

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

امیر امیدوار<sup>۱</sup>، رضا مهریار<sup>۲</sup> و امیرحسین مهدوی<sup>۳</sup>

۱- استادیار مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شیراز و عضو هیئت علمی پژوهشکده سامانه‌های دریایی (نویسنده مخاطب)، [omidvar@sutech.ac.ir](mailto:omidvar@sutech.ac.ir)

۲- استادیار مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شیراز و عضو هیئت علمی پژوهشکده سامانه‌های دریایی، [mehryar@sutech.ac.ir](mailto:mehryar@sutech.ac.ir)

۳- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شیراز، [ah.mahdavi@yahoo.com](mailto:ah.mahdavi@yahoo.com)

(دریافت: ۱۳۹۱/۳/۱۳، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۱/۱۰/۲۲، پذیرش: ۹۱/۱۱/۲۹)

در بسیاری از فرایندهای مهندسی و صنعتی، استفاده از افشانه‌ها کاربرد فراوانی دارد. در این راستا بررسی رفتار تبخیری قطرات افشانه از اهمیت بسزایی برخوردار است. یکی از فرض‌هایی که در مدلسازی رفتار تبخیری قطرات افشانه مورد استفاده قرار می‌گیرد، فرض عدد لوئیس واحد است، که در این تحقیق صحت این فرض بررسی و ارزیابی شده است. بدین منظور، معادلات انتقال جرم و انرژی برای یک تک قطره محاسبه شده‌اند. در این راستا، یک قطره سوخت (هپتان نرمال) و یک قطره آب در فشار و دمای مختلف مطالعه شده‌اند. به منظور اطمینان از صحت محاسبات، نتایج با داده‌های آزمایشگاهی و عددی گزارش شده در مقالات مقایسه شده و هماهنگی خوبی بین نتایج مشاهده شد. 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 مطالعه رفتار تبخیری سوخت‌ها نیست. اما، برخلاف سوخت‌ها، نتایج حاصل از اعمال فرض لوئیس واحد برای قطره آب، در مقایسه با حالتی که این فرض اعمال نشده است، مطابقت خوبی دارد. در این حالت دمای نهایی قطره آب به دمای حباب تر هوا نزدیک‌تر است.

کلیدواژگان: قطره، تبخیر، عدد لوئیس

### مقدمه

استفاده از افشانه‌ها در بسیاری از فرایندهای مهندسی و کاربردهای صنعتی، همچون موتورهای احتراق داخلی، سیستم‌های اطفاء حریق و تولید پودرهای خشک رواج دارد. در این راستا، مباحث مربوط به رفتار قطرات از مسائل مهم و کلیدی در این فرایندهاست. مطالعه آزمایشگاهی رفتار افشانه پس از خروج از دهانه نازل، به‌ویژه در فشارهای بالا، به‌دلیل چگالی زیاد مایع در نزدیکی نازل، بسیار پیچیده است [۱]. به همین دلیل، بررسی عددی رفتار افشانه یک عامل مهم برای مطالعه دقیق‌تر سازوکار فیزیکی این پدیده است. یکی از چشم‌اندازهای مهم در بررسی افشانه‌ها، مطالعه رفتار تبخیری مایع تزریق شده از نازل است. به‌دلیل ارزشمند بودن سوخت، مطالعات آزمایشگاهی وسیعی در زمینه شبیه‌سازی رفتار تبخیری سوخت‌های مختلف انجام شده است [۲، ۳]. در همین راستا، روابط عددی متعددی به‌منظور شبیه‌سازی رفتار قطره سوخت ارائه شده است [۴-۶]. با توجه به دردسترس بودن آب، مطالعات پرهزینه آزمایشگاهی بر روی رفتار تبخیری قطره آب صورت نگرفته است و در کارهای انجام شده رفتار کمی افشانه آب مورد توجه قرار گرفته است [۷، ۸]. یوشیدا و هایدو به‌صورت آزمایشگاهی کاهش نرخ تبخیر قطره آب را به‌دلیل افزایش رطوبت نسبی نشان دادند [۹]. شیرای و همکاران تغییرات دمای قطرات آب را به‌صورت آزمایشگاهی و عددی مطالعه کردند [۱۰، ۱۱]. در مطالعات انجام شده در سال‌های اخیر نیز در مورد سیستم افشانه آب و کاربردهای صنعتی آن، از فرض‌های ساده‌کننده بسیاری استفاده شده است که صحت بسیاری از آن‌ها، به‌دلیل 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 بی بعد لوئیس است. این فرض اغلب به این دلیل استفاده می‌شود که روابط موجود برای نفوذ آب در هوا، به دلیل جامع نبودن نتایج آزمایشگاهی، بازه عملکرد دمایی محدودی دارند [۱۵]. فرض عدد لوئیس واحد در مدلسازی‌های اولیه برای جریان افشانه استفاده می‌شد، اما در مدل‌های جدیدتر این فرض کمتر مورد توجه قرار گرفت [۱۶]. البته در برخی از مدلسازی‌های جدید حتی برای افشانه سوخت نیز همچنان این فرض استفاده می‌شود [۱۷]. همواره در مدلسازی تبخیر قطرات افشانه فرضیات ساده‌کننده‌ای استفاده می‌شود که شناسایی آن‌ها می‌تواند در بهبود عملکرد مدل‌ها به شدت اثرگذار باشد [۱۷]. یکی از این فرضیات، فرض تبخیر تعادلی یا همان فرض واحد بودن عدد لوئیس قطره است که لازم است صحت یا عدم صحت این فرض ارزیابی شود. در این تحقیق، با توسعه یک کد صفر بعدی، رفتار یک قطره آب و سوخت در یک محیط گرم مطالعه شده است. با مقایسه 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 قطره آب و سوخت (هپتان نرمال) ارزیابی شود.

