

مطالعه‌ی عددی مخاطرات تشعشع آتش استخری در مخازن بزرگ مقیاس ذخیره مشتقات نفتی در حالت بدون باد

قاسم حیدری نژاد^{۱*}، محمدرضا افتخاری^۲، محمد صفرزاده^۳، محمد ضابطیان طرقي^۴

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

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، eftekhari.m@modares.ac.ir

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

۴- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، zabetian@modares.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۴، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۲/۱۰/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۳)

چکیده: مطالعه اثر تشعشع در پدیده آتش استخری مخازن سوخت، با توجه به خسارت جانی و مالی وارده به نفرات و تأسیسات یک مجتمع پالایشگاهی، بسیار حائز اهمیت است. از این رو در مطالعه حاضر، میزان تشعشع حاصل از آتش استخری سه سوخت متداول بنزین، کروزن و نفت خام در سه مخزن بزرگ ذخیره‌سازی سوخت در قطرهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ متر و ارتفاع ثابت ۱۵ متر به صورت عددی مطالعه شد. در این مطالعه از نرم‌افزار FDS استفاده شد که بر پایه رویکرد تفاضل محدود بوده که به روش صریح حل می‌شود. همچنین به‌عنوان نوآوری میزان تشعشع در ارتفاع ۱/۵، ۳ و ۵ متر جهت بررسی میزان خطرات وارده بر انسان و آتش‌نشانان حاضر در ماشین آلات اطفای حریق و در ارتفاع ۱۰ متر جهت بررسی اثر تشعشع بر سایر مخازن مجاور، در فواصل افقی گوناگون مطالعه شد. نتایج اخذشده نشان می‌دهد زمانی که سوخت بنزین باشد، بیشترین خطر تشعشع در فاصله مابین جداره مخزن تا ۱/۷ قطر مخزن بوده و همچنین حداقل فاصله مجاز جهت قرارگیری در محدوده ایمن در فاصله ۲/۶ قطر مخزن است که با افزایش ارتفاع از سطح زمین میزان تشعشع نیز افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که تشعشع دریافتی در فاصله یکسان از مخازن با قطر مشابه، با توجه به نوع سوخت متفاوت بوده که با نرخ آزدسازی حرارت ارتباط مستقیم دارد.

کلیدواژگان: مخاطرات تشعشع، آتش استخری، دینامیک سیالات محاسباتی، مخازن ذخیره سوخت، نرم‌افزار FDS

مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل در صنایع استخراج و پالایش نفت و مشتقات آن، ذخیره‌سازی این مواد پس از خالص‌سازی و آماده نگه‌داشتن آن برای زمان مصرف است. مشتقات استحصال‌شده، خوراک بسیاری از پالایشگاه‌ها و پتروشیمی‌ها بوده که پس از تولید بلافاصله مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. به دلیل آتش‌زا بودن و حجم بالای انباشت محصولات در این مخازن، حفظ و نگهداری آن از خطر حریق و همچنین اثرات زیان‌بخش آن بر روی انسان و محیط اطراف در صورت وقوع آتش، به یکی از مسائل اصلی صنعت در این زمینه تبدیل شده است [۱].

آتش استخری یکی از شایع‌ترین حوادث آتش‌سوزی در مخازن ذخیره سوخت است که عمدتاً به دلیل نشت سوخت، پاشش و یا سرریز مخزن و در مواجهه با عوامل ایجاد جرقه تشکیل شده و در یک سطح وسیع گسترش می‌یابد. این نوع حریق در مقیاس بزرگ به‌سختی اطفاء شده و در صورتی که کنترل نشود به دلیل تشعشع بالا سبب انتقال آتش به سایر مخازن در یک مزرعه مخزن و تحمیل هزینه‌های بسیار هنگفت جانی، مالی و زیست‌محیطی می‌شود [۲]. ابعاد مخازن بزرگ صنعتی جهت ذخیره سوخت‌های مایع همانند نفت سفید، بنزین و سایر مشتقات نفتی در پالایشگاه‌ها به قطر تقریبی ۷۰ متر به ارتفاع ۱۷ متر و با ظرفیت ذخیره‌سازی ۴۰ الی ۶۰ هزار مترمکعب طراحی و ساخته شده است [۳]. اگرچه این قطر با توجه به نوع کاربری به کمتر از این مقدار نیز می‌رسد [۴]. لذا لازم است در خصوص پیش‌بینی خطراتی که پس از وقوع حادثه متحمل می‌شویم مورد بحث و مطالعه قرار گیرد. سه مخاطره رایج در این زمینه پلوم آتش با تشعشع بالا، نشر گازهای سمی [۵] و زبانه کشیدن گازهای داغ به محیط مجاور است [۶،۷].

در خصوص پلوم آتش با تشعشع بالا احمدی و همکاران [۸] با مطالعه عددی و استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز دینامیک آتش^۱، سناریوهای مختلف شبیه‌سازی آتش در یک مزرعه مخزن و به‌منظور ارزیابی میزان شار حرارتی تشعشعی مورد مطالعه قرار گرفت. سناریو آتش در این مطالعه به دو صورت مورد بررسی قرار گرفت، در حالت اول هنگامی که آتش استخری در محدوده پیرامون مخازن در یک مزرعه تانک رخ دهد و در حالت دوم هنگامی که یکی از مخازن مورد حریق قرار می‌گیرد. همچنین اثر دومینویی در مزرعه تانک با سرعت بادهای ۰ و ۶ متر بر ثانیه مورد مطالعه قرار گرفت و مشخص شد زمانی که فاصله بین تانک‌ها بین ۷۰-۸۰ متر و آتش بر روی مخزن باشد، امکان ایجاد دومینو وجود ندارد؛ ولی هنگامی که آتش در محدوده پیرامون اتفاق می‌افتد به دلیل نزدیکی آن به مخازن، وجود باد اثرات دومینو را بر روی مخازن نزدیک به خود می‌گذارد.

در مطالعه دیگر از احمدی و همکاران [۹] پدیده جوشش^۲ و پیامدهای آن را که بر اثر شار حرارتی تابشی در یک مخزن نفت خام به وجود می‌آید را توسط دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی کردند. در این پژوهش یک حادثه جوشش با مدت زمان مختلف، مربوط به یک مخزن نفت خام با قطر ۷۸ متر مربوط به شهر میل‌فورد^۳ آمریکا انجام شد و مشاهده شد به علت افزایش ناگهانی شار تابشی به نسبت حالت بدون جوشش، برخی از افراد حاضر در مخزن نفت دچار سوختگی درجه ۱ شدند.

مالیک و همکاران [۱۰] به بررسی مدل پیش‌بینی کننده احتمال آتش‌سوزی در یک مزرعه تانک و اثر دومینویی آن با استفاده از شبیه‌سازی عددی با شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. این پژوهش به تجزیه و تحلیل انتشار آتش در یک مجموعه مزرعه مخزن در سرعت‌های متغیر باد و مکان‌های گوناگون آتش استخری اولیه پرداخته شد. مشخص شد سرعت باد بالای ۱ m/s نقش مهمی در تشدید دینامیکی آتش‌سوزی مخازنی که در راستای جهت باد و حریق اولیه قرار دارند ایفا می‌کند و آسیب‌پذیری بیشتری دارند. محل آتش‌سوزی اولیه نقش مهمی را در زمان گسترش آتش داشته به‌گونه‌ای که گسترش آتش هنگامی که آتش‌سوزی در وسط مزرعه مخزن اتفاق افتد، ۲۰٪ سریع‌تر از زمانی است که آتش اولیه در یک گوشه از مزرعه تانک اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده شد که محاسبات مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی و استفاده از مدل شبکه مصنوعی، خطر گسترش آتش را به‌طور دقیق‌تر با توجه به شرایط گوناگون پیش‌بینی می‌کند.

سان و همکاران [۱۱] با استفاده از مدل سیالات محاسباتی مخاطرات اطراف یک ایستگاه گاز طبیعی مایع^۴ در صورت وقوع آتش‌سوزی را بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد فواصل مخازنی که در یک مزرعه تانک‌ها در نظر گرفته شدند به‌اندازه

¹ Fire dynamic simulation (FDS)

² Boil Over

³ Milford

⁴ Liquefied natural gas

کافی بزرگ بوده و مناطقی که درگیر فعالیت‌های انسانی هستند، شرایط دمایی قابل تحملی جهت خروج از ناحیه را دارا می‌باشند. همچنین اثر و کارایی افشانه‌ها و پرده‌های آبی برحسب فاصله آن‌ها از محل آتش‌سوزی را جهت کاهش خطرات تشعشع موردبررسی قرار گرفت که نشان داد می‌تواند ابزار مؤثری جهت کاهش خطرات تشعشع باشد.

واسانس و همکاران [۱۲] تأثیرات آتش استخری چندگانه^۱ با دو سوخت گوناگون که هم‌زمان دچار حریق شده‌اند موردبررسی و تأثیر برهمکنش‌های تشعشعی و دمایی را به‌صورت پروفیل‌های مختلف به نمایش گذاشت. همان‌طور که انتظار می‌رود در این شبیه‌سازی نشان داده شد که رفتار آتش استخری چندگانه با نوع سوخت ارتباط مستقیم دارد. همچنین شرح داده شد که فاصله مابین مخازن سوخت‌های سبک‌تر باید بیشتر از فاصله مابین سوخت‌های سنگین‌تر باشد به این دلیل که سوخت‌های سبک‌تر نرخ تبخیر بالاتری داشته که منجر به فعل‌وانفعال شدیدتر در هنگام آتش‌سوزی می‌شود.

