

## ارزیابی حساسیت رفتار تبخیری قطرات سوخت‌های زیستی به خواص ترموفیزیکی آنها

کاظم شعبانی زاد<sup>۱\*</sup>، امیر امیدوار<sup>۲</sup>

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، shaabanizad.kazem@gmail.com

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، omidvar@sutech.ac.ir

\* نویسنده مخاطب

### چکیده

تنوع زیاد زیست‌سوختها سبب شده است که دستیابی به خواص ترموفیزیکی آنها که لازمه محاسبات مربوط به مدلسازی تبخیر قطرات سوخت است، با محدودیتهایی همراه باشد. از این جهت شناسایی میزان حساسیت رفتار تبخیری قطرات سوخت به کمیت‌های مختلف ترموفیزیکی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله، سعی شده راهکارهای ساده‌کننده‌ای برای پیش‌بینی رفتار تبخیری سوخت‌های زیستی ارائه گردد. بدین منظور، معادلات انتقال جرم و انرژی برای یک تک قطره بررسی شدند. برای اطمینان از صحت محاسبات، نتایج با داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده مقایسه و هماهنگی خوبی بین نتایج مشاهده شد. مقادیر خطای ناشی از عدم دقت در تعیین مقدار دقیق هر کدام از خواص ترموفیزیکی مورد نیاز در مدلسازی تبخیر بررسی شدند. نتایج نشان داد، از میان خواص مورد بررسی، ظرفیت مخصوص حرارتی سوخت مایع، نفوذ جرمی، فشار بخار و چگالی مایع سوخت بیشترین تاثیر را بر پیش‌بینی رفتار تبخیری سوخت‌های زیستی دارند. همچنین برای لزجت دینامیکی و ضریب هدایت گرمایی بخار زیست‌سوختها که معمولاً اطلاعات دقیقی از آنها در دسترس نیست، راهکار جایگزینی این خواص با هوا پیشنهاد شد. نتایج، کارآمدی این راهکار به خصوص در فشارهای محیطی بالا (مانند محفظه احتراق موتورهای دیزل) را نشان داد.

کلمات کلیدی: تبخیر، خواص ترموفیزیکی، زیست‌سوخت، قطره

### مقدمه

افزایش هشدارهای ناشی از اثرات زیانبار آلودگی هوا باعث پدید آمدن اجبار در اجرای قوانین مبارزه با آن شده است. استفاده روز افزون از سوخت‌های فسیلی در بسیاری از کاربردهای صنعتی از جمله موتورهای احتراق داخلی، کوره‌های صنعتی و دیگر ماشین‌های حرارتی عامل اصلی تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی مانند هیدروکربن‌های سوخته‌نشده، اکسیدهای نیتروژن، منواکسیدکربن و دی‌اکسیدکربن می‌باشد. علاوه بر این، افزایش قیمت فرآورده‌های نفتی و کمبود ذخایر موجود، محققان را به سمت استفاده از انرژی‌های نو و تولید سوخت‌های جایگزین ترغیب نموده است. در سال‌های اخیر زیست‌سوخت‌ها به عنوان یکی از جایگزین‌های مناسب برای سوخت‌های فسیلی مطرح شده‌اند. زیست‌سوخت‌ها منو آلکیل استرها، اسیدهای چرب با زنجیره بلند هستند که از مواد خام چرب تجدیدپذیر مانند روغن‌های گیاهی، چربی‌های حیوانی، پسماند روغن‌های خوراکی، پساب و یا فاضلاب-هایی که منبع آلی دارند، تهیه می‌گردند. وجود منابع مختلف باعث شده است که امروزه سوخت‌های زیستی متنوعی با ساختارهای مولکولی متفاوت تولید و معرفی گردند. به عنوان مثال، در آمریکا روغن سویا یکی از مهم‌ترین منابع تولید سوخت‌های زیستی است. روغن کانولا، خرما، ذرت، نارگیل و پنبه دانه از جمله دیگر منابع مرسوم تولید زیست سوخت در کانادا و اروپا هستند. در بعضی از کشورها از روغن آفتابگردان و حتی روغن بدست آمده از دانه‌های گوجه‌فرنگی برای تولید اینگونه سوخت‌ها استفاده می‌شود [۱].

جهت بررسی نحوه عملکرد تبخیری و احتراقی سوخت‌های زیستی نیاز به دانستن خواص ترموفیزیکی آنها است. تنوع زیاد سوخت‌های زیستی، درصد‌های مختلف ترکیب با سوخت‌های فسیلی و همچنین وجود ناخالصی‌ها در ساختار آنها به دلیل فرایندهای تولید و نظایر آن، موجب شده است که دستیابی به خواص ترموفیزیکی سوخت‌های جدید با چالش‌های زیادی همراه

باشد. به همین دلیل در دهه اخیر با افزایش مصرف اینگونه سوخت‌ها، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه تعیین خواص ترموفیزیکی مختلف آنها انجام شده است [۲-۵]. علیرغم تحقیقات گسترده انجام شده، همچنان نواقص زیادی در این زمینه وجود دارد.

در راستای بررسی و برآورد عملکرد احتراقی سوخت‌های زیستی لازم است خواص تبخیری سوخت مشخص گردد. عملکرد تبخیری سوخت‌ها نقش موثری در احتراق آنها دارد به طوری که تبخیر کند و توزیع غیریکنواخت بخار سوخت، موجب احتراق ناکارآمد شده و به تبع آن انتشار آلاینده‌های خروجی نیز افزایش می‌یابد. به منظور بررسی رفتار تبخیری زیست‌سوخت‌ها باید خواص ترموفیزیکی سوخت مایع و همچنین بخار سوخت در لایه اطراف قطرات، به صورت تابعی از دمای محفظه احتراق معلوم باشد. بررسی تحقیقات پیشین حاکی از آن است که دستیابی به کلیه این اطلاعات برای انواع سوخت‌های زیستی کار ساده‌ای نیست. برخی از این خواص یا موجود نیستند، یا برای سوخت‌هایی خاص و مشخص و یا در بسیاری از موارد در گستره دمایی محدودی بیان شده‌اند. به نظر می‌رسد که جهت سهولت در مدلسازی رفتار تبخیری قطرات سوخت لازم است میزان اهمیت و تأثیرگذاری هر یک از کمیت‌های ترموفیزیکی بر ویژگی‌های تبخیری آن مشخص گردد. با این روش می‌توان مشخص کرد که تا چه حد به پیش‌بینی خواص مختلف ترموفیزیکی سوخت‌های جدید نیاز است و همچنین عدم اطلاع کافی از دقت بسیاری از روابط ارائه شده برای خواص سوخت‌های زیستی و حتی عدم وجود روابط کافی در برخی از موارد، تا چه اندازه می‌تواند بر نتایج پیش‌بینی اثرگذار باشد. لذا در این تحقیق سعی شده است قبل از هر چیز میزان اهمیت و اثرگذاری کمیت‌های مختلف ترموفیزیکی سوخت بر رفتار تبخیری آن مورد بررسی قرار گیرد.

### معادلات حاکم و فرضیات

در این تحقیق به منظور بررسی رفتار تبخیری یک تک قطره یک کد صفر-بعدی توسعه یافته است که قطر قطره را در هر گام زمانی و زمان لازم برای تبخیر آن را محاسبه می‌کند. معادلات حاکم بر این مسئله شامل معادلات بقای جرم و انرژی هستند که به منظور حل این معادلات فرضیات ساده-کننده‌ای استفاده شده است. انتقال حرارت تابشی در مقابل انتقال حرارت جابجایی ناچیز فرض شده و از گرادیان دما و غلظت درون قطره چشم‌پوشی شده است. قطره را به صورت کروی در نظر گرفته و از تغییر شکل و شکست آن صرف‌نظر شده است. در ادامه به تفصیل این معادلات پرداخته می‌شود.

