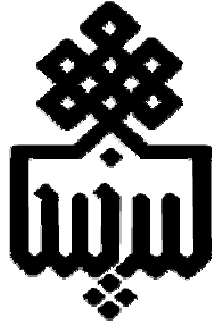


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه بیرجند
دانشکده مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک – تبدیل انرژی

تحلیل عددی شکست و تبخیر غیر تعادلی قطره سوخت

دانشجو:

مرتضی یوسفی کرگنرود

استاد راهنما:

دکتر جواد خادم

تأییدیه هیات داوران

(برای پایان نامه)

یک نسخه اصل فرم مربوطه

پروردگارا

نه میتوانم موهایشان را که در راه عزت من سفید شد، سیاه کنم و نه برای دست‌های پینه بسته‌شان که ثمره تلاش برای افتخار من است، مرهمی دارم. پس توفیقم ده که هر لحظه شکر گزارشان باشم و ثانیه- های عمرم را در عصای دست بودنشان، بگذرانم.

تقدیم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم

در اینجا بر خود لازم می‌دانم که از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر جواد خادم کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم، که با برنامه‌ریزی و صرف وقت، در به سرانجام رسیدن این پروژه نقش اساسی داشته‌اند. همچنین از سایر اساتید محترم گروه مکانیک – تبدیل انرژی که در طول دوره کارشناسی ارشد افتخار شاگردیشان را داشتم، سپاس‌گذارم.

در نهایت از دوستان عزیزم، آقایان فرهاد جلیلی، وحید جدی، حافظ عزیزی و حیدر معصومی تشکر و قدردانی می‌کنم.

چکیده

مطالعه درباره احتراق سوخت‌های هیدروکربنی و رفتار آنها و بهینه‌سازی سیستم‌های احتراقی از دیرباز مورد توجه بوده است. اکثر سوخت‌های فسیلی مورد استفاده در سیستم‌های احتراقی به صورت مایع هستند، که قبل از احتراق باید به بخار تبدیل شوند. از اینرو بررسی تبخیر قطرات سوخت و همچنین شکست آنها برای بهبود احتراق و استفاده بهینه از سوخت، مهم و لازم است. در این پایان‌نامه، تبخیر سوخت‌های هیدروکربنی و شکست آنها مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای مدل‌سازی تبخیر قطرات، از دو مدل غیرتعادلی که بر پایه قانون تبخیر غیرتعادلی لانگمویر-نارسن است، استفاده شده است. بر اساس این دو مدل، چهار مدل تبخیر استخراج شده است. همچنین اثر جاذبه در تبخیر مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج حل عددی چهار مدل در دو حالت، با در نظر گرفتن جاذبه و بدون در نظر گرفتن جاذبه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که در نظر گرفتن اثر جاذبه باعث افزایش دقت حل و بهبود نتایج می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده، مدلی که بیشترین سازگاری را با نتایج آزمایشگاهی داشته، انتخاب شده و تبخیر سوخت‌های بنزن، دکان، هپتان و هگزان بررسی شده است. سپس برای مطالعه در باره شکست قطره، یک مدل ساده که قطر قطره بعد از شکست را مستقیماً تعیین می‌کند، به کار گرفته شده است. نتایج بر اساس تغییر در سرعت اولیه و تغییر در قطر اولیه نشان می‌دهد که در تبخیر، قطر اولیه قطره و در شکست، سرعت اولیه قطره در نتایج تأثیر زیادی دارد.

