Iran Occupational Health

Iran Occupational Health. 2020 (12 Dec);17:55.

Original Article

http://ioh.iums.ac.ir

Prediction of time to Boilover in crude oil storage tanks using empirical models

Omran Ahmadi, PhD, Department of Occupational Healthand Safety Engineering, Faculty of Medical Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
Kazem sarvestani, MSc, Department of Occupational Healthand Safety Engineering, Faculty of Medical Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
Seyed Bagher Mortazavi, (*Corresponding author), Professor,Department of Occupational Healthand Safety Engineering, Faculty of Medical Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. mortazav@modares.ac.ir
Hassan Asilian mahabadi, AssociateProfessor, Department of Occupational Healthand Safety Engineering, Faculty of Medical Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Abstract

Background and objectives: Storage tanks are used in oil, refining and petrochemical companies to store large volumes of hazardous materials. Tank fires are one of the most common accidents in these industries that cause major losses. The Boilover is one of the most dangerous phenomenon of crude oil storage tanks fires (atmospheric tanks).Many fires in liquid hydrocarbon tanks can lead to Boilover due to various factors such as type of stored fuel. When heavy liquid hydrocarbons such as crude oil, or in other words liquid containing a mixture of hydrocarbons with different boiling temperature ranges catch fire there is potential of Boilover phenomena occurrence. In Boilover phenomenon, a distillation process occurs at the fuel surface. The lighter compounds evaporate on the fuel surface and feed the flames, the dense layer of the fuel called hot layer go below the burning liquid surface. If the velocity of the hot layer is greater than the fuel surface regression rate, the heat wave (hot layer) is propagated downstream of the tank. If the tank contains a layer of water or a suspended layer of water and oil emulsion inside the fuel, at a certain point, the heat wave will reach this layer. When the heat wave reaches the water, it will evaporate the water. Suddenly, evaporation of water resulting in the ejection of hot fuel from the tank. This phenomenon called Boilover. The occurrence of Boilover results in an increase in flame size and areas exposed to heat radiation. The main and most dangerous consequence of Boilover is the formation of a fireball and ejection of burning materials out of the tank. The heat energy released as a result of the formation of the fireball eliminates the possibility of escape for people that responded to the fire in the area of the accident. It also exacerbated the accident by flaming the contents of adjacent tanks. For example, at the Taco Power plant accident in Venezuela, a fireball after a Boilover killed 150 people and injured 500 others. It also exacerbated the accident by flaming the contents of adjacent tanks. In the Boilover of the crude oil tank at the Czechowice-Dziedzice refinery in Poland, the burning oil was ejected out of the tank up to 250 meters away from the tank. As a result of this Boilover, 30 people were killed and 100 people were injured. A massive Boilover occurred at the Amoco refinery tank in Milford Haven, burning oil out of the tank and formed a huge fireball with a height of 900 meters. The Boilover caused firefighters to burn. The availability of detailed information about the time to Boilover plays an important role in the decisions of the

Keywords

Crude oil

Atmospheric storage tank

Boilover

Empirical model

Received: 2019-03-07

Accepted: 2020-06-13

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

accident commander during suppression of storage tank fire. Prediction of time to Boilover is important to alert firefighters to escape the tank fire scene and to obtain information on the amount of fuel remaining in the tank prior to the Boilover. Also, predicting the time to Boilover is an important factor in modeling Boilover's consequences. Empirical models are proposed for the prediction of time to Boilover. These methods are based on experimental study and each of them uses different variables to predict time to Boilover such as radiation received from the flame, the fuel thickness, the average fuel boiling point, the fuel storage temperature, the tank diameter, and the presence of water emulsion inside the tank. The purpose of this study is to predict the time to Boilover in the fire of the crude oil storage tanks using empirical models.

Materials and Methods: In the first step, time to Boilover prediction empirical models were identified from previous studies. For this purpose, appropriate keywords were searched in search engines such as Google Scholar, Scopus, PubMed, and science direct. Experimental studies on the time to Boilover were reviewed to select a study for comparing of the predictions of models. For this purpose, the experimental study conducted by Koseki et al. on 1.9 m diameter storage tank containing Sarukawa crude oil was selected. Time to Boilover was calculated using six different models for the three experiments of Koseki et al. study. The percentage of prediction error of models was calculated. Due to the significant impact of tank dimensions on the time to Boilover, the predictions of the empirical models were compared with the data of the three large-scale Boilover accidents. Boilover accidents were identified by searching the databases such as FACTS, CSB, eMARS, ARIA and previous studies. Three accidents, including Czechowice-Dziedzice refinery accident, Poland, Tacoa Power Plant accident, Venezuela and Amoco refinery accident, Milford Haven, United Kingdom that have comparable data were selected for comparing predictions of time to Boilover of empirical models. The prediction results of the empirical models were compared with accidents data. Finally, given that the time to Boilover is highly dependent on the value of thermal energy reflected from the flame to the fuel surface and there is no way to calculate this parameter value, the time to Boilover for actual accidents for a range of thermal energy reflected from the flame was calculated using Buang, Casal and Michaelis models.

