

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه علم و صنعت ایران

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی هوافضا- آیرودینامیک

عنوان

بررسی رفتار احتراقی ذرات ریز جامد

توسط

الیاس نعمتی

استاد راهنما

دکتر مهدی بیدآبادی

استاد مشاور

مهندس محمد صدیقی

دیماه ۱۳۸۳

۱	فصل ۱ احتراق تراکمی و انبساطی
۱-۱	مقدمه
۲-۱	احتراق انبساطی و احتراق تراکمی
۳-۱	موجهای احتراق تراکمی در گازها
۴-۱	ساختار یک بعدی موجهای احتراق تراکمی
۵-۱	ساختار سه بعدی احتراق تراکمی
۶-۱	آغاز احتراق تراکمی
۷-۱	گذار از احتراق انبساطی به احتراق تراکمی
۸-۱	انتشار و انتقال امواج احتراق تراکمی
۹-۱	بارهای ناشی از احتراق تراکمی
۱۰-۱	احتراق تراکمی در محیطهای چگالیده
۱۱-۱	DDT و اندازه‌گیری‌های ضربه‌ای
۱۲-۱	آغاز موج شوک احتراق تراکمی ضربه‌ای در کانالی که قسمتی از آن با ذرات آلومینیوم معلق در گاز پر شده است
۱۲-۱-۱	موج شوک ناگهانی تقویت شده
۱۲-۱-۲	موجهای شوک ناگهانی واقعی
۴۳	فصل ۲ تجهیزات آزمایشگاهی
۱-۲	مقدمه
۲-۲	معرفی دستگاههای مختلف اندازه‌گیری غلظت
۲-۲-۱	روش تعلیق الکترواستاتیکی (EPS)
۲-۲-۲	روش ضربه
۲-۲-۳	روش سقوط آزاد
۲-۲-۴	روش بستر سیالی شده
۳-۲	تجهیزات آزمایشگاهی احتراق ذرات ریز فلزی

۴۷	..... اندازه‌گیری غلظت.....	۱-۳-۲
۴۸	..... دستگاه لیزر.....	۱-۱-۳-۲
۴۹	..... سیستم اخذ، کنترل و پردازش اطلاعات.....	۲-۱-۳-۲
۴۹	..... سیستم ایجاد شعله.....	۲-۳-۲
۵۰	..... سیستم تهویه.....	۳-۳-۲
۵۱	..... تجهیزات تصویربرداری.....	۴-۳-۲

فصل ۳ ساختار شعله و رفتار احتراقی ذرات جامد

۵۲		
۵۳	..... مقدمه.....	۱-۳
۵۶	..... احتراق ابر ذرات جامد غیر فلزی.....	۲-۳
۵۹	..... احتراق ابر ذرات جامد فلزی.....	۳-۳
۵۹	..... احتراق ذرات منیزیم.....	۱-۳-۳
۶۲	..... احتراق منیزیم در جاذبه نرمال.....	۱-۱-۳-۳
۶۵	..... احتراق منیزیم در جاذبه ناچیز.....	۲-۱-۳-۳
۶۷	..... پیشانی شعله منیزیم.....	۳-۱-۳-۳
۶۹	..... ساختار پیشانی شعله.....	۴-۱-۳-۳
۷۱	..... رفتار احتراقی ذرات منیزیم.....	۵-۱-۳-۳
۷۶	..... احتراق مجدد ذرات منیزیم.....	۶-۱-۳-۳
۷۷	..... ساختار شعله منیزیم.....	۷-۱-۳-۳
۷۹	..... حرکت ذرات در احتراق منیزیم.....	۸-۱-۳-۳
۸۱	..... احتراق ذرات آلومینیوم.....	۲-۳-۳
۸۳	..... بررسی احتراق آلومینیوم در دو حالت جاذبه نرمال و جاذبه ناچیز.....	۱-۲-۳-۳
ïì	.....	۲-۲-۳-۳
ïî	.....	ê-ê-ê
ïï	.....	è-ê-ê-ê
ïð	.....	é-ê-ê-ê
ïç	.....	ê-ê-ê-ê

فصل ۴ ساختارشناسی تجربی شعله ذرات آلومینیوم

۹۴		
۹۵	..... مقدمه.....	۱-۴
۹۵	..... ساختار شعله ذرات آلومینیوم.....	۲-۴

فهرست مطالب (ادامه)

- ۳-۴. کالیبره کردن دستگاه آزمایش..... ۱۰۲
- ۴-۴. زمان احتراق ابر ذرات آلومینیوم..... ۱۰۵
- ۵-۴. سرعت احتراق ابر ذرات آلومینیوم..... ۱۰۸
- ۶-۴. رفتار احتراقی ابر ذرات آلومینیوم در شعله پایدار..... ۱۰۸
- ۱-۶-۴. قطر ذرات و تاثیر آن بر رفتار احتراقی آلومینیوم..... ۱۱۱
- ۲-۶-۴. غلظت و تاثیر آن بر رفتار احتراقی آلومینیوم..... ۱۱۳
- ۳-۶-۴. اکسیدایزر و تاثیر آن بر رفتار احتراقی آلومینیوم..... ۱۱۴
- ۴-۶-۴. گاز بستر و تاثیر آن بر رفتار احتراقی آلومینیوم..... ۱۱۶
- ۷-۴. بحث و نتیجه گیری..... ۱۱۷

