Journal of Occupational Hygiene Engineering Volume 6, Issue 4, Winter 2020, Pages: 1-9

Original Article

doi: 10.52547/johe.6.4.1

Prediction of Fireball Consequences Caused by Boilover Occurrence in the Atmospheric Storage Tanks

Omran Ahmadi[1], Kazem Sarvestani[2], Seyyed Bagher Mortazavi[3,*], Hasan Asilian Mahabadi[4]

[1] *PhD, Department of Occupational Health and Safety Engineering, Tarbiat Modares University, Faculty of Medical Sciences, Tehran, Iran*
[2] *MSc Student, Department of Occupational Health and Safety Engineering, Tarbiat Modares University, Faculty of Medical Sciences, Tehran, Iran*
[3] *Professor, Department of Occupational Health and Safety Engineering, Tarbiat Modares University, Faculty of Medical Sciences, Tehran, Iran*
[4] *Associate Professor, Department of Occupational Health and Safety Engineering, Tarbiat Modares University, Faculty of Medical Sciences, Tehran, Iran*

**** Corresponding Author:*** *Seyyed Bagher Mortazavi, Department of Occupational Health and Safety Engineering, Tarbiat Modares University, Faculty of Medical Sciences, Tehran, Iran. Email: mortazav@modares.ac.ir*

Received: 23/06/2019
Accepted: 13/10/2019

How to Cite this Article:
Ahmadi O, Sarvestani K, Mortazavi SB, Asilian Mahabadi H. Prediction of Fireball Consequences Caused by Boilover Occurrence in the Atmospheric Storage Tanks. *J Occup Hyg Eng*. 2020; 6(4): 1-9. DOI: 10.52547/johe.6.4.1

Abstract

Background and Objective: Although Boilover occurs with a low frequency; however, in case of occurrence, it can cause severe damage to people and equipment around the tank. The prediction of the consequences followed by a fireball of the Boilover phenomenon has an important role in adopting appropriate strategies for fire suppression of the atmospheric storage tank. This study aimed to predict the consequences after fireball caused by the Boilover phenomenon using empirical models.

Materials and Methods: This study was conducted based on a descriptive-analytical design. Initially, empirical models presented for the prediction of the Boilover consequences were identified in this study. Subsequently, the models were utilized to predict the fireball geometry and its radiation heat flux around the tank. Eventually, the results obtained from the predictions were compared with the data of a small-scale experimental study and a large-scale real Boilover accident.

Results: According to the results, the errors obtained from INERIS and Buang model to predict the radiation heat flux around the experimental Boilover were 23% and 31%, respectively. Moreover, the errors of these two prediction models were 52% and 71% for a real accident, respectively.

Conclusion: The INERIS and Buang models showed lower rates of errors for the prediction of the Boilover fireball consequences, compared to other models. The results of this study can be used to assess the risk of Boilover in atmospheric storage tanks. Moreover, they help accident decision-makers decide on strategies and tactics for the fire suppression of atmospheric storage tanks.

Keywords: Atmospheric Storage Tank; Boilover; Consequence; Empirical Models

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.52547/johe.6.4.1]

Copyright © 2020 Journal of Occupational Hygiene Engineering. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cite

مقاله پژوهشی

doi: 10.52547/johe.6.4.1

پیش‌بینی پیامد توپ آتش ناشی از وقوع پدیده Boilover در مخازن ذخیره اتمسفریک

عمران احمدی [۱]، کاظم سروستانی [۲]، سید باقر مرتضوی [۳،*]، حسن اصیلیان [۴]

[۱] دکترای تخصصی، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده علوم پزشکی و ایمنی کار، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده علوم پزشکی و ایمنی کار، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
[۳] استاد، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده علوم پزشکی و ایمنی کار، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
[۴] دانشیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده علوم پزشکی و ایمنی کار، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* **نویسنده مسئول:** سید باقر مرتضوی، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده علوم پزشکی و ایمنی کار، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
ایمیل: mortazav@modares.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۰۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۲۱

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی همدان محفوظ است.

چکیده

سابقه و هدف: هرچند Boilover با فراوانی کمی اتفاق می‌افتد؛ اما در صورت وقوع می‌تواند موجب واردآمدن آسیب شدید به افراد و تجهیزات اطراف مخزن شود. پیش‌بینی پیامد ناشی از وقوع پدیده Boilover نقش مهمی در اتخاذ استراتژی‌های مناسب برای اطفا حریق مخازن ذخیره اتمسفریک دارد. در این راستا، مطالعه حاضر با هدف پیش‌بینی پیامد توپ آتش ناشی از وقوع پدیده Boilover با استفاده از مدل‌های تجربی انجام شد.

مواد و روش‌ها: مطالعه حاضر از نوع توصیفی- تحلیلی می‌باشد. ابتدا مدل‌های تجربی مختلف ارائه‌شده برای پیش‌بینی پیامد Boilover شناسایی گردیدند و در ادامه، مدل‌ها برای پیش‌بینی هندسه توپ آتش ناشی از Boilover و شار حرارت تشعشعی آن در اطراف مخزن مورد استفاده قرار گرفتند. سپس، نتایج پیش‌بینی مدل‌ها با داده‌های حاصل از یک مطالعه آزمایشگاهی در مقیاس کوچک و یک حادثه در مقیاس بزرگ مقایسه شدند.

یافته‌ها: براساس نتایج، خطای مدل INERIS و Buang برای پیش‌بینی شار حرارتی تشعشعی در اطراف مخزن کار آزمایشگاهی به‌ترتیب معادل ۲۳ و ۳۱ درصد بود. خطای این دو مدل برای حادثه واقعی به‌ترتیب برابر با ۵۲ و ۷۱ درصد به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری: مدل‌های INERIS و Buang برای پیش‌بینی پیامدهای توپ آتش ناشی از Boilover نسبت به سایر مدل‌ها خطای کمتری دارند. نتایج این مطالعه می‌توانند در ارزیابی ریسک Boilover در مخازن اتمسفریک مورد استفاده قرار بگیرند و به فرماندهان حادثه در مورد تصمیم‌گیری به‌منظور انتخاب استراتژی‌ها و تاکتیک‌های مناسب فرماندهی حریق مخازن اتمسفریک کمک نمایند.

