مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1396، دوره 17، شماره 1، ص‌ص 293-304

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه آثار ناپایایی بر تبخیر قطره سوخت‌های چندجزیی

اصغر عظیمی[1]، آرش عرب‌خلج[1]، حجت قاسمی[2]*

1-دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
*تهران، صندوق‌پستی 163-16765، h_ghassemi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 08 آبان 1395
پذیرش: 14 دی 1395
ارائه در سایت: 26 دی 1395

کلید واژگان:
اثر گذرایی
تبخیر قطره
چندجزئی
سوخت

چکیده

هدف از این مقاله بررسی ویژگی‌های تبخیر سوخت‌های تک‌جزئی و چندجزئی و مطالعه اثر ترم ناپایایی بر تبخیر قطرات این سوخت‌ها می‌باشد. بدین منظور از دو رویکرد کاملا گذرا و شبه‌پایا استفاده شده است. در این دو رویکرد معادلات اجزا، ممنتوم، و انرژی برای فاز گاز و معادلات اجزا و انرژی برای فاز مایع، با فرض خواص متغیر با دما، به صورت عددی حل شده‌اند. نتایج حاصل از روی‌کرد کاملا گذرا برای قطرات تک‌جزئی و چندجزئی در فشار اتمسفریک برای سوخت‌هایی با فراریت کم و زیاد و در گستره‌ی دمایی متنوع، تطابق مناسبی با داده‌های تجربی موجود در ادبیات دارد. در این مطالعه از سه هیدروکربن هپتان، دکان، و هگزادکان به منظور بررسی آثار فراریت سوخت بر تبخیر استفاده شده است. با بررسی تبخیر سوخت دو جزئی، از منظرهای متفاوت تبخیر چند مرحله‌ای برای قطرات چندجزئی بیان شده است. با استفاده از دو معیار ناپایایی مربوط به نفوذ جرمی بخار سوخت و نفوذ حرارت در سطح قطره، میزان شبه‌پایا بودن فرآیندهای حرارت و نفوذ در فاز گاز بررسی شده، و میزان انحراف رویکرد گذرا از رویکرد شبه‌پایا توجیه شده است. نتایج نشان می‌دهند که دمای محیط و نوع سوخت تاثیر زیادی در ناپایایی دارند؛ بطوریکه با افزایش دما و سنگین‌تر شدن سوخت میزان انحراف رویکرد شبه‌پایا از رویکرد گذرا افزایش می‌یابد. همچنین انحراف بین نتایج دو رویکرد با افزایش اختلاف فراریت سوخت‌ها بیشتر می‌شود و رویکرد شبه‌پایا برای قطرات سبک‌تر و اجزایی با فراریت مشابه نتایج نزدیکتری به رویکرد گذرا ارائه می‌دهد.

Influences of Unsteadiness on the Multicomponent Fuel Droplets

Asghar Azimi, Arash Arabkhalaj, Hojat Ghassemi*

Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 16765-163, Tehran, Iran, h_ghassemi@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 29 October 2016
Accepted 03 January 2017
Available Online 15 January 2017

Keywords:
Unsteadiness Effect
Droplet Evaporation
Multicomponent
Fuel

ABSTRACT

The aim of present article is investigation of evaporation of single- and multi-component fuels droplets and the effect of unsteadiness term on it. Two approaches are used: fully transient and quasi-steady. The species, momentum, and energy equations for gas phase and species and energy equations for liquid phase are solved numerically by assuming variable properties with respect to temperature. The results are obtained from the fully transient approach show an acceptable compliance with experimental data at atmospheric pressure in a wide range of fuel volatility and ambient temperature for the single- and multi-component fuels. Heptane, decane, and hexadecane are used in order to investigate the effects of fuel volatility on evaporation.The steadiness of processes in the gas phase has been checked by using two measures of unsteadiness related to the mass and heat diffusion of fuel vapor on the droplet surface. The deviations of the results of the quasi-steady approach from the fully transient have been justified by the unsteadiness measures. The results show that fuel and ambient temperature have significant effects on the unsteadiness. For heavier fuels and higher ambient temperature, the diviation of quasi-steady approach from fully transient increases. Also, the diviation becomes higher when the differences between volatility of component increase. Therefore, it is concluded that the quasi-steady approach presents reasonable results for lighter fuels in the case of single component and whenever the volatilities of components are very close.

1- مقدمه

تحقیقات تئوری در تبخیر اسپری و فرآیند احتراق در موتورهای سوخت احتراق داخلی، محفظه احتراق توربین گاز و بویلرهای با سوخت مایع معمولا نیازمند محاسبه‌ی نرخ تبخیر سوخت‌های مختلف است. تخمین ویژگی‌های حیاتی موتور مانند میزان مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها بطور چشمگیری به دقت مدل‌های ارائه شده برای تبخیر قطره متکی است. تبخیر قطره در دهه‌های گذشته به‌طور گسترده‌ای مورد بررسی تجربی و عددی قرار گرفته است. برای مطالعه‌ی تاریخچه‌ی پیدایش این مدل‌ها و نحوه‌ی پیشرفت آن‌ها می‌توان به مقالات ویلیامز [1]، لاو [2] و پنگ و آگاروال [3] مراجعه کرد. همچنین مدل‌های کلاسیک تبخیر قطره در کتاب‌هایی نظیر کو [4] و سیریگنانو [5] و ساژین [6] نیز به تفصیل آورده شده‌اند.

بیشتر سوخت‌های مایعی که در محفظه‌های احتراق استفاده می‌شوند

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Azimi, A. Arabkhalaj, H. Ghassemi, Influences of Unsteadiness on the Multicomponent Fuel Droplets, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 293-304, 2017 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.53.3]

چندجزئی می‌باشند. ترکیب سوخت می‌تواند تاثیر زیادی بر روی رفتار قطره سوخت در فرایند تبخیر و احتراق داشته باشد؛ به ویژه برای سوخت‌هایی که از اجزایی با خواص بسیار متفاوت تشکیل شده است [7]. تبخیر قطرات چندجزئی ماهیتی متفاوت از قطرات تک‌جزئی دارد. در قطره‌های چندجزئی اجزا با نرخ متفاوت تبخیر شده و در نتیجه گرادیان غلظت درون قطره به وجود می‌آید و فرایند انتقال جرم درون فاز مایع نیز اهمیت پیدا می‌کند. علاوه بر فرایند انتقال جرم در فاز مایع و اختلاف فراریت اجزا، شرایط تغییر فاز در سطح قطره و خواص ترموفیزیکی که تابعی از ترکیب و شرایط کاری می‌باشند نیز می‌توانند بر تبخیر قطره تاثیرگذار باشند [8]. تفاوت در ترکیب سوخت می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر روی تغییرات دمایی قطره نیز بگذارد [9]. هم‌چنین به دلیل تغییرات پیوسته ترکیب و دمای قطره، نرخ تبخیر وابستگی شدیدی به زمان دارد [10]. همچنین از آن‌جایی که نرخ تبخیر قطرات تاثیر زیادی بر فرایند احتراق و هم‌چنین سینتیک شیمیایی آن می‌گذارد [11] حصول درک مناسبی از فرایند تبخیر سوخت‌های مایع در فرایندهای شیمیایی از اهمیت زیادی برخوردار خواهد بود.. از این رو محققین بسیاری تبخیر قطره چندجزئی را به صورت تجربی و تئوری بررسی نموده‌اند. استنگل و همکاران تبخیر قطره تک و دوجزئی در شرایط سقوط آزاد را در دما و فشارهای زیاد بررسی نموده و با مقایسه نتایج تئوری و داده‌های تجربی، ترکیبی از روابط موجود برای اعداد ناسلت و شروود و نحوه‌ی محاسبه خواص را برای به دست آوردن نتایج دقیق‌تر ارائه نموده‌اند [12]. دیف و همکارانش به بررسی تبخیر قطرات چندجزئی در محیطی با جابجایی آزاد و اجباری و مقایسه‌ی آن با نتایج تئوری پرداختند [13]. ایشان نتیجه گرفتند که وجود جابجایی آزاد بیش از جابجایی اجباری بر تبخیر و هم‌چنین نتایج مدل تاثیر می‌گذارد و این تاثیر با افزایش دما کاهش می‌یابد. قاسمی و همکاران تبخیر قطره دوجزئی هپتان-هگزادکان را در دما و فشار زیاد بررسی نموده و به دلیل اختلاف فراریت دوجزء تبخیر ترجیحی و دومرحله‌ای را مشاهده نمودند [14].

در چندین دهه گذشته مطالعات تئوری زیادی بر روی تبخیر قطرات تک و چندجزئی انجام گرفته است که می‌توان جمع‌بندی آن‌ها را در مقالات مروری مختلف [15-17] و مونوگراف‌ها [6,5] مطالعه نمود. در قطرات چندجزئی غلظت و فراریت نسبی اجزا، قابلیت حل‌شدن اجزا و انتقال اجزا درون قطره باید در نظر گرفته شود [2]. به طور کلی نفوذ (دیفیوژن) جرم در فاز مایع آهسته‌تر از نفوذ حرارت فاز مایع و نفوذ جرم، حرارت، و مومنتوم در فاز گاز می‌باشد [5]. در تئوری دو حالت حدی برای نرخ نفوذ جرم در فاز مایع وجود دارد: حالت پس‌روی سریع (دیفیوژن صفر) و حالت دیفیوژن بی‌نهایت [16]. در عمل اما تبخیر در حالت میانه‌ی نرخ نفوذ محدود انجام می‌شود. هرچند در ابتدای عمر قطره تبخیر سریع و ترجیحی (معادل حالت دیفیوژن بی‌نهایت) می‌باشد اما با گذر زمان تبخیر آهسته و کنترل‌شونده با نفوذ (حالت دیفیوژن محدود) خواهد شد. به دلیل سریع‌تر بودن فرایندهای انتقال فاز گاز نسبت به فرایندهای انتقال در فاز مایع، معمولا فاز گاز در مدل‌های تبخیر شبه‌پایا فرض می‌شود. در رهیافت شبه‌پایا فرض می‌شود که فاز گاز به سرعت به حالت پایای خود می‌رسد و از این رو معادلات فاز گاز به صورت پایا حل می‌شوند. ابراهیمیان و هبچی با استفاده از قانون هیرشفلدر برای تخمین سرعت نفوذ در فاز گاز، مدلی شبه‌پایا برای تبخیر قطره چندجزئی در فشارهای مختلف توسعه داده‌اند [18]. لنگ و همکارانش با ارائه‌ی یک مدل تحلیلی شبه‌پایا برای تبخیر قطرات چندجزئی، فشار معیاری ارائه نمودند که در کمتر از آن فرض گاز ایده‌آل دقت خوبی دارد [19]. ایشان هم‌چنین مشاهده نمودند که میزان جذب تشعشع در رفتار تبخیری بطور چشمگیری به قطر قطره و دمای محیط بستگی دارد. جو و همکارانش با ارائه‌ی یک مدل شبه‌پایا به بررسی تاثیر اندازه‌ی قطره در تبخیر قطرات دو جزئی پرداخته و گزارش دادند که با کاهش قطر اولیه‌ی نرخ تبخیر بیشینه هر دو جز کاهش می‌یابد [20]. سعیدی و همکاران به منظور مدل‌سازی اسپری بیواتانول در داخل محفظه احتراق از مدل تبخیر سیریگنانو استفاده کرده‌اند[21].