۱۲۰

فهرست منابع و مراجع

۱	فصل ۱ احتراق تراکمی و انبساطی
شکل ۱-۱	درصد جرمی اتم اکسیژن طی شکل گیری یک احتراق تراکمی مخلوط هیدروژن-اکسیژن در فشار ابتدایی
۲ بار	..... ۴
شکل ۲-۱	پروفیل سرعت در خلال شکل گیری احتراق تراکمی مخلوط هیدروژن-اکسیژن در فشار آغازین ۲ بار ۵
شکل ۳-۱	مدل نمایشی یک موج ضربه ای ایستاده ۶
شکل ۴-۱	مکان هندسی نقاط دست یافتنی در فرایندهای همدم، آدیاباتیک و موج ضربه ای (هوگونیوت). شیب خط ربلی که حالت‌های آغازی و پایانی را به یکدیگر متصل می کند، اندازه سرعت موج را نمایش می دهد. ۷
شکل ۵-۱	منحنی هوگونیوت برای گذار همراه با واکنش شیمیایی گرمازا ۸
شکل ۶-۱	نمایش یک ناحیه واکنش محدود با یک دسته از منحنی های هوگونیوت که مراحل پیشرفت واکنش را نشان می دهند ۱۰
شکل ۷-۱	ساختار ZND و الگوی یک ساختار واقعی جبهه احتراق تراکمی. مقیاس طول الگوی سلولی، اندازه سلول (λ) در شکل نشان داده شده است ۱۳
شکل ۸-۱	الف: مدل نمایش مبدا تا پایداریهای اریب در یک موج احتراق تراکمی. ب: خواصی که بر جبهه موج عمود هستند ۱۵
شکل ۹-۱	نمایش بازتاب ضربه، الف: عمود بر صفحه، ب: با زاویه نسبت به صفحه، ج: تشکیل یک سد ماخ ۱۶
شکل ۱۰-۱	نمایش ساختار یک احتراق تراکمی سلولی به کمک ردگذاری روی سطح دوده اندود ۱۷
شکل ۱۱-۱	اندازه سلول بر حسب غلظت سوخت برای استیلن، اتیلن و هیدروژن در هوا ۱۸
شکل ۱۲-۱	اندازه سلول بر حسب غلظت سوخت برای اتیلن، پروپان و متان در هوا ۱۸
شکل ۱۳-۱	شتاب شعله در لوله ۲۲
شکل ۱۴-۱	سرعت شعله در لوله به قطر ۱/۴ متر با متان-هوا ۲۳
شکل ۱۵-۱	تغییر شکل لوله به خاطر گذار به احتراق تراکمی ۲۴
شکل ۱۶-۱	فاصله رسیدن به احتراق تراکمی بر حسب قطر لوله ۲۵
شکل ۱۷-۱	فاصله رسیدن برای اتیلن - هوا و پروپان - هوا در لوله به قطر ۵۰ میلیمتر ۲۵
شکل ۱۸-۱	پروفیل فشار- زمان در نزدیکی مکانی که گذار به احتراق تراکمی رخ می دهد ۲۷
شکل ۱۹-۱	شرایط لازم برای انتشار موفق احتراق تراکمی صفحه ای در لوله ها و کانالها ۲۸
شکل ۲۰-۱	شرایط لازم برای انتقال موفق احتراق تراکمی صفحه ای به موج احتراق تراکمی کروی سه بعدی نامحدود ۲۹
شکل ۲۱-۱	محدودیت برای انتشار امواج احتراق تراکمی در توده سوخت- هوای نامحدود ۲۹
شکل ۲۲-۱	پروفیل فشار- فاصله برای انتشار احتراق تراکمی در لوله ای با یک انتهای بسته ۳۱
شکل ۲۳-۱	زمان گذار در DDT برای مخلول $C_3H_8 + 5O_2 + xN_2$ در لوله ای با قطر ۳۸ میلیمتر ۳۳
شکل ۲۴-۱	روش پاندول بالستیکی برای اندازه گیری ضربه در تیوب احتراق تراکمی یک سر باز ۳۴
شکل ۲۵-۱	فشار در دیواره تراست ۳۴
شکل ۲۶-۱	دیاگرام X-T داخل تیوب ۳۵

چکیده

شناخت ساختار و رفتار احتراقی شعله آرام و پایدار ابر ذرات آلومینیوم و تحلیل میکروسکوپی آن از تازه‌ترین بحث‌های احتراق می‌باشد. این پایان‌نامه نخست به مطالعه احتراق انبساطی و تراکمی پرداخته و عوامل موثر در ایجاد احتراق تراکمی و گذار از احتراق انبساطی به تراکمی مورد شناسایی قرار می‌دهد. جهت انجام آزمایشهای تجربی، دستگاه مورد نظر معرفی و نحوه کالیبره کردن پارامتر اساسی غلظت تشریح شده است. احتراق ذرات مختلف جامد فلزی و غیر فلزی مطالعه و بررسی گردیده و سعی شده است که تمام حالت‌های رفتار احتراقی ابر ذرات پوشش داده شود. در مطالعه تجربی ابر ذرات آلومینیوم، زمان و سرعت احتراق اندازه‌گیری شده و تاثیر قطر ذرات، غلظت، درصد اکسیدایزر و نوع گاز بستر بر تجمع ذرات، شدت احتراق، رژیم احتراقی و حفره‌های احتراق نیافته مورد بررسی قرار گرفته است. در مورد ساختار شعله پایدار ابر ذرات آلومینیوم و حفره‌های احتراق نیافته، نظریات جدیدی مطرح شده است.