### معادله بقای جرم

نرخ تبخیر از سطح قطره‌ای با قطر  $d$ ، از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۶]:

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

که در آن  $Sh$  عدد بی‌بعد شروود می‌باشد که رابطه ارائه شده برای محاسبه آن به صورت زیر می‌باشد:

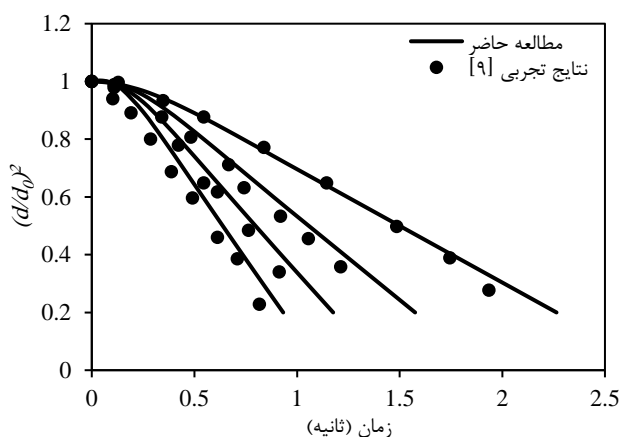
$$Sh = 2 + 0.6Re^{0.5} Sc^{0.33} \quad (2)$$

$$z = -\frac{C_{pv} \frac{dm_d}{dt}}{Nuk_a \pi d} \quad (13)$$

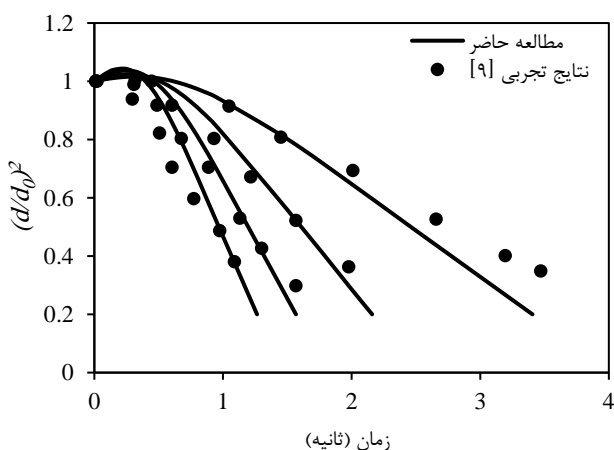
در معادله فوق  $z$  ضریب تصحیح بی‌بعدی است که برای منظور کردن همزمان انتقال جرم در معادلات انتقال حرارت در نظر گرفته شده است.

### اعتبارسنجی مدل‌سازی عددی تبخیر برای یک قطره

در این بخش به منظور ارزیابی مدل عددی ارائه شده برای محاسبات تبخیری، تغییرات زمانی قطر یک تک‌قطره با نتایج آزمایشگاهی موجود در دما و فشارهای متفاوت ارزیابی شده است. در گزارش ارائه‌شده توسط نومورا و همکاران [۹]، 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 میلی-متر و دمای اولیه آن ۳۰۰ کلوین می‌باشد. آزمایش در شرایط میکروگراویتی انجام شده است. مقادیر آزمایشگاهی  $(d/d_0)^2$  بر حسب زمان برای بازه فشاری ۰/۱ و ۰/۵ مگاپاسکال و بازه دمایی ۴۰۰ تا ۸۰۰ کلوین در شکل‌های ۱ و ۲ آورده شده‌اند و نتایج بدست‌آمده از مدل عددی ارائه‌شده در این گزارش نیز در شرایط یکسان مقایسه شده‌اند.



شکل ۱: مقایسه تغییرات قطر نسبی برای تبخیر قطره هپتان نرمال بر حسب زمان در دماهای مختلف با نتایج آزمایشگاهی برای فشار ۰/۱ مگاپاسکال



شکل ۲: مقایسه تغییرات قطر نسبی برای تبخیر قطره هپتان نرمال بر حسب زمان در دماهای مختلف با نتایج آزمایشگاهی برای فشار ۰/۵ مگاپاسکال

همانطور که مشاهده می‌شود مدل عددی ارائه شده در این پژوهش تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی انجام شده دارد. حال با اطمینان از صحت الگوی

در رابطه بالا  $Sc = \mu_m / \rho_g D_{ab}$  معرف عدد بی‌بعد اشمیت برای یک قطره است و  $Re = \rho_g d U / \mu_g$  عدد رینولدز را بیان می‌کند. اندازه سرعت نسبی بین قطره و محیط اطراف است که در ادامه با نشان داده می‌شود.  $D_{ab}$  نفوذ جرمی بخار مایع در هوا است که برای تمام سوخت‌ها با فشار رابطه عکس و با دما رابطه مستقیم دارد.

در رابطه (۱)،  $B_m$  عدد جرمی اسپالدینگ بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$B_m = \frac{Y_s - Y_\infty}{1 - Y_s} \quad (3)$$

که در رابطه (۳)،  $Y_s$  و  $Y_\infty$  به ترتیب کسر جرمی بخار در نزدیکی سطح قطره و در فاصله دور از سطح قطره می‌باشند. در اغلب موارد از  $Y_\infty$  به دلیل ناچیز بودن صرف‌نظر می‌شود و  $Y_s$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۷]:

$$Y_s = \left[ 1 + \left( \frac{P_g}{P_s} - 1 \right) \frac{M_g}{M_l} \right]^{-1} \quad (4)$$

که  $P_g$  و  $P_s$  به ترتیب فشار محیط و فشار اشباع بخار مایع در نزدیکی سطح قطره و در دمای قطره‌اند و  $M_l$  و  $M_g$  به ترتیب جرم مولکولی هوا و مایع است. لازم به ذکر است که اندیس  $m$  مربوط به خواص ترمودینامیکی مخلوط بخار مایع و هوا می‌باشد. این خواص در دمای میانگین  $T_m = (T_d + T_g)/2$  و درصد جرمی  $Y_r = (Y_\infty + 2Y_s)/3$  محاسبه می‌شوند. مقادیر لزجت، ظرفیت مخصوص حرارتی و ضریب هدایت گرمایی مخلوط بخار مایع و هوا به صورت زیر می‌باشند:

$$\mu_m = Y_r \mu_v + (1 - Y_r) \mu_g \quad (5)$$

$$C_{pm} = Y_r C_{pv} + (1 - Y_r) C_{pg} \quad (6)$$

$$k_m = Y_r k_v + (1 - Y_r) k_g \quad (7)$$

در این روابط اندیس‌های  $g$  و  $v$  به ترتیب نمایانگر فاز گازی و بخار سوخت هستند.

### معادله بقای انرژی

دمای قطره  $T_d$  را می‌توان با توجه به تعادل انرژی، با در نظر گرفتن نرخ انتقال گرما و تبخیر از روی سطح قطره از رابطه زیر محاسبه کرد [۸]:

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

که در این رابطه  $C_{pl}$  ظرفیت مخصوص حرارتی فاز مایع و  $h_{fg}$  انرژی نهان تبخیر می‌باشد.  $\dot{q}_d''$  نرخ حرارت گرفته شده از محیط با دمای  $T_g$  است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{q}_d'' = \left( \frac{Nuk_m}{d} \right) (T_d - T_g) \quad (9)$$

در رابطه (۹)،  $Nu$  عدد بی‌بعد ناسلت بوده و می‌توان برای محاسبه آن از رابطه (۱۰) استفاده کرد.

$$Nu = 2 + 0.6 Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (10)$$

در این رابطه  $Pr = C_{pm} \mu_m / k_m$  عدد بی‌بعد پرائنتل می‌باشد. برای محاسبه دمای قطره در فشارهای بالا، به‌تراست از رابطه زیر استفاده شود [۷]:

$$m_d C_{pl} \frac{dT_d}{dt} = -\dot{q}_d + h_{fg} \frac{dm_d}{dt} \quad (11)$$

$$\dot{q}_d = k_a \pi d (T_d - T_g) \frac{z}{e^z - 1} Nu \quad (12)$$

جدول ۲: مقدار خطای ناشی از عدم دقت ۱۰ درصدی در چگالی فاز مایع دودکان نرمال در فشار ۱۰۰ بار، سرعت ۲۰۰ متر بر ثانیه و دماهای مختلف

$P_g=100$ (bar)	$U=200$ (m/s)		
	۹۰۰	۷۰۰	۵۰۰
	دما (K)		
	۱۰/۰۵۶	۱۰/۰۰۵	۱۰/۰۰۳
	خطا (%)		

همان گونه که مشاهده می شود، مقدار خطا برای هر دو سوخت مورد مطالعه در دما، فشار و سرعت های متفاوت تقریباً ثابت و معادل همان مقدار خطای اعمالی در تخمین چگالی مایع است. در شرایط محیطی مختلف و برای مقادیر دیگر خطا نیز همین روند مشاهده شد.

