بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی هوافضا

پایان نامهٔ کارشناسی ارشد

گرایش پیشرانش

مطالعهٔ عددی اشتعال و انتشار شعله در ماتریس قطرات سوخت

نگارنده

سجاد رنجبران

استاد راهنما

دکتر صادق تابع جماعت

زمستان ۱۳۸۶

بسمه تعالی

تـاریخ: .....

شماره مدرک .....

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

فـرم اطلاعات پایان‌نـامه
کارشنـاسی ارشد و دکتـرا
کتابخـانه مرکـزی

مشخصات دانشجو	نام خانوادگی :رنجبران	نام : سجاد	شماره دانشجویی: ۸۴۱۲۹۰۰۱
	دانشگاه : صنعتی امیر کبیر	دانشکده : هوا فضا	رشته تحصیلی : مهندسی هوا فضا گرایش (جلوبرندگی)
عنوان	مطالعهٔ عددی اشتعال و انتشار شعله در ماتریس قطرات سوخت		
Title :	Numerical Study on Ignition and Flame Spread in Fuel Droplet Array		
استاد راهنما	نام خانوادگی : تابع جماعت	نام: صادق	
استاد مشاور	نام خانوادگی :	نام :	
دانشنامه	کارشناسی ○ ارشد ● دکترا ○	سال تحصیلی: ۸۶-۸۷	
نوع پروژه	کاربردی ○ بنیادی ○ توسعه ای ● نظری ○		
مشخصات ظاهری	تعداد صفحات: ۱۳۱	تصویر: ● جدول: ● نمودار: ● نقشه: ○ واژه‌نامه: ○ تعداد مراجع: ۴۲ تعداد ضمائم: ○ ۰	
زبان متن	فارسی ● انگلیسی ○	چکیده	فارسی ● انگلیسی ●
یاداشت	لوح فشرده ○ دیسکت فلاپی ○		
توصیفگر			
کلید واژه فارسی	ماتریس قطرات سوخت، اشتعال، انتشار شعله ، فراریت سوخت، شرایط بی وزنی		
کلید واژه لاتین	Droplet Array, Ignition, Flame Propagation, Fuel Volatility, Microgravity		

چکیده

در پروژهٔ حاضر به مطالعهٔ عددی اشتعال در هوای داغ و انتشار شعله ماتریس قطرات سوخت پرداخته شده است. بدین منظور یک کد محاسباتی دوبعدی بر پایهٔ الگوریتم MAC و روش گسسته سازی تفاضل محدود تهیه شده؛ همچنین برای مدلسازی فرایند احتراق از مدل نرخ محدود استفاده شده است. در بخش اول این پایان نامه مطالعه عددی پخش شعله در ماتریس قطرات سوخت هپتان نرمال در شرایط بی وزنی در دمای مختلف محیط ۳۰۰، ۵۰۰ و ۶۵۰ کلوین و برای S/d_0 از ۳ تا ۸ که S فاصله بین قطرات و d_0 قطر اولیه آنها می باشد انجام شده است. مدهای پخش شعله با تغییر S/d_0 و دما تغییر می کند. استفاده از مدل واکنش بهتر و در نظر گرفتن انتقال حرارت تشعشعی به نتایج حاصل را به نتایج تجربی نزدیکتر می کند. با افزایش درجه حرارت محیط و به دلیل افزایش انتقال حرارت محیط به قطره، دمای سطح قطره بالا تر رفته و لایه گاز قابل اشتعال توسعه می یابد در نتیجه نرخ انتشار شعله در دمای بالاتر محیط افزایش می یابد. می توان گفت که دمای محیط نقش کلیدی هم در مد پخش شعله و هم در نرخ پخش شعله دارد. . مقایسه ای که بین نتایج عددی و نتایج تجربی انجام گرفته است نشان می دهد که تشابه کیفی بین این دو بر قرار است. در بخش دوم اشتعال ماتریس قطرات سوخت در هوای داغ و تاثیر فراریت سوختهای مختلف بر این اشتعال مطالعه شده است. در مطالعات تجربی قبلی نشان شده است که رفتارهای مختلفی به ازای فراریت سوخت در اشتعال ماتریس قطرات سوخت در هوای داغ وجود دارد و هدف از این کار روشن ساختن این رفتارها به وسیله حل عددی می باشد. بدین منظور حل عددی ماتریس قطرات سوخت با قطر ۱ میلیمتر و فاصله های مختلف از ۵ تا ۱۵ میلیمتر برای سوخت پنتان نرمال و هگزادکان نرمال در دمای ۹۵۰ کلوین و برای سوخت هپتان نرمال در دمای ۹۲۵ کلوین مطابق مطالعات تجربی انجام گرفت. نتایج نشان می دهد که زمان اشتعال با کم کردن فاصله قطرات در ماتریس برای سوختهای فرار کوتاه تر از قطره جدا وبا کاهش بیشتر فاصله زمان اشتعال افزایش می یابد. برای سوختهایی با فراریت کم مانند هگزادکان زمان اشتعال کلا با افزایش فاصله قطرات کاهش می یابد. روند نتایج حاصله با کارهای تجربی تطابق کیفی دارد و با بهبود مدل مانند اضافه نمودن تشعشع و استفاده از سینتیک شیمیایی کاملتر به نتایج تجربی نزدیکتر می شویم.در حالتیکه زمان اشتعال ماتریس قطرات از زمان اشتعال قطره جدا کمتر باشد یعنی برای سوختهای فرار کانتورهای دما نشان می دهد که مکان اشتعال در ماتریس در بالای قطرات و به صورت بهم پیوسته مانند سیلندر است. برای سوختهای با فراریت کم مکان اشتعال از سوختهایی دیگر به دلیل اینکه قسمت بیشتر زمان اشتعال آن صرف تبخیر قطره های سوخت شده بالاتر می باشد.