فصل اول

احتراق تراکمی و انبساطی

۱-۱. مقدمه

سرعت یک واکنش شیمیایی (که مثلاً با تعداد مولکول‌هایی که در واحد زمان واکنش می‌دهند، اندازه‌گیری می‌شود) به دمای مخلوط گازهایی که واکنش در آنها صورت می‌گیرد، بستگی دارد و با افزایش دما، افزایش می‌یابد.

احتراق یک مخلوط گازی لزوماً همراه با حرکت گاز است. بنابراین فرآیند احتراق نه تنها یک پدیده شیمیایی، بلکه یک پدیده مربوط به دینامیک گازها هم می‌باشد. به طور کلی، طبیعت فرآیند احتراق باید با حل همزمان معادلات مربوط به سینتیک شیمیایی واکنش و معادلات دینامیک گاز تعیین شود.

ناحیه گاز سوخته (یعنی ناحیه‌ای که در آن واکنش انجام‌شده و گاز مخلوطی است از محصولات احتراق) از گازی که هنوز احتراق در آن شروع نشده، در حالی که واکنش در حال پیشرفت است، به وسیله یک لایه انتقالی جدا شده است (ناحیه احتراق یا شعله). با گذشت زمان، این لایه با سرعتی که می‌توان آن را سرعت انتشار احتراق در گاز نامید، به طرف جلو حرکت می‌کند. اندازه این سرعت بستگی به مقدار حرارتی دارد که از ناحیه احتراق به مخلوط گازی سرد انتقال می‌یابد. مکانیزم اصلی انتقال حرارت، رسانش معمولی است.

در حالت احتراق آرام که در بالا توصیف شد، انتشار درون گاز نتیجه گرمایش است که آن هم به خاطر انتقال مستقیم حرارت از گاز در حال سوختن به بخشی است که هنوز نسوخته. یک مکانیزم کاملاً متفاوت دیگر هم برای انتشار احتراق ممکن است که شامل امواج ضربه‌ای می‌باشد. موج ضربه‌ای، در هنگام عبور از میان گاز، آن را گرم می‌کند. دمای گاز پشت شعله بیشتر از دمای آن در جلوی شعله است. اگر موج ضربه‌ای به اندازه کافی قوی باشد، افزایش دمایی که ایجاد می‌کند، می‌تواند برای شروع احتراق کافی باشد. آن گاه موج ضربه‌ای در حین حرکت خود، مخلوط گازی را

محترق می کند. یعنی احتراق با سرعت موج ضربه‌ای و بسیار سریع تر از احتراق معمولی منتشر می شود. این مکانیزم انتشار احتراق، احتراق تراکمی خوانده می شود.

هنگامی که موج ضربه‌ای از نقطه‌ای درون گاز عبور می کند، واکنش در آن نقطه شروع می شود و تا زمانی که کل گاز بسوزد، یعنی برای یک مدت زمانی که مشخصه واکنش مربوطه است، ادامه می یابد. بنابراین واضح است که موج ضربه‌ای به همراه لایه‌ای حرکت می کند که در آن لایه احتراق انجام می شود و ضخامت این لایه با سرعت انتشار موج ضرب در زمان برابر است. این مهم است که ضخامت این لایه به ابعاد اجسام موجود در مسأله بستگی ندارد. هنگامی که ابعاد مشخصه مسأله به اندازه کافی بزرگ باشد، می توانیم موج ضربه‌ای را به همراه ناحیه احتراقی که آن را دنبال می کند، به عنوان یک سطح ناپیوستگی در نظر بگیریم که بخش سوخته و بخش نسوخته گازها را از هم جدا می کند. چنین سطحی را موج احتراق تراکمی (Detonation) می نامیم.

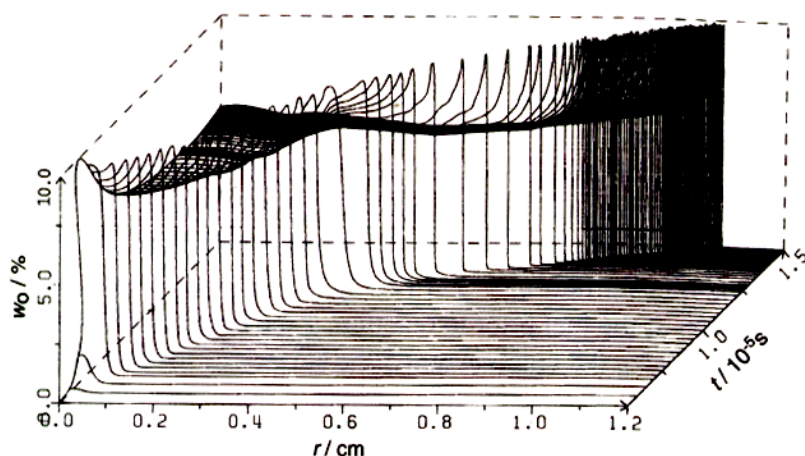
احتراق تراکمی ذرات هنگامی حاصل می شود که یک ماده قابل احتراق به ذرات بسیار ریز تقسیم شود و سپس مانند یک ابر در یک اتمسفر که به مقدار کافی شامل اکسیژن باشد، پراکنده گردد. اکسیژن به عنوان اکسید کننده برای شروع و ادامه واکنش احتراق لازم است. همچنین به یک منبع مشتعل کننده با میزان انرژی کافی نیاز است.