Results: The prediction error of the models presented by Michaelis and Buang for the first experiment was 39.91% and 47.15%, for the second experiment was 4.02% and 15.51%, and for the third experiment was 8.7% and 17.8%, respectively. The equations presented by Tan and Casal estimate time to Boilover more than real data. The Tan model prediction error was more than 100% and Casal model prediction error was 81%.The Kong and Cia models estimate the time to Boilover much less than the real data. The Cia model has a prediction error of 75% and the Kong model of 77%.The error percentages of the models presented by Michaelis, Buang, Cia, Tan, Kong and Casal for the Czechowice-Dziedzice refinery accident were 3.94, 15.77, 8.57, 6.11, 30.05 and 14.4, for Tacoa accident were 3. 04, 9.76, 44.33, 16.64, 4.48, and 50.72, and for Amoco refinery accident were 11.39, 5.8, 28.52, 54.3, 26.26 and 45.68,respectively.The Buang and Michael models with average error of 6 and 10 ٪ for real accidents and 26 and 17 ٪ for experimental study, more precisely predicted the time to Boilover compared to other models. The results of the Buang and Michaelis empirical models with a reflection fraction between 3.5 and 5٪ were the exact time of the Boilover accident at the Amoco refinery, while this value was close to 7٪ for the Casal model. For the Czechowice-Dziedzice refinery accident, the same

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

values of Amoco accident were obtained. In the Tacoa power plant accident, the value of thermal energy reflected from the flame to the fuel surface between 14 and 15 ٪for Buang and Michaelis models and close to 18٪for Casal model, results was same as the real accident data. Given the dependence of the Buang, Michaelis and Casal models on the value of thermal energy reflected from the flame to the fuel surface, applying a range values of thermal energy reflected from the flame to the fuel surface resulted in more accurate results.

Conclusion: When dealing with tank fires, the major challenge for commanders present at the scene of the accident is the prediction of time to Boilover, as one of the most hazardous phenomena in tank fire scenarios. Accurate prediction of time to Boilover is critical for developing a tank management strategy for those liquid with Boilover potential. In this study, first the models presented for predicting the time to Boilover were identified by searching in the different sources. The models predictions were compared using the results of an experimental study and the data of three real accidents. The studied models had different percentages of error in predicting the time to the Boilover. Comparison of different time to Boilover prediction models using experimental and real accident data revealed that the models presented by Buang and Michaelis have a lower prediction error than the other time to Boilover prediction models. Given the dependence of the three relationships of Buang, Michaelis and Casal on the thermal energy reflected from the flame to the fuel surface value, they applied by different value of this parameter. The results show that Boilover can be more accurately predicted by applying the Buang and Michaelis method simultaneously and by applying a range of thermal energy reflected from the flame to the fuel surface values. The results of this study can be used to predict time to Boilover and use a safe tactic and strategy to control of tank fire that have Boilover potential. Applying the models to a range of thermal energy reflected from the flame to the fuel surface values also provided more accurate results from time to Boilover, which could be used to develop a relation to predict more accurate time to Boilover in future studies. The results of this study can be used to predict time to Boilover and to adopt more efficiently and safely cooling and suppression strategies and tactics when handling crude oil storage tanks fire. Limitations of the present study include the lack of experimental data on large diameter tanks.

Conflicts of interest: None

Funding: None

How to cite this article:
Omran Ahmadi, Kazem Sarvestani, Seyed Bagher Mortazavi, Hassan Asilian Mahabadi. Prediction of time to Boilover in crude oil storage tanks using empirical models. Iran Occupational Health. 2020 (12 Dec);17:55.

*This work is published under CC BY-NC-SA 3.0 licence

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

سلامت کار ایران
دوره ۱۷ - ۵۵/۱۳۹۹

مقاله پژوهشی
http://ioh.iums.ac.ir

پیش‌بینی زمان وقوع Boilover در مخازن نفت خام با استفاده از مدل‌های تجربی

عمران احمدی: استادیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکدهٔ علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
کاظم سروستانی: دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکدهٔ علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
سیدباقر مرتضوی: (* نویسنده مسئول) استاد، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکدهٔ علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. mortazav@modares.ac.ir
حسن اصیلیان: دانشیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکدهٔ علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

زمینه و هدف: Boilover یکی از خطرناک ترین پدیده‌های مرتبط با آتش‌سوزی مخازن ذخیرهٔ نفت خام (مخازن اتمسفریک) است. بسیاری از آتش‌سوزی‌های مخازن هیدروکربنی مایع با توجه به فاکتورهای مختلف، ازجمله نوع مواد ذخیره‌شده در آن، می‌توانند به Boilover منجر شوند. پدیدهٔ Boilover باعث تشدید حادثه می‌شود و از جمله واکنش دهندگان به حادثه، به‌ویژه آتش نشان‌ها، را در معرض خطر جدی قرار می‌دهد. بنابراین پیش بینی زمان وقوع Boilover در حریق مخازن حاوی سوخت های با پتانسیل وقوع Boilover، برای تخلیهٔ بهنگام افراد در معرض خطر از صحنهٔ حادثه و اتخاذ تاکتیک‌های مناسب فرماندهی حادثه ضروری است. در دسترس بودن اطلاعات دقیق زمان وقوع Boilover نقش مهمی در تصمیم فرماندهی حادثه و اطفای بموقع آتش‌سوزی مخازن دارد. هدف از این مطالعه پیش‌بینی زمان وقوع Boilover در آتش‌سوزی مخازن ذخیرهٔ نفت خام با استفاده از مدل‌های تجربی است.

روش بررسی: پژوهش حاضر از نوع توصیفی ـ تحلیلی است. ابتدا روش های مختلف ارائه‌شده برای پیش بینی زمان وقوع Boilover از میان مطالعات قبلی شناسایی شد. برای این منظور در موتورهای جست‌وجوی گوگل اسکولار، اسکوپس، پابمد، ساینس دایرکت با استفاده از کلیدواژه‌های مناسب جست‌وجو انجام شد. ابتدا مدل های تجربی ارائه‌شده برای پیش بینی زمان وقوع Boilover شناسایی شد. سپس از این مدل ها برای پیش بینی زمان وقوع Boilover در یک مطالعهٔ آزمایشگاهی و سه حادثهٔ واقعی استفاده شد. نتایج پیش‌بینی مدل‌ها با داده‌های مطالعهٔ آزمایشگاهی و حوادث واقعی مقایسه شد. با توجه به اینکه زمان شروع Boilover وابستگی زیادی به نرخ شار گرمایی بازتابی از شعله به سوخت دارد و روشی برای محاسبهٔ کسری بازتابی به سطح سوخت ارائه نشده است، زمان شروع Boilover برای حوادث واقعی برای دامنه‌ای از کسر حرارتی بازتابی به سطح سوخت با استفاده از ۳ مدلی که این متغیر را درنظر می‌گیرند، محاسبه شد.