ژانگ و همکاران [۱۳] نیز در خصوص مدل‌سازی و شبیه‌سازی CFD^۲، پیامدهای حادثه آتش‌سوزی استخری در محیط پیرامون یک تانک ذخیره بوتیل آکریلات^۳ را به قطر ۱۲/۵ متر و ارتفاع ۱۴ متر در یک مجموعه مزرعه تانک با تعداد ۳۸ تانک به ظرفیت‌های ۱۵۰۰ تا ۶۰۰۰ مترمکعب جهت بررسی خطرات جانی، مالی مورد مطالعه قرار داد. بدین‌صورت که مخزن بوتیل آکریلات دچار نشتی شده و شروع به آتش‌سوزی در محدوده پیرامون مخزن می‌شود. نتایج نشان داد که تشعشعات شدید آتش استخری تا محدوده ۲۸ متر موجب تلفات جدی می‌شود که می‌تواند به سایر مخازن آسیب جدی وارد نماید. همچنین اگر فاصله مرکز آتش از سایر مخازن و تأسیسات بیش از ۶۹ متر باشد، تجهیزات و کارکنان آسیب نمی‌بینند.

سو و همکاران [۱۴]، به مطالعه عددی چهار تانک سوخت ذخیره بنزین مشابه به قطر تقریبی ۴۶ متر و ارتفاع ۱۹/۵ متر پرداخته است. سناریو در نظر گرفته‌شده در مورد پیامدهای وارده به انسان بر اساس شارهای مختلف تابشی صادره از آتش‌سوزی مخازن را به سه درجه سوختگی درجه ۱ (آسیب جزئی)، سوختگی درجه ۲ (جدی) و سوختگی درجه ۳ (شعاع مرگ) بر اساس موقعیت فاصله افقی تا مرکز آتش بررسی و دسته‌بندی کرد و دریافت که شعاع ۱۰۳، ۱۲۲ و ۱۶۹ متر از مرکز آتش، به ترتیب برای درجه سوختگی ۱، ۲ و ۳ حداقل فاصله‌های مجاز است.

با توجه به‌مرور مطالعات پیشین، مخاطرات تشعشع در آتش استخری بزرگ مقیاس در مخازن ذخیره با سوخت‌های مختلف، برای افراد حاضر در مزرعه مخازن سوخت بررسی نشده است. اگرچه مخاطره تشعشع برای انتشار به مخازن مجاور به‌وفور در مطالعات پیشین مشاهده می‌شود. از این‌رو در این مطالعه بررسی هم‌زمان مخاطره تشعشع برای کارکنان و عوامل اجرایی حاضر در مزرعه و همچنین تانک‌های مجاور پیشنهاد شد. همچنین از جمله نوآوری‌های دیگر این مطالعه، بررسی عددی جامع مخازن با سه نوع سوخت متداول نفت خام، کروزن و بنزین با سه قطر مختلف توسط نرم‌افزار FDS^۴ است که این موضوع می‌تواند در طراحی نقشه جانمایی مخازن نسبت به یکدیگر و همچنین نحوه قرارگیری ایمن افراد به‌منظور اطفاء آتش بکار گرفته شود.

معادلات حاکم

طبیعت رفتاری آتش یک جریان با آشفستگی بالاست. به‌منظور مدل‌سازی این طبیعت آشفته نیاز به مدل‌های اغتشاشی همچون RANS^۵، LES^۱ و یا DNS^۲ است. با توجه به هزینه‌بر بودن مدل اغتشاشی DNS و همچنین پایین‌تر بودن دقت مدل اغتشاشی

¹ Multiple Pool Fires (MPFs)

² Computational fluid dynamics

³ Butyl acrylate

⁴ Fire dynamic simulation

⁵ Reynolds-averaged Navier-Stokes

RANS، مدل اغتشاشی LES در شبیه‌سازی جریان‌های احتراقی همچون آتش با استقبال روبرو شد [۱۵]. در این مدل اغتشاشی اولین قدم فیلترگیری از معادلات حاکم است. با توجه به ماهیت متغیر بودن چگالی در آتش روش فاوره به‌منظور فیلترگیری استفاده می‌شود. با این روش هر یک از معادلات حاکم به شرح ذیل است. اولین معادله انتقال معادله پیوستگی است که فرم معادله (۱) نوشته می‌شود [۱۶].

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{u}) = 0 \quad (1)$$

در معادله (۱)، $\bar{\rho}$ چگالی، t زمان و \tilde{u} سرعت است.

معادله (۲)، فرم فیلترگیری شده بقای مومنتوم است.

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{u}) = -\nabla \bar{P} + \nabla \cdot \left[\mu_{\text{eff}} \left(\nabla \tilde{u} + (\nabla \tilde{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \tilde{u}) I \right) \right] + \bar{\rho} g \quad (2)$$

در معادله (۲)، \bar{P} فشار، μ_{eff} ویسکوزیته دینامیکی است که شامل مجموع μ ویسکوزیته آرام و μ_{sgs} ویسکوزیته مقیاس زیر شبکه است. μ_{sgs} نیز برابر حاصل ضرب $\bar{\rho}$ در ν_{sgs} است که ν_{sgs} ویسکوزیته سینماتیکی زیر شبکه است که با استفاده از مدل اسمانگورینسکی محاسبه می‌شود.

معادله (۳)، مربوط به فرم فیلترگیری شده بقای انرژی است.

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{h}_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{h}_s) = \frac{D\bar{p}}{Dt} + \nabla \cdot \left[\bar{\rho} \left(D_{th} + \frac{\nu_{\text{sgs}}}{Pr_t} \right) \nabla \tilde{h}_s \right] - \nabla \cdot \bar{q}_r'' + \bar{q}_c''' \quad (3)$$

در معادله (۳)، \tilde{h}_s انرژی محسوس، D_{th} ضریب انتشار حرارتی، عدد پراتل جریان آشفته، \bar{q}_r'' شار حرارتی تابشی و \bar{q}_c''' نرخ آزاد شدن گرما در واحد حجم در اثر احتراق است. ΔH_c گرمای احتراق سوخت، $\bar{\omega}_F'''$ نرخ مصرف سوخت است.

معادله (۴)، مربوط به فرم فیلترگیری شده بقای گونه‌ها است.

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{Y}_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{Y}_k) = \nabla \cdot \left[\bar{\rho} \left(D_k + \frac{\nu_{\text{sgs}}}{Sc_t} \right) \nabla \tilde{Y}_k \right] + \bar{\omega}_k''', \quad (k = 1, \dots, N_s - 1) \quad (4)$$

در معادله (۴)، \tilde{Y}_k کسر جرمی گونه، D_k ضریب انتشار جرم گونه، Sc_t عدد اشمیت آشفته هستند و از تأثیر گرادیان فشار و دما بر ضریب نفوذ صرف‌نظر شد. $\bar{\omega}_k'''$ نرخ واکنش گونه است که با استفاده از مدل احتراقی EDM محاسبه می‌شود [۱۷]. در این مدل احتراقی با فرض سینتیک سریع، نرخ واکنش گونه محاسبه شده و با توجه به واکنش تک‌مرحله‌ای می‌توان نرخ تبدیل و یا از بین رفتن گونه‌های دیگر را نیز مدل کرد. لازم به ذکر است زمانی که نرخ تبدیل سوخت مشخص باشد، میزان آزادسازی حرارت با استفاده از رابطه‌ی $\Delta H_c \bar{\omega}_F'''$ به دست می‌آید. بنابراین در هر سلول محاسباتی که واکنش اتفاق افتد میزان آزادسازی حرارت نیز اعمال می‌شود. لازم به ذکر است که با آزادسازی حرارت دما افزایش پیدا کرده و با استفاده از مدل تشعشعی میزان نشر تشعشع به اطراف محاسبه می‌شود. از این‌رو ترم \bar{q}_r'' با مدل FVDOM مدل‌سازی می‌شود [۱۸]. همچنین از گونه‌هایی نظیر CO و NOX با توجه به سهم کم آن‌ها، صرف‌نظر شد. در این مدل ابتدا معادله انتقال تشعشعی به فرم معادله (۵) گسسته‌سازی شده و سپس با

¹ Large eddy simulation

² Direct numerical simulation

حل آن در جهت‌های مختلف، برآیند شار تشعشعی در هر سلول اعمال می‌شود. البته لازم به ذکر است که حل معادله انتقال تابش، پیچیده بوده، لذا لازم است فرضیات ساده کننده‌ای با توجه به فیزیک مسئله، از جمله فرض گاز خاکستری [۱۹]، عدم برهمکنش تشعشع و اغتشاش، عدم در نظر گرفتن پراکندگی تشعشع، اعمال شود.

$$S \cdot \nabla I_{\lambda}(x, s) = -[k(x, \lambda) + \sigma_s(x, \lambda)]I_{\lambda}(x, s) + B(x, \lambda) + \frac{\sigma_s(x, \lambda)}{4\pi} \int_0^{4\pi} \Phi(s', s) I_{\lambda}(x, s') I_{\lambda}(x, s') ds' \quad (5)$$

در معادله (۵)، $I_{\lambda}(x, s)$ شدت تابش در طول موج λ است. S بردار جهت شدت تابش، $k(x, \lambda)$ ضریب موضعی جذب و $\sigma_s(x, \lambda)$ ضریب موضعی انعکاس است. $B(x, \lambda)$ نیز چشمه نشر انرژی تشعشعی است که برابر با مقدار حرارتی است که توسط مخلوط محلی گاز، دوده و ذرات منتشر می‌شود. ترم انتگرالی سمت راست معادله، نماینده انرژی تشعشعی انعکاس یافته در جهت دیگر است. به منظور بسته شدن فرم معادلات نیاز به معادله حالت نیز است. علاوه بر معادلات انتقالی که بیان شد، با توجه به دمای بالای حریق می‌توان از معادله حالت به فرم معادله (۶) استفاده کرد.

$$\tilde{p} = \frac{\rho RT}{\bar{W}} \quad (6)$$

در معادله (۶)، R ثابت جهانی گازها، T مربوط به دمای گاز و \bar{W} جرم مولکولی مخلوط است.

