



FCCI2012-1012



ارزیابی فرض عدد لوئیس واحد در مدلسازی رفتار تبخیری قطرات آب و سوخت

امیر امیدوار^{۱*}، رضا مهربار^۲، امیرحسین مهدوی^۳
دانشگاه صنعتی شیراز - دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا
omidvar@sutech.ac.ir

چکیده

در بسیاری از فرآیندهای مهندسی و صنعتی، استفاده از اسپری‌ها کاربرد فراوانی دارد. در این راستا بررسی رفتار تبخیری قطرات اسپری، از اهمیت بسزایی برخوردار است. یکی از فرض‌هایی که در مدلسازی رفتار تبخیری قطرات اسپری مورد استفاده قرار می‌گیرد، فرض عدد لوئیس واحد می‌باشد. در این تحقیق، صحت این فرض مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور، معادلات انتقال جرم و انرژی برای یک تک قطره محاسبه شده‌اند. در این راستا یک قطره‌ی سوخت (n-Heptane) و یک قطره‌ی آب در فشار و دمای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. به منظور اطمینان از صحت محاسبات، نتایج با داده‌های آزمایشگاهی و عددی گزارش شده در مقالات مقایسه شده و هماهنگی خوبی بین نتایج مشاهده گردید. زمان تبخیر و دمای نهایی قطره یکبار با در نظر گرفتن فرض لوئیس واحد و یکبار بدون در نظر گرفتن این فرض برای سوخت مذکور و آب مقایسه شده‌اند. با توجه به نتایج حاصل به نظر می‌رسد فرض لوئیس واحد، فرض مناسبی برای مطالعه‌ی رفتار تبخیری سوخت‌ها نمی‌باشد. اما بر خلاف سوخت‌ها، نتایج حاصل از اعمال فرض لوئیس واحد برای قطره‌ی آب در مقایسه با حالتی که این فرض اعمال نشده است، مطابقت خوبی دارد. در این حالت دمای نهایی قطره‌ی آب به دمای حباب تر هوا^۴ نزدیک‌تر است.

واژه‌های کلیدی: قطره - تبخیر - عدد لوئیس

۱- مقدمه

استفاده از اسپری‌ها در بسیاری از فرآیندهای مهندسی و کاربردهای صنعتی همچون موتورهای احتراق داخلی، سیستم‌های اطفا حریق و تولید پودرهای خشک رواج دارند. در این راستا مباحث مربوط به رفتار قطرات از مسائل مهم و کلیدی در این فرآیندها می‌باشد. مطالعه‌ی آزمایشگاهی رفتار اسپری پس از خروج از دهانه‌ی نازل بخصوص در فشارهای بالا، بدلیل چگالی زیاد مایع در نزدیکی نازل، بسیار پیچیده می‌باشد [۱]. به همین دلیل بررسی عددی رفتار اسپری یک عامل مهم برای مطالعه‌ی دقیق‌تر مکانیزم فیزیکی این پدیده می‌باشد. یکی از چشم‌اندازهای مهم در بررسی اسپری‌ها، مطالعه‌ی رفتار تبخیری مایع تزریق شده از نازل می‌باشد. بدلیل ارزشمند بودن سوخت، مطالعات آزمایشگاهی وسیعی در زمینه‌ی شبیه‌سازی رفتار تبخیری سوخت‌های مختلف انجام شده است [۲ و ۳]. در همین راستا روابط عددی متعددی به منظور شبیه‌سازی رفتار قطره‌ی سوخت ارائه شده است [۴-۶]. با توجه به در دسترس بودن آب، مطالعات پرهزینه‌ی آزمایشگاهی بر روی رفتار تبخیری قطره‌ی آب صورت نگرفته است و در کارهای انجام شده رفتار کمی اسپری آب مورد توجه قرار گرفته است [۷ و ۸]. یوشیدا و هایدو در سال ۱۹۷۰ به صورت آزمایشگاهی کاهش نرخ تبخیر قطره‌ی آب را به دلیل افزایش رطوبت نسبی نشان دادند [۹]. شیرای و همکاران در سال ۱۹۷۱ تغییرات دمای قطرات آب را بصورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند [۱۰ و ۱۱]. در

۱- استادیار

۲- استادیار

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

^۴ Air Wet-Bulb Temperature

FCCI2012-1012

مطالعات انجام شده در سال‌های اخیر نیز در مورد سیستم اسپری آب و کاربردهای صنعتی آن، از فرض‌های ساده کننده‌ی بسیاری استفاده شده است که صحت بسیاری از آن‌ها بدلیل نبود نمونه‌های آزمایشگاهی به اثبات نرسیده است [۱۲-۱۴]. یکی از پرکاربردترین فرض‌هایی که در مطالعات مربوط به رفتار تبخیری آب استفاده می‌شود، فرض واحد بودن عدد بی‌بعد لوئیس می‌باشد. این فرض به این دلیل استفاده می‌شود که روابط موجود برای نفوذ آب در هوا بدلیل جامع نبودن نتایج آزمایشگاهی، بازه‌ی عملکرد دمایی محدودی دارند [۱۵].