تقدیم به:

پدر و مادرم و .....

تشکر و قدردانی

بر خود فرض می‌دانم تا از زحمات، دلسوزی‌ها و راهنمایی‌های استاد گرامی جناب آقای دکتر صادق تابع‌جماعت که در تعریف و انجام این پروژه دلسوزانه یاری‌ام نمودند، کمال تشکر و قدردانی را داشته و مراتب احترام خود را ابراز دارم.

از زحمات و حمایت‌های آقایان مهندس یاشار شرکا، مهندس امیر مردانی، مهندس مهدی جنگی، مهندس حامد علیصادقی، مهندس بیژن یداللهی، مهندس علی صادقی نیچکوهی ، مهندس ابراهیم سجودی و مهندس بابک کشیر و کلیهٔ عزیزانی که بی‌منت تجربیات خویش را در اختیار اینجانب قرار داده و در انجام این پروژه یار و یاور من بودند، کمال تشکر و قدردانی را داشته و از خداوند منان توفیق روز افزون ایشان را خواهانم.

در پایان نیز وظیفهٔ خود می‌دانم که از پدر و مادر گرامی و خانوادهٔ عزیزم مخصوصا برادر بزرگترم مهدی عزیز که با حمایت دلسوزانهٔ خود بهترین مشوق من بوده‌اند، و خانم عاطفه حیدری دلگرم تشکر و قدردانی نمایم.

سجاد رنجبران

بهمن ۸۶

فهرست علائم و اختصارات

ضریب پخش گرمایی	a	m^2/s	گرمای مخصوص در فشار ثابت	c_p	$kJ/kg.k$
قطر قطره	d	m	ضریب پخش	D	m^2/s
گرمای مخصوص تشکیل	h	kJ/kg	گرمی نهان تبخیر	L	kJ/kg
فشار	P	atm	جهت شعاعی	r	m
شعاع قطرات	R	m	فاصله بین قطرات	S	m
زمان	t	s	دما	T	k
سرعت	u	m/s	جز جرمی	Y	
جهت محوری	z	m	ضریب رسانش گرمایی	λ	$W/m.k$
چگالی	ρ	kg/m^3	نرخ واکنش	$\dot{\omega}$	$Kmol/m^3.s$

اندیسها:

سوخت	f	نقطه جوش	b
فاز مایع	l	اجزا	i
سطح قطره	s	جهت شعاعی	r
شرایط اولیه	0	جهت محوری	z