واژگان کلیدی: پیامد؛ مخازن ذخیره اتمسفریک؛ مدل‌های تجربی؛ Boilover

مقدمه

حریق مخازن نفتی نسبتاً نادر است؛ اما به دلیل ذخیره حجم قابل‌توجهی از سوخت یا مایعات ناپایدار، وقوع حادثه آتش‌سوزی و انفجار در این مخازن، پیامدهای فاجعه‌باری را به دنبال دارد. حادثه انبار نفت بانسفلید انگلستان [۱]، حادثه انبار نفت جیپور هند [۲] و حادثه انبار نفت گلنپول (Glenpool) اوکلاهامای آمریکا [۳] نمونه‌هایی از حوادث رخداده در مخازن ذخیره هستند که خسارت‌های زیادی را به شرکت‌ها تحمیل نموده و باعث ازدست‌دادن جان افراد و آلودگی‌های زیست‌محیطی فراوانی شده‌اند. طبقه‌بندی جامع و یکسانی برای مخازن ذخیره وجود ندارد. طبقه‌بندی مخازن می‌تواند از دیدگاه‌های متفاوتی مانند شکل هندسی، نوع سیال و یا فشار بخار ماده ذخیره‌شده در آن انجام شود. یکی از طبقه‌بندی‌ها که در استانداردها و کدها به‌صورت رایج استفاده می‌شود، طبقه‌بندی براساس فشار داخلی مخزن است [۴]. بر این اساس می‌توان مخازن را به سه گروه مخازن اتمسفریک، مخازن با فشار کم و مخازن با فشار بالا تقسیم کرد. مخازن اتمسفریک، پرکاربردترین مخازن در صنعت نفت هستند. این مخازن معمولاً در فشار داخلی برابر و یا به‌طور جزئی (۰/۵ پوند بر اینچ مربع) بالاتر از فشار جو کار می‌کنند. مخازن با فشار کم، مخازنی هستند که برای فشار بالاتر از جو طراحی شده‌اند. این مخازن برای کار تا ۱۵ پوند بر اینچ مربع بالاتر از فشار جو استفاده می‌شوند. به مخازنی که برای فشار بالاتر از ۱۵ پوند بر اینچ مربع طراحی شده‌اند، مخازن با فشار بالا گفته می‌شود. نوع و ماهیت محصولی که باید ذخیره گردد، مهم‌ترین معیار در انتخاب نوع مخزن اتمسفریک (سقف ثابت، سقف شناور و یا سقف ثابت با

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-01]

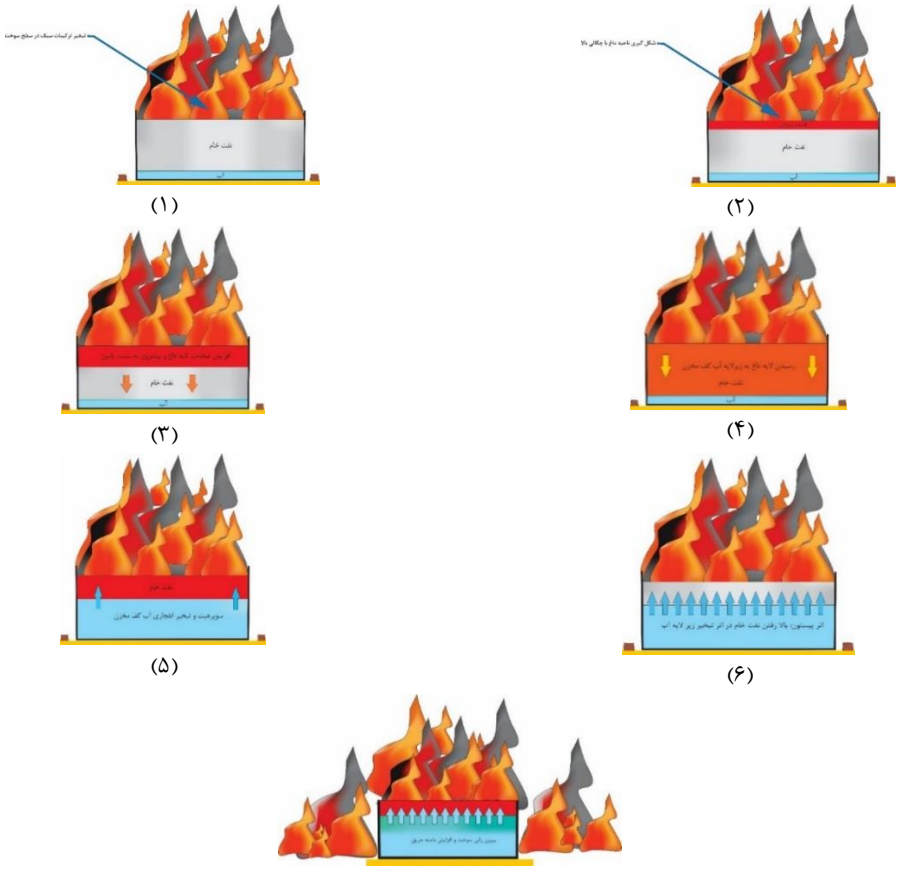
[DOI: 10.52547/johe.6.4.1]

پوشش شناور داخلی) می‌باشد [۵]. در گروه‌بندی دیگری می‌توان مخازن را با توجه به نوع کاربرد آن‌ها به مخازن نفت خام، مخازن واسطه، مخازن فرآورده و مخازن بارگیری و پخش تقسیم کرد.

