

## بررسی نحوه توزیع دمای قطره سوخت در فرآیند تبخیر و مقایسه با نتایج تحلیلی

علی عبدالکریمی<sup>۱\*</sup>، علیرضا مستوفی زاده<sup>۲</sup>

\*AAkarimiA@yahoo.com

### چکیده

شبیه سازی فرآیند تبخیر، امکان درک بهتر از پدیده احتراق را ممکن ساخته و مقدمات تحلیل آن را فراهم می آورد. در این مسئله، تغییرات دمای سطح و داخلی قطره در مجاورت گاز داغ بررسی می شود که دمای داخلی نیز در شرایط lumped فرض می شود. در ابتدا جریان حول یک کره با شرایط یکسان با قطره، توسط نرم افزار فلوئنت مدل می شود تا تغییرات دما روی سطح قطره بررسی شود و سپس توسط برنامه کامپیوتری و استفاده از یک مدل تبخیر مناسب، تغییرات دمای داخل نسبت به سطح قطره ارزیابی می گردد. در ادامه چندین مدل مختلف تبخیر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و نتایج آن ها برای این مسئله اعتبار سنجی شده است. بررسی نتایج نشان می دهد که در ابتدای کار دمای داخلی و دمای سطح قطره، رفتار افزایشی داشته و در فاز انتها به تعادل دمایی می رسند. نتایج بدست آمده در مقایسه با نتایج تحلیلی و تجربی دیگران همخوانی خوبی را نشان می دهد.

واژه های کلیدی: جریان دوفازی - دمای داخلی قطره - دمای سطح قطره - مدل تبخیر

### ۱- مقدمه

تبخیر سوخت در بهبود راندمان احتراق و همچنین در بهینه نمودن طراحی موتورهای موشک، موتورهای جت و استفاده درست از منابع طبیعی حایز اهمیت است [۱]. سه مشخصه مهم محفظه احتراق که بر روی عملکرد یک توربین گازی تاثیر می گذارد، عبارت است از راندمان محفظه، افت فشار و یکنواختی پروفیل دمای خروجی. راندمان محفظه احتراق بطور مستقیم مصرف سوخت را متاثر خواهد نمود. مصرف سوخت بالا، موجب کاهش پارامترهای برد و زمان پرواز جت خواهد شد. این موضوع اهمیت بررسی فرآیند تبخیر را آشکار می سازد. تبخیر قطره واقعی در شرایطی اتفاق می افتد که انتقال حرارت جابجایی نقش موثری دارد و پدیده تبخیر در این شرایط پیچیده است. به دنبال آن نیز انتقال حرارت هدایت و تشعشع نیز اهمیت پیدا می کند و تبخیر قطره، متاثر از این دو عامل نیز می باشد [۲].

طی سالهای گذشته، تحقیقات زیادی توسط محققان در این زمینه انجام گرفته است. سیرینگانو (۱۹۹۳) اسپری را با تقریب لاگرانژین بررسی کرد [۳]. مشایک [۴] در سال ۱۹۹۷ پراکندگی قطره را در جریان مغشوش همسان طوری که تبخیر از قانون  $D^2$  (اسپالدینگ و گودساو در سال ۱۹۵۳) تبعیت می کرد، شبیه سازی کرد و با فرض اینکه بار جرمی ذره کوچک باشد. فرشچی و همکاران انتقال حرارت در شرایط گذرا و نحوه تصاعد گاز از قطره سوخت مایع پراورزی را در سال ۱۳۸۵ بررسی نمودند [۸]. زانگ نیز (۲۰۰۳) تبخیر را در شرایط فشار و دمای بالا و با در نظر گرفتن خواص ترمودینامیکی متغیر جهت بررسی چرخش داخلی مدل نمود [۱]. با توجه به کثرت پارامترهای حاکم بر مسئله، با فرضیات زیر می توان مسئله را ساده تر نمود. ۱- اثرات جاذبه قابل صرف نظر است. ۲- تغییر شکل قطرات در طول فرایند تبخیر از حالت کروی ناچیز است. ۳- از تشعشع صرف نظر می شود. ۴- از تغییرات خواص ترمودینامیکی فاز مایع صرف نظر می شود. ۵- اثرات چرخش داخلی در نظر گرفته نمی شود.

