

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

قاسم حیدری نژاد<sup>۱\*</sup>، فرهاد جمس<sup>۲</sup>، محمد صفرزاده<sup>۳</sup>

۱- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، gheidari@modares.ac.ir

۲- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، farhadjems@modares.ac.ir

۳- دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، m.safarzadeh@modaers.ac.ir

\* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۴، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۱/۰۶/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۵)

**چکیده:** یکی از چالش‌ها و پیچیدگی‌های شبیه‌سازی مسائل مرتبط با آتش استخری با سوخت مایع، تعیین نرخ تبخیر سوخت است. در این پژوهش تلاش شده تا با استفاده از الگوریتم متشکل از روابط ساده تحلیلی و نیمه تجربی، نرخ تبخیر سوخت متانول در مسئله آتش استخری کم‌عمق تحت اثر شار تابشی و دمای محیط گذرا محاسبه شود. در این الگوریتم، هر دو پدیده انتقال حرارت و انتقال جرم لحاظ شد و رفتار هر پدیده مطالعه شد. در مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها با نتایج عددی پژوهش‌های دیگر، دقت قابل قبولی (کمتر از ۳ درصد خطای نسبی) مشاهده شد. همچنین، در مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی، مشخص شد نتایج پایای شبیه‌سازی به نسبت نتایج تجربی، ۱ درصد خطای نسبی دارد. با بررسی نتایج، مشاهده شد که نرخ تبخیر در حالتی که شار تابشی گذراست، به نسبت حالتی که شار تابشی پایا است ۵۰ ثانیه تأخیر زمانی دارد. همچنین، عدد ناسلت و عدد گراشوف مستقل از شار تابشی و وابسته به دمای محیط اطراف می‌باشند.

**کلیدواژگان:** نرخ تبخیر، استخر سوخت کم‌عمق، انتقال جرم، آتش استخری، شبیه‌سازی عددی

### مقدمه

آتش استخری در بستر مایع پدیده‌ای حاصل از سوختن سطح آزاد آن است. در این پدیده، سوخت مایع به واسطه جذب انرژی تابشی آزادشده از واکنش شیمیایی، گرم شده و بخار می‌شود. سوخت بخار شده نیز در حضور گرما و در مدت‌زمان کافی با اکسیژن موجود در هوای اطراف مخلوط می‌شود و واکنش سوختن شکل می‌گیرد. در نتیجه، انرژی تابشی آزاد شده از سوختن به تداوم تبخیر کمک می‌کند و از طرفی، مایع تبخیر شده به تداوم تشکیل شعله کمک می‌کند. این چرخه تا زمانی که سوخت مایع تمام شود، ادامه پیدا می‌کند [۱]. با توجه به فراگیری این نوع از آتش‌سوزی، مطالعه‌ی فیزیک و ساختار آن مورد توجه مطالعات متعددی [۲،۳] قرار گرفته است.

به جهت شناخت و آشنایی با آتش استخری، دو روش کلی آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای از جمله روش‌های رایج می‌باشند. هر دو روش با محدودیت‌ها و چالش‌هایی روبرو هستند. هزینه‌های بالای آزمایش، آلودگی ناشی از محصولات آتش، خطرات جانی ناشی از آزمایش‌های در مقیاس واقعی از جمله چالش‌های پیش‌رو روش تجربی است. از طرفی، هزینه محاسباتی بالا، خطای ناشی از مدل‌سازی پدیده‌های پیچیده مرتبط با آتش و تعیین دبی جرمی سوخت مایع و جامد از جمله چالش‌های اصلی روش عددی است. دبی جرمی سوخت مایع در روش عددی به شیوه‌های مختلف مدل می‌شود. بررسی

هم‌زمان فاز مایع و گاز [۴]، استفاده از روابط تحلیلی-تجربی [۵]، حل معادله انرژی و انتقال جرم ساده‌سازی شده در سوخت مایع [۶] از جمله روش‌های مورد استفاده در تخمین دبی جرمی سوخت مایع تبخیر شده است.

دقیق‌ترین روش برای محاسبه نرخ تبخیر سوخت در شبیه‌سازی رایانه‌ای، در نظر گرفتن سوخت مایع به‌عنوان یک فاز مجزا است تا برهم‌کنش بین سوخت مایع و آتش با دقت بالایی محاسبه شود؛ اما در این روش، حجم محاسبات بسیار بالاست و حتی ممکن است از شبکه محاسباتی متغیر<sup>۱</sup> برای محاسبه دقیق‌تر پارامترهای مختلف در سطح آزاد سوخت استفاده شود. تعامل بین دو فاز مختلف مایع (فاز سوخت) و گاز (فاز تشکیل شعله) از جمله‌ی چالش‌های این روش است.

روشی دیگر از روش‌های تعیین دبی جرمی، استفاده از روابط تحلیلی-تجربی و یا داده‌های تجربی است. در این روش، دبی جرمی اندازه‌گیری شده از آزمایش‌های تجربی به‌عنوان داده ورودی در شبیه‌سازی استفاده می‌شود [۷، ۸] و یا اینکه با توجه به داده‌های تجربی و روابط تحلیلی، فرمولی برای نرخ تبخیر ارائه می‌شود [۹، ۳]. در نتیجه نیازی به شبیه‌سازی با در نظر گرفتن فاز مایع نیست. مشکل اصلی این روش، لحاظ نشدن وابستگی انرژی گرمایی آزاد شده و نرخ تبخیر به فاکتورهای محیطی همانند میزان اکسیژن و دمای هوای اطراف سطح آزاد است [۱۰]. این موضوع باعث می‌شود استفاده از این روش به شرایط محیطی مشابه (یا دست‌کم شرایط محیطی تقریباً مشابه) با بسترهای سوخت با ابعاد هندسی مشابه محدود شود. همچنین، به‌واسطه ثابت بودن نرخ تبخیر، امکان بررسی دقیق رفتار آتش در شرایط گذرا نیست و صرفاً نتایج پایدار آن قابلیت بررسی دارد.

یکی دیگر از روش‌های تعیین نرخ تبخیر، استفاده از الگوریتم‌هایی است که در آن، نرخ تبخیر سوخت با توجه به شرایط محیطی و با اعمال ساده‌سازی‌هایی در معادلات انتقال جرم و حرارت محاسبه می‌شود. در این الگوریتم‌ها، با دانستن میزان گرمای دریافتی از آتش در سطح آزاد سوخت و دمای هوای اطراف، معادلات ساده‌سازی شده‌ی انتقال جرم و حرارت در بستر سوخت حل می‌شود و تخمینی از دبی جرمی سوخت ارائه می‌شود. در این روش، پیچیدگی‌های موجود در پدیده تبخیر با استفاده از روابط تحلیلی و تجربی ساده‌سازی می‌شود. از جمله‌ی محدودیت‌های این روش، کارایی آن برای بستر سوخت با عمق کم است. اگرچه این روش به نسبت روش اول دقت پایین‌تری داشته؛ اما این روش، سادگی بیشتری به نسبت شبیه‌سازی مستقیم فاز مایع و گاز دارد. همچنین، استفاده از الگوریتم‌ها به نسبت روابط تحلیلی-تجربی دقت بالاتر و کارایی بیشتری دارد. از این‌رو، تحقیقات متعددی بر روی روش آخر انجام شده است.

بجی و مرسی [۱۱] الگوریتمی بر اساس لایه فیلم<sup>۲</sup> و متشکل از روابط تحلیلی و تجربی و با استفاده از آنالوژی چیلتون-کولبرن<sup>۳</sup> ارائه کردند که در آن، نرخ تبخیر مایعات تحت اثر شار تابشی ثابت محاسبه می‌شود. در این الگوریتم، فرض شد که استخر سوخت کم‌عمق است و دمای کل استخر یکنواخت است. سیکان و هوستیکا [۱۲] الگوریتمی برای محاسبه نرخ تبخیر و توزیع دما در استخر سوخت ارائه کردند که در آن، اثر انتقال حرارت جابجایی آزاد درون استخر با اصلاح مقدار ضریب رسانش هدایتی مدل شد و شار تابشی نفوذی به استخر به‌صورت چشمه گرمایی در نظر گرفته شد. بجی [۱۳] با اصلاح روابط استفاده شده برای محاسبه عدد ناسلت<sup>۴</sup> و رایلی<sup>۵</sup> در الگوریتم سیکان و هوستیکا [۱۲]، دقت توزیع دمای درون استخر برحسب ارتفاع را بهبود بخشید. سگوویا [۱۴] با استفاده از الگوریتم ارائه‌شده توسط سیکان و هوستیکا [۱۲]، تبخیر سطحی سوخت هپتان را به کمک کد آیسس<sup>۶</sup> شبیه‌سازی کرد. نتایج نشان‌دهنده دقت مناسب شبیه‌سازی در پیش‌بینی نرخ تبخیر است و نتایج عددی در مقایسه با داده‌های تجربی ۵ درصد خطا دارند. هوانگ و همکاران [۱۵] با استفاده از الگوریتم ارائه‌شده