در این تحقیق با توسعه‌ی یک کد صفر-بعدي، رفتار یک قطره‌ی آب و سوخت در یک محیط گرم مورد مطالعه قرار گرفته است. با مقایسه‌ی نتایج حاصل از قبیل قطر و دمای قطره با نتایج آزمایشگاهی و عددی موجود سعی شده است صحت فرض واحد بودن عدد لوئیس در بررسی رفتار تبخیر یک قطره‌ی آب و سوخت (n-Heptane) مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲- معادلات حاکم و فرضیات

یک کد صفر-بعدي برای گرمایش و تبخیر یک تک قطره، با صرف‌نظر از گرادیان دمای درون قطره و همچنین اثرات تابش، مورد بررسی قرار گرفته است. قطره ساکن در نظر گرفته شده و از اثرات قطره بر روی جریان صرف‌نظر شده است. هوای اطراف هم به صورت گاز ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود. معادلات حاکم در این بررسی، معادلات انتقال جرم و انرژی می‌باشند که بصورت لاگرانژی مورد بررسی قرار می‌گیرند. با حل معادلات مذکور، اطلاعات مربوط به قطر و دمای قطره در هر گام زمانی قابل محاسبه می‌باشد. با توجه به اینکه قطره ساکن در نظر گرفته شده است از حل معادلات مومنتوم برای قطره صرف‌نظر می‌شود.

۱-۲- معادلات انتقال جرم

روابط متعددی برای محاسبه‌ی عدد بی‌بعد شروود ارائه شده است. یکی از رایج‌ترین روابط موجود به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Sh = 2 + 0.6Re^{0.5} Sc^{0.33} \quad (1)$$

که در آن $Re = \rho_a d |V_a - V_d| / \mu_m$ و $Sc = \mu_m / \rho_a D_{ab}$ به ترتیب اعداد بی‌بعد رینولدز و اشمیت برای یک قطره می‌باشند. V_a و V_d به ترتیب سرعت قطره و گاز می‌باشند. تمامی خواص مایع و هوا وابسته به دما می‌باشد و خواص انتقالی مربوط به هوا و بخار از قبیل C_p ، μ و k در دمای میانگین $T_m = (T_a + T_d) / 2$ محاسبه می‌شوند. T_a و T_d دمای قطره و هوا می‌باشند. اطلاعات کامل در مورد خواص ترمودینامیکی در بخش مربوط آورده شده است. نرخ مایع تبخیر شده از سطح قطره از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۴]:

$$\frac{dm_d}{dt} = \pi d \rho_m D_{ab} Sh \ln(1 + B_m) \quad (2)$$

که در آن $B_m = (Y_s - Y_\infty) / (1 - Y_s)$ عدد جرمی اسپالدینگ می‌باشد. D_{ab} نفوذ جرمی بخار مایع در هوا بوده و Y_s و Y_∞ به ترتیب درصد جرمی بخار مایع در نزدیکی قطره و در فاصله دور از قطره می‌باشند. به دلیل ناچیز بودن Y_∞ اغلب از آن در معادلات صرف‌نظر می‌شود. مقدار Y_s از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۴]:

$$Y_s = \left[1 + \left(\frac{P}{P_s} - 1 \right) \frac{M_a}{M_l} \right]^{-1} \quad (3)$$



FCCI2012-1012

چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

کاشان - دانشگاه کاشان - بهمن ماه ۱۳۹۰



P_s و P به ترتیب فشار محیط و فشار اشباع بخار مایع در نزدیکی سطح قطره می‌باشند و M_l و M_a به ترتیب جرم مولکولی هوا و مایع می‌باشد.

۲-۲- معادلات انرژی

معادله‌ی ارائه شده برای عدد بی بعد ناسلت قطرات در این تحقیق به صورت زیر است:

$$Nu = 2 + 0.6Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (۴)$$

که در آن Re عدد رینولدز قطره می‌باشد که بر اساس سرعت نسبی بین قطره و هوا محاسبه می‌گردد و $Pr = C_{pm}\mu_m/k_m$ عدد بی بعد پرانتل می‌باشد.

دمای قطره در هر گام زمانی با توجه به تعادل انرژی با در نظر گرفتن نرخ انتقال گرما و تبخیر از روی سطح قطره از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۱۲]:

$$m_d C_{pl} \frac{dT_d}{dt} = -A_s \dot{q}_d'' + h_{fg} \frac{dm_d}{dt} \quad (۵)$$

$$\dot{q}_d'' = h(T_d - T_a) \quad (۶)$$

در رابطه‌ی (۵) مقدار A_s سطح قطره و h_{fg} انرژی نهان تبخیر آب می‌باشد. در رابطه‌ی (۶) ضریب انتقال حرارت جابجایی بوده و از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$h = \frac{Nuk_m}{d} \quad (۷)$$

که در آن d قطر قطره و k_m ضریب هدایت گرمایی میانگین می‌باشد.