روش عددی

در این مطالعه، مدل سازی توسط نرم افزار متن باز FDS در محیط گرافیکی PyroSim انجام شد. در این نرم افزار که بر مبنای تفاضل محدود است [۲۰]، معادلات به صورت صریح حل شده و هر یک از ترم‌های جابجایی و نفوذ با مرتبه دو گسسته سازی می‌شود [۲۱]. همچنین برای تولید شبکه از سلول‌های سازمان یافته به صورت مکعب مستطیل با رعایت مقدار بیشینه نسبت منظر^۱ استفاده شد. به منظور انتخاب گام زمانی نیز از شاخص عدد کورانت استفاده شد [۲۲] که در تمامی شبیه سازی‌ها و در تمامی گام زمانی‌ها کمتر از یک لحاظ شد. همچنین فضای سه بعدی در معادله تشعشع، به ۱۰۰ قسمت گسسته شد. جهت شبیه سازی این پژوهش، از یک دستگاه رایانه با پردازشگر AMD Ryzen 9 5900X با فرکانس ۳/۷ گیگاهرتز که ۱۲ هسته حقیقی و ۱۲ هسته مجازی و ۳۲ گیگابایت حافظه موقت دارد، استفاده شده است.

شرایط مرزی

شرایط مرزی مفروض در این مسئله بدین صورت است که هندسه شبیه سازی شده در دو جهت X (شرقی و غربی) و دو جهت Y (شمالی و جنوبی)، در یک فضای بسته قرار دارد و از سمت Z (بالا)، در معرض فضای آزاد است [۲۳]. علت انتخاب این حالت، به دلیل نیروی گرانش جهت خروج محصولات احتراق در راستای Z است. همچنین دیوار با شرط عدم لغزش برای سرعت و گرادیان صفر برای دما و گونه در نظر گرفته شده است [۱۶]. جهت شبیه سازی عددی لازم است ناحیه محاسباتی اضافی در نظر گرفته شود. بدین منظور در راستای X و Y ، ابعاد هندسه، ۱۲ برابر قطر اصلی مخزن لحاظ شد. جدول (۱)، مشخصات سوخت‌های بکار رفته در این مطالعه به همراه خواصی که در نرم افزار PyroSim درج شده، نشان داده شده است که اطلاعات مربوط به بخش صحت سنجی و سناریوهای بخش نتایج به صورت مجزا بیان شده است. لازم به ذکر است که در جدول (۱)، منظور از دمای سطح

¹ Aspect Ratio

سوخت، شرط مرزی دما ثابتی است که بر روی بستر سوخت لحاظ شد تا بدین ترتیب بتوان فیزیک تبخیر در نقطه جوش را در شبیه‌سازی وارد کرد. همچنین پارامتر نسبت دوده نیز، نسبت جرم تولیدی دوده به جرم مصرفی سوخت را مشخص می‌کند که با توجه به این پارامتر می‌توان میزان دوده تولیدی در هر یک از نقاط محاسباتی را مدل کرد.

جدول ۱- مشخصات انواع سوخت به کاررفته در مطالعه حاضر

Table 1- Fuel type properties used in the present study

Test type	Fuel type	Reference	Chemical formula	Heat of combustion (kJ/kg)	Soot yield	Mass loss rate (kg/m ² .s)	Fuel surface temperature (K)
Validation	Arabian light crude oil	[24]	C ₁₀ H ₂₂	4.32E4	0.08	0.0336	773
Present study test case	Iranian Crude oil	[25]	C ₁₀ H ₂₂	4.32E4	0.07	0.054	523
	Kerosene	[26]	C ₁₂ H ₂₆	4.32E4	0.042	0.063	523
	Gasoline	[27]	C ₈ H ₁₈	4.44E4	0.07	0.086	393

مطالعه شبکه

جهت تنظیم وضوح شبکه، از عبارت بدون بعد $D^*/\delta x$ استفاده شده است [۲۸] که در آن D^* مقیاس طول مشخصه متناسب با نرخ آزادسازی حرارتی سوخت و δx اندازه سلول شبکه است. در این عبارت بدون بعد هر چه اندازه مش کاهش پیدا کند، دقت افزایش یافته و زمان محاسباتی بیشتری نیاز دارد. برای محاسبه مقیاس طول مشخصه از رابطه (۷) استفاده می‌شود.

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}_f}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، \dot{Q}_f نرخ آزادسازی حرارت، ρ_{∞} چگالی هوای محیط، c_p حرارت ویژه سیال، T_{∞} دمای هوای محیط اطراف و g شتاب گرانش زمین است. نسبت توصیه شده مقیاس طول مشخصه ۴ الی ۱۶ است [۲۹] که بالاتر از آن نسبت می‌تواند کیفیت بهتری را به نمایش بگذارد به گونه‌ای که میزان تغییرات و گردابه های کوچک‌تری را مدل‌سازی نماید. اندازه سلول محاسبه‌شده در حالت‌های مختلف شبیه‌سازی شده در جدول (۲) محاسبه‌شده است.

جدول ۲- عدد وضوح مش در حالت‌های مختلف شبیه‌سازی مورد مطالعه

Table 2- Mesh resolution in different simulation models in this study

Test type	Fuel type	Fuel bed dimension	No. Of mesh	Meshes resolution ($D^*/\delta x$)
Validation	Arabian light crude oil	Diameter = 1 m	1201k	17
	Crude oil	Diameter = 25 m	1375k	19
	Crude oil	Diameter = 50 m	1375k	17
	Crude oil	Diameter = 75 m	1375k	15
	Kerosene	Diameter = 25 m	1375k	20
Present study test case	Kerosene	Diameter = 50 m	1375k	18
	Kerosene	Diameter = 75 m	1375k	16
	Gasoline	Diameter = 25 m	1375k	58
	Gasoline	Diameter = 50 m	1375k	51
	Gasoline	Diameter = 75 m	1375k	47

صحت‌سنجی تشعشع

با توجه به اینکه در این مطالعه هدف بررسی مخاطره تشعشع است، نیاز به صحت‌سنجی این پارامتر در گام اول وجود دارد. بنابراین ضروری است که این پارامتر در هندسه‌ای شبیه به مطالعه حاضر صحت‌سنجی شود.

در رابطه با صحت‌سنجی تشعشعی مخازن با آتش استخری، یک مطالعه تجربی در پژوهشگاه آتش‌نشانی توکیو ژاپن توسط کازکی و همکارانش [۳۰] در سال ۱۹۹۱ انجام شد. سوخت مورد آزمایش نفت خام سبک عربستان و ظرف مورداستفاده این آزمایش، در یک مخزن فولادی به قطر یک متر و به عمق ۲ سانتی‌متر انجام شد. گرمای تابشی در فواصل $L/D=3,5,7$ و در ارتفاع $1/2$ متری از سطح زمین اندازه‌گیری شد. (L فاصله افقی از مرکز مخزن و D قطر مخزن است)

مخزن سوخت به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده این آزمایش در شکل (۴) نمایش داده شده است. قطر و ارتفاع مخزن سوخت یک متر در نظر گرفته شده است. و ابعاد محیط در نظر گرفته شده جهت مطالعه تشعشع 16×16 متر و به ارتفاع ۲۰ متر شبیه‌سازی شد. علت این امر جهت مطالعه اثرات تشعشع آتش تا فاصله ۷ برابر قطر مخزن است. شبکه‌بندی نیز در نواحی اطراف مخزن که نیاز به محاسبه اعداد دقیق‌تری است ریزتر در نظر گرفته شده که همانند شکل (۱) در جهت X و Y ، ۱۵۵ سلول و در جهت Z ، ۵۰ سلول در نظر گرفته شد.