۱- کارشناس ارشد هوافضا، سازمان صنایع هوافضا ۰۹۱۲۴۳۷۹۷۹۵

۲- استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر

## ۲- فاز سیال پیوسته (گاز)

معادله پیوستگی در جریان تراکم ناپذیر دائم، به صورت زیر نوشته می شود.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i) = 0 \quad (1)$$

معادله اندازه حرکت در جریان آشفته به شکل زیر است:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho \left( \frac{D\bar{u}_i}{Dt} \right) &= -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial (\bar{T}_{ij})_L}{\partial x_j} + \frac{\partial (\bar{T}_{ij})_T}{\partial x_j} \\ \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) &= -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{T}_{ij} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j') \end{aligned} \right. \quad (2)$$

که در آن، تنش برشی آرام و آشفته به شکل زیر است:

$$(\bar{T}_{ij})_1 = \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k}, (\bar{T}_{ij})_t = -\rho \bar{u}_i \bar{u}_j' \quad (3)$$

معادله انرژی در جریان آشفته به شکل زیر است:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{T} \bar{u}_j) = \frac{1}{\rho C_p} \left( (\bar{u}_j \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + K \frac{\partial}{\partial x_j} + \left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) + \mu \left( -\frac{2}{3} \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2 \right) \right) \quad (4)$$

برای حل مسئله، انتخاب مدل آشفتگی که شرایط مسئله را ارضاء کند لازم است، لذا نهایتاً مدل  $k - \varepsilon$  استاندارد بدلیل داشتن رینولدز جریان بالا، داشتن جوابهای مناسب در مرکز جریان و قرار گیری بیشتر زمان عمر قطره در مرکز جریان) انتخاب می شود.

$$\left\{ \begin{aligned} \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j k_j &= \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} k_j \right) + G + B - \rho \varepsilon \\ \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_j \varepsilon_j &= \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \varepsilon_j \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G + C_2 (1 - C_3) \frac{\varepsilon}{k} B - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

## ۳- معادلات حاکم بر فاز گسسته (قطره)

اصولاً دو تقریب برای مدلسازی عددی جریان های چند فازی وجود دارد: تقریب اولر - لاگرانژ و تقریب اولر - اولر. در تقریب اولر، فاز گسسته (قطره) کسر حجمی کوچکی را اشغال می کند حتی اگر از نظر بار جرمی بالا باشد. ( $\dot{m}_{\text{particles}} \geq \dot{m}_{\text{fluid}}$ ) در صورتی که تقریب دوم زمانی به کار می رود که کسر حجمی فاز گسسته بیشتر از ۱۰ درصد باشد [۵]. قطره سوخت، یک حالت از جریان دو فازی است که فاز گسسته، یک تک قطره کروی می باشد. فرایند تبخیر، در نهایت مساله ای دائم است. این فرض بدین معنی است که در هر لحظه زمانی فرایند مشابه یک فرایند حالت دائمی بررسی شود. تحت این شرایط، معادلات لاگرانژین حاکم بر فاز قطره به صورت زیر تشریح می شوند [۴ و ۲]:

$$\begin{cases} \frac{dX_d}{dt} = v_d \\ \frac{dv_d}{dt} = \left(\frac{f_1}{\tau_d}\right)(u_G - v_d) \\ \frac{dT_d}{dt} = \frac{f_2 Nu}{3 Pr_G} \left(\frac{\theta_1}{\tau_d}\right) (T_G - T_d) + \left(\frac{L_V}{C_L}\right) \frac{\dot{m}_d}{m_d} - H_{\Delta T} \\ \frac{dm_d}{dt} = -\frac{Sh}{3 Sc_G} \left(\frac{m_d}{\tau_d}\right) H_M \end{cases} \quad (6)$$

که در آن ظرفیت حرارتی مایع،  $L_V$  گرمای نهان تبخیر بوده و زیرنویسهای مربوط به قطره با حرف  $d$  و برای فاز گاز با  $G$  نشان داده شده است.  $T_G$  نیز دمای گاز می باشد.  $\tau_d$  ثابت زمانی قطره به شکل زیر تعریف می شود:

$$\tau_d = \frac{\rho_d d^2}{18 \mu_g} \quad (7)$$

قطر قطره با  $d$  و دانسیته با  $\rho$  نشان داده شده است.  $f_1$  تصحیح پسا برای حرکت و تبخیر و  $f_2$  تصحیح انتقال حرارت به جهت تبخیر است و به صورت زیر محاسبه می شوند. روابط مختلفی برای اعمال پسای قطره در میدان گاز بیان شده است منظور از ضریب پسا، ضریب کلی است که برابر مجموع ضریب فشاری و اصطکاکی است. ضریب پسای قطرات با تغییر سرعت حرکت، شکل و غلظت قطرات تغییر می کند و همچنین تغییر قطر قطره، باعث تغییر در ضریب پسای می شود. در بدست آوردن ضریب پسا، از عدد رینولدز قطره استفاده می شود [۲] و [۴] و [۵].

$$\begin{cases} C_D = f_1 \frac{24}{Re_d} \\ f_1 = (1 + b_1 Re_d^{b_2}) + \frac{b_3 Re_d}{b_4 + Re_d} \left(\frac{Re_d}{24}\right) \\ f_2 = \frac{\beta}{e^\beta - 1} \end{cases} \quad (8)$$

ضرایب  $b$  مقادیری ثابت می باشند [۵].