برای فشارهای بالا، بهتر است از رابطه‌ی زیر برای محاسبه‌ی دمای قطره استفاده شود [۱]:

$$m_d C_{pl} \frac{dT_d}{dt} = \dot{q}_d - h_{fg} \frac{dm_d}{dt} \quad (۸)$$

$$\dot{q}_d = k_a \pi d (T_a - T_d) \frac{\zeta}{e^{\zeta} - 1} Nu \quad (۹)$$

$$\zeta = \frac{C_{pv} dm_d/dt}{Nuk_a \pi d} \quad (۱۰)$$

۲-۳- نفوذ^۱ جرمی بخار در هوا

در رابطه‌ی (۲) D_{ab} نمایانگر نفوذ جرمی بخار مایع در هوا می‌باشد. برای سوخت مورد نظر در این تحقیق (n-Heptane) رابطه‌ی ارائه شده برای نفوذ به صورت زیر است [۴]:

$$D_{ab} = \frac{(3.341 \times 10^{-5} T_m^{1.75})}{P} \quad (۱۱)$$

که همانگونه که قبلاً اشاره شد T_m دمای میانگین مایع و هوا و P فشار محیط می‌باشد.

اما برای نفوذ بخار آب در هوا اطلاعات آزمایشگاهی کمی ارائه شده است. جدول ۱ مقادیر D_{ab} را در بازه‌ی دمایی ۲۰°C تا ۴۰°C برای آب نشان می‌دهد [۱۵]:

¹ Diffusivity

جدول ۱- مقادیر نفوذ بخار آب در هوا در دماهای مختلف

دما (°C)	-۲۰	-۱۰	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰
نفوذ جرمی ($cm^2 s^{-1}$)	۰.۱۹۷	۰.۲۱۱	۰.۲۲۶	۰.۲۴۱	۰.۲۵۷	۰.۲۷۳	۰.۲۸۹

برای گازها وابستگی نفوذ به فشار و دما به صورت زیر ارائه می‌شود [۱۵]:

$$\frac{D_{ab}}{D_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \frac{P_0}{P} \quad (12)$$

که در آن D_0 نفوذ بخار آب در دمای مطلق T_0 و فشار P_0 می‌باشد. بهترین رابطه‌ی ارائه شده برای نفوذ بخار آب در هوا در $n=1.81$ تعریف می‌شود [۱۵]. همانگونه که مشاهده می‌شود با توجه به محدودیت بازه‌ی دمایی ارائه شده، در دماهای بالا احتمال وجود خطا افزایش می‌یابد.

۲-۴- فرض عدد لوئیس واحد

عدد بی‌بعد لوئیس نمایانگر نسبت نفوذ حرارتی (α) به نفوذ جرمی (D_{ab}) می‌باشد و هنگامی تعریف می‌شود که انتقال حرارت و انتقال جرم به روش جابجایی همزمان صورت گیرد.

$$Le = \frac{\alpha}{D_{ab}} \quad (13)$$

که در آن $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ می‌باشد. علاوه بر این عدد لوئیس را می‌توان نسبت عدد اشمیت به پرانتل نیز تعریف کرد:

$$Le = \frac{Sc}{Pr} \quad (14)$$

عدد لوئیس در واقع نسبت سرعت نفوذ حرارت به نفوذ ذرات^۱ را نشان می‌دهد. در بسیاری از مدل‌های تبخیر فرض می‌شود تمامی ذرات با یک سرعت یکسان نفوذ می‌کند. در این صورت مقدار عدد لوئیس واحد در نظر گرفته می‌شود. در این صورت نفوذ حرارتی با نفوذ جرمی برابر شده و نتیجه می‌شود:

$$\rho_m D_{ab} = \frac{k_m}{C_{Pm}} \quad (15)$$

همانگونه که انتظار می‌رود با توجه به رابطه‌ی (۱)، (۴) و (۱۴) مقدار عدد ناسلت و شرود برابر می‌شود و معادله‌ی انتقال جرم به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$\frac{dm_d}{dt} = \pi d \left(\frac{k_m}{C_{Pm}} \right) Sh \ln(1 + B_m) \quad (16)$$

که با این فرض D_{ab} از معادلات حذف می‌شود.

۲-۵- خواص ترمودینامیکی

¹ Species

FCCI2012-1012

همانگونه که در بخش قبل اشاره شد، نرخ تبخیر وابسته به خواص ترمودینامیکی مخلوط بخار و آب می‌باشد. تمامی خواص در شرایط فیلم حول قطره و در دمای میانگین $T_m = (T_a + T_d)/2$ و درصد جرمی $Y_r = (Y_\infty + 2Y_s)/3$ طبق قانون یک سوم محاسبه می‌شوند.

$$\mu_m = Y_r \mu_v + (1 - Y_r) \mu_a$$

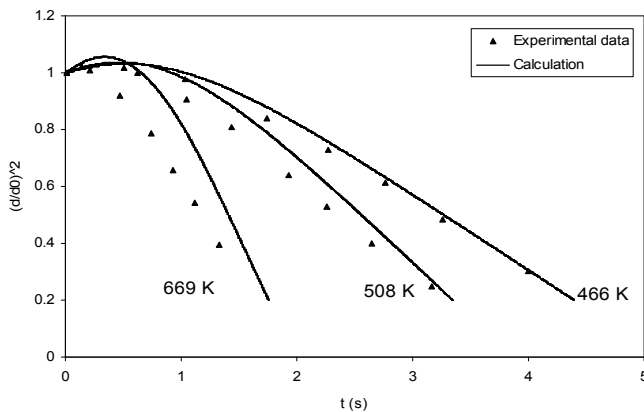
$$C_{Pm} = Y_r C_{Pv} + (1 - Y_r) C_{Pa}$$