## معادلات حاکم و فرضیات

در این پژوهش، یک کد صفر بعدی برای مطالعه گرمایش و تبخیر یک تک قطره، با صرف نظر از گرادیان دمای درون قطره و همچنین اثرات تابش، توسعه یافته است. قطره، ساکن در نظر گرفته شده و از اثرات قطره بر روی جریان نیز صرف نظر شده است. هوای اطراف هم به صورت گاز ایدئال فرض شده است. معادلات حاکم در این بررسی معادلات انتقال جرم و انرژی اند که به صورت لاگرانژی بررسی می‌شوند. با حل معادلات مذکور، اطلاعات مربوط به قطر و دمای قطره در هر گام زمانی قابل محاسبه است. با توجه به اینکه قطره ساکن در نظر گرفته شده است، از حل معادلات تکانه برای قطره صرف نظر می‌شود.

## معادله بقای جرم

تاکنون روابط متعددی برای محاسبه عدد بی بعد شروود<sup>۱</sup> 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 بی بعد رینولدز و اشمیت برای یک قطره‌اند.  $V_a$  و  $V_d$  به ترتیب سرعت قطره و گازند. تمامی خواص مایع و هوا وابسته به دماست و خواص انتقالی مربوط به هوا و بخار از قبیل  $C_p$ ،  $\mu$  و  $k$  در دمای میانگین  $T_m = (T_a + T_d) / 2$  محاسبه می‌شوند.  $T_a$  و  $T_d$  دمای قطره و هوا هستند. اطلاعات کامل در مورد خواص ترمودینامیکی در بخش مربوطه آورده شده است.

نرخ تبخیر مایع از سطح قطره از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۴]:

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

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

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

1. Sherwood

که  $P_s$  و  $P_a$  به ترتیب فشار محیط و فشار اشباع بخار مایع در نزدیکی سطح قطره و در دمای قطره‌اند و  $M_l$  و  $M_a$  به ترتیب جرم مولکولی هوا و مایع است.

### معادله بقای انرژی

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

$$Nu = 2 + 0.6 Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (4)$$

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

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 رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۲]:

$$m_d C_{pl} \frac{dT_d}{dt} = -A_s \dot{q}_d'' + h_{fg} \frac{dm_d}{dt} \quad (5)$$

$$\dot{q}_d'' = h(T_d - T_a) \quad (6)$$

در رابطه (۵) مقدار  $A_s$  سطح قطره و  $h_{fg}$  انرژی نهان تبخیر آب است. در رابطه (۶)،  $h$  ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$h = \frac{Nuk_m}{d} \quad (7)$$

که در آن  $d$  قطر قطره و  $k_m$  ضریب هدایت گرمایی میانگین است. برای فشارهای بالا، بهتر است از رابطه زیر برای محاسبه دمای قطره استفاده شود [۱]:

$$m_d C_{pl} \frac{dT_d}{dt} = -\dot{q}_d + h_{fg} \frac{dm_d}{dt} \quad (8)$$

$$\dot{q}_d = k_a \pi d (T_d - T_a) \frac{\zeta}{e^{\zeta} - 1} Nu \quad (9)$$

$$\zeta = -\frac{C_{pv} dm_d/dt}{Nuk_a \pi d} \quad (10)$$

### نفوذ جرمی بخار در هوا

در رابطه (۲)،  $D_{ab}$  نمایانگر نفوذ جرمی بخار مایع در هواست. برای سوخت مورد نظر در این تحقیق (هیپتان نرمال)، رابطه ارائه شده برای نفوذ جرمی به صورت زیر است [۴]:

$$D_{ab} = \frac{(3.341 \times 10^{-5} T_m^{1.75})}{P_a} \quad (11)$$

که همان گونه که قبلاً اشاره شد،  $T_m$  دمای میانگین مایع و هوا و  $P_a$  فشار محیط است. اما برای نفوذ بخار آب در هوا اطلاعات آزمایشگاهی کمی ارائه شده است. جدول ۱ مقادیر  $D_{ab}$  را در بازه دمایی  $20^\circ\text{C}$  تا  $40^\circ\text{C}$  برای آب نشان می‌دهد [۱۵]:

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

۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	۰	-۱۰	-۲۰	دما ( $^\circ\text{C}$ )
۰/۲۸۹	۰/۲۷۳	۰/۲۵۷	۰/۲۴۱	۰/۲۲۶	۰/۲۱۱	۰/۱۹۷	نفوذ جرمی ( $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ )

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  $T_0$  (۳۰۰ کلوین) و فشار  $P_0$  (یک اتمسفر) است.  $T$  دمای میانگین و  $P$  فشار محیط است. بهترین رابطه ارائه شده برای نفوذ بخار آب در هوا در  $n=1.81$  تعریف می‌شود [۱۵]. همان گونه که مشاهده می‌شود، با توجه به محدودیت بازه دمایی ارائه شده، در دماهای بالا احتمال وجود خطا افزایش می‌یابد.