یافته ها: در نهایت ۶ مدل مختلف برای پیش بینی زمان Boilover شناسایی و انتخاب شد. براساس نتایج، مدل های ارائه‌شده به‌وسیلهٔ بوانگ و میکائیل به‌ترتیب با درصد خطای ۶٪ و ۱۰٪ برای حوادث واقعی، و ۲۶٪ و ۱۷٪ برای مطالعات آزمایشگاهی، نسبت به بقیهٔ مدل ها، زمان وقوع Boilover را دقیق تر پیش بینی کردند.

نتیجه گیری: براساس نتایج، مدل های ارائه‌شده به‌وسیلهٔ بوانگ و میکائیل با درصد خطای کمتر از سایر مدل‌ها، زمان وقوع Boilover را پیش‌بینی کردند. با توجه به وابستگی سه رابطهٔ بوانگ و میکائیل و کازال به کسر گرمای بازتابی به سطح سوخت، توسعهٔ روشی برای محاسبهٔ کسر گرمای بازتابی به سطح سوخت که در شکل گیری ناحیهٔ داغ شرکت دارد، باعث دستیابی به نتایج قابل اعتمادتری می شود. نتایج این مطالعه برای توسعهٔ استراتژی اطفای حریق مؤثرتر و ایمن‌تر مخازن با پتانسیل وقوع Boilover کاربرد خواهد داشت. همچنین به‌کار بردن مدل‌ها برای یک محدوده‌ای از مقادیر گرمای بازتابی نتایج دقیق‌تری از زمان Boilover ارائه داد که می تواند به‌منظور توسعهٔ رابطه‌ای برای پیش‌بینی زمان وقوع Boilover دقیق تر در مطالعات آینده به‌کار گرفته شود.

تعارض منافع: *گزارش نشده است.*

منبع حمایت کننده: *ندارد.*

کلیدواژه‌ها

نفت خام

مخازن ذخیرهٔ اتمسفریک

Boilover

مدل تجربی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۴

شیوه استناد به این مقاله:

Omran Ahmadi, Kazem Sarvestani, Seyed Bagher Mortazavi, Hassan Asilian Mahabadi. Prediction of time to Boilover in crude oil storage tanks using empirical models. Iran Occupational Health. 2020 (12 Dec);17:55.

*انتشار این مقاله به صورت دسترسی آزاد مطابق با CC BY-NC-SA 3.0 صورت گرفته است

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

مقدمه

مخازن ذخیره در شرکت‌های نفت، پالایش و پخش و پتروشیمی برای نگه‌داری حجم عظیمی از مواد خطرناک استفاده می شوند. حوادث مخازن هیدروکربنی مایع در صنعت نفت به‌دلیل ماهیت قابلیت اشتعال و حجم زیاد مواد محتوی آن‌ها، خسارات زیادی درپی داشته (۱) که نمونهٔ بارز آن حادثهٔ آتش‌سوزی مخزن اتمسفریک پتروشیمی بوعلی سینای ماهشهر است که منجر به خسارت مالی زیادی گردید. از حوادث بزرگ مربوط به مخازن هیدروکربنی مایع در سطح جهانی می‌توان به واقعهٔ آتش‌سوزی پایانه‌های ذخیرهٔ نفتی هرتفوردشایر (۲)، حادثهٔ تأسیسات ذخیره‌سازی نفت بایامون در پورتوریکو (۳) و رخداد مربوط به آتش‌سوزی انبارهای نفتی جیپور هند اشاره کرد. (۴) براساس مطالعهٔ چنگ و همکاران بر روی حوادث مخازن جهان در طول ۴۰ سال گذشته، ۲۴۲ حادثه در مخازن اتفاق افتاده که ۱۴۵ مورد از آن‌ها آتش‌سوزی و ۶۱ مورد انفجار بوده است. بیشترین آن‌ها در مخازن نفتی اتمسفریک محتوی نفت خام بوده است. نوع مخزن اتمسفریکی که بیشترین حادثه در آن اتفاق افتاده، از نوع سقف شناور خارجی بوده است. (۵) برپایهٔ نتایج تحقیقات (۶، ۷)، سناریوهای آتش‌سوزی حوادث مخازن اتمسفریک را می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد:

۱. آتش سوزی ناحیهٔ نشت‌بند مخازن؛
۲. آتش سوزی مواد ریخته‌شده روی سقف مخازن؛
۳. آتش سوزی تمام سطح مخازن؛
۴. آتش سوزی ناحیهٔ باندوال؛
۵. انفجار پانتون؛
۶. Boilover.

Boilover یکی از خطرناک‌ترین پدیده‌های مرتبط با آتش‌سوزی مخازن ذخیرهٔ نفت خام (مخازن اتمسفریک) است. در حادثهٔ نیروگاه برق تاکوا ونزوئلا، شکل‌گیری توپ آتش به‌دنبال وقوع یک Boilover عظیم باعث کشته شدن ۱۵۰ نفر از افراد حاضر در محل حریق و آسیب ۵۰۰ نفر شد؛ همچنین با شعله‌ور کردن محتویات مخازن مجاور، حادثه شدت یافت.

در حادثهٔ مخزن نفت خام در پالایشگاه کزچویک در لهستان که حاوی نفت خام بود، وقوع Boilover نفت درحال سوختن را به همهٔ جهات تا ۲۵۰ متر دورتر از مخزن پرتاب کرد. بر اث وقوع این Boilover، ۳۰ نفر جان باختند و ۱۰۰ نفر دچار آسیب شدند.