کلید واژه‌ها: قطره، تبخیر، جاذبه، شکست، تبخیر غیرتعادلی.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست علائم و نشانه‌ها.....	د.....
فهرست جدول‌ها.....	ز.....
فهرست شکل‌ها.....	ح.....
فصل 1- مقدمه.....	1.....
1-1- پیشگفتار.....	1.....
2-1- تاریخچه.....	3.....
3-1- مروری بر مدل‌های موجود.....	6.....
4-1- هدف.....	7.....
5-1- ساختار پایان‌نامه.....	7.....
فصل 2- بررسی مدل‌های تبخیر و شکست قطره.....	8.....
1-2- بررسی مدل‌های تبخیر.....	8.....
1-1-2- مدل تبخیر کلاسیک.....	8.....
2-1-2- مدل تبخیر مقایسه‌ای انتقال حرارت-جرم.....	10.....
3-1-2- مدل تبخیر غیرتعادلی.....	11.....
2-2- بررسی مدل‌های شکست قطره.....	13.....
3-2- بررسی دسته‌بندی و روش‌های حل عددی جریان‌های دوفازی مایع-گاز.....	15.....
1-3-2- دسته‌بندی جریان‌های دوفازی.....	15.....
1-1-3-2- دسته اول.....	16.....
2-1-3-2- دسته دوم.....	16.....
3-1-3-2- دسته سوم.....	16.....
2-3-2- روش‌های حل عددی جریان‌های دوفازی.....	17.....
1-2-3-2- حل جریان‌های دوفازی دسته اول.....	17.....
2-2-3-2- حل جریان‌های دوفازی دسته دوم.....	17.....
3-2-3-2- حل جریان‌های دوفازی دسته سوم.....	17.....
فصل 3- بررسی فرضیات، مدل‌های تبخیر و مدل شکست استفاده شده در این پایان‌نامه....	20.....

20	تعریف مسئله	1-3
21	بررسی مدل‌های تبخیر غیرتعادلی	2-3
21	مدل اول	1-2-3
24	مدل دوم	2-2-3
25	مدل‌های اقتباس شده از دو مدل غیرتعادلی تبخیر	3-2-3
26	مدل شکست	3-3
27	فصل 4 - روش حل معادلات تبخیر و شکست	
27	معادلات محاسبه نیرو، نرخ تبخیر و انتقال حرارت	1-4
27	گسسته سازی معادلات حاکم	2-4
29	الگوریتم حل	3-4
32	فصل 5 - نتایج حاصل از حل عددی	
32	بررسی صحت مدل‌ها	1-5
32	نتایج حل عددی بدون در نظر گرفتن اثر جاذبه	1-1-5
34	نتایج حل عددی با در نظر گرفتن اثر جاذبه	2-1-5
36	تبخیر قطرات سوخت‌های هیدروکربنی	2-5
36	بررسی تبخیر قطرات سوخت‌ها به صورت جداگانه	1-2-5
36	سوخت بنزن	1-1-2-5
39	سوخت دکان	2-1-2-5
42	سوخت هپتان	3-1-2-5
45	سوخت هگزان	4-1-2-5
48	بررسی و مقایسه تبخیر سوخت‌های مختلف با یکدیگر	2-2-5
48	حالت اول	1-2-2-5
50	حالت دوم	2-2-2-5
52	شکست قطرات سوخت‌های هیدروکربنی	3-5
52	بررسی شکست قطرات سوخت‌ها به صورت جداگانه	1-3-5
52	سوخت بنزن	1-1-3-5
55	سوخت دکان	2-1-3-5
57	سوخت هپتان	3-1-3-5
60	سوخت هگزان	4-1-3-5
63	بررسی و مقایسه شکست سوخت‌های مختلف با یکدیگر	2-3-5

63	.....حالت اول	5-3-2-1
65	.....حالت دوم	5-3-2-2
67	.....نتیجه گیری و پیشنهادات	6-6
67	.....نتیجه گیری	6-1-1
68	.....پیشنهادات	6-2-2
69	.....فهرست مراجع	
71	.....ضمیمه الف: خواص ترمودینامیکی هوا و سوختهای هیدروکربنی	