احتراقهای تراکمی ذرات، شباهت مشخصی به احتراقهای تراکمی گازی دارند. به هر حال، تفاوت های قابل ملاحظه‌ای هم وجود دارند که مطالعه احتراق تراکمی ذرات را بی نهایت مشکل می سازند. برای وقوع یک احتراق تراکمی ذرات، میزانی از توربولانس در اتمسفر و ابر ذرات باید وجود داشته باشد. علت این است که توربولانس عاملی برای معلق نگه داشتن ذرات در ابر و جلوگیری از ته نشینی آنهاست.

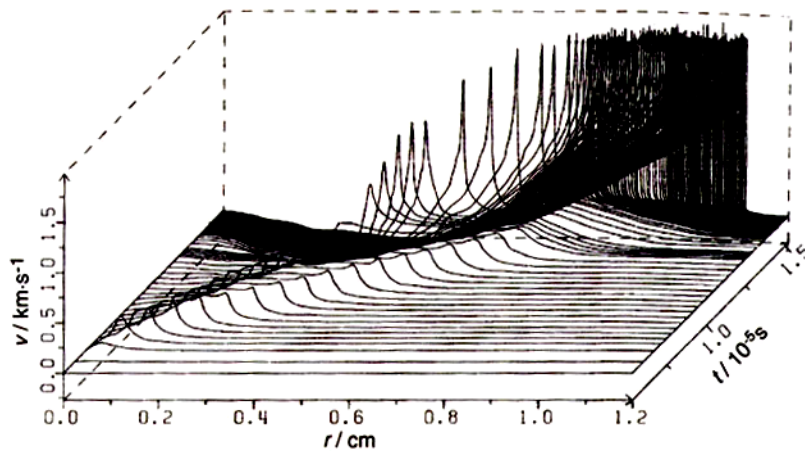
۲-۱. احتراق انبساطی و احتراق تراکمی

احتراق انبساطی (Deflagration) با واکنش‌های شیمیایی بوجود می‌آید که یک گرادیان و پروسه‌های انتقال مولکولی را تقویت میکند که گرادیان را منتشر می‌کنند. احتراق تراکمی توسط یک موج فشاری بوجود می‌آید که با واکنش شیمیایی تقویت می‌شود و مشابه آزاد سازی انرژی است. یک مشخصه ویژه احتراقهای تراکمی سرعت انتشار است (معمولا بیشتر از 1000 m/s) که بسیار بیشتر از سرعت شعله است (معمولا 0.5 m/s). یکی از دلایل اصلی سرعت بالای انتشار، v_d ، سرعت بالای صوت در گازهای مشتعل است.

مساله‌ای که در بسیاری از کاربردها اهمیت دارد این است که در چه شرایطی گذار بین احتراق انبساطی به احتراق تراکمی اتفاق می‌افتد. مدل‌های ریاضی برای هندسه‌های ساده شبیه سازی چنین پروسه‌هایی را فراهم می‌کنند. شکل‌های (۱-۱) و (۲-۱) گذار به احتراق تراکمی را در مخلوط هیدروژن-اکسیژن نمایش می‌دهند. احتراق انبساطی شتاب می‌گیرد و به احتراق تراکمی تبدیل می‌شود



شکل ۱-۱. درصد جرمی اتم اکسیژن طی شکل گیری یک احتراق تراکمی مخلوط هیدروژن-اکسیژن در فشار ابتدایی ۲ بار.



شکل ۱-۲. پروفیل سرعت در خلال شکل گیری احتراق تراکمی مخلوط هیدروژن-اکسیژن در فشار آغازین ۲ بار.

۳-۱. موج‌های احتراق تراکمی در گازها

شعله معمولی یا موج احتراقی، با سرعت‌های نسبتاً پایین، معمولاً نزدیک ۰٫۱ تا ۱۰ متر بر ثانیه پیش می‌رود. اما در بسیاری از مخلوط‌های انفجاری، سرعت جبهه شعله ممکن است تا چندین مرتبه بزرگتر شود و برای نمونه به ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر بر ثانیه نیز برسد. این گونه شعله‌ها که سرعت آنها از سرعت مشخصه صوت در آن گازها فراتر می‌رود، احتراق‌های تراکمی یا امواج احتراق تراکمی نامیده می‌شوند. احتراق‌های تراکمی گازی به وسیله تغییرات بزرگ فشار و دما مشخص می‌شوند. آشکار است که در این دو پدیده، مکانیسم انتشار شعله باید فرق داشته باشد. انتشار در شعله ساده به ترابری گرما و احتمالاً گونه‌های واکنش پذیر شیمیایی به درون گازهای نسوخته در جلوی جبهه شعله بستگی دارد. این گونه فرایندهای ترابری به آن اندازه تند نیستند که احتراق تراکمی را توضیح دهند. در این حالت بر اثر یک موج فراصوت یا موج ضربه‌ای، واکنش آغاز می‌شود. موج ضربه‌ای گاز واکنش پذیر را فوق العاده سریع گرم می‌کند و انرژی آزاد شده در واکنش شیمیایی بعدی، نیروی محرک موج را فراهم می‌سازد.