1. Dynamic Mesh  
2. Film Layer  
3. Chilton-Culborn J factor analogy  
4. Nusselt Number  
5. Rayleigh Number  
6. ISIS

توسط بجی و مرسی [۱۱]، نرخ تبخیر مشتقات نفتی را به کمک نرم‌افزار فلونت<sup>۱</sup> شبیه‌سازی کردند و با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با نتایج تجربی، مشخص شد نتایج شبیه‌سازی دقت مناسبی دارد. گالیو و همکاران [۱۶] الگوریتمی جهت محاسبه نرخ تبخیر سوخت‌های مرکب (نظیر بنزین) را ارائه کردند و شبیه‌سازی‌هایی را به کمک نرم‌افزار فلونت ۱۸/۰ انجام دادند. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی مشخص شد نتایج از دقت مناسبی برخوردارند و میزان خطای نتایج ۹ درصد است. با بررسی نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت نرخ تبخیر وابستگی شدیدی به ضخامت سیال دارد به‌طوری که با کمتر شدن ضخامت، نرخ تبخیر به‌واسطه آسان‌تر شدن روند تبخیر بیشتر می‌شود. استوارت و همکاران [۱۷] با استفاده از نرم‌افزار اف‌دی‌اس<sup>۲</sup>، دقت مدل‌های ارائه‌شده برای محاسبه نرخ تبخیر سوخت‌های مایع را با نتایج تجربی مقایسه کردند. در این مقایسه، سوخت‌های مختلفی نظیر اتانول و گازوئیل در ابعاد مختلف بررسی شد و از مدل احتراقی واکنش بی‌نهایت سریع<sup>۳</sup> استفاده شد. در مطالعه‌ی استوارت و همکاران [۱۷] از مدل‌های تبخیر دیگری نظیر دیچ [۱۸]، بروسکاس [۱۹] و مدل موجود در نرم‌افزار اف‌دی‌اس [۲۰] استفاده کرده و نتایج عددی را با نتایج تجربی ارائه شده توسط پرتل و همکاران [۲۱]، چاتریس و همکاران [۲۲، ۲۳]، مونوز و همکاران [۲۴] مقایسه کردند. نتایج نشان می‌دهد، در سوخت‌هایی که دمای تبخیر آن‌ها پایین است، فرآیند احتراق بسیار سریع می‌شود اما در سوخت‌هایی که دمای تبخیر آن‌ها بالاست، لازم است یک انرژی اولیه در شبیه‌سازی لحاظ شود تا واکنش احتراق شکل گیرد.

با توجه به مرور مطالعات در زمینه‌ی مدل‌های تبخیر سوخت مایع، اکثراً بستر سوخت در معرض شار تابشی پایا قرار گرفته و دمای محیط پایا فرض شده و در این شرایط کارایی مدل بکار رفته، بررسی شده است. در نتیجه، میزان نرخ تبخیر محاسبه شده در حالتی است که شرایط محیطی پایا است و اثری از گذرا بودن این موارد در نرخ تبخیر محاسبه شده مشخص نیست. همچنین، در سناریوهایی که بستر سوخت در معرض شار تابشی قرار می‌گیرد (همچون آتش استخری بر بستر سوخت مایع)، دمای محیط، سوخت موجود در استخر و میزان شار تابشی با گذشت زمان تغییر می‌کند. از این‌رو بررسی نحوه‌ی تبخیر گذرای سوخت مایع، در حالتی که دیگر پارامترهای اثرگذار نیز گذرا هستند، امری ضروری است.

در این پژوهش، فرآیند آتش استخری سوخت متانول تحت اثر شار تابشی گذرا و پایا در حالتی که دمای محیط پایا یا گذرا است، شبیه‌سازی شد. بدین منظور، از الگوریتم ارائه شده توسط بجی و مرسی [۱۱] ایده گرفته شد و با پیاده‌سازی تغییراتی در آن، الگوریتم جدیدی با قابلیت اعمال شرایط متغیر با زمان ارائه شد. این الگوریتم به جهت محاسبه نرخ تبخیر و متوسط دمای سوخت موجود در استخر مسائله آتش استخری استفاده می‌شود. کارایی و دقت این الگوریتم در مسائلی بالاست که استخر سوخت کم عمق باشد. ورودی الگوریتم، دمای اولیه سوخت و محیط، شار تابشی بر سطح استخر، ارتفاع سوخت در استخر و جرم سوخت است و خروجی آن، متوسط نرخ تبخیر بر سطح، متوسط دمای سوخت و تغییرات عمق سوخت است. همچنین، این مدل ریاضی می‌تواند به عنوان یک شرط مرزی در شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی مرتبط با آتش استخری با سوخت مایع یا در حالت کلی‌تر، مسائل مربوط به تبخیر سطحی و تبخیر در نقطه جوش سیال استفاده شود. به‌منظور صحت‌سنجی الگوریتم جدید، ابتدا نتایج مطالعه‌ی حاضر با نتایج الگوریتم ارائه‌شده توسط بجی و مرسی [۱۱] در شرایط شار تابشی و دمای محیط ثابت مقایسه می‌شود و در گام بعد نتایج الگوریتم حاضر با نتایج تجربی کلاسن و گور [۲۵] مقایسه می‌شود. در نهایت، نرخ تبخیر، دمای سوخت، عدد ناسلت و عدد گراشوف برای حالتی که شار تابشی و دمای محیط گذرا باشد، بررسی می‌شود.

1. Fluent  
2. FDS (Fire Dynamics Simulator)  
3. Infinite Fast Chemistry (IFC)

## فیزیک مسئله

به طور کلی تبخیر سطحی مایعات تحت کنترل دو پدیده انتقال جرم و حرارت است. هنگامی که دمای سطح آزاد مایع کمتر از نقطه جوش آن باشد و محیط اطراف آن از بخار سیال اشباع نشده باشد، فرآیند تبخیر تحت کنترل انتقال جرم است. در این حالت مولکول‌های حاضر در سطح آزاد با دریافت انرژی از اطراف، از مایع به گاز تغییر فاز می‌دهند. هنگامی که دمای مایع به نقطه جوش رسیده باشد، نرخ تبخیر مایع وابسته به میزان گرمای دریافتی است و در نتیجه تحت کنترل پدیده انتقال حرارت است.

در هنگام شکل‌گیری آتش، بخار سیال در نزدیکی سطح آزاد در حضور انرژی اولیه واکنش شیمیایی سوختن را طی می‌کند و بخشی از انرژی آزاد شده به سمت استخر مایع برمی‌گردد. این انرژی باعث بالا رفتن دمای مایع (به خصوص در سطح آزاد آن) می‌شود و در نهایت، به بالا رفتن نرخ تبخیر منجر می‌شود. تا زمانی که دمای سیال به نقطه جوش نرسد، نرخ تبخیر در کنترل انتقال جرم و هنگامی که دمای سیال به نقطه جوش برسد، گرمای دریافتی صرف تأمین گرمای نهان مایع شده و نرخ تبخیر توسط پدیده انتقال حرارت کنترل می‌شود. با توجه به فیزیک بیان شده، برای مدل‌سازی نرخ تبخیر سوخت مایع نیاز به الگوریتمی است که تأثیر هم‌زمان انتقال جرم و حرارت بر نرخ تبخیر را لحاظ کند.

## تشریح الگوریتم و روابط حاکم بر مسئله

شکل (۱) نمایی از یک استخر سیال را نشان می‌دهد. استخر سوخت و محیط اطراف آن را می‌توان به سه ناحیه سطح آزاد سیال، لایه فیلم و محیط اطراف تقسیم نمود. در سطح آزاد مایع به واسطه جذب انرژی از محیط اطراف تبخیر می‌شود و میزان غلظت بخار سیال در لایه فیلم بالاست. محیط اطراف نیز توسط هوای آزاد پر شده و غلظت بخار ناچیز است و دمای هر سه ناحیه متفاوت است. با توجه به برهم‌کنش هر سه ناحیه در تبخیر بستر سوخت، نیاز به ایجاد تعامل بین این نواحی است. بدین منظور از الگوریتم ارائه شده توسط بجی و مرسی [۱۱] که برای حالت نرخ تشعشع و دمای محیط پایا است، استفاده شد و با اعمال تغییراتی (که در ادامه توضیحات آن آورده می‌شود) در زبان سی‌پلاس‌پلاس<sup>۱</sup> پیاده‌سازی شد.

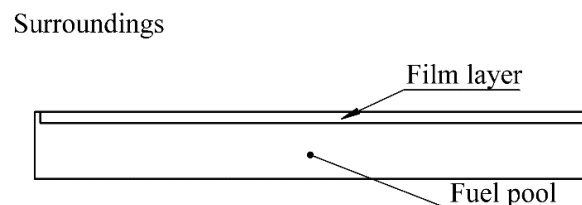


Figure 1- Schematic of liquid pool and surroundings (right view)  
شکل ۱- نمایی از استخر مایع و محیط اطراف (نمای سمت راست)

## فرضیات حاکم بر الگوریتم

در الگوریتم پیشنهادی تلاش شده تا با در نظر گرفتن هر دو پدیده انتقال حرارت و انتقال جرم نرخ تبخیر مایع محاسبه شود. در این روش، نرخ تبخیر تابعی از گرمای تابشی ورودی از سطح آزاد سیال و دمای محیط اطراف است و محاسبات به کمک روابط تحلیلی و نیمه تجربی انجام می‌شود. در این الگوریتم فرضیات زیر لحاظ شده است:

1. C++

- ۱- ضخامت لایه سوخت در استخر کم باشد. در بستر سوخت دایروی، نسبت قطر به ارتفاع سوخت بسیار بزرگتر از ۱ باشد. لازم به ذکر است در شرایطی که سطح مقطع استخر سوخت دایروی نیست، می‌توان از قطر هیدرولیکی استفاده کرد.
- ۲- استخر سوخت دمای یکنواختی دارد و تغییرات دمای استخر سوخت بصورت یکنواخت محاسبه می‌شود.
- ۳- هوای اطراف، بخار سوخت و مخلوط آن‌ها گاز ایده‌آل است. خواص مایع ثابت اما خواص بخار آن و هوای اطراف متغیر و وابسته به دما است.
- ۴- انتقال حرارت بین سطح آزاد و محیط اطراف لحاظ شده اما از انتقال حرارت اطراف استخر سوخت با محیط اطراف صرف‌نظر شده است.
- ۵- به جهت محاسبه پارامترهای مرتبط با پدیده انتقال جرم، از آنالوژی چیلتون-کولبرن استفاده می‌شود.
- ۶- جهت محاسبه خواص ترمودینامیکی لایه فیلم از دیدگاه دالتون<sup>۱</sup> استفاده می‌شود.