### فرض عدد لوئیس واحد

عدد بی بعد لوئیس نمایانگر نسبت نفوذ حرارتی ( $\alpha$ ) به نفوذ جرمی ( $D_{ab}$ ) است و هنگامی تعریف می‌شود که انتقال حرارت و انتقال جرم به روش جابه‌جایی هم‌زمان صورت گیرد.

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

که در آن  $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$  است. 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<sup>۱</sup> را نشان می‌دهد. در بسیاری از مدل‌های تبخیر، فرض می‌شود تمامی ذرات با یک سرعت یکسان نفوذ می‌کنند. در این صورت مقدار عدد لوئیس واحد در نظر گرفته می‌شود. در این صورت نفوذ حرارتی با نفوذ جرمی برابر شده و نتیجه می‌شود:

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

همان گونه که انتظار می‌رود، با توجه به رابطه (۱)، (۴) و (۱۴)، مقدار عدد ناسلت و شروود برابر می‌شود و معادله 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.

### خواص ترمودینامیکی

همان گونه که در بخش قبل اشاره شد، نرخ تبخیر وابسته به خواص ترمودینامیکی مخلوط بخار و آب است. 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 یک‌سوم محاسبه می‌شوند.

$$\mu_m = Y_r \mu_v + (1 - Y_r) \mu_a \quad (17-الف)$$

$$C_{pm} = Y_r C_{pv} + (1 - Y_r) C_{pa} \quad (17-ب)$$

$$k_m = Y_r k_v + (1 - Y_r) k_a \quad (17-ج)$$

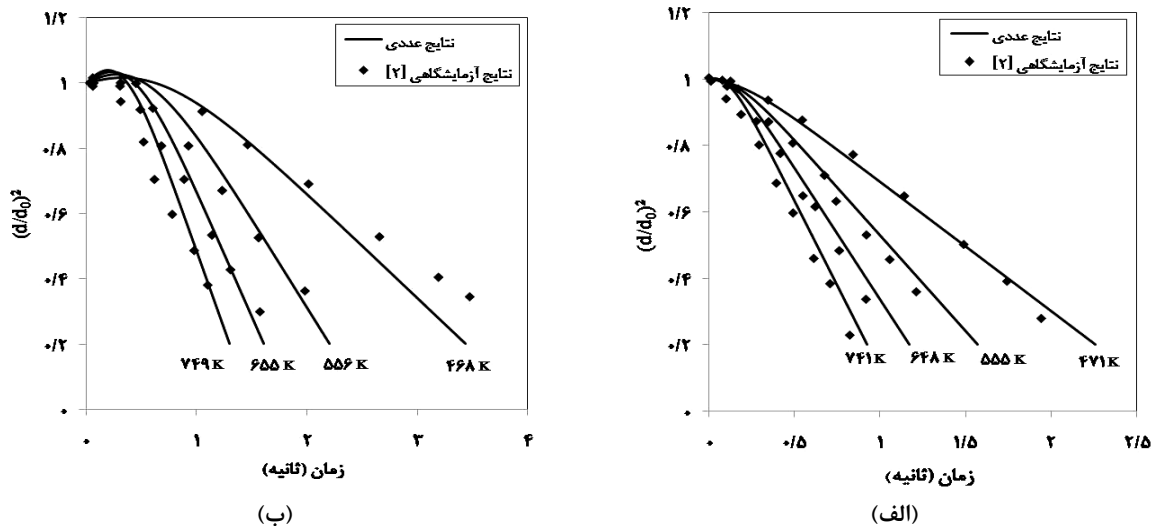
شایان ذکر است زیرنویس‌های  $a$  و  $v$  به ترتیب مربوط به هوا و بخار است.