یکی از سناریوهای خطرناک‌تر در آتش‌سوزی مخازن اتمسفریک، وقوع پدیده Boilover است. Boilover در مخازن حاوی مخلوطی از هیدروکربن‌های مختلف با طیف گسترده‌ای از نقطه جوش مانند نفت خام رخ می‌دهد [۶]. پدیده Boilover به بیرون‌راندن شدید سوخت به دلیل تبخیر زیر لایه آب که منجر به افزایش دامنه حریق و شکل‌گیری توپ آتش می‌شود، اطلاق می‌گردد [۷]. با توجه به اینکه در زمان وقوع Boilover ممکن است تعداد زیادی از افراد پاسخ‌دهنده به حریق در اطراف مخزن باشند، این امر می‌تواند منجر به تلفات جانی بالایی شود؛ به همین دلیل مطالعه پیامد Boilover برای مخازن اتمسفریک ضروری می‌باشد.

(National Fire Protection Association) NFPA پدیده Boilover را به‌صورت زیر تعریف می‌کند: "*رویدادی است در جریان سوختن ترکیب خاصی از نفت در مخازن روباز که پس از یک دوره طولانی سوختن آرام، بیرون‌راندن نفت از مخزن منجر به افزایش ناگهانی در شدت حریق می‌شود*" [۸].

به‌طور کلی دو نوع Boilover اتفاق می‌افتد: Boilover ناحیه داغ که در حریق مخازن ذخیره که حاوی مخلوطی از هیدروکربن‌ها با دامنه وسیعی از دمای جوش هستند (مانند نفت خام) رخ می‌دهد. با شروع حریق در سطح مخزن، مقدار کمی از گرمای آزادشده از شعله به وسیله تابش حرارتی به سطح سوخت می‌رسد و یک فرایند تقطیر در سطح سوخت رخ می‌دهد. ترکیبات سبک‌تر به تدریج تبخیر می‌شوند و سوخت از ترکیبات سنگین با نقطه جوش بالا غنی می‌گردد. حباب‌های بخار موجب اختلاط کامل مایع در این ناحیه شده و یک لایه که از نظر ترکیب و دما کاملاً یکنواخت است را ایجاد می‌کند که به آن لایه داغ گفته می‌شود. با ادامه فرایند تقطیر، دمای ناحیه داغ و عمق آن افزایش می‌یابد. رسیدن ناحیه داغ به آب کف مخزن باعث بخارشدن سریع آب می‌شود. تبخیر سریع آب منجر به ایجاد حجم زیاد بخار آب می‌گردد که به‌صورت یک پیستون، سوخت را به بیرون مخزن پرتاب می‌کند [۹]. شکل‌گیری ناحیه داغ یک نیاز ضروری برای وقوع Boilover بوده و سوخت‌های با ترکیبات دارای نقاط جوش متعدد، تمایل بیشتری به تشکیل ناحیه داغ دارند [۱۰]؛ Boilover لایه نازک: لایه نسبتاً نازکی از سوخت که روی لایه‌ای از آب شناور می‌شود، در صورت مشتعل‌شدن ممکن است باعث وقوع Boilover شود [۱۱]. این نوع Boilover شدت کمتری نسبت به نوع اول دارد و انتقال حرارت از سطح سوخت به فاز مایع، به انتقال از نوع هدایتی محدود می‌شود [۱۲]. تفاوت عمده Boilover ناحیه داغ و Boilover لایه نازک در این است که در Boilover لایه نازک، لایه داغ تشکیل نمی‌شود [۱۳]. Boilover در محیط‌های خاص بدون حضور آب نیز اتفاق می‌افتد؛ اما این اتفاق بسیار نادر می‌باشد. مراحل مختلف وقوع Boilover در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: مراحل مختلف وقوع پدیده Boilover

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.52547/johe.6.4.1]

وقوع Boilover منجر به افزایش اندازه شعله و نواحی در معرض تابش حرارتی می‌شود. اصلی‌ترین و خطرناک‌ترین پیامد Boilover، تشکیل توپ آتش و در درجه بعد، پرتاب مواد درحال سوختن به اطراف مخزن می‌باشد. انرژی گرمایی آزادشده در نتیجه تشکیل توپ آتش، امکان فرار را برای افراد در محدوده حادثه از بین می‌برد [۱۴-۱۸]. در حادثه نیروگاه برق تاکوا ونزوئلا شکل‌گیری توپ آتش به دنبال یک Boilover عظیم باعث کشته‌شدن ۱۵۰ نفر از افراد حاضر در محل حریق شد و با شعله‌ورکردن محتویات مخازن مجاور منجر به تشدید حادثه گردید [۱۵]. شعاع، زمان، ارتفاع، قدرت تابشی و جرم سوخت درون توپ آتش از فاکتورهای مهم در تعیین اثرات حرارتی توپ آتش در طول Boilover هستند [۱۴-۲۰،۱۸]. به‌منظور پیش‌بینی پیامدهای Boilover، روش‌های تجربی متعددی از جمله CCPS (Center for Chemical Process Safety) [۲۱]، Casal [۶]، TNO (Toegepast-Natuurwetenschappelijk Onderzoek)، INERIS و Buang [۱۵] ارائه شده است. این روش‌ها بر مبنای کار آزمایشگاهی ایجاد شده‌اند و هرکدام از آن‌ها متغیرهای متفاوتی را برای پیش‌بینی پیامد Boilover به کار می‌برند. در این راستا، پژوهش حاضر با هدف ارزشیابی مدل‌های تجربی مختلف در پیش‌بینی تشعشع ناشی از Boilover در مخازن ذخیره با مقیاس کوچک و بزرگ انجام شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر که در ارتباط با مخازن ذخیره اتمسفریک انجام شد، از مطالعات توصیفی- تحلیلی می‌باشد. به‌منظور انجام این مطالعه، ابتدا روابط تجربی برای پیش‌بینی پیامد Boilover با استفاده از منابع مختلف شناسایی شدند. با توجه به اینکه اصلی‌ترین پیامد Boilover تشکیل توپ آتش می‌باشد، روش‌های موجود در جهت برآورد اثرات تشعشعی توپ آتش شناسایی شدند. جرم سوخت درون توپ آتش، قطر، مدت زمان و شار حرارتی توپ آتش پارامترهایی هستند که توسط این روش‌ها بررسی می‌شوند. به‌منظور مقایسه مدل‌های ارائه‌شده از یک آزمایش تجربی در مقیاس کوچک و یک حادثه واقعی در مقیاس بزرگ استفاده شد. در مرحله اول چندین مطالعه آزمایشگاهی در مقیاس کوچک و بزرگ بررسی گردیدند و از بین آن‌ها یک مورد که دارای داده‌های کامل‌تری بود، برای مقایسه مدل‌ها انتخاب شد. این آزمایش توسط کاسوکی و همکاران در مورد مخازن با قطر ۱ متر انجام شد. حادثه مورد استفاده برای مقایسه روش‌ها، مربوط به وقوع حریق تمام سطح مخزن TO11 پالایشگاه آموکو میلفورد هاون بود که پس از گذشت ۱۳ ساعت از آغاز حریق منجر به یک Boilover شده است. برای کاهش خطا و تسریع محاسبات، کلیه فرمول‌های مربوط به روابط تجربی به نرم‌افزار Excel 2016 منتقل شدند. سپس شار حرارتی، زمان، قطر، ارتفاع و جرم سوخت درون توپ آتش پیش‌بینی‌شده توسط روابط تجربی با نتایج آزمایشگاهی و حادثه واقعی مقایسه شدند. درصد خطای پیش‌بینی هریک از مدل‌ها با استفاده از معادله ۱ محاسبه گردید [۲۲،۲۳].