تونینی و کوسالی با ارائه‌ی یک مدل تحلیلی به تخمین عمر قطرات دو و سه جزئی با توجه به تاثیر نفوذ تمامی اجزا پرداخته‌اند [22]. ایشان همچنین با حل تحلیلی معادلات استفان مکسول به ارائه مدلی برای تخمین قطره پرداخته و نشان دادند که مدل‌های براساس قانون فیک، نرخ تبخیر را خصوصا در نرخ های بالای تبخیر کمتر از مقدار واقعی خود تخمین می‌زنند [23]. چن و همکارانش به بررسی تبخیر قطرات چندجزئی غیرایده‌آل در شرایط شبه‌پایا با استفاده از ضریب فعالیت پرداخته و سه مدل متفاوت نفوذ صفر، نفوذ بی‌نهایت و دیفیوژن محدود برای انتقال اجزا را بررسی نمودند [24]. ایشان نتیجه گرفتند که برای مخلوط بوتانول-دکان هر سه مدل نتایج تقریبا یک‌سانی می‌دهند و با دقت خوبی می‌توانند رفتار تبخیر قطره را پیش‌بینی کنند. مظاهری و همکاران از مدل شبه‌پایا به‌منظور بررسی اسپری تبخیری دیزل در محفظه احتراق بهره برده‌اند [25]. ما و همکارانش با ارائه یک مدل شبه‌پایا به بررسی تبخیر قطرات سه جزئی استون-بوتانول-اتانول و یک سوخت دیزل شش جزئی پرداختند [26]. ایشان نشان دادند که عمر قطرات مورد بررسی، به‌طور غیرخطی با افزایش دمای محیط کاهش می‌یابد. گوهین و همکارانش با ارائه‌ی یک مدل شبه‌پایا به بررسی تبخیر قطرات چندجزئی با حضور بخار سوخت در محیط پیرامون قطره پرداختند [27]. آن‌ها نشان دادند که رابطه‌ی تجربی $\mathrm{Sh}(1+B_{\mathrm{M}})^{0.7}=2$ که پیش‌تر برای قطرات تک‌جزئی به اثبات رسیده بود تطابق خوبی برای قطرات چندجزئی نیز دارد. قاسمی و شاهسون با استفاده از مدلی تحلیلی- عددی قطره بیودیزل را تحت شرایط کاری مختلف بررسی کرده‌اند[28].

هرچند نشان داده شده است که گذرا بودن فرایندهای فاز گاز منجر به تغییر نرخ تبخیر از مرتبه $O\left[\left(\rho_{\mathrm{g}}/\rho_{\mathrm{L}}\right)^{1/2}\right]$ می‌شود که در بسیاری از شرایط کوچک می‌باشد [29]، ژو و همکاران با معرفی نسبت زمان‌های مشخصه به عنوان پارامتر نمایانگر گذرا بودن فاز گاز، نتیجه گرفتند که در تبخیر قطره تک‌جزئی گذرا بودن فاز گاز در مراحل اولیه تبخیر، در مکان‌های نزدیک به سطح قطره و در فشارهای زیاد اهمیت دارد [30]. هم‌چنین فایبرگ و همکاران نشان دادند که هرچند مدل‌های شبه‌پایا و گذرا در قطرات تک‌جزئی عمر قطره را نزدیک به هم تخمین می‌زنند اما نحوه تغییر شعاع قطره در دو مدل تفاوت زیادی داشته و عدد ناسلت و شروود در مدل گذرا متفاوت از مدل شبه‌پایا می‌باشند [31]. ژانگ و همکاران نیز با استفاده از رهیافت گذرا و با حل عددی معادلات به صورت متقارن محوری نتیجه گرفتند که در تبخیر قطره هپتان در فشار زیاد رفتار گذرا در تمام عمر قطره مشاهده می‌شود [32]. آگاروال و همکاران با حل عددی معادلات گذرای تبخیر قطره هگزان نتیجه گرفتند که با افزایش دمای محیط، فشار محیط مینیمم و زمان لازم برای رسیدن به شرایط تبخیر بحرانی کاهش می‌یابد [33]. بیروک و ابوالسود با حل عددی معادلات گذرا و سه بعدی جرم، مومنتوم، انرژی و انتقال اجزا برای یک قطره هپتان قرار گرفته در یک جریان مغشوش گاز نتیجه گرفتند که قانون کلاسیک d^2 تنها برای دوره کوتاهی از عمر قطره برقرار است [34].

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.53.3]

ا بررسی ادبیات موضوع، مشخص می‌شود که تاثیر همه‌ی ترم‌های موثر در تبخیر قطره از جمله تغییرات زمانی و آنتالپی نفوذ درمطالعات محدودی دیده شده است. همچنین بسیاری از مطالعات انجام شده فرآیندهای فاز گاز را به صورت شبه‌پایا در نظر گرفته‌اند. تا چه اندازه این مدل‌ها برای پیش‌بینی عمر قطره و هم‌چنین نرخ تبخیر سوخت‌های مختلف مناسبند؟ این مدل‌ها برای دماهای مختلف محیط چگونه است؟ در این مقاله با ارائه مدل گذرای کامل با درنظر گرفتن تغییرات خواص با دما و به تبع آن با مکان و زمان به یافتن پاسخ این سوال‌ها پرداخته شده است. در این راستا رفتار تبخیری قطرات سوخت‌های تک‌جزئی و چندجزئی با فراریت‌های مختلف و در محیط‌هایی با دماهای مختلف با رویکردهای گذرا و شبه‌پایا بررسی شده‌اند. همچنین مطالعه در مورد تأثیر ترم ناپایایی به‌طور محدودی در مراجع دیده می‌شود و تاثیر همه عوامل موثر در فرآیند تبخیر بر روی آن بررسی نشده است. در این مقاله، تأثیر دمای محیط، نوع سوخت و ترکیب چندجزئی بر روی ترم ناپایایی مطالعه شده است، و با معرفی دو کمیت، تاثیر آن به‌طور دقیق مطالعه شده و اثر آن بر روی فرآیند تبخیر توجیه شده است.

2- مدل فیزیکی

در این مقاله تبخیر یک قطره چندجزئی در محیط نیتروژن مطالعه می‌شود. در ابتدا شرایط حاکم بر فرایند تبخیر و سپس معادلات حاکم بر آن تشریح می‌شوند. در مدل‌سازی حاضر فرض می‌شود که محیط ساکن و عاری از گرانش زمین بوده و قطره به شکل کره می‌باشد. همچنین فرض می‌شود که در سطح مشترک مایع و بخار تعادل ترمودینامیکی برقرار است. معادلات حاکم بر چنین سیستمی شامل معادلات بقای جرم و انرژی و معادله ممنتوم برای محیط گازی پیرامون قطره و معادلات بقای اجزا و انرژی برای مایع تشکیل دهنده قطره می‌باشد. این معادلات در دستگاه مختصات کروی یکبعدی و متقارن محوری بیان می‌شوند. نفوذ اجزای گاز با قانون فیک بیان شده است. همچنین از آثار جانبی گرادیان‌های دمایی مانند اثر دوفور و سورت صرف نظر شده است. علاوه بر این فرض شده است که خواص گازها و مایع تابعی از دما در هر مکان و زمانی است.

معادلات حاکم بر تبخیر قطره با دو رویکرد گذرا و شبه‌پایا به شرح زیر ارائه شده‌اند.

2-1-حالت گذرا

معادلات حاکم بر فاز گازی به شرح زیر است:

$$\frac{\partial \rho_{kg}}{\partial t}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(\rho_{kg}ur^2\right)=\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left[\rho_{g}D_{kg}r^2\frac{\partial}{\partial r}\left(Y_{kg}\right)\right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_{g}u}{\partial t}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(\rho_{g}u^2r^2\right)=\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left[\mu_{g}r^2\frac{\partial u}{\partial r}\right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_{g}h_{g}}{\partial t}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(\rho_{g}h_{g}ur^2\right)=\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left[k_{g}r^2\frac{\partial T_{g}}{\partial r}\right]+\frac{1}{r^2}\left\{\frac{\partial}{\partial r}r^2\rho_{g}D_{kg}\left[\sum_{k=1}^{N}h_{kg}\frac{\partial}{\partial r}\left(Y_{kg}\right)\right]\right\} \quad (3)$$

$$P_{T}=\rho_{g}RT_{g} \quad (4)$$

که معادلات (1) تا (4)، به ترتیب، معادلات بقای جزء، مومنتوم، و بقای انرژی و معادله‌ی حالت گاز ایده‌آل می‌باشند. در این معادلات t نماینده‌ی زمان، r نشان‌دهنده‌ی مکان، u سرعت در فاز گاز، N_g تعداد اجزای گازی ، ρ_g چگالی کل، μ_g ضریب ویسکوزیته کل، k_g ضریب هدایت حرارتی کل فاز گاز و h_{kg}، D_{kg}، ρ_{kg} به ترتیب آنتالپی، ضریب نفوذ و چگالی جز kام می‌باشند. مجهولات نیز T_g، u و $\rho_{kg}/\rho=Y_{kg}$ به ترتیب دما و سرعت و کسرجرمی در فاز گاز می‌باشند. معادلات حاکم بر فاز مایع نیز به شرح زیر است:

$$\frac{\partial \rho_{kL}}{\partial t}=\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\rho_{L}D_{L}\frac{\partial Y_{kL}}{\partial r}\right),k=1,\dots,N_{L} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{L}C_{PL}T_{L})=\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(k_{L}r^2\frac{\partial T_{L}}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\sum_{k=1}^{N_{L}}\rho_{L}D_{kL}h_{k}\frac{\partial Y_{kL}}{\partial r}\right) \quad (6)$$

معادلات (5) و (6) به ترتیب بقای جز و بقای انرژی هستند. اندیس L نشان دهنده‌ی فاز مایع است و مجهول این معادلات به ترتیب کسر جرمی فاز مایع $\rho_{kL}/\rho=Y_{kL}$ و دمای قطره T_L می‌باشد.