در حادثهٔ آتش‌سوزی مخزن پالایشگاه آموکو در میلفورد هاوِن، Boilover عظیم رخ داد و نفت درحال سوختن را به بیرون مخزن و تا ارتفاع ۹۰۰ متر پرتاب کرد. این حادثه باعث سوختگی آتش‌نشانان شد. (۸)

بسیاری از آتش‌سوزی‌های مخازن هیدروکربنی مایع با توجه به فاکتورهای مختلف، ازجمله نوع مواد ذخیره‌شده در آن، به Boilover منجر می‌شوند. (۹) هنگامی که مواد نفتی سنگین یا نفت خام و یا به عبارت دیگر مخازن محتوی مخلوطی از هیدروکربن‌ها با محدودهٔ دمای جوش مختلف دچار حریق می شوند، فرایند تقطیر در سطح سوخت رخ می دهد. ترکیبات سبک تر در سطح سوخت تبخیر می شوند و شعله های حریق را تغذیه می کنند. بازتاب گرما از شعله به سطح سوخت (عمدتاً از طریق تابش) باعث تبخیر بیشتر ترکیبات سبک تر سوخت می‌شود و یک لایه هم دما و چگال موسوم به لایهٔ داغ در پایین سطح مایع سوزان تشکیل می‌گردد. درصورتی که سرعت افزایش ضخامت لایهٔ داغ به‌سمت پایین مخزن بزرگ تر از سرعت پایین آمدن سطح سوخت باشد، موج گرما (لایهٔ داغ) به‌سمت پایین مخزن منتشر می شود. اگر مخزن محتوی یک لایهٔ آب یا یک لایهٔ معلق امولسیون آب و نفت درون سوخت باشد، در نقطه ای مشخص، موج گرما (در دمای بالاتر از دمای جوش آب) به این زیرلایهٔ آب خواهد رسید. رسیدن موج گرما به آب باعث تبخیر اولیهٔ بخشی از آب خواهد شد. توربلانس ایجادشده به‌دنبال تبخیر اولیهٔ آب باعث اختلاط بیشتر دو لایهٔ آب و سوخت می‌شود و به تبخیر گستردهٔ آب می‌انجامد. عملاً به‌طور آنی مقدار عظیمی بخار ایجاد خواهد شد با حجم ویژهٔ ۱۶۰۰برابر آب که سبب فوران، بیرون رانی مایعات داغ و افزایش اندازه شعله های آتش خواهد شد. (۱۰، ۱۱) پدیده Boilover می تواند باعث تشدید حادثه شود و واکنش دهندگان به حادثه، به‌ویژه آتش نشان‌ها، را در معرض خطر جدی قرار دهد. ترس از وقوع Boilover چه بسا عملکرد و تصمیمات فرمانده حادثه و آتش نشان‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. (۱۲، ۱۳) بنابراین پیش بینی زمان وقوع Boilover در حریق مخازن حاوی سوخت های با پتانسیل وقوع Boilover، برای تخلیهٔ بموقع افراد در معرض خطر از صحنهٔ حادثه و اتخاذ تاکتیک‌های مناسب فرماندهی حادثه، ضرورت دارد.

علاوه‌بر حریق تمام سطح مخزن، محققان شرط‌های زیادی را برای وقوع پدیدهٔ Boilover برشمرده اند. در

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

مطالعهٔ تجربی که هال با استفاده از مخازن با قطرهای متفاوت و سوخت های گوناگون انجام داد، وجود زیرلایهٔ آب، شکل‌گیری ناحیهٔ داغ و سوخت مایع با ویسکوزیتهٔ بالا سه شرط ضروری برای وقوع پدیدهٔ Boilover شناخته شد. (۱۴) علاوه‌بر این سه عنصر، محققان مختلفی شکل گیری حباب در لایهٔ مشترک آب ـ نفت را شرط ضروری برای وقوع پدیدهٔ Boilover دانسته اند. (۱۵ـ۱۸) در آزمایش های تجربی کاسوکی مشخص شد که بالاتر بودن دمای ناحیهٔ داغ از نقطهٔ جوش آب و بالا بودن سرعت رشد ناحیهٔ داغ از سرعت نرخ سوختن سوخت نیز از عناصر ضروری برای وقوع Boilover است. (۱۹ـ۲۰) بعضی مطالعات هسته زایی آب در ناحیهٔ مشترک آب ـ سوخت را نیز عنصر ضروری برای وقوع Boilover معرفی کرده اند. (۱۹، ۲۱) بنابراین همهٔ مخازن درگیر حریق تمام سطح منجر به پدیدهٔ Boilover نمی شوند. فقط سوخت هایی قابلیت Boilover را دارند که توانایی تشکیل ناحیهٔ داغ را داشته باشند. شکل‌گیری ناحیهٔ داغ برای سوخت های ترکیبی با دامنهٔ وسیعی از نقطهٔ جوش امکان پذیر است. (۱۴) مطالعات مختلف سوخت ها را به دو دسته تقسیم کردند: ۱. سوخت های تشکیل‌دهندهٔ ناحیهٔ داغ شامل سوخت‌های با دامنه وسیع از نقطهٔ جوش مانند نفت خام، نفت کوره و مخلوط دیزل و بیودیزل و ۲. سوخت‌هایی که ناحیهٔ داغ تشکیل نمی دهند شامل سوخت هایی که نقطهٔ جوش نزدیک به هم دارند مانند سوخت‌های تصفیه‌شده و خالص، حلال ها و بیودیزل. (۱۰، ۲۲ـ۲۶) آزمایش دیگری که کاسوکی و همکاران انجام دادند، مشخص نمود که شدت و زمان Boilover با ضخامت اولیهٔ سوخت رابطهٔ مستقیم دارند. (۲۷) زمان شروع Boilover به‌صورت خطی با ضخامت لایهٔ اولیهٔ سوخت افزایش می‌یابد و با افزایش قطر استخر، زمان Boilover کاهش می‌یابد. همچنین کاهش دمای جوش سوخت باعث کاهش زمان Boilover می‌شود. (۲۸) کاسوکی و همکاران در یک آزمایش تجربی، تأثیر مقدار آب موجود در سوخت را بر زمان شروع Boilover بررسی کردند و از نفت خام حاوی ۰/۳٪ آب استفاده کردند. نتایج نشان داد زمان وقوع Boilover کوتاه‌تر از مطالعات مشابه بدون امولسیون آب است. زمان مورد نیاز برای رسیدن Boilover با افزایش ضخامت لایهٔ سوخت و کاهش ضخامت لایهٔ آب افزایش یافت و سرعت پایهٔ ناحیهٔ داغ ۱۰برابر سریع تر از مطالعات قبلی بود. (۲۹) یکی از فاکتورهای بسیار مهم برای تعیین دقیق زمان وقوع Boilover تعیین سرعت موج گرما یا همان ناحیهٔ داغ است. شالوف و همکاران یک آزمایش تجربی برای تعیین سرعت گسترش ناحیهٔ داغ به‌سمت کف مخزن انجام دادند. براساس تغییرات پروفایل دمای اندازه‌گیری‌شده در سوخت، سرعت گسترش ناحیهٔ داغ تقریباً mm/s ۰/۱ برآورد شد. (۳۰) کاسوکی در یک آزمایش تجربی، میزان سوختن و سرعت گسترش ناحیهٔ داغ را بررسی کرد و نتیجه گرفت که هر دو پارامتر با افزایش قطر مخزن، افزایش می‌یابد. کاسوکی نتیجه گرفت برای قطرهای حدود ۵ متر، سرعت سوختن، نسبت به سرعت گسترش ناحیهٔ داغ، بیشتر است؛ ولی برای قطرهای بزرگ‌تر این نسبت تقریباً ثابت است. (۳۱) روش‌های مختلفی با درنظر گرفتن مواردی مانند انرژی دریافتی از شعله، ارتفاع سطح سوخت، میانگین نقطهٔ جوش سوخت، دمای ذخیرهٔ سوخت، قطر مخزن و وجود امولسیون آب درون مخزن، برای پیش‌بینی زمان وقوع Boilover ارائه شده‌اند. با توجه به اینکه پیش‌بینی زمان دقیق وقوع Boilover نقش بسیار مهمی در برآورد پیامد آن دارد (۳۲ـ۳۳)، در مطالعهٔ حاضر هدف، پیش‌بینی زمان وقوع Boilover در آتش‌سوزی مخازن نفت خام با استفاده از مدل‌های تجربی مختلف است.