$$k_m = Y_r k_v + (1 - Y_r) k_a$$

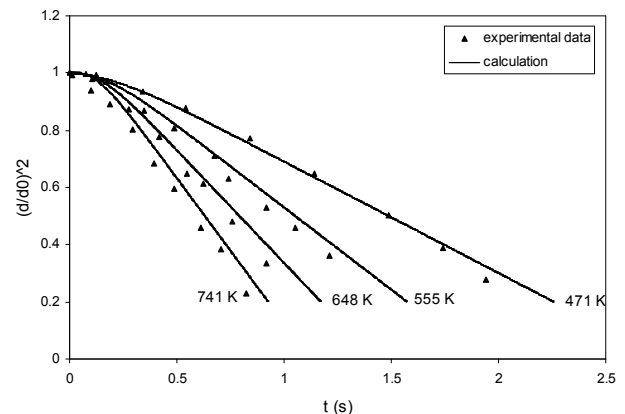
لازم به ذکر است اندیس‌های a ، l و v به ترتیب مربوط به هوا، مایع و بخار می‌باشد.

۳- ارزیابی صحت الگوریتم عددی

در این بخش مدل عددی ارائه شده با مقایسه‌ی تغییرات زمانی قطر و دمای قطره با نتایج آزمایشگاهی موجود ارزیابی می‌شود. در گزارش ارائه شده توسط نومورا و همکاران [۲]، یک قطره‌ی n-Heptane معلق در محیط نیتروژن تحت تأثیر فشارها و دماهای مختلف قرار گرفته است. قطر اولیه قطره ۰/۶ تا ۰/۷ میلی‌متر و دمای اولیه آن ۳۰۰ K می‌باشد. آزمایش در شرایط میکروگرافی انجام شده است. مقادیر آزمایشگاهی $(d/d_0)^2$ بر حسب زمان (t) برای بازه‌ی فشاری ۰/۱ MPa و ۱ MPa و بازه‌ی دمایی ۴۰۰ K تا ۸۰۰ K در نمودار (۱) آورده شده و نتایج بدست آمده از مدل عددی ارائه شده در این گزارش نیز در شرایط یکسان مقایسه شده‌اند.



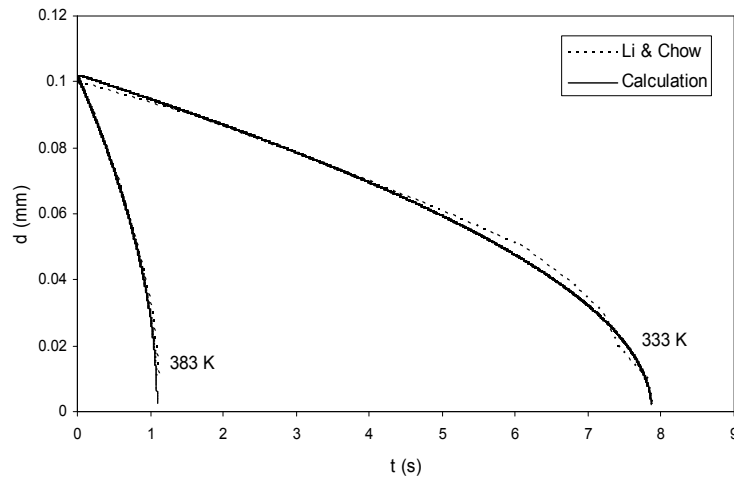
(ب)



(الف)

نمودار ۱- تغییرات $(d/d_0)^2$ برای تبخیر قطره n-Heptane بر حسب زمان در دماهای مختلف
(الف) برای فشار ۰/۱ MPa و (ب) برای فشار ۱ MPa

در نمودار (۲) نتایج بدست آمده از مدل عددی این گزارش با نتایج عددی لی و چو [۱۲] برای قطره‌ی آب مقایسه شده است. قطر اولیه‌ی قطره ۰/۱ میلی‌متر و دمای اولیه ۲۸۳ K و فشار محیط ۰/۱ MPa می‌باشد. سرعت اولیه قطره 3 (m/s) در راستای افق بوده و اثرات جاذبه در نظر گرفته شده است.

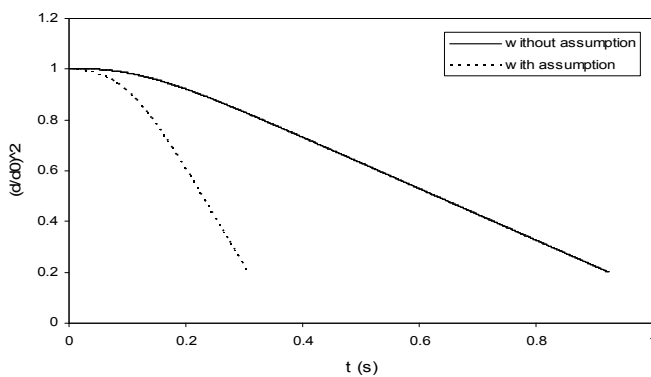


نمودار ۲- تغییرات d برای تبخیر قطره‌ی آب بر حسب زمان در فشار 0.1 MPa در دو دمای 383 K و 333 K