1. Species

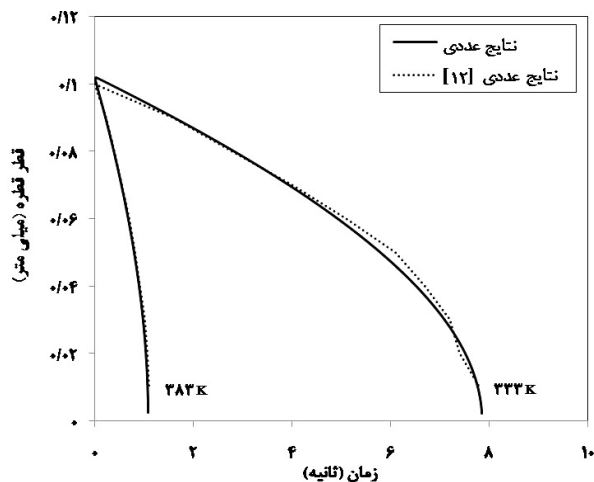
## ارزیابی صحت الگوریتم عددی

معادلات ارائه شده در بخش قبل به صورت هم‌زمان، با روش رانگ کوتا حل شد. در این بخش، مدل عددی ارائه شده با مقایسه تغییرات زمانی قطر و دمای قطره با نتایج آزمایشگاهی موجود ارزیابی می‌شود. در گزارش ارائه شده توسط نومورا و همکاران [۲]، یک قطره هپتان نرمال 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 است. آزمایش در شرایط میکروگراویتی انجام شده است. مقادیر آزمایشگاهی  $(d/d_0)^2$  برحسب زمان (t) برای بازه فشاری ۰/۱ MPa و ۰/۵ MPa و بازه دمایی ۴۰۰ تا ۸۰۰ کلوین در شکل ۱ آورده شده و نتایج به دست آمده از مدل عددی ارائه شده در این گزارش نیز در شرایط یکسان مقایسه شده‌اند.

در شکل ۲، نتایج به دست آمده از مدل عددی این گزارش با نتایج عددی لی و چو [۱۲] برای قطره آب مقایسه شده است. قطر اولیه قطره ۰/۱ میلی‌متر و دمای اولیه ۲۸۳ K و فشار محیط ۰/۱ MPa است. سرعت اولیه قطره ۳ (m/s) در راستای افق بوده و اثرات جاذبه در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- مقایسه تغییرات  $(d/d_0)^2$  برای تبخیر قطره هپتان نرمال برحسب زمان در دماهای مختلف با نتایج آزمایشگاهی [۲] (الف) برای فشار ۰/۱ MPa و (ب) برای فشار ۰/۵ MPa

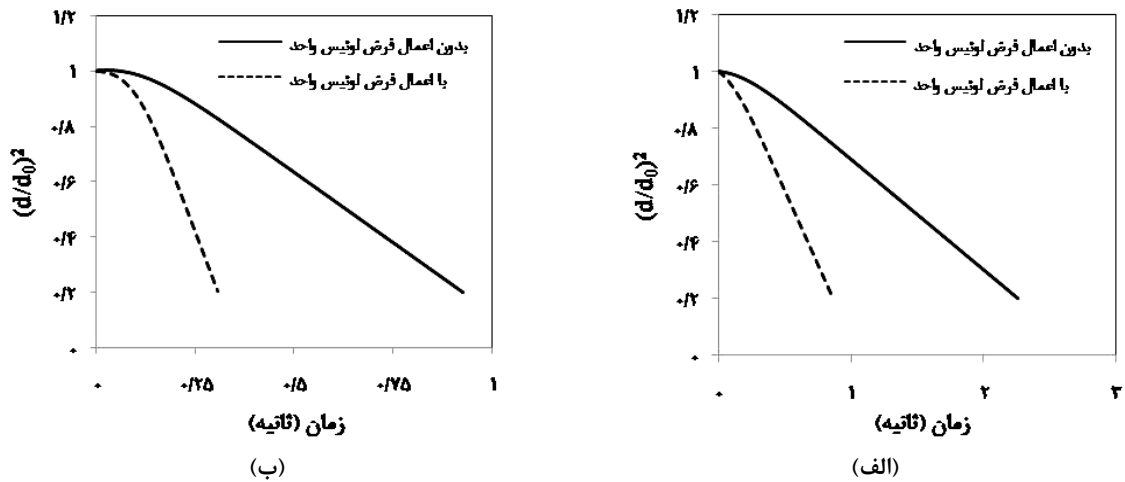


شکل ۲- مقایسه تغییرات قطر قطره آب برحسب زمان در فشار ۰/۱ MPa در دو دمای ۳۳۳ K و ۲۸۳ K با نتایج عددی لی و چو [۱۲]

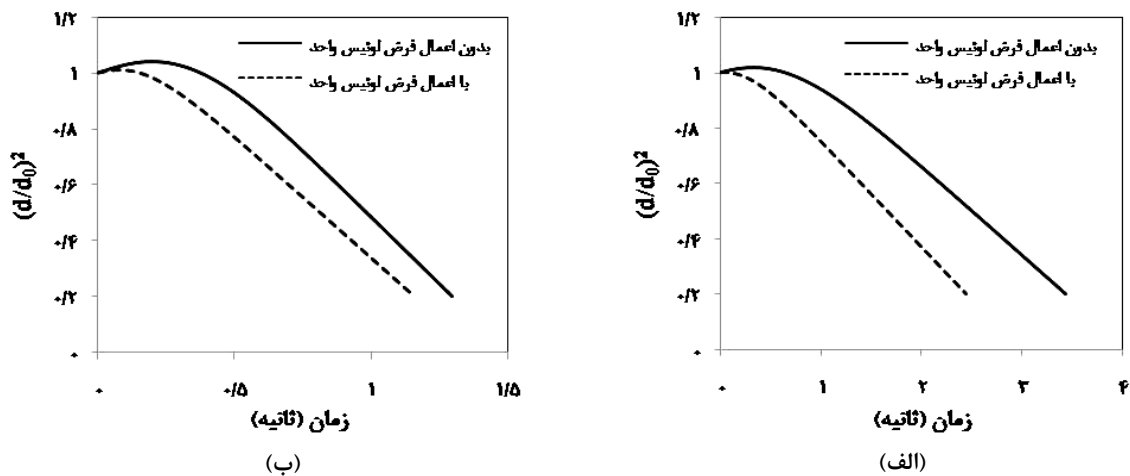
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مدل عددی گزارش‌شده در این تحقیق مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی و عددی پیشین دارد. در ادامه، صحت فرض واحد بودن عدد لوئیس در مطالعات مربوط به تبخیر قطره بررسی خواهد شد.