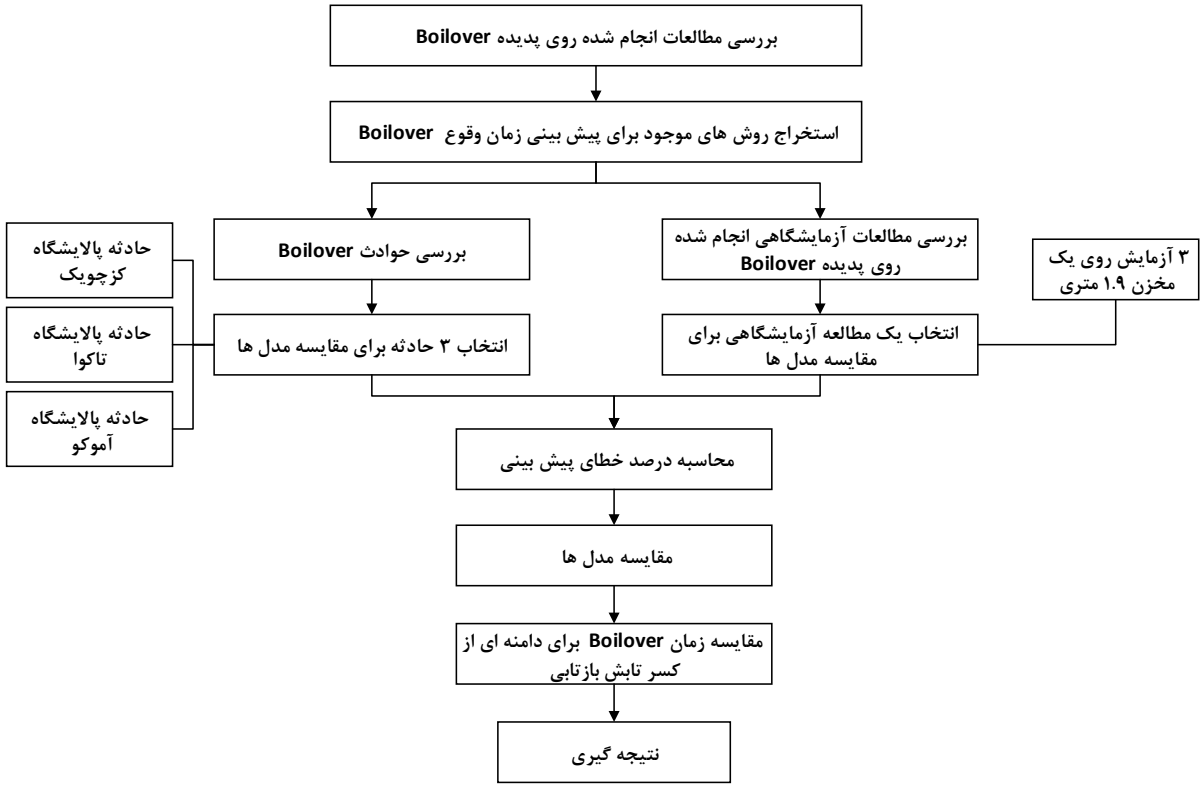
روش بررسی

این پژوهش از نوع توصیفی ـ تحلیلی است. ابتدا روش های مختلف ارائه‌شده برای پیش بینی زمان وقوع Boilover از مطالعات قبلی شناسایی شد. برای این منظور در موتورهای جست‌وجوی گوگل اسکولار، اسکپوس، پابمد، ساینس دایرکت با استفاده از کلیدواژه‌های مناسب جست‌وجو انجام شد. مراحل تحقیق مطابق شکل ۱ است.

