


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای سید یاسر محمودی لاریمی رساله ۲۴ واحدی خود را با عنوان بررسی نقش ناپایداری های هیدرودینامیکی و نفوذ مولکولی در ساختار دتونیشن های گازی با استفاده از پردازش موازی در تاریخ ۱۳۹۰/۵/۴ ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر کیومرث مظاهری	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمدرضا انصاری	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر قاسم حیدری نژاد	استاد	
استاد ناظر	دکتر فتح اله امی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر مهدی معرفت	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمد فرشچی	استاد	
استاد ناظر	دکتر رضا ابراهیمی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر مهدی معرفت	دانشیار	



آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد / رساله دکتری نگارنده در رشته مکانیک است که در سال ۱۳۹۰ در دانشکده فیزیک و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر سیرت مظاهری مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن

دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب سید یاسر محمودی لاریمی دانشجوی رشته مهندسی مکانیک مقطع دکتری تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: سید یاسر محمودی لاریمی

تاریخ و امضا:

۹۰/۰۴/۲۹

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاستهای پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه ها / رساله های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین نامه ها و دستورالعمل های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد. تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان نامه / رساله نیز منتشر می شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره های ملی، منطقه ای و بین المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

نام و نام خانوادگی

امضاء

سید محمدحسین

۹۰، ۴، ۲۹



دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

رساله دوره دکتری مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی

بررسی نقش ناپایداری‌های هیدرودینامیکی و نفوذ ملکولی در ساختار تراک گازی با استفاده از پردازش موازی

دانشجو:

سید یاسر محمودی لاریمی

استاد راهنما:

دکتر کیومرث مظاهری

اردیبهشت 1390

تقدیم به پدر و مادرم که همواره پشتوانه زندگی ام

بوده‌اند

و تقدیم به همسر مهربان و صبورم

سپاس‌گذاری

خداوند منان را شاکرم که با اعطای بهترین نعمت‌های خود، زمینه کسب علم و معرفت را برایم فراهم

نمود که اگر عنایت او نبود در این راه توفیقی کسب نمی‌گردید.

از استاد راهنمای بزرگووارم، جناب آقای دکتر کیومرث مظاهری که در طول چندین سال تحقیق و

پژوهش، از آغاز تا پایان آن مرا راهنمایی و کمک نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

همچنین از کمک‌های علمی پروفسور متی رادلسکو (Matei Radulescu) که در طی چند سال تحقیق

در طی تماس‌های متعددی که با ایشان داشتم، بنده را راهنمایی کردند، کمال تشکر را دارم.

از همه دوستانی که در این مدت همراهی نمودند مخصوصاً آقایان، دکتر مجید سبزویشانی، دکتر

حمیدرضا انبارلوئی، دکتر حسین سوری، سبحان امامی کوپائی، میثم بابا احمدی، سیروس سرمستی، علیرضا

علیپور، امیر نیازمند، محسن حلاجی، علی شمعونی‌پور، مهدی تیماجی، سعید پروار و حسین شجاعی بخاطر

کمک‌هایشان در طول تحقیق تشکر می‌نمایم.