$$\text{درصد خطای پیش‌بینی} = \frac{A-B}{A} * 100 \quad (1)$$

جدول ۱: رابطه ارائه‌شده توسط Casal برای پیش‌بینی پیامد ناشی از Boilover

نویسنده		رابطه تجربی		مرجع
Casal (۲۰۱۷)	زمان توپ آتش (ثانیه)	$t = 0.9\ M^{0.25}$	M: جرم سوخت درون توپ آتش (کیلوگرم) ΔH_c: گرمای احتراق (کیلوژول بر کیلوگرم) P: فشار درون مخزن قبل از انفجار است (نیوتن بر متر مربع) و اگر فشار درون مخزن مشخص نباشد، $\eta_{rad} = 1/3$ در نظر گرفته می‌شود. η_{rad}: کسری از انرژی آزادشده است که به‌صورت تابش حرارتی منتشر می‌شود، از طریق رابطه زیر به‌دست می‌آید و مقداری بین ۰/۲ تا ۰/۴ دارد. (D/2+d): فاصله بین سطح دریافت‌کننده تشعشع و مرکز آتش کروی است.	[۶]
	قطر توپ آتش (متر)	$D = 8.66\ M^{0.25}\ t_i^{1/3}$ for $0 \le t_i \le t/3$ $D_{max} = 5.8\ M^{1/3}$ for $t/3 < t_i \le t$		
	ارتفاع توپ آتش (متر)	$H = 0.5D$ for $0 \le t_i \le \frac{t}{3}$ $H = \frac{3D_{max}t_i}{2t}$ for $t/3 < t_i \le t$ $H = 0.75\ D$		
	توان تابشی توپ آتش (کیلووات بر متر مربع)	$E = \frac{\eta_{rad}\ M\ \Delta H_c}{\pi\ D^2\ t}$ $E_{max} = 0.0133\ \eta_{rad}\ \Delta H_c\ M^{1/12}$ for $0 \le t_i \le t/3$ $E = E_{max}\left[\frac{3}{2}\left(1-\frac{t_i}{t}\right)\right]$ for $t/3 \le t_i \le t$		
	کسر بازتابی (η_{rad})	$\eta_{rad} = 0.00325\ P^{0.32}$		
	فاکتور دید (F_{view})	$F_{max} = \frac{4\pi(D^2/4)}{4\pi\left[\frac{D}{2}+d\right]^2} = \frac{D^2}{4\left[\frac{D}{2}+d\right]^2}$ $F_{vertical} = F_{max}\ \cos\alpha$ $F_{horizontal} = F_{max}\ \sin\alpha$		

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.52547/johe.6.4.1]

در رابطه فوق، A مقدار به‌دست‌آمده از نتایج آزمایش و B مقدار پیش‌بینی‌شده از طریق روابط تجربی می‌باشد.

پیامد اصلی Boilover ایجاد توپ آتش است. Casal (۲۰۱۷) پیشنهاد نموده است که برای برآورد تشعشع حرارتی توپ آتش ناشی از پدیده Boilover می‌بایست از مدل شعله جامد استفاده شود. براساس این مدل، ویژگی‌های توپ آتش به‌صورت تابعی از زمان تغییر می‌کنند. Buang نیز با درنظرگرفتن جرم سوخت تبخیرشده قبل از وقوع Boilover، روابطی را برای محاسبه جرم سوخت درون توپ آتش، زمان و قطر توپ آتش ارائه نمود. Buang برای محاسبه اثرات تشعشعی توپ آتش از روابط CCPS استفاده شد. در این ارتباط، INERIS با درنظرگرفتن زمان وقوع Boilover و نرخ سوختن مواد، مدلی را برای محاسبه هندسه توپ آتش Boilover و اثرات تشعشعی آن ارائه داد. TNO و CCPS نیز براساس مطالعات صورت‌گرفته، روابطی تجربی را برای تخمین اثرات توپ آتش ارائه نمودند. با توجه به حجم زیاد روابط ارائه‌شده، تنها رابطه Casal در جدول ۲ ارائه شده است.

