

شبیه‌سازی نرخ تبخیر و دمای سوخت تحت اثر شار حرارتی متغیر با زمان در آتش استخری کم عمق

فرهاد جمس^{۱*}، محمد صفرزاده^۲، قاسم حیدری نژاد^۳

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، farhadjems@modares.ac.ir

۲- دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، m.safarzadeh@modares.ac.ir

۳- استاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، gheidari@modares.ac.ir

* نویسنده مخاطب

چکیده

در این پژوهش، نرخ تبخیر و دمای سیال در یک استخر سوخت کم عمق در حالاتی که شار حرارتی و دمای محیط نسبت به زمان ثابت یا متغیر باشند شبیه‌سازی شد و با نتایج تجربی مقایسه شد. شبیه‌سازی با استفاده از یک الگوریتم توسعه داده شده با روابط تحلیلی و نیمه تجربی انجام شد. در این الگوریتم هر دو مکانیزم انتقال حرارت و انتقال جرم بر محاسبه نرخ تبخیر اثرگذارند. سوخت استفاده شده متانول می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که نرخ تبخیر در حالتی که شار حرارتی متغیر با زمان باشد، ۵۰ ثانیه به نسبت حالت شار ثابت، تاخیر زمانی دارد.

کلمات کلیدی: نرخ تبخیر، استخر سوخت کم عمق، انتقال جرم، آتش استخری، شبیه‌سازی عددی

مقدمه

آتش استخری از جمله پدیده‌های خطرآفرین در صنایعی است که در آن‌ها حمل، نگهداری و استفاده از سوخت‌های مایع در ظروف یا مخازن است [۱،۲]. در این پدیده، ابتدا بخار مایع در نزدیکی سطح آزاد آن تحت اثر جرقه (یا هر عاملی که باعث اشتعال شود) فرایند احتراق را طی می‌کند و بخشی از گرمای آزاد شده بصورت شار تابشی به سمت سوخت مایع تابش می‌کند [۳].

گرمای جذب شده باعث تبخیر سوخت مایع شده و بخار مایع بواسطه حضور در فرایند احتراق می‌سوزد [۴]. این چرخه تا زمانی که تمامی اجزای پنج ضلعی حریق (سوخت، گرما، اگسیژن، اختلاط و زمان کافی) حضور دارند، ادامه می‌یابد.

بررسی، شناخت و رفتارشناسی حریق به درک عمیقی از آن، یافتن نقاط ضعف و قوت و یافتن روش‌های مناسب به جهت کنترل این پدیده می‌انجامد. با بررسی عمده پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، می‌توان گفت بررسی این پدیده در دو دسته کلی تجربی [۵] و عددی [۶] انجام می‌شود.

در بررسی‌های تجربی، موارد مختلفی همچون میزان گرمای آزاد شده، نرخ سوختن، نرخ تبخیر، ارتفاع و دمای شعله، دمای سوخت مایع، مشخصات جریان سوخت مایع در ظرف بررسی می‌شود.

از آنجاییکه بررسی‌های تجربی نیازمند تجهیزات بسیار و پرخطر است، بررسی بصورت عددی روشی بسیار مناسب است. اما یکی از معضلات اصلی این روش‌ها، پیچیدگی بالای فیزیک مساله و عدم دسترسی به خواص ترموفیزیکی مدنظر می‌باشد.

می‌توان گفت دقیق‌ترین روش شبیه‌سازی سوخت مایع، شبیه‌سازی با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی است. اما از آنجایی که حجم محاسبات در شبیه‌سازی به این روش بسیار بالاست و همچنین در بسیاری از پژوهش‌ها هدف، بررسی کنش و واکنش بین حریق و محیط اطراف است، استفاده از این نحوه شبیه‌سازی به صرفه نیست.

یکی از روش‌های بسیار مرسوم در این شبیه‌سازی‌ها، استفاده از نرخ تبخیر (یا نرخ سوختن) مایع است [۷]. بدین ترتیب نیازی به شبیه‌سازی فاز مایع نیست و حجم محاسبات به شدت کاهش می‌یابد.