درنهایت ۶ مدل مختلف برای پیش بینی زمان Boilover شناسایی و انتخاب شد. خلاصهٔ اطلاعات مربوط به مدل‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

در مرحلهٔ بعد، تحقیقات آزمایشگاهی انجام‌شده دربارهٔ زمان وقوع Boilover بررسی شد. درنهایت مطالعهٔ آزمایشگاهی کاسوکی و همکاران در سال ۲۰۰۳ روی مخازن با قطر ۱/۹ متر حاوی نفت خام ساریکوا انتخاب شد. خلاصه‌ای از نتایج پژوهش کاسوکی و همکاران در جدول ۲ آمده است. (۲۹) مجموعاً ۴ آزمایش با ضخامت لایهٔ آب و سوخت متفاوت در مطالعه کاسوکی و همکاران انجام شده است. در آزمایش شماره (۴) بدلیل صفر بودن

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]



شکل ۱ـ مراحل تحقیق

ضخامت زیرلایه آب، Boilover رخ نداد. برای مقایسه مدل های تجربی در پیش بینی زمان Boilover از نتایج آزمایش‌های شماره ۱، ۲ و ۳ استفاده شد. در مرحلهٔ بعد، برای کاهش خطا و تسریع محاسبات، تمام فرمول ها به نرم افزار اکسل ۲۰۱۶ منتقل شد. زمان Boilover با استفاده از روش های مختلف برای ۳ آزمایش محاسبه شد (شکل ۱). درصد خطای پیش بینی هریک از مدل ها با استفاده از معادلهٔ ۱ محاسبه شد. (۳۷ـ۳۸)

$$\text{درصد خطای پیش بینی} = \frac{A-B}{A} * 100 \qquad (۱)$$

در این رابطه: A مقدار به‌دست‌آمده از نتایج آزمایش ، B مقدار پیش بینی‌شده با استفاده از مدل است.

با توجه به تأثیر زیاد ابعاد مخزن در زمان شروع Boilover، نتایج پیش بینی مدل های تجربی با اطلاعات به‌دست‌آمده از ۳ حادثهٔ Boilover در مقیاس بزرگ‌تر نیز مقایسه شد. مجموعاً ۲۰ حادثهٔ Boilover براساس جست‌وجو در پایگاه داده حوادث FACTS، CSB، eMARS، ARIA و سایر پایگاه داده معتبر و مطالعات قبلی شناسایی شد. از بین ۲۰ حادثه، ۳ رخداد به‌دلیل داشتن گزارش و داده‌های کامل برای مقایسهٔ مدل های تجربی پیش بینی زمان Boilover انتخاب شد.

الف. حادثهٔ پالایشگاه کزچویک لهستان

در ۲۶ ژوئن ۱۹۷۱ ساعت ۱۹:۵۰صاعقه به یک مخزن نفت خام در پالایشگاه کزچویک در لهستان که حاوی نفت خام بود، اصابت کرد. مخزن از نوع سقف ثابت مخروطی و ظرفیت آن ۱۲۰۰۰ مترمکعب بود. برخورد صاعقه باعث فروپاشی سقف مخزن و شروع حریق تمام سطح شد. ۱۷ ساعت بعد از شروع حریق، یک Boilover سریع رخ داد و نفت درحال سوختن را به همهٔ جهات تا ۲۵۰ متر دورتر از مخزن پرتاب کرد. درنتیجهٔ وقوع این Boilover ، ۳۳ نفر جان باختند. خلاصهٔ اطلاعات مربوط به این حادثه در جدول ۳ ارائه شده است.

ب. حادثهٔ نیروگاه برق تاکوا ونزوئلا

در ۱۶ دسامبر ۱۹۸۲ در نیروگاه برق حرارتی در تاکوا ونزوئلا، ۳ نفر درحال اندازه گیری مقدار سوخت درون یک مخزن حاوی نفت سوختی بودند. چند دقیقه بعد، یک

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

جدول ۱ـ مدل های ارائه‌شده برای پیش‌بینی زمان وقوع Boilover

ردیف	نویسنده(گان)	مدل	مرجع
۱	تان و همکاران (۲۰۰۹)	$t_b(min) = -20.5235 + 557.2043\frac{H_0}{\sqrt{D}}$ قطر مخزن $D\ (m)$ ارتفاع لایهٔ سوخت	(۳۴)
۲	سیا و همکاران (۲۰۰۶)	$t_b(min) = \frac{H_0}{V_{hz}} - k(H_0 + H_W)$ ارتفاع لایهٔ آب $H_W(m)$ سرعت موج گرما $V_{hz}\ (\frac{m}{min})$	(۳۴)
۳	کازال (۲۰۰۸)	$t_b(sec) = \frac{\rho_l c_p h_{HC}(T_{hw} - T_a)}{Q_f - m(\Delta h_v + c_p(T_{0av} - T_a)}$ گرمای تبخیر در T_{0av} $\Delta h_v\ (Kj/Kg)$ چگالی سوخت در T_a $\rho_l\ (Kg/m^3)$ شار گرمایی بازتابی به سطح سوخت $Q_f\ (Kw/m^2)$ گرمای ویژهٔ سوخت در T_a $c_p\ (Kj/Kg.K)$ دمای موج گرما $T_{hw}\ (K)$ ارتفاع اولیهٔ سوخت در مخزن $h_{HC}\ (m)$ متوسط دمای جوش سوخت $T_{0av}\ (K)$ نرخ سوختن $m\ (Kg/m^2.s)$	(۳۵)
۴	کانگ و همکاران (۲۰۱۷)	$t_b(sec) = \frac{\rho}{\dot{m}_s + v_2\rho}h_0$ نرخ سوختن $\dot{m}_s\ (kg/m^2.s)$ ضخامت لایهٔ اولیهٔ سوخت سرعت انتشار حرارت $v_2\ (mm/s)$ نرخ بازگشت سطح سوخت	(۳۶)
۵	میکائیل و همکاران (۲۰۰۵)	$t_{bo}(sec) = \frac{\rho_l z_f C_p(T_{hz} - T_{st}) + (.001\Delta h_c)}{\dot{Q}_f - \dot{y}\rho_l C_p(T_{hz} - T_{st})}$ نرخ سوختن $m''_v\ (Kg/m$ گرمای لازم برای تبخیر بخش‌های فرار سوخت اختلاف دمای جوش و دمای محیط ΔT نرخ بازگشت سطح سوخت گرمای نهان تبخیر $\Delta h_{lh}\ (j/Kg)$ گرمای ویژه	(۸)
۶	بوانگ (۲۰۱۴)	$t_{bo}(sec) = \frac{z_f A \rho_L C_p(T_{hz} - T_{st})}{Q A - \dot{m}_V \Delta h_{lh}}$ نرخ سوختن $\dot{m}_V\ (Kg/m^2.s)$ مساحت مقطع عرضی مخزن	(۸)