نتایج حاصل که برای دو سوخت با چگالی های متفاوت بدست آمده است را می توان به سوخت های زیستی تعمیم داد و میزان عدم دقت در روابط موجود برای این خاصیت را با خطای حاصل در زمان تبخیر برابر دانست.

#### ظرفیت مخصوص حرارتی مایع

در ادامه میزان حساسیت زمان تبخیر قطره به ظرفیت مخصوص حرارتی فاز مایع برای دو سوخت نامبرده بررسی و خطای حاصل از عدم دقت در روابط موجود برای این خاصیت در شرایط متفاوت نشان داده خواهد شد. همانند حالت های قبل میزان عدم دقت ۲۰ درصدی در این خاصیت به عنوان نمونه بررسی خواهد شد.

جدول ۳ مربوط به خطای ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در ظرفیت مخصوص حرارتی فاز مایع هپتان نرمال در فشار ۱۰۰ بار و دمای ۷۰۰ کلوین و جدول ۴ مقدار خطا را در همین شرایط و برای دودکان نرمال نشان می دهد. همانطور که پیداست، تغییر سرعت نسبی بین قطره و محیط اطراف تاثیر بسیار کمی در مقدار خطا ایجاد می کند که قابل چشم پوشی است. ثابت ماندن میزان خطا با تغییر سرعت برای هر دو سوخت مورد مطالعه این پیش بینی را به همراه خواهد داشت که در سوخت های زیستی تغییر سرعت تاثیری در میزان خطای حاصل از دقیق نبودن روابط موجود برای ظرفیت مخصوص حرارتی مایع نخواهد داشت.

جدول ۳: مقدار خطای ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در ظرفیت مخصوص حرارتی فاز مایع هپتان نرمال در فشار ۱۰۰ بار، دمای ۷۰۰ کلوین و سرعت های مختلف

$P_g=100$ (bar)	$T_g=700$ (K)		
	۲۰۰	۱۰۰	۵۰
	سرعت (m/s)		
	۱۹/۲۵۲	۱۹/۲۵۶	۱۹/۲۴۱
	خطا (%)		

جدول ۴: مقدار خطای ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در ظرفیت مخصوص حرارتی فاز مایع دودکان نرمال در فشار ۱۰۰ بار، دمای ۷۰۰ کلوین و سرعت های مختلف

$P_g=100$ (bar)	$T_g=700$ (K)		
	۲۰۰	۱۰۰	۵۰
	سرعت (m/s)		
	۱۷/۴۳۳	۱۷/۴۲۲	۱۷/۴۴۲
	خطا (%)		

ارائه شده، در ادامه میزان اهمیت و اثرگذاری کمیت های مختلف ترموفیزیکی سوخت بر رفتار تبخیری آن مورد بررسی قرار گرفته است.

#### بحث و ارائه نتایج

همان گونه که از روابط حاکم بر رفتار تبخیری قطرات پیداست، نحوه تغییرات دمایی خواص ترموفیزیکی سوخت مایع و همچنین بخار سوخت در لایه اطراف قطره، بر روی روند تبخیر تاثیر بسزایی دارند و عدم دقت کافی و یا نبود برخی روابط می تواند محاسبات ما را دستخوش تغییر سازد. حال بررسی اینکه خطای موجود در روابط ارائه شده برای کمیت های مختلف یا در برخی موارد نبود آنها تا چه اندازه می تواند زمان تبخیر را تغییر دهد و خطای ایجاد شده در زمان تبخیر نسبت به تغییر شرایط، چه در محیط اطراف و چه در خود قطره، چه رفتاری را نشان می دهد، می تواند مفید واقع شود. در این بخش، میزان تغییر در زمان تبخیر یک تک قطره در فشارها و دماهای مختلف محیط اطراف، و همچنین در مقادیر متفاوت سرعت، دما و قطر اولیه قطره مورد بررسی قرار گرفته و خطای حاصل به صورت درصد بیان شده است. ۵، ۱، ۵۰ و ۱۰۰ بار و ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ کلوین به ترتیب فشارها و دماهای مورد مطالعه برای محیط اطراف هستند که گستره وسیعی را شامل می شوند. سرعت های صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ متر بر ثانیه سرعت های اولیه، ۲۸۰، ۳۰۰ و ۳۲۰ کلوین دماهای اولیه و ۱۰۰ و ۵۰ میکرون قطرهای اولیه مختلف در نظر گرفته شده برای قطره هستند. برای رسیدن به درکی بهتر و پیش بینی رفتاری دقیق تر از روند و مقدار خطای ناشی از عدم دقت در روابط و تعمیم به سوخت های دیگر، محاسبات برای دو سوخت هپتان نرمال و دودکان نرمال که ویژگی های متفاوتی دارند انجام شده است. به این صورت که در هر مرحله ۱۰ و ۲۰ درصد خطا به عنوان نمونه در خاصیت مورد نظر اعمال شده و خطای حاصل در زمان تبخیر قطره در شرایط های مختلف اشاره شده، محاسبه و بررسی شده است. برای گزارش نتایج، خطای نمونه ۲۰ درصدی در کمیت های ترموفیزیکی در نظر گرفته شده است. در ابتدا مقدار و روند خطای حاصل از این عدم دقت اعمالی در خواص فاز مایع برای دو سوخت هپتان نرمال و دودکان نرمال در شرایط مختلف بررسی و با توجه به نتایج حاصل رفتاری از خطا برای زیست سوخت ها پیش بینی می شود. در ادامه برای برخی خواص فاز بخار که اطلاعاتی از آنها برای زیست سوخت ها موجود نیست، جایگزینی خواص هوا با خواص بخار سوخت به عنوان راهکاری پیشنهادی برای هپتان نرمال و دودکان نرمال بررسی و نتایج به سوخت های زیستی تعمیم داده خواهد شد.

#### چگالی مایع

در جدول ۱ مقدار خطای ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در چگالی فاز مایع هپتان نرمال و در جدول ۲ این مقادیر در عدم دقت ۱۰ درصدی برای دودکان نرمال در شرایط محیطی مختلف به عنوان نمونه، آورده شده اند.