چکیده

در این رساله ساختار تراک گازی با به‌کارگیری سینتیک یک مرحله‌ای آرنیوسی در مخلوط‌های با انرژی فعال - سازی پایین و بالا که به ترتیب، دارای ساختار سلولی منظم و نامنظم هستند، با استفاده از شبیه‌سازی دو بعدی معادلات ناویر-استوکس واکنشی مورد مطالعه قرار گرفته است. نقش ناپایداری‌های هیدرودینامیکی (ناپایداری ریچمیر-مشکوف و کلونین-هلمهولتز) و نفوذ ملکولی در ساختار تراک گازی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از حل معادلات اولر نشان می‌دهند که برای مشاهده ناپایداری‌های هیدرودینامیکی در ساختار تراک در مخلوط‌های با انرژی فعال‌سازی بالا، دقت بیشتر از 300 سلول محاسباتی در طول نیمه واکنش باید به‌کار گرفته شود. اما در تراک با ساختار منظم، دقت 50 سلول در طول نیمه واکنش ساختار فیزیکی مناسبی از جبهه تراک را نشان می‌دهد. در مقایسه با تراک‌های با ساختار منظم که بسته نسوخته‌ای در پشت جبهه مشاهده نمی‌شود، نتایج برای ساختار نامنظم حاکی از آن است که سهم بزرگی از مواد اولیه نمی‌توانند توسط شوک پیشرو محترق شوند و بصورت بسته نسوخته در پشت جبهه باقی می‌مانند. نتایج حاصل از برخورد دو نقطه سه‌گانه یا یک نقطه سه‌گانه با دیواره نشان می‌دهند که در اثر برخورد، یک جفت جریان جت پر سرعت عقب‌رو و پیشرو تشکیل می‌شود. هنگامی که تراک به جلو حرکت می‌کند، جت‌ها تحت تاثیر ناپایداری ریچمیر-مشکوف، رشد می‌کنند. مشاهده شد که امواج عرضی بطور مستقیم نقشی در مصرف بسته‌های نسوخته ندارند. اما این امواج بطور غیر مستقیم نقش مهمی در آغاز دوباره تراک در انتهای سیکل سلولی دارند. چون برخورد نقطه سه‌گانه منسوب به امواج عرضی با یکدیگر یا با دیواره منجر به ایجاد گردابه‌های بزرگ می‌شود که نقش بسیار مهمی در مصرف بسته‌های نسوخته دارند. نتایج حاصل از حل معادلات ناویر-استوکس نشان می‌دهند که در تراک‌های با ساختار نامنظم، تاثیر نفوذ در لایه‌های برشی، باعث تضعیف چرخش‌های حاصل از ناپایداری‌های هیدرودینامیکی و کاهش اختلاط توربولانسی می‌شوند. اما به‌دلیل عدم وجود ناپایداری‌های هیدرودینامیکی در تراک‌های منظم، تاثیر نفوذ ملکولی در این تراک‌ها بسیار ناچیز می‌باشد.

واژگان کلیدی: ناپایداری‌های هیدرودینامیکی، نفوذ ملکولی، امواج عرضی، بسته نسوخته.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
1.....	فصل 1 ساختار سلولی امواج تراک
1.....	1-1- مقدمه
2.....	2-1- ساختار تراک.....
4.....	3-1- انتشار تراک در طول یک سلول (چرخه سلولی).....
6.....	4-1- انواع ساختارهای نقطه سه گانه
8.....	5-1- امواج عرضی
9.....	6-1- ساختارهای منظم و نامنظم.....
10.....	7-1- نتیجه گیری.....
12.....	فصل 2 مروری بر مطالعات انجام شده بر ساختار تراک گازی.....
12.....	1-2- مقدمه
15.....	2-2- نقاط داغ
16.....	3-2- جت پر سرعت
17.....	4-2- بسته های نسوخته
20.....	5-2- ناپایداری های هیدرودینامیکی در ساختار تراک
23.....	6-2- نقش نفوذ مولکولی در ساختار تراک
25.....	7-2- اهمیت اندازه شبکه محاسباتی.....
27.....	8-2- ضرورت تحقیق.....
28.....	9-2- مروری بر مطالب رساله حاضر.....
31.....	فصل 3 معادلات حاکم و روش حل عددی.....
31.....	1-3- مقدمه
31.....	2-3- معادلات حاکم بر تراک گازی
35.....	3-3- شکل بی بعد معادلات حاکم.....