یک روش تعیین نرخ تبخیر، استفاده از نرخ تبخیر گزارش شده در پژوهش‌های تجربی است. بدین جهت می‌بایست شرایط مسائلی شباهت‌های بسیاری به یکدیگر داشته باشند؛ چراکه نرخ تبخیر توسط عوامل بسیاری همچون میزان فشار هوای محیط، هندسه استخر، میزان غلظت هوا، دمای هوا، دمای شعله، حرارت آزاد شده از حریق به سمت مایع، کنترل می‌شود.

تعیین نرخ تبخیر در مسائلی که نمونه تجربی مشابهی ندارند، ساده نیست. همچنین، از آنجاییکه نرخ تبخیر ثابت در نظر گرفته می‌شود، امکان بررسی شرایط رشد و نمو حریق ممکن نیست. به جهت رفع این مشکل، الگوریتم‌ها و روش‌هایی به منظور تعیین نرخ تبخیر بر اساس شرایط حریق طراحی شده است.

سیکانن و هوستیکا [۸] با بررسی تغییرات حرارتی استخر سوخت تحت اثر شار تابشی ثابت و یکنواخت، روابطی جهت محاسبه نرخ تبخیر ارائه دادند. در این بررسی، اثر انتقال حرارت جابجایی در استخر سوخت با اصلاح رسانش گرمایی سوخت مدل شد و در معادلات انتقال حرارت، شار تابشی نفوذی به عنوان چشمه حرارتی در استخر سوخت در نظر گرفته شد.

بجی و مرسی [۴] یک الگوریتم محاسبه نرخ تبخیر را به کمک روابط نیمه تجربی ارائه کردند. در این الگوریتم، میزان شار تابشی ثابت و یکنواخت است و ارتفاع سوخت در استخر به نسبت طول مشخصه سطح مقطع آن بسیار کم می‌باشد. همچنین هر دو پدیده انتقال جرم و انتقال حرارت در این بررسی لحاظ شد.

هاباساکا [۹] نرخ تبخیر، تغییرات دمای سوخت و استخر را بصورت تجربی برای سه سوخت هپتان، متانول و نفت سفید بررسی کرد. نتایج نشان می‌دهد که فرایند حریق از ابتدا تا زمانی که سوخت مایع تمام می‌شود، دمای سوخت در سه ناحیه زمانی پیش گرمایش، انتقالی و جوشش تغییر می‌کند. همچنین، از آنجاییکه نفت سفید ترکیبی از هیدروکربن‌های سبک و سنگین است، رفتار متفاوتی را نسبت به دو سوخت دیگر نشان داد و دمای آن حین فرایند همواره افزایش یافت.

بجی [۱۰] با اصلاح روند نحوه محاسبه عدد رایلی و عدد ناسلت در الگوریتم ارائه شده توسط سیکانن [۸]، توانست توزیع دمای دقیق تری در راستای عمق سوخت مایع ارائه دهد.

در این پژوهش تلاش شده تا نرخ تبخیر سوخت مایع تحت اثر شار حرارتی متغیر با زمان در یک استخر متانول شبیه‌سازی گردد. بدین منظور از الگوریتم ارائه شده توسط بجی و مرسی [۴] ایده گرفته شده و در ابتدا استقلال زمانی بررسی می‌شود و سپس به منظور حصول اطمینان در نحوه عملکرد الگوریتم، با نتایج ارائه شده مقایسه صورت می‌پذیرد. در انتها

در این روابط به ترتیب T_{film} و Y_{film} دما و غلظت در لایه فیلم، $T_{L,S}$ و $Y_{L,S}$ دما و غلظت در سطح آزاد سیال، T_g و Y_g دما و غلظت در محیط اطراف است.