فهرست مطالب

فصل اول

مقدمه ۳

۱-۱ تعیین اندازه قطرات ٦

فصل دوم

تئوری تبخیر و گرمایش و حرکت قطره ۹

۲-۱ تبخیر قطره ۱۰

۲-۲ گرمایش و تبخیر در مدل تقارن کروی قطره ۱۳

۲-۲-۱ واکنش شیمیایی ۱۵

۲-۳ تبخیر قطره در جریان جابجایی ۱٦

۲-۳-۱ تحلیل تخمینی لایه مرزی فاز گاز ۲۱

۲-۳-۲ تحلیل تخمینی جریان فاز مایع ۲۲

۲-۳-۳ مدل رسانش موثر ۲۳

۲-۳-۴ بررسی نتایج تحلیل تخمینی ۲۵

۲-۴ بررسی زمان اشتعال برای قطره منفرد سوخت ۲۷

۲-۵ ماتریس و گروه قطرات ۲۸

۲-۵-۱ گرمایش و تبخیر در ماتریس قطرات ۳۰

۲-۶ انتشار شعله در ماتریس قطرات سوخت ۳۸

۲-۷ تبخیر و احتراق گروهی قطرات ٤۷

فصل سوم

مدل تئوری ۵۱

۳-۱ مدل فیزیکی ۵۲

۳-۱-۱ فرضیات ۵۳

۳-۲ معادلات حاکم ۵۵

۳-۲-۱ شرایط مرزی ۵۶

۳-۲-۱-۱ شرایط مرزی بین فاز جامد وگاز ۵۷

فصل چهارم

روش عددی ۵۹

۴-۱ بی بعد سازی ٦۰

۴-۲ تولید شبکه ٦۲

۴-۲-۱ شبکه متحرک ۶۶

۴-۲-۲ روش تولید شبکه ۶۷

۴-۳ روش بدست آوردن سرعت و فشار ۷۱

۴-۳-۱ معادله پوواسون فشار برای فرمولاسیون متغیر پایه ای ۷۲
۴-۳-۲ شرایط مرزی فشار ۷۴
۴-۴ الگوریتم حل معادلات ۷٤
۴-۴-۱ ترتیب حل معادلات فاز گاز و مایع ۷۵
۴-۴-۲ مراحل بدست آوردن متغیرها در مرز مشترک فاز مایع و گاز ۷۶
۴-۵ روش جداسازی معادلات ۷۷
۴-۶ خواص فاز گاز و مایع ۷۸
۴-۶-۱ گرمای ویژه و آنتالپی ۷۸
۴-۶-۲ ضریب پخش ۷۹
۴-۶-۳ ویسکوزیته ۸۰
۴-۶-۳ رسانایی گرمایی ۸۱
۴-۶-۴ خواص فاز مایع ۸۱
۴-۶-۵ مدل واکنش شیمیایی ۸۲

فصل پنجم

نتایج عددی انتشار شعله در ماتریس قطرات سوخت ۸۴

۵-۱ مقدمه ۸۵
۵-۲ مدهای مختلف انتشار شعله ۸٦
۵-۲-۱ مد انتشار شعله پیش مخلوط ۸۸
۵-۲-۲ مد اول ۹۱
۵-۲-۳ مد دوم ۹۳
۵-۲-۴ مد سوم ۹۶
۵-۳ نرخ انتشار شعله ۹۹
۵-٤ نتیجه‌گیری ۱۰۱

فصل ششم

نتایج عددی اشتعال در ماتریس قطرات سوخت در هوای داغ ساکن ۱۰۳

٦-۱ مقدمه ۱۰٤
٦-۲ دمای فاز گازبر حسب زمان ۱۰۵
٦-۳ دمای سطح قطرات بر حسب زمان ۱۰۸
٦-٤ زمان اشتعال بر حسب فاصله بین قطرات ۱۱۰
٦-۵ کانتور دما و جز جرمی سوخت در زمان اشتعال ۱۱۵
٦-٦ نتیجه گیری ۱۲۳