## بحث و نتایج

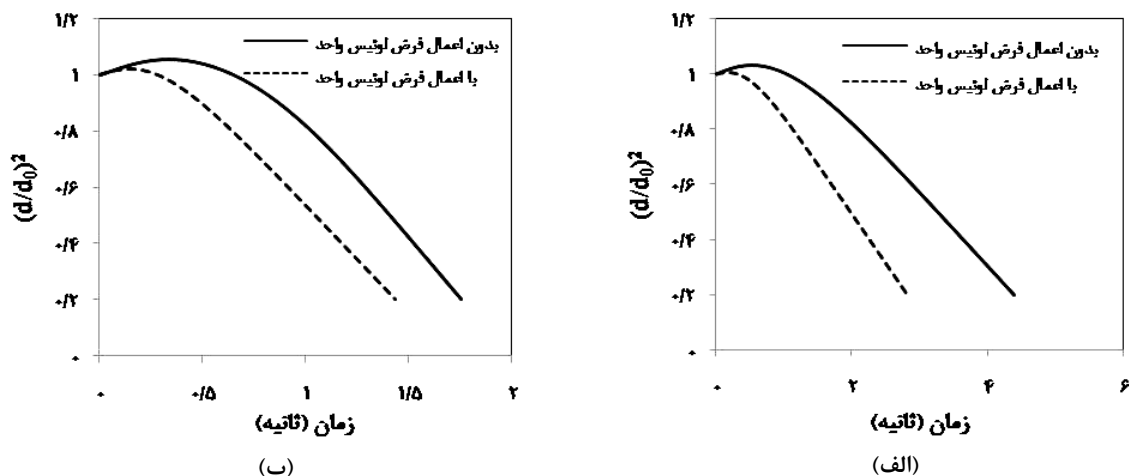
همان‌گونه که در قبلاً (در بخش فرض عدد لوئیس واحد) نیز به آن اشاره شد، با در نظر گرفتن فرض عدد لوئیس واحد معادلات مربوط به انتقال جرم کمی تغییر می‌کنند. در این بخش، تأثیرات این فرض بر روی زمان تبخیر و دمای نهایی قطره برای سوخت (هپتان نرمال) و آب ارزیابی شده است. بدین منظور یک قطره سوخت و آب به‌طور جداگانه در فشارهای ۰/۱ MPa و ۰/۵ MPa و در دماهای مختلف، یک‌بار با در نظر گرفتن فرض عدد لوئیس واحد و یک‌بار بدون آن، بررسی شدند. در شکل‌های ۳، ۴ و ۵، قطر سوخت هپتان نرمال با قطر اولیه ۰/۶ میلی‌متر تحت شرایط مذکور در دو حالت مقایسه شده است.



شکل ۳- مقایسه تغییرات زمانی قطر محاسبه‌شده برای قطره هپتان نرمال با در نظر گرفتن فرض عدد لوئیس واحد و بدون آن در فشار ۰/۱ MPa، (الف) در دمای هوای ۴۷۱ K و (ب) در دمای هوای ۷۴۱ K



شکل ۴- مقایسه تغییرات زمانی قطر محاسبه‌شده برای قطره هپتان نرمال 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



شکل ۵- مقایسه تغییرات زمانی قطر محاسبه شده برای قطره هپتان نرمال 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

همان گونه که در شکل های بالا مشاهده می شود، با در نظر گرفتن فرض عدد لوئیس واحد، محاسبات دچار خطای چشمگیری شده و میزان خطا برای زمان تبخیر تا ۶۰ درصد هم می رسد. البته در فشارها و دماهای بالا این میزان کاهش می یابد. این امر تا حد زیادی ریشه در نوع و میزان وابستگی خواص ترموفیزیکی سوخت با تغییرات دما و فشار دارد. در منحنی های شکل ۶ قطره آب با قطر اولیه ۰/۱ میلی متر تحت شرایط مذکور در دو حالت مقایسه شده است.