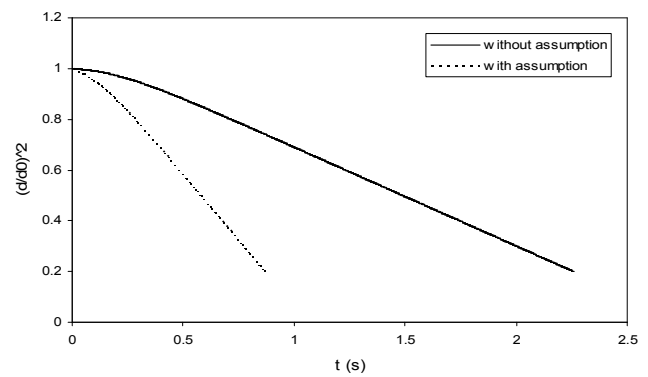
همانگونه که مشاهده می‌شود، مدل عددی گزارش شده در این تحقیق مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی و عددی پیشین دارد. در ادامه صحت فرض واحد بودن عدد لوئیس در مطالعات مربوط به تبخیر قطره بررسی خواهد گردید.

۴- بحث و نتایج

همانگونه که در بخش ۴-۲ اشاره شد، با در نظر گرفتن فرض عدد لوئیس واحد معادلات مربوط به انتقال جرم تغییر می‌کند. در این بخش تأثیرات این فرض بر روی زمان تبخیر و دمای نهایی قطره برای سوخت (n-Heptane) و آب مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور یک قطره‌ی سوخت و آب بطور جداگانه در فشارهای 0.1 MPa ، 0.5 MPa و 1 MPa در دماهای مختلف، یکبار با در نظر گرفتن فرض عدد لوئیس واحد و یکبار بدون آن مورد بررسی قرار گرفتند. در نمودارهای (۳)، (۴) و (۵) قطره‌ی سوخت n-Heptane با قطر اولیه‌ی 0.6 میلی‌متر تحت شرایط مذکور در دو حالت مورد مقایسه قرار گرفته است.

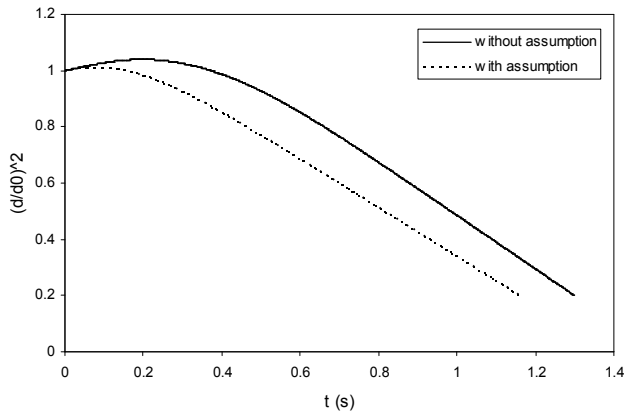


(ب)

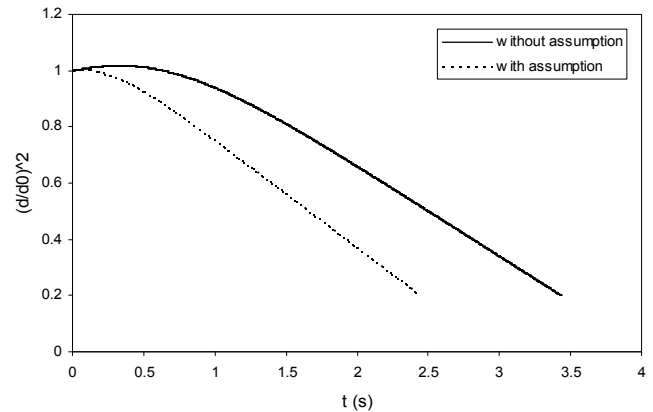


(الف)

نمودار ۳- مقایسه‌ی تغییرات زمانی قطر محاسبه شده برای قطره‌ی n-Heptane با در نظر گرفتن فرض عدد لوئیس واحد و بدون آن در فشار 0.1 MPa (الف) در دمای هوای 471 K و (ب) در دمای هوای 741 K

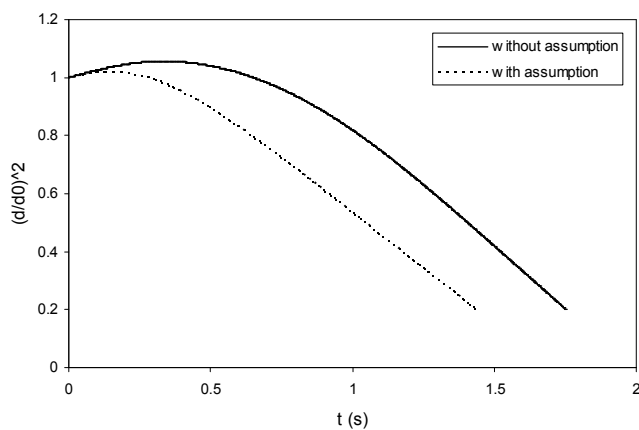


(ب)