### معادلات حاکم بر الگوریتم

پس از انجام فرضیات نرخ تبخیر سطحی مایع را می‌توان با استفاده از مدل استفان-فوجس<sup>۲</sup> محاسبه نمود.

$$\dot{m} = A_L \rho_{\text{total}} h_m \ln(1 + B_M) \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $\dot{m}$  نرخ تبخیر سطحی،  $A_L$  مساحت سطح آزاد،  $h_m$  ضریب انتقال جرمی و  $B_M$  عدد اسپالدینگ است. ضریب انتقال حرارت جرمی طبق رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$h_m = \frac{\text{Sh} \times D_v}{L} \quad (2)$$

در این رابطه،  $\text{Sh}$  عدد شروود،  $D_v$  ضریب پخش بخار سیال در هوای اطراف و  $L$  طول مشخصه است. با استفاده از آنالوژی چیلتون-کولبرن می‌توان عدد شروود<sup>۳</sup> را توسط عدد لوئیس<sup>۴</sup> و عدد ناسلت محاسبه نمود. برای محاسبه ضریب پخش بخار سیال می‌توان از رابطه (۳) استفاده کرد. همچنین، عدد اسپالدینگ طبق رابطه (۴) تعریف می‌شود و طول مشخصه نسبت مساحت سطح آزاد به محیط آن است.

$$\rho_{\text{total}} D_v = \frac{1}{\text{Le}} \frac{k_{\text{mixture}}}{C_{p, \text{vapor}}} \quad (3)$$

$$B_M = \frac{Y_L - Y_G}{1 - Y_L} \quad (4)$$

$$B_M = \frac{X_L - X_G}{1 - X_L} \quad (5)$$

در روابط (۳) الی (۵)،  $\text{Le}$  عدد لوئیس،  $k_{\text{mixture}}$  و  $C_{p, \text{mixture}}$  به ترتیب رسانش هدایتی و ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط بخار سیال و هوا در لایه فیلم،  $Y_L$  و  $Y_G$  به ترتیب کسر جرمی،  $X_L$  و  $X_G$  کسر مولی سیال و هوای اطراف است. برای محاسبه دمای لایه فیلم و غلظت بخار سیال در این لایه، از قانون یک‌سوم طبق رابطه (۶) و (۷) استفاده می‌شود [۲۶].

---

1. Dalton Law  
2. Stefan-Fuchs Model  
3. Sherwood Number  
4. Lewis Number

$$T_{\text{film layer}} = T_{\text{free surface}} + \frac{1}{3}(T_{\text{surroundings}} - T_{\text{free surface}}) \quad (6)$$

$$Y_{\text{film layer}} = Y_{\text{free surface}} + \frac{1}{3}(Y_{\text{surroundings}} - Y_{\text{free surface}}) \quad (7)$$

در رابطه (۶)  $T_{\text{film layer}}$ ،  $T_{\text{free surface}}$  و  $T_{\text{surroundings}}$  به ترتیب دمای لایه فیلم، دمای سطح آزاد سیال و دمای هوای محیط اطراف است. همچنین، در رابطه (۷)  $Y_{\text{film layer}}$ ،  $Y_{\text{free surface}}$  و  $Y_{\text{surroundings}}$  به ترتیب کسر جرمی بخار سیال در لایه فیلم، سطح آزاد سیال و هوای محیط اطراف است. خواص ترمودینامیکی لایه فیلم نظیر رسانش هدایتی، چگالی و لزجت طبق دیدگاه دالتون بر مبنای میزان کسر جرمی بخار سیال و هوا محاسبه می‌شود. حال می‌توان رابطه (۱) را به شکل رابطه‌ی (۸) بازنویسی کرد.

$$\dot{m} = A_L \frac{k_{\text{mixture}}}{C_{p, \text{vapor}}} \frac{1}{Le} \frac{Nu}{L} \ln(1 + B_M) \quad (8)$$

برای محاسبه عدد ناسلت، لازم است شرایط جریان هوای اطراف سطح آزاد مشخص باشد. برای مسائلی همچون آتش استخری می‌توان از روابط (۹) و (۱۰) برای کف گرم و سقف سرد و یا رابطه (۱۱) برای کف سرد و سقف گرم استفاده نمود [۲۷].

$$Nu = 0.54 Ra^{0.25} \quad \text{if } 10^4 < Ra < 10^7 \quad (9)$$

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

$$Nu = 0.27 Ra^{0.25} \quad \text{if } 10^5 < Ra < 10^{10} \quad (11)$$

$$Ra = Pr \times Gr \quad (12)$$

$$Pr = \frac{C_{p,g} \mu_g}{k_g} \quad (12)$$

$$Gr = \frac{gL^3 |\rho_g - \rho_{\text{Film}}|}{\vartheta_{\text{Film}}^2 \rho_{\text{Film}}} \quad (13)$$

در روابط (۹) الی (۱۱)  $Ra$  عدد رایلی است و طبق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود. همچنین در روابط (۱۳) و (۱۴)،  $Gr$  و  $Pr$  به ترتیب عدد گراشوف و عدد پرانتدل است و  $g$  شتاب گرانش،  $L$  طول مشخصه،  $\rho_g$  و  $\rho_{\text{Film}}$  چگالی هوای اطراف و لایه فیلم،  $\vartheta_{\text{Film}}$  لزجت سینماتیکی سیال است. به جهت محاسبه دمای سطح آزاد (و استخر مایع)، قانون اول ترمودینامیک به صورت رابطه‌ی (۱۴) برای سطح آزاد نوشته می‌شود.

$$m c_{p,L} \frac{dT_L}{dt} = A \dot{q}_e'' - A \varepsilon \sigma (T_L^4 - T_{\text{amb}}^4) - \dot{m} L_v \quad (14)$$

در این رابطه،  $m$  جرم مایع موجود در استخر سوخت،  $c_{p,L}$  ظرفیت گرمایی ویژه مایع،  $T_L$  دمای مایع،  $\varepsilon$  ضریب نفوذ شار تابشی،  $\dot{q}_e''$  شار تابشی وارد شده به استخر،  $\sigma$  ثابت استفان-بولتزمن،  $T_{\text{amb}}$  دمای محیط اطراف و  $L_v$  گرمای نهان مایع است. در حالتی که دمای سطح آزاد به دمای تبخیر مایع برسد، می‌توان رابطه انرژی (۱۴) را به صورت پایا در نظر گرفت. حال، برای

حل این معادله می‌توان از روش‌هایی نظیر اولر<sup>۱</sup> و رانج-کوتا<sup>۲</sup> استفاده نمود. همچنین، برای محاسبه خواص گاز وابسته به دما می‌توان از چندجمله‌ای‌های درجه ۵ استفاده نمود [۲۸]. الگوریتم حل مسئله تبخیر را می‌توان در ۹ مرحله زیر بیان کرد:

- ۱- تعیین خواص سیال (در این پژوهش سیال متانول است) و گاز موجود در اطراف (هوا)، میزان شار تابشی بر سطح استخر، اندازه گام زمانی و مقادیر اولیه دما، ارتفاع سیال، ابعاد استخر.
- ۲- محاسبه کسر جرمی (یا کسر مولی) سیال در سطح آزاد با استفاده از روابط (۴) یا (۵).
- ۳- محاسبه خواص ترموفیزیکی لایه فیلم با استفاده از قانون دالتون.
- ۴- محاسبه عدد پرانتل با استفاده از رابطه (۱۲) و عدد گراشوف طبق رابطه (۱۳).
- ۵- محاسبه عدد ناسلت طبق روابط (۹) الی (۱۲).
- ۶- محاسبه دمای جدید سیال با حل رابطه (۱۴). در این رابطه، مقدار نرخ تبخیر از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.
- ۷- اگر دمای سیال به دمای تبخیر نرسیده باشد، محاسبه نرخ تبخیر با رابطه (۸)، در غیر این صورت محاسبه نرخ تبخیر با استفاده از رابطه (۱۴) در حالتی که فرضیه ثابت بودن دمای استخر اعمال شود.
- ۸- محاسبه مقدار جدید جرم سیال درون استخر و عمق جدید آن.
- ۹- تکرار مراحل (۲) الی (۸) تا زمانی جرم سیال درون استخر صفر شود.