با توجه به این منحنی ها، می توان دریافت که فرض مقدار واحد برای عدد لوئیس فرض مناسبی برای مطالعه رفتار تبخیری قطره آب است. در این صورت حداکثر میزان خطا ۷ درصد بوده که در دماهای بالا اتفاق می افتد. البته همان طور که در بخش محاسبه خواص ترمودینامیکی به آن اشاره شد، اطلاعات موجود برای محاسبه نفوذ جرمی آب محدودیت دمایی دارند. لذا به نظر می رسد خطای ایجاد شده در دماهای بالا به دلیل همین محدودیت دمایی روابط باشد و در صورت تصحیح رابطه نفوذ جرمی برای آب، این خطا کاهش یابد.

شکل ۷ تغییر دمای قطره آب را در فشار ۰/۱ MPa و در دو دمای ۴۷۱ K و ۷۴۱ K نشان می دهد. در این شکل تغییرات دمایی شکل ۶ بررسی شده است.

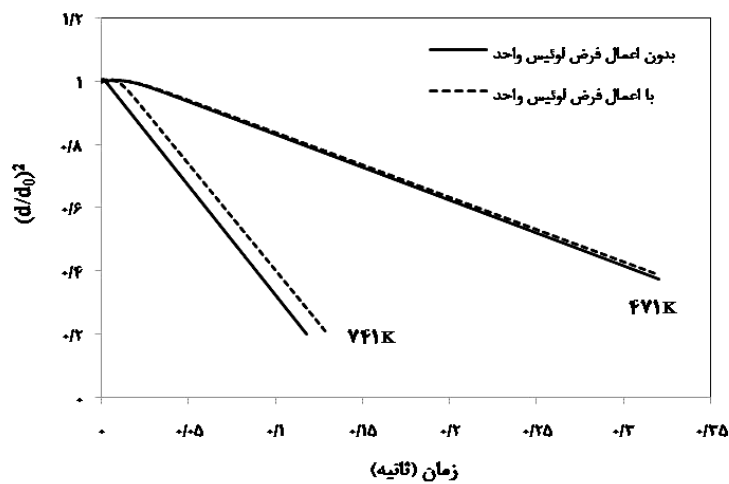
هنگامی که یک قطره آب در محیط گرم قرار می گیرد، دمای آن به سرعت افزایش می یابد. این افزایش دمای قطره تا جایی ادامه می یابد که دمای قطره به دمای حباب تر هوا<sup>۱</sup> برسد [۱۰، ۱۱]. روابط متعددی برای محاسبه دمای حباب تر هوا موجود است. جدول ۲ مقادیر آزمایشگاهی دمای حباب تر هوا را بر حسب دمای هوا نشان می دهد [۱۲].

با توجه به جدول ۲، با میان یابی، دمای حباب تر هوا در ۴۷۱ K و ۷۴۱ K به ترتیب برابر با ۳۲۳ K و ۳۴۸ K به دست می آید. همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود، با فرض لوئیس واحد، دمای نهایی قطرات به مقادیر آزمایشگاهی نزدیک است. همچنین، به نظر می رسد خطای موجود، در حالتی که این فرض در نظر گرفته نشده است، به دلیل محدودیت دمایی رابطه نفوذ جرمی برای آب است.

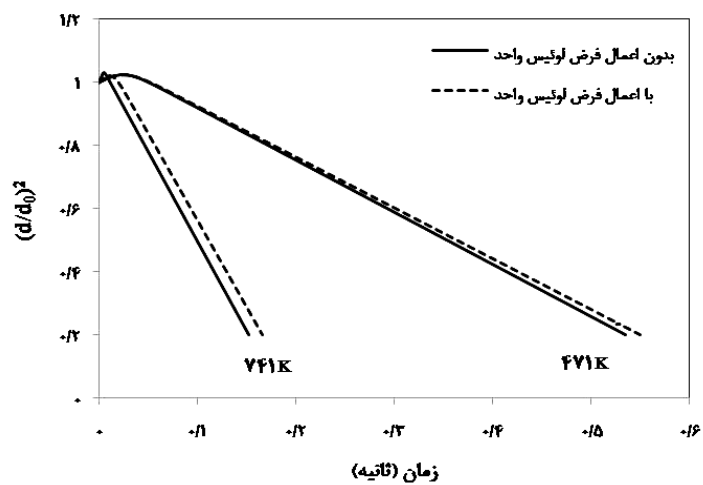
جدول ۲- مقادیر آزمایشگاهی دمای حباب تر هوا بر حسب دمای هوا

۱۲۷۳	۱۰۷۳	۸۷۳	۶۷۳	۴۷۳	۳۷۳	دمای هوا (K)
۳۶۸	۳۶۳	۳۵۸	۳۴۳	۳۲۳	۳۰۶	دمای حباب تر هوا (K)