2-2- حالت شبه‌پایا

حالت شبه‌پایا با فرض پایا بودن فرآیند در فاز گاز حاصل می‌شود. از این‌رو معادلات حاکم در این حالت را می‌توان با حذف ترم تغییرات زمانی از معادلات فاز گازی استخراج کرد. این معادلات به‌صورت زیر بازنویسی می‌شوند:

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(\rho_{kg}ur^2\right)=\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left[\rho_{g}D_{kg}r^2\frac{\partial}{\partial r}\left(Y_{kg}\right)\right] \quad (7)$$

$$\rho_{g}ur^2=\text{const} \quad (8)$$

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(\rho_{g}h_{g}ur^2\right)=\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left[k_{g}r^2\frac{\partial T_{g}}{\partial r}\right]+\frac{1}{r^2}\left\{\frac{\partial}{\partial r}r^2\rho_{g}D_{kg}\left[\sum_{k=1}^{N}h_{kg}\frac{\partial}{\partial r}\left(Y_{kg}\right)\right]\right\} \quad (9)$$

لازم به ذکر است که معادلات حاکم در فاز مایع بدون تغییر باقی می‌مانند.

2-3- شرایط مرزی و اولیه

در مرکز قطره فرض عدم وجود گرادیان دمایی $\partial T_L/\partial r$ و عدم وجود گرادیان غلظت $\partial Y_{kL}/\partial r$ حاکم است. همچنین در خیلی دورتر از سطح قطره داریم: $T\to T_\infty, P\to P_\infty, Y_{kF}\to 0, Y_{N_2}\to 0, u=0$ برای برقراری تعادل در سطح قطره از معادلات تعادلی ترمودینامیکی استفاده می‌شود. رابطه‌های (10) و (11) بیانگر تعادل شار جرمی و حرارتی در سطح قطره می‌باشند. معادله‌ی (10) بیان میدارد که در سطح قطره نرخ خالص شار جرمی جز k در مایع با نرخ خالص شار آن جز در گاز برابر است. همچنین معادله (11) نشان دهنده‌ی این حقیقت است که گرمایی که از طریق هدایت قطره به درون می‌رود برابر است با مجموع گرمایی که از طریق هدایت و تشعشع از گاز اطراف دریافت می‌کند به‌علاوه خروج انرژی از سطح قطره به واسط انتقال جرم است. معادله (12) بیانگر تعادل فازهای بخار (گاز) و مایع از جز kام می‌باشد.

$$\dot{m}Y_{kg}=\rho_{L}D_{kL}A_{s}\frac{\partial Y_{kL}}{\partial r}|_{r=r_s^-}\dot{m}Y_{kg}-\rho_{g}D_{kg}A_{s}\frac{\partial Y_{kg}}{\partial r}|_{r=r_s^+} \quad (10)$$

$$-k_{L}\frac{\partial T_{L}}{\partial t}|_{r=r_s^-}=k_{g}\frac{\partial T_{g}}{\partial r}A_{s}+\sum_{k=1}^{N}\dot{m}Y_{kg}-\rho_{g}D_{kg}A_{s}\frac{\partial Y_{kg}}{\partial r}|_{r=r_s^+}\Delta H_{vk}-\alpha\sigma(T_\infty^4-T_s^4)A_{s} \quad (11)$$

$$X_{kg}=\frac{P_{Fs}}{P_{T}}X_{kL} \quad (12)$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.53.3]

که در آن Y_k، X_k به ترتیب کسر جرمی و مولی، A_s مساحت سطح قطره در هر لحظه، k ضریب هدایت حرارتی، ΔH_{vk} آنتالپی تبخیر جز kام، σ ثابت استفان بولتزمن، P_{Fs} فشار بخار، P_T فشارکل و α ضریب جذب بوده که این ضریب تابعی از دما و قطر قطره و نوع سوخت می‌باشد [36,35].

در سطح قطره با توجه به داشتن نرخ تبخیر، سرعت گاز از رابطه‌ی (13) به‌دست می‌آید.

$$\dot{m} = \rho_g A_s \left(u - \frac{\partial R(t)}{\partial t}\right)|_{r=r_s^+} \quad (13)$$

شعاع قطره در هر لحظه به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{m} = 4\pi r^2 \left(\frac{dR(t)}{dt}\rho_{Lm} + \frac{R(t)}{3}\frac{\partial \rho_{Lm}}{\partial t}\right) \quad (14)$$

که در آن ρ_{Lm} چگالی میانگین فاز مایع است.

شرایط اولیه نیز به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\text{At } t=0 \rightarrow \begin{cases} r \le R(t): T_L = T_0 \\ r \ge R(t): T_g = T_\infty, Y_{g-Fuel} = 0, Y_{N_2} = 1, u = 0 \end{cases}$$

2-4- الگوریتم حل

ابتدا به‌علت عدم برابری تعداد مجهولات با معادلات باید حدس اولیه‌ای به مسئله وارد شود. به همین دلیل ابتدا دمای سطح قطره و دبی تبخیر حدس زده می‌شوند. این حدس در مراحل بعدی اصلاح می‌شوند. در کنار این حدس‌ها به تمامی مجهولات مسئله یک مقدار اولیه معقول نیز نسبت داده می‌شود. در گام بعدی خواص موردنیاز برای حل معادلات مانند چگالی و ضریب نفوذ و ضریب هدایت و لزجت با دمای اولیه به‌دست آورده می‌شود. سپس تغییر شعاع اولیه با این خواص به‌دست آمده محاسبه شده و وارد

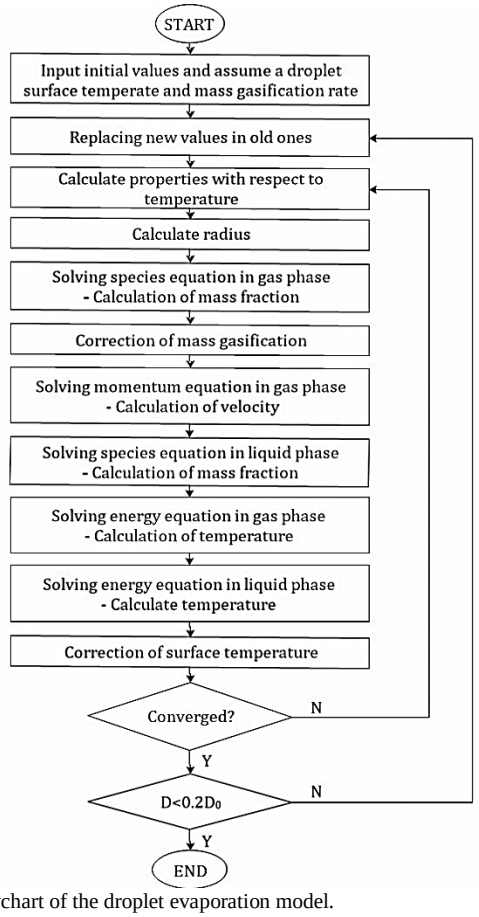


Fig.1 Flowchart of the droplet evaporation model.

شکل 1 فلوچارت مدل تبخیر قطره

معادله‌ی بقای فاز گاز می‌شود و در آن‌جا کسر جرمی اجزای مختلف فاز گاز محاسبه می‌شود. پس از آن دبی تبخیر حدس زده شده با داشتن مقادیر معلوم اصلاح می‌شود. در ادامه سرعت فاز گاز و کسر جرمی فاز مایع با حل معادله‌ی مومنتوم گاز و بقای جز مایع به‌دست می‌آید. در انتها با حل معادلات انرژی در فاز گاز و مایع پروفیل کامل دما نیز یافته می‌شود. در این مرحله دمای سطح مایع که حدس زده شده اصلاح می‌شود. حال با بررسی تفاوت مقادیر به‌دست آمده با حدس‌های اولیه، در صورت عدم تطابق، با جایگزینی مقادیر به‌دست آمده به‌عنوان حدس اولیه روند حل تکرار می‌شود و در صورت نزدیکی آن‌ها، وارد گام زمانی بعدی شده و همین روند تا زمانی‌که شعاع قطره به یک پنجم شعاع اولیه‌اش برسد ادامه پیدا می‌کند. در شکل نمودار جریان الگوریتم حل آورده شده است.

2-5- حل عددی

در ادامه‌ی روند حل مقادیر به‌دست آمده با مقادیر حدس زده شده مقایسه می‌شود و در صورت قرار گرفتن در محدوده‌ی معیار همگرایی، وارد گام زمانی بعدی می‌شود. معیار همگرایی در رابطه‌های (15) و (16) معرفی شده‌اند:

$$\frac{|T_s - T_{s-old}|}{T_s} < 10^{-4} \quad (15)$$

$$\frac{|\dot{m} - \dot{m}_{old}|}{\dot{m}} < 10^{-4} \quad (16)$$

این روند حل تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که قطر قطره به یک پنجم مقدار اولیه‌ی خود برسد. بنابراین شرط پایان حل از رابطه‌ی (17) به‌دست می‌آید.

$$\frac{R}{R_0} < 0.2 \quad (17)$$

گام زمانی برای حل 0.0001 ثانیه انتخاب شده است. تعداد گره‌های محاسباتی در فاز گاز و فاز مایع به ترتیب برابر با 1000 و 100 انتخاب شده‌اند. همچنین محیط پیرامون قطره تا 100 برابر شعاع اولیه قطره در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم با رویکرد حجم کنترل به‌صورت ضمنی و به روش کرنک نیکلسون گسسته‌سازی شده‌اند [27]. معادلات گسسته‌سازی شده با استفاده از الگوریتم ماتریس سه قطری TDMA حل شده‌اند.

2-6- خواص

- خواص اجزا:

نحوه‌ی محاسبه‌ی خواص اجزا در جدول آورده شده است.

- خواص مخلوط

الف) فاز گاز

$$\rho_g = \left(\sum_i \frac{Y_i}{\rho_i}\right)^{-1} \quad (18)$$

$$C_{pg} = \sum_i Y_i C_{pi} \quad (19)$$

$$D_{ig} = \frac{1 - X_i}{\sum_j X_i / D_{ij}} \quad (20)$$

لازم به ذکر است که ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی در فاز گاز از روش ویلک محاسبه می‌شود [40].

ب) فاز مایع

$$k_{avg}^L = \sqrt{\frac{1}{\sum_i \frac{Y_i}{k_{Li}^2}}} \quad (21)$$

$$\ln\bar{\mu}_L = \sum_{i=1} X_i \ln\bar{\mu}_{Li} \quad (22)$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.53.3]

جدول 1 روش‌های محاسبه و مراجع خواص ترموفیزیکی

Table 1. Methods of calulation and references of thermophysical properties

فاز گاز	
خاصیت	نحوه‌ی محاسبه
چگالی	قانون گاز کامل و قاعده آماگات
ظرفیت گرمایی ویژه	چند جمله‌ای ناسا [37] و استفاده از ثوابت هیدروکربن‌ها در مرجع [38]
ویسکوزیته	چندجمله‌ای ناسا [39] و استفاده از روش چانگ برای هیدروکربن‌ها [40]
ضریب هدایت حرارتی	چندجمله‌ای ناسا [39] و استفاده از روش چانگ برای هیدروکربن‌ها [40]
ضریب دیفیوژن	روش چاپمن-انسکاگ [4]
فاز مایع	
چگالی	از مرجع [41]
ظرفیت گرمایی ویژه	معادله‌ی لی کسلر [38]
ویسکوزیته	از مرجع API-TDB [38]
ضریب هدایت حرارتی	با داشتن ضریب هدایت حرارتی در نقاط جوش و ذوب از مرجع [38]
ضریب دیفیوژن	رابطه‌ی ویلک- چانگ [40]
فشار بخار	رابطه‌ی آنتوین [40]
گرمای نهان تبخیر	از مرجع API-TDB [38]

چگالی میانگین در فاز مایع از روش میانگین وزنی استفاده شده است.

$$\rho_{\mathrm{Lavg}} = \frac{\sum_j \rho_{\mathrm{L}j}(r_j^3 - r_{j-1}^3)}{R_s^3} \quad (23)$$

برای محاسبه‌ی باقی خواص مخلوط در فاز مایع از روابط موجود در فاز گاز استفاده می‌شود.