الف. مطالعه آزمایشگاهی

کاسوکی و همکاران برای درک بیشتر پدیده Boilover و مکانیسم حاکم بر آن یک مطالعه آزمایشگاهی را در مقیاس کوچک با استفاده از نفت خام سبک عربی انجام دادند. آزمایش در مخزن فولادی با قطر ۱ متر با ضخامت اولیه سوخت ۳۰ میلی‌متر شناور روی یک لایه آب انجام شد. در این مطالعه تأثیر ضخامت لایه نفت خام بر Boilover مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش در یک اتاق بزرگ انجام شد و برای محدودکردن پاشیده‌شدن سوخت به اطراف در زمان وقوع Boilover، مخزن آزمایش درون یک مخزن بزرگتر قرار داده شد. سپس نرخ کاهش سطح سوخت، تابش حرارتی، دمای داخل مایع و شعله در طول آزمایش اندازه‌گیری گردید. پس از اتمام آزمایش و اطفاء حریق، مقدار سوخت باقی‌مانده اندازه‌گیری شد. در ادامه، تابش حرارتی حریق با سه رادیومتر در جهات مختلف اندازه‌گیری گردید. دو دقیقه پس از آغاز حریق، نرخ کاهش سطح سوخت به‌صورت صعودی افزایش یافت و این روند تا وقوع Boilover ادامه داشت. پس از اطفا حریق، ۱/۲ میلی‌متر سوخت درون مخزن باقی ماند. نتایج نشان دادند که ۱۰ تا ۲۰ درصد سوخت به‌صورت نسوخته باقی مانده است. خلاصه‌ای از نتایج این آزمایش در جدول ۲ قابل‌مشاهده می‌باشد [۱۰].

یافته‌ها و بحث

نتایج حاصل از پیش‌بینی پیامد Boilover با استفاده از روش‌های تجربی برای مطالعه آزمایشگاهی نفت خام با قطر ۱ متر در جدول ۳ قابل‌مشاهده می‌باشد. در این مطالعه از پنج روش تجربی برای تخمین اثرات پدیده Boilover استفاده گردید. مدل های TNO، Casal و CCPS با این فرض ارائه شده‌اند که کل سوخت درون مخزن در شکل‌گیری توپ آتش مشارکت دارد؛ از این رو جرم سوخت درون توپ آتش برابر با جرم سوخت درون مخزن در نظر گرفته شده است. در معادلات ارائه شده توسط Buang و INERIS، جرم سوخت درون توپ آتش تنها کسر کوچکی از جرم سوخت درون مخزن را شامل می‌شود. همان‌طور که در آزمایش کاسوکی مشخص گردید، ۲۰-۱۰ درصد از سوخت اولیه به‌صورت نسوخته باقی می‌ماند و بخشی از آن نیز به اطراف مخزن پخش می‌شود و در شکل‌گیری توپ آتش مشارکتی ندارد؛ بنابراین جرم سوختی که عملاً در شکل‌گیری توپ آتش

جدول ۲: خلاصه اطلاعات مربوط به آزمایش نفت خام با قطر ۱ متر

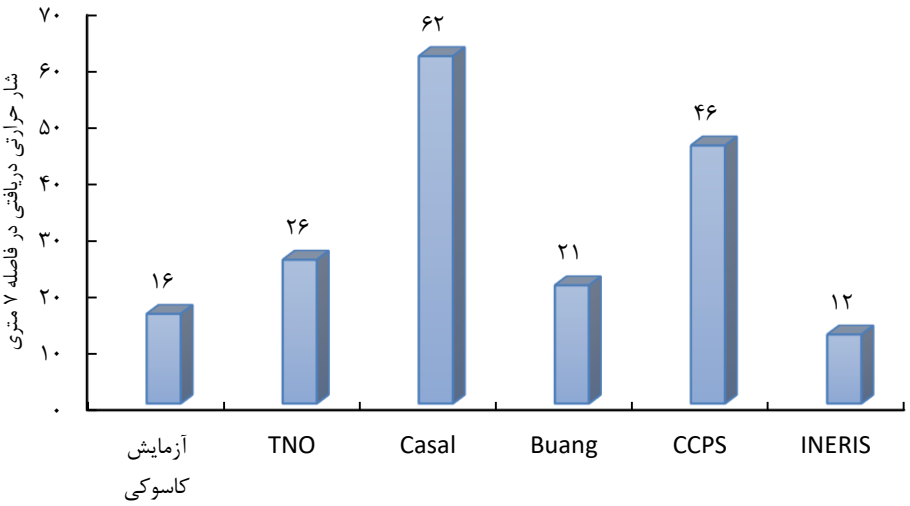
سوخت	نفت خام	زمان Boilover از شروع حریق (دقیقه)	۹
چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	۸۵۰	قطر توپ آتش (متر)	۱
قطر مخزن (متر)	۱	زمان توپ آتش (ثانیه)	۸۷
ضخامت سوخت (میلی‌متر)	۳۰	شار حرارتی توپ آتش در فاصله ۷ متری (کیلووات بر متر مربع)	۱۶
متوسط نرخ کاهش سطح سوخت (میلی‌متر بر دقیقه)	۲/۲	ضخامت سوخت باقیمانده پس از Boilover (میلی‌متر)	۱/۲
متوسط سرعت موج گرما (میلی‌متر بر دقیقه)	۰/۹	ضخامت لایه آب (میلی‌متر)	-

جدول ۳: پیش‌بینی پیامد Boilover مخزن با قطر ۱ متر با استفاده از روابط تجربی

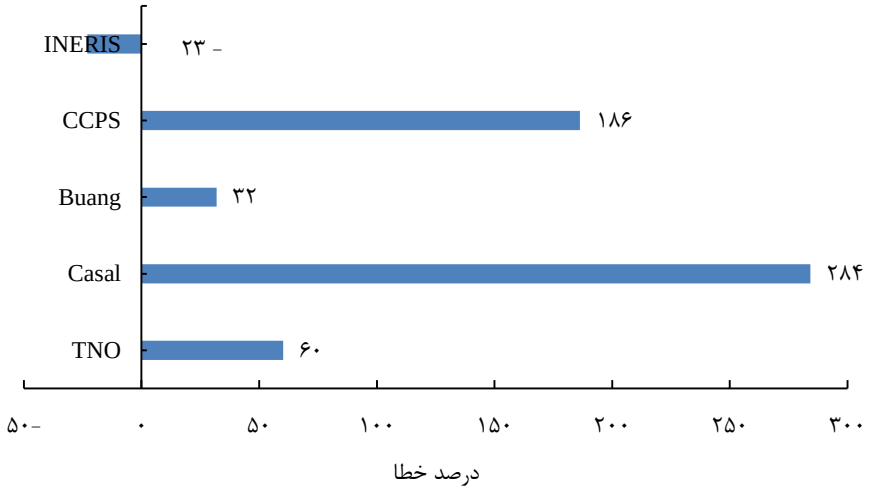
پارامتر	نتایج آزمایش	روش تجربی				
		TNO (۲۰۰۵)	Casal (۲۰۱۷)	Buang (۲۰۱۴)	CCPS (۲۰۰۰)	INERIS (۲۰۱۵)
جرم سوخت درون توپ آتش (کیلوگرم)	<۲۰	۲۰	۲۰	۲/۵۴	۲۰	۱/۲۳۹
زمان توپ آتش (ثانیه)	۲	۱/۸۵	۱/۹	۱/۳۱	۱/۲۲	۰/۳۱۵
قطر (متر)	۱	۱۷/۱۶	۱۵/۷۴	۸	۱۵/۷۴	۰/۳۰۳
شار حرارتی در فاصله ۷ متری (کیلووات بر متر مربع)	۱۶	۲۵/۶۳	۶۱/۵۷	۲۱/۱۰	۴۵/۸۰	۱۲/۳۲۹