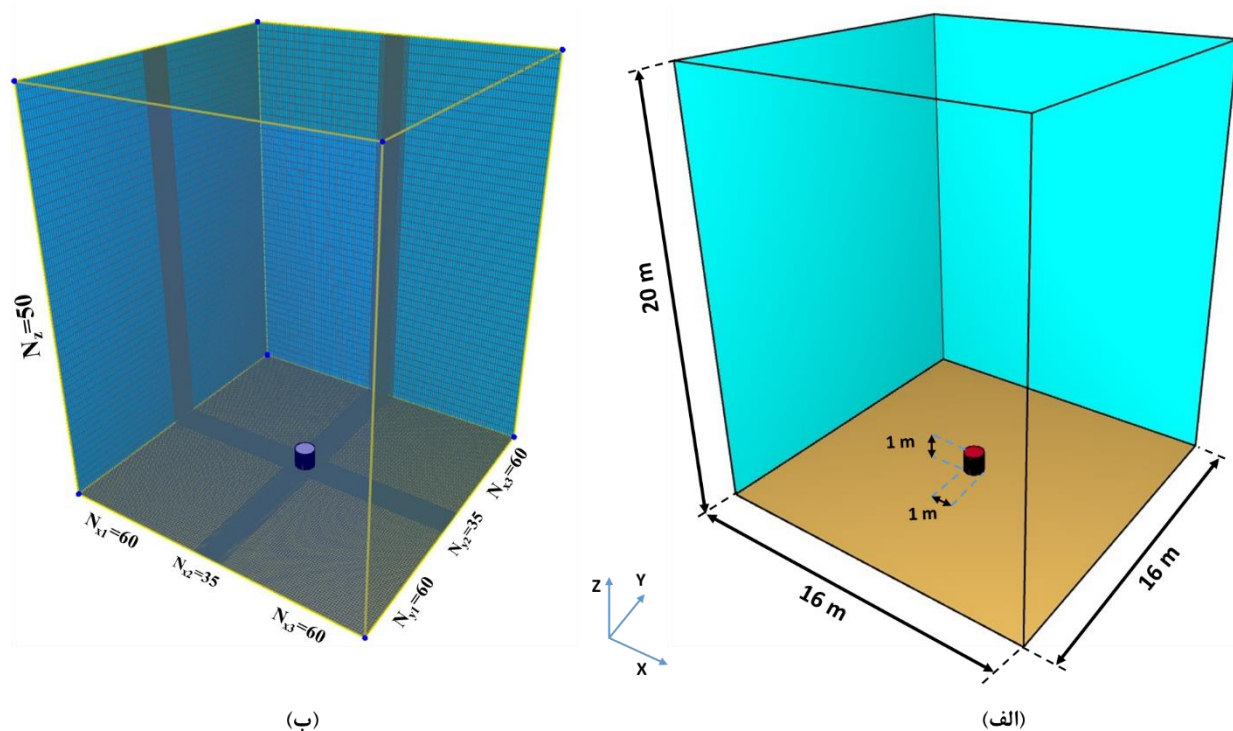


Figure 1- A) Grid dimensions of radiation verification geometry B) Number of considered meshes in the X, Y, Z direction
 شکل ۱- الف) ابعاد شبکه‌بندی هندسه صحت‌سنجی تشعشع ب) تعداد مش‌های در نظر گرفته شده در جهت X, Y, Z

نتایج تشعشعی که کازکی و همکاران [۳۰]، استخراج کردند به همراه نتایج عددی در نمودار شکل (۲) نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش فاصله از منبع سوخت میزان تشعشع کاهش می‌یابد تا حدی که در فاصله ۷ برابری قطر به تشعشع نزدیک به صفر تنزل می‌کند. این روند در نتایج تجربی و عددی مشاهده می‌شود. همچنین طبق شکل (۲) در دو فاصله L/D برابر ۳ و ۷ کمترین خطای نسبی و در L/D برابر با ۵ بیشترین خطای نسبی مشاهده می‌شود که در نهایت میزان متوسط خطای نسبی کمتر از ۲۰ درصد است که دقت قابل قبولی است.

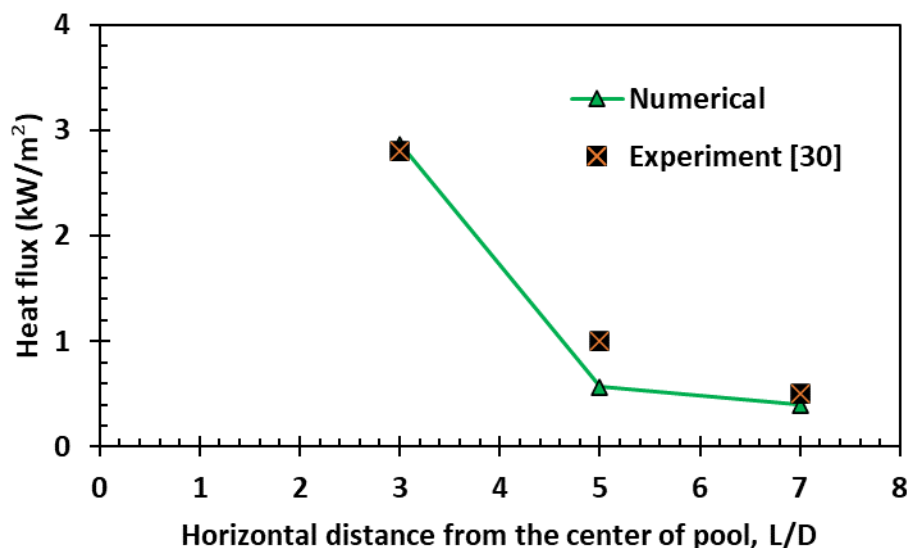


Figure 2- Validation of radiation results at $L/D=3, 5, 7$ and height of 1.2 m above ground
 شکل ۲- صحت سنجی نتایج تشعشع در سه فاصله $L/D=3, 5, 7$ و ارتفاع ۱/۲ متری از سطح زمین

نتایج

پس از صحت سنجی، نتایج اثر قطر بستر آتش در سه نوع سوخت کروزن، نفت خام و بنزین در این بخش آورده می‌شود. به منظور بررسی جامع از مخاطرات محتمل، میزان تشعشع در اطراف بستر سوخت مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور بستر سوخت در سه قطر ۲۵، ۵۰ و ۷۵ متر، با ارتفاع ثابت ۱۵ متر (در کلیه سناریوها)، در نظر گرفته شده و سنسور تشعشع در ۵ فاصله افقی L/D ، $2D$ ، $3D$ ، $4D$ و $5D$ (در هر سناریو قطر بستر سوخت است) و در سه ردیف با ارتفاع ۱/۵ متر از سطح زمین (متناسب با قد انسان)، ۳ متر و ۵ متر (متناسب با تجهیزات اطفای حریق نظیر ماشین آتش‌نشانی) قرار داده شد. توضیحات کاملی از این سناریوها در شکل (۳) آورده شده است. همچنین مشخصات سناریوهای مورد بررسی طبق جدول (۳) است.

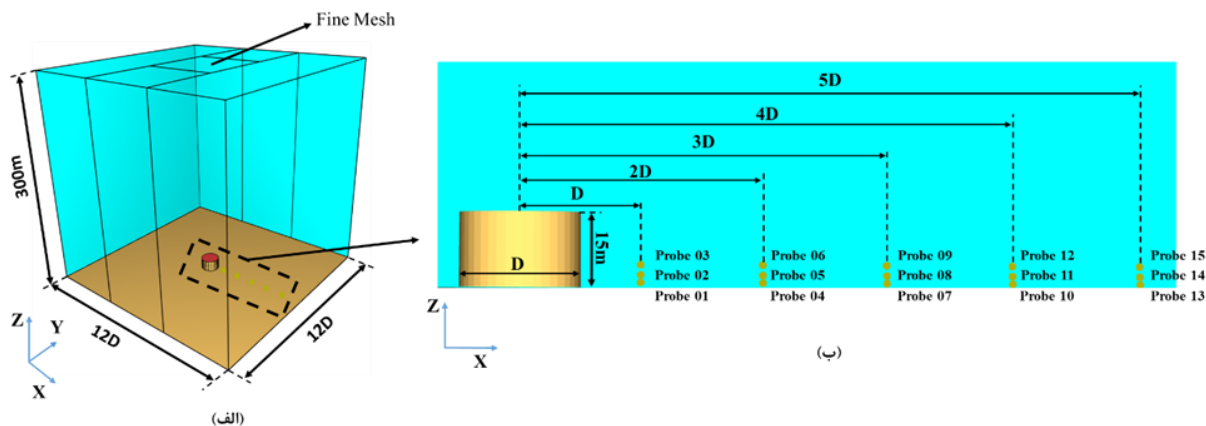


Figure 3- A) Geometry dimensions according to tank diameter B) Sensors location relative to fuel bed
 شکل ۳- الف) ابعاد هندسه مورد مطالعه بر اساس قطر مخزن ب) موقعیت قرارگیری سنسورها نسبت به بستر سوخت

جدول ۳- مشخصات سناریوهای مختلف مخازن

Table 3- Configuration of different tank scenarios

	Fuel Type	Tank Diameter (m)	Tank Height (m)
1	Gasoline	25	15
2	Gasoline	50	15
3	Gasoline	75	15
4	Kerosene	25	15
5	Kerosene	50	15
6	Kerosene	75	15
7	Crude Oil	25	15
8	Crude Oil	50	15
9	Crude Oil	75	15

بررسی تشعشع در مخازن

در این بخش با بررسی میدان تشعشع در اطراف مخازن با سوخت و قطرهای مختلف، مخاطراتی را که می‌تواند ایجاد کند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل (۴) کانتور تشعشع حاصل از حریق شبیه‌سازی شده مخزن با قطر ۲۵ متر سه سوخت، نفت خام، کروزن و بنزین را نشان می‌دهد. میزان تشعشع ساطع‌شده از بستر سوخت بنزین نسبت به کروزن و سپس نفت خام در فواصل یکسان بیشتر است.