فصل هفتم

پشنهاد ادامه کار ۱۲۴

مراجع ۱۲۷

فصل اول

مقدمه

امروزه مطالعه دینامیک سیالات و پدیده انتقال در اسپری ها به دلیل اهمیت فراوان آن در حال گسترش است. تئوری اسپری کاربرد زیادی در پیشرانه ها، مبدل ها حرارتی و فراوری مواد دارد. با توجه به کاربرد آن در کلیه صنایع، اسپری و قطرات می تواند تاثیر زیادی در اقتصاد و مسایل نظامی داشته باشد. مثالهای آن شامل موتورهای دیزل در اتومبیل ها،توربین های گازی و ژنراتورهای نیرو وکاربردهای فضایی است. تحلیل اسپری و کاربرد قطرات در آن بیشتر برای پدیده احتراق در سوخت های مایع انجام شده است اما این موضوع به فراوری مواد، مبدل های حرارتی، رنگ آمیزی سطوح پوشش در صنعت، تولید سموم و حشره کش ها نیز مربوط می شود. پتانسیل های زیادی برای بهبود عملکرد وکاهش هزینه ها وتولید محصولات جدید وجود دارد. تلاش های فراوانی برای استفاده از کنترل اکتیو در بهینه سازی اسپری ها وگسترش تکنولوژی استفاده از آن در حال انجام است.

اسپری یکی از انواع جریان دو فازی است که در آن فاز مایع (قطرات) به عنوان فاز مستهلک[1]یا جدا و گاز به عنوان فاز پیوسته است. در مقیاس اندازه قطره در اسپری مسائلی مانند لایه مرزی وخیزش[2] به دلیل حرکت نسبی بین قطره و گاز اطرافش مطرح می شود. پدیده های وابسته دیگری نیز مانند گردش داخلی قطره به دلیل تنش برشی، جریان استفان که باعث تبخیر و یا میعان می شود، ناپایداری قطرات و تغییر شکل آنها ویا تقسیم احتمالی آن ویا تقابل قطرات با ساختار توربولانسی مطرح می شود[1].

در مقیاس بزرگتر پیچیدگی هایی در مورد تبادل جرم و ممنتوم و انرژی بین تعداد زیادی ازقطرات و جریان گاز وجود دارد. این مسئله موجب وابستگی شدید پارامترها به یکدیگر شده است. بدون آگاهی از

[1] disperse
[2] Wake

جزئیات در مقیاس ریز نمی توان پدیده ها ی انتقال جرم، ممنتوم انرژی را در مقیاس بزرگتر بررسی کرد. در کاربرد های عملی مقیاس های مختلفی استفاده می شود که نتیجه آن مدلهای زیر شبکه ای است.

وقتی که نرخ تبخیر افزایش می یابد وابستگی بین دو فاز افزایش می یابدو عمر قطره و بعضی دیگر از مشخص های زمانی کاهش می یابد و در این حالت مشخصه های گذرا اهمیت پیدا می کنند. نرخ تبخیر در محیط های گازی با دمای در حدود ۱۰۰۰ کلوین و به بالا مهم می شود که احتراق سوخت مایع بهترین مثال برای این حالت است. در محیط‌های داغ عمر قطره به اندازه زمان گرمایش داخلی کوتاه می شود.احتراق اسپری در این موارد از لحاظ علمی و مسائل تحلیلی و عددی نسبت به اسپری در دماهای پایین پیچیده تر است [1].

تبخیر از دیگر پروسه های احتراق مانند اختلاط و واکنش شیمیایی طولانی‌تر است در نتیجه می تواند به عنوان پارامتر کنترل کننده مطرح باشد در اسپری مواردی از قبیل گرادیان مکانی دما، گرادیان غلظت و گردش داخلی در قطرات وتقابل قطرات در همسایگی هم بر پیچیدگی موضوع می‌افزاید .

پدیده انتقال در فاز گاز سریع تر از فاز مایع است. قطر قطرات در حدود چند میلیمتر تا چند صد میکرومتر است. مقیاس مورد بررسی برای گرادیان های داخل قطرات می تواند در حدود میکرومتر ویا حتی از آن ریزتر باشد. در نتیجه مدل تبخیر زیر شبکه ای برای حل در این گونه مسائل مورد نیاز است. در متون کلاسیک در مورد قطره که شامل سوختن آن نیز می شود تبخیر یک قطره در محیط ساکن در نظر گرفته شده است.در این مدل مایع از یک ترکیب شیمیایی یکسان تشکیل شده است. شرایط گاز اطراف زیر بحرانی است و تبخیر در حالت پایدار انجام می شود. در نتایج حاصله مربع شعاع یا قطر قطره با گذشت زمان بصورت خطی کاهش و این به دلیل این است که پخش جرمی و حرارتی کنترل این

پروسه را در دست دارند که این رفتار قانون d^2 است. نتایج محققین در تحقیقات جدید فاصله زیادی با این نتایج دارد [1].