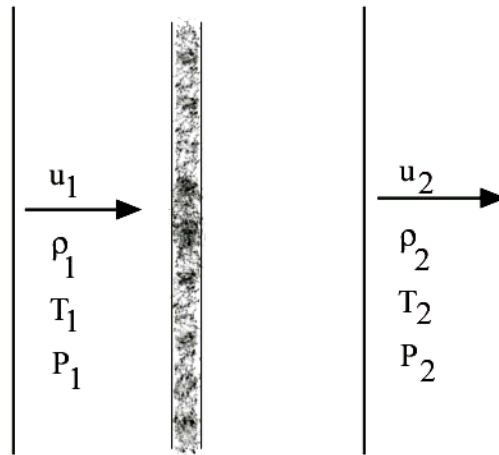
۴-۱. ساختار یک بعدی موجهای احتراق تراکمی

اگر شرایط را در محیط قبل از تاثیر موج ضربه‌ای برابر (v_1, T_1, P_1) و بعد از گذار موج ضربه‌ای از محیط برابر (v_2, T_2, P_2) در نظر گرفته شود (شکل (۳-۱))، سرعت ضربه با عبارت

$$U_s = v_1 \left(\frac{P_2 - P_1}{v_1 - v_2} \right)^{0.5} \quad (1-1)$$

و سرعت جریان یا سرعت ذره‌ای با عبارت زیر بیان می‌شود.

$$W = (v_1 - v_2) \left(\frac{P_2 - P_1}{v_1 - v_2} \right)^{0.5} \quad (2-1)$$

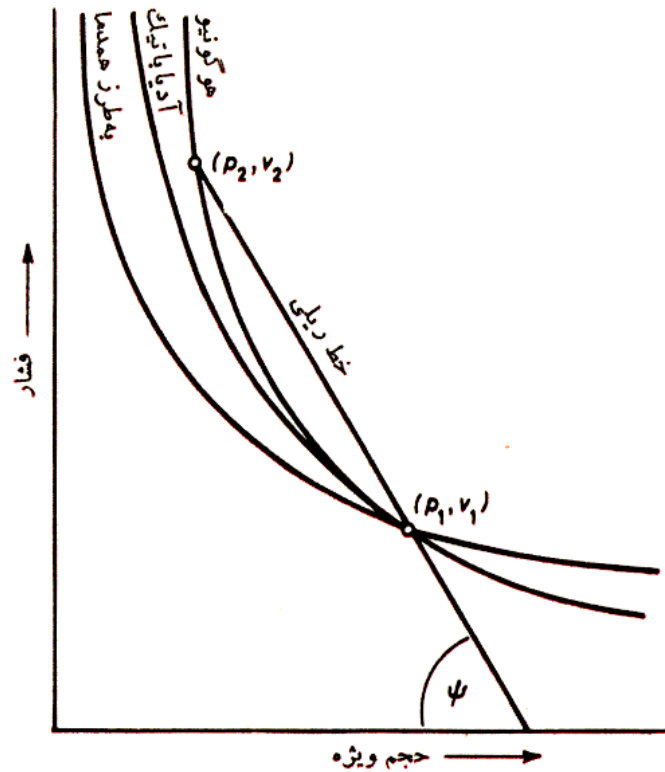


شکل ۳-۱. مدل نمایشی یک موج ضربه‌ای ایستاده.

با بررسی‌های ریاضی که از حوصله این بحث خارج است و در [1] به تفصیل به آنها پرداخته شده است، به رابطه زیر که معروف به رابطه رانکین-هوگونیوت (Rankine - Hugoniot) است، می‌رسیم.

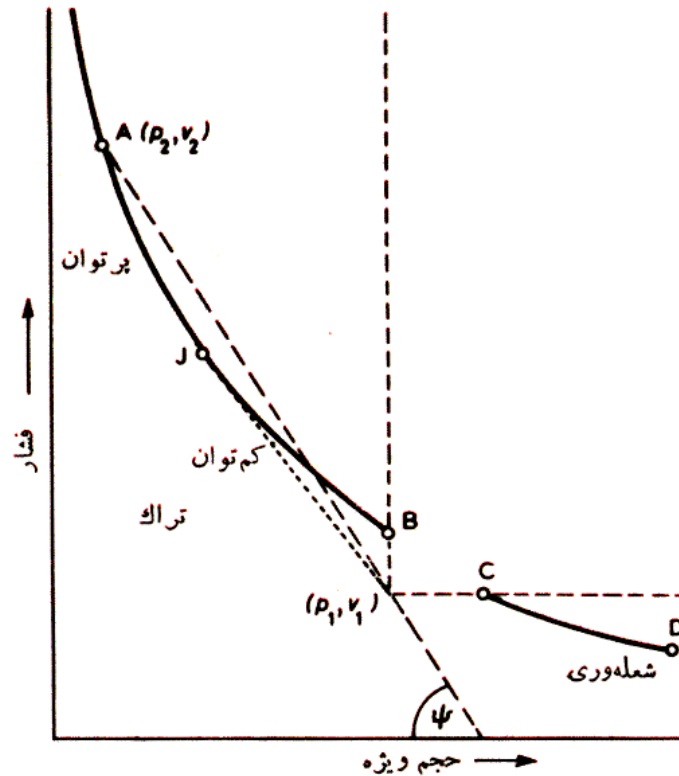
$$e_2 - e_1 = \frac{1}{2} (P_2 + P_1) (v_1 - v_2) \quad (3-1)$$

که در این رابطه، e ، انرژی درونی ویژه یعنی انرژی بر جرم واحد می باشد.
 رابطه (۳-۱) در نمودار $P-v$ ، منحنی ای را نشان می دهد که همه حالت هایی را که موج ضربه ای می گذراند، به یکدیگر پیوسته می سازد و منحنی هوگونیوت نام دارد (شکل (۴-۱)).