انفجار سقف مخزن را از بدنه جدا کرد. تقریباً ۶ ساعت بعد از شروع حریق، یک Boilover شدید رخ داد و باعث شکل‌گیری توپ آتش و کشته شدن بیش از ۱۵۰ نفر شد. مخزن از نوع سقف ثابت مخروطی بود. خلاصهٔ اطلاعات این در جدول ۴ آورده شده است.

ج. حادثه پالایشگاه آموکو، میلفورد هاون

در ۳۰ آگوست ۱۹۸۳، مخزن TO11 پالایشگاه آموکو در میلفورد هاون با ظرفیت ۹۴،۰۰۰ مترمکعب درگیر حریق شد. در زمان حادثه، مخزن تقریباً حاوی ۴۷،۰۰۰ مترمکعب نفت خام بود. چند ساعت بعد از شروع حریق،

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

جدول ۲ـ خلاصهٔ نتایج آزمایش های کاسوکی و همکارن (۲۹)

شمارهٔ آزمایش / پارامتر	(۱)	(۲)	(۳)	(۴)
قطر مخزن (m)	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۴
ضخامت سوخت (mm)	۱۰۰	۲۰۰	۴۰۰	۴۰۰
ضخامت آب (mm)	۷۰۰	۵۰۰	۳۰۰	۰
زمان Boilover (min)	۱۲/۳	۱۵/۴	۳۱	-
زمان سوختن (min)	۱۸	۳۲	۴۰	>۹۰
نرخ سوختن (mm/min)	۳/۸	۴/۲-۳/۵	۳/۲	۳/۳
چگالی سوخت (kg/m^3)		۸۷۰		
ویسکوزیته (mm/s^2 در 30°C)		۸/۷		

جدول ۳ـ اطلاعات عمومی حادثهٔ پالایشگاه کزچویک

ظرفیت مخزن (m^3)	۱۲۰۰۰	چگالی سوخت (kg/m3)	۸۰۰/۰
قطر مخزن (m)	۳۳	گرمای نهان تبخیر (J/kg)	۱۶۳۴۳۰/۱
ارتفاع مخزن (m)	۱۴/۷	گرمای ویژه (J/kg.K)	۳۱۸۹/۰
دمای ذخیره (K)	۳۰۳	نرخ سوختن (kg/s)	۳۴/۶۴۴
دمای محیط (K)	۲۹۸	نرخ بازگشت سطح سوخت (m/s)	۰/۰۰۰۰۵۰۶
ارتفاع اولیهٔ سوخت (m)	۱۱/۷	نرخ سوختن در واحد سطح (kg/m2.s)	۰/۰۴۱
زمان Boilover (hour)	۱۷:۳۰	گرمای احتراق (J/kg)	۰/۰۰۰۰۰۰۴۳۳
رطوبت نسبی (٪)	۷۲	شار گرمایی بازتابی به سطح سوخت (W/m2)	۷۸۹۵۱/۷
میانگین نقطهٔ جوش (K)	۶۲۵/۷	دمای ناحیهٔ داغ (K)	۴۴۹/۷

جدول ٤ـ اطلاعات عمومی حادثهٔ تاکوا

ظرفیت مخزن (m3)	۴۰۰۰۰	چگالی سوخت (kg/m3)	۸۹۰
قطر مخزن (m)	۵۵	گرمای نهان تبخیر (J/kg)	۱۳۴۵۶۸/۱
ارتفاع مخزن (m)	۱۷	گرمای ویژه (J/kg.K)	۴۲۶۲/۴
دمای ذخیره (K)	۳۳۳	نرخ سوختن (kg/s)	۸۳/۱
دمای محیط (K)	۲۹۸	نرخ بازگشت سطح سوخت (m/s)	۰/۰۰۰۰۳۹۳
ارتفاع اولیهٔ سوخت (m)	۶/۱	نرخ سوختن در واحد سطح (kg/m2.s)	۰/۰۳۵
زمان Boilover (hour)	۶:۱۵	گرمای احتراق (J/kg)	۰/۰۰۰۰۰۰۴۲۳
رطوبت نسبی (٪)	۷۵	شار گرمایی بازتابی به سطح سوخت (W/m2)	۲۰۷۰۵۷/۳
میانگین نقطهٔ جوش (K)	۶۲۱/۶	دمای ناحیهٔ داغ (K)	۵۲۳/۸۱