### روش عددی

الگوریتم ارائه شده به زبان سی پلاس پلاس نوشته شده و تأثیر هم‌زمان انتقال حرارت و جرم بر تبخیر را به صورت زمان‌مند در نظر می‌گیرد. در این الگوریتم، معادلات دیفرانسیل انرژی با استفاده از روش کرانک-نیکلسون<sup>۳</sup> گسسته‌سازی شده و گام زمانی با استفاده از استقلال از گام زمانی، ۰/۱ ثانیه در نظر گرفته شد. کد موردنظر با استفاده از سیستم محاسباتی ۴ هسته با پردازنده Core™ i7-4702MQ ساخت شرکت اینتل و ۸ گیگابایت حافظه‌ی موقت انجام شد (البته برای هر یک از شبیه‌سازی‌ها از یک هسته استفاده شد و هر یک ۳ ثانیه طول کشید).

### اعتبارسنجی

به منظور حصول اطمینان از عملکرد صحیح کد نوشته شده، نتایج برنامه رایانه‌ای در سه قسمت با نتایج تجربی و عددی مقایسه می‌شود. در گام نخست، بستر سوخت مایع از جنس هپتان مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج مطالعه‌ی حاضر با نتایج عددی بجی و مرسی [۱۱] مقایسه می‌شود. در مرحله‌ی بعد، نتایج شبیه‌سازی حاضر برای بستر مایع آب با نتایج تجربی [۲۹] و عددی بجی و مرسی [۱۱] مقایسه می‌شود. در گام نهایی نیز از نتایج تجربی [۲۵] استفاده شده و نتایج عددی حاضر برای بستر سوخت متانول با نتایج تجربی صحت‌سنجی می‌شود.

### صحت‌سنجی نرخ تبخیر در بستر سوخت هپتان

در این بخش، به منظور حصول اطمینان از عملکرد صحیح کد نوشته شده، نتایج به دست آمده توسط برنامه رایانه‌ای با نتایج ارائه شده توسط بجی و مرسی [۱۱] مقایسه می‌شود. در این شبیه‌سازی سوخت بکار رفته هپتان و شار تابشی ۵۰ کیلووات بر مترمربع بود. همچنین ارتفاع سوخت ۱/۳۸ سانتی‌متر و قطر ظرف ۹/۶ سانتی‌متر بود که نمایی از بستر سوخت در شکل (۱) نشان داده شده است. به جهت بررسی حساسیت نتایج به گام زمانی، شبیه‌سازی با استفاده از گام‌های زمانی ۰/۰۱، ۰/۱، ۱ و ۱۰ ثانیه انجام شد. با توجه به این که معادلات مربوط به نرخ تبخیر و دمای سیال تابع زمان هستند، تنها نیاز به بررسی

1. Euler Method  
2. Runge-Kutta Method  
3. Crank-Nicolson

استقلال از گام زمانی است. بدین منظور در این سناریو، نتایج نرخ تبخیر از سطح بستر سوخت برای گام‌های زمانی مختلف در شکل (۲) نشان داده شده است. به‌منظور بررسی اثر گام زمانی، هم‌ی پارامترها از جمله شرایط اولیه یکسان و تنها گام زمانی متفاوت است. طبق نتایج ارائه شده در شکل (۲)، تفاوت بین نتایج به‌دست‌آمده 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.

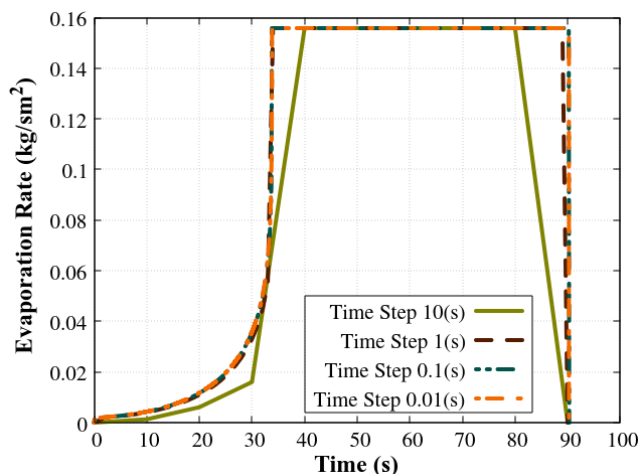


Figure 2- Calculated evaporation rate using different time steps

شکل ۲- نرخ تبخیر محاسبه‌شده در گام‌های زمانی مختلف

پس از بررسی استقلال از گام زمانی، نتایج نرخ تبخیر سوخت هپتان حاصل از شبیه‌سازی حاضر با نتایج بجی و مرسی [۱۱] در شکل (۳) مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، نرخ تبخیر در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله‌ی اول (زمان بین ۰ الی ۳۳ ثانیه) نرخ تبخیر از صفر به ۰/۱۶ کیلوگرم بر مترمربع ثانیه می‌رسد و در مرحله‌ی دوم (زمان بین ۳۳ الی ۹۰ ثانیه) نرخ تبخیر در ۰/۱۶ کیلوگرم بر مترمربع ثانیه ثابت باقی می‌ماند (توضیحات هر یک از این مراحل در ادامه ارائه خواهد شد). نتایج شبیه‌سازی حاضر با نتایج بجی و مرسی [۱۱] در هر دو مرحله تطابق خوبی دارد و این نشان‌دهنده‌ی عملکرد صحیح شبیه‌سازی حاضر است.

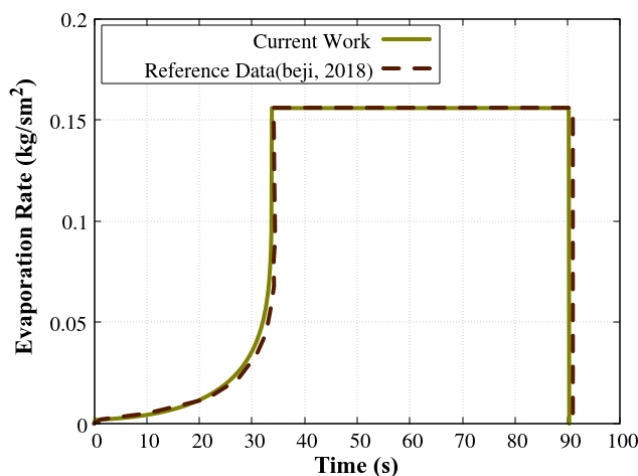


Figure 3- Comparison of computed results and reference results

شکل ۳- مقایسه نتایج محاسبه‌شده با نتایج مرجع



### صحت‌سنجی دما و نرخ تبخیر در بستر مایع آب

به‌منظور تکمیل صحت‌سنجی، در این بخش نتایج تبخیر از سطح بستر مایع از جنس آب با نتایج تجربی [۲۹] و نتایج عددی [۱۱] مقایسه می‌شود. در این بخش علاوه بر نرخ تبخیر، نتایج دمای بستر مایع و عدد ناسلت نیز بررسی می‌شود و از این جهت می‌توان گفت تمام پارامترهای اصلی در شبیه‌سازی، صحت‌سنجی می‌شوند (البته لازم به ذکر است که در این بررسی تنها نتایج تجربی مربوط به نرخ تبخیر موجود بود و سایر پارامترها با نتایج عددی مقایسه شدند). هندسه و ابعاد بستر آب مورد بررسی مشابه شکل (۱) می‌باشد.

شکل (۴) تغییرات نرخ تبخیر آب برحسب زمان در آزمایش تجربی [۲۹]، شبیه‌سازی مرجع [۱۱] و نتایج پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. میزان خطای شبیه‌سازی حاضر با داده‌های عددی ارائه‌شده توسط بیجی و مرسی (مرجع) کمتر از ۳ درصد است. با مقایسه نتایج تجربی با داده‌های شبیه‌سازی حاضر، می‌توان دریافت در بازه‌ی زمانی صفر الی صد ثانیه (شروع تبخیر از سطح)، داده‌های شبیه‌سازی تطابق خوبی با داده‌های تجربی دارد و نشان از توانایی بالای الگوریتم در محاسبه نرخ تبخیر و شبیه‌سازی درست فیزیک مسئله است.

در بازه‌ی زمانی صد الی دویست ثانیه، میزان خطای شبیه‌سازی با نتایج تجربی افزایش می‌یابد. علت اصلی این میزان خطا را با توجه به میزان دما در این بازه می‌توان به نادیده گرفتن اثر انتقال حرارت سطح آزاد با لایه‌های زیرین سیال موجود در استخر مرتبط دانست. چرا که انتقال حرارت سطح آزاد با لایه‌های زیرین، از ثابت ماندن دمای سطح آزاد جلوگیری می‌کند و در نتیجه، نرخ تبخیر سوخت (برخلاف نتایج شبیه‌سازی) به میزان بیشینه خود نمی‌رسد و این موضوع سبب می‌شود که زمان افزایش دمای سطح و رسیدن آن به دمای تبخیر با تأخیر روبرو شود. در بازه‌ی زمانی دویست الی پانصد ثانیه، میزان نرخ تبخیر پایدار شده و ثابت باقی می‌ماند. در این حالت، میزان نرخ تبخیر مربوط به نتایج تجربی و عددی به ترتیب، ۰/۰۱۹ و ۰/۰۲۱۵ کیلوگرم بر مترمربع ثانیه است. به این ترتیب میزان خطای نسبی نتایج عددی با نتایج تجربی، ۱۳ درصد می‌شود. در نتیجه، رفتار پیش‌بینی شده از نرخ تبخیر در شبیه‌سازی با رفتار داده‌های تجربی تطابق مناسبی دارد.