38	4-3- روش حل عددی
40	5-3- شرایط مرزی و اولیه
42	6-3- نتیجه گیری
43	فصل 4 مطالعه ساختار تراک با استفاده از حل معادله اولر و شبکه محاسباتی بسیار ریز
43	1-4- مقدمه
44	2-4- ساختار تراک در انرژی فعالسازی بالا (ساختار نامنظم)
48	3-4- اثر دقت شبیه سازی بر ساختار تراک در مخلوط با انرژی فعالسازی بالا (ساختار نامنظم)
49	4-4- ساختار تراک در انرژی فعالسازی کم (ساختار منظم)
51	5-4- اثر دقت شبیه سازی بر ساختار تراک در مخلوط با انرژی فعال سازی کم (ساختار منظم)
52	6-4- طبیعت لایه برشی در تراک
56	7-4- نتیجه گیری
58	فصل 5 برخورد نقاط سه گانه با دیواره ها در انتهای نیم چرخه اول و دوم و شکل گیری بسته های نسوخته
58	1-5- مقدمه
60	2-5- برخورد نقطه سه گانه با دیواره در انتهای نیم چرخه سلولی اول، در تراک با ساختار منظم
65	3-5- برخورد نقطه سه گانه با دیواره در انتهای نیم چرخه سلولی دوم، در تراک با ساختار منظم
68	4-5- برخورد نقطه سه گانه با دیواره در انتهای نیم چرخه سلولی اول، در تراک با ساختار نامنظم
73	5-5- برخورد نقطه سه گانه با دیواره در انتهای نیم چرخه سلولی دوم، در تراک با ساختار نامنظم
79	6-5- نتیجه گیری
81	فصل 6 نقش ناپایداری های هیدرودینامیکی و امواج عرضی در ساختار تراک
81	1-6- مقدمه
83	2-6- ساختار تراک نامنظم
85	3-6- ناپایداری ریچمیر-مشکوف و مصرف بسته های نسوخته
88	4-6- شکل گیری ناپایداری ریچمیر-مشکوف
91	5-6- ریچمیر-مشکوف در نیمه دوم سیکل سلولی
93	6-6- تولید گردابه

99	7-6- ناپایداری هیدرودینامیکی در تراک با ساختار منظم
101	8-6- نقش امواج عرضی
103	9-6- نتیجه گیری
104	فصل 7 نفوذ ملکولی در ساختار تراک
104	1-7- مقدمه
106	2-7- مقیاس طولی و زمانی نفوذ در لایه برشی
108	3-7- نقش پدیده نفوذ در تراک با ساختار نامنظم
115	4-7- اثر اندازه شبکه بر نقش نفوذ در تراک با ساختار نامنظم
118	5-7- نفوذ در تراک با ساختار منظم
120	6-7- اثر اندازه شبکه بر نقش نفوذ در تراک با ساختار منظم
121	7-7- نتیجه گیری
122	فصل 8 نتیجه گیری و پیشنهادات
122	1-8- مقدمه
123	2-8- نتیجه گیری نهایی
125	3-8- نوآوریهای این تحقیق
127	4-8- پیشنهادات برای ادامه کار
130	مراجع
135	واژه نامه انگلیسی به فارسی
137	پیوست : پردازش موازی