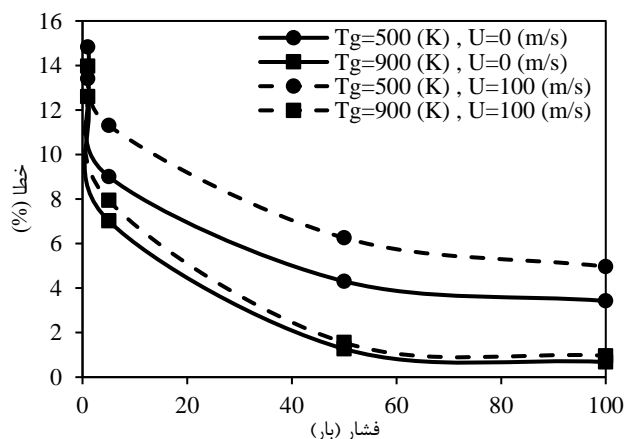
جدول ۱: مقدار خطای ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در چگالی فاز مایع هپتان نرمال در دمای ۷۰۰ کلوین، سرعت صفر و فشارهای مختلف

$T_g=700$ (K)	$U=0$ (m/s)		
	۱۰۰	۵۰	۵
	فشار (bar)		
	۲۰/۰۰۴	۲۰/۰۰۲	۲۰
	خطا (%)		

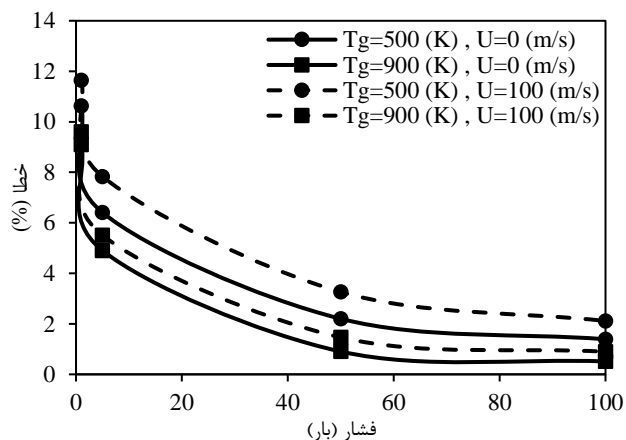
خطا ندارد. مقدار بیشینه خطا در دما و فشارهای بالا رخ می‌دهد. همین روند نیز برای نحوه تغییر خطای ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در ظرفیت مخصوص حرارتی فاز مایع برای سوخت‌های زیستی قابل پیش‌بینی است.

### گرمای نهان تبخیر

شکل‌های ۵ و ۶ مقدار و نحوه تغییر خطای به وجود آمده در زمان تبخیر قطره، ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در گرمای نهان تبخیر نسبت به شرایط مختلف را به ترتیب برای هپتان نورمال و دودکان نورمال نشان می‌دهند.



شکل ۵: خطای حاصل در زمان تبخیر قطره بر حسب فشار در دما و سرعت‌های مختلف ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در گرمای نهان تبخیر هپتان نورمال

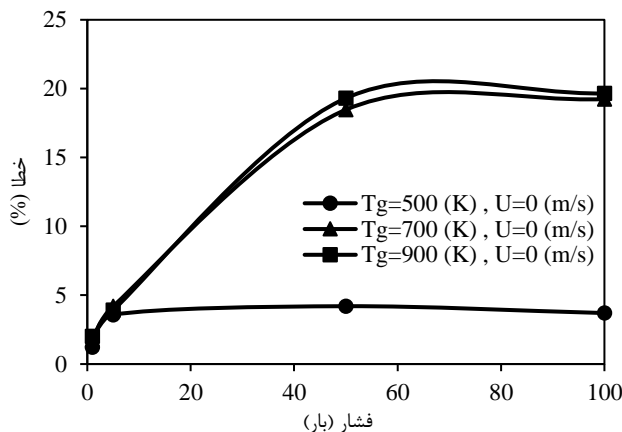


شکل ۶: خطای حاصل در زمان تبخیر قطره بر حسب فشار در دما و سرعت‌های مختلف ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در گرمای نهان تبخیر دودکان نورمال

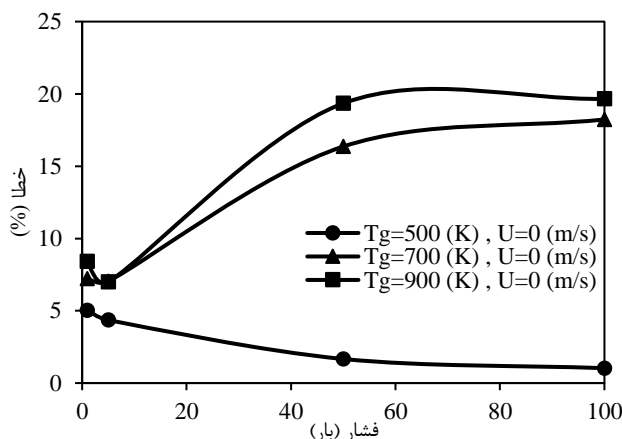
همان‌گونه که از نتایج حاصل پیداست، افزایش فشار باعث کاهش خطا می‌شود که این کاهش در فشارهای بالا با شیب کمتری رخ می‌دهد. افزایش دما نیز در سرعت ثابت باعث کاهش خطا را به دنبال دارد. با سرعت گرفتن قطره نیز خطای حاصل در زمان تبخیر بیشتر خواهد شد. بنابراین کمترین مقدار خطا در قطرات ساکن و به خصوص دما و فشارهای بالا رخ می‌دهد.

گرمای نهان تبخیر زیست‌سوخت‌ها در دماهای پایین از سوخت‌های فسیلی کمتر و در دماهای بالا بیشتر است. به همین دلیل میزان خطا در دماهای مختلف برای سوخت‌های زیستی می‌تواند متفاوت از سوخت‌های فسیلی شود. اما می‌توان نحوه تاثیر فشار محیط و سرعت قطره را یکسان در نظر گرفت و انتظار داشت که کمترین مقدار خطا در فشار و سرعت‌های بالا رخ دهد.

در ادامه مقدار و نحوه تغییر خطا در زمان تبخیر قطره نسبت به فشار و دما در شکل ۳ و ۴ به ترتیب برای هپتان نورمال و دودکان نورمال نشان داده شده است.



شکل ۳: خطای حاصل در زمان تبخیر قطره بر حسب فشار در دماهای مختلف ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در ظرفیت مخصوص حرارتی مایع هپتان نورمال



شکل ۴: خطای حاصل در زمان تبخیر قطره بر حسب فشار در دماهای مختلف ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در ظرفیت مخصوص حرارتی مایع دودکان نورمال

افزایش فشار برای هر دو سوخت در دمای پایین نسبت به دماهای بالا رفتاری متفاوت را نشان می‌دهد. در دمای پایین، برای هپتان نورمال افزایش فشار ابتدا افزایش اندکی در مقدار خطا ایجاد می‌کند و در ادامه تاثیری در میزان آن ندارد و خطا تقریباً ثابت می‌ماند. برای دودکان نورمال، خطای حاصل در اثر افزایش فشار در ابتدا کاهشی اندک و سپس به جای ثابت ماندن، با شیب کمی کاهش می‌یابد که این تفاوت می‌تواند ناشی از پایین‌تر بودن ظرفیت حرارتی مایع دودکان نورمال نسبت به هپتان نورمال باشد. با توجه به نتایج بالا و ذکر این نکته که این خاصیت برای زیست‌سوخت‌ها از دودکان نورمال به عنوان نمونه‌ای از سوخت‌های فسیلی کمتر است می‌توان اینگونه پیش‌بینی کرد که افزایش فشار، کاهش خطا را حتی با شیب تندتری نسبت به دودکان نورمال در پی خواهد داشت و از آنجا که خطا در ابتدا مقدار کمی دارد می‌تواند در فشارهای بالا و البته دماهای پایین به کمترین مقدار خود برسد و به صفر نزدیک شود. با افزایش دما خطای به وجود آمده در زمان تبخیر قطره برای هر دو سوخت مورد مطالعه افزایش می‌یابد که این افزایش در فشارهای بالا کاملاً نمایان است. در دماهای بالا تغییرات دمایی تاثیر چندانی روی میزان

فشار بخار

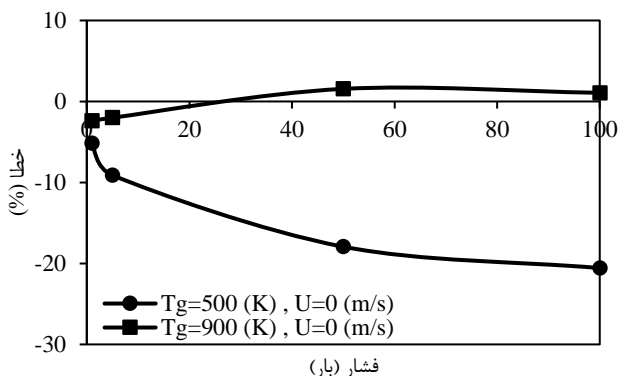
فشار بخار برای زیست سوخت‌ها بسیار پایین‌تر از سوخت‌های فسیلی است. پایین بودن بیش از حد آنها بخصوص در دماهای پایین اندازه‌گیری این خاصیت را برای این‌گونه سوخت‌ها دچار مشکل کرده است [۱۰]. حال چه مقدار این عدم دقت می‌تواند در رفتار تبخیری قطرات سوخت تأثیرگذار باشد می‌تواند اهمیت بسزایی داشته باشد.