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.52547/johe.6.4.1]



نمودار ۱: مقایسه شار حرارتی دریافتی به وسیله هدف در فاصله ۷ متر از مخزن با استفاده از مدل‌های تجربی



نمودار ۲: درصد خطای مدل‌های مختلف برای مطالعه آزمایشگاهی

دخیل است، کسر کوچکی از جرم سوخت اولیه می‌باشد. مدل‌های مختلف، برآورد تقریباً یکسانی از مدت زمان توپ آتش داشته‌اند. قطر توپ آتش تابعی از جرم سوخت درون مخزن است. مدل‌های TNO، Casal و CCPS قطر توپ آتش را معادل ۱۷-۱۵ متر برآورد کرده‌اند. این مقدار برای Buang، ۸ و برای INERIS، ۰/۳ متر می‌باشد. در این مطالعه شار حرارتی در فاصله ۷ متر از مرکز مخزن با استفاده از مدل‌های تجربی محاسبه گردید. این مقدار برای رابطه Buang و INERIS به‌ترتیب معادل ۲۱ و ۱۲ کیلووات بر متر مربع بود. در نمودار ۱ نتایج حاصل از پیش‌بینی شار حرارتی دریافتی توسط هدف در فاصله ۷ متر از مرکز مخزن ۱ متری توسط روابط تجربی و مطالعه آزمایشگاهی ارائه شده است. بر مبنای نتایج، رابطه INERIS و Buang به‌ترتیب با ۲۳ و ۳۱ درصد کمترین خطا را در پیش‌بینی شار حرارت تشعشعی در اطراف مخازن دارند (نمودار ۲).

ب. حادثه واقعی

در ۳۰ آگوست ۱۹۸۳ یک مخزن حاوی نفت خام در پالایشگاه Amoco در میلفورد هاون ولز دچار حریق شد. ظرفیت مخزن ۹۴۰۰۰ متر مکعب بود که در زمان حادثه، مخزن حاوی ۴۷۰۰۰ متر مکعب نفت خام بود. شایان ذکر است که این مخزن بزرگ‌ترین مخزن پالایشگاه و از نوع سقف شناور بود و ۷۸ متر قطر و ۲۰ متر ارتفاع داشت. ۱۳ ساعت پس از شروع حریق، پدیده Boilover بزرگ رخ داد و هزاران تن نفت درحال سوختن را به بیرون پرتاب کرد که باعث شکل‌گیری توپ آتش با شعاع ۱۴۴ متر و ارتفاع ۳۰۰۰ فوت شد. دو ساعت بعد، Boilover دیگری رخ داد. در این حادثه شش آتش‌نشان مجروح شدند [۱۵،۲۴]. اطلاعات مربوط به این حادثه به‌طور

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.52547/johe.6.4.1]

جدول ۴: خلاصه‌ای از اطلاعات مربوط به حادثه میلفورد هاون

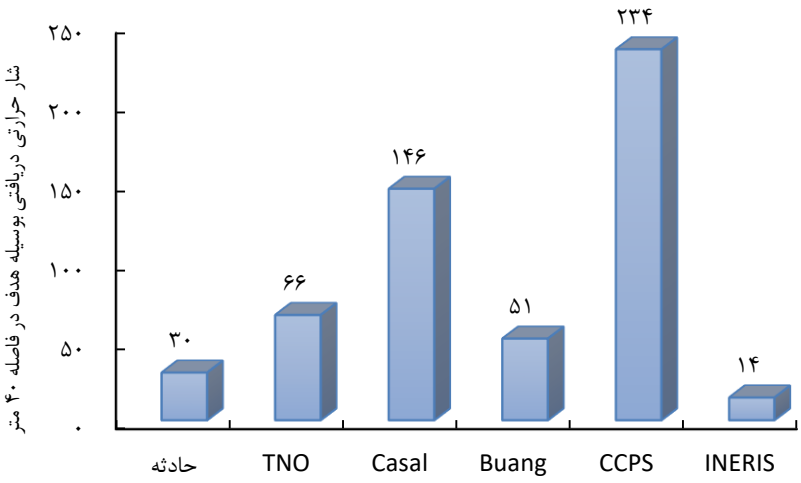
نوع محصول	نفت خام سبک	شار دریافتی در فاصله ۴۰ متری	۳۰ کیلووات بر متر مربع
چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	۸۰۲	گرمای ویژه (ژول بر کیلوگرم کلوین)	۳۱۸۵
اطلاعات مخزن	ارتفاع ۸ متر و قطر ۷۸ متر	گرمای نهان تبخیر (ژول بر کیلوگرم)	۱۸۹۲۱۱
دمای ذخیره (کلوین)	۳۰۳	گرمای احتراق (ژول بر کیلوگرم)	۴۳۳۰۰۰۰۰
دمای محیط (کلوین)	۲۹۳	مدت زمان توپ آتش (ثانیه)	۳۰
رطوبت نسبی	۸۸ درصد	قطر توپ آتش (متر)	۱۴۴
ضخامت اولیه سوخت (متر)	۱۰ متر	ارتفاع توپ آتش (متر)	۹۰۰