تعریف عدد رینولدز قطره به شکل زیر است: [۲، ۴، ۶]

$$Re_d = \frac{\rho_G d_p (u_G - u_d)}{\mu_G} \quad (9)$$

اعداد پرانتل، اشمیت، شروود و ناسلت هم بدین گونه تعریف می شوند:

$$\begin{cases} Pr_G = \mu_G C_{PG} / C_L, Sc_G = \mu_G / \rho_G \Gamma_G \\ Nu = 2 + 0.552 Re_d^{1/2} Pr_G^{1/3} \\ Sh = 2 + 0.552 Re_d^{1/2} Sc_G^{1/3} \end{cases} \quad (10)$$

#### ۴- مدل ریاضی

برای بررسی فرآیند تبخیر باید از یک مدل استفاده نمود. این مدلها در شبیه سازی فرآیند تبخیر مورد استفاده قرار می گیرد و علت آن فرمول بندی خلاصه آنها و تشابه تعمیم همین نتایج به معادله انرژی می باشد. مدلهای مفروض شامل دو نسخه از مدل کلاسیک و چهار نسخه از مدلهای همسان انتقال جرم و حرارت و همچنین دومدل غیرتعادلی هستند. برای

بررسی تغییرات دما در فاز ابتدایی تبخیر از مدل (Langmuir & Knudsen) [۲] استفاده شده است. در این راستا، اعداد انتقال اسپالدینگ برای جرم در شرایط تعادلی و غیر تعادلی به ترتیب بدین شکل هستند:

$$B_{M,eq} = (Y_{S,eq} - Y_G) / (1 - Y_{S,eq}) \quad (11)$$

که  $Y_S$  پارامتر کسر جرمی در سطح و  $Y_G$  کسر جرمی بخار دور از سطح قطره می باشد.

$$B_{M,neq} = (Y_{S,neq} - Y_G) / (1 - Y_{S,neq}) \quad (12)$$

عدد انتقال انرژی نیز به شکل زیر است:

$$B_T = (T_G - T_d) C_{p,v} / L_v \quad (13)$$

$C_{p,v}$  ظرفیت گرمایی بخار نام دارد. برای محاسبه کسر جرمی بخار سوخت در سطح قطره از رابطه زیر استفاده می شود.

$$Y_{Seq} = \frac{X_{Seq}}{X_{Seq} + (1 - X_{Seq})\theta_2} \quad (14)$$

$\theta_2$  نسبت وزن مولکولی گاز به بخار می باشد. برای هر مدل تبخیر، از معادله کلایوس-کلاپیرون نسبت مولی بخار در سطح قطره ( $X_{seq}$ ) محاسبه می شود.

$$X_{seq} = \frac{P_{atm}}{P_G} \exp \left[ \frac{L_v}{R} \left( \frac{1}{T_B} - \frac{1}{T_d} \right) \right] \quad (15)$$

$T_b$  دمای جوش قطره،  $T_d$  دمای میانگین حجمی (دمای داخلی قطره) و  $W_v$  وزن مولکولی بخار هستند. کسر مولی و کسر جرمی بخار در سطح قطره، در شرایط غیر تعادلی به صورت زیر خواهند بود:

$$\begin{cases} X_{sneq} = X_{seq} - \left[ \frac{L_k}{d/2} \right] \beta \\ L_k = \frac{\mu_G \sqrt{2\pi T_d R} / W_v}{Sc_G P_G} \end{cases} \quad (16)$$

$P_G$  فشار گاز و  $L_k$  ضخامت لایه نارس می باشند. کسر جرمی بخار غیر تعادلی در سطح قطره به شکل زیر خواهد بود:

$$Y_{sneq} = \frac{X_{sneq}}{X_{sneq} + (1 - X_{sneq})\theta_2} \quad (17)$$

کسر جرمی بخار تعادلی، بواسطه پارامتر تبخیر بدون بعد ( $\beta$ )، از حالت تعادل خارج می شود.

$$\beta = \left( \frac{-3Pr_G \tau_d}{2} \right) \frac{\dot{m}_d}{m_d} \quad (18)$$

پتانسیل انتقال جرم ( $H_M$ ) به شکل زیر می باشد:

$$H_M = \ln(1 + B_{M,neq}) \quad (19)$$

معادله ای که اثر تغییرات دما را مورد بررسی قرار می دهد، به شکل زیر است:

$$H_{\Delta T} = \frac{(2\beta)}{3Pr_G} \left( \frac{\theta_1}{\tau_d} \right) \Delta T \quad (20)$$