3- نتایج و تفسیر

در این بخش ابتدا اعتبار مدل ذکر شده برای قطرات تک و چندجزئی صحت‌سنجی شده است. سپس با استفاده از این مدل به بررسی ویژگی‌های تبخیر قطرات تک‌جزئی مانند تغییرات کسر جرمی و دمای سطح پرداخته شده است. در ادامه تخمین عمر این قطرات براساس دو روی‌کرد با یکدیگر مقایسه شده‌اند. سپس به بررسی تبخیر قطرات تک‌جزئی پرداخته شده است. آن‌گاه روند عمومی نتایج مانند تغییرات دمای سطح، توزیع کسر جرمی سوخت در فاز مایع و گاز آورده شده است بعد از آن اثرات ترم آنتالپی دیفیوژن و ترم تغییرات زمانی در تخمین عمر قطره بررسی شده است.

لازم به ذکر است که این مطالعه بر سه سوخت هپتان، دکان و هگزادکان تمرکز دارد. برخی از ویژگی‌های شاخص این سه سوخت در جدول 2 آمده است. براساس جرم مولکولی، می‌توان گفت که هگزادکان به‌عنوان سوخت سنگین و هپتان به‌عنوان سوخت سبک ایفای نقش می‌کنند.

3-1- اعتبارسنجی

نتایج مدل حاضر با داده‌های تجربی نومورا و همکارانش [42] و قاسمی و همکارانش [14] برای قطرات تک‌جزئی مقایسه شده‌اند و سپس اعتبار مدل گذرا از طریق مقایسه نتایج آن با دو دسته از داده‌های تجربی موجود در ادبیات برای قطرات چندجزئی سنجیده شده‌اند. برای نشان دادن این‌که مدل حاضر قابلیت تخمین مناسب عمر قطره، برای سوخت‌های متفاوت در بازه‌ی دمایی متنوعی را دارد نتایج آن با داده‌های تجربی قاسمی و همکارانش [14]

جدول 2 ویژگی‌های سوخت‌های مورد استفاده

Table 2. Main features of used fuels

سوخت	جرم مولکولی (g/mol)	چگالی (kg/m^3)	دمای جوش (K)	گرمای نهان (kJ/mol)
هپتان	100.21	684	371	31.77
دکان	142.29	730	447	38.75
هگزادکان	226.45	770	560	68.50

که برای سوخت دوجزئی هپتان و هگزادکان در دماهای متفاوت است مقایسه شده است. سپس برای تخمین عمر قطراتی که بیش از دو جزء دارند، نتایج مدل حاضر با داده‌های تجربی حاصل از کار ما و همکارانش [43] برای سوخت دیزل مقایسه شده است.

ابتدا برای صحت‌سنجی این مدل، عمر قطره با داده‌های تجربی نومورا و همکارانش [42] در چهار دمای مختلف و فشار اتمسفر با قطر 0.8 میلی‌متر و شرایط گرانش ضعیف در "شکل 2" مقایسه شده است. می‌توان گفت که مدل حاضر قابلیت باز تولید داده‌های تجربی در دماهای مختلف را دارد.

هپتان سوختی با دمای جوش کم و فراریت زیاد است. تغییرات دما در چنین سوختی خیلی زیاد نیست. به منظور بررسی اعتبار مدل گذرا برای سوختی با فراریت کم، مقایسه‌ای با تبخیر قطره هگزا دکان نیز انجام شده است. در "شکل 3" عمر قطره با داده‌های تجربی قاسمی و همکارانش [14] مقایسه شده است. قاسمی و همکارانش تبخیر قطره را در محیطی با فشار 1 بار، دماهای 673 K و با در نظر گرفتن گرانش بررسی کرده‌اند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مدل حاضر عمر قطره را بیشتر از داده‌های تجربی تخمین زده است. همان‌طور که در بخش فرضیات اشاره شد در مدل حاضر تأثیرات شتاب گرانش نادیده گرفته شده است. چاوو و همکارانش در مطالعه‌ای تأثیر شتاب گرانش بر عمر قطره را بررسی کرده‌اند [44]. آن‌ها نشان دادند که شتاب جاذبه باعث به وجود آمدن پدیده‌ی جابجایی اجباری در سطح قطره و به‌تبع آن افزایش انتقال حرارت به قطره شده که منجر به تسریع در فرآیند تبخیر و کاهش عمر قطره می‌گردد. از دیگر نکات این شکل، افزایش قطر قطره در ابتدای فرآیند تبخیر می‌باشد که علت آن انبساط قطره در اثر تغییرات چگالی با دما است که در رابطه‌ی (48) آورده شده است. این پدیده برای قطره‌ی هپتان ضعیف‌تر است. علت آن کم‌تر بودن دامنه تغییرات دمای آن نسبت به هگزادکان است.

در مقایسه‌ای دیگر در "شکل 4" نتایج به‌دست آمده از کار تجربی قاسمی و همکارانش مورد بررسی قرارگرفته‌اند [14]. این نتایج برای قطرات

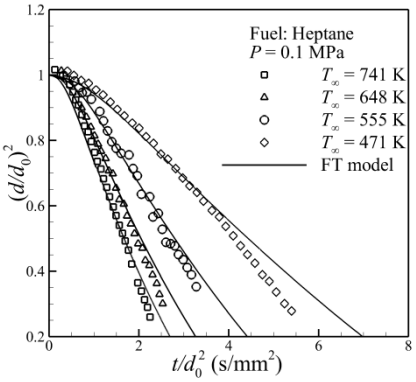


Fig.2 Comparison of heptane droplet vaporization with the experiment of Nomura et al [42]

شکل 2 مقایسه عمر قطره هپتان در فشار 1 بار با داده‌های تجربی نومورا [42]

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.53.3]

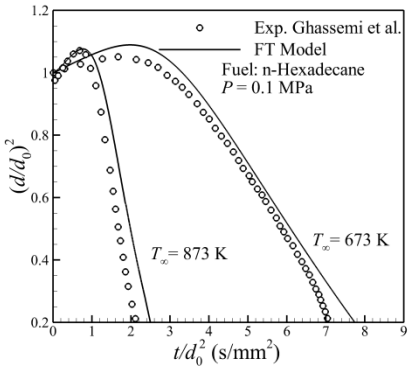


Fig.3 Comparison of hexadecane droplet vaporization with the experiment of Ghassemi et al. [14]

شکل 3 مقایسه عمر قطره هگزادکان در دمای 673 K و فشار 1 بار با داده‌های تجربی قاسمی[14]

دوجزئی هپتان و هگزادکان به ترتیب با درصد حجمی 50-50 درصد و قطر 1.1 mm در فشار 1 بار و در دماهای مختلف گرفته شده‌اند. علت اختلاف مدل با داده‌های تجربی در این است که کار قاسمی و همکارانش در شرایط گرانش معمولی بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در دماهای بالاتر این اختلاف کم‌تر است که علت آن تأثیر کم‌تر شتاب گرانش در عمر قطره در دماهای بالاتر است. چاوو و همکارانش در مطالعه‌ای تأثیر شتاب گرانش بر عمر قطره را بررسی کرده‌اند [44]. آن‌ها نشان دادند که شتاب جاذبه باعث به وجود آمدن پدیده‌ی جابجایی اجباری در سطح قطره و به‌تبع آن افزایش انتقال حرارت به قطره شده که منجر به تسریع در فرآیند تبخیر و کاهش عمر قطره می‌گردد. با توجه به این‌که مدل حاضر، قابلیت تعمیم برای قطرات سوخت بالاتر از دو جزء را نیز دارد و سوخت‌های متداول در صنعت معمولا چندجزئی هستند، لازم است که نتایج حاصل از مدل برای سوخت‌های صنعتی نیز ارزیابی شود. برای این کار از داده‌های تجربی ما و همکارش استفاده شده است [43]. ایشان به بررسی تبخیر سوخت دیزل در شرایط گرانش ضعیف پرداخته‌اند. نتایج این آزمایش به‌صورت تغییرات سطح قطره برحسب زمان در "شکل 5" ارائه شده است. سوخت دیزل به‌صورت ترکیبی از پنج جزء مندرج در جدول 3 در نظر گرفته شده است [45]. لازم به ذکر است که کار آقای ما، در دمای 723 کلوین و فشار اتمسفریک با قطره‌ای به قطره 0.92 میلی‌متر انجام‌شده است. همان‌طور که در "شکل 5" مشاهده می‌شود نتایج مدل گذرا، ضمن نمایش همسویی مناسب با نتیجه تجربی، قابلیت

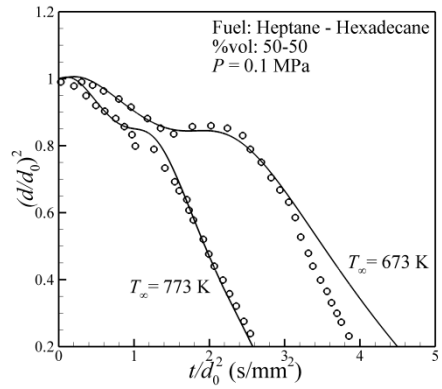


Fig.4 Comparison of hexadecane-heptane multicomponent droplet vaporization with the experiment of Ghassemi et al. [14]

شکل 4 مقایسه عمر قطره دوجزئی هپتان و هگزادکان با داده‌های تجربی قاسمی [14]

جدول 3 اجزای معادل سوخت دیزل پیشنهادی توسط ریتز و همکارانش [45]

Table 3. Diesel fuel mixture proposed by Reitz et al. [45]

جزء	کسر جرمی
تولوئن	0.08
دکان	0.11
دودکان	0.21
تترادکان	0.27
هگزادکان	0.17
اوکتادکان	0.16

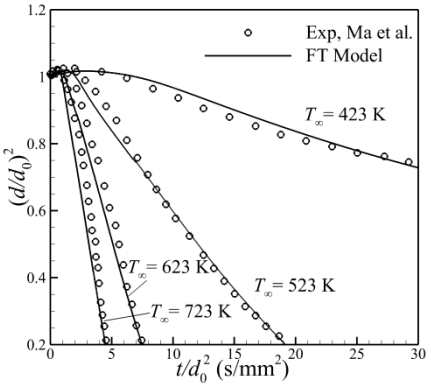


Fig.5 Comparison of Diesel fuel droplet vaporization with the experiment of Ma et al [43]

شکل 5 مقایسه‌ی تغییرات سطح قطره سوخت دیزل برحسب زمان بی‌بعد با داده‌های تجربی ما [43]

محاسبه تبخیر قطرات چندجزئی را به نمایش می‌گذارد.