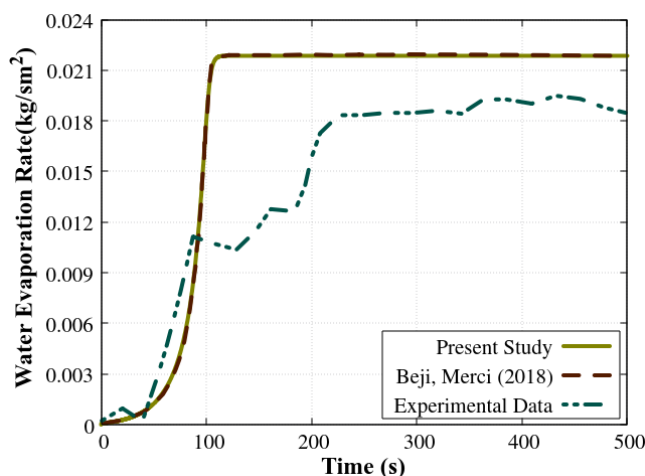


Figure 4- Comparison of experimental and numerical results of water evaporation rate with respect to time  
 شکل ۴- مقایسه تغییرات نرخ تبخیر در داده‌های تجربی، عددی مرجع و داده‌های شبیه‌سازی حاضر برحسب زمان

شکل (۵) تغییرات دمای سطح آزاد سیال برحسب زمان در داده‌های عددی [۱۱] و داده‌های شبیه‌سازی پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. تغییرات دما برحسب زمان در بازه‌ی زمانی صفر الی صد ثانیه خطی است و در بازه‌ی زمانی صد الی پانصد ثانیه دما ثابت است. میزان دمای سطح آزاد در ابتدای شبیه‌سازی ۲۹۸ کلوین و در انتها ۳۷۲ کلوین است. در نتیجه می‌توان گفت،

تعداد حرارتی برقرار شده بین استخر سوخت و محیط اطراف به گونه‌ای است که مکانیزم تبخیر تا انتهای شبیه‌سازی در اختیار پدیده انتقال جرم است. این موضوع با بررسی رابطه انرژی (۱۴) مشخص است. شار تابشی در تلاش است تا دمای استخر را بالا ببرد و تابش سطح آزاد به محیط اطراف و تبخیر ناشی از انتقال جرم هدایتی درصدد کاهش دمای سطح آزاد است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی پژوهش حاضر تطابق بسیار خوبی با نتایج مرجع [۱۱] دارند و میزان خطای نسبی آن کمتر از ۳ درصد است.

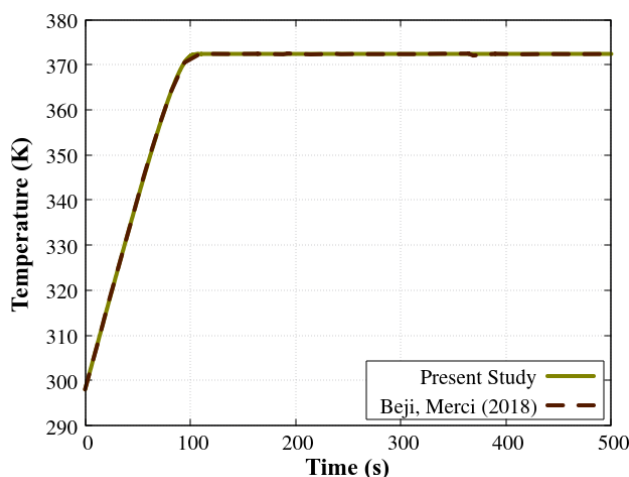


Figure 5- Comparison of Reference numerical and present study of free surface temperature data with respect to time  
 شکل ۵- مقایسه تغییرات دما در داده‌های عددی مرجع و داده‌های شبیه‌سازی حاضر برحسب زمان

شکل (۶) تغییرات عدد ناسلت برحسب زمان در داده‌های عددی [۱۱] و پژوهش حاضر را نمایش می‌دهد. همانند نرخ تبخیر و دما، نتایج شبیه‌سازی حاضر با نتایج داده‌های عددی مرجع تطابق بسیار خوبی دارد و میزان خطا کمتر از ۳ درصد است. میزان کمینه عدد ناسلت در شبیه‌سازی پیش‌رو از ۲/۵ شروع شده و در مدت زمان ۱۰۰ ثانیه به مقدار بیشینه خود می‌رسد که در هر دو شبیه‌سازی پس از گذشت ۱۰۰ ثانیه مقدار عدد ناسلت پایا می‌شود. همچنین، میزان بیشینه عدد ناسلت در شبیه‌سازی پیش‌رو ۱۰/۷ و در داده‌های مرجع ۱۰/۷۵ است.

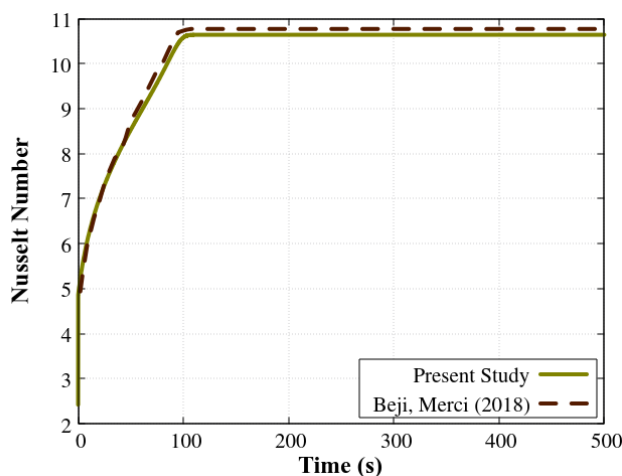


Figure 6- Comparison of experimental and numerical results of Nusselt number with respect to time  
 شکل ۶- مقایسه تغییرات عدد ناسلت در داده‌های تجربی، عددی مرجع و داده‌های شبیه‌سازی حاضر برحسب زمان

به جهت مقایسه نتایج الگوریتم یاد شده با نتایج تجربی آتش استخری، از نتایج ارائه شده توسط کلاسن و گور [۲۵] استفاده شده است. در این آزمایش از استخر سوخت متانول با قطر ۱۰۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰/۲ سانتی‌متر استفاده شده است و جنس ظرف استخر سوخت استیل با ضخامت ۰/۱۶ سانتی‌متر است. از آنجایی که نسبت ارتفاع به قطر استخر ۰/۱۰۲ است، استخر موردنظر را می‌توان استخر کم‌عمق دانست. شار تابشی آتش بر سطح آزاد سوخت در نقاط مختلف سطح آزاد و نرخ تبخیر سوخت اندازه‌گیری شد. چیدمان شرایط آزمایش و داده‌های به‌دست آمده در جدول (۱) ارائه شده است و شکل (۷) طرحی سه‌بعدی از استخر سوخت استفاده شده در آزمایش را نشان می‌دهد.

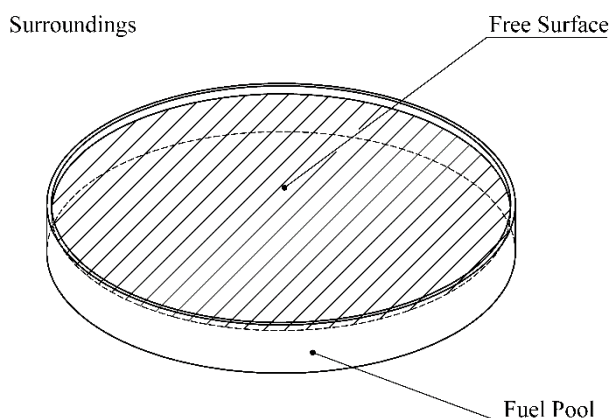


Figure 7- Schematic of liquid pool and surroundings, Trimetric view

شکل ۷- نمایی از استخر سوخت و محیط اطراف

درحالتی که میزان حرارت تشعشع متوسط بر سطح بستر سوخت، ۱۶ کیلووات بر مترمربع باشد، میزان نرخ تبخیر پایای اندازه‌گیری شده در آزمایش تجربی و به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی انجام‌شده به ترتیب ۰/۰۱۴۴ و ۰/۰۱۴۳ کیلوگرم بر مترمربع ثانیه است. در نتیجه میزان خطای نسبی شبیه‌سازی ۰/۷ درصد است که نشان‌دهنده دقت بالای شبیه‌سازی است. همچنین دمای سطح بستر سوخت در این حالت به ۳۳۷ کلوین می‌رسد (البته داده‌های تجربی در این زمینه گزارش نشده بود).

جدول ۱- چیدمان آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی به همراه نتایج

Table 1- Experimental and numerical setup and results

Data Type	Diameter (cm)	Height/Diameter	Steady Radiative heat flux (kw/m <sup>2</sup> )	Evaporation Rate (kg/m <sup>2</sup> s)	Free-Surface Temperature (K)
Experimental Data	10.2	0.102	16	0.0144	-
Numerical Data	10.2	0.102	16	0.0143	337

در یک جمع‌بندی از مقایسه‌ی نتایج عددی حاضر با نتایج تجربی و عددی مطالعات دیگران، می‌توان دریافت که میزان خطای نسبی مطالعه‌ی حاضر در پیش‌بینی نتایج نرخ تبخیر، دمای سطح و عدد ناسلت، در حد قابل قبولی است و به‌این ترتیب می‌توان نتایج مربوط به نرخ تبخیر در حالت شار تابشی و دمای محیط گذرا را بررسی کرد.