فهرست شکل ها

صفحه

عنوان

- شکل (1-1): الف) سایه نگار از جبهه تراک، انتشار از سمت چپ به راست در یک کانال برای مخلوط $2H_2-O_2-17Ar$ و فشار اولیه 20kpa ب) ساختار سلولی تشکیل شده روی فویل دوده اندود [4]. _____ 2
- شکل (2-1): طرحواره جبهه تراک برای انتشار از چپ به راست [5]. _____ 3
- شکل (3-1): طرحواره ای از انتشار تراک درون یک سلول. خط چین بیانگر مسیر حرکت نقاط سه گانه میباشد. جبهه شوک در دو موقعیت نشان داده شده است. در نیم چرخه اول از نقطه A تا BC ماخ استم بعنوان شوک پیشرو می باشد. در نیم چرخه دوم از BC تا D موج برخوردی بعنوان شوک پیشرو می باشد. M: ماخ استم، I: موج برخوردی و S: لایه برشی. _____ 5
- شکل (4-1): طرحواره ساختار تراک با یک و دو نقطه سه گانه، الف) ساختار ماخ تکی ب) ساختار ماخ دوتایی [12]. _____ 7
- شکل (5-1): الف) ساختار نامنظم تراک در مخلوط گازی $C_3H_8 5O_2 9N_2$ در فشار اولیه 20 kPa ب) ساختار منظم تراک در مخلوط گازی $2H_2-O_2-17Ar$ و فشار اولیه 20 kPa [4]. _____ 10
- شکل (1-2): شکل تجربی از جبهه تراک [21]. _____ 21
- شکل (1-4): ساختار تراک در مخلوط با انرژی فعال سازی 20 و دقت 600 سلول در طول نیمه واکنش. _____ 47
- شکل (3-4): تاثیر دقت شبیه سازی در کانتور چگالی ساختار تراک در مخلوط با انرژی فعالسازی 20. _____ 49
- شکل (3-4): ساختار تراک منظم در مخلوط با انرژی فعالسازی 10 و دقت 600 سلول در طول نیمه واکنش. _____ 50
- شکل (4-4): تاثیر دقت شبیهسازی در کانتور چگالی ساختار تراک در مخلوط با انرژی فعالسازی 10. _____ 52
- شکل (1-5): ساختار سلولی تراک بر اساس تاریخچه فشار بیشینه در مخلوط با $Ea/RT_0=10$ ، $Q/RT_0=50$ و $\gamma=1.2$ 61
- شکل (2-5): ساختار تراک در مراحل برخورد نقطه سه گانه با دیواره در انتهای نیم چرخه اول در مخلوط با انرژی فعال سازی 10. شکل های سمت چپ: کانتورهای فشار، سمت راست: کانتورهای چگالی. _____ 63
- شکل (3-5): ساختار تراک در مراحل برخورد نقطه سه گانه با دیواره در انتهای نیم چرخه دوم در مخلوط با انرژی فعال سازی 10. شکل های سمت چپ: کانتورهای فشار، سمت راست: کانتورهای چگالی. _____ 67
- شکل (4-5): ساختار تراک در مراحل برخورد نقطه سه گانه با دیواره در انتهای نیم چرخه اول در مخلوط با انرژی فعال سازی 20. شکل های سمت چپ: کانتورهای فشار، سمت راست: کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش. _____ 73

شکل (5-5): ساختار تراک در مراحل برخورد نقطه سه گانه با دیواره در انتهای نیم چرخه دوم در مخلوط با انرژی فعال سازی 20. شکل های سمت چپ: کانتورهای فشار، سمت راست: کانتورهای پارامتر پیشرفت واکنش. _____ 79

شکل (1-6): ساختار تراک درون یک کانال با دو نقطه سه گانه اصلی در مخلوط با $E_a/RT_0=20$, $Q/RT_0=50$ و $\gamma=1.2$. 84

شکل (2-6): تاریخچه فشار بیشینه تراک در مخلوط با $E_a/RT_0=20$ و $Q/RT_0=50$ و $\gamma=1.2$. B_1 , B_2 , C_1 و C_2 مسیر حرکت نقاط سه گانه ثانویه و A_1 و A_2 مسیر حرکت نقاط سه گانه اصلی میباشد. hj و xy مسیر شوک های انعکاسی نشان داده شده در شکل (1-6) می باشند. _____ 85

شکل (3-6): ساختار تراک قبل و در لحظه برخورد دو نقطه سه گانه در مخلوط با $E_a/RT_0=20$ و $Q/RT_0=50$ و $\gamma=1.2$. الف) تا د) بیانگر تراک ساختار را قبل از برخورد دو نقطه سه گانه هستند. ه) و و) لحظه برخورد دو نقطه سه گانه را نشان می دهند. شکل های سمت راست، کانتور فشار و شکل های سمت چپ پارامتر پیشرفت واکنش را نشان می دهند. _____ 87