ابتدا تأثیر تغییر سرعت نسبی بین قطره و محیط اطراف را روی میزان خطای ناشی از عدم دقت در این خاصیت را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در هپتان نرمال، همانگونه که از شکل ۷ پیداست، افزایش سرعت تغییر کمی روی مقدار خطا دارد. بیشترین مقدار تغییر خطا کاهش ۳ درصدی آن است که در دمای ۹۰۰ کلوین و فشار ۵۰ بار رخ می‌دهد. در قطره سوخت دودکان نرمال همانطور که از جدول ۵ پیداست، تغییرات سرعت روی مقدار خطا تأثیری ندارد و خطا ثابت می‌ماند.

جدول ۵: مقدار خطای ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در فشار بخار دودکان نرمال در فشار ۱۰۰ بار، دمای ۷۰۰ کلوین و سرعت‌های مختلف

P <sub>g</sub> =۱۰۰ (bar)		T <sub>g</sub> =۷۰۰ (K)		
سرعت (m/s)	۲۰۰	۱۰۰	۵۰	صفر
خطا (%)	۱/۵۱۶	۱/۵۴۸	۱/۵۱۸	۱/۵۸۷

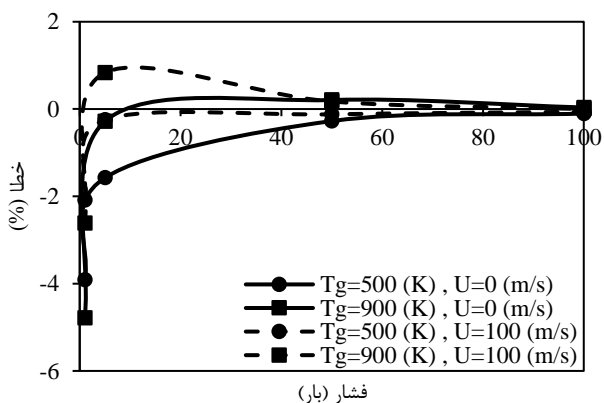
رخ می‌دهد که می‌تواند مقداری بیش از ۲۰ درصد داشته باشد. لازم به یادآوری است که در دودکان نرمال به دلیل پایین‌تر بودن فشار بخار آن نسبت به هپتان نرمال دارای بیشینه اندازه خطای بیشتری بود.



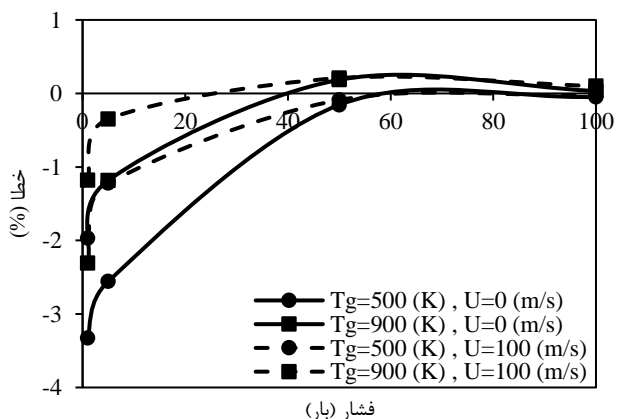
شکل ۸: خطای حاصل در زمان تبخیر قطره بر حسب فشار در سرعت صفر و دماهای مختلف ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در فشار بخار دودکان نرمال

چگالی بخار

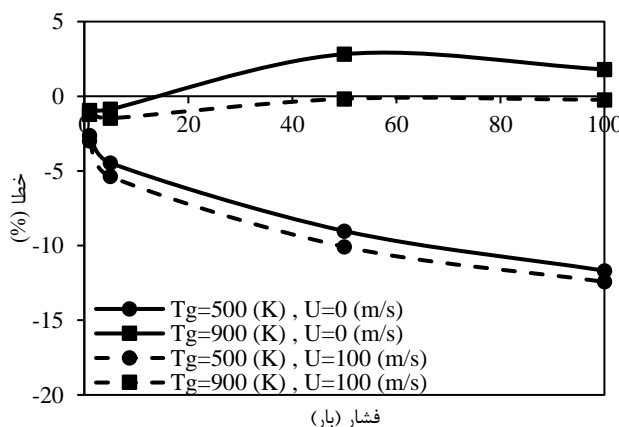
برای سوخت‌های زیستی در مواقع لزوم به داشتن مقادیر چگالی بخار قطره در دماهای مختلف می‌توان از فرض رفتار گاز ایده‌آل استفاده کرد. حال عدم دقت این فرض تا چه اندازه می‌تواند روی رفتار تبخیری قطره سوخت تأثیرگذار باشد، جای سوال دارد.



شکل ۹: خطای حاصل در زمان تبخیر قطره بر حسب فشار در دما و سرعت‌های مختلف ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در چگالی بخار هپتان نرمال



شکل ۱۰: خطای حاصل در زمان تبخیر قطره بر حسب فشار در دما و سرعت‌های مختلف ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در چگالی بخار دودکان نرمال



شکل ۷: خطای حاصل در زمان تبخیر قطره بر حسب فشار در دما و سرعت‌های مختلف ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در فشار بخار هپتان نرمال

از بررسی‌های انجام شده و با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ می‌توان دریافت که مقدار خطا در دماهای بالا، برای هر دو سوخت مورد بررسی، تقریباً ثابت و ناچیز است. در دماهای پایین با افزایش فشار اندازه خطا افزایش پیدا می‌کند و به بیشترین مقدار خود می‌رسد. دودکان نرمال که فشار بخار کمتری نسبت به هپتان نرمال دارد، دارای بیشینه اندازه خطای بیشتری است.

همانطور که اشاره شد، زیست سوخت‌ها فشار بخار پایین‌تری نسبت به سخت‌های فسیلی دارند برای سوخت‌های زیستی نیز می‌توان اینگونه پیش‌بینی کرد که تغییرات سرعت تأثیر بسیار کمی روی میزان خطا خواهد داشت. کمینه اندازه خطا در زمان تبخیر قره ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در فشار بخار، در دماهای بالا رخ خواهد داد و به علت پایین‌تر بودن فشار بخار این سوخت‌ها نسبت به دودکان نرمال، مقدار بیشینه فشار در دما و فشارهای بالا

با توجه به شکل‌های ۱۱ و ۱۲ که مقدار خطا در زمان تبخیر قطره را در شرایط مختلف نشان می‌دهد می‌توان دریافت که افزایش سرعت موجب کاهش خطا برای هر دو سوخت مورد بررسی شده است. در دماهای پایین نیز مقدار خطا ناچیز است. افزایش فشار به فشارهای اندکی بالاتر از فشار اتمسفر ابتدا خطا را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد و به بیشترین مقدار خود می‌رساند. در ادامه افزایش فشار کاهش خطا را در پی دارد. در مجموع می‌توان این طور بیان کرد که بیشینه خطا در در دماهای بالا و فشارهای کمی بیشتر از اتمسفر خواهد بود و در فشارهای بالا، دماهای پایین و سرعت‌های بالا خطا مقدار ناچیزی دارد.

برای سوخت‌های زیستی نیز همین رفتار را می‌توان تعمیم داد. مقادیر نزدیک ظرفیت مخصوص حرارتی بخار برای دو سوخت هپتان نرمال و دودکان نرمال می‌تواند باعث نزدیک بودن کمینه و بیشینه خطای مورد نظر شده و از آنجا که بر اساس مقادیر محدود گزارش شده برای زیست‌سوخت‌ها این خاصیت از لحاظ مقدار و رفتار نزدیک به این دو سوخت است مقدار بیشینه خطا نباید بسیار متفاوت باشد.