شرط محاسبه نرخ تبخیر در این الگوریتم، دمای محاسبه شده برای مایع است. هنگامی که دمای مایع کمتر از دمای تبخیر آن باشد، روش محاسبه نرخ تبخیر از براساس فیزیک انتقال جرم و هنگامی که دمای مایع به دمای تبخیر برسد، نرخ تبخیر براساس فیزیک انتقال حرارت محاسبه می‌شود. روابط (۹) و (۱۰) برای محاسبه نرخ تبخیر ارائه شده است.

$$If: T_{pool} < T_b$$

$$\dot{m} = \frac{A_L k Nu}{L c_p Le} \ln(1 + B_M) \quad (9)$$

$$If: T_{pool} = T_b$$

$$\dot{m} = \frac{A_L \dot{q}_e'' - A_L \epsilon_L \sigma (T_b^4 - T_{amb}^4)}{L_v} \quad (10)$$

در این روابط، \dot{m} نرخ تبخیر، A_L مساحت سطح آزاد استخر، L طول مشخصه، B_M عدد اسپالدینگ، \dot{q}_e'' شار حرارتی ورودی، ϵ_L ضریب نفوذ شار حرارتی، σ ثابت استفان بولتزمن و L_v گرمای نهان تبخیر است. باتوجه به این که فرض شده ارتفاع سوخت به نسبت طول مشخصه مساحت مقدار کوچکی است، توزیع دمای مایع در راستای عمق آن ثابت فرض می‌شود. همچنین از تغییرات دما در سطح نیز صرف نظر شده است. با دانستن مقدار نرخ تبخیر و گام زمانی (که یکی از پارامترهای ورودی شبیه‌سازی است) و دانستن مقدار چگالی، می‌توان تغییرات جرم مایع و ارتفاع مایع درون استخر را طبق روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه نمود.

$$m^{new} = m^{old} - \Delta t \times \dot{m} \quad (11)$$

$$d^{new} = \frac{m}{A_p} \quad (12)$$

در این روابط m^{old} و m^{new} جرم سوخت در استخر در گام زمانی جدید و قدیم، Δt اندازه‌ی گام زمانی و d^{new} عمق جدید سوخت می‌باشد. به جهت محاسبه نرخ تبخیر و دمای سوخت، رابطه انرژی برای استخر استفاده می‌شود. هنگامی که دمای سوخت کمتر از دمای تبخیر است رابطه (۱۳) و هنگامی که دمای سوخت با دمای تبخیر باشد، رابطه (۱۴) برای محاسبه نرخ تبخیر به کار می‌رود.

$$m c_{p,L} \frac{dT_L}{dt} = A \dot{q}_e'' - A \epsilon \sigma (T_L^4 - T_{amb}^4) - \dot{m} L_v \quad (13)$$

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{q}_e'' - \epsilon \sigma (T^4 - T_{amb}^4)}{L_v} \quad (14)$$

در این روابط، T_{amb} دمای محیط اطراف است.

بررسی صحت عملکرد الگوریتم و استقلال از گام زمانی

به منظور بررسی الگوریتم یادشده، یک برنامه کامپیوتری با زبان سی‌پلاس‌پلاس توسعه داده شد. در ابتدا به جهت حصول اطمینان از عملکرد برنامه توسعه داده شده، نتایج بدست آمده از شبیه سازی با نتایج ارائه شده توسط بجی و مرسی مقایسه گشت. در این شبیه‌سازی، هیتان به عنوان سوخت انتخاب شد و شار تابشی ۵۰ کیلووات بر مترمربع بود. همچنین ارتفاع سوخت ۱/۳۸ سانتی‌متر و قطر استخر ۹/۶ سانتی‌متر بود. همانطور که در شکل (۲) مشخص است، دقت نتایج برنامه نوشته شده با نتایج مرجع همخوانی دارد. همان طور که مشاهده می‌شود، در مرحله اول که نرخ تبخیر زمان‌مند است و در زمانی که به حالت پایدار می‌رسد، نتایج پژوهش حاضر و مرجع مورد نظر مطابقت دارند. همچنین در هر دو، زمان اتمام سوخت ۹۰ ثانیه است که این موضوع دقت قابل قبول برنامه‌ی نوشته شده را نشان می‌دهد.

تغییرات دمای سطح استخر و نرخ تبخیر محاسبه شده تحت اثر شار تابشی متغیر با زمان ارائه می‌شود.