که مقادیر پارامترها در آن به صورت زیر هستند.



$$\begin{cases} \frac{d\Delta T}{dt} = (5\Delta T - \alpha) \left( \frac{\theta_3}{Pr_G} \right) \left( \frac{-\theta_1}{\tau_d} \right) \\ \theta_3 = \frac{\lambda_G}{\lambda_L} \end{cases} \quad (21)$$

$\theta_3$  نسبت هدایت حرارتی فاز گاز به فاز مایع می باشد.

$$\alpha = \left[ 0.5(T_G - T_{sd})(G.Nu) - \left( \frac{L_v}{Cp_G} \beta \right) \right] \theta_3 \quad (22)$$

$T_{sd}$  دمای سطح قطره و  $Cp_G$  ظرفیت حرارتی فاز گاز می باشد.

$$\Delta T = T_{sd} - T_d \quad (23)$$

مطالعات گذشته نشان می دهد که پیش بینی نرخ تبخیر، نسبت به انتخاب خواص ترموفیزیکی بسیار حساس است. روش عمومی برای محاسبه خواص ترموفیزیکی مخلوط گاز و بخار سوخت استفاده از دما و کسر جرمی مرجع می باشد که مطابق روابط زیر تعریف می شوند:

$$T_R = T_{d,s} + A(T_G - T_{d,s}) \quad (24)$$

$$Y_R = Y_s + A(Y_G - Y_s)$$

ضریب  $0 \leq A \leq 1$  بوده که برای کسب نتایج بهتر،  $A = 1/3$  پیشنهاد شده است. همچنین از دمای حالت پایانی سطح قطره

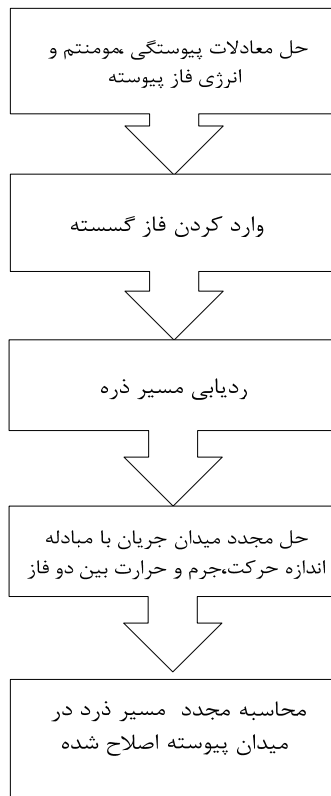
نیز می توان جهت محاسبه خواص گاز و بخار سوخت استفاده کرد [۲].

## ۵- الگوریتم حل

شبیه سازی دو فاز به دو طریق همزمان و غیر همزمان قابل انجام می باشد. در شبیه سازی دو فاز به صورت همزمان (Coupled) مراحل زیر انجام می شود.

- ۱- حل میدان جریان فاز پیوسته
- ۲- وارد کردن فاز گسسته در داخل میدان پیوسته
- ۳- محاسبه مجدد میدان فاز پیوسته پس از مبادله اندازه حرکت، جرم و حرارت بین دو فاز
- ۴- محاسبه مجدد مربوط به فاز گسسته، در میدان جریان پیوسته اصلاح شده

در شبیه سازی دو فاز به صورت غیر همزمان (Uncoupled) فقط مراحل (۱ و ۲) انجام میشود. روش حل همزمان، زمانی به کار می رود که فاز گسسته از نظر جرم و اندازه حرکت، بار زیادی بر روی میدان پیوسته دارد. در واقع تاثیر فاز گسسته بر میدان جریان پیوسته غیر قابل اغماض نیست شکل (۱). در مقابل، روش حل غیر همزمان، زمانی به کار می رود که فاز گسسته از نظر جرم و اندازه حرکت بار زیادی بر روی میدان پیوسته ندارد. ( Low mass and momentum loading ) در واقع میدان جریان پیوسته، متاثر از وجود فاز گسسته نمی شود که برای بررسی تک قطره، این روش حل بکار می رود.