۱-۱ تعیین اندازه قطرات

به دلیل اینکه در این تحقیق احتراق قطرات مورد بررسی قرار می گیرد تعیین اندازه آنها از اهمیت خاصی بر خوردار است. اندازه و شکل قطره فاکتور مهمی در رابطه با رفتار آن است. تنش سطحی همیشه در جهت کمینه کردن مساحت سطح نسبت به حجم مشخص است که در نتیجه قطره کروی می شود. در یک اسپری سایزهای مختلف قطره وجود دارد. تبخیر و میعان، برخورد قطرات و یا تقسیم آن به قطرات بیشتر باعث تغییر اندازه در قطرات است. در اسپری از تابع توزیع قطره برای برسی رفتار اسپری استفاده می شود. این تابع تعداد قطرات را در یک قطر مخصوص می دهد میانگین قطر قطرات d_{mn} به صورت زیر است:

$$d_{mn} = \left(\frac{\int_0^\infty f(d) d^m dd}{\int_0^\infty f(d) d^n dd} \right)^{1/(m-n)} \qquad (۱-۱)$$

در عمل f(d) تابع پیوسته نیست. اما برای مدلسازی اسپری ها می توان این تابع را پیوسته فرض نمود یک مثال از قطر متوسط سوتر d_{32} است که نسبت کل حجم مایع دراسپری به کل مساحت سطوح قطرات در اسپری است [2].

نیروهای آئرودینامیکی وارد بر قطره به سایز آن و طبعاً به جرم آن بستگی دارند. در نتیجه قطرات ریز تر سریعتر شتاب می گیرند و یا سرعتشان کاهش می یابد. زمان گرمایش و تبخیرآنها نیز کوتاهتر خواهد بود. برای پیش بینی رفتار یک قطره دقت در تعیین توزیع اندازه آن اجباری می باشد. جریان مایع تزریق

شده در محیط گازی در شرایط مختلف ناپایدار است یکی از پارامترهای مهم عدد وبر است که به صورت معادله ۱-۲ تعریف می شود:

$$We = \frac{\rho \Delta U^2 L}{\sigma} \qquad ۲-۱$$

که ρ چگالی گاز، ΔU سرعت نسبی، L مشخصه ابعاد جریان و σ ضریب تنش سطحی است. این عدد نسبت نیروهای آئرودینامیکی مربوط به فشار به نیروی تنش سطحی است. بر اساس شکل جریان، تغییر در جریان و شکست قطره در بیشتر از مقدار بحرانی عدد وبر اتفاق می افتد. در مقادیر زیر بحرانی نیروی تنش سطحی بر نیروهای آئرودینامیکی غلبه دارند و قطره بدون تغییر شکل باقی می ماند ولی در بیشتر از این مقدار نیروهای تنش سطحی غلبه کرده و تغییر شکل و تقسیم به قطرات ریزتر اتفاق می افتد که بر این پروسه اتمیزاسیون گفته می شود [2].

این تقسیم قطرات به صورت سری آنقدر اتفاق می افتد تا عدد وبر به مقدار زیر بحرانی برسد. در موارد عملی روشهای مختلفی برای رسیدن به مقدار بحرانی عدد وبر وجود دارد در انژکتورها از افت فشار کافی در اریفیس برای رسیدن به سرعت لازم قطرات استفاده می شود و یا از جریان کمکی هوا (ایر بلاست) در این موارد استفاده می شود. مقدار بحرانی عدد وبر به سرعت نسبی بین مایع و گاز بستگی دارد که در بعضی از انژکتورها از پره های گردان برای افزودن مؤلفه مماسی سرعت و در نتیجه افزایش سرعت نسبی استفاده می شود از دیگر روشها می توان به اسیلاتورهای صوتی و یا فوق صوتی، نیروهای الکترو استاتیکی و یا تزریق حباب مایعات اشاره کرد.