بررسی فیزیک مسئله

فرآیند تبخیر سوخت مایع (با هر مایعی که تحت اثر شار تابشی از سطح آزاد خود باشد) تحت اثر دو پدیده انتقال جرم و انتقال حرارت کنترل می‌شود. دمای مایع با دریافت شار تابشی از سطح آزاد خود (بویژه سطح آزاد آن) بالا رفته و در نهایت به نقطه جوش می‌رسد. در این بازه زمانی، نرخ تبخیر تحت اثر پدیده انتقال جرم کنترل شده و با بالا رفتن دما، نرخ تبخیر افزایش می‌یابد.

هنگامی که دمای سطح آزاد مایع به نقطه جوش برسد، گرمای دریافت شده صرف تامین گرمای نهان شده و به نسبت، مایع تبخیر می‌گردد. در این حالت، نرخ تبخیر توسط پدیده انتقال حرارت کنترل می‌شود. شکل (۱) نمایی از استخر سوخت مدنظر را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمایی از محیط مسئله

در الگوریتم ارائه شده توسط بجی و مرسی [۴]، تلاش شده تا با در نظر گرفتن هر دو فیزیک انتقال جرم و حرارت و با استفاده از روابط تحلیلی و نیمه تجربی، نرخ تبخیر محاسبه شود. بدین منظور، از آنالوژی چیلتون-کولبرن به جهت محاسبه مشخصه‌های انتقال جرمی مسئله استفاده شد. در این الگوریتم میزان عدد لوئیس "۱" فرض شده است. بدین منظور، مقدار عدد ناسلت با عدد شروود برابر است و ضریب نفوذ جرمی با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$Le = 1 \quad (1)$$

$$Nu = Sh \quad (2)$$

$$\rho D = k/c_p \quad (3)$$

در روابط بالا Le عدد لوئیس، Nu عدد ناسلت، Sh عدد شروود، ρ چگالی، D ضریب نفوذ جرمی، k رسانش هدایتی و c_p ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت است.

به جهت محاسبه عدد ناسلت، از روابط نیمه تجربی (۴) و (۵) که برای سقف سرد-کف گرم (به ترتیب سطح آزاد و محیط اطراف) و رابطه (۶) برای سقف گرم-کف سرد (سطح آزاد و محیط اطراف در حضور حریق) استفاده شده است. این روابط به شرح زیر است.

$$Nu = 0.54 Ra^{0.25} \quad if \ 10^4 < Ra < 10^7 \quad (4)$$

$$Nu = 0.15 Ra^{1/3} \quad if \ 10^7 < Ra < 10^{11} \quad (5)$$

$$Nu = 0.27 Ra^{0.25} \quad if \ 10^5 < Ra < 10^{10} \quad (6)$$

در این روابط، Ra عدد رابلی می‌باشد. همچنین، مقدار دما (و متناظرا غلظت) در لایه نزدیک سطح آزاد موسوم به لایه فیلم با استفاده از قانون یک-سوم محاسبه می‌شود. روابط (۷) و (۸) نحوه محاسبه دما و غلظت در این لایه را براساس قانون یک-سوم را ارائه می‌کند.

$$T_{film} = T_{L,S} + \frac{1}{3}(T_g - T_{L,S}) \quad (7)$$

$$Y_{film} = Y_{L,S} + \frac{1}{3}(Y_g - Y_{L,S}) \quad (8)$$

در این روابط، t زمان، $t_{transient}$ مدت زمان گذرا بودن نرخ یا دما، q متوسط شار حرارتی، q_{Max} بیشینه متوسط شار حرارتی، T دمای سوخت، T_0 دمای اولیه سوخت و T_{fire} دمای هوای مجاور شعله است. باتوجه به نتایج تجربی [۱۲]، میزان بیشینه متوسط شار حرارتی ۱۶ کیلووات بر متر مربع است.