جدول ۵: پیش‌بینی پیامد Boilover حادثه واقعی با استفاده از روش‌های تجربی

پارامتر	حادثه واقعی	روش تجربی			
		TNO (۲۰۰۵)	Casal (۲۰۱۷)	Buang (۲۰۱۴)	CCPS (۲۰۰۰)	INERIS (۲۰۱۵)
جرم سوخت درون توپ آتش (کیلوگرم)	-	۳۷۶۹۴۰۰۰	۳۷۶۹۴۰۰۰	۸۴۰۳۷۲/۲۸	۳۷۶۹۴۰۰۰	۲۱۳۴۵۱۴۷
زمان توپ آتش (ثانیه)	۳۰	۷۹/۴۸	۷۰/۵۱	۳۲/۸۰	۴۷/۶۰	۶۵/۳۴
قطر (متر)	۱۸۰	۱۸۷۸/۷۲	۱۹۴۳/۵۶	۵۲۲/۰۸	۱۹۴۴/۵۸	۷۹/۵۲
شار حرارتی در فاصله ۴۰ متری (کیلووات بر متر مربع)	۳۰	۶۶/۲۶	۱۴۶	۵۱/۴	۲۳۴/۲	۱۴/۳۲

خلاصه در جدول ۴ ارائه شده است.

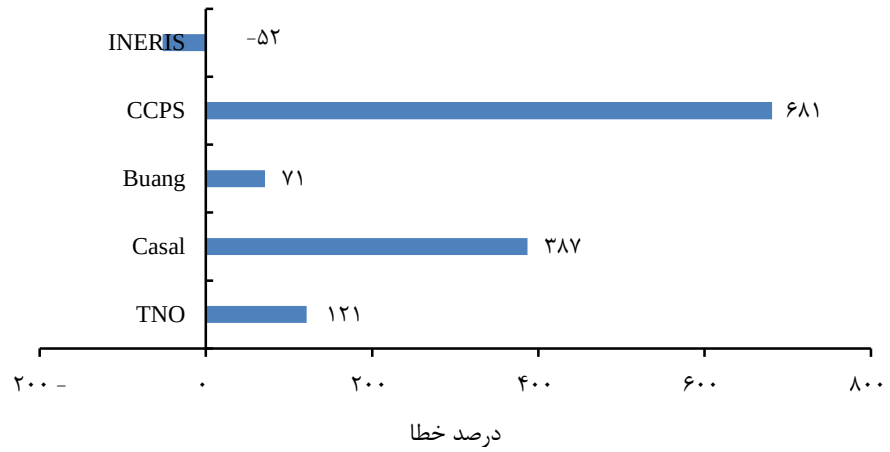
با توجه به محدودیت‌های مطالعات آزمایشگاهی و تأثیر قابل‌توجه ابعاد مخزن بر شار حرارتی دریافتی به و سیله هدف، مدل‌های تجربی ارائه‌شده با استفاده از داده‌های یک حادثه واقعی مقایسه شدند (جدول ۵). با توجه به اینکه بخشی از سوخت قبل از وقوع Boilover تبخیر می‌شود و بخش زیادی نیز به اطراف مخزن پرتاب می‌گردد، جرم سوخت درون توپ آتش ب سیار کمتر از جرم اولیه می‌با شد. همان‌طور که در جدول مشاهد می‌شود، تنها در مدل ارائه‌شده توسط Buang و INERIS این نکته لحاظ شده است. این مقدار برای رابطه Buang کمتر از ۳ درصد و برای رابطه INERIS معادل ۵۰ درصد از جرم اولیه می‌باشد. قطر واقعی توپ آتش در گزارش معادل ۱۸۰ متر ثبت گردید که با قطر محا سبه شده با ا ستفاده از روش‌های تجربی اختلاف زیادی دارد. از سوی دیگر، مدت زمان توپ آتش در گزارش معادل ۳۰ ثانیه ذکر شد که مقدار به‌د ست‌آمده از رابطه TNO، Casal و INERIS تقریباً دو برابر این مقدار است. این مقدار برای رابطه Buang برابر با ۳۲ و برای CCPS معادل ۴۷ ثانیه می‌با شد. علاوه‌براین، شار حرارتی در فاصله ۴۰ متری از حادثه حدود ۳۰ کیلووات بر متر مربع برآورد گردید. همچنین مقادیر محاسبه‌شده از طریق روابط TNO و INERIS به‌ترتیب معادل ۶۰ و ۱۴ کیلووات بر متر مربع بود (نمودار ۳). شایان ذکر است که همه روابط با مقدار



نمودار ۳: مقایسه شار حرارتی دریافتی در فاصله ۴۰ متری با استفاده از مدل‌های تجربی

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.52547/johe.6.4.1]



نمودار ۴: درصد خطای مدل‌های مختلف برای حادثه واقعی

خطای بالایی، پارامترهای مربوط به حادثه را پیش‌بینی کردند که در این میان، رابطه INERIS با ۵۲ درصد دارای کمترین خطای پیش‌بینی بود (نمودار ۴).