شکل (4-6): ساختار تراک بعد از برخورد دو نقطه سه گانه بیانگر رشد ناپایداری RM در مخلوط با $E_a/RT_0=20$ و $Q/RT_0=50$ و $\gamma=1.2$. شکل های سمت راست، کانتور فشار و شکل های سمت چپ پارامتر پیشرفت واکنش را نشان می دهند. _____ 91

شکل (5-6): ساختار تراک در نیمه دوم سیکل سلولی بعد از برخورد دو نقطه سه گانه در مخلوط با $E_a/RT_0=20$ و $Q/RT_0=50$ و $\gamma=1.2$. شکل های سمت راست، کانتور فشار و شکل های سمت چپ پارامتر پیشرفت واکنش را نشان می دهند. _____ 92

شکل (10-6): تاریخچه فشار بیشینه تراک در مخلوط با $E_a/RT_0=10$ و $Q/RT_0=50$ و $\gamma=1.2$. _____ 99

شکل (11-6): پارامتر پیشرفت واکنش بیانگر رشد و شکل گیری ناپایداری ریچمیر-مشکوف و تشکیل ناحیه نسوخته سنگ مانند ساختار تراک در مخلوط با $E_a/RT_0=10$, $Q/RT_0=50$ و $\gamma=1.2$. _____ 101

شکل (1-7) کانتور چگالی ساختار تراک در مخلوط با مشخصات $\gamma=1.2$, $Q/RT_0=50$, $E_a/RT_0=20$ و $N=300\text{cells/hr}$. _____ 109

شکل (2-7): کانتور پارامتر پیشرفت واکنش ساختار تراک در مخلوط با مشخصات $\gamma=1.2$, $Q/RT_0=50$, $E_a/RT_0=20$ و $N=300\text{cells/hr}$. _____ 113

شکل (3-7): کانتور فشار ساختار تراک برای مخلوط با مشخصات $\gamma=1.2$, $Q/RT_0=50$, $E_a/RT_0=20$ و $N=300\text{cells/hr}$. _____ 114

شکل (4-7): کانتور پارامتر پیشرفت واکنش ساختار تراک برای مخلوط با مشخصات $E_a/RT_0=20$, $Q/RT_0=50$, $\gamma=1.2$ و $N=50\text{cells/hr}$ 115

شکل (5-7): کانتور پارامتر پیشرفت واکنش ساختار تراک برای مخلوط با مشخصات $E_a/RT_0=20$, $Q/RT_0=50$, $\gamma=1.2$ و $N=600\text{cells/hr}$ 117

شکل (6-7): کانتور پارامتر پیشرفت واکنش ساختار تراک برای مخلوط با مشخصات $E_a/RT_0=20$, $Q/RT_0=50$, $\gamma=1.2$ و $N=1000\text{cells/hr}$ 117

شکل (7-7): کانتور چگالی ساختار تراک برای مخلوط با مشخصات $E_a/RT_0=10$, $Q/RT_0=50$, $\gamma=1.2$ و $N=300\text{cells/hr}$ 119

شکل (8-7): کانتور پارامتر پیشرفت واکنش ساختار تراک برای مخلوط با مشخصات $E_a/RT_0=10$, $Q/RT_0=50$, $\gamma=1.2$ و $N=600\text{cells/hr}$ 120

شکل (9-7): کانتور چگالی ساختار تراک برای مخلوط با مشخصات $E_a/RT_0=10$, $Q/RT_0=50$, $\gamma=1.2$ و $N=50\text{cells/hr}$ 121