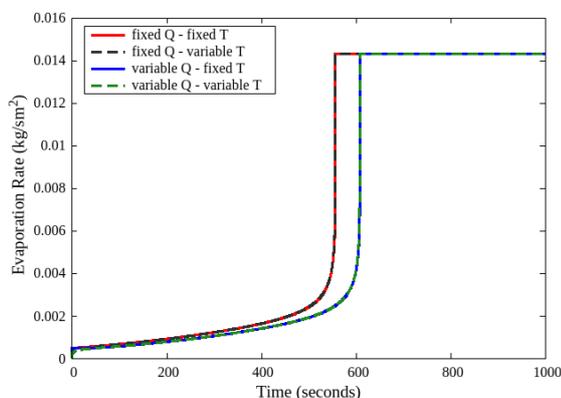
با توجه به پژوهش‌های انجام شده در این زمینه [۸][۷]، مدت زمان لازم برای پایدار شدن شار حرارتی و دمای هوای مجاور شعله، حدود ۱۰۰ ثانیه است. در نتیجه، مقدار q_{Max} ، ۱۶ کیلووات بر متر مربع و مقدار $t_{transient}$ ، ۱۰۰ ثانیه است. همچنین، دمای اولیه سوخت و هوای محیط ۲۹۸ کلوین می‌باشد و مدت زمان شبیه‌سازی ۱۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد.

نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی در چهار حالت الف) شار حرارتی و دما ثابت، ب) شار حرارتی ثابت و دما متغیر، ج) شار حرارتی متغیر و دما ثابت، د) شار حرارتی و دما متغیر انجام شد.

شکل (۴) نرخ تبخیر نسبت به زمان را نشان می‌دهد. باتوجه به نتایج بدست‌آمده، نرخ تبخیر وابستگی شدیدی به میزان شار حرارتی دارد. بطوریکه نرخ تبخیر در حالتی که شار حرارتی متغیر است به نسبت حالتی که شار حرارتی ثابت در نظر گرفته شده تاخیر زمانی دارد. نرخ تبخیر در حالتی که شار حرارتی ثابت فرض شده است پس از ۵۵۰ ثانیه و در حالتی که شار حرارتی نسبت به زمان متغیر است پس از ۶۰۰ ثانیه به پایداری می‌رسد.

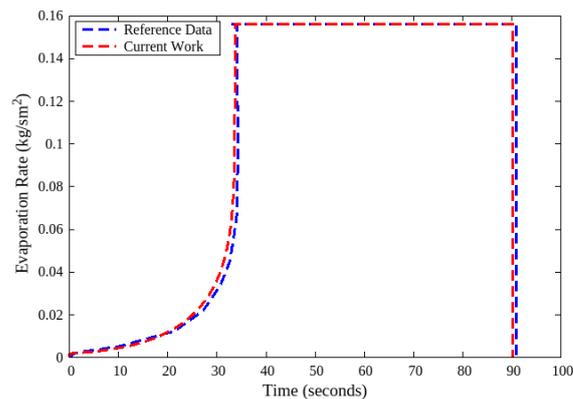
مقدار پایدار نرخ تبخیر در همه حالات ۰/۰۱۴۳ کیلوگرم بر مترمربع ثانیه است. به این ترتیب برای سوخت متانول، تغییرات دما در حین تبخیر، تاثیری بر نرخ تبخیر نمی‌گذارد و تنها تغییرات شار حرارتی بر نتایج تاثیر گذار است و ۵۰ ثانیه تاخیر در رسیدن به حالت پایدار ایجاد می‌نماید.



شکل ۴: نرخ تبخیر نسبت به زمان

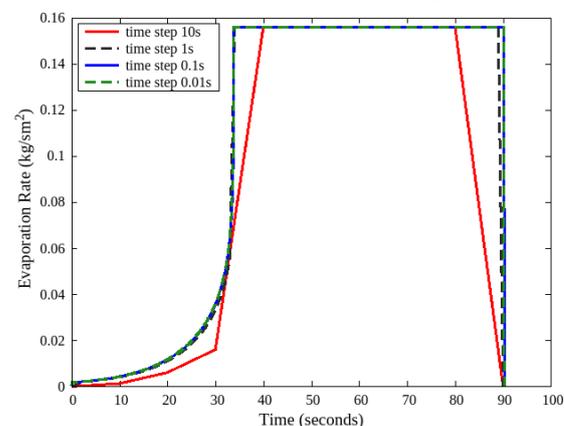
شکل (۵) تغییرات دمای سوخت مایع را نسبت به زمان نشان می‌دهد. با بررسی نتایج بدست‌آمده می‌توان دریافت که در حالتی که شار حرارتی نسبت به زمان متغیر باشد، نمودار تغییر دما - همانند نمودار تغییر نرخ تبخیر - به نسبت حالتی که شار حرارتی ثابت است تاخیر زمانی دارد و دیرتر به مقدار پایدار خود می‌رسد.