### تبخیر در حالت شار تابشی و دمای محیط متغیر با زمان

پس از حصول صحت سنجی از الگوریتم ارائه‌شده و تحلیل نتایج در حالت شار تابشی و دمای محیط ثابت، در این بخش نتایج مربوط به تبخیر در حالت شار تابشی و دمای محیط گذرا بررسی می‌شود. به این منظور نتایج در چهار حالت متفاوت از شار تابشی و دمای محیط متغیر با زمان، مقایسه و نرخ تبخیر، دمای سطح و عدد ناسلت و گراشوف مطالعه می‌شود.

## روند شبیه‌سازی

هدف از این پژوهش، محاسبه پارامترهای مرتبط با تبخیر در مسئله آتش استخری است. از این رو بستر سوخت با ابعادی مشابه شکل (۸) در نظر گرفته شده و به این ترتیب قطر استخر مورد نظر ۱۰۰ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۱۰ سانتی‌متر است. همچنین، سوخت از جنس متانول در نظر گرفته شده است. از آنجایی که نسبت قطر به ارتفاع ۱۰ است، این استخر سوخت، کم‌عمق است. به منظور شبیه‌سازی اثر آتش، شار تابشی و دمای هوای اطراف به صورت متغیر تعریف می‌شود و نتایج این شبیه‌سازی‌ها با حالتی که این مقادیر ثابت هستند مقایسه می‌شود. در نتیجه، ۴ شبیه‌سازی مختلف انجام شد. روابط (۱۵) و (۱۶) تغییرات شار تابشی و دما نسبت به زمان را بیان می‌کنند.

$$\begin{cases} t < t_{\text{transient}}: q = t \times q_{\text{Max}}/t_{\text{transient}} \\ t \geq t_{\text{transient}}: q = q_{\text{Max}} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} t < t_{\text{transient}}: T = T_0 + t * (T_{\text{fire}} - T_0)/t_{\text{transient}} \\ t \geq t_{\text{transient}}: T = T_{\text{fire}} \end{cases} \quad (16)$$

در این روابط،  $t$  زمان،  $t_{\text{transient}}$  مدت‌زمان گذرا بودن نرخ یا دما،  $q$  متوسط شار تابشی،  $q_{\text{Max}}$  بیشینه متوسط شار تابشی،  $T$  دمای سوخت،  $T_0$  دمای اولیه سوخت و  $T_{\text{fire}}$  دمای هوای مجاور شعله است. با توجه به نتایج تجربی [۲۵]، میزان بیشینه متوسط شار تابشی ۱۶ کیلووات بر مترمربع است. با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه [۳۰، ۱۲]، مدت‌زمان لازم برای پایدار شدن شار تابشی و دمای هوای مجاور شعله، تقریباً ۱۰۰ ثانیه است. در نتیجه، مقدار  $q_{\text{Max}}$ ، ۱۶ کیلووات بر مترمربع و مقدار  $t_{\text{transient}}$ ، ۱۰۰ ثانیه است. همچنین، دمای اولیه سوخت و هوای محیط ۲۹۸ کلوین است و مدت‌زمان کل شبیه‌سازی ۱۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد. از آنجایی که اطلاعات مشخصی در مورد میزان دمای هوا در نزدیکی سطح آزاد در شرایط آتش موجود نیست، میزان بیشینه دمای محیط اطراف از ۲۹۸ کلوین تا ۱۲۹۸ کلوین (دمای نزدیک به شعله آتش متانول) در نظر گرفته شد و با بررسی نتایج بدست آمده مشخص شد که بیشینه دما تاثیری در نتایج ندارند. در نتیجه میزان بیشینه دما ۱۲۹۸ کلوین در نظر گرفته شد. در جدول (۲) شرایط اولیه هریک از شبیه‌سازی‌های ذکر شده بیان شده است.

جدول ۲ - شرایط اولیه شبیه‌سازی

Table 2 – Initial Conditions of Simulations

Simulation Name	Simulation Information	Initial Fuel Temperature (K)	Initial Ambient Air Temperature (K)	Maximum Ambient Temperature (K)	Initial Heat Flux (kW/m <sup>2</sup> )	Maximum Heat Flux (kW/m <sup>2</sup> )	Fuel Depth (m)
A	Constant Ambient Temperature – Constant Radiative Heat Flux	298	1298	1298	16	16	0.1
B	Transient Ambient Temperature – Constant Radiative Heat Flux	298	298	1298	16	16	0.1
C	Constant Ambient Temperature – Transient Radiative Heat Flux	298	1298	1298	0	16	0.1
D	Transient Ambient Temperature – Transient Radiative Heat Flux	298	298	1298	0	16	0.1

## نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌ها در چهار حالت شار تابشی پایا-دمای محیط پایا (حالت A)، شار تابشی پایا-دمای محیط گذرا (حالت B)، شار تابشی گذرا-دمای محیط پایا (حالت C) و شار تابشی گذرا-دمای محیط گذرا (حالت D) انجام شد. در این بخش نتایج دمای سطح آزاد، نرخ تبخیر، عدد ناسلت و عدد گراشوف به ترتیب ارائه می‌شود.

### دمای سطح آزاد

شکل (۸) تغییرات دمای سطح آزاد استخر برحسب زمان در چهار حالت یادشده را نشان می‌دهد. از آنجایی که به واسطه کم‌عمق بودن استخر سوخت از تغییرات دمای استخر صرف‌نظر شده و دمای استخر در سرتاسر آن به صورت یکنواخت فرض شده، نتایج این بخش برای کل استخر برقرار است. در حالات A و B - که شار تابشی ثابت است - دمای سطح آزاد سیال به صورت خطی تا دمای تبخیر تغییر می‌کند؛ اما در حالات C و D - که شار تابشی در ۱۰۰ ثانیه اول گذرا است - تغییرات دما در همین بازه‌ی زمانی غیرخطی است و پس از گذشت ۱۰۰ ثانیه، تغییرات دما برحسب زمان رفتاری خطی دارد.

طبق شکل (۸) در هر چهار حالت، دمای پایای سطح آزاد به دمای تبخیر سیال می‌رسد و مقدار آن ۳۳۷ کلوین است. همچنین، شروع تغییرات دمای سطح آزاد در هر دو حالت A و B به نسبت دو حالت C و D حدود ۵۰ ثانیه سریع‌تر است. با بررسی نتایج می‌توان گفت که تأثیر تغییرات دمای هوای اطراف بر تغییرات دمای سطح آزاد در مقایسه با اثر شار تابشی ناچیز است. همچنین، با بررسی نتایج حالات A و B مشخص می‌شود گذرا یا پایا بودن دمای محیط بر تغییر دمای سطح آزاد تأثیری ندارد. این موضوع با بررسی نتایج حالات C و D نیز مشخص است. علت این موضوع را می‌توان به پایین بودن نقطه‌جوش سوخت متانول مرتبط دانست.

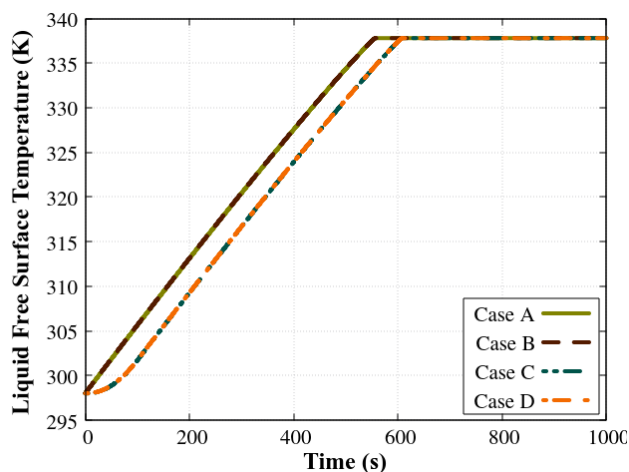


Figure 8- Free surface temperature with respect to time

شکل ۸ - دمای سطح آزاد به نسبت زمان

### نرخ تبخیر

شکل (۹) نرخ تبخیر محاسبه شده برحسب زمان را نشان می‌دهد. هر دو حالت A و B، به نسبت حالات C و D زودتر پایا شده و در حالت پایا، مقدار نرخ تبخیر ۰/۰۱۴۳ کیلوگرم بر مترمربع ثانیه است. با بررسی نتایج حالات A و C با B و D می‌توان گفت، توزیع گذرا یا پایای شار تابشی اثر چندانی بر رفتار نموداری نرخ تبخیر ندارد و همانند نتایج دمای سطح آزاد، صرفاً باعث تأخیر زمانی ۵۰ ثانیه‌ای می‌شود. همچنین همانند نتایج دما، توزیع گذرا یا پایای دمای محیط بر نرخ تبخیر بی‌تأثیر است.