نتیجه‌گیری

جدی‌ترین و خطرناک‌ترین پیامد پدیده Boilover، شکل‌گیری توپ آتش و پاشیده‌شدن سوخت داغ به اطراف مخزن است که می‌تواند انرژی تابشی زیادی را آزاد کند و جان نفرات حاضر در صحنه حادثه را که عمدتاً آتش‌نشان‌ها هستند، به خطر بیندازد و تجهیزات اطراف را تهدید کند. برای داشتن برآوردی صحیح از اثرات تابشی توپ آتش، محاسبه جرم سوخت درون توپ آتش ضروری است. بازتاب انرژی حرارتی از شعله به سطح سوخت در طول حریق باعث تبخیر اجزای سبک‌تر سوخت شده و باعث می‌شود که جرم سوخت درون مخزن به تدریج کاهش یابد و عملاً جرم سوختی که در زمان Boilover به درون توپ آتش وارد می‌شود، بسیار کمتر از جرم اولیه سوخت درون مخزن باشد. علاوه‌براین، بخش زیادی از سوخت در زمان Boilover به اطراف پخش می‌شود و نقشی در تشکیل توپ آتش ندارد. بخشی از آن نیز به‌صورت نسوخته در مخزن باقی می‌ماند. این نکته مهم تنها در مدل Buang و INERIS لحاظ شده است. با توجه به اینکه جرم سوخت درون آتش کروی در رابطه‌های پیشنهادی TNO، Casal و CCPS برابر با جرم اولیه مخزن در نظر گرفته می‌شود، به نظر می‌رسد که این روابط برای برآورد توپ آتش ناشی از پدیده Boilover مناسب نمی‌باشند؛ از این رو پیشنهاد می‌شود برای برآورد صحیح جرم سوخت درون توپ آتش و قطر و زمان آن که تابعی از جرم هستند، از روش Buang و INERIS استفاده گردد. مهم‌ترین پارامتر در بررسی پیامد توپ آتش، شار حرارتی آن می‌باشد. مقایسه روش‌های تجربی با داده‌های واقعی نشان می‌دهد که مدل‌های TNO و INERIS برای برآورد شار حرارتی آتش کروی در یک فاصله معین، مناسب‌تر هستند.

در انتها، پیشنهاد می‌گردد برای دستیابی به یک برآورد صحیح از جرم سوخت درون توپ آتش، آزمایشات تجربی در مقیاس بزرگ با نفت خام و محصولات آن انجام شوند و جرم سوخت پخش‌شده به اطراف مخزن و جرم سوخت باقی‌مانده پس از اطفا حریق به‌طور دقیق اندازه‌گیری گردد. با کسرنمودن جرم اولیه از این مقادیر، جرم دقیق سوخت مصرف‌شده در توپ آتش مشخص می‌شود. باید خاطرنشان ساخت که شبیه‌سازی پدیده Boilover با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD: Computational Fluid Dynamics) می‌تواند نتایج دقیق‌تری را نسبت به روش‌های تجربی ارائه نماید.

تشکر و قدردانی

این مطالعه بخش از نتایج پایان‌نامه دکتری می‌باشد که در دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام شده است.

تضاد منافع

???

ملاحظات اخلاقی

???

سهم نویسندگان

????

حمایت مالی

???

REFERENCES

1. The Buncefield incident, 11 December 2005: the final report of the Major Incident Investigation Board. London: Health

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.52547/johe.6.4.1]

and Safety Executive; 2008.
2. Girdhar M. Jaipur fire and its environmental effects. *Fire Eng*. 2012;**37**(3):21-2.
3. Explosion ST. Fire in Glenpool, Oklahoma April 7, 2003. NTSB/PAR-04/02, PB2004-916502, Notation 7666. Washington, D.C: National Transportation Safety Board; 2003.
4. Myers PE. Aboveground storage tanks. New York: McGraw-Hill; 1997.
5. Long B, Garner B. Guide to storage tanks and equipment. New Jersey: John Wiley & Sons; 2004.
6. Casal J. Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants. New York: Elsevier; 2017.
7. Laboureur D. Experimental characterization and mondeling of hazards. Belgium: Bleve and Boilover; 2012.
8. National Fire Protection Association. NFPA 30: Flammable and Combustible Liquids Code: NFPA 30A: code for motor fuel dispensing facilities and repair garages. California: The Association; 2000.
9. Hasegawa K. Experimental study on the mechanism of hot zone formation in open-tank fires. *Fire Saf Sci*. 1989;**2**:221-30. DOI:10.3801/IAFSS.FSS.2-221
10. Koseki H, Kokkala M, Mulholland GW. Experimental study of boilover in crude oil fires. *Fire Saf Sci*. 1991;**3**:865-74. DOI:10.3801/IAFSS.FSS.3-865
11. Koseki H, Mulholland GW. The effect of diameter on the burning of crude oil pool fires. *Fire Technol*. 1991;**27**(1):54-65. DOI: 10.1007/BF01039527
12. Garo JP, Vantelon J, Koseki H. Thin-layer boilover: Prediction of its onset and intensity. *Combustion Sci Technol*. 2006;**178**(7):1217-35. DOI: 10.1080/00102200500296846
13. Broeckman B, Schecker H. Boilover: effects in burning oil-tanks. 7th International symposium loss prevention and safety promotion in the process industries, Italia; 1992.
14. Casal J. Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants. New York: Elsevier; 2008.
15. Buang A. Boilover in liquid hydrocarbon tank fires. Loughborough, England: Loughborough University; 2014.
16. Hall H. Oil tank fire boilover. *Mechan Eng*. 1925;**47**:540.
17. Broeckmann B, Schecker HG. Heat transfer mechanisms and boilover in burning oil-water systems. *J Loss Prev Proc Indust*. 1995;**8**(3):137-47. DOI: 10.1016/0950-4230(95)00016-T
18. Prugh RW. Quantitative evaluation of fireball hazards. *Proc Saf Progr*. 1994;**13**(2):83-91. DOI: 10.1002/prs.680130211
19. van den Bosch CJ, Weterings RA. Methods for the calculation of physical effects: due to releases of hazardous materials, liquids and gases: Yellow Book. Netherlands: Ministerie van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening (VROM); 2005.
20. Book TY. Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases). *Committee Prev Disasters CRP E*. 1997;**14**:870.
21. CfCP S. Guidelines for chemical process quantitative risk analysis. New York: Center for Chemical Process Safety; 2000.
22. Wu G, Baraldo M, Furlanut M. Calculating percentage prediction error: a user's note. *Pharmacol Res*. 1995;**32**(4):241-8. PMID: 8866841 DOI: 10.1016/s1043-6618(05)80029-5
23. Bennett JO, Briggs WL, Badalamenti A. Using and understanding mathematics: a quantitative reasoning approach. Boston: Pearson Addison Wesley Reading, MA; 2008.
24. Persson H, Lönnermark A. Tank Fires-Review of fire incidents 1951-2003. Sweden: SP Fire Technology; 2004.

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.52547/johe.6.4.1]