دمای سوخت در حالتی که شار حرارتی ثابت است پس از ۵۵۰ ثانیه و در حالتی که نرخ تبخیر متغیر است، پس از ۶۰۰ ثانیه به دمای تبخیر سوخت (۳۳۷ کلوین) می‌رسد. همانند حالت قبل، تغییرات دمای محیط تاثیر کمی بر دمای سوخت مایع دارد. روند تغییرات دمای استخر در حالتی که شار حرارتی ثابت است خطی و در حالتی که تغییر با زمان است پس از گذشت حدود ۱۰۰ ثانیه خطی می‌شود.



شکل ۲: مقایسه نتایج محاسبه شده با مرجع

به جهت بررسی حساسیت نتایج به گام زمانی، شبیه‌سازی با استفاده از گام‌های زمانی "۱۰"، "۱"، "۰/۱" و "۰/۰۱" ثانیه انجام شد. نتایج این شبیه‌سازی‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است. به منظور بررسی اثر گام زمانی، همه پارامترها از جمله شرایط اولیه و مرزی یکسان و همانند شرایط صحت‌سنجی کد رایانه‌ای اعمال شده و تنها گام زمانی فرق می‌کند.



شکل ۳: بررسی استقلال از گام‌های زمانی - نتایج شبیه‌سازی در گام‌های زمانی مختلف

همانطور که در شکل (۳) مشخص است، تفاوت بین نتایج بدست آمده در گام‌های زمانی "۰/۱" و "۰/۰۱" عملاً ناچیز است و بنابراین برای محاسبات بعدی در این پژوهش، از گام زمانی "۰/۱" ثانیه استفاده می‌شود.

روند شبیه‌سازی

به منظور شبیه‌سازی نرخ تبخیر استخر سوخت متانول با استفاده از الگوریتم یاد شده [۴]، خواص ترموفیزیکی سوخت مدنظر با استفاده از توزیع چندجمله‌ای متغیر با دما محاسبه شد [۱۱]. همچنین قطر استخر "۱۰۰" سانتی‌متر و ارتفاع آن "۱۰" سانتی‌متر است. از آنجاییکه نسبت قطر به ارتفاع "۱۰" است، این استخر سوخت، کم عمق است.

هدف از این شبیه‌سازی‌ها بررسی میزان نرخ تبخیر تحت اثر شار حرارتی یا دمای محیط متغیر با زمان است. در نتیجه، ۴ شبیه‌سازی مختلف انجام شد. روابط (۱۳) و (۱۴) تغییرات شار حرارتی و دما نسبت به زمان را بیان می‌کنند.

$$\begin{cases} t < t_{transient}: q = t \times q_{Max}/t_{transient} \\ t \geq t_{transient}: q = q_{Max} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} t < t_{transient}: T = T_0 + t * (T_{fire} - T_0)/t_{transient} \\ t \geq t_{transient}: T = T_{fire} \end{cases} \quad (14)$$

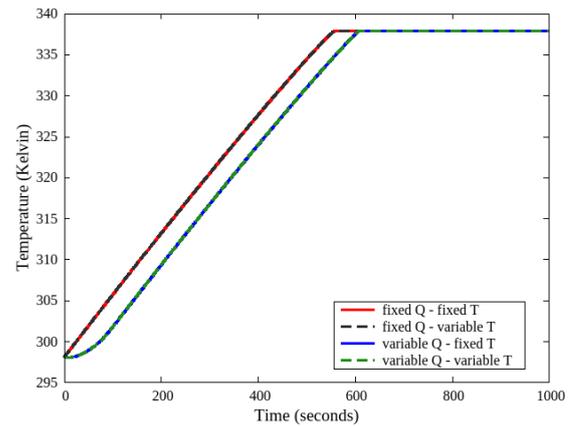
نهایی سوخت در همه حالات با هم برابر است. با مقایسه مقدار بدست‌آمده برای نرخ تبخیر با نتایج تجربی، مشخص شد که میزان خطای شبیه‌سازی ۳۲ درصد می‌باشد. از این رو، اصلاح روابط انرژی در استخر سوخت و ارائه روابطی برای محاسبه توزیع دما درون استخر به عنوان گام بعدی شبیه‌سازی‌ها، به منظور ارتقاء دقت محاسبات، پیشنهاد می‌شود.