3-2- ویژگی‌های تبخیر

نفوذ بخار سوخت که عمدتا در دمای خیلی کمتر از دمای محیط قراردارند، پیرامون قطره، عامل کنترلی قویی در تبخیر قطرات می‌باشند. از این‌رو، توزیع کسر جرمی سوخت در محیط پیرامون و تغییرات دمای سطح قطره، دو مشخصه مهم در تبخیر قطرات می‌باشند. "شکل 6" کسر جرمی هپتان در فاز گاز بر حسب شعاع بی‌بعد در لحظات مختلف تبخیر را نشان می‌دهد. در پایان تبخیر، کسر جرمی بخار سوخت در همسایگی قطره به بیشترین مقدار خود رسیده و با دور شدن از سطح قطره کاهش می‌یابد. همچنین با گذر زمان مقدار بخار سوخت در همسایگی قطره افزایش می‌یابد.

در "شکل 7" دمای سطح قطره برحسب زمان بدون بعد برای دو نوع سوخت هپتان و هگزادکان در دماهای محیط 500 و 800 کلوین آورده شده است. مشاهده می‌شود که در همه‌ی شرایط عمر قطره پیش از رسیدن دما به دمای جوش سوخت (جدول 3) به پایان می‌رسد. علاوه بر این این شکل نشان می‌دهد که تغییرات زمانی دمای سطح قطره در سوخت دیرفرارتر نسبت به سوخت دیگر بیشتر است.

شناسایی رفتار چندمرحله‌ای موجود در تبخیر قطرات چندجزئی نیازمند بررسی تغییرات مساحت سطح قطره و دمای سطح آن می‌باشد. علاوه بر این نفوذ بخار سوخت که عمدتا در دمای خیلی کمتر از دمای محیط قراردارند، به پیرامون قطره، عامل کنترلی قوی‌ای در تبخیر قطرات می‌باشند. از این‌رو، توزیع کسر جرمی سوخت در محیط پیرامون قطره سوخت و تغییرات دمای سطح قطره، دو مشخصه مهم در تبخیر قطرات می‌باشند. که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته‌شده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.53.3]

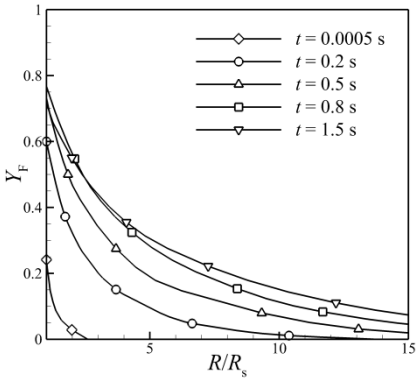


Fig.6 Variations of vapor fuel mass fraction in terms of dimensionless radius for n-heptane droplet at 800 K

شکل 6 تغییرات کسر جرمی هپتان در فاز گاز برحسب شعاع بی بعد در دمای 800 کلوین

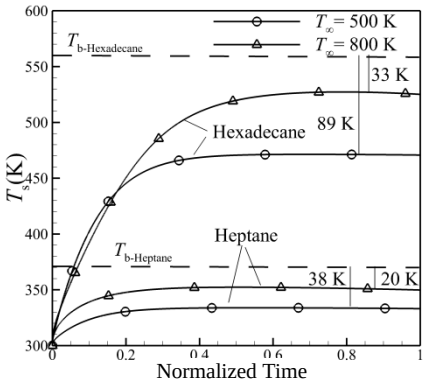


Fig.7 Variations of surface temperature in terms of Normalized Time for n-heptane and hexadecane droplet at 500 K and 800 K

شکل 7 مقایسه‌ی دمای سطح قطره برحسب زمان بی‌بعد برای دو نوع سوخت در دماهای محیط متفاوت

در "شکل 8" مراحل مختلف در فرآیند تبخیر قطره دوجزئی هپتان و هگزادکان با درصد حجمی 50-50 در دمای 673 کلوین نشان‌داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود می‌توان فرآیند تبخیر قطرات دوجزئی را به سه مرحله تقسیم کرد که در آن نرخ تبخیر به‌ترتیب توسط جزء سبک‌تر (در این‌جا هپتان)، هر دو جزء و سپس جزء سنگین‌تر (در این‌جا هگزادکان) کنترل می‌شود. همچنین مرحله‌ی اول نیز شامل دو بازه‌ی زمانی گرمایش اولیه و تبخیر است. در بازه‌ی گرمایش، شار گرمایی جذب شده صرف افزایش دمای قطره شده در حالی‌که در بازه‌ی تبخیر، این شار گرمایی سبب تبخیر قطره می‌گردد. در مرحله‌ی دوم هر چه از جزء فرار باقی‌مانده به آرامی تبخیر شده و همچنین جزء سنگین‌تر وارد بازه‌ی گرمایش اولیه می‌شود که این گرمایش منجر به افزایش حجم قطره می‌گردد، برآیند این دو اثر متضاد منجر به ایجاد شیب نزدیک به صفر در این مرحله می‌گردد.

در "شکل 9" تغییرات کسر جرمی فازهای مایع و گاز روی سطح قطره برحسب زمان نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در فاز مایع (9-الف) ابتدا کسر جرمی هپتان روی سطح قطره کاهش یافته که به معنی تبخیر سوخت سبک‌تر در ابتدای عمر قطره است و در نتیجه‌ی آن، کسر جرمی سوخت سنگین‌تر روی سطح قطره افزایش می‌یابد به‌تبع آن در فاز گاز شکل (9-ب) ابتدا کسر جرمی جزء سبک‌تر (هپتان) افزایش‌یافته و با اتمام این جزء در سطح قطره و نفوذ آن در فاز گاز، منجر به جایگزینی نیتروژن در مجاورت قطره می‌شود. سپس با شروع تبخیر جزء سنگین‌تر

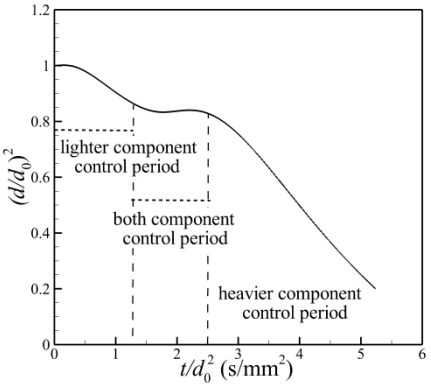
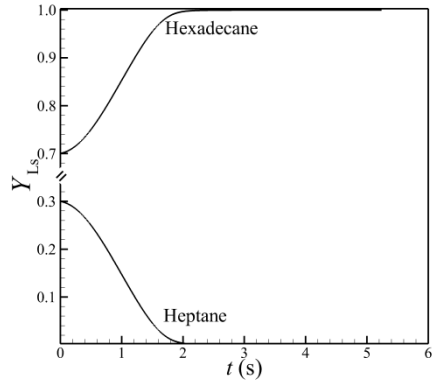
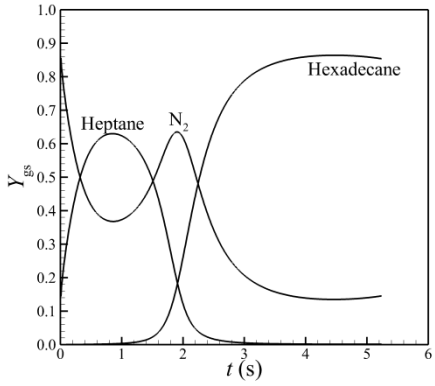


Fig.8 Definition of the two stages during the vaporization process of a binary-component droplet

شکل 8 تعریف دو مرحله در فرآیند تبخیر قطرات دو جزئی



(الف) (a)



(ب) (b)

Fig.9 Definition of the two stages in the temporal variation of mass fraction of a binary-component droplet a) liquid phase b) gas phase

شکل 9 تعریف دو مرحله فرآیند تبخیر در تغییرات کسر جرمی در سطح قطره برحسب زمان در الف) فاز مایع ب) فاز گاز

(هگزادکان) بخار سوخت در سطح قطره به تدریج کسر جرمی بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد. لازم به ذکر است که کسر جرمی سوخت سبک‌تر (هپتان) در سطح قطره ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. علت این‌که با وجود تبخیر هپتان شاهد کاهش کسر جرمی آن در سطح قطره هستیم، نفوذ بخار سوخت به محیط اطراف می‌باشد.

"شکل 10" نشان‌دهنده‌ی تغییرات دمای سطح قطره است. همان‌طور که مشاهده می‌شود همانند قطرات تک‌جزئی، عمر قطره قبل از رسیدن به نقطه‌ی جوش جزء سنگین‌تر به پایان می‌رسد. اما این اتفاق برای جزء سبک‌تر صدق نمی‌کند. همان‌طور که در "شکل 9" مشخص است، هپتان تا

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.53.3]

ثانیه‌ی 2.5 در قطره وجود دارد اما تقریبا از ثانیه‌ی اول تبخیر، دمای سطح از دمای جوش هپتان عبور کرده است. برای آگاهی دقیق‌تر از دمای قطره باید به مشاهده‌ی توزیع دمایی داخل قطره پرداخته شود. در "شکل 11" تغییرات مکانی دما و کسر جرمی داخل قطره آورده شده است. لازم به ذکر است که محور افقی این شکل، مکان بی‌بعد شده با استفاده از قطر اولیه قطرات می‌باشد. در "شکل (11-ب)" خطوط نشان‌دهنده‌ی هپتان و خط‌چین‌های نماینده‌ی هگزادکان می‌باشند. از "شکل (11-الف)" می‌توان نتیجه گرفت که بعد از ثانیه‌ی اول دمای داخل قطره از نقطه‌ی جوش هپتان عبور می‌کند. در چنین شرایطی ممکن است بخار اشباع و مافوق گرم هپتان به شکل حباب در داخل قطره به وجود آمده و به سمت بیرون از قطره حرکت کند. این پدیده‌ی غیرعادی به نام جوشش داخلی گزارش شده در مطالعات تجربی قاسمی و همکارانش نیز منعکس شده است [14]. در "شکل 12" تاریخچه‌ی تبخیر یک قطره‌ی دوجزئی هپتان و هگزادکان به قطر 1.1 با درصد مولی 50-50 در دمای 673 کلوین نشان داده شده است. بازه‌ی زمانی نشان داده شده متعلق به زمانی است که در آن جزء هپتان در قطره وجود داشته و دمایی بیشتر از نقطه‌ی جوش خود را تجربه می‌کند. این بازه از ثانیه‌ی دوم (با توجه به در شکل (11-الف)) که در آن دمای جوش از نقطه‌ی جوش هپتان عبور می‌کند آغاز شده و در ثانیه‌ی 2.5 (با توجه به "شکل (11-ب))" که در آن تقریبا تمام هپتان تبخیر می‌شود، به پایان می‌رسد. تغییرات نوسانی قطر در این بازه نشان‌دهنده‌ی همین پدیده می‌باشد.