شکل ۴-۱. مکان هندسی نقاط دست یافتنی در فرایندهای همدم، آدیاباتیک و موج ضربه ای (هوگونیوت). شیب خط ریلی که حالت های آغازی و پایانی را به یکدیگر متصل می کند، اندازه سرعت موج را نمایش می دهد.

وتری که حالت های آغازی (v_1, P_1) و (v_2, P_2) را به هم وصل میکند، خط ریلی نام دارد. روابط بالا با این فرض به دست آمده اند که هیچ واکنش شیمیایی در محیط رخ نمی دهد اما در یک دستگاه با واکنش گرمزای، برای به دست آوردن حالت پایانی، انرژی آزاد شده در واکنش نیز باید در نظر گرفته شود. اثر این انرژی، جابجایی منحنی هوگونیوت با سوی اندازه های بالاتر P و v است به طوریکه منحنی دیگر از نقطه (v_1, P_1) نمیگذرد (شکل (۵-۱)).



شکل ۱-۵. منحنی هوگونیوت برای گذار همراه با واکنش شیمیایی گرمازا.

منحنی هوگونیوت هنوز جواب معادله (۱-۱) را نشان می‌دهد و اکنون حالتی را تعریف می‌کند که از دیدگاه ریاضی ممکن است از یک حالت آغازی معینی به وسیله گذار ضربه، همراه با رهایی انرژی از واکنش شیمیایی حاصل شده باشند. اما از دید فیزیکی همه این حالتها حقیقی نیستند. در شکل (۱-۵) می‌بینیم که در میان نقطه‌های B و C، نسبت $\left(\frac{P_2 - P_1}{v_1 - v_2}\right)$ منفی است پس اندازه U_s موهومی خواهد بود. بنابراین گذر از نقطه (v_1, P_1) به هر نقطه‌ای بین B و C دست نیافتنی است. بنابراین دو ناحیه جدا وجود دارد: ناحیه AB که مربوط به هنگامی است که $P_2 > P_1$ و $v_2 < v_1$ باشد و ناحیه CD برای زمانی که $P_2 < P_1$ و $v_2 > v_1$ در ناحیه CD در سمت راست نقطه (v_1, P_1) ، شیب خط ریلی از زاویه مماس بر منحنی در نقطه (v_2, P_2) ، کمتر است از این رو احتراق زیر صوتی

است. گذشته از این با گذر موج ضربه‌ای، فشار و چگالی کاهش می‌یابد اما سرعت از اندازه ورودی بیشتر می‌شود. این بخش از منحنی به موج احتراقی یا احتراق انبساطی مربوط است.

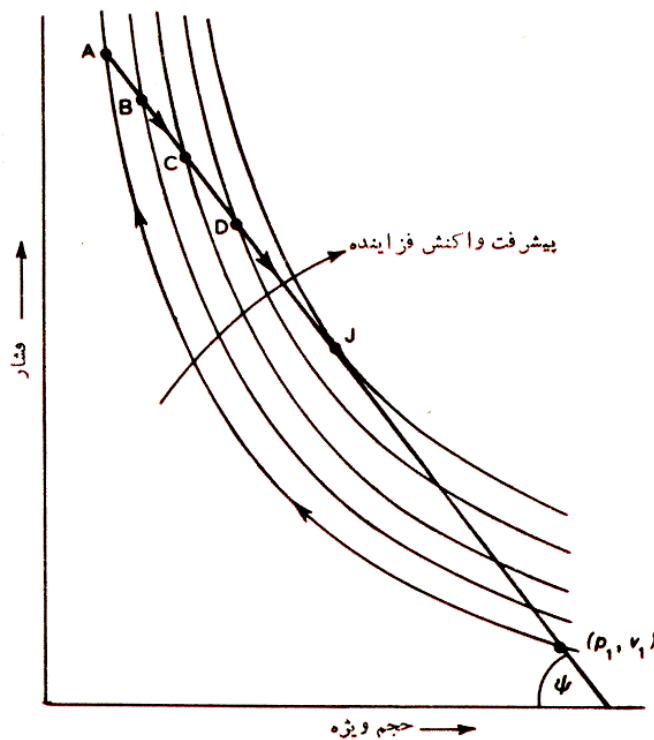
نقطه‌های روی منحنی AB در سمت چپ (v_1, P_1) ، مربوط به سرعت‌های بزرگتر از سرعت صوت هستند. این بخش از منحنی فرایند احتراق تراکمی را نمایش می‌دهد. آن خط ریلی که از نقطه (v_1, P_1) بر منحنی مماس می‌شود، سرعت حداقل دست یافتنی احتراق تراکمی را نشان می‌دهد. خط‌های ریلی دیگری که از نقطه (v_1, P_1) رسم می‌شوند، شیب‌های تندتری دارند و به سرعت‌های بزرگتر مربوطند. احتراق تراکمی با سرعت حداقل را احتراق تراکمی چاپمن-ژوگوئیت (Chapman-Jouguet) می‌نامند و حالت پایانی که با نقطه J نشان داده می‌شود و وابسته به این‌گونه احتراق تراکمی است، حالت چاپمن-ژوگوئیت (C-J) نام دارد. در شکل (۱-۵) دیده می‌شود احتراق‌های تراکمی که حالت پایانی آنها در سمت چپ حالت C-J باشد، احتراق تراکمی پرتوان و آن دسته که مربوط به نقطه‌های سمت راست هستند، احتراق تراکمی کم توان نام دارند.