علائم

C	سرعت صوت
D	ضریب نفوذ گونه
E	انرژی کل
Ea	انرژی فعال‌سازی
F	بردار شار غیر لزج در جهت X
G	بردار شار غیر لزج در جهت Y
I	موج برخوردی
J	بردار نفوذ گونه‌ها
k	ثابت پیش‌فاکتور مدل یک مرحله‌ای
K	ضریب هدایت حرارتی
$l_{1/2}$	طول نیمه واکنش
M	ماخ استم
n	ضریب ثابت در رابطه (7-3)
p	فشار
pr	عدد پراتل
Q	انرژی آزاد شده بر واحد جرم مخلوط
q	شار حرارتی بی‌بعد
R	ثابت جهانی گازها
Re	عدد رینولدز
S	جمله چشمه، قدرت موج
Sc	عدد اشمیت
T	دما
T_s	دمای پشت موج ضربه‌ای در ساختار ZND
t	زمان
u	مولفه سرعت طولی
U	بردار متغیرهای بقایی
v	مولفه سرعت عرضی
W	نرخ واکنش

x مختصات طولی

y مختصات عرضی

واژه‌های یونانی

r چگالی

t تنش برشی

μ لزجت

β پارامتر پیشرفت واکنش

γ نسبت گرماهای ویژه

l اندازه سلول مشخصه

زیرنویس‌ها

0 شرایط اولیه

d دیفیوژن یا نفوذ

t توربولانس

بالانویس‌ها

- متوسط

~ فیلتر گیری جرمی

+ کمیت‌های بی‌بعد

علائم اختصاری

CJ	Chapman-Jouguet
KH	Kelvin-Helmholtz
LES	Large eddy simulation
RM	Richtmyer-Meshkov
SGS	Subgrid scale
ZND	Zeldovich-von Neumann-Doring

فصل 1 ساختار سلولی امواج تراک

1-1- مقدمه

در حالت کلی یک مخلوط گازی قابل احتراق به دو گونه شعله آرام¹ و تراک² می‌تواند بسوزد. گونه اول که شعله آرام می‌باشد، همان سوختن معمولی است که در آن سرعت موج احتراقی زیر صوت است. در شعله آرام، گرمای ایجاد شده و رادیکالهای حاصل از احتراق می‌توانند به قسمت مواد نسوخته نفوذ کنند. سرعت این امواج از مرتبه دهم متر بر ثانیه بوده و تغییر فشار قبل و بعد از موج ناچیز می‌باشد. گونه دیگر، موج تراک است که در آن سرعت موج احتراقی بسیار بیشتر از سرعت صوت و در حدود 2000 تا 3000 متر بر ثانیه می‌باشد. این امواج باعث افزایش 15 تا 20 برابر فشار مخلوط اولیه (در شرایط محیط) می‌گردند [1-2].

بطور کلی تراک شامل یک جبهه تشکیل شده از چند موج شوک است. امواج شوک با گذشتن از یک محیط قابل احتراق، باعث افزایش فشار و دما در مخلوط نسوخته شده و آن را می‌سوزانند. در تراک، انرژی ناشی از احتراق، امواج ضربه‌ای را تقویت کرده و مانع از تضعیف و میرا شدن آنها می‌گردد. قدرت موج

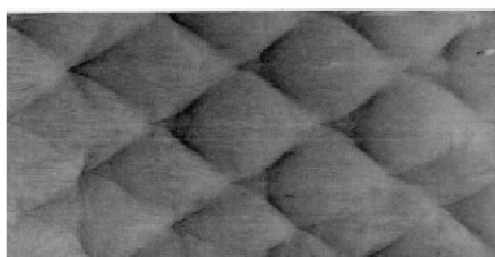
¹ Laminar deflagration

² Detonation

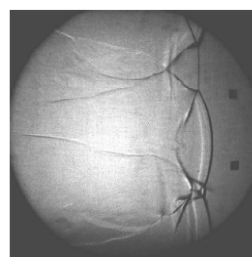
ضربه‌ای در تراک به قدری است که افزایش دمای پشت موج ضربه‌ای، موجب واکنش احتراقی خود بخودی می‌گردد. مکانیزم این احتراق نیز به گونه‌ای است که می‌تواند موج ضربه‌ای را تقویت کند. بعبارتی برای خوداتکا¹ بودن تراک، نرخ آزاد شدن انرژی توسط واکنش شیمیایی باید به اندازه‌ای باشد که بر نرخ خنک شدن مخلوط گازی توسط امواج انبساطی و یا اثرات دیوار کانال غلبه کند. [3].