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
پتانسل انتقال جرم	H_M
ثابت جهانی گاز ($kJ/kmol K$)	\bar{R}
ثابت زمانی قطره (s)	τ_d
نرخ انتقال پخش جرم بخار در واحد سطح (kg/sm^2)	\dot{m}''
حرارت نهان تبخیر قطره (kJ/kg)	L_V
دمای جوش فاز مایع (K)	T_B
دمای سطح قطره (K)	$T_{d,s}$
دمای قطره (K)	T_d
دمای گاز (K)	T_G
سرعت شار جرمی از سطح قطره (m/s)	u_b
سرعت قطره (m/s)	v_i
سرعت گاز (m/s)	u_i
سرعت نسبی (m/s)	v_{rel}
شار جرمی قطره (kg/s)	\dot{m}
شار حرارتی (J/s)	q
شتاب گرانش زمین (m/s^2)	g_i
شعاع قطره (m)	r
ضخامت لایه ناسن (m)	L_K
ضریب تصحیح برای اعمال اثر تبخیر روی انتقال حرارت	f_2
ضریب تصحیح برای نیروی پسا قطره	f_1
ضریب نیروی پسا	C_d
ظرفیت حرارتی بخار در فشار ثابت ($J/kg K$)	$c_{p,v}$
ظرفیت حرارتی مایع ($J/kg K$)	c_L
عدد استانتون	St

Sc	عدد اشمیت
B_T	عدد انتقال انرژی
B_T'	عدد انتقال انرژی اصلاح شده
B_M	عدد انتقال بدون بعد اسپالدینگ
Pr_G	عدد پرائنتل گاز
Re_b	عدد رینولدز بر اساس سرعت انتقال جرم از روی قطره
Re_d	عدد رینولدز قطره
Sh	عدد شروود
M	عدد ماخ
Nu	عدد ناسلت
We	عدد وبر
We_{cr}	عدد وبر بحرانی
P_{atm}	فشار اتمسفر (N/m^2)
P_G	فشار گاز (N/m^2)
d	قطر قطره (m)
Y	کسر جرمی
Y_s	کسر جرمی بخار در سطح قطره
Y_G	کسر جرمی بخار دور از سطح قطره
$X_{s,eq}$	کسر جرمی تعادلی بخار
$X_{s,neq}$	کسر جرمی غیرتعادلی بخار
$Y_{s,eq}$	کسر مولی تعادلی بخار
$Y_{s,neq}$	کسر مولی غیرتعادلی بخار
dt	گام زمانی (s)
x_i	موقعیت قطره (m)
$H_{\Delta T}$	مولفه اعمال اثر هدایت حرارتی محدود (K/s)
f_i	نیروی پسا (N)
W_V	وزن مولکولی قطره ($kg/kmol$)

زیرنویس

<i>atm</i>	اتمسفر
<i>cr</i>	بحرانی
<i>v</i>	بخار
<i>eq</i>	تعادلی
<i>s</i>	سطح قطره
<i>neq</i>	غیر تعادلی
<i>P</i>	فشار ثابت
<i>d</i>	قطره
<i>G</i>	گاز
<i>L</i>	مایع
<i>i</i>	مؤلفه برداری
<i>rel</i>	نسبی

علائم یونانی

β	پارامتر بدون بعد تبخیر
δ	ثابت تبخیر (m^2/s)
ρ	چگالی (kg/m^3)
Γ	ضریب نفوذ (m^2/s)
σ	کشش سطحی (N/m)
θ_1	نسبت ظرفیت گرمای ویژه گاز در فشار ثابت به ظرفیت گرمای ویژه قطره
γ	نسبت ظرفیت گرمای ویژه گاز در فشار ثابت به ظرفیت گرمای ویژه گاز در حجم ثابت
θ_3	نسبت هدایت حرارتی گاز به قطره
μ	ویسکوزیته (kg/ms)
λ	هدایت حرارتی (W/mK)

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
11.....	جدول 1-2: ضرایب تصحیح انتقال حرارت و پتانسیل انتقال جرم در حالت‌های مختلف
25.....	جدول 1-3: حالت‌های مختلف اقتباس شده از دو مدل غیرتعادلی