روی منحنی AB در بخش احتراق‌های تراکمی پرتوان، خط مماس بر (v_2, P_2) از خط ریلی مربوطه شیب تندتری دارد. پس جبهه موج نسبت به گاز پشت سر خود زیر صوتی است و هر گونه بهم‌خوردگی از پشت به جبهه موج می‌رسد و باعث کاهش توان احتراق تراکمی می‌شود. احتراق‌های تراکمی پرتوان یا پرسرعت هنگامی روی می‌دهند که برای نمونه با یک موج ضربه‌ای نیرومند آغاز شوند. اما این‌گونه احتراق‌های تراکمی ناپایدارند و به احتراق تراکمی C-J کاهش می‌یابند، مگر آنکه با انرژی افزون بر انرژی واکنش، پشتیبانی شوند.

روی منحنی AB در بخش احتراق‌های تراکمی کم توان، احتراق تراکمی نسبت به گاز بعدی فراصوتی است. می‌توان نشان داد که در اینجا همه انرژی شیمیایی برای راندن موج به کار نمی‌رود. بنابراین می‌توان گفت در حالی که از دیدگاه معادله‌های پایستگی، همه حالت‌های پایانی واقع روی

منحنی A شدنی هستند، حالت C-J است که یک احتراق تراکمی پایدار خود نگهدارنده را نشان می‌دهد.

در خلال جنگ دوم جهانی Zeldovich, Doring و Von Neumann، مدل C-J را با در نظر گرفتن نرخ واکنش بهبود بخشیدند و نشان دادند برداشت قبلی از موج احتراق تراکمی برداشت کاملاً درستی نیست، زیرا فرض شده است که واکنش شیمیایی بی‌درنگ به پایان می‌رسد. مدل ZND، نمایش بهتری از این پدیده ارائه می‌دهد. در این مدل خانواده‌ای از منحنی‌های هوگونیوت در نظر گرفته می‌شود که کسرهای پیشرفت پیاپی واکنش را نمایش می‌دهند (شکل (۶-۱)).



شکل ۶-۱. نمایش یک ناحیه واکنش محدود با یک دسته از منحنی‌های هوگونیوت که مراحل پیشرفت واکنش را نشان می‌دهند.

از آنجا که احتراق تراکمی پدیده‌ای پایاست، یعنی اگر در یک دستگاه مختصات که با سرعت یکنواخت حرکت می‌کند، سنجیده شود، همه جزئیات رفتار آن ثابت می‌ماند. همه حالت‌هایی که دستگاه از آنها می‌گذرد، باید روی یک خط ریلی که به سرعت احتراق تراکمی وابسته است، قرار

گیرند. پس از موج ضربه‌ای آغازی، حالت گاز با نقطه A در روی منحنی هوگونویوت مربوط به گاز واکنش‌ناپذیر نشان داده می‌شود. سپس حالت گاز در روی خط ریلی به سوی افزایش پیشرفت واکنش، پیوسته پیش می‌رود تا به حالت C-J در نقطه J برسد. این نقطه روی منحنی هوگونویوت گازی که در آن واکنش به پایان رسیده است، قرار دارد.

بنابراین در این مدل ZND احتراق تراکمی به مانند یک موج ضربه‌ای ساده فرض می‌شود که در پی آن یک ناحیه واکنش با طول محدود می‌آید. در این ناحیه واکنش، فشار و چگالی پایین می‌آیند، اما دما بالا می‌رود. در فشار جو طول ناحیه واکنش نزدیک به ۱ میلی‌متر یا کمتر، که معادل ۰/۵ میکرو ثانیه است، پیش‌بینی می‌شود. اندازه‌گیری طول ناحیه واکنش بسیار دشوار است. به کمک روشهای غیر مستقیم، برای مخلوطهای بنزن-اکسیژن زمانهای واکنش ۰/۳ تا ۰/۵ میکروثانیه به دست آمده است. این مدل وجود ماکزیمم‌هایی را در روی نمودار فشار و چگالی پیش‌بینی می‌کند که جهش وان نیومان (Von Neumann spike) نام دارد و در آزمایش نیز دیده شده است. سراسر ناحیه میان جبهه موج و صفحه C-J یک فرایند جریان پایا را نشان می‌دهد که بدون هیچگونه تغییری انتشار می‌یابد.

مدل ZND پشتیبانی بیشتری از اصل موضوع C-J است. در این مدل به حالت‌های پایانی ای که مشخصه احتراق تراکمی پرتوان را دارند می‌توان دست یافت که در واقع رخ می‌دهند. اما به حالت‌هایی که مشخصه احتراق تراکمی کم توان را دارند نمی‌توان رسید مگر آنکه به صورت گذرا باشند.