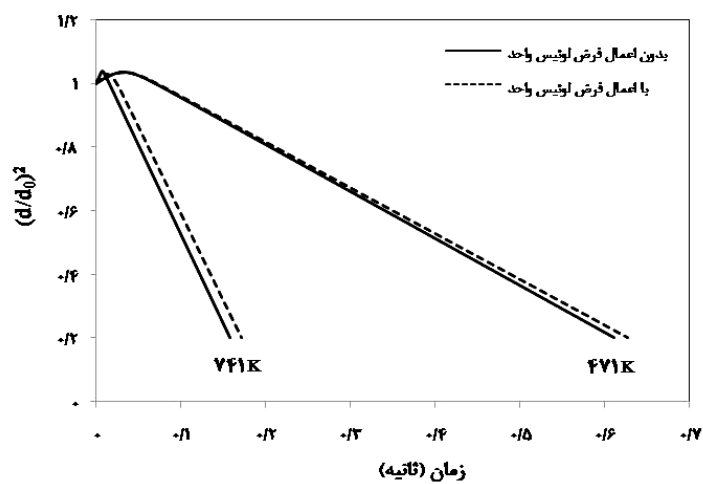
1. Air wet-bulb temperature



(الف)



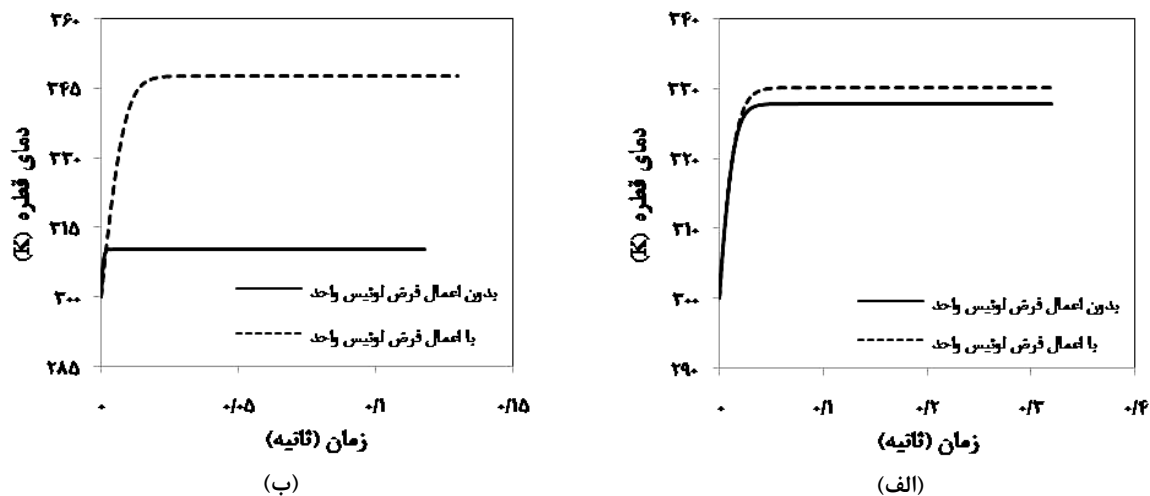
(ب)



(ج)

شکل ۶- مقایسه 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





شکل ۷- مقایسه تغییرات زمانی دمای محاسبه شده برای قطره آب بر حسب کلوین 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

### جمع بندی

همواره در مدلسازی تبخیر قطرات افشانه فرضیات ساده کننده‌ای استفاده می‌شود که شناسایی آن‌ها می‌تواند در بهبود عملکرد مدل‌ها به شدت اثرگذار باشد. یکی از این فرضیات، فرض تبخیر تعادلی یا همان فرض واحد بودن عدد لوئیس قطره است که لازم است صحت یا عدم صحت این فرض بررسی شود. در این مقاله یک کد صفر بعدی برای ارزیابی صحت فرض لوئیس واحد در مطالعات مربوط به رفتار تبخیر قطره سوخت و آب توسعه یافته است. به منظور اطمینان از صحت کد مورد نظر، نتایج کد مذکور با برخی داده‌های تجربی و عددی گزارش شده توسط پژوهشگران دیگر در شرایط مشابه مقایسه شد و هماهنگی قابل قبولی مشاهده شد.

فرض تبخیر تعادلی یا همان فرض عدد لوئیس واحد در مدلسازی‌های اولیه برای جریان افشانه استفاده می‌شد. این فرض همچنان در برخی از مدلسازی‌های افشانه سوخت استفاده می‌شود. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که فرض عدد لوئیس واحد، برای مطالعه رفتار تبخیری سوخت‌ها، فرض مناسبی نیست و خطای این فرض در محاسبه زمان تبخیر به ۶۰ درصد نیز می‌رسد. بررسی‌ها نشان داد که خطای ناشی از این فرض با بالا رفتن فشار محفظه احتراق تا حدودی کاهش خواهد یافت، ولی حتی در فشارهای بالا نیز مقادیر خطا قابل چشم‌پوشی نیست.

نتایج نشان داد که اعمال فرض عدد لوئیس واحد، برای مطالعه رفتار تبخیری قطره آب، نتایج قابل قبولی به همراه دارد؛ به طوری که بیشترین خطای ایجاد شده برای زمان تبخیر ۷ درصد است. با اعمال این فرض، دمای نهایی قطره به دمای حباب تر هوا نزدیک تر است. خطای ایجاد شده برای قطره آب، در دو حالت اعمال فرض لوئیس واحد و بدون اعمال این فرض، به دلیل محدودیت دمایی رابطه نفوذ جرمی برای آب است و با اصلاح رابطه مذکور این خطا کاهش می‌یابد.