رفتار نرخ تبخیر بر حسب زمان را می‌توان به سه بخش تقسیم نمود. در قسمت اول نرخ تبخیر به نسبت مقدار پایای خود بسیار کم است و در این بازه، دمای سطح آزاد در بازه ۲۹۸ تا ۳۳۰ کلوین است. با توجه به میزان دما در این بازه‌ی زمانی، نرخ تبخیر تحت کنترل پدیده انتقال جرم است. از دمای ۳۳۰ کلوین تا زمانی که دمای سطح آزاد به نقطه جوش برسد (۳۳۷ کلوین) که قسمت دوم را تشکیل می‌دهد، فیزیک تبخیر همچنان در اختیار پدیده انتقال جرم است؛ اما نرخ تبخیر با شدت بالایی افزایش می‌یابد و به مقدار پایا نزدیک می‌شود. در قسمت سوم، هنگامی که دمای سطح آزاد به دمای تبخیر برسد، نرخ تبخیر در کنترل پدیده انتقال حرارت قرار می‌گیرد و تا زمانی که همه سوخت مصرف شود، دمای سطح در نقطه جوش مایع باقی خواهد ماند. از آنجایی که تغییرات دمای استخر سوخت به صورت یکسان فرض شده، انتقال حرارت بین سطح آزاد و لایه‌های زیرین لحاظ نمی‌شود و همین موضوع باعث می‌شود که تغییرات نرخ تبخیر با نزدیک شدن دمای سطح آزاد به نقطه جوش ناگهانی باشد. این موضوع باعث می‌شود تا در زمانی کوتاه، نرخ تبخیر پایا شود.

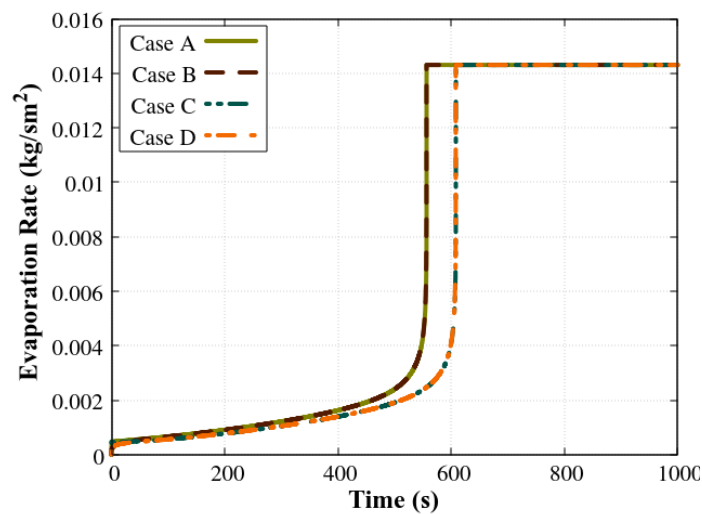


Figure 9- Evaporation rate with respect to time

شکل ۹- نرخ تبخیر بر حسب زمان

### عدد ناسلت و گراشوف

شکل (۱۰) تغییرات عدد ناسلت بر حسب زمان را نشان می‌دهد. میزان پایای عدد ناسلت در هر چهار حالت ۱۷/۹ است. با توجه به رابطه (۸) الی (۱۳) می‌توان گفت خواص ترموفیزیکی هوای اطراف و لایه‌ی فیلم به دمای هوا وابسته است و در نتیجه، می‌توان انتظار داشت که عدد ناسلت به دمای محیط وابسته باشد و مستقل از شار تابشی عمل کند. با بررسی نتایج به دست آمده از حالات B و D و مقایسه آن با حالات A و C مشخص است که طبق انتظار، عدد ناسلت تابعی از دمای محیط و مستقل از شار تابشی عمل می‌کند. همچنین، بازه‌ی زمانی رفتار گذرای عدد ناسلت همانند بازه‌ی گذرای تغییرات دمای هوا است که بعد از ۱۰۰ ثانیه، ثابت می‌شود. در حالات B و D، کمینه عدد ناسلت ۱۳/۸ و بیشینه آن ۲۵ است.

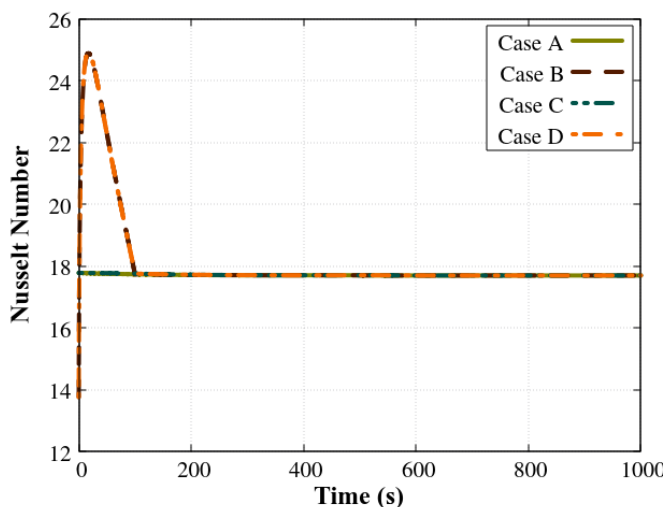


Figure 10- Nusselt number with respect to time

شکل ۱۰- عدد ناسلت به نسبت زمان

شکل (۱۱) تغییرات عدد گراشوف بر حسب زمان را نشان می‌دهد. با توجه به وابستگی خواص ترموفیزیکی هوا و لایه فیلم به دمای هوا، همانند عدد ناسلت، می‌توان انتظار داشت عدد گراشوف به دما وابسته است و با تغییر دما، عدد گراشوف نیز تغییر می‌کند. همچنین، با مقایسه نتایج حالات B و D با نتایج حالات A و C، می‌توان دریافت که شار تابشی اثری بر عدد گراشوف ندارد و این موضوع مطابق انتظار بود. میزان کمینه عدد گراشوف در حالات B و D،  $1 \times 10^7$  و میزان بیشینه آن  $1/0.5 \times 10^8$  است. همچنین میزان پایای این عدد،  $2/5 \times 10^7$  بود.

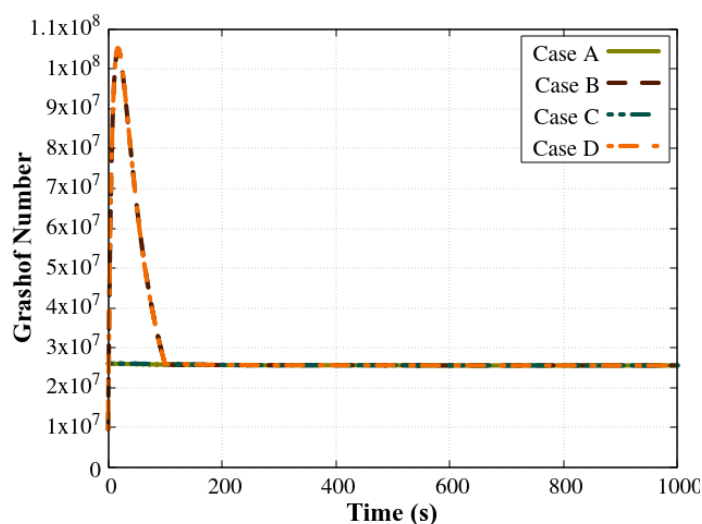


Figure 11- Grashof number with respect to time

شکل ۱۱- عدد گراشوف به نسبت زمان

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش نرخ تبخیر، دمای سطح آزاد، عدد ناسلت و عدد گراشوف طی فرآیند تبخیر سطحی استخر متانول تحت اثر شار تابشی و دمای محیط گذرا با استفاده از الگوریتم متشکل از روابط تحلیلی و تجربی شبیه‌سازی شد و نرخ تبخیر به‌دست آمده

با نتایج تجربی مقایسه شد. با مقایسه نرخ تبخیر به دست آمده (۰/۱۴۳ کیلوگرم بر ثانیه مترمربع) در حالت پایا با میزان اندازه‌گیری شده از مطالعه‌ی تجربی (۰/۱۴۴ کیلوگرم بر ثانیه مترمربع)، میزان خطای شبیه‌سازی کمتر از ۱ درصد است. همچنین نتایج شبیه‌سازی حاضر با مطالعات عددی دیگران نیز مقایسه شد که در این مورد نیز خطای نسبی کلی کمتر از ۳ درصد بود. به جهت بررسی اثر تغییرات زمان‌مند شار تابشی و دمای محیط بر نرخ تبخیر، شبیه‌سازی‌ها در چهار حالت شار تابشی پایا-دمای محیط پایا، شار تابشی پایا-دمای محیط گذرا، شار تابشی گذرا-دمای محیط پایا و شار تابشی گذرا-دمای محیط گذرا انجام شد که بازه زمانی رفتار گذرای شار تابشی و دمای هوا ۱۰۰ ثانیه بود. نتایج نشان می‌دهد که در این شبیه‌سازی، نرخ تبخیر و دمای سطح آزاد استخر مستقل از دمای محیط و وابسته به شار تابشی است و عدد ناسلت و عدد گراشوف وابسته به دمای محیط و مستقل از شار تابشی می‌باشند. البته لازم به ذکر است که در این شبیه‌سازی، فرض شده که کل استخر سوخت به صورت یکسان تغییر دما می‌دهد (این موضوع باعث می‌شود از انتقال حرارت سطح آزاد سیال با لایه‌های زیرین صرف‌نظر شود). همچنین 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 و سوخت تماماً شفاف فرض شده است. در نتیجه شار تابشی ورودی به کل سوخت نفوذ می‌کند و میزان بازتاب شار تابشی ورودی صفر است. این فرض باعث انباشت انرژی در استخر سوخت شده و دمای استخر با نرخ شدیدتری بالا می‌رود. به جهت بهبود میزان عملکرد الگوریتم استفاده شده، می‌توان آثار تابشی لایه‌های زیرین سطح آزاد را لحاظ نمود و همچنین با در نظر گرفتن انتقال حرارت جابجایی و رسانش استخر سوخت با محیط اطراف، دقت شبیه‌سازی را ارتقاء داد.