### لزجت دینامیکی بخار

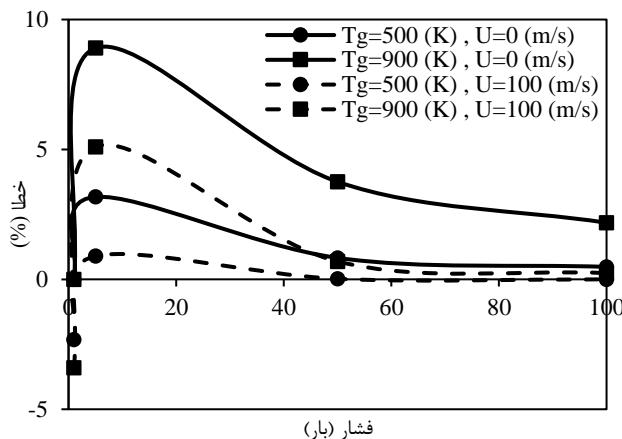
بررسی حساسیت رفتار تبخیری قطره سوخت به این خاصیت از این جنبه حائز اهمیت است که بر اساس مطالعات صورت گرفته، اطلاعاتی از این خاصیت برای سوخت‌های زیستی موجود نمی‌باشد. استفاده از لزجت دینامیکی هوا به جای لزجت دینامیکی سوخت را می‌توان به عنوان راهکار پیشنهادی برای رفع این مشکل ارائه داد. حال این راهکار تا چه اندازه و در چه شرایطی می‌تواند موثر باشد، می‌تواند به ما در مدلسازی دقیق‌تری از تبخیر قطره سوخت به خصوص سوخت‌های زیستی کمک کند.

از بررسی‌های انجام شده این نتیجه حاصل شد که این راهکار در قطرات ساکن کاملاً موثر بوده و می‌تواند در این شرایط برای تمام سوخت‌ها از جمله سوخت‌های زیستی، بدون هیچ گونه خطایی استفاده شود. در قطرات دارای سرعت، جایگزینی لزجت دینامیکی هوا با بخار سوخت محاسبات تبخیری مربوط را دستخوش تغییر می‌کند و باعث به وجود آمدن خطا در زمان تبخیر قطره می‌شود. قابل ذکر است که افزایش سرعت در قطرات متحرک تغییر بسیار اندکی در مقدار خطا ایجاد می‌کند که قابل چشم‌پوشی است. شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب برای هپتان نرمال و دودکان نرمال رسم شده‌اند و مقدار خطای ناشی از جایگزینی لزجت دینامیکی هوا با بخار سوخت در زمان تبخیر قطره را نشان می‌دهند. اندازه خطا برای دو سوخت مورد مطالعه و در شرایط مذکور در محدوده ۱۲-۳ درصدی جای می‌گیرد که بیشینه آن به فشارهای کمی بیشتر از فشار اتمسفر و در دماهای بالا مربوط می‌شود. اگرچه در هپتان نرمال افزایش دما تغییرات زیادی در مقدار خطا ایجاد نمی‌کند اما اندازه خطا را در دودکان نرمال افزایش می‌دهد. مقدار فشار محیط نیز نقش مهمی در رفتار خطا ایجاد می‌کند. افزایش فشار به فشارهای کمی بیشتر از فشار اتمسفر موجب افزایش خطا شده ولی در ادامه با بالا رفتن فشار محیط اندازه خطا کاهش می‌یابد و به کمترین مقدار خود در قطرات متحرک می‌رسد. پس برای مدلسازی رفتار تبخیری قطرات سوخت به خصوص زیست‌سوخت‌ها، می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که استفاده از این راهکار پیشنهادی در قطرات ساکن کاملاً موثر خواهد بود. در قطرات دارای سرعت نیز در صورت لزوم، جایگزینی لزجت دینامیکی هوا با بخار سوخت می‌تواند در فشارهای بالا راهکاری مناسب پیش روی ما باشد.

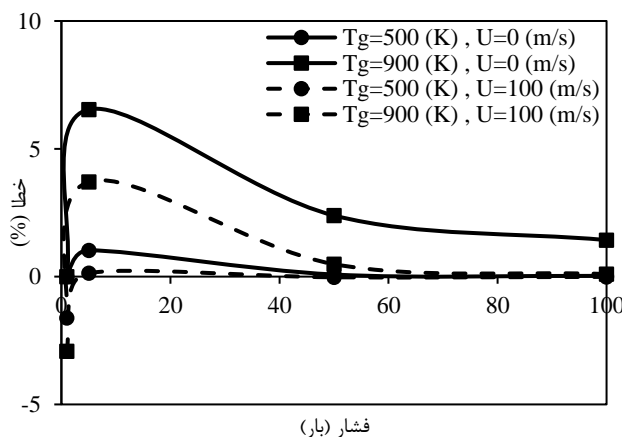
شکل‌های ۹ و ۱۰ خطای حاصل در زمان تبخیر قطره بر حسب فشار در دما و سرعت‌های مختلف ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در چگالی بخار را به ترتیب برای هپتان نرمال و دودکان نرمال نشان می‌دهد. از نتایج حاصل پیداست که بیشترین مقدار خطا در فشارهای پایین رخ می‌دهد و با افزایش فشار این خطا کاهش یافته و در فشارهای بالا به صفر نزدیک می‌شود. علاوه بر این، تغییرات سرعت تاثیر بسیار کمی روی مقدار خطا دارد. حال بسته به اینکه خطای حاصل از فرض رفتار گاز ایده‌آل چه میزان است بیشینه خطا می‌تواند متفاوت باشد. همانطور که از شکل‌های ۹ و ۱۰ پیداست، اگر اعمال این فرض ۲۰ درصد خطا داشته باشد، اندازه بیشینه خطا برای این دو سوخت بین ۵-۳ درصد خواهد بود. برای زیست‌سوخت‌ها نیز می‌توان همین روند را پیش‌بینی کرد و بیشترین مقدار خطا را در فشارهای پایین و نزدیک به مقادیر اشاره شده برای هپتان نرمال و دودکان نرمال در نظر داشت.

### ظرفیت مخصوص حرارتی بخار

وجود خطا در روابط موجود برای محاسبه ظرفیت مخصوص حرارتی بخار سوخت می‌تواند زمان تبخیر قطره آن را دستخوش تغییر کند. حال رفتار و مقدار این خطا در شرایط متفاوت چگونه خواهد بود، می‌تواند به ما در داشتن محاسباتی دقیق‌تر یاری رساند.



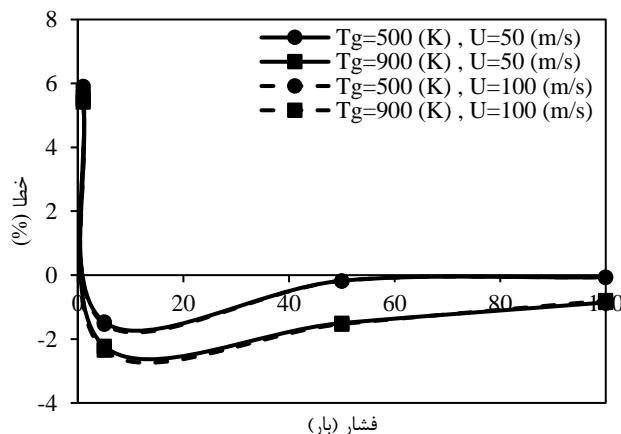
شکل ۱۱: خطای حاصل در زمان تبخیر قطره بر حسب فشار در دما و سرعت‌های مختلف ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در ظرفیت مخصوص حرارتی بخار هپتان نرمال



شکل ۱۲: خطای حاصل در زمان تبخیر قطره بر حسب فشار در دما و سرعت‌های مختلف ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در ظرفیت مخصوص حرارتی بخار دودکان نرمال

راهکار خطایی را در پی نخواهد داشت. برای سوخت‌های زیستی نیز چنین رفتاری قابل پیش بینی خواهد بود.