3-3- مقایسه نتایج رویکردها

در این بخش نتایج دو رویکرد گذرا و شبه‌پایا در تخمین تبخیر قطرات تک‌جزئی و چند جزئی با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

3-3-1- سوخت تک‌جزئی

ابتدا نتایج دو رویکرد عددی شبه‌پایا و گذرا برای قطره‌ای به قطر 1 میلی‌متر، در فشار 1 بار و در دو دمای 500 و 800 کلوین با سه نوع سوخت تک‌جزئی هپتان، دکان و هگزادکان مقایسه شده‌اند. تغییرات سطح سه سوخت در"شکل 13" آورده شده است. رویکرد شبه‌پایا به‌علت عدم درنظر گرفتن ترم تغییرات زمانی عمر قطره را بیشتر تخمین می‌زند. همچنین اختلاف دو رویکرد با افزایش دما برای هر یک از سوخت‌ها بیشتر می‌شود به‌طوری‌که این اختلاف برای هپتان در دمای 500 و 800 کلوین به ترتیب 2.3 و 3.9 درصد،

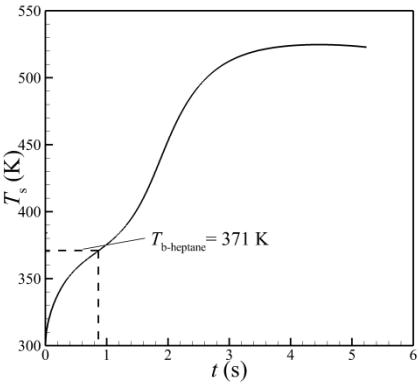


Fig.10 Definition of the two stages in the temporal variation of mass fraction of a binary-component droplet a) liquid phase b) gas phase

شکل 10 تعریف دو مرحله فرآیند تبخیر در تغییرات کسر جرمی در سطح قطره برحسب زمان در الف) فاز مایع ب) فاز گاز

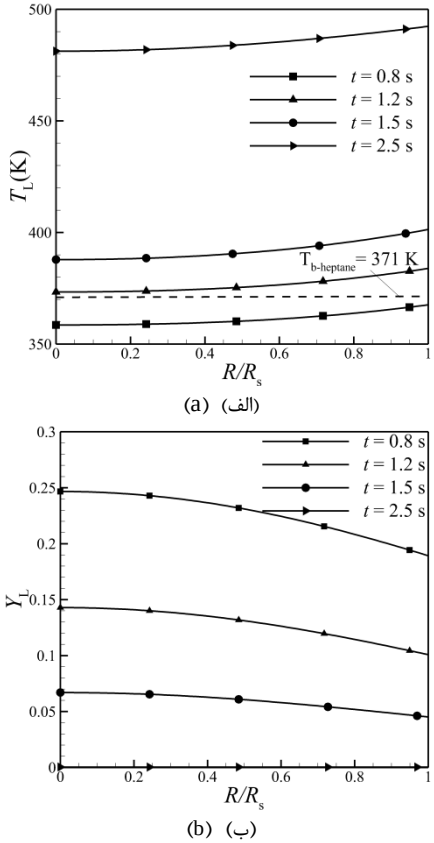


Fig. 11 Internal liquid distribution a) Temperature b) mass fraction

شکل 11 تغییرات مکانی ویژگی‌های داخلی قطره الف) دما ب) کسر جرمی

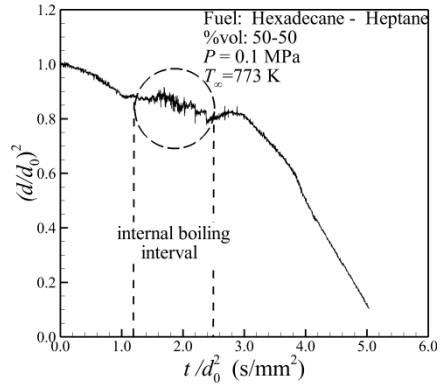


Fig.12. Definition of internal boiling interval in binary component evaporation in the study of Ghassemi et al. [14]

شکل 12 تعریف بازه‌ی جوشش داخلی در فرآیند تبخیر قطره دوجزئی در مطالعه‌ی قاسمی و همکاران [14]

برای دکان به ترتیب 2 و 9.1 درصد و برای هگزاکان به ترتیب 1.5 و 26.6 درصد می‌باشد. این موضوع که در دماهای بالاتر تأثیر ترم تغییرات زمانی افزایش می‌یابد در کار آگاروال و همکارانش نیز ارائه شده است [30]. نکته‌ی قابل‌توجه دیگر این است که با سنگین‌تر شدن سوخت انحراف رویکرد شبه‌پایا از رویکرد گذرا به‌شدت افزایش می‌یابد (26 درصد برای هگزادکان در دمای 800 کلوین) که این امر نشان‌دهنده‌ی تأثیر قابل توجه ترم ناپایایی در قطرات سنگین‌تر در دماهای بالاتر است.

آگاروال و همکارانش [30] دو معیار ناپایایی دمایی R_T و جرمی R_F را به‌صورت زیر، برای توضیح اثر ناپایایی معرفی کرده‌اند. معیار ناپایایی مربوط به

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.53.3]

دما از تقسیم دو مشخصه زیر به‌دست می‌آید.

$$R_{\mathrm{T}} = \tau_{\mathrm{g}}/\tau_{\mathrm{s}}.$$

$$\tau_{\mathrm{g}} = \frac{r_{\mathrm{s}}^2}{\alpha}\,,\tau_s = \frac{T_{\mathrm{b}} - T_0}{\mathrm{d}T_{\mathrm{s}}/\mathrm{d}t} \tag{24}$$

که در آن r_{s} شعاع قطره، α ضریب نفوذ حرارتی گاز و T_{s}، T_0 و T_{b} به ترتیب دماهای سطح، اولیه، و جوش سوخت می‌باشند. همچنین معیار ناپایایی مربوط به نفوذ بخار سوخت از تقسیم دو مشخصه زیر به‌دست می‌آید

$$R_{\mathrm{F}} = \tau'_{\mathrm{g}}/\tau'_{\mathrm{s}}.$$

$$\tau'_{\mathrm{g}} = \frac{r_{\mathrm{s}}^2}{D}\,,\tau'_{\mathrm{s}} = \frac{1}{dY_{\mathrm{s}}/dt} \tag{25}$$

که در آن D ضریب نفوذ جرمی گاز و Y_{s} کسر جرمی بخار سوخت می‌باشد.

نسبت R_{F} به R_{T}، نسبت نفوذ مولکولی به نفوذ گرمایی، یا عدد بدون بعد لوئیس است. بنابراین هنگامی‌که این دو معیار به هم نزدیک باشند عدد لوئیس برابر یک بوده و درنتیجه می‌توان از مدل‌های ارائه شده با فرض لوئیس واحد [16,2] استفاده کرد. در "شکل 14" این دو معیار ناپایایی ذکر شده برای قطره‌ی هپتان به قطر 0.05 میلی‌متر در دمای 500 K و فشار 1 بار آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دو معیار به هم نزدیک بوده بنابراین برای سوخت هپتان و در شرایط بالا مدل‌های ذکر شده با فرض لوئیس واحد نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهند.

"شکل 15" تغییرات مقدار بیشینه‌ی معیار ناپایایی فاز گاز (در سطح قطره) را برحسب زمان بی‌بعد برای سه سوخت مختلف نشان می‌دهد. براساس گزارش آگاروال و همکارانش، هنگامی که معیار ناپایایی از مرتبه $O(10^{-3})$ و یا کمتر باشد فرض حالت شبه‌پایا تخمین مناسبی از روند تبخیر قطره ارائه می‌کند [30]. یعنی هر چقدر مدت زمانی که این دو معیار کم‌تر از $O(10^{-3})$ هستند بیشتر باشد، رویکرد شبه‌پایا تخمین نزدیک‌تری به رویکرد گذرا دارد. بر این اساس برای تحلیل انحراف موجود در رویکرد شبه‌پایا از رویکرد گذرا که در "شکل 13" نشان داده شد، می توان از "شکل 15" استفاده کرد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود با افزایش دما برای هر سوخت، بخشی از عمر قطره که می‌توان به‌عنوان تبخیر شبه‌پایا در نظر گرفته شود کاهش پیدا می‌کند و در سوخت سنگین‌تر، این کاهش بیشتر است. به‌طوری‌که برای سوخت هگزادکان در دمای 500 و 800 کلوین به ترتیب 80 و 40 درصد از عمر قطره در حالت شبه‌پایا (کمتر از $O(10^{-3})$) سپری می‌شود. به‌عبارت دیگر در دمای 800 کلوین حدود 60 درصد عمر قطره در حالت گذرا می‌باشد به همین دلیل است که در "شکل 13" رویکرد شبه‌پایا

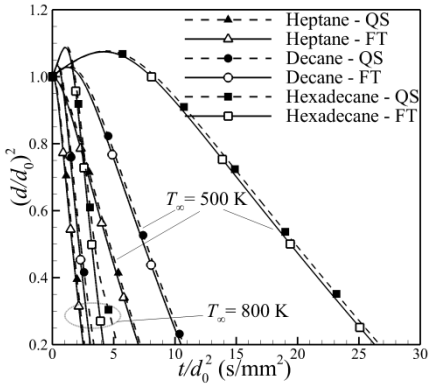


Fig. 13 Comparison of predicted temporal variation of droplet surface area with the QS approach

شکل 13 تغییرات سطح قطره برای دو رویکرد عددی

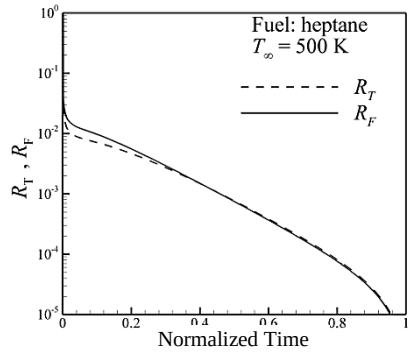
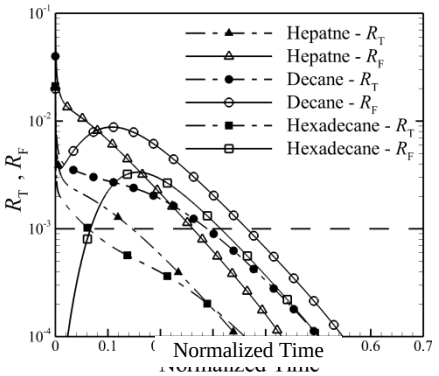
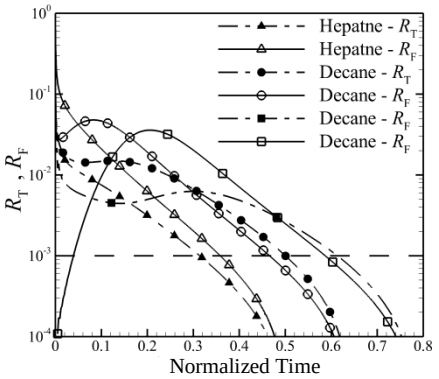


Fig. 14 Temporal variation of the maximum gas-phase unsteadiness in terms of time scale ratios R_{F} and R_{T} for a heptane droplet

شکل 14 تغییرات بیشینه ناپایایی فاز گاز برحسب زمان بی‌بعد (نرمالیزه شده توسط عمر قطره) برای قطره‌ی هپتان



(a) (الف)



(b) (ب)

Fig. 15 Temporal variation of the maximum gas-phase unsteadiness in terms of time scale ratios R_{F} and R_{T} for three different fuels a)$T_\infty = 500$ K b)$T_\infty = 800$ K

شکل 15 تغییرات ماکزیمم غیرپایایی فاز گاز برحسب زمان بی‌بعد در برای سه سوخت چندجزئی مختلف الف) دمای محیط 500 ب) دمای محیط 800 کلوین

برای قطره هگزادکان در دمای 800 کلوین انحراف قابل ملاحظه‌ای (26 درصد) از رویکرد گذرا دارد. در جدول 4 ارتباط بین میزان شبه‌پایایی و انحراف دو رویکرد نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش میزان شبه‌پایایی، انحراف دو رویکرد کاهش می‌یابد.