شکل ۱- روش حل همزمان

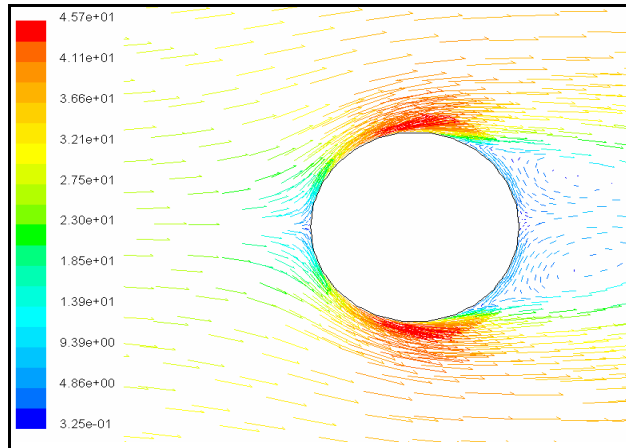
درجه حرارت هوای خروجی از کمپرسور در موتورهای هوایی به نسبت فشار کمپرسور وابسته می باشد و برای این مسئله عموماً بین ۱۸۰ تا ۲۲۰ درجه سانتیگراد بوده و دمای پاشش سوخت نیز برای این مسئله صنعتی باید کمتر از ۶۰ درجه سانتیگراد باشد. سرعت جریان هوا در محفظه موتورهای جت در اثر عبور از یک دیفیوزر کاهش یافته و عموماً بین ۵۰-۳۰ متر بر ثانیه می باشد [۷]. شرایط حل بصورت زیر است:

$$T_{\text{sphere}} = 327\text{K}, T_g = 437\text{K},$$

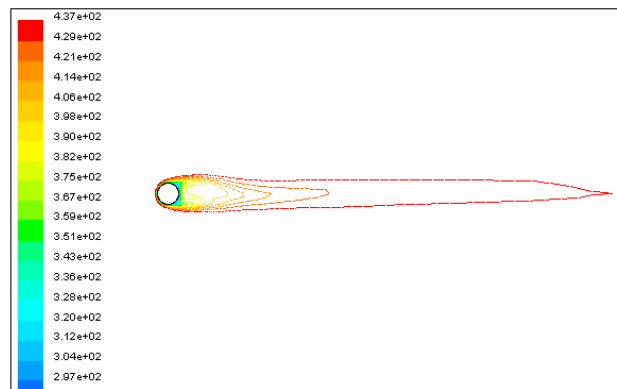
$$P_g = 3.5\text{bar}, \text{Re}_{\text{droplet}=0} = 110$$

## ۶- بررسی نحوه توزیع دما حول سطح کره، جهت بررسی تغییرات دمای حول سطح قطره

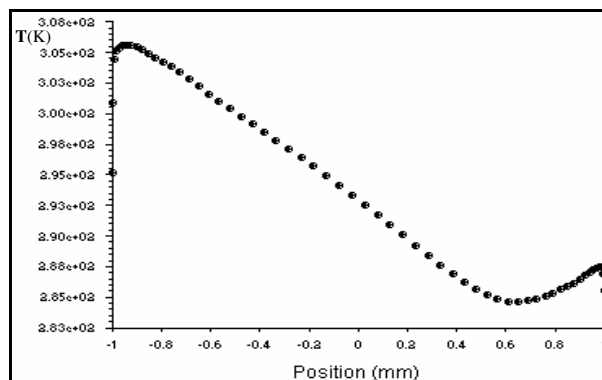
معادلات حاکم، همان معادلاتی است که در بخش دوم به آنها اشاره شد. میدان جریان گاز اطراف قطره در شکل ۲ نشان داده شده است. در فرآیند حل، مطابق با شکل ۳ همان طور که انتظار می رود دما در نقطه سکون بالاترین مقدار و در نقطه جدایش (به علت لمس نشدن سطح کره توسط خطوط جریان گاز) کمترین مقدار را دارد. از نقطه سکون تا نقطه فوقانی روی سطح کره (به علت شیب فشار منفی) دما کاهش می یابد. بعد از نقطه جدایش، دمای روی سطح به علت لمس شدن سطح توسط جریان های برگشتی مجدداً افزایش می یابد. علت دیگر افزایش دما، وجود گرادیان فشار مثبت است (شکل ۴).



شکل ۲- خطوط جریان گاز



شکل ۳- کانتورهای دما و پروفیل آن در اطراف کره



شکل ۴- توزیع دما بر روی سطح قطره از صفر تا  $\pi$  درجه (نیم دایره فوقانی)

## ۷- نتیجه گیری

نتایج نشان می دهد که مکانیزم غالب انتقال حرارت در مراحل اولیه گرمایش قطره به صورت هدایتی می باشد که رفته رفته جای خود را به اشکال دیگر انتقال گرما بسته به شرایط تبخیر خواهد داد [۸]. همچنین با توجه به این تحقیق می توان موارد زیر را برای مسأله مورد مطالعه نتیجه گرفت:

## ۱-۷- میدان جریان

زمان مشخصه تغییرات میدان جریان گازی، معمولاً بسیار کوچکتر از زمان عمر قطره است. بنابراین، از نقطه نظر دائم بودن جریان، فرض شبه پایدار تا حد زیادی درست می باشد. لازم به ذکر است که اگر چه در بسیاری موارد، میدان جریان گاز متلاطم است ولی به دلیل کوچکتر بودن اندازه قطره نسبت به اندازه گردابه ها، روی سطح قطره، لایه مرزی آرام وجود دارد.