فهرست علائم

A	مساحت سطح آزاد استخر سوخت m^2
B_M	عدد اسپالدینگ
c_p	گرمای ویژه در فشار ثابت، J/kgK
D	ضریب نفوذ جرمی، m^2/s
d	عمق سوخت m
k	رسانش هدایتی، w/mK
L	طول مشخصه m
Le	عدد لوئیس
L_v	گرمای نهان تبخیر J/kg
\dot{m}	نرخ تبخیر kg/s
m	جرم سوخت kg
Nu	عدد ناسلت
q	متوسط شار حرارتی W/m^2
Ra	عدد رابلی
Sh	عدد شرود
t	زمان، s
T	دما K
Y	غلظت
فهرست علائم یونانی	
Δt	اندازه‌ی گام زمانی s
ε	ضریب نفوذ شار حرارتی
ρ	چگالی، kg/m^3
σ	ثابت استفان بولتزمن W/m^2K^4
زیرنویس‌ها	
0	مقدار اولیه
Max	مقدار بیشینه
amb	مقدار در سطوح اطراف
g	مقدار در محیط اطراف
L, s	مقدار در سطح آزاد سیال
fire	مقدار در نزدیکی شعله
tansient	مقدار در ناحیه گذرا
بالانویس‌ها	
new	مقدار جدید
old	مقدار قدیم

مراجع

- 1- M. Zhang, W. Song, J. Wang, and Z. Chen, "Accident consequence simulation analysis of pool fire in fire dike," *Procedia Engineering*, vol. 84, pp. 565–577, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.469.
- 2- Q. G. Li, W. H. Song, M. Zhang, and Z. Chen, "Fire risk assessment and numerical simulation of the pool fire in the epoxy propane tank," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 353–354, pp. 2424–2432, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.353-356.2424.
- 3- S. Sudheer and S. v. Prabhu, "Measurement of flame emissivity of gasoline pool fires," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 240, no. 10, pp. 3474–3480, 2010, doi: 10.1016/j.nucengdes.2010.04.043.



شکل ۵: تغییرات دمای سوخت مایع نسبت به زمان

بحث بر روی نتایج

هر دو پارامتر نرخ تبخیر و دمای استخر در یک بازه‌ی زمانی به مقدار پایدار و نهایی خود رسیدند که این موضوع هماهنگی روند محاسبه هر دو پارامتر براساس یک مکانیزم را نشان می‌دهد. تا زمانیکه دمای سوخت به دمای تبخیر خود نرسد، فیزیک حاکم انتقال جرم است و بر همین اساس نرخ تبخیر محاسبه می‌شود. هنگامی که دمای سوخت به نقطه تبخیر می‌رسد، مکانیزم غالب در این فرآیند، انتقال حرارت خواهد بود و نرخ تبخیر براساس همین مکانیزم محاسبه می‌شود. در این حالت گرمای دریافتی صرف تامین گرمای نهان سوخت می‌شود و دمای سوخت با دمای تبخیر برابر است.

با بررسی نتایج بدست‌آمده می‌توان گفت که وابستگی نرخ تبخیر و تغییر دمای سوخت به دمای محیط بسیار ضعیف و وابستگی این دو پارامتر به میزان شار حرارتی بسیار قوی است. علل اصلی این پدیده، پایین بودن دمای تبخیر متانول (حدود ۳۳۷ کلوین) و صرف نظر کردن از انتقال حرارت بین استخر سوخت و محیط اطراف از طریق جابجایی دیواره استخر و رسانش از طریق کف استخر است.