نکته‌ی قابل توجه دیگر این است که در دمای پائین‌تر معیار ناپایایی مرتبط با دما همواره زودتر به مقادیر کمتر از مرتبه‌ی $O(10^{-3})$ رسیده و می‌توان آن را پایا در نظر گرفت که علت آن پائین‌تر بودن گرادیان دما در دماهایی پائین‌تر می‌باشد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.53.3]

3-3-2- سوخت چندجزئی

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه‌ی قطرات چندجزئی با استفاده از فرض شبه‌پایا انجام شده است بنابراین با مقایسه‌ی مدل حاضر با مدل شبه‌پایا می‌توان به محدودیت کاربرد این فرض در تخمین عمر قطره پی برد. در "شکل 16" منحنی تغییرات سطح قطره برحسب پارامتر زمان بی‌بعد برای قطرات دوجزئی مختلف با درصدهای حجمی متفاوت در قطر 1 میلی‌متر، فشار 1 بار و دمای 800 کلوین آورده شده است. لازم به ذکر است که خطوط تو پر نشان‌دهنده‌ی رویکرد گذرا و خط‌چین‌ها

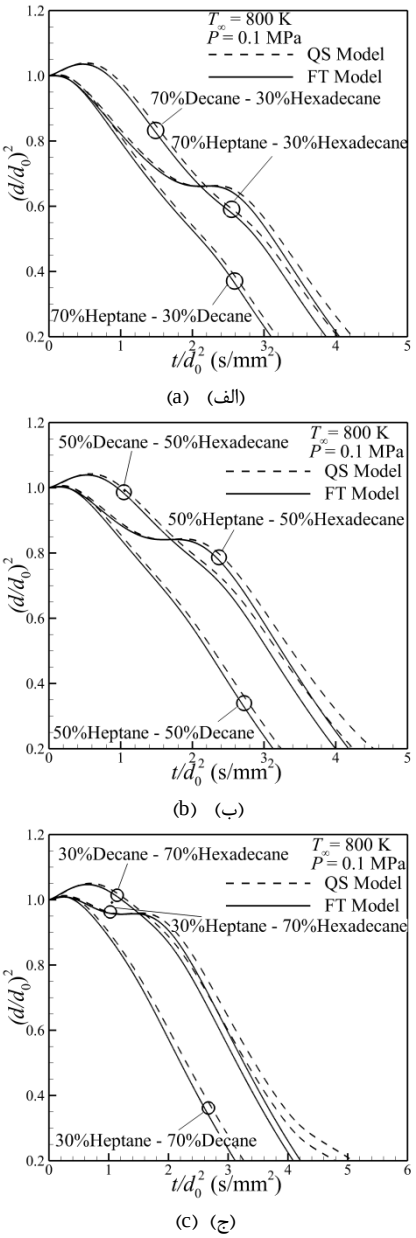


Fig. 16 Comparison of droplet surface area variations predicted by fully transient (solid lines) and the quasi steady (dashed lines) approaches for three different droplet compositions a)%70 light component - %30 heavy component b)%50-%50 c)%30 light component - %70 heavy component

شکل 16 مقایسه تغییرات مساحت سطح قطره رویکردهای کاملا گذرا (خطوط پر) و شبه‌دائمی (خطوط بریده) برای سه سوخت چندجزئی مختلف با درصدهای حجمی متفاوت الف) 70٪ جزء سبک-30٪ جزء سنگین ب)50٪-50٪ ج)30٪ جزء سبک-70٪ جزء سنگین

جدول 4 مقایسه‌ی درصد شبه‌پایایی و انحراف از رویکرد گذرا

Table 4. Steadiness percentage and deviation of QS approach from FT approach

دمای محیط	800 K		500 K	
سوخت	شبه‌پایایی	انحراف	شبه‌پایایی	انحراف
هپتان	٪60	٪3.9	%70	٪2.3
دکان	٪50	٪9.1	%70	٪2.0
هگزادکان	٪30	٪26.6	%80	٪1.5

نشانگر رویکرد شبه‌پایا می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود این دو رویکرد از یکدیگر انحراف دارند. میزان انحراف روی‌کرد شبه‌پایا از روی‌کرد کاملا گذرا در جدول 5 آورده شده است. انتظار می‌رود که با افزایش درصد سوخت سنگین، میزان انحراف افزایش یابد. همان‌طور که در جدول 5 مشاهده می‌شود، درصد انحراف از راست به چپ (با افزایش درصد سوخت سنگین) افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش اختلاف فراریت بین دو سوخت، این درصد انحراف چشم‌گیرتر است.

همان‌طور که گفته شد هرچقدر مدت زمانی که معیار ناپایایی کم‌تر از $O(10^{-3})$ است، بیشتر باشد، رویکرد شبه‌پایا، تخمین نزدیک‌تری به رویکرد گذرا دارد. بر این اساس برای تحلیل انحراف موجود در دو روی‌کرد شبه‌پایا و گذرا که در "شکل 16" نشان داده شد، می‌توان از "شکل 17" استفاده کرد. در "شکل 17" تغییرات معیار ناپایایی دیفیوژن برحسب زمان بی‌بعد برای قطره دوجزئی هپتان و هگزادکان با درصدهای حجمی متفاوت آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به معیار ناپایایی که بالاتر بودن از مرتبه‌ی $O(10^{-3})$ تعریف شد می‌توان گفت برای درصدهای حجمی 30 و 50 و 70 هگزادکان میزان ناپایایی افزایش یافته و به ترتیب 48، 52 و58 درصد از عمر قطره می‌باشد. با توجه به درصدهای غیرپایایی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد هگزادکان باید انحراف حل گذرا از شبه‌پایا افزایش یابد که این افزایش در جدول 5 نیز مشاهده می‌شود.

4- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، معادلات حاکم بر تبخیر قطره تک‌جزئی و چندجزئی با دو روی‌کرد کاملا گذرا و شبه‌پایا حل شده است. دو روی‌کرد با در نظرگرفتن تغییرات زمانی و مکانی خواص می‌باشند. نتایج به‌دست آمده از روی‌کرد کاملا گذرا با داده‌های تجربی موجود در ادبیات مقایسه شده و تطابق قابل قبولی را در گستره‌ی دمایی وسیع و با قطرات سوخت‌های متفاوت تک و دو و چندجزئی ارائه می‌دهند. در حالت چندجزئی، تبخیر چندمرحله‌ای قطره دوجزئی با جزئیات مشاهده شد. نتایج نشان داد که وقتی اجزای تشکیل دهنده‌ی قطره فراریت متفاوتی داشته باشند، جزء فرار تر ابتدا فرآیند تبخیر را کنترل کرده و سپس جزء سنگین‌تر تبخیر می‌شود.

نفوذ حرارت به داخل قطره موجب افزایش دمای قطره و عبور از نقطه‌ی جوش جزء فرار تر می‌شود. این اتفاق منجربه بروز پدیده‌ی جوشش داخلی

جدول 5 مقایسه‌ی انحراف رویکرد شبه‌پایا از گذرا در سوخت‌های چندجزئی

Table 5. Deviation of quasi steady approach from fully transient approach in multicomponent droplet

درصد حجمی	30-70	50-50	70-30
سوخت	درصد انحراف		
هپتان و دکان	2.7	3.4	4.3
هپتان و هگزادکان	4.2	7.7	17.2
دکان و هگزادکان	4	5.8	14.7

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.53.3]

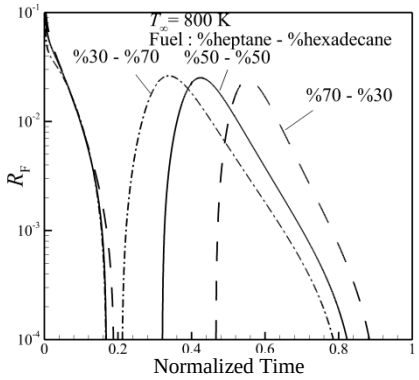


Fig. 17 Variations of maximum gas phase unsteadiness versus nondimensional timefor different binary droplets of heptane and hexadecane at 800 K.

شکل 17 تغییرات ماکزیمم ناپایایی فاز گاز برحسب زمان بی‌بعد برای قطره‌ی هپتان- هگزادکان به قطر 1 میلی‌متر در دمای 800 در درصدهای حجمی متفاوت

می‌گردد. بازه‌ی امکان اتفاق این پدیده را می‌توان به کمک توزیع دمای داخل قطره و تغییرات کسر جرمی در فاز مایع تخمین زد.

همچنین برای تحلیل و توجیه رفتار تبخیر قطرات و مقایسه‌ی نتایج رویکرد شبه‌پایا با رویکرد گذرا، دو معیار ناپایایی دمایی و جرمی استفاده شده‌اند. این معیارها میزان ناپایایی فرآیند تبخیر را به‌دست می‌دهند.

پارامترهای مختلفی بر ناپایایی تاثیرگذارند:

- دمای محیط تاثیر قابل توجهی در ناپایایی دارد. به‌طوری که در دماهای بالاتر انحراف حل شبه‌پایا از حل گذرا بیشتر می‌شود. با توجه به این‌که درجه حرارت محیط‌های تبخیری-احتراقی زیاد می‌باشد، این یافته از اهمیت زیادی برخوردار است.
- نوع سوخت نیز تاثیر بسزایی در ناپایایی دارد. مدل شبه‌پایا انحراف بیشتری را از رویکرد گذرا، برای سوخت‌های سنگین‌تر نشان می‌دهند. با توجه به این‌که سوخت‌های متداول در صنعت از هیدروکربن‌های نسبتا سنگین در مقایسه با هپتان تشکیل شده‌اند، این انحراف قابل تامل می‌باشد.
- در تبخیر قطرات چندجزئی، با افزایش حضور اجزای سنگین‌تر در قطره و همچنین افزایش اختلاف فراریت اجزای تشکیل‌دهنده‌ی آن، میزان ناپایایی مسئله افزایش می‌یابد و انحراف رویکرد شبه‌پایا از گذرا بیشتر می‌شود.