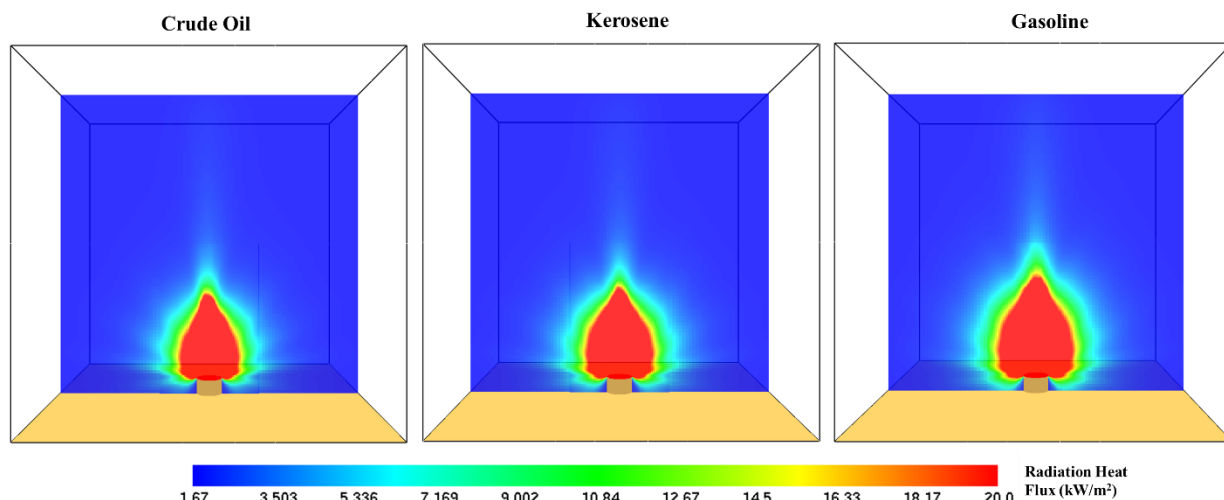


Figure 4- Radiation Contour in the middle tanks for tanks diameter 25 m with different fuels

شکل ۴- کانتور تشعشع در صفحه میانی برای مخازن با قطر ۲۵ متر با سوخت مختلف

شکل (۵)، نمودار میزان تشعشع ساطع‌شده حریق مخزن سوخت نفت خام با سه قطر ۲۵، ۵۰ و ۷۵ متر در فواصل X/D ، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ (X فاصله افقی و D قطر مخزن است) در ارتفاع‌های ۱/۵، ۳ و ۵ متری از سطح زمین را نشان می‌دهد. مقایسه نمودارهای شکل (۵) نشان می‌دهد برای یک سوخت یکسان با افزایش سطح بستر سوخت که در این شبیه‌سازی معادل سطح مخزن است میزان تشعشع در فواصل X/D یکسان، افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال برای X/D برابر با یک، در $Z=5m$ ، میزان تشعشع به ترتیب برای قطرهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ متر معادل ۳/۹۳، ۶/۲۳ و ۷/۹۲ کیلووات بر مترمربع است.

همچنین با افزایش فاصله از سطح زمین، تشعشع افزایش می‌یابد به عبارتی در یک X/D ثابت، افزایش Z از $1/5$ متر به 5 متر، میزان تشعشع افزایشی است. در جهت افقی نیز از فاصله $1D$ تا $5D$ با دور شدن از مرکز بستر سوخت کاهش تشعشع را شاهد هستیم تا جایی که در فاصله افقی $5D$ و بیشتر از آن تشعشع دریافتی معادل تشعشع محیط ($1/68 \text{ kW/m}^2$) می‌شود.

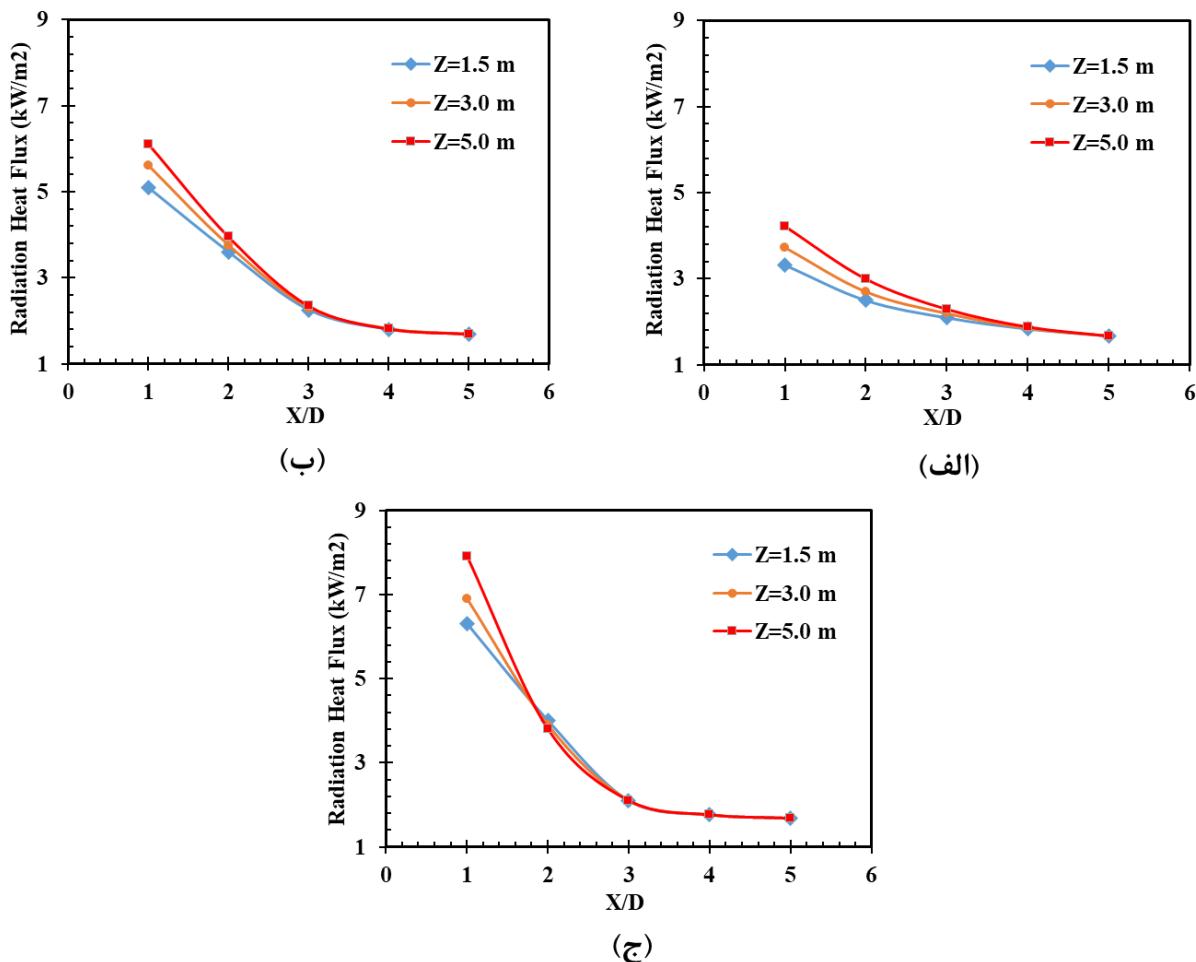


Figure 5- Amount of radiation according to the distance from the center of the crude oil tank with a) 25 m, b) 50 m, and c) 75 m
 شکل ۵- میزان تشعشع برحسب فاصله از مرکز مخزن سوخت نفت خام با قطر الف) ۲۵ متر ب) ۵۰ متر و ج) ۷۵ متر

سو و همکاران [۱۴]، مخاطرات قرارگیری انسان در برابر تشعشع را محاسبه و در سه درجه تقسیم‌بندی کردند. جدول (۴) برگرفته از مطالعه سو و همکاران [۱۴] بوده که در آن دسته‌بندی وقوع خطرات قرارگیری انسان در برابر مقدار تشعشع را در مدت‌زمان ۶۰ ثانیه نشان می‌دهد. درجه اول مربوط به سوختگی نوع یک برای آسیب‌های جزئی و تشعشع ۳ کیلووات بر مترمربع و بالاتر از آن تا ۶/۶ کیلووات بر مترمربع را شامل می‌شود که با رنگ زرد کد گذاری شد. سوختگی درجه ۲، سوختگی شدید بوده که در محدوده ۶/۶ کیلووات بر مترمربع و بالاتر از آن تا ۱۰ کیلووات بر مترمربع را شامل می‌شود که به رنگ نارنجی مشخص شد. دسته‌بندی سوم، حادترین و خطرناک‌ترین ناحیه بوده و محدوده مرگ نام‌گذاری شد که شامل تشعشع ۱۰ کیلووات بر مترمربع و بالاتر از آن است. تمامی سه درجه خطرات تشعشع توضیح داده‌شده، یک محاسبه آماری است که در آن بیش از ۵۰ درصد افراد به آن دچار شده‌اند. رنگ سبز شامل تشعشع زیر ۳ کیلووات بر مترمربع، به‌عنوان محدوده بی‌خطر و امن برای انسان تعریف شد.

جدول ۴- میزان مخاطرات تشعشع در آتش مخازن برای انسان و تانک مجاور

Table 4- Radiation hazards in tank fires for humans and nearby tanks

Damage Type	Damage threshold	Radiation Intensity (kW/m ²)	Result	Color code	Reference
Atmospheric Tank	Escalation threshold	15	Collapse neighbor tank after 10 min	Dark red color	[31]
	Death RHF	10	60 s may cause death	Red color	
Human	Major injury RHF	6.6	60 s will cause second-degree burns	Orange color	[14]
	Minor injury RHF	3	60 s will cause first-degree burns	Yellow color	
	Safe RHF	Lower than 3	Safe area	Green Color	

جدول (۵)، اعداد محاسبه شده تشعشع در نرم افزار *FDS* را برای سوخت کروزن و بنزین در مخازن شبیه سازی شده برحسب قطر و فاصله افقی نشان می دهد. رنگ بندی اعداد برحسب درجه مخاطره جدول (۲) است. همان طور که در جدول (۵) مشخص شده برای هر دو سوخت بنزین و کروزن، در فاصله X/D برابر ۳ و در هر سه ارتفاع ۱/۵، ۳ و ۵ متر میزان تشعشع پایین بوده و نقطه عاری از خطر است و در نقاط نزدیک تر به مخزن خطر سوختگی درجه ۲ و شدید را شاهد هستیم. نکته دیگر اینکه با افزایش قطر مخزن و به عبارتی افزایش بستر سوخت، مقدار تشعشع صادر شده افزایش است تا جایی که بالاترین تشعشع برای سه سوخت انتخابی مربوط به مخزن بنزین با قطر ۷۵ متر است که با رنگ قرمز متمایز شده است. بدین معنا که قرارگیری بیش از ۶۰ ثانیه در محدوده $X/D=1$ و $Z=5\text{ m}$ احتمال وقوع مرگ برای انسان وجود دارد.