2-1- ساختار تراک

نتایج تجربی نشان داده‌اند که تراک یک پدیده بشدت سه بعدی و وابسته به زمان است [4]. اگر تراک درون یک کانال یا لوله که دیواره‌های آن دوده اندود شده‌اند تشکیل شده باشد، مسیر انتشار موج تراک بر روی ورق دوده‌اندود به شکل پولک ماهی می‌باشد. شکل (1-1- الف) سایه‌نگار لیزری از جبهه تراک را نشان می‌دهد [4]. در شکل (1-1- ب) اثرات برجای مانده عبور تراک بر روی فویل دوده‌اندود نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

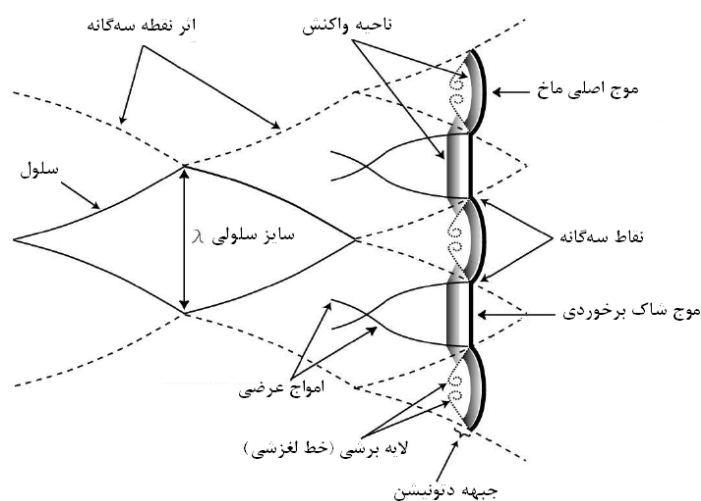
شکل (1-1): الف) سایه‌نگار از جبهه تراک، انتشار از سمت چپ به راست در یک کانال برای مخلوط $2H_2-O_2-17Ar$ و فشار اولیه 20kpa ب) ساختار سلولی تشکیل شده روی فویل دوده‌اندود [4].

شکل (2-1) طرحواره‌ای از ساختار سلولی جبهه تراک را نشان می‌دهد. جبهه تراک شامل سه موج ضربه‌ای متمایز است. یک موج ضربه‌ای قوی که ماخ استم² نام دارد و در جهت انتشار تراک حرکت می‌کند. با توجه به قوی بودن این موج، طول ناحیه واکنش مربوط به ماخ استم نسبت به دو شوک دیگر کوچکتر بوده و نرخ واکنش شیمیایی در آن بیشتر است. موج دوم که یک موج ضربه‌ای ضعیف‌تر است، موج ضربه‌ای

¹ Self-sustained

² Mach Stem

برخوردی¹ نام دارد. موج ضربه‌ای برخوردی مشابه ماخ استم، در جهت انتشار تراک حرکت می‌کند. این دو موج ضربه‌ای جبهه شوک پیشرو در تراک را تشکیل می‌دهند. موج سوم که یک موج ضعیف‌تر نسبت به دو موج قبلی است، موج ضربه‌ای عرضی² نامیده می‌شود. موج عرضی برخلاف دو موج ضربه‌ای ماخ استم و برخوردی، در جهت عمود بر انتشار تراک حرکت می‌کند. این سه موج ضربه‌ای در یک نقطه که نقطه سه‌گانه³ نامیده می‌شود با یکدیگر برخورد می‌کنند. در مجاورت این نقطه، یک ناحیه بسیار کوچک با فشار و دمای بسیار بالا وجود دارد. اندرکنش این امواج باعث بوجود آمدن یک لایه برشی⁴ می‌گردد.