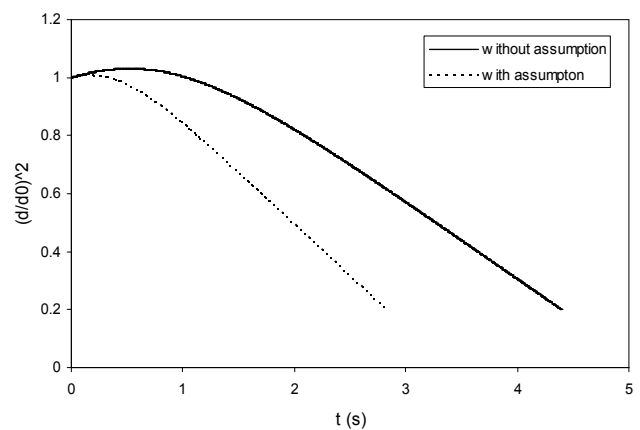


(الف)

نمودار ۴-مقایسه‌ی تغییرات زمانی قطر محاسبه شده برای قطره‌ی n-Heptane با در نظر گرفتن فرض عدد لوئیس واحد و بدون آن در فشار ۰.۵ MPa (الف) در دمای هوای ۴۶۸ K و (ب) در دمای هوای ۷۴۹ K



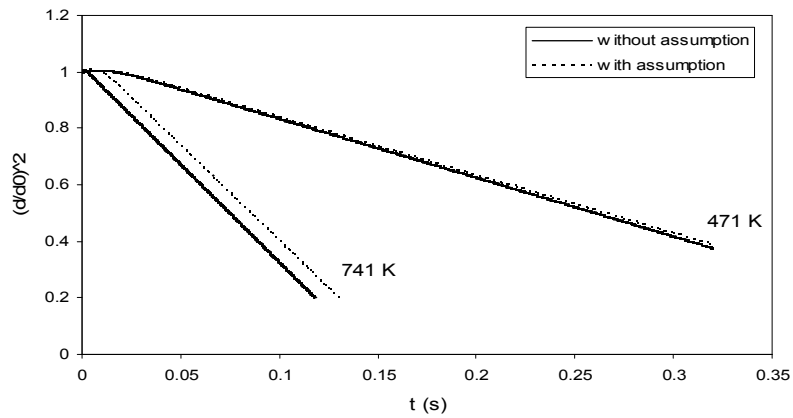
(ب)



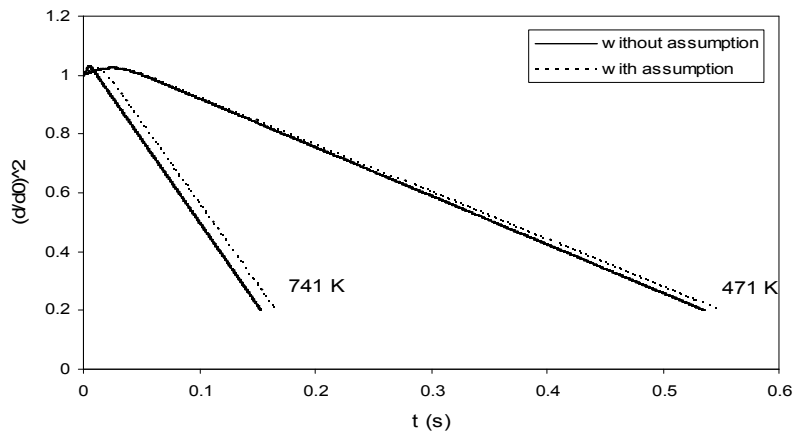
(الف)

نمودار ۵-مقایسه‌ی تغییرات زمانی قطر محاسبه شده برای قطره‌ی n-Heptane با در نظر گرفتن فرض عدد لوئیس واحد و بدون آن در فشار ۱ MPa (الف) در دمای هوای ۴۶۶ K و (ب) در دمای هوای ۶۶۹ K

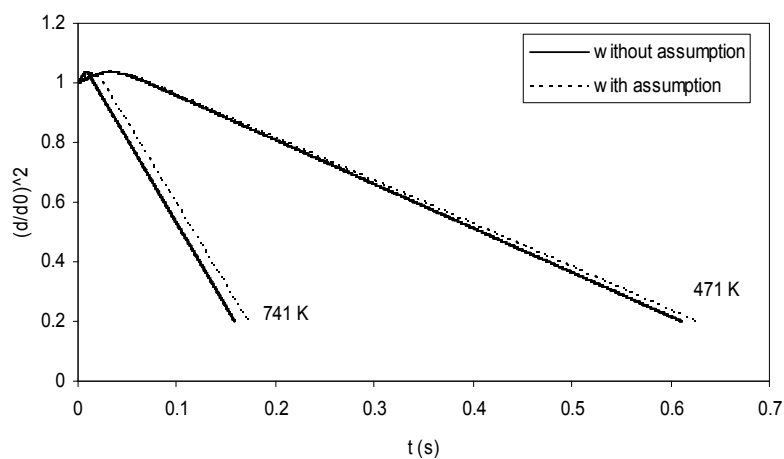
همانگونه که در نمودارهای فوق مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن فرض عدد لوئیس واحد، محاسبات دچار خطای چشمگیری شده و میزان خطا برای زمان تبخیر تا ۶۰٪ هم می‌رسد. البته در فشارها و دماهای بالا این میزان کاهش می‌یابد. در منحنی‌های نمودار (۶) قطره‌ی آب با قطر اولیه‌ی ۰.۱ میلی‌متر تحت شرایط مذکور در دو حالت مورد مقایسه قرار گرفته است.