سه روش عمومی برای تعیین سایز قطرات وجود دارد رایج ترین روش روابط تجربی است روش دیگر حل معادلات ناویر-استوکس و یا معادله اویلر برای پیش بینی تقسیم جریان مایع است. روش سوم

حل معادلات بقا جرم، ممنتوم و انرژی به اضافه تابع توزیع اندازه قطره که اصل ماکزیمم انتروپی را ارضا کرده باشد [1].

فصل دوم

تئوری تبخیر و گرمایش و حرکت قطره

در این فصل به بررسی تبخیر قطره به عنوان یک پروسه مهم در احتراق قطرات می پردازیم. به دلیل اینکه تبخیر کندترین پروسه در احتراق سوخت مایع است نرخ سوختن کلی را تعیین می کند. شش مدل تحلیلی به ترتیب بر اساس افزایش پیچیدگی بیان می‌شود. تفاوت این مدلها در دقت آنها در شبیه سازی فرایند تبخیر می‌باشد. برای نزدیک شدن به شبیه سازی یک احتراق اسپری نیاز به بررسی قطرات به صورت ماتریسی و گروهی می‌باشد که این موضوع در ادامه این فصل مطرح شده است.

۲-۱ تبخیر قطره

مسئله تبخیر قطره از دو لحاظ مهم می باشد. اول از جهت دینامیک سیالات و پدیده انتقال وابسته به گرمایش و تبخیر قطره، دوم اینکه باید مدلهای گرمایش و تبخیر و حرکت قطره را طوری توسعه داده شوند که به اندازه کافی دقیق و ساده باشند تا در تحلیل اسپری که شامل تعداد زیادی قطره می‌شود استفاده شوند.

مسئله تبخیر قطره یک مسئله چالش برانگیز است که می تواند شامل انتقال گرما و جرم، دینامیک سیالات و فعالیت شیمیایی[1] می‌باشد در حالت عمومی حرکت نسبی بین محیط اطراف و قطره وجود دارد در اینجا مشخصه های آئرودینامیکی شامل گرادیان فشار، لایه مرزی ویسکوز و جدایش جریان و خیزش در جریان گاز روی قطرات پدید می آید. عدد رینولدز بر اساس سرعت نسبی ، قطر قطره و خواص گاز از مشخصه‌های تعیین کننده نوع جریان گاز است. گردش داخل قطره به دلیل نیروی برش سطحی یکی دیگر از موضوعات مهم در دینامیک سیالات قطره است.

[1] Chemical kinetics

خصوصیات جریان تأثیر بسیار مهمی بر پدیده انتقال جرم، ممنتوم و انرژی بین فاز گاز و مایع دارد چه در موارد تبخیر چه در موارد غیر تبخیری. البته مواردی که در آنها تبخیر وجود دارد به دلیل وجود لایه مرزی و کوچک شدن قطره پیچیده تر است.

شش مدل تبخیر قطره بر اساس افزایش پیچیدگی به صورت زیر می باشد [1]:

۱) مدل قطره دما ثابت که همان قانون d^2 است

۲) مدل ضریب بی نهایت رسانش، قطره دما ثابت اما متغیر با زمان

۳) مدل رسانش محدود قطره.

۴) مدل رسانش مؤثر[1]

۵) مدل ورتکس

۶) حل معادلات ناویر–استوکس

این مدلها تفاوتهایی با هم دارند اما مسئله اساسی نوع برخورد با گرمایش فاز مایع است که عامل مؤثر و کنترل کننده پدیده تبخیر مخصوصاً در محیطهای داغ است. این مدل ها در این قسمت توضیح داده خواهند شد.

در پنج مدل اول ، فاز گاز به صورت شبه پایدار در نظر گرفته می شود و در سه مدل اول حرکت نسبی بین قطره و گاز اطراف وجود ندارد و حرکت گردشی داخل قطره نیز در نظر گرفته نمی شود اما در مدل رسانایی مؤثر و در مدل آخر این نوع گردش در محاسبات آورده می شود.