## ۲-۷- فشار

نتایج عددی نشان می دهند که در فشار محیط بالا (۱ تا ۴ مگا پاسکال) قطرات ابتدا منبسط می شوند [۲]. لازم به ذکر است که در فشار محیط ۰/۱ مگا پاسکال، پدیده انبساط در قطرات آشکار نمی شود. تحت فشار بالای محیط، گاز محیط به درون قطره نفوذ می کند و باعث می شود یک مخلوط لایه ای سطحی که آن خودش یک نقطه کاذب بحرانی دارد، تشکیل شود. همچنان که قطره گرم می شود، مخلوط سطح به نقطه بحرانی کاذب نزدیک می شود در حالیکه سیال خالص در داخل قطره زیر نقطه بحرانی می ماند و در نهایت کشش سطحی به صفر رسیده و در اثر فشار بالا، قطره شکسته می شود. در کار حاضر، فشار سیال در حدود ۳ بار است و پدیده های فوق بوجود نخواهد آمد.

## ۳-۷- چرخش داخلی

تنشهای برشی در فصل مشترک گاز-مایع، باعث ایجاد جریان داخلی درون قطره می شود. این جریان داخلی را می توان با حل کامل معادلات ناویر-استوکس شبیه سازی کرد. در صورتی که عدد رینولدز قطره زیاد باشد، تنش برشی بین گاز و مایع به اندازه ای بزرگ خواهد بود که باعث چرخش داخلی فاز مایع می شود. جریان داخلی قطره، باعث کاهش قابل توجهی در زمانها و طولهای مشخصه انتقال جرم و حرارت در فاز مایع می شود. بنابراین بخاطر این اختلاطهای داخلی درون قطره، انتقال حرارت و جرم وجود خواهد داشت و نهایتاً نرخ تبخیر قطره تغییر می کند.

## ۴-۷- کشش سطحی

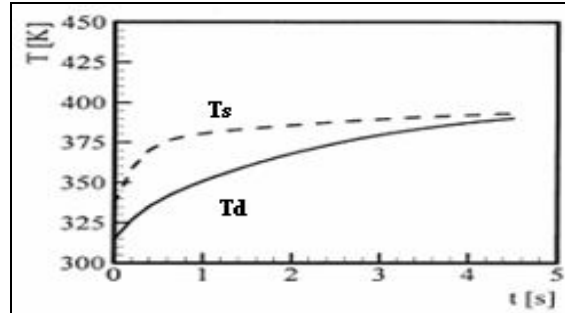
کشش سطحی، تمایل به حفظ شکل کروی قطره دارد. در اعداد رینولدز بالا (بیشتر از  $10^2$ ) اثرات اینرسی بر کشش سطحی غلبه می کند و عدد وبر قابل ملاحظه می شود و این منجر به شکست قطرات و تبدیل آن ها به قطرات کوچک می شود. در کار اخیر بدلیل کوچک بودن عدد وبر ( $w_e \leq 1$ )، از اثرات آنها صرف نظر شده است [۱].

## ۵-۷- دمای گاز و قطره

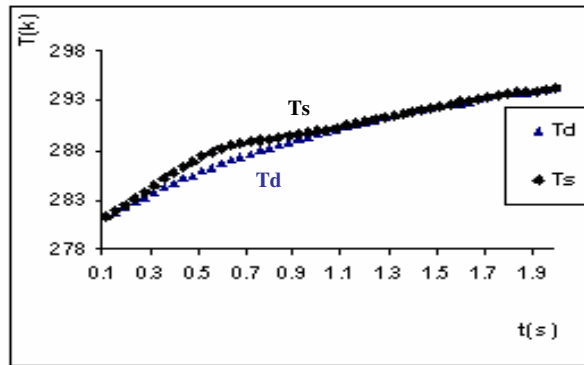
بالا بودن دمای گاز، اثر افزایشی بر دمای سطح قطره در لحظات اولیه دارد. بدین گونه که در ابتدا، دمای سطح در مجاورت گاز داغ بالا می رود و نهایتاً با دمای داخل قطره برابر می شود. میزان افزایش دمای سطح، بستگی به شرایط تبخیر دارد (نرخهای تبخیر کم، متوسط و زیاد [۲]). اندازه دمای گاز پارامتر غالب است. زمانیکه قطره در داخل جریان گاز داغ قرار می گیرد، در ابتدای گرمایش، دمای سطح قطره (برای زمانهای اولیه) به سرعت افزایش می یابد و در اثرگردایان دما، یک ناحیه پیش گرم کوچک، نزدیک سطح قطره تشکیل می شود و در ادامه مطابق با شکل های ۵ و ۶، هر دوی دمای متوسط حجمی و دمای سطح، به یک اندازه می رسند. برای کوتاه کردن این زمان در محفظه های جت، سوخت را قبل از ورود به انژکتور از روی لوله های روغن برگشتی از یاتاقان ها می توان عبور داد و روغنی که در اثر روغن کاری اجزاء چرخنده و داغ، گرم و منبسط شده توسط سوخت خنک نمود تا دمای اولیه سوخت نیز بالا رود. با پیش گرم کردن سوخت، دمای اولیه بالا رفته و اختلاف دمای قطره با گاز کم شده و بازه زمانی که صرف تعادل دمای میانگین حجمی و دمای سطح قطره می شود به میزان