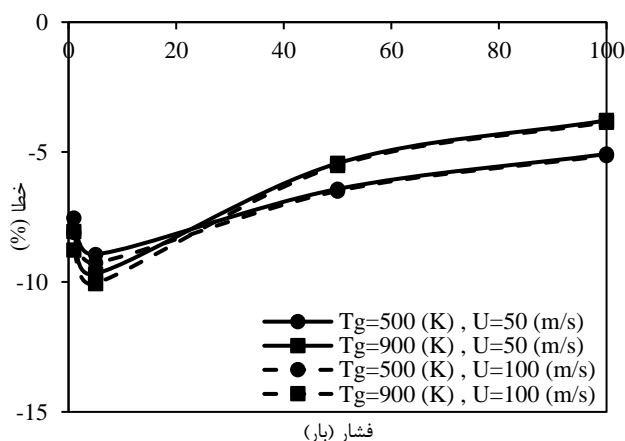
در مجموع هم برای ضریب هدایت گرمایی و هم برای لزجت دینامیکی بخار افزایش فشار موجب کاهش خطا می‌شود و افزایش دما به افزایش خطا منجر خواهد شد. دلیل این امر را می‌توان به نفوذ جرمی بخار سوخت ارتباط داد. همانطور که اشاره شد، نفوذ جرمی بخار سوخت با دما رابطه مستقیم و با فشار رابطه عکس دارد. افزایش فشار نفوذ جرمی بخار سوخت در محیط اطراف قطره را کاهش می‌دهد و موجب پایین آمدن مقدار خطا می‌شود و بالعکس افزایش نفوذ جرمی بخار سوخت در اثر افزایش دما موجب بالا رفتن خطا می‌شود.



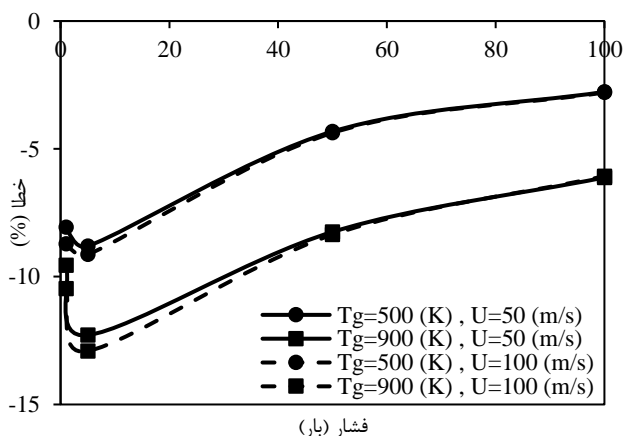
شکل ۱۵: خطای حاصل در زمان تبخیر قطره بر حسب فشار در دما و سرعت‌های مختلف ناشی از ضریب هدایت گرمایی هوا با بخار سوخت دودکان نرمال

#### نفوذ جرمی بخار

خطای حاصل در زمان تبخیر قطره بر حسب فشار، در دما و سرعت‌های مختلف ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در نفوذ جرمی بخار در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب برای هپتان نرمال و دودکان نرمال نشان داده شده‌اند. مقدار خطا در دماهای بالا برای هر دو سوخت مورد مطالعه، مقدار کوچکی است و تغییر سرعت تاثیر کمی روی میزان خطا دارد که قابل چشم‌پوشی است. از آنجا که کمترین خطای حاصل در دماهای بالا رخ می‌دهد، می‌توان برای زیست‌سوخت‌ها نیز کمینه خطا را در دماهای بالا در نظر گرفت. در دماهای پایین و به خصوص قطرات ساکن، خطا مقادیر قابل توجهی را دارد و با افزایش فشار اندازه این مقادیر بیشتر می‌شوند و به بیشترین مقادیر خود می‌رسند. اندازه بیشینه خطا برای هپتان نرمال و دودکان نرمال به ترتیب ۱۵ و ۲۰ درصد است که پیش بینی می‌شود برای زیست‌سوخت‌ها نیز مقدار بیشینه خطا که در دماهای پایین و فشارهای بالا رخ می‌دهد به این مقادیر نزدیک باشد. البته در دماهای پایین نیز می‌توان با سرعت دادن به قطره خطا را کاهش داد.



شکل ۱۳: خطای حاصل در زمان تبخیر قطره بر حسب فشار در دما و سرعت‌های مختلف ناشی از جایگزینی لزجت دینامیکی هوا با بخار سوخت هپتان نرمال



شکل ۱۴: خطای حاصل در زمان تبخیر قطره بر حسب فشار در دما و سرعت‌های مختلف ناشی از جایگزینی لزجت دینامیکی هوا با بخار سوخت دودکان نرمال

#### ضریب هدایت گرمایی بخار

برای ضریب هدایت گرمایی بخار زیست‌سوخت‌ها، همانند لزجت دینامیکی آنها، اطلاعاتی در دسترس نیست. راهکار پیشنهادی در مورد لزجت دینامیکی بخار در این بخش نیز استفاده شده و خطای ناشی از جایگزینی ظرفیت حرارتی بخار سوخت با هوا مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۵ مربوط به خطای حاصل در زمان تبخیر قطره بر حسب فشار، در دما و سرعت‌های مختلف ناشی از جایگزینی ضریب هدایت گرمایی هوا با بخار سوخت دودکان نرمال است. عدم بررسی این راهکار در این بخش برای هپتان نرمال اختلاف بسیار زیاد ظرفیت هدایت گرمایی این سوخت با دیگر سوخت‌های فسیلی است.

در قطرات ساکن مقدار خطا به جز در فشار اتمسفر تقریباً صفر است و می‌توان از این راهکار بدون داشتن هیچ‌گونه خطایی در محاسبات تبخیری سوخت‌ها اعم از سوخت‌های زیستی بهره برد. در فشار اتمسفر خطای حدوداً ۶-۸ درصدی در زمان تبخیر قطره مشاهده شد. همانطور که از شکل ۱۵ پیداست افزایش سرعت قطرات متحرک همانند بخش ۴-۷، تغییری در میزان خطا ایجاد نمی‌کند. مقدار بیشینه خطای ناشی از جایگزینی ضریب هدایت گرمایی هوا با بخار سوخت دودکان نرمال در فشار اتمسفر رخ می‌دهد. افزایش فشار خطا را کاهش می‌دهد به طوری که در فشارهای بالا نیز استفاده از این

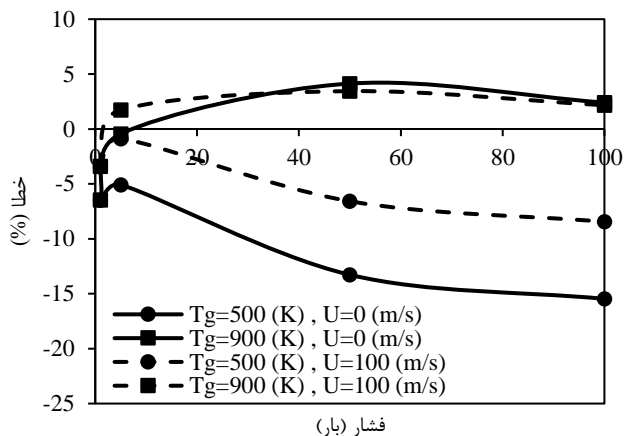
مقدار و رفتار خطا ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در خواص مورد نیاز برای شرایط مختلف بررسی شد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که بیشترین مقدار خطا در زمان تبخیر قطره در چگالی مایع سوخت مشاهده شد که در تمام شرایط مورد مطالعه حدوداً ۲۰ درصد و برابر با همان میزان عدم دقت در محاسبات مربوط به این خاصیت است. علاوه بر این، ظرفیت مخصوص حرارتی مایع سوخت در دما و فشارهای بالا، نفوذ جرمی و فشار بخار در دماهای پایین و فشارهای بالا، خواصی هستند که عدم دقت در محاسبه آنها می‌تواند محاسبات ما را با خطای قابل توجهی همراه سازند و باید در محاسبات مربوط به این خواص نیز دقت کرد. از میان سرعت نسبی بین قطره و محیط اطراف، فشار و دمای محیط کمترین میزان حساسیت خطا نسبت به سرعت می‌باشد. جایگزینی لزجت و ضریب هدایت گرمایی هوا با معادل آنها برای بخار سوخت به عنوان یک راهکار پیشنهاد شد که نتایج حاصل حاکی از موثر بودن این راهکار به خصوص در قطرات ساکن و فشارهای بالا است. فرض رفتار گاز ایده‌آل نیز می‌تواند با خطای ناچیز به ما در مدلسازی رفتار تبخیری قطرات سوخت به ویژه زیست‌سوخت‌ها کمک کند.