(الف)



(ب)



(ج)

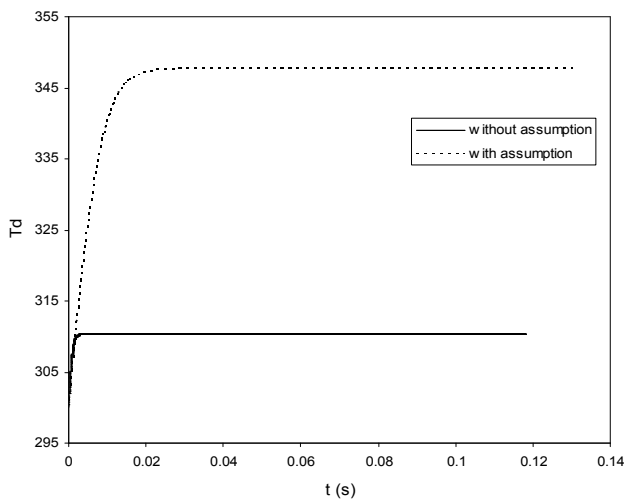
نمودار ۶-مقایسه‌ی تغییرات زمانی قطر محاسبه شده برای آب با در نظر گرفتن فرض عدد لوئیس واحد و بدون آن در دماهای مختلف

(الف) در فشار ۰.۱ MPa (ب) در فشار ۰.۵ MPa و (ج) در فشار ۱ MPa

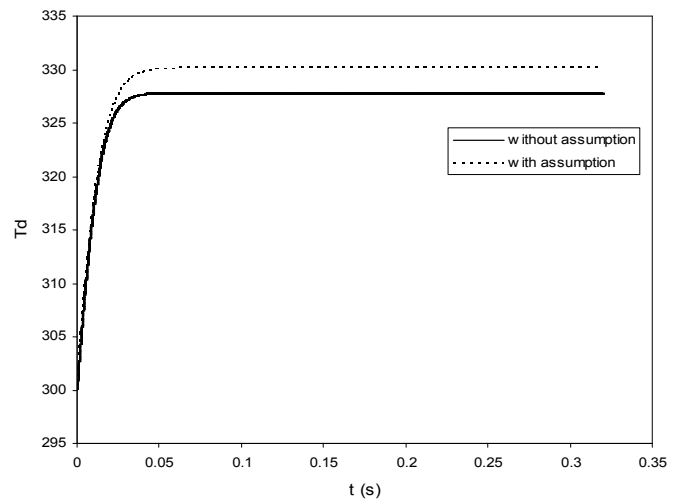
FCCI2012-1012

با توجه به این منحنی‌ها می‌توان دریافت که فرض مقدار واحد برای عدد لوئیس، فرض مناسبی برای مطالعه‌ی رفتار تبخیری قطره‌ی آب می‌باشد. در این صورت حداکثر میزان خطا ۷٪ بوده که در دماهای بالا اتفاق می‌افتد. البته همانطور که در بخش ۳-۲ اشاره شد اطلاعات موجود برای محاسبه‌ی نفوذ جرمی آب محدودیت دمایی دارند. لذا به نظر می‌رسد خطای ایجاد شده در دماهای بالا، بدلیل همین محدودیت دمایی روابط باشد و در صورت تصحیح رابطه‌ی نفوذ جرمی برای آب، این خطا کاهش یابد.

نمودار (۷) تغییر دمای قطره‌ی آب را در فشار ۰.۱ MPa و در دو دمای ۴۷۱ K و ۷۴۱ K نشان می‌دهد. در این نمودار تغییرات دمایی نمودار (۶) بررسی شده است.



(ب)



(الف)

نمودار ۷- مقایسه‌ی تغییرات زمانی دمای محاسبه شده برای قطره‌ی آب بر حسب کلویین با در نظر گرفتن فرض عدد لوئیس واحد و بدون آن در فشار ۰.۱ MPa، (الف) برای دمای هوای ۴۷۱ K و (ب) برای دمای هوای ۷۴۱ K

هنگامی که یک قطره‌ی آب در محیط گرم قرار می‌گیرد، دمای آن به سرعت افزایش می‌یابد. این افزایش دمای قطره تا جایی ادامه می‌یابد که دمای قطره به دمای حباب تر هوا برسد [۱۰ و ۱۱]. روابط متعددی برای محاسبه‌ی دمای حباب تر هوا موجود است. جدول ۲ مقادیر آزمایشگاهی دمای حباب تر هوا را بر حسب دمای هوا نشان می‌دهد [۱۲].

جدول ۲- مقادیر آزمایشگاهی دمای حباب تر هوا را بر حسب دمای هوا

۱۲۷۳.۱۵	۱۰۷۳.۱۵	۸۷۳.۱۵	۶۷۳.۱۵	۴۷۳.۱۵	۳۷۳.۱۵	دمای هوا (K)
۳۶۸.۱۵	۳۶۳.۱۵	۳۵۸.۱۵	۳۴۳.۱۵	۳۲۳.۱۵	۳۰۶.۱۵	دمای حباب تر هوا (K)

با توجه به جدول ۲، با میان‌یابی، دمای حباب تر هوا در ۴۷۱ K و ۷۴۱ K به ترتیب برابر با ۳۲۳ K و ۳۴۸ K بدست می‌آید. همانطور که در نمودار (۸) مشاهده می‌شود، با فرض لوئیس واحد، دمای نهایی قطرات به مقادیر آزمایشگاهی نزدیک می‌باشند. همچنین به نظر می‌رسد خطای موجود در حالتی که این فرض در نظر گرفته نشده است، بدلیل محدودیت دمایی رابطه‌ی نفوذ جرمی برای آب می‌باشد.