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
2	شکل 1-1: محفظه احتراق یک موتور درونسوز.....
3	شکل 2-1: سیستم سرمایه‌گذاری قطعات ماشینکاری شده.....
12	شکل 1-2: لایه ناسن در سطح مایع.....
14	شکل 2-2: رژیم‌های شکست قطره.....
18	شکل 3-2: روش حل اتصال یک راهه و دوراهه.....
31	شکل 1-4: دیاگرام حل.....
33	شکل 1-5: تغییر مربع قطر بر حسب زمان بدون در نظر گرفتن جاذبه.....
33	شکل 2-5: تغییر دمای قطره بر حسب زمان در حالت بدون در نظر گرفتن جاذبه.....
34	شکل 3-5: تغییر مربع قطر بر حسب زمان با در نظر گرفتن جاذبه.....
35	شکل 4-5: تغییر دمای قطره بر حسب زمان در حالت با در نظر گرفتن جاذبه.....
36	شکل 5-5: تغییر مربع قطر بر حسب زمان برای قطره بنزن به قطر 1 mm در سرعت‌های اولیه متفاوت.....
37	شکل 6-5: تغییر مربع قطر بر حسب زمان برای قطره بنزن در سرعت اولیه 1 m/s و برای قطرهای اولیه متفاوت.....
38	شکل 7-5: تغییر دما بر حسب زمان برای قطره بنزن به قطر 1 mm در سرعت‌های اولیه متفاوت.....
39	شکل 8-5: تغییر دما بر حسب زمان برای قطره بنزن در سرعت اولیه 1 m/s و برای قطرهای اولیه متفاوت.....
39	شکل 9-5: تغییر مربع قطر بر حسب زمان برای قطره دکان به قطر 1 mm در سرعت‌های اولیه متفاوت.....
40	شکل 10-5: تغییر مربع قطر بر حسب زمان برای قطره دکان در سرعت اولیه 1 m/s و برای قطرهای اولیه متفاوت.....
41	شکل 11-5: تغییر دما بر حسب زمان برای قطره دکان به قطر 1 mm در سرعت‌های اولیه متفاوت.....
42	شکل 12-5: تغییر دما بر حسب زمان برای قطره دکان در سرعت اولیه 1 m/s و برای قطرهای اولیه متفاوت.....
43	شکل 13-5: تغییر مربع قطر بر حسب زمان برای قطره هپتان به قطر 1 mm در سرعت‌های اولیه متفاوت.....

- شکل 5-14: تغییر مربع قطر برحسب زمان برای قطره هپتان در سرعت اولیه 1 m/s و برای قطرهای اولیه متفاوت..... 43
- شکل 5-15: تغییر دما برحسب زمان برای قطره هپتان به قطر 1 mm در سرعت‌های اولیه متفاوت..... 44
- شکل 5-16: تغییر دما برحسب زمان برای قطره هپتان در سرعت اولیه 1 m/s و برای قطرهای اولیه متفاوت..... 44
- شکل 5-17: تغییر مربع قطر برحسب زمان برای قطره هگزان به قطر 1 mm در سرعت‌های اولیه متفاوت..... 45
- شکل 5-18: تغییر مربع قطر برحسب زمان برای قطره هگزان در سرعت اولیه 1 m/s و برای قطرهای اولیه متفاوت..... 46
- شکل 5-19: تغییر دما برحسب زمان برای قطره هگزان به قطر 1 mm در سرعت‌های اولیه متفاوت..... 47
- شکل 5-20: تغییر دما برحسب زمان برای قطره هگزان در سرعت اولیه 1 m/s و برای قطرهای اولیه متفاوت..... 48
- شکل 5-21: تغییر مربع قطر بر حسب زمان برای سوخت‌های مختلف در حالت اول..... 49
- شکل 5-22: تغییر دما بر حسب زمان برای سوخت‌های مختلف در حالت اول..... 50
- شکل 5-23: تغییر مربع قطر بر حسب زمان برای سوخت‌های مختلف در حالت دوم..... 51
- شکل 5-24: تغییر دما بر حسب زمان برای سوخت‌های مختلف در حالت دوم..... 51
- شکل 5-25: تغییر مربع قطر برحسب زمان برای قطره بنزن به قطر 1 mm در سرعت‌های اولیه متفاوت..... 52
- شکل 5-26: تغییر مربع قطر برحسب زمان برای قطره بنزن در سرعت اولیه 30 m/s و برای قطرهای اولیه متفاوت..... 53
- شکل 5-27: تغییر دما برحسب زمان برای قطره بنزن به قطر 1 mm در سرعت‌های اولیه متفاوت..... 54
- شکل 5-28: تغییر دما برحسب زمان برای قطره بنزن در سرعت اولیه 30 m/s و برای قطرهای اولیه متفاوت..... 54
- شکل 5-29: تغییر مربع قطر برحسب زمان برای قطره دکان به قطر 1 mm در سرعت‌های اولیه متفاوت..... 55
- شکل 5-30: تغییر مربع قطر برحسب زمان برای قطره دکان در سرعت اولیه 30 m/s و برای قطرهای اولیه متفاوت..... 56
- شکل 5-31: تغییر دما برحسب زمان برای قطره دکان به قطر 1 mm در سرعت‌های اولیه متفاوت..... 57
- شکل 5-32: تغییر دما برحسب زمان برای قطره دکان در سرعت اولیه 30 m/s و برای قطرهای اولیه متفاوت..... 57