**فهرست علائم**

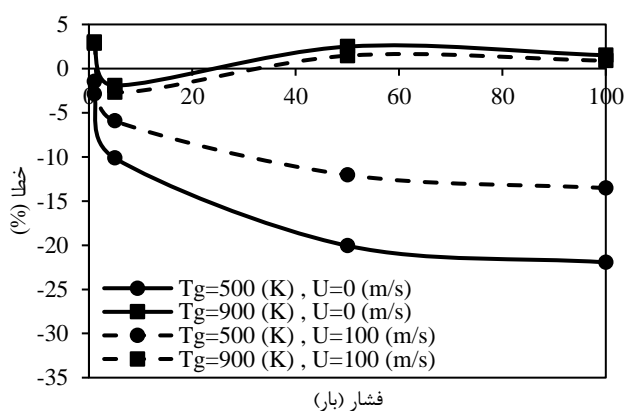
$B_m$	عدد جرمی اسپالدینگ
$C_p$	ظرفیت مخصوص حرارتی ( $JKg^{-1}K^{-1}$ )
$d$	قطر قطره (m)
$D_{ab}$	نفوذ جرمی بخار مایع در هوا ( $m^2s^{-1}$ )
$h_{fg}$	انرژی نهان تبخیر ( $JKg^{-1}$ )
$k$	ضریب هدایت گرمایی ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )
$M$	جرم مولکولی ( $Kgmole^{-1}$ )
$m_d$	جرم قطره (Kg)
Nu	عدد ناسلت
$P$	فشار ( $Kgm^{-1}s^{-2}$ )
$P_s$	فشار اشباع در نزدیکی سطح قطره ( $Kgm^{-1}s^{-2}$ )
Pr	عدد پرانتل
Re	عدد رینولدز
Sc	عدد اشمیت
$T$	دما (K)
$U$	سرعت نسبی بین قطره و محیط اطراف ( $ms^{-1}$ )
$Y_r$	درصد جرمی
$Y_s$	کسر جرمی بخار در نزدیکی سطح قطره
$Y_{\infty}$	کسر جرمی بخار در فاصله دور از سطح قطره

**علائم یونانی**

$\rho$	چگالی ( $Kgm^{-3}$ )
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $Kgm^{-1}s^{-1}$ )
<b>زیر نویس‌ها</b>	
$d$	قطره
$g$	محیط اطراف قطره
$l$	مایع
$m$	مخلوط بخار مایع و هوا
$v$	بخار مایع



شکل ۱۶: خطای حاصل در زمان تبخیر قطره بر حسب فشار در دما و سرعت‌های مختلف ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در نفوذ جرمی بخار هپتان نرمال



شکل ۱۷: خطای حاصل در زمان تبخیر قطره بر حسب فشار در دما و سرعت‌های مختلف ناشی از عدم دقت ۲۰ درصدی در نفوذ جرمی بخار دودکان نرمال

لازم به ذکر است که تمام مطالعات انجام شده در قطراتی با قطر و دماهای اولیه متفاوت نیز بررسی شد. قطر اولیه قطره تاثیری در میزان خطای حاصل در زمان تبخیر ندارد اما تغییرات دمای اولیه قطره مقدار خطا را تغییر می‌دهد. این تغییر که در برخی خاصیت‌ها افزایش و در برخی دیگر کاهش خطا را در پی دارد، بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است.

**جمع‌بندی**

یکی از پیچیده‌گی‌های موجود در مدلسازی تبخیر قطرات سوخت به ویژه در زیست‌سوخت‌ها، محاسبه خواص ترموفیزیکی آنها در دماهای مختلف است. برخی از این خواص یا موجود نیستند، یا برای سوخت‌هایی خاص و مشخص و یا در بسیاری از موارد در گستره دمایی محدودی بیان شده‌اند. حال اینکه عدم دقت در بسیاری از روابط ارائه شده برای خواص سوخت‌های زیستی و حتی عدم وجود روابط کافی در برخی از موارد، تا چه اندازه می‌تواند بر نتایج پیش‌بینی اثرگذار باشد می‌توان به ما را در مدلسازی دقیق‌تری از رفتار تبخیری سوخت باری رساند. در این مقاله یک کد صفر بعدی برای بررسی این موضوع در مطالعات مربوط به رفتار تبخیری قطره سوخت توسعه یافته است. به منظور اطمینان از صحت کد مورد نظر، نتایج کد مذکور با برخی داده‌های تجربی گزارش شده توسط محققان دیگر در شرایط مشابه مقایسه و هماهنگی قابل قبولی مشاهده شد.



- 1- A. Omidvar. a. E. Amini, Predicting of Physical Properties and Atomization Characteristics of the Biofuel Derived from *Chlamydomonas* Microalgae, *Research Journal of Fuel and Combustion*, Vol. 3, No. 2, pp. 47-59, 2010. (In Persian)
- 2- E. Alptekin, M. Canakci, Determination of the density and the viscosities of biodiesel–diesel fuel blends, *Renewable Energy*, Vol. 33, No. 12, pp. 2623-2630, 2008 .
- 3- Y.-H. Chen, B.-Y. Huang, T.-H. Chiang, T.-C. Tang, Fuel properties of microalgae (*Chlorella protothecoides*) oil biodiesel and its blends with petroleum diesel, *Fuel*, Vol. 94, pp. 270-273, 2012
- 4- A. Schedemann, T. Wallek, M. Zeymer, M. Maly, J. Gmehling, Measurement and correlation of biodiesel densities at pressures up to 130MPa, *Fuel*, Vol. 107, pp. 483-492, 2013  
biodiesel densities at pressures up to 130MPa, *Fuel*, Vol. 107, pp. 483-492, 2013.
- 5- L. F. Ramírez-Verduzco, J. E. Rodríguez-Rodríguez, A. del Rayo Jaramillo-Jacob, Predicting cetane number, kinematic viscosity, density and higher heating value of biodiesel from its fatty acid methyl ester composition, *Fuel*, Vol. 91, No. 1, pp. 102-111, 2012.
- 6- C. Baumgarten, *Mixture formation in internal combustion engines*: Springer Science & Business Media, 2006.
- 7- Y. Li, W. Chow, Study of water droplet behavior in hot air layer in fire extinguishment, *Fire technology*, Vol. 44, No. 4, pp. 351-381, 2008.
- 8- S. Som, D. Longman, A. Ramirez, S. Aggarwal, A comparison of injector flow and spray characteristics of biodiesel with petrodiesel, *Fuel*, Vol. 89, No. 12, pp. 4014-4024, 2010.
- 9- H. Nomura, Y. Ujiie, H. J. Rath, J. i. Sato, M. Kono, Experimental study on high-pressure droplet evaporation using microgravity conditions, 26th Symposium (International) on Combustion/ The Combustion Institute, 1996,, pp. 1267-1273.
- 10- P. Saxena, J. C. Patel, M. H. Joshipura, Prediction of Vapor Pressure of Fatty Acid Methyl Esters, *Procedia Engineering*, Vol. 51, pp. 403-408, 2013.