## منابع

1. R. A. Demarco Bull, *Modelling thermal radiation and soot formation in buoyant diffusion flames*, PhD Thesis, Marseille University, Marseille, 2012.
2. C. Sedano, O. López, A. Ladino, and F. Muñoz, "Prediction of a methane circular pool fire with fireFoam," *MATEC Web of Conferences*, vol. 240, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201824005026.
3. W. Yao, J. Yin, X. Hu, J. Wang, and H. Zhang, "Numerical modeling of liquid n-heptane pool fires based on heat feedback equilibrium," *Procedia Eng*, vol. 62, pp. 377–388, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.08.079.
4. W. C. Ikealumba and H. Wu, "Modeling of Liquefied Natural Gas Release and Dispersion: Incorporating a Direct Computational Fluid Dynamics Simulation Method for LNG Spill and Pool Formation," *Ind Eng Chem Res*, vol. 55, no. 6, pp. 1778–1787, 2016, doi: 10.1021/acs.iecr.5b04490.
5. B. Sun, K. Guo, and V. K. Pareek, "Dynamic simulation of hazard analysis of radiations from LNG pool fire," *J Loss Prev Process Ind*, vol. 35, pp. 200–210, 2015, doi: 10.1016/j.jlp.2015.04.010.
6. A. C. Y. Yuen *et al.*, "Numerical study of the development and angular speed of a small-scale fire whirl," *J Comput Sci*, vol. 27, pp. 21–34, 2018, doi: 10.1016/j.jocs.2018.04.021.
7. G. Maragkos, T. Beji, and B. Merci, "Advances in modelling in CFD simulations of turbulent gaseous pool fires," *Combust Flame*, vol. 181, pp. 22–38, 2017, doi: 10.1016/j.combustflame.2017.03.012.
8. M. Safarzadeh, G. Heidarnejad, and H. Pasharshahri, "Accuracy of Sub-grid Models in Internal Fire Whirl Modeling by Large Eddy Simulation," *Fuel and Combustion*, vol. 13, no. 2, pp. 41–56, 2020. (in Persian)
9. F. Jems, M. Safarzadeh, and G. Heidarnejad, "Numerical simulation of liquid fuel evaporation rate under uniform radiative heat flux in thin pool," in *19th Fluid Dynamics Conference*, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, November 2021, pp. 1-8. Online. Available: <https://civilica.com/doc/1328644> (in Persian)
10. F. Jems, M. Safarzadeh, and G. Heidarnejad, "Numerical Simulations of Fuel Temperature and Evaporation Rate Under the Transient Radiative Heat Flux in Thin Pool Fire," in *9th Fuel and Combustion Conference*, Shiraz University, Shiraz, Iran, February 2022. Online. Available: <https://civilica.com/doc/1452525> (in Persian)
11. T. Beji and B. Merci, "Development of a numerical model for liquid pool evaporation," *Fire Saf J*, vol. 102, no. July, pp. 48–58, 2018, doi: 10.1016/j.firesaf.2018.11.002.
12. T. Sikanen and S. Hostikka, "Modeling and simulation of liquid pool fires with in-depth radiation absorption and heat transfer," *Fire Saf J*, vol. 80, pp. 95–109, 2016, doi: 10.1016/j.firesaf.2016.01.002.
13. T. Beji, "Theoretical analysis of the liquid thermal structure in a pool fire," *J Fire Sci*, vol. 39, no. 1, pp. 36–52, 2021, doi: 10.1177/0734904120962376.
14. J. F. Perez Segovia, T. Beji, and B. Merci, "Assessment of an Evaporation Model in CFD Simulations of a Free Liquid Pool Fire Using the Mass Transfer Number Approach," *Flow Turbul Combust*, vol. 101, no. 4, pp. 1059–1072, 2018, doi: 10.1007/s10494-018-9943-1.



15. W. Huang, F. Huang, J. Fang, and L. Fu, "A calculation method for the numerical simulation of oil products evaporation and vapor diffusion in an internal floating-roof tank under the unsteady operating state," *J Pet Sci Eng*, vol. 188, no. January, pp. 1-12, 2020, doi: 10.1016/j.petrol.2019.106867.
16. A. Galeev, Y. Chistov, and S. Ponikarov, "Numerical analysis of flammable vapour cloud formation from gasoline pool," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 137, pp. 211–222, 2020, doi: 10.1016/j.psep.2020.02.031.
17. J. R. Stewart, H. N. Phylaktou, G. E. Andrews, and A. D. Burns, "Evaluation of CFD simulations of transient pool fire burning rates," *J Loss Prev Process Ind*, vol. 71, no. March, pp. 1-14, 2021, doi: 10.1016/j.jlp.2021.104495.
18. B. D. Ditch, J. L. de Ris, T. K. Blanchat, M. Chaos, R. G. Bill, and S. B. Dorofeev, "Pool fires - An empirical correlation," *Combust Flame*, vol. 160, no. 12, pp. 2964–2974, 2013, doi: 10.1016/j.combustflame.2013.06.020.
19. V. Babrauskas, "Estimating large pool fire burning rates," *Fire Technol*, vol. 19, no. 4, pp. 251–261, Nov. 1983, doi: 10.1007/BF02380810.
20. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, and K. Overhold, *Fire Dynamics Simulator User's Guide (FDS)*, Sixth Edition, NIST Special Publication 1019, 2020.
21. H. Pretrel, P. Querre, and M. Forestier, "Experimental study of burning rate behaviour in confined and ventilated fire compartments," *Fire Safety Science*, vol. i, no. January, pp. 1217–1228, 2005, doi: 10.3801/IAFSS.FSS.8-1217.
22. J. M. Chatris, E. Planas, J. Arnaldos, and J. Casal, "Effects of thin-layer boilover on hydrocarbon pool fires," *Combustion Science and Technology*, vol. 171, no. 1, pp. 141–161, 2001, doi: 10.1080/00102200108907862.
23. J. M. Chatris, J. Quintela, J. Folch, E. Planas, J. Arnaldos, and J. Casal, "Experimental study of burning rate in jet-fuel pool fires," *Combust Flame*, vol. 126, no. 01, pp. 1373–1383, 2001.
24. M. Muñoz, J. Arnaldos, J. Casal, and E. Planas, "Analysis of the geometric and radiative characteristics of hydrocarbon pool fires," *Combust Flame*, vol. 139, no. 3, pp. 263–277, 2004, doi: 10.1016/j.combustflame.2004.09.001.
25. M. Klassen and J. P. Gore, *Structure and radiation properties of pool fires*. NIST, 1994.
26. J. Floyd and R. McDermott, "Development and evaluation of two new droplet evaporation schemes for fire dynamics simulations," *Fire Saf J*, vol. 91, no. 1, pp. 643–652, 2017, doi: 10.1016/j.firesaf.2017.04.036.
27. D. Drysdale, *An introduction to fire dynamics*, Third Edition, John Wiley & Sons, 2011.
28. Thermal-FluidsPedia | Thermophysical properties | Thermal-Fluids Central. [www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/Thermophysical\\_Properties](http://www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/Thermophysical_Properties) (accessed Dec. 04, 2021).
29. M. J. Hurley et al., *SFPE handbook of fire protection engineering*, fifth edition, Springer, 2016. doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0.
30. B. Sun, K. Guo, and V. K. Pareek, "Computational fluid dynamics simulation of LNG pool fire radiation for hazard analysis," *J Loss Prev Process Ind*, vol. 29, no. 1, pp. 92–102, 2014, doi: 10.1016/j.jlp.2014.02.003.

## English Abstract

# Numerical simulations of evaporation rate and fuel temperature under the transient radiative heat flux in the case of pool fire

Ghassem heidarinejad<sup>1\*</sup>, Farhad Jems<sup>2</sup>, Mohammad Safarzadeh

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, gheidari@modares.ac.ir

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, farhadjems@modares.ac.ir

3- Department of Mechanical Engineering, taribat Modares University, Tehran, Iran, m.safarzadeh@modares.ac.ir

\*Corresponding author

(Received: 2022/06/25, Received in revised form: 2022/09/10, Accepted: 2022/09/27)

Computing the evaporation rate of fuel is one of the challenges and complexities of pool fire simulations. In this study, the evaporation rate of methanol in a shallow pool fire problem is computed using an algorithm that includes analytical and empirical relations. Modeled radiative heat flux and surrounding air temperature are considered transient. Heat and mass transfer phenomena are included in this algorithm, and their effects are discussed. The relative error of results to other numerical studies was below 3 percent. Also, by comparing steady results to experimental results, the relative error was 1 percent. Results show that the evaporation rate in transient radiative heat flux case is delayed 50 seconds to constant radiative flux. In addition, Nusselt number and Grashof number are independent of radiative flux, and depend on surrounding air temperature.

**Keywords:** Evaporation rate, Thin pool fire, Mass transfer, Numerical simulation