جدول ۵- تشعشع ساطع شده از مخازن شبیه سازی شده با سوخت های *Kerosene* و *Gasoline* برحسب قطر و فاصله از مرکز مخزن

Table 5- Radiation emitted from kerosene and gasoline fuels according to the diameter and distance from the center of the tank

Fuel: Kerosene									
	D=25 m			D=50 m			D=75 m		
	Z=1.5 m	Z=3.0 m	Z=5.0 m	Z=1.5 m	Z=3.0 m	Z=5.0 m	Z=1.5 m	Z=3.0 m	Z=5.0 m
X/D	RHF (kW/m ²)			RHF (kW/m ²)			RHF (kW/m ²)		
1	3.83	4.4	5.1	6.61	7.2	7.9	7.48	8.3	9.35
2	2.9	3.1	3.3	4.1	4.3	4.7	4.6	4.6	4.5
3	2.3	2.35	2.54	2.4	2.5	2.6	2.2	2.2	2.2
4	1.9	1.95	2	1.8	1.85	1.9	1.78	1.78	1.78
5	1.7	1.75	1.75	1.67	1.67	1.7	1.7	1.7	1.7
Fuel: Gasoline									
	D=25 m			D=50 m			D=75 m		
	Z=1.5 m	Z=3.0 m	Z=5.0 m	Z=1.5 m	Z=3.0 m	Z=5.0 m	Z=1.5 m	Z=3.0 m	Z=5.0 m
X/D	RHF (kW/m ²)			RHF (kW/m ²)			RHF (kW/m ²)		
1	5.1	5.8	6.66	7.8	8.3	9.1	8.7	9.6	11
2	3.7	3.9	4.2	4.75	4.85	5.3	4.7	4.7	4.6
3	2.5	2.6	2.7	2.7	2.7	2.7	2.4	2.4	2.4
4	2	2.05	2.1	1.95	1.95	1.95	1.86	1.86	1.86
5	1.75	1.8	1.83	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7

در یک جمع‌بندی کلی سوخت بنزین به نسبت دو سوخت دیگر مخاطره تشعشعی بیشتری برای افراد ایجاد کرده است که علت این موضوع به نرخ آزادسازی حرارت بیشتر این سوخت برمی‌گردد که به عبارتی با زیاد شدن نرخ آزادسازی حرارت میزان تشعشع نیز زیاد شده و از این رو محدوده بیشتری را دچار مخاطره می‌کند. به همین منظور کانتوری از نمای بالا و جانبی از محدوده مخاطره سطح ۱ و ۲ سوختگی و همچنین محدوده مخاطره مرگ در شکل (۶) آورده شده است.

در شکل (۶)، نمای جانبی و از بالای کانتور تشعشع در مقاطع مختلف برای سناریوی آتش استخری مخزن ۷۵ متری بنزین نمایش داده شده است. نمای جانبی شکل (۶)، نمایش و تفکیک پنج ناحیه جدول (۴) بر اساس میزان تشعشع واصله از سطح بستر سوخت را نشان می‌دهد که با خط‌چین از یکدیگر تفکیک شده است. در کانتور تشعشع از نمای بالای در مقطع $Z=1.5\text{ m}$ ، دو ناحیه کلی کم‌خطر و پرخطر مشخص است. از دیواره مخزن تا فاصله $X=130\text{ m}$ محدوده پرخطر و از ۱۳۰ تا ۲۰۰ متر محدوده کم‌خطر است. نگاه دقیق‌تر به این کانتور نشان‌دهنده یک فضای کم‌خطر باریک از لبه دیواره مخزن تا فاصله ۳ متری از آن، مشاهده می‌شود که علت این موضوع عدم رسیدن تشعشع شعله در مجاورت تانک است. این ناحیه در $Z=3.5\text{ m}$ نیز دیده می‌شود ولی با افزایش ارتفاع از سطح زمین و نزدیک شدن به سطح سوخت این ناحیه به ناحیه پرخطر در $Z=10\text{ m}$ می‌رسد.

در $Z=3\text{ m}$ نیز در حالت کلی تا فاصله ۱۳۰ متر از مرکز مخزن، ناحیه پرخطر و از ۱۳۰ تا ۲۰۰ متر ناحیه کم‌خطر تشعشع را مشاهده می‌کنیم. تفاوتی که در $Z=3\text{ m}$ با $Z=1.5\text{ m}$ وجود دارد، این است که فاصله ۶۰ تا ۷۰ متر از مرکز مخزن، تشعشعی در حدود ۱۰ الی ۱۱ kW/m^2 مشاهده می‌شود، به عبارتی این فاصله در محدوده مرگ قرار دارد. بررسی و تفکیک نواحی تشعشعی در $Z=5\text{ m}$ نیز نشان می‌دهد، تا فاصله ۱۰۰ متر از مرکز مخزن ناحیه مرگ، از ۱۰۰ تا ۱۳۰ متر ناحیه پرخطر، ۱۳۰ تا ۲۰۰ متر ناحیه کم‌خطر و بعد از آن در ناحیه امن قرار داریم.

کوزانی و همکاران [۳۱]، مطالعه‌ای در خصوص میزان ریسک قرارگیری مخازن در یک تانک فارم و اثر دومینویی آتش‌سوزی آن‌ها را انجام دادند. در این مطالعه قرارگیری مخازن اتمسفریک در تشعشع 15 kW/m^2 در مدت زمان بیشتر از ده دقیقه را آستانه تشدید تابش معرفی کردند که اثر آن موجب ازهم‌گسیختگی مخازنی که در این ناحیه قرار می‌گیرند می‌شود. لذا کانتور نمای بالا در $Z=5\text{ m}$ در شکل (۶) جهت نمایش این موضوع آورده شده است.

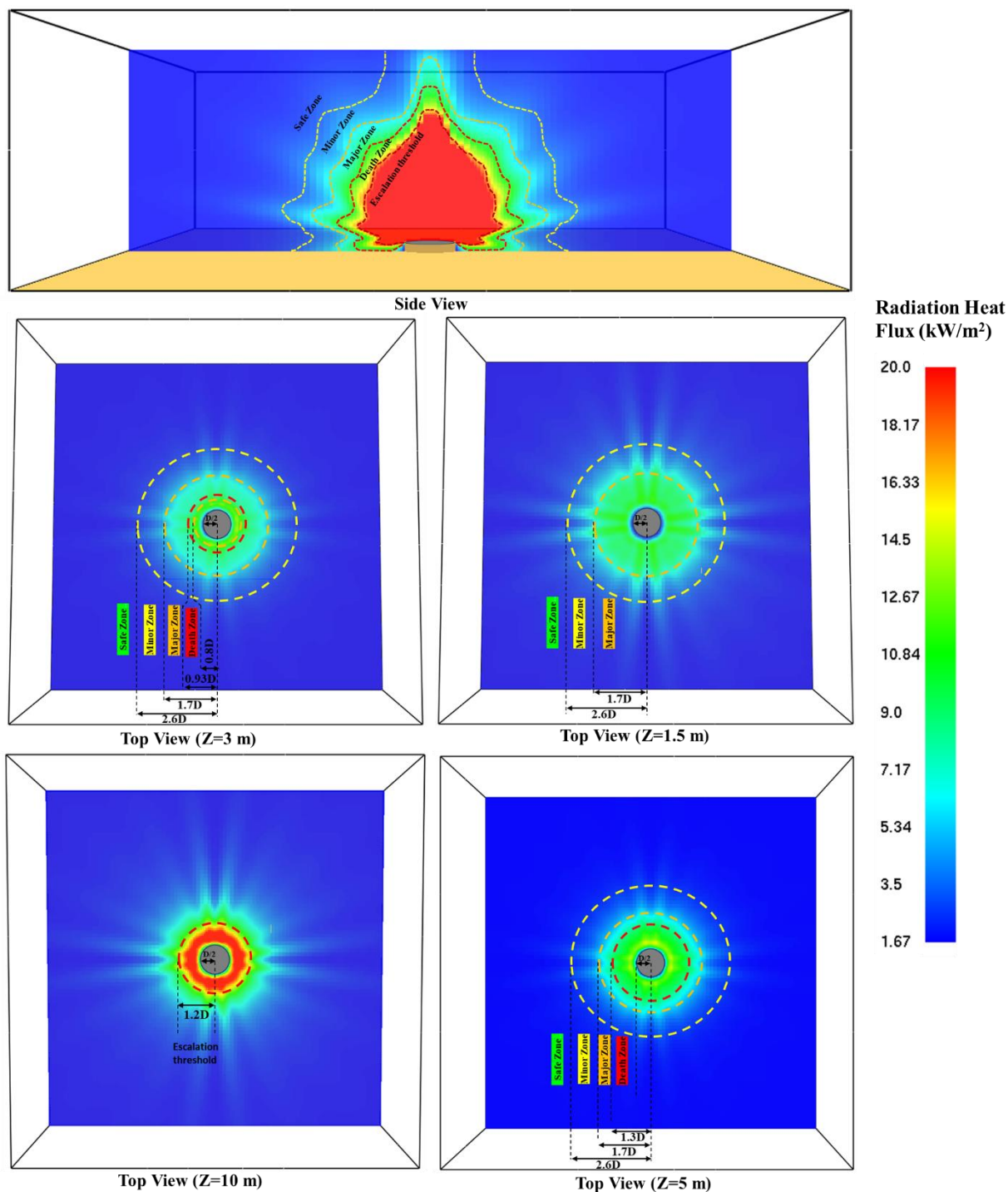


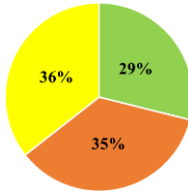
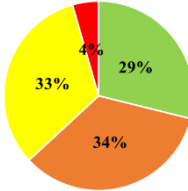
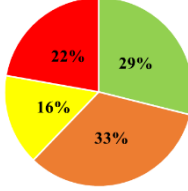
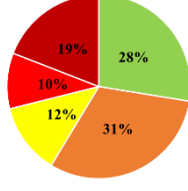
Figure 6- Side and top view of the radiation contour at different points for gasoline tank 75 m
 شکل ۶- نمای جانبی و از بالای کانتور تشعشع در مقاطع مختلف برای سناریوی آتش استخری مخزن ۷۵ متری بنزین