5- فهرست علایم

A_s	مساحت قطره (m^2)
C_P	ظرفیت گرمایی ویژه (kJ/kgK)
D	ضریب نفوذ جرمی (m^2/s)
FT	مدل گذرا
k	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)
M	جرم مولی (g/mol)
$\dot{m}$	نرخ تبخیر (kg/s)
QS	مدل شبه‌پایا
R, r	شعاع قطره (m)
R_F	معیار ناپایایی نفوذ جرمی
R_T	معیار ناپایایی نفوذ حرارت
T	دما (K)
t	زمان (s)
X	کسر مولی
Y	کسر جرمی

علایم یونانی

α	ضریب جذب سطح
μ	لزجت دینامیکی (cp)
ρ	چگالی (kg/m^3)
σ	ثابت استفان بولتزمن (W/m^2K^4)

زیرنویس‌ها

avg	میانگین
F	سوخت
g	فاز گاز
k	جزء
L	فاز مایع
s	سطح
T	کل
v	بخار
∞	خیلی دور

6- مراجع

[1] A. Williams, Combustion of droplets of liquid fuels: A review, *Combustion and Flame*, Vol. 21, No. 1, pp. 1-31, 1973.
[2] C. Law, Recent advances in droplet vaporization and combustion, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 8, No. 3, pp. 171-201, 1982.
[3] F. Peng, S. Aggarwal, A review of droplet dynamics and vaporization modeling for engineering calculations, *Proceeding of ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*, Hague, Netherlands, American Society of Mechanical Engineers, pp. V003T06A003-V003T06A003, 1994.
[4] K.K. Kou, *principle of combustion*, Second Edittion, pp. 672-680, New Jersey: Wiley, 2005.
[5] W.A. Sirignano, *Fluid Dynamics and transport of droplet and sprays*, Second edittion, pp. 53-56, New York: Cambridge University Press, 2010.
[6] S. Sazhin, *Droplets and sprays*, First Edittion, pp. 102-110, London: Springer, 2014.
[7] C. Laurent, G. Lavergne, P. Villedieu, Continuous thermodynamics for droplet vaporization: Comparison between Gamma-PDF model and QMoM, *Comptes Rendus Mécanique*, Vol. 337, No. 6, pp. 449-457, 2009.
[8] S. Aggarwal, H. Mongia, Multicomponent and high-pressure effects on droplet vaporization, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 124, No. 2, pp. 248-255, 2002.
[9] C. Maqua, G. Castanet, F. Lemoine, N. Doué, G. Lavergne, Temperature measurements of binary droplets using three-color laser-induced fluorescence, *Experiments in Fluids*, Vol. 40, No. 5, pp. 786-797, 2006.
[10] C. Maqua, G. Castanet, F. Lemoine, Bicomponent droplets evaporation: Temperature measurements and modelling, *Fuel*, Vol. 87, No. 13, pp. 2932-2942, 2008.
[11] C. Wang, A. M. Dean, H. Zhu, R. J. Kee, The effects of multicomponent fuel droplet evaporation on the kinetics of strained opposed-flow diffusion flames, *Combustion and Flame*, Vol. 160, No. 2, pp. 265-275, 2013.
[12] J. Stengele, K. Prommersberger, M. Willmann, S. Wittig, Experimental and theoretical study of one-and two-component droplet vaporization in a high pressure environment, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, No. 14, pp. 2683-2694, 1999.
[13] A. Daıf, M. Bouaziz, X. Chesneau, A. A. Cherif, Comparison of multicomponent fuel droplet vaporization experiments in forced convection with the Sirignano model, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 18, No. 4, pp. 282-290, 1998.
[14] H. Ghassemi, S.W. Baek, Q.S. Khan, Experimental study on binary droplet evaporation at elevated pressures and temperatures, *Combustion Science and Technology*, Vol. 178, No. 6, pp. 1031-1053, 2006.
[15] G. M. Faeth, Current status of droplet and liquid combustion, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 3 No. 4, pp. 191-224, 1977.
[16] W. A. Sirignano, Fuel droplet vaporization and spray combustion theory, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 9, No. 4, pp. 291-322, 1983.
[17] S.S. Sazhin, Advanced models of fuel droplet heating and evaporation, *Progress in Energy and Combustion Science* Vol. 32, No. 2, pp. 162-214, 2006.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.53.3]

[18] V. Ebrahimian, C. Habchi, Towards a predictive evaporation model for multi-component hydrocarbon droplets at all pressure conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 15, pp. 3552-3565, 2011.
[19] W. Long, P. Yi, M. Jia, L. Feng, J. Cui, An enhanced multi-component vaporization model for high temperature and pressure conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 90, No. 1, pp. 857-871, 2015.
[20] D. Ju, T. Zhang, J. Xiao, X. Qiao, Z. Huang, Effect of droplet sizes on evaporation of a bi-component droplet at DME (dimethyl ether)/n-heptane-fueled engine conditions, *Energy*, Vol. 86. No. 1, pp. 257-266, 2015.
[21] M. M. Naghizadeh, A.R. Ghahremani, M. H. Saidi, Numerical simulation of spray characteristics of bio-ethanol and its blend with gasoline in a direct injection combustion chamber, *Modares Mechanical Engineering* Vol. 15, No. 4, pp. 112-122, 2015. (in persian فارسی)
[22] S. Tonini, G. Cossali, A novel formulation of multi-component drop evaporation models for spray applications, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 89, No. 1, pp. 245-253, 2015.
[23] S. Tonini, G. Cossali, A multi-component drop evaporation model based on analytical solution of Stefan–Maxwell equations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 92, No. 1, pp. 184-189, 2016.
[24] L. Chen, Z. Liu, Y. Lin, C. Zhang, Different spray droplet evaporation models for non-ideal multi-component fuels with experimental validation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 94, No. 1, pp. 292-300, 2016.
[25] E. Mohammadian Esfahani, K. Mazaheri, H. Pasdar Shahri, Investigation of droplet size distribution effect in prediction of liquid and vapor penetration length in the diesel spray, *Modares Mechanical Engineering* Vol. 16, No. 2, pp. 189-198, 2016. (in persian فارسی)
[26] X. Ma, F. Zhang, K. Han, G. Song, Numerical modeling of acetone–butanol–ethanol and diesel blends droplet evaporation process, *Fuel*, Vol. 174, No. 1, pp. 206-215, 2016.
[27] S. Gavhane, S. Pati, S. Som, Evaporation of multicomponent liquid fuel droplets: Influences of component composition in droplet and vapor concentration in free stream ambience, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 105, No. 1, pp. 83-95, 2016.
[28] R. Shahsavan Markadeh, H. Ghassemi, Modeling of biodiesel droplet evaporation: effects of operating conditions and fuel composition, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 342-352, 2016. (in persian فارسی)
[29] M. Matalon, C. K. Law, Gas-phase transient diffusion in droplet vaporization and combustion, *Combustion and Flame*, Vol. 50, No. 1, pp. 219-229, 1983.
[30] G.-S. Zhu, R. D. Reitz, S. K. Aggarwal, Gas-phase unsteadiness and its influence on droplet vaporization in sub-and super-critical environments, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, No. 16, pp. 3081-3093, 2001.
[31] C. Fieberg, L. Reichelt, D. Martin, U. Renz, R. Kneer, Experimental and numerical investigation of droplet evaporation under diesel engine conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 15, pp. 3738-3746, 2009.
[32] H. Zhang, V. Raghavan, G. Gogos, Subcritical and supercritical droplet evaporation within a zero-gravity environment: Low Weber number relative motion, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, No. 4, pp. 385-394, 2008.
[33] S. K. Aggarwal, C. Yan, G. Zhu, Transcritical vaporization of a liquid fuel droplet in a supercritical ambient, *Combustion Science And Technology*, Vol. 174, No. 9, pp. 103-130, 2002.
[34] M. Birouk, M. A. Al-Sood, Droplet evaporation in a turbulent high-pressure freestream–A numerical study, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, No. 2, pp. 264-271, 2010.
[35] S. Sazhin, W. Abdelghaffar, E. Sazhina, S. Mikhalovsky, S. Meikle, C. Bai, Radiative heating of semi-transparent diesel fuel droplets, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 126, No. 1, pp. 105-109, 2004.
[36] B. Abramzon, S. Sazhin, Droplet vaporization model in the presence of thermal radiation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No. 9, pp. 1868-1873, 2005.
[37] Bonnie J. McBride; Michael J. Zehe; Sanford Gordon, *NASA Glenn Coefficients for Calculating Thermodynamic Properties of Individual Species*, First Edittion, pp. 70-105, Ohio: National Aeronautics and Space Administration, John H. Glenn Research Center at Lewis Field, 2002.
[38] M. R. Riazi, *Characterization and properties of petroleum fractions*, First Edittion, pp. 232-260, Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 2005.
[39] R.A. Svehla, *Transport coefficients for the NASA Lewis chemical equilibrium program*, First Edittion, pp. 15-26, Ohio: National Aeronautics and Space Administration, John H. Glenn Research Center at Lewis Field, 1995.
[40] B.E. Poling, J.M. Prausnitz, O.C. John Paul, R.C. Reid, *The properties of gases and liquids*, Fifth Edittion, pp. 3.1-11.43, New York: McGraw-Hill, 2001.
[41] C.L. Yaws, *Thermophysical properties of chemicals and hydrocarbons*, First Edittion pp. 1-95, New York: William Andrew, 2008.
[42] H. Nomura, Y. Ujiie, H.J. Rath, J.i. Sato, M. Kono, Experimental study on high-pressure droplet evaporation using microgravity conditions, *Proceeding of the Combustion Institute*, Tokyo, Japan, Elsevier, pp. 1267-1273, 1996.
[43] X. Ma, F. Zhang, K. Han, B. Yang, G. Song, Evaporation characteristics of acetone–butanol–ethanol and diesel blends droplets at high ambient temperatures, *Fuel*, Vol. 160, No. 1, pp. 43-49, 2015.
[44] C. Chauveau, F. Halter, A. Lalonde, I. Gokalp, An experimental study on the droplet vaporization: effects of heat conduction through the support fiber, *Proceeding of. 22 nd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Como Lake, Italy, ILASS Europe, pp. 210-217
[45] Y. Ra, R. D. Reitz, A vaporization model for discrete multi-component fuel sprays, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 35, No. 2, pp. 101-117, 2009.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-29]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.1.53.3]