire and Explosion Hazards, Edinburgh, UK, April 2007, 23-27.
- [6] Zalosh, R. "Blast waves and fireballs generated by Hydrogen fuel tank rupture during fire exposure", Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Seminar on Fire and Explosion Hazards, Edinburgh, UK, April 2007, 23-27.
- [7] Tieszen, S. R.; Sherman, M. P.; Benedick, W. B.; Shepherd, J. E.; Knystautas, R.; Lee, J. H. S. "Detonation cell size measurements in hydrogen-air-steam mixtures."; Progress in Astronautics and Aeronautics, 1986, 106, 205-219.
- [8] Tieszen, S. R.; Stamps, D. W.; Westbrook, C. K.; Pitz, W. J. "Gaseous hydrocarbon-air detonations."; Comb. Flame, 1991, 84(3-4), 376-390.
- [9] Knystautas, R.; Lee, J. H. S.; Guirao, C. M. "The critical tube diameter for detonation failure in hydrocarbon-air mixtures."; Comb. Flame, 1982, 48, 63-83.
- [10] Kaneshige, M.; Shepherd, J. E. "Detonation database."; GALCIT technical report FM97, [http://www.galcit.caltech.edu/detn\\_db/html/db.html](http://www.galcit.caltech.edu/detn_db/html/db.html).
- [11] Hoi Dick, N.; Lee, John H.S. "Comments on explosion problems for hydrogen safety."; J. Los Prevention Proc. Indust., 2007, 21, 136-146.
- [12] Gel, B.E.; "Detonation Limits of Air Mixtures with Two-Component Gaseous Fuels."; Comb. Explo. shock waves, 2002, 38(5), 581-584.
- [13] Guirao, C. M.; Knystautas, R.; Lee, J. H. "A summary of hydrogen-air detonation experiments."; Technical report NUREG/ CR-4961, Sandia National Laboratory report SAND87-7128, 1989.
- [14] Shchelkin, K.I.; Sokolik, A.S. "The effect of chemical presentation on the initiation of the detonation wave."; Soviet. Zhurn. Phys. Chem, 1937, 10, 479-485.
- [15] Campbell, G.A.; Rutledge, P.V. "Detonation of hydrogen peroxide vapor."; Inst. Chem. Eng. Symp. Ser. 33, p. 37. Institute of Chemical Engineering, London, 1972.
- [16] Bollinger, L.E.; Fong, M.C.; Edse, R. "Experimental measurements and theoretical analysis of detonation induction distance."; Am. Rocket Soc. J., 1961, 31, 588-596.
- [17] Bollinger, L.E.; Laughrey, J.A. Edse, R., "Experimental detonation velocities and induction distances in hydrogen-nitrous oxide mixture."; Am. Rocket Soc. J., 1962, 32, 81-90.

- [18] Aizawa, K.; Yoshine, S.; Mogi, T.; Shiina, H.; Ogata, Y.; Wada, Y.; Hayashi, A. K. "Study of Detonation Initiation in Hydrogen/air Flow." ; Shock Wave, 2008, 18, 299-305.
- [19] Farinaccio, R.; Harris, P.G.; Stower, R.A. "Turbulent flow effects on DDT run-up distance for a pulse detonation", 40th AAIA/ASME/SAE/ASEE joint propulsion conference, 2004, 3917-2004.
- [20] Hirschfelder, J.O.; Curtiss, C.F.; Bird, R.B. "Molecular Theory of Gases and Liquids."; Wiley, London, 1964.
- [21] Ishii, K.; Katoka, H.; Kojima, T. "Initiation and Propagation of Detonation Waves in Combustible in High Speed Flows."; Proc. Comb. Inst., 2009, 32, 2323-2330.

Archive of SID