در جدول (۶)، به صورت دقیق تر میزان تشعشع و مخاطرات آن، برحسب فاصله افقی و عمودی، از لبه مخزن آورده شده است. نتیجه گیری کلی که از شکل (۶) و جدول (۶) به دست می آید این است که در فواصل بیشتر از ۲۰۰ متر از مرکز مخزن سوخت بنزین قطر ۷۵ متر یا به عبارتی حفظ فاصله ۱۹۳ متر از دیواره این مخزن، بدون دریافت تشعشع زیاد، ناحیه ایمن است. نزدیک تر

از این ناحیه با توجه به ارتفاع قرارگیری از سطح زمین خطرات نوع کم خطر، پرخطر و یا مرگ را در پی دارد. اگر ناحیه ارتفاعی ۱/۵ تا ۳ متر برای بدن یک انسان در نظر گرفته شود، محدوده مرگ بر اثر تشعشع، از ۲۳ تا فاصله ۳۳ متر از لبه مخزن احتمال وقوع آن وجود دارد و همچنین اگر ارتفاع ماشین‌های اطفای حریق در ناحیه ۵ متری از سطح زمین در نظر گرفته شود، آتش‌نشانی که بر روی خودرو بدون البسه اطفای حریق قرار دارند هنگامی که در فاصله ۱۳ تا ۶۳ متر از دیواره مخزن قرار گیرند، احتمال مرگ آن‌ها بر اثر تشعشع وجود خواهد داشت. در نمودار دایره‌ای جدول (۶)، یک‌فاصله معیار برابر با ۲۲۵ متر از لبه دیواره مخزن که معادل 3D است در نظر گرفته شد و درصد بندی بر اساس این فاصله و نواحی تفکیک شده آورده شده است.

جدول ۶- تفکیک نواحی مخاطرات تشعشع برحسب فاصله از دیواره مخزن سوخت بنزین با قطر ۷۵ متر

Table 6- Separation of radiation hazard areas according to the distance from the wall gasoline tank with a diameter of 75 m

Height above the ground	The zone layers and their distances from the tank wall (m)	Pie chart (%)
Z=1.5 m	(0 - 3) safe zone, (3 - 13) minor zone, (13 - 93) major zone, (93 - 163) minor zone, (163 - ∞) safe zone	
Z=3.0 m	(0 - 3) safe zone, (3 - 10) minor zone, (10 - 23) major zone, (23 - 33) death zone, (33 - 93) major zone, (93 - 163) minor zone, (163 - ∞) safe zone	
Z=5.0 m	(0 - 3) safe zone, (3 - 8) minor zone, (8 - 13) major zone, (13 - 63) death zone, (63 - 93) major zone, (93 - 163) minor zone, (163 - ∞) safe zone	
Z=10.0 m	(0 - 3) major zone, (3 - 10) death zone, (10 - 53) Escalation threshold, (53 - 68) death zone, (68 - 93) major zone, (93 - 163) minor zone, (163 - ∞) safe zone	

■ Safe Zone
 ■ Minor Zone
 ■ Major Zone
 ■ Death Zone
 ■ Escalation Threshold

در شکل (۷)، نمای واقعی فاصله قرارگیری چند نمونه از مخازن سوخت واقع در مناطق نفت‌خیز جنوبی کشور ایران در بندر ماهشهر و بندر کنگان نشان داده شده است. در خصوص پایانه صادراتی فرآورده‌های نفتی بندر ماهشهر، عمده سوخت ذخیره شده در این مجموعه تانک فارم، سوخت‌های مورد مطالعه این پژوهش است که با نگاه به فواصل قرارگیری آن‌ها نسبت به یکدیگر، نشان از عدم رعایت حداقل فاصله ۱/۲ برابر قطر، جهت جلوگیری از تشدید تشعشع مخزن محترق شده از سایر مخازن مجاور بر یکدیگر است که یک مجموعه ناایمن را رقم می‌زند. سمت چپ تصویر نیز مربوط به پالایشگاه فاز ۱۳ کنگان بوده، که در آن فاصله مخازن در محدوده ایمن اثر تشدید تشعشع قرار گرفته‌اند.



South pars refinery -Phase 13 Kangan



Mahshahr export port

Figure 7- Example realistic view of tow tanks farm placement distance, safe and unsafe with focus on radiation

شکل ۷- نمای واقعی از فواصل قرارگیری دو نمونه مزرعه مخازن سوخت ایمن و نایمن با تمرکز بر تشعشع

محدودیت‌ها و نقاط ضعف پژوهش

لازم به ذکر است که در مطالعه حاضر برخی از جزئیات وارد شبیه‌سازی نشده است که در مطالعات آتی می‌تواند مورد بررسی سایر محققین قرار گیرد. بخشی از این محدودیت‌ها شامل موارد زیر است:

- اگرچه در اکثر ساعات ممکن است شرایط محیطی نظیر باد در محیط مجاور تانک ثابت است؛ اما در ساعاتی از شبانه‌روز این شرایط تغییر می‌کند که مطمئناً بر نتایج اثرگذار است. اما در این تحقیق، شرایط محیطی ثابت فرض شده و از تغییر آن با زمان صرف‌نظر شده است.
- وجود تانک‌های مجاور و همچنین سایر تجهیزاتی که در سناریوهای واقعی وجود دارد نظیر ساختمان‌های اداری می‌تواند بر میدان سرعت مجاور تانکی که دچار حریق شده اثر گذارد که در این تحقیق، اثر تانک‌های مجاور بر تغییر رژیم جریان اطراف منبع آتش در نظر گرفته نشده است.
- همچنین در این تحقیق دبی آزادسازی سوخت از منبع آتش با استفاده از فرض ساده ثابت بودن شار جرمی تبخیر مدل شد که البته نتایج تجربی نیز به این موضوع اشاره کردند. اما در ابتدای تشکیل شعله بر تانکی که دچار حریق شده، شار جرمی متغیر بوده که نیاز به مدل‌سازی دقیق برهمکنش تشعشع شعله و نرخ تبخیر سطحی سوخت است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به کمک نرم‌افزار FDS، به شبیه‌سازی فرآیند حریق مخازن بزرگ ذخیره سه سوخت متداول در صنایع نفتی و پالایشگاهی در موقعیت‌های گوناگون نسبت به بستر سوخت پرداخته شد. این شبیه‌سازی در حالت بدون باد انجام‌گرفته است بدین طریق که در ابتدا جهت صحت‌سنجی نتایج عددی و تجربی، مطالعه آزمایشگاهی کازوکی و همکاران [۳۰] که برای سوخت نفت خام عربستان، در یک مخزن با قطر یک متر و ارتفاع ۱/۲ متر شبیه‌سازی شد. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد در فاصله L/D برابر با ۳، مقدار تشعشع تقریباً نزدیک به مقدار آزمایشگاهی با خطای نسبی ۲ درصد است. سپس شبیه‌سازی برای سه

سوخت بنزین، کروزن و نفت خام و در سه قطر مخزن ۲۵، ۵۰ و ۷۵ متر در مجموع شامل ۹ حالت گوناگون مطالعه شد. کلیات نتایج مشاهده شده در این پژوهش در ذیل آورده شده است.

- ۱- با توجه به نوع سوخت میزان تشعشع ساطع شده از آتش استخری متفاوت بوده و با نرخ آزادسازی حرارت نسبت مستقیم دارد، در شرایط شبیه سازی مشابه به ترتیب سوخت بنزین، کروزن و سپس نفت خام دارای بیشترین میزان تشعشع در موقعیت یکسان می باشند.
- ۲- در فاصله بسیار نزدیک به دیواره مخزن که مختصات پای مخزن نامیده می شود، به دلیل عدم رسیدن تشعشع به این ناحیه، یک ناحیه امن از نظر میزان تشعشع تشکیل می شود ولی با توجه به سایر مخاطرات مانند سرریز شدن سوخت از روی جداره تانک و یا ترکیدگی و پارگی مخزن، قرارگیری در این ناحیه در هنگام آتش سوزی توصیه نمی شود.
- ۳- در حالت کلی برای سناریوهایی که از سوخت بنزین و کروزن استفاده می کنند، از فاصله $2.6D$ به بعد محدوده تشعشعی امن برای انسان و کارکنان ماشین آلات آتش نشانی وجود دارد. و در فواصل $1.7D$ و نزدیک تر، با توجه به ارتفاع از سطح زمین، وارد نواحی پرخطر و حتی نواحی مرگ و تشدید تشعشع در ارتفاع های بالاتر و نزدیک به بستر سوخت می شویم.
- ۴- با افزایش قطر مخزن برای یک سوخت یکسان، میزان تشعشع دریافتی در موقعیت های X/D برابر، افزایش می یابد.
- ۵- مخازن اتمسفریک مجاور در یک تانک فارم می بایست حد فاصله آستانه تشعشع را جهت جلوگیری از تأثیرپذیری از آتش استخری مخزن مجاور رعایت نمایند. برای مخزن سوخت بنزین با قطر ۷۵ متر، این فاصله در حدود ۵۳ متر از لبه دیواره این مخزن به دست آمده است؛ به عبارتی در شرایط بدون باد، دیواره مخزن شعله ور شده از دیواره مخازن مجاور می بایست بیش از ۵۳ متر فاصله داشته باشند تا تحت تأثیر تشعشع دچار فروپاشی نشود.