چشمگیری کاهش می یابد که این امر منجر به کوتاه شدن زمان احتراق سوخت و نهایتاً کوچکتر شدن بعد طولی محفظه احتراق خواهد شد.

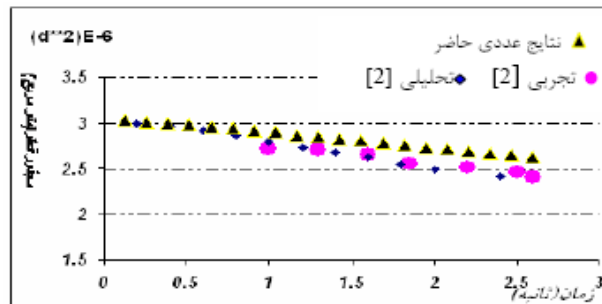


شکل ۵-  $T_s$  (دمای سطح) و  $T_d$  (دمای میانگین حجمی) در مقابل زمان در شرایط  $T_G = 1000^\circ\text{K}$ ,  $T_d = 315^\circ\text{K}$  [۲]



شکل ۶-  $T_s$  و  $T_d$  در شرایط  $T_G = 437^\circ\text{K}$ ,  $T_d = 281^\circ\text{K}$  مدل  $\text{Langmuir-Knudsen}$  [۲] (نتایج عددی حاضر)

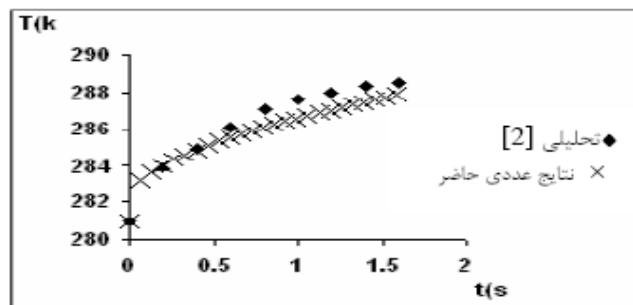
مقایسه شکل های (۵) و (۶) نشان می دهد که مطابق انتظار، هر دو کمیت دمایی نهایتاً به یک مقدار خواهند رسید. تفاوت دو نمودار در مقدار نرخ تبخیر می باشد. بدلیل عدم اطلاعات تجربی برای شرایط شکل ۶، رفتار سنجی پارامترها در شکل ۶ با شکل ۵ مقایسه شده است و مسئله مهم، یکسان بودن روند هر دو نمودار می باشد. در شکل ۷ جهت مقایسه نتایج با نتایج تجربی موجود، مجذور قطر قطره با زمان در فرآیند تبخیر نشان داده شده که در آن میزان خطا ۵ درصد می باشد.



شکل ۷- مجذور قطر قطره در مقابل زمان برای نتایج عددی حاضر توسط مدل غیر تعادلی  $\text{Langmuir-Knudsen}$  [۲] و شرایط تجربی [۲]