با مقایسه نرخ تبخیر بدست‌آمده (۰/۰۱۴۳ کیلوگرم بر مترمربع ثانیه) در حالت پایدار با میزان اندازه‌گیری شده (۰/۰۱۰۷۸ کیلوگرم بر مترمربع ثانیه) مرجع [۱۲]، میزان خطای شبیه‌سازی ۳۲ درصد می‌باشد. دلایل خطا به صورت زیر می‌باشند:

- ۱- در این شبیه‌سازی، فرض شده که کل استخر سوخت بصورت یکسان تغییر دما می‌دهد.
- ۲- با بررسی و مطالعه رابطه (۱۳) و (۱۴) می‌توان دریافت انتقال حرارت دیواره استخر سوخت با محیط اطراف (از طریق جابجایی) و کف استخر با سطح زمین (از طریق رسانش) در این شبیه‌سازی لحاظ نشده است.
- ۳- سوخت تماماً شفاف فرض شده است. در نتیجه شار حرارتی ورودی به کل سوخت نفوذ می‌کند و میزان بازتاب شار حرارتی ورودی صفر است. این فرض باعث انباشت انرژی در استخر سوخت شده و دمای استخر با نرخ شدیدتری بالا می‌رود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش نرخ تبخیر و دمای استخر سوخت کم عمق با استفاده از الگوریتمی که در آن از روابط تحلیلی و نیمه تجربی استفاده شده شبیه‌سازی شد. شبیه‌سازی در شرایطی که شار حرارتی و دمای محیط ثابت یا نسبت به زمان متغیر باشند انجام شد. نتایج بدست‌آمده نشان می‌دهد که وابستگی نرخ تبخیر و دمای سوخت به شارحرارتی زیاد و به دمای محیط بسیار کم است. همچنین مقدار پایدار نرخ تبخیر و دمای

- 4- T. Beji and B. Merci, "Development of a numerical model for liquid pool evaporation," *Fire Safety Journal*, vol. 102, no. October, pp. 48–58, 2018, doi: 10.1016/j.firesaf.2018.11.002.
- 5- H. Sezer, K. S. Arsava, S. P. Kozhumal, and A. S. Rangwala, "The effect of embedded objects on pool fire burning behavior," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 108, pp. 537–548, 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.021.
- 6- S. Vasanth, S. M. Tauseef, T. Abbasi, A. S. Rangwala, and S. A. Abbasi, "Assessment of the effect of pool size on burning rates of multiple pool fires using CFD," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 30, no. 1, pp. 86–94, 2014, doi: 10.1016/j.jlp.2014.04.011.
- 7- B. Sun, K. Guo, and V. K. Pareek, "Computational fluid dynamics simulation of LNG pool fire radiation for hazard analysis," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 29, no. 1, pp. 92–102, 2014, doi: 10.1016/j.jlp.2014.02.003.
- 8- T. Sikanen and S. Hostikka, "Modeling and simulation of liquid pool fires with in-depth radiation absorption and heat transfer," *Fire Safety Journal*, vol. 80, pp. 95–109, 2016, doi: 10.1016/j.firesaf.2016.01.002.
- 9- H. Hayasaka, "Unsteady Burning Rates Of Small Pool Fires," *Fire Safety Science*, vol. 5, pp. 499–510, 1997, doi: 10.3801/iafss.fss.5-499.
- 10- T. Beji, "Theoretical analysis of the liquid thermal structure in a pool fire," *Journal of Fire Sciences*, vol. 39, no. 1, pp. 36–52, 2021, doi: 10.1177/0734904120962376.
- 11- "Thermal-FluidsPedia | Thermophysical properties | Thermal-Fluids Central." http://www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/Thermophysical_Properties (accessed Dec. 04, 2021).
- 12- M. Klassen and J. P. Gore, *Structure and radiation properties of pool fires*. 1994.
- 13- D. Sahu, S. Jain, A. Gupta, and S. Kumar, "Experimental studies on different liquid pool fires inside the compartment," *Fire Safety Journal*, vol. 109, no. July, 2019, doi: 10.1016/j.firesaf.2019.102858.
- 14- D. Sahu, S. Jain, Shashi, and A. Gupta, "Experimental Study on Methanol Pool Fires under Low Ventilated Compartment," *Procedia Earth and Planetary Science*, vol. 11, pp. 507–515, 2015, doi: 10.1016/j.proeps.2015.06.051.