۵- جمع بندی

یک کد صفر بعدی به منظور ارزیابی صحت فرض لوئیس واحد در مطالعات مربوط به رفتار تبخیر قطره‌ی سوخت و آب توسعه یافته است. به منظور اطمینان از صحت کد مورد نظر، مقایسه‌ای با مقادیر آزمایشگاهی نومورا و همکاران [۲] و مقادیر عددی لی و چو [۱۲] صورت گرفته است. به نظر می‌رسد فرض لوئیس واحد برای مطالعه‌ی رفتار تبخیری سوخت‌ها، فرض مناسبی نمی‌باشد و خطای این فرض در محاسبه‌ی زمان تبخیر به ۶۰٪ نیز می‌رسد. اما اعمال این فرض برای مطالعه‌ی رفتار تبخیری آب، نتایج قابل قبولی به همراه دارد؛ بطوریکه بیشترین خطای ایجاد شده برای زمان تبخیر ۷٪ در دماهای بالا می‌باشد. با اعمال این فرض دمای نهایی قطره به دمای حباب تر هوا نزدیک‌تر می‌باشد. خطای ایجاد شده برای قطره‌ی آب در دو حالت اعمال فرض لوئیس واحد و بدون اعمال این فرض، بدلیل محدودیت دمایی رابطه‌ی نفوذ جرمی برای آب می‌باشد و با اصلاح رابطه‌ی مذکور این خطا کاهش می‌یابد.

مراجع

- 1- Baumgurten, C., *Mixture Formation in Internal Combustion Engines*, Springer, 2005
- 2- Nomura, H., Ujiie, Y., Rath, H.J., Sato, J., Kono, M., *Experimental study on High-Pressure Droplet Evaporation Using Microgravity Conditions*, Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion/ The Combustion Institute, pp. 1267-1273, 1996
- 3- Gokalp, C., Chauveau, J., Richard, R., Kramer, M., Leuckel, W., *Observation on the Low Temperature Vaporization and Envelope or Wake Flame Burning of n-Heptane Droplets at Reduced Gravity During Parabolic Flights*, Twenty-second Symposium (International) on Combustion/ The Combustion Institute, pp. 2027-2035, 1988
- 4- Sazhin, S.S., Abdelghaffar, W.A., Sazhina, E.M., Heikal, M.R., *Models for Droplet Transient Heating: Effects on Droplet Evaporation, Ignition, and Break-up*, International Journal of Thermal Science, Vol. 44, pp. 610-622, 2005
- 5- Abramzon, B., Sirignano, W.A., *Droplet vaporization model for spray combustion calculations*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 32, pp. 1605-18, 1989
- 6- Yao, G.F., Abdel-Khalik, S.I., Ghiaasiaan, S.M., *An investigation of simple evaporation models used in spray simulations*, ASME, Journal of Heat and Transfer, Vol. 125, pp. 179-82, 2003
- 7- Collin, A., Boulet, P., Parent, G., Vetrano, M.R., Buchlin, J.M., *Dynamic and Thermal Behaviour of Water Sprays*, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 47, pp. 399-407, 2008
- 8- Kim, S.C., Ryou, H.S., *An Experimental and Numerical Study on Fire Suppression Using a Water Mist in an Enclosure*, Building and Environment, Vol. 38, pp. 1309-1316, 2003
- 9- Yoshida, T., Hyodo, T., *Evaporation of Water in Air, Humid Air and Superheated Steam*, Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development, 1970
- 10- Shirai, K., Matsui, S., Shinjo, A., *On the Temperature Change of Sprayed Water Drops I: Theoretical Study*, Transaction of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering, Vol. 35, pp. 24-29, 1971
- 11- Shirai, K., Matsui, S., Shinjo, A., *On the Temperature Change of Sprayed Water Drops II: Experimental Study*, Transaction of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering, Vol. 35, pp. 30-35, 1971
- 12- Li, Y.F., Chow, W.K., *Study of Water Droplet Behavior in Hot Air Layer in Fire Extinguishment*, Fire Technology, Vol. 44, pp. 351-381, 2008
- 13- Di pin, L., Zu-ming, C., *Numerical Simulation of Water Mist Fire Suppression Technology*, Procedia Engineering, Vol. 11, pp. 205-209, 2011



انجمن احتراق ایران

چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

کاشان - دانشگاه کاشان - بهمن ماه ۱۳۹۰



FCCI2012-1012

- 14- Zheng, L., Quan, W., *Experimental Study of Explosive Water Mist Extinguishing Fire*, Procedia Engineering, Vol. 11, pp. 258-267, 2011
- 15- Montgomery, R.B., *Viscosity and Thermal Conductivity of Air and diffusivity of Water Vapor in Air*, Journal of Meteorology, Vol. 4, pp. 193-197, 1947