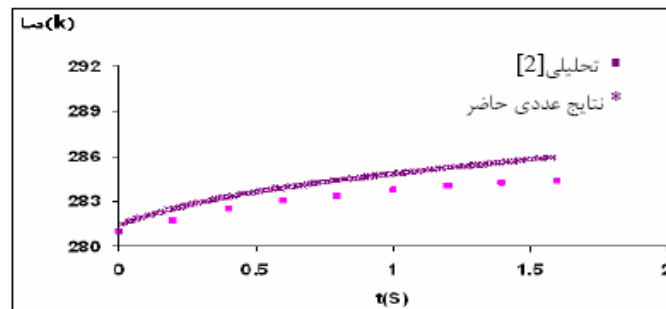
## ۶-۷- تاثیر نوع مدل بر فرآیند حل

در این شبیه سازی، بررسی تبخیر توسط هریک از مدلها، امکان پذیر می باشد. مسئله تبخیر به کمک مدل‌های ذکر شده در شکل های ۶، ۸ و ۹ بررسی شد. در شکل های ۸ و ۹ مدل ها قادر به اعمال تفاوت محسوس (در این مسئله) بین دمای داخلی و دمای سطح قطره نبوده و لذا یک روند افزایشی دما را با توجه به انتقال حرارت جابجایی بین قطره و گاز پیش بینی نمودند که در واقع تخمین آن ها Over predict بود. در شکل ۶ مدل بکار رفته علاوه بر پیش بینی روند افزایشی دما در قطره، به دلیل فرمول بندی مناسب، رفتار سنجی واقعی تری از پدیده تبخیر در فاز آغازین از خود نشان می دهد که همین امر دقت بالاتر آن را نسبت به سایر مدل ها نشان می دهد.



شکل ۸- بررسی دمای داخلی قطره برای نتایج عددی حاضر و یک کار تحلیلی [۲] (توسط مدل Classical rapid mixing)

بررسی شکل‌های (۸) و (۹) نشان می دهد که مدل کامپیوتری، رفتارسنجی درستی را در مقایسه با نتایج تحلیلی موجود از خود نشان می دهد و حداکثر دارای ۵ درصد خطا می باشد.



شکل ۹- بررسی دمای داخلی قطره برای نتایج عددی حاضر و یک کار تحلیلی [۲] (توسط مدل Mass analogy)

## ۷-۷- جمع بندی

به دلیل کثرت تعداد پارامترهای حاکم بر مسئله، مطالعه کلیه پارامترها در یک پژوهش و بطور جزئی ممکن نمی باشد [۴]. ولی آنچه مسلم است پارامترهای ترمودینامیکی که متاثر از شرایط میدان گاز هستند، به نحو ویژه ای بر فرآیند تبخیر تاثیر گذار می باشند به طوری که با افزایش دما و فشار گاز، عمر قطره کاهش می یابد [۱]. به عنوان نمونه عمر قطره در میدان گاز با دمای ۱۲۰۰ کلوین ۶۰-۵۰ درصد عمر آن در دمای ۶۰۰ می باشد که دلیل این امر کاهش کسر جرمی بخار در سطح قطره مطابق با رابطه مربوطه می باشد [۱۴]. همچنین با توجه به اینکه در اکثر پژوهش های مرتبط با تبخیر قطره، مدل

Classical rapid mixing (مدل  $d^2$ ) مورد استفاده قرار می گیرد، مع الوصف این مدل پیش بینی درستی در لحظات اولیه فرآیند از پارامتر دما و لذا نرخ تبخیر (که مطابق با تفاضل  $(Y_S - Y_G)$  می باشد) ندارد [۱ و ۴] ولی در مراحل پایانی پیش بینی قابل قبولی از خود نشان می دهد. در کار حاضر با توجه به نرخ تبخیر موجود [۲] نتایج مدل ها در فازهای آغازین و انتهای فرآیند تبخیر حداکثر اختلاف ۳ درصدی دارند که نشان می دهد برای مسئله حاضر از هر یک از مدل ها می توان استفاده نمود.

## مراجع

- 1- Hongtao Zhang , Numerical research on a vaporizing fuel droplet in a forced convective environment, Journal of Multiphase Flow, Vol.30,PP. 181-198,2004
- 2-R.S. Miller, K.harstad, J.Bellan, Evaluation of equilibrium and non- equilibrium evaporation models for many-droplet gas-liquid flow simulations , Vol.24, PP.1025-1055,1998
- 3- Tong, A.Y. ,Sirignano,W.A. ,Transient thermal boundary layer in heating of droplet with internal circulation, Combustion, Technology, Vol.29,pp.87-94,1982
- 4- F. Mashayek, "Direct numerical simulations of evaporating droplet dispersion in forced low Mach number turbulence," Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 41, No.17,PP.2601-2617,1998
- 5- Tutorial and Manual of Fluent, 2001
- 6- F.catoire,G.E.D.Gauthier,M.F.Bardon and A.Benaissa, "Quasi- steady state evaporation model for multicomponent droplets", Royal military college of Canada ,Kingstone,Ontario
- 7- H.Cohen, G.F.C.Rogers, H.I.H. Saravanamutto, "Gas turbine theory", 3<sup>rd</sup>, John Wiley and Sons, New York, 1987
- ۸- محمد فرشچی و همکاران، "بررسی روند گذرای انتقال حرارت قطره و متصاعد شدن گاز از قطره سوخت مایع پراثرژی"، ششمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران، اسفند ماه ۱۳۸۵
- 9-Wong,S.C.,Lin,A.R., "Internal temperature distributions of droplets vaporizing in high-temperature convective flows" ,J.fluid mesh,N.237,PP.671-687