- شکل 5-33: تغییر مربع قطر برحسب زمان برای قطره هپتان به قطر 1 mm در سرعت‌های اولیه متفاوت
58.....
- شکل 5-34: تغییر مربع قطر برحسب زمان برای قطره هپتان در سرعت اولیه 30 m/s و برای قطرهای
اولیه متفاوت..... 58.....
- شکل 5-35: تغییر دما برحسب زمان برای قطره هپتان به قطر 1 mm در سرعت‌های اولیه متفاوت..... 59.....
- شکل 5-36: تغییر دما برحسب زمان برای قطره هپتان در سرعت اولیه 30 m/s و برای قطرهای اولیه
متفاوت..... 60.....
- شکل 5-37: تغییر مربع قطر برحسب زمان برای قطره هگزان به قطر 1 mm در سرعت‌های اولیه متفاوت
60.....
- شکل 5-38: تغییر مربع قطر برحسب زمان برای قطره هگزان در سرعت اولیه 30 m/s و برای قطرهای
اولیه متفاوت..... 61.....
- شکل 5-39: تغییر دما برحسب زمان برای قطره هگزان به قطر 1 mm در سرعت‌های اولیه متفاوت..... 62.....
- شکل 5-40: تغییر دما برحسب زمان برای قطره هگزان در سرعت اولیه 30 m/s و برای قطرهای اولیه
متفاوت..... 62.....
- شکل 5-41: تغییر مربع قطر بر حسب زمان برای سوخت‌های مختلف در حالت اول..... 64.....
- شکل 5-42: تغییر دما بر حسب زمان برای سوخت‌های مختلف در حالت اول..... 64.....
- شکل 5-43: تغییر مربع قطر بر حسب زمان برای سوخت‌های مختلف در حالت دوم..... 65.....
- شکل 5-44: تغییر دما بر حسب زمان برای سوخت‌های مختلف در حالت دوم..... 66.....

فصل 1 - مقدمه

1-1 - پیشگفتار

جریان ذرات و قطرات در سیال زیرمجموعه‌ای از جریان‌های چند جزئی دوفازی است. این جریان‌ها دامنه وسیعی از کاربردهای علمی و صنعتی را پوشش می‌دهند. منظور از جزء در این حالت یک گونه شیمیایی مثل آب است. کلمه فاز نیز بر جامد، مایع یا گاز بودن ماده دلالت می‌کند. جریان‌های دوفازی تک جزئی عموماً به صورت جریان یک مایع به همراه بخار آن می‌باشد. جریان‌های دوفازی را می‌توان به سه گروه تقسیم کرد:

1. گاز-مایع

2. گاز-جامد

3. مایع-جامد

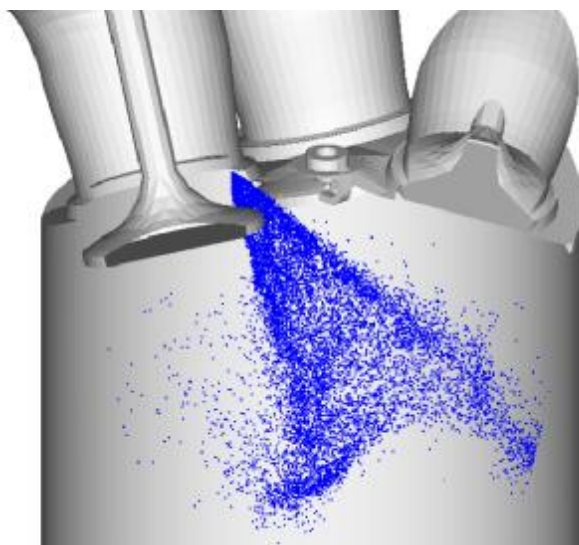
برای گروه اول می‌توان به جریان قطرات مایع در داخل هوا اشاره کرد. فاز مایع به صورت پراکنده شده¹ در داخل فاز گاز پیوسته جریان دارند و یکی از پرکاربردترین گونه‌های جریان‌های دوفازی است. گروه دوم مشابه گروه اول است با این تفاوت که به جای ذرات مایع، ذرات جامد به عنوان فاز پراکنده وجود دارند. گروه سوم شامل ذرات جامدی هستند که توسط یک فاز مایع انتقال داده می‌شوند. این دسته هم کاربرد زیادی در صنعت دارد. به عنوان مثال می‌توان به دستگاه برش فلزات با آب اشاره کرد، که در آنها از ذرات جامد به عنوان ذرات ساینده در داخل آب که با سرعت زیاد به فلز برخورد می‌کنند، اشاره کرد. در چند دهه‌ی گذشته تلاش‌های زیادی برای تحلیل، بررسی و مدل‌سازی جریان‌های دوفازی صورت گرفته است. استخراج روابط تجربی از طریق استفاده از نتایج آزمایشگاهی، روی جریان‌های دوفازی برای پیشگویی رفتار این نوع جریان‌ها در همین راستا بوده است. همزمان با توسعه رایانه‌ها و روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی²، مدل‌سازی عددی این جریان‌ها گسترش یافته است. البته پیچیدگی جریان‌های دوفازی باعث شده فرضیات ساده‌کننده زیادی در مدل‌سازی عددی آنها در نظر گرفته شود. علاوه بر این، نتایج تجربی برای بررسی اعتبار روش‌های عددی کم است.

¹ Dispersed

² Computational fluid dynamic (CFD)

جریان های دو فازی مایع - گاز کاربردهای زیادی در صنعت و علوم دارند، این جریان ها شامل تبخیر¹ (یا میعان²) قطرات شبه کروی در محیط های با دمای زیاد (یا کم) است که به عنوان نمونه به موارد زیر می-توان اشاره کرد:

خنک کاری توسط اسپری³، احتراق⁴، اطفاء حریق⁵، پیش اختلاط سوخت و هوا در محفظه احتراق⁶، کوره های صنعتی، موتورهای موشک سوخت مایع، خشک کن های پاششی و غیره. در سیستم های احتراقی با سوخت مایع، ابتدا باید فاز مایع گسسته شود و در دمای زیاد محفظه احتراق تبدیل به بخار شده و سپس احتراق صورت بگیرد (شکل 1-1).



شکل 1-1: محفظه احتراق یک موتور درونسوز

در سیستم های سرمایشی معمولاً از آب استفاده می شود، در اثر اسپری شدن، آب تبدیل به قطرات ریز با دمای کم شده و سپس در اثر برخورد با سطح داغ بخار می شوند و جسم را سرد می کند (شکل 1-2):

¹ Evaporation

² Condensation

³ Spray

⁴ Combustion

⁵ Fire control

⁶ Air-fuel premixing in combustor



شکل 1-2: سیستم سرمایش قطعات ماشین کاری شده

در همه موارد مذکور فاز مایع به تعداد زیادی ذرات ریز، گسسته می‌شود و در داخل یک فاز پیوسته گازی تبخیر می‌شود. معادلات ریاضی حاکم بر سیستم فوق بدلیل اتصال¹ معادلات غیر خطی انرژی، مومنتم و تبادل جرم شکل پیچیده‌ای دارند.