گاز سوخته بیرون آمده از صفحه C-J همسو با احتراق تراکمی اما با سرعت ذره حرکت می‌کند و چنانچه چشمه انرژی دیگری در دسترس نباشد سرانجام می‌ایستد. برای روشن کردن این مکانیسم چنین در نظر می‌گیریم که در انتهای بسته یک لوله دراز، احتراق تراکمی آغاز می‌شود. در این سر لوله، گاز باید ساکن بماند. پس یک موج انبساطی بدنبال جبهه احتراق تراکمی راه می‌افتد که گاز سوخته را خنک می‌کند و درسوی وارونه شتاب می‌دهد. از آنجا که موج انبساطی، ناگزیر آدیاباتیک

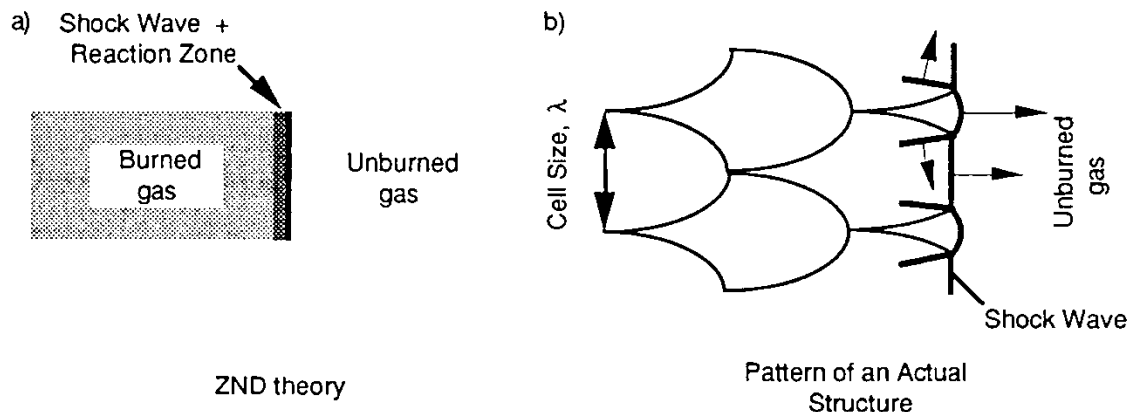
است، سرعت پیمایش آن برابر جمع سرعت صوت در گاز و سرعت جریان است. بنابراین می‌بینیم که این درست شرایط صفحه C-J را دارد که سر موج انبساطی به آن گره خورده است. ناحیه انبساطی ناپایدار است، زیرا با گسترش احتراق تراکمی درون گاز در این ناحیه، نمودارها با زمان تغییر می‌کنند. می‌بینیم که جبهه احتراق تراکمی تنها هنگامی حرکت یکنواخت دارد که جریان گاز سوخته رفتاری مانند سر موج انبساطی داشته باشد. بنابراین از این گفته که احتراق تراکمی خود نگهدارنده با حالت C-J نشان داده می‌شود، بار دیگر پشتیبانی می‌شود. در جدول (۱-۱) مقادیر C-J برای چند مخلوط سوختی نشان داده شده است.

جدول ۱-۱. سرعت و فشار احتراق تراکمی C-J برای چند مخلوط سوخت - هوا با دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد و

فشار اولیه ۱/۰۱۳ بار.

	Methane	Propane	Ethylene	Hydrogen
C-J Pressure (bar)	17.4	18.6	18.6	15.8
C-J Velocity (m/s)	1802	1804	1822	1968

چنانچه در شکل (۷-۱) نشان داده شده است، مدل ZND، موج احتراق تراکمی را به عنوان یک موج شوک در نظر می‌گیرد که بلافاصله یک ناحیه واکنش (شعله) را دنبال می‌کند. ضخامت این ناحیه بوسیله نرخ واکنش داده می‌شود. از تئوری ZND همان سرعتها و فشارهای تئوری C-J به دست می‌آید و تفاوت بین این دو مدل تنها در ضخامت موج است.



شکل ۱-۷. ساختار ZND و الگوی یک ساختار واقعی جبهه احتراق تراکمی. مقیاس طول الگوی سلولی، اندازه سلول، λ . در شکل نشان داده شده است.

۱-۵. ساختار سه بعدی احتراق تراکمی

اندازه‌گیریهای آزمایشی سرعت احتراق تراکمی با پیش‌بینی‌های نظریه چاپمن-ژوگوئیت تا کمتر از ۲ درصد نزدیکی نیاز دارند، مگر در لوله‌های باریک و با در نزدیکی حدود احتراق تراکمی پذیری که انحراف به ۱۰ درصد و یا بیشتر می‌رسد. در این گونه موارد آثار سه بعدی دیده می‌شوند، مهم‌ترین آنها احتراق تراکمی چرخان (Spinning detonation) است که با پیش رفتن در درون لوله، جبهه موج کج می‌شود و به دور محور می‌چرخد.

سالها چنین پنداشته می‌شد که این گونه آثار سه بعدی، تنها با حالت‌های بسیار کمیاب همراه هستند. اما اکنون می‌دانیم که به خاطر سینتیک واکنش گرمای درون ناحیه واکنش، دستگاه یک بعدی، ناپایدار می‌شود. چنانچه ناپایداریها طولی باشند، احتراق تراکمی سواره (Galloping detonation) دیده خواهد شد که در آن موج احتراق تراکمی پیاپی به تباهی می‌رود اما هر بار با یک جهش، سرعت خود را باز می‌یابد. همه احتراق‌های تراکمی پایدار، ساختاری سه بعدی و پیچیده دارند. یکی از راههای نشان دادن سرچشمه ناپایداری به صورت زیر است: جبهه احتراق تراکمی با یک مدل موج چهارگوش نمایش داده می‌شود. به دنبال موج ضربه‌ای واکنش‌ناپذیر، یک دوره القای