شکل (2-1): طرحواره جبهه تراک برای انتشار از چپ به راست [5].

این خط مرزی از نقطه سه‌گانه شروع می‌شود و ذرات مخلوط گازی را که از موج برخوردی عبور می‌کنند از ذراتی که از ماخ استم می‌گذرند جدا می‌نماید. درحقیقت ذرات سیال در دو طرف لایه برشی دارای فشار و جهت جریان نسبتاً یکسانی می‌باشند ولی چگالی و سایر خواص ترمو-فیزیکی آنها متفاوت می‌باشد. هرچند تاکنون بطور واضح سازوکار ایجاد ساختار سلولی روی فویل دوده‌اندود روشن نشده است، اما نظر اغلب محققین این است که اثر نیروی برشی قوی در نقطه سه‌گانه است که ساختار سلولی تراک را ایجاد

¹ Incident Shock

² Transverse Wave

³ Triple Point

⁴ Shear Layer

می‌کند. هریک از سلولهای تشکیل شده روی فویل، سلول مشخصه¹ و پهنای عرضی سلولهای تشکیل شده، سایز یا اندازه سلولی² نامیده می‌شود [2, 4, 6].

1-3- انتشار تراک در طول یک سلول (چرخه سلولی)

در طول انتشار تراک، امواج عرضی با هم برخورد می‌کنند و جبهه شوک پیشرو در طول یک سلول بطور متناوب از ماخ استم به موج برخوردی تغییر می‌یابد.³ به منظور بررسی انتشار تراک در طول یک سلول (که در اینجا به عنوان یک چرخه سلولی تعریف می‌شود)، طرحواره‌ای از ساختار سلولی در شکل (1-3) نشان داده شده است. جهت انتشار تراک از چپ به راست می‌باشد. در نقطه شروع شکل گیری یک سلول⁴ (نقطه A) دو موج عرضی به هم برخورد می‌کنند. پس از برخورد، امواج عرضی از هم دور می‌شوند. در اثر برخورد دو نقطه سه‌گانه، ناحیه‌ای با فشار و دمای بسیار بالا تشکیل می‌شود و قسمتی از جبهه شوک پیشرو نسبت به قسمت‌های دیگر آن پیشی می‌گیرد [4]. این ناحیه فشار بالا، بصورت جریان‌های جت پرسرعت مواد کاملاً داغ و سوخته درون خود را به سمت عقب و جلو منتشر می‌کنند. برخورد این جت‌های پرسرعت با جبهه شوک ممکن است منجر به ایجاد شکستگی در جبهه شوک پیشرو گردد [7]. بر این اساس، شوک پیشرو جبهه در این زمان، موج قوی ماخ استم می‌باشد که با موج برخوردی از سلول همسایه در نقطه سه‌گانه با هم تلاقی دارند. در نقطه B و C امواج عرضی با امواج عرضی از سلول همسایه برخورد می‌کنند. هنگامی که جبهه رو به جلو منتشر می‌شود، در اثر انبساط گازهای پشت جبهه، قدرت شوک کاهش می‌یابد تا زمانی که موج عرضی با نقطه سه‌گانه دیگر در نقطه B برخورد کنند [4]. پس از برخورد، این امواج به سمت هم حرکت می‌کنند تا دوباره در نقطه D با هم برخورد کنند. بعلاوه کم شدن قدرت شوک در اثر انبساط گاز، جبهه شوک پیشرو در فاصله BC تا نقطه D یک موج ضعیف برخوردی می‌باشد که با ماخ استم از سلول همسایه

¹ Characteristic Cell

² Cell Size

³ Alternate

⁴ Cell apex