1-2 - تاریخچه

یکی از اولین تحقیقات صورت گرفته برای تبخیر قطره توسط اسپالدینگ² در سال 1953 انجام شد. نتیجه پژوهش او، ارائه مدلی بر اساس قانون کلاسیک³ مربع قطر می‌باشد [1]. او این مدل را با فرض ثابت بودن دما و سرعت هوای محیط برای یک قطره تنها به دست آورد و رابطه‌ای برای میزان شار جرمی ارائه داد. همزمان با او گودسیو⁴ نیز نتایج مشابهی به دست آورد [2]. پس از آنها کرو⁵ و همکاران در سال 1977، با فرض غیرقابل حل بودن مایع در گاز، مدلی تحت عنوان، مدل مقایسه‌ای انتقال جرم-حرارت⁶ (HMTA) ارائه نمودند، که مستقیماً با استفاده از شرط مرزی کسر جرمی بخار سوخت در سطح قطره بدست می‌آید [3].

زمانی که نرخ تبخیر افزایش می‌یابد، نتایج روش‌های تعادلی اختلاف زیادی با نتایج تجربی نشان می‌دهند، اولین بار بلان⁷ و سومرفیلد⁸ در سال 1978، در مدل‌سازی احتراق قطره متوجه اهمیت فرایندهای

¹ Coupling

² Spalding

³ Classic

⁴ Godsave

⁵ Crowe

⁶ Heat-mass transfer analogy model

⁷ Bellan

⁸ Summerfield

غیر تعادلی¹ در اندازه قطرات متداول (در حدود 0/5 میلی متر) در کاربردهای صنعتی شدند و قانون تبخیر غیرتعادلی لانگمویر- نادنسن² را برای استفاده در تبخیر قطرات معرفی کردند [4]. جکسون³ و داویدسون⁴ در سال 1983، برای قطرات بسیار ریز که در طی فرایند میعان و فرایند هسته-ای⁵ بوجود می آیند، قانون غیرتعادلی هرز - نادنسن⁶، که در ناحیه مولکول های آزاد، یعنی جایی که مسافت طی شده توسط مولکول های گاز در فضای آزاد بسیار بزرگتر از ضخامت فیلم گاز فشرده است، کاربرد دارد، را در مدل جریان مایع-گاز خود وارد کردند [5].

آگاروال⁷ و همکاران در سال 1984، مدل های مختلف تبخیر را برای استفاده در شبیه سازی لاگرانژی⁸ اسپری، بکار بردند [6]. آنها استفاده از یک مدل متقارن کروی⁹ با ضریب هدایت محدود¹⁰ برای مایع در حالت ایستا و یک مدل متقارن محوری¹¹ برای جریان داخل قطره برای حالتی که عدد رینولدز¹² قطره بزرگتر از یک می باشد را پیشنهاد کردند. متأسفانه هیچ یک از این دو مدل برای شبیه سازی سیستم-هایی که شامل تعداد زیادی قطره هستند مناسب نمی باشند. علت این امر، هزینه بالای محاسبات مورد نیاز برای تحلیل جریان داخلی و لایه مرزی خارجی روی سطح قطره می باشد. بعلاوه در این پژوهش مقایسه ای بین مدل های مختلف و مدل های غیر تعادلی با مدل کلاسیک و نتایج تجربی، انجام نگرفته است.

سیریگنانو¹³ در سال 1993، با صرف نظر کردن از میدان جریان پیچیده به بررسی و مدل سازی معادلات اندازه حرکت¹⁴، انتقال حرارت و انتقال جرم یک قطره پرداخت [7]. معادلات بدست آمده توسط او در روش های مختلفی مانند مدل سازی مستقیم عددی¹⁵ و یا در مدل سازی های اسپری و حالت آشفته¹⁶ که بر اثر حرکت قطرات در داخل فاز گاز ایجاد می شود، نیز استفاده شد.

¹ Non-equilibrium

² Langmuir-Knudsen

³ Jackson

⁴ Davidson

⁵ Nucleation processes

⁶ Herz-Knudsen

⁷ Aggarwal

⁸ Lagrangy

⁹ Spherically symmetric

¹⁰ Finite liquid conductivity

¹¹ Axisymmetric

¹² Reynolds

¹³ Sirignano

¹⁴ Momentum

¹⁵ Direct numerical simulation (DNS)

¹⁶ Turbulent