### منابع

1. C. Baumgurten, *Mixture Formation in Internal Combustion Engines*, Springer, Berlin, Germany, 2005.
2. H. Nomura, Y. Ujii, H. J. Rath, J. Sato and M. Kono, "Experimental Study on High-Pressure Droplet Evaporation using Microgravity Conditions," *26<sup>th</sup> Symposium (International) on Combustion/ The Combustion Institute*, 1996, pp. 1267-1273.
3. C. Gokalp, J. Chauveau, R. Richard, M. Kramer and W. Leuckel, "Observation on the Low Temperature Vaporization and Envelope or Wake Flame Burning of n-Heptane Droplets at Reduced Gravity during Parabolic Flight," *22<sup>th</sup> Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute*, 1988, pp. 2027-2035.

4. S. S. Sazhin, W. A. Abdelghaffar, E. M. Sazhina and M. R. Heikal, "Models for Droplet Transient Heating: Effects on Droplet Evaporation, Ignition, and Break-up," *International Journal of Thermal Science*, 44, 2005, pp. 610-622.
5. B. Abramzon and W. A. Sirignano, "Droplet Vaporization Model for Spray Combustion Calculations," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 32, 1989, pp. 1605-1618.
6. G. F. Yao, S. I. Adel-Khalif and S. M. Ghiaasiaan, "An Investigation of Simple Evaporation Models used in Spray Simulation," ASME, *Journal of Heat Transfer*, 125, 2003, pp. 179-182.
7. A. Collin, P. Boulet, G. Parent, M. R. Vetrano and J. M. Buchlin, "Dynamic and Thermal Behaviour of Water Sprays," *International Journal of Thermal Sciences*, 47, 2008, pp. 399-407.
8. S. C. Kim and H. S. Ryou, "An Experimental and Numerical Study on Fire Suppression using a Water Mist in an Enclosure," *Building and Environment*, 38, 2003, pp. 1309-1316.
9. T. Yoshida and T. Hyodo, "Evaporation of Water in Air, Humid Air and Superheated Steam," *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 9, No. 2, 1970, pp. 207-214.
10. K. Shirai, S. Matsui and A. Shinjo, "On the Temperature Change of Sprayed Water Drops I: Theoretical Study," *Transaction of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, 35, 1971, pp. 24-29.
11. K. Shirai, S. Matsui and A. Shinjo, "On the Temperature Change of Sprayed Water Drops II: Experimental Study," *Transaction of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, 35, 1971, pp. 30-35.
12. Y. F. Li and W. K. Chow, "Study of Water Droplet Behavior in Hot Air Layer in Fire Extinguishment, Fire Technology," *Fire Technology*, 44, 2008, pp. 351-381.
13. L. Di-pin and C. Zu-ming, "Numerical Simulation of Water Mist Fire Suppression Technology," *Procedia Engineering*, 11, 2011, pp. 205-209.
14. L. Zheng and W. Quan, "Experimental Study of Explosive Water Mist Extinguishing Fire," *Procedia Engineering*, 11, 2011, pp. 258-267.
15. R. B. Montgomery, "Viscosity and Thermal Conductivity of Air and diffusivity of Water Vapor in Air," *Journal of Meteorology*, 4, 1947, pp. 193-197.
16. A. C. S. Baptista da Silvia, J. A. Bellini da Cunha Neto, and R. Lamberts, "Computer Simulation of Evaporative Cooling of Buildings by Water Spray Vaporization," *Ninth International IBPSA Conference*, Montreal, Canada, 2005.
17. E. K. Shashank, and H. Pitsch, "Spray Evaporation Model Sensitivities," Center for Turbulence Research, Annual Research Briefes, Stanford University, USA, No. 20, 2011, pp. 2013-2024.

## English Abstract

# Evaluation of Unity Lewis Number Assumption in Modeling of Water and Fuel Droplets Evaporation

**A. Omidvar<sup>1</sup>, R. Mehryar<sup>2</sup> and A. H. Mahdavi<sup>3</sup>**

1- Assis. Prof., Mech. Eng., Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran (Correspondent author)

2- Assis. Prof., Mech. Eng., Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

3- MSc., Mech. Eng., Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

(Received: 2012.6.3, Received in revised form: 2013.1.12, Accepted: 2013.2.18)

Over the recent decades, spray systems have been widely utilized in a variety of applications within the areas of engineering. In this regard, studying the evaporative behavior of droplets in spray can give us a good view point. One of the most common assumptions in droplets' evaporation is to consider the Lewis number to be unity. In this paper the correctness of this assumption has been evaluated for water and n-Heptane single droplets. The results for droplets' evaporation trend have been compared with some relevant experimental and numerical data. Evaporation time and droplets' temperature have been investigated in both conditions. According to obtained results, although the unit Lewis number is not a good assumption for studying n-Heptane droplet evaporation, this assumption gives acceptable results for predicting the water droplets evaporation. Moreover, by assuming the unity Lewis number for water droplet, the calculated temperature of the droplet is close to wet bulb temperature of air.

**Keywords:** Droplet, Evaporation, Lewis number