[1] Effective Conductivity

به دلیل اینکه تبخیر کندترین پروسه در احتراق سوخت مایع است نرخ سوختن کلی را تعیین می‌کند که به اهمیت موضوع تبخیر قطره می افزاید. در تئوریهای کلاسیک تبخیر و سوختن قطره سوخت کره ای متقارن در محیط گازی شکل در نظر گرفته می شود. در این مدل حرکت نسبی بین گاز و مایع همان جابجایی شعاعی به دلیل تبخیر می باشد. این مدل حالتی را شبیه سازی می کند که قطره در داخل محفظه احتراق به همراه گاز و با سرعت یکسان در حال حرکت است. این فرض برای قطرات کوچک (کمتر از ۳۰ میکرون) می تواند درست باشد. به دلیل نیروی درگ سرعت بین دو فاز کاهش می یابد. این گرایش در بعضی موارد بر افزایش سرعت به دلیل گرادیان فشار و یا تنشهای ویسکوز غلبه می کند. در این موارد قطرات بزرگتر اینرسی بیشتری دارند. سرعت نسبی باعث افزایش نرخ گرمایش و تبخیر در لایه مرزی جلوی قطره می شود. این لایه مرزی تا پشت قطره نیز ادامه می یابد در رینولدزهای بالا جدایش نیز رخ می دهد. به خاطر حرکت سطح قطره به دلیل برش، جدایش در قطره با جدایش در کره جامد فرق می کند. به عنوان مثال نقطه تنش صفر با نقطه جدایش یکی نیست اما در کره جامد این دو نقطه یکی هستند. نقطه تنش صفر در هر دو نوع کره در حدود ۱۱۰ تا ۱۳۰ درجه از نقطه سکون اتفاق می افتد اما نقطه جدایش در قطره بعد از این نقطه است.

تنش برشی در سطح قطره باعث حرکت در سطح مایع می شود این حرکتها باعث بوجود آمدن حرکت گردشی در داخل قطره می شود (همانطور که در قسمتهای بعدی خواهید دید) این پدیده طول مشخصه و زمان گرمایش و پخش جرمی فاز مایع را کاهش می دهد. اثرات جاذبه در دبی های بالا بر روی مسیر قطره تأثیرات مهمی ندارد تغییرات تنش سطحی قطره به دلیل تغییرات دمای سطح نیز مهم نمی باشد اما کلاً تنش برشی در سطح برخورد مایع با گاز پیوسته در نظر گرفته می شود [1].

در اعداد رینولدز بالا (در حدود چند صد) تأثیرات اینرسی بیشتر از تأثیرات تنش سطحی است و قطرات به قطرات کوچکتر تقسیم می شوند که قطرات ریزتر رینولدز کمتری دارند.

در موارد محدود که سرعت نسبی بین قطره و گاز وجود ندارد تقارن کروی برای گاز اطراف قطره و خود قطره وجود دارد. اگر سرعت نسبی کوچکی پدید آید بر اثر شتاب کاهنده قطره این سرعت سریعاً صفر می شود پس سرعت نسبی قطره با وجود سرعت متغیر گاز صفر است. با این فرض سرعت سیال به جابجایی استفان در جهت شعاعی کاهش پیدا می کند.

۲-۲ گرمایش و تبخیر در مدل تقارن کروی قطره

قطره ای کره ای را در نظر بگیرد که در جهت شعاعی در حال تبخیر در فاز گاز است. این بخار به صورت جابجایی و پخش سطح قطره را ترک می کند. که به این جابجایی را جابجایی استفان می گویند. در میعان شار جابجایی استفان منفی است. رسانش گرمایی بر خلاف جابجایی در جهت مرکز قطره است. گرمای فاز گاز در سطح قطره صرف تغییر فاز مایع و گرمایش داخل قطره از طریق رسانش می شود. رسانش داخل قطره باعث بالا رفتن دمای آن می شود. در بعضی از موارد بخار با گاز اطراف قطره مخلوط شده و واکنش گرمازا ایجاد می کند. این منبع انرژی تبخیر وگرمایش قطره را بهبود می بخشد. این واکنش در صورتی اتفاق می افتد که زمان واکنش از زمان پخش بخار کمتر باشد.

در این مدل مرکز قطره هیچگونه حرکت نسبی ندارد اما سطح قطره در اثر تبخیر کاهش می یابد، در نتیجه شرایط مرزی بدون جابجایی متحرک هستند. در این قسمت معادلات مربوط به این مدل ارائه می گردد فرض شبه پایدار برای فاز گاز به این دلیل است که پخش گرما و جرم در فاز گاز سریعتر از فاز مایع است. این فرض با نزدیک شدن به فشار بحرانی ضعیف و ناکار آمد می شود [3].