منابع

- [1] Y. Chen, J. Fang, X. Zhang, Y. Miao, Y. Lin, R. Tu, and L. Hu, "Pool fire dynamics: Principles, models and recent advances," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 95, p. 101070, Mar 2023.
- [2] Y. Guo, G. Xiao, L. Wang, C. Chen, H. Deng, H. Mi, C. Tu, and Y. Li, "Pool fire burning characteristics and risks under wind-free conditions: State-of-the-art," *Fire Saf. J.*, p. 103755, Feb 2023.
- [3] E. Wami, W. Onunwor, O. Chisa, and D. Jimmy, "Design of a Floating Roof Crude Oil Storage Tank of 100,000 BPD Capacity and Prototype Fabrication," *J. Sci. Eng. Res.*, vol. 4, no. 8, pp. 318–329, Sep 2017.
- [4] J. Sjöström, F. Amon, G. Appel, and H. Persson, "Thermal exposure from large scale ethanol fuel pool fires," *Fire Saf. J.*, vol. 78, pp. 229–237, Nov 2015.
- [5] M. J. Jafari, M. Pouyakian, A. Khanteymoori, and S. M. Hanifi, "Development of a framework for dynamic risk assessment of environmental impacts in chemicals warehouse using CFD-BN," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, pp. 1–16, Oct 2021.
- [6] S. N. Espinosa, R. C. Jaca, and L. A. Godoy, "Thermal effects of fire on a nearby fuel storage tank," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 62, p. 103990, Nov 2019.
- [7] A. Pourkeramat, A. Daneshmehr, S. Jalili, and K. Aminfar, "Investigation of wind and smoke concentration effects on thermal instability of cylindrical tanks with fixed roof subjected to an adjacent fire," *Thin-Walled Struct.*, vol. 160, p. 107384, Mar 2021.
- [8] O. Ahmadi, S. B. Mortazavi, H. Pasharshahri, and H. A. Mohabadi, "Consequence analysis of large-scale pool fire in oil storage terminal based on computational fluid dynamic (CFD)," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 123, pp. 379–389, Mar 2019, doi: 10.1016/j.psep.2019.01.006.
- [9] O. Ahmadi, S. Bagher, and H. Pasharshahri, "Modeling of boilover phenomenon consequences: Computational fluid dynamics (CFD) and empirical correlations Modeling of boilover phenomenon consequences: Computational fluid dynamics (CFD) and empirical correlations," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 129, pp. 25–39, Sep 2019, doi: 10.1016/j.psep.2019.05.045.
- [10] A. A. Malik, M. S. Nasif, U. Arshad, A. A. Mokhtar, M. Z. M. Tohir, and R. Al-Waked, "Predictive Modelling of Wind-Influenced Dynamic Fire Spread Probability in Tank Farm Due to Domino Effect by Integrating Numerical Simulation with ANN," *Fire*, vol. 6, no. 3, Feb 2023. doi: 10.3390/fire6030085.
- [11] 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, May 2015, doi: 10.1016/j.jlpl.2015.04.010.

- [12] S. Vasanth, S. M. Tauseef, T. Abbasi, and S. A. Abbasi, "Simulation of multiple pool fires involving two different fuels," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 48, pp. 289–296, Jul 2017, doi: 10.1016/j.jlp.2017.04.031.
- [13] M. Zhang, W. Song, J. Wang, and Z. Chen, "Accident consequence simulation analysis of pool fire in fire dike," *Procedia Eng.*, vol. 84, pp. 565–577, Jan 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.469.
- [14] M. Su, L. Wei, S. Zhou, G. Yang, R. Wang, Y. Duo, S. Chen, M. Sun, J. Li, and X. Kong, "Study on dynamic probability and quantitative risk calculation method of domino accident in pool fire in chemical storage tank area," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 24, p. 16483, Dec 2022.
- [15] G. Yeoh and K. Yuen, "Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering," *Comput. Fluid Dyn. Fire Eng.*, Jan 2009, doi: 10.1016/B978-0-7506-8589-4.X0001-4.
- [16] G. Heidarinejad, H. Tajaddod, and M. Safarzadeh, "Numerical study of the effect of the water mist nozzle location on fire extinguishing system in shielded fire," *Fuel Combust.*, vol. 15, no. 4, pp. 1–19, Jun 2023. (in persian)
- [17] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, and H. Pasdarshahri, "A study on turbulence-combustion interaction and sub-grid scale model in the simulation of methane pool fire using LES," *Sci. Iran.*, vol. 28, no. 4, pp. 2133–2149, Aug 2021. (in persian)
- [18] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, and H. Pasdarshahri, "Accuracy of three different versions of flamelet-generated manifold with/without radiation coupling in simulation of pool fire," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 44, no. 5, pp. 1–16, May 2022, doi: 10.1007/s40430-022-03519-6.
- [19] H. Pasdarshahri, G. Heidarinejad, and K. Mazaheri, "Development of compatible sub-grid scale model of les in numerical simulation of compartment fires," Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, May 2013. (in persian)
- [20] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, and K. Overhold, "Sixth Edition Fire Dynamics Simulator User's Guide (FDS)," *NIST Special Publication 1019*, vol. Sixth Edit. p. 402, Apr 2023.
- [21] G. Maragkos and B. Merci, "Large Eddy Simulations of CH₄ Fire Plumes," *Flow, Turbul. Combust.*, vol. 99, no. 1, pp. 239–278, Jan 2017, doi: 10.1007/s10494-017-9803-4.
- [22] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, and K. Overholt, "Sixth Edition Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1 : Mathematical Model," vol. 1, pp. 1–147, Apr 2023.
- [23] G. Heidarinejad and E. Mousavi, "Numerical simulation of poolfire suppression using water mist system investigating nozzle parameter effects," *Modares Mech. Eng.*, vol. 17, no. 2, pp. 350–358, Mar 2017. (in persian)
- [24] H. Koseki, M. Kokkala, and G. W. Mulholland, "Experimental study of boilover in crude oil fires," *Fire Safety Science: Proceedings of the Third International Symposium*, pp. 865–874, 2006. doi: 10.4324/9780203973493.
- [25] Y. Iwata, H. Koseki, M. L. Janssens, and T. Takahashi, "Combustion characteristics of crude oils," *Fire Mater.*, vol. 25, no. 1, pp. 1–7, Oct 2000, doi: 10.1002/1099-1018(200101/02)25:1<::AID-FAM751>3.0.CO;2-V.
- [26] M. J. Hurley, *SFPE handbook of fire protection engineering*. Springer, 2015.
- [27] H. Koseki, "Combustion properties of large liquid pool fires," *Fire Technol.*, vol. 25, no. 3, pp. 241–255, Aug 1989, doi: 10.1007/BF01039781.
- [28] J. Lee, "Numerical analysis on the rapid fire suppression using a water mist nozzle in a fire compartment with a door opening," *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 51, no. 2, pp. 410–423, Oct 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.net.2018.10.026.
- [29] C. S. Fernandes, G. C. Fraga, F. H. R. França, and F. R. Centeno, "Radiative transfer calculations in fire simulations: An assessment of different gray gas models using the software FDS," *Fire Saf. J.*, vol. 120, p. 103103, Mar 2021.
- [30] H. Koseki and G. W. Mulholland, "The effect of diameter on the burning of crude oil pool fires," *Fire Technol.*, vol. 27, pp. 54–65, Feb 1991.
- [31] V. Cozzani, G. Gubinelli, G. Antonioni, G. Spadoni, and S. Zanelli, "The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 127, no. 1–3, pp. 14–30, Aug 2005. doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.07.003.

English Abstract

Numerical study of pool fire radiation hazards in large-scale petroleum derivatives storage tanks in windless condition

Ghassem Heidarinejad^{1*}, Mohammadreza Eftekhari², Mohammad Safarzadeh³, Mohammad Zabetian Targhi⁴

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

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

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

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

*Corresponding author

(Received: 2023/12/05, Received in revised form: 2024/01/06, Accepted: 2024/01/13)

The study of the radiation effects of the pool fire is significant considering the life and financial damages to individuals and facilities of a refinery complex. Therefore, in the present study, the radiation resulting from a pool fire of three common fuels, gasoline, kerosene, and crude oil, in three large fuel storage tanks with diameters of 25, 50, and 75 meters and a fixed height of 15 meters was studied numerically. In this study, FDS software was used, which is based on the finite difference approach with an explicit time discretization. As an innovation, the amount of radiation at a height of 1.5, 3, and 5 meters were studied in order to investigate the level of dangers to humans and firefighters of fire extinguishing machines, and at a height of 10 meters to investigate the effect of radiation on other nearby tanks, at different horizontal distances. The results indicate that when the fuel is gasoline, the highest radiation risk is between the tank wall and 1.7 times the tank diameter, and the minimum allowable distance for the safe zone is 2.6 times the tank diameter, which increases with increasing height above ground level. It was also observed that the radiation received at the same distance from tanks with similar diameters differed depending on the fuel, which has a direct relationship with the heat release rate.

Keywords: Radiation hazards, Pool fire, Computational fluid dynamics, Fuel storage tanks, FDS software