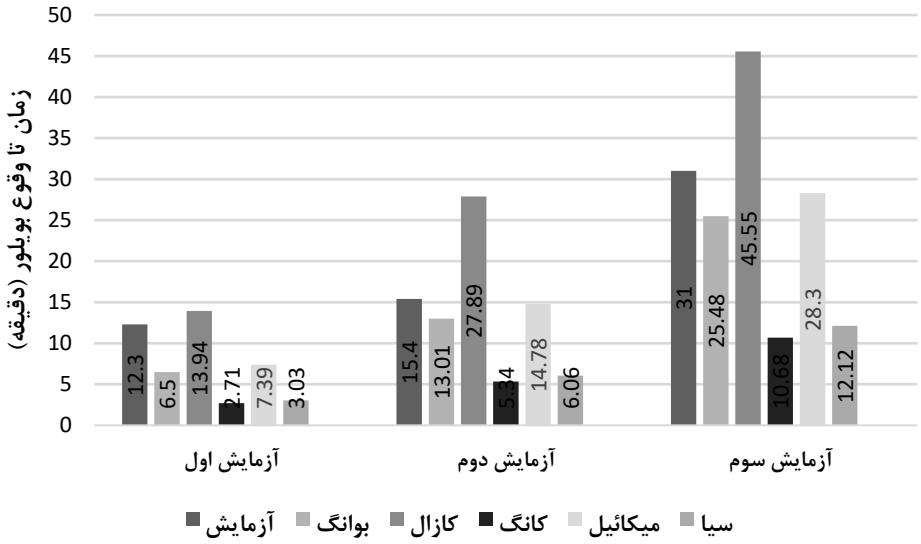
سقف مخزن یک‌پارچگی خود را ازدست داد و غرق شد. افزایش دامنهٔ حریق باعث شد تیم آتش‌نشانی محل حادثه را تخلیه کند. تقریباً ۱۳ ساعت بعد از شروع حریق، یک Boilover عظیم رخ داد و نفت درحال سوختن را به بیرون مخزن و تا ارتفاع ۹۰۰ متر پرتاب کرد. خلاصهٔ اطلاعات حادثه به‌صورت خلاصه در جدول ۵ قابل مشاهده است.

با توجه به اینکه زمان شروع Boilover وابستگی زیادی به نرخ شار گرمایی بازتابی از شعله به سوخت دارد و روشی برای محاسبهٔ کسری بازتابی به سطح سوخت ارائه نشده است، زمان شروع Boilover برای حوادث واقعی برای دامنه ای از کسر حرارتی بازتابی به سطح سوخت با استفاده از مدل های بوانگ، کازال و میکائیل محاسبه شد. طبق مطالعات، تقریباً ۱ تا ۵٪ کل انرژی آزادشده از شعله ها به سطح سوخت بازتاب می شود. (۸، ۲۸) این

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

جدول ۵ـ اطلاعات عمومی حادثهٔ آموکو

ظرفیت مخزن (m3)	۹۴۰۰۰	چگالی سوخت (kg/m3)	۸۰۲
قطر مخزن (m)	۷۸	گرمای نهان تبخیر (J/kg)	۱۸۹۲۱۰/۵
ارتفاع مخزن (m)	۲۰	گرمای ویژه (J/kg.K)	۳۱۸۵
دمای ذخیره (K)	۳۰۳	نرخ سوختن (kg/s)	۲۲۵/۷
دمای محیط (K)	۲۹۳	نرخ بازگشت سطح سوخت (m/s)	۰/۰۰۰۰۵۸۹
ارتفاع اولیهٔ سوخت (m)	۱۰	نرخ سوختن در واحد سطح (kg/m2.s)	۰/۰۴۷
زمان Boilover (hour)	۱۳:۱۵	گرمای احتراق (J/kg)	۰/۰۰۰۰۰۰۴۳۳
رطوبت نسبی (٪)	۸۸	شار گرمایی بازتابی به سطح سوخت (W/m2)	۹۲۰۳۶/۵
میانگین نقطهٔ جوش (K)	۵۳۶/۷	دمای ناحیهٔ داغ (K)	۴۵۰/۲۱



شکل ۲ـ مقایسهٔ نتایج پیش بینی مدل‌های تجربی با داده های آزمایش ۱/۹ متر

مقدار برای مخازن با قطر کوچک (کمتر از ۵ متر) بین ۱ تا ۲٪ است. (۲۳ـ۲۵) نرخ گرمای بازتابی به سطح سوخت را می توان براساس کل انرژی آزادشده از حریق به‌دست آورد (معادلهٔ ۲).

$$\dot{Q} = X_r \dot{m}_s \Delta h_c \qquad (۱)$$

X_r کسری از نرخ گرمای آزادشده است از شعله که به سطح سوخت برمی گردد؛ $\dot{m}_s \left(Kg/m^2s\right)$ نرخ سوختن و Δh_c (j/kg) ارزش حرارتی سوخت است. (۳۹)

نتایج

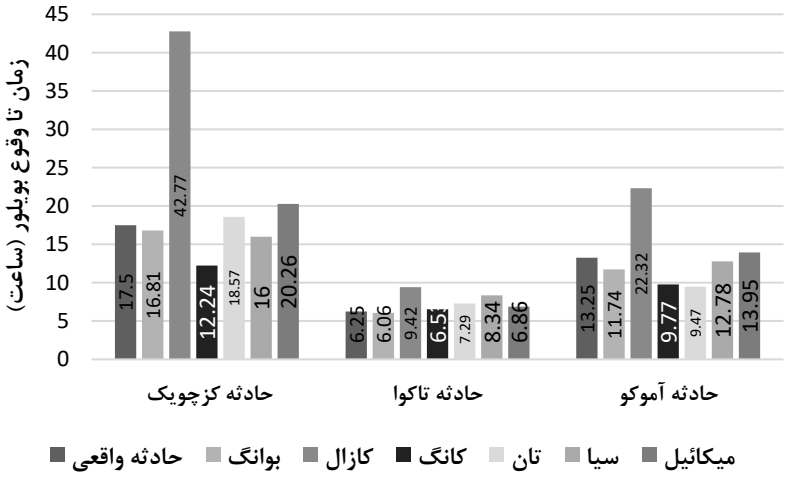
شکل ۱ نتایج پیش بینی زمان Boilover با استفاده از مدل های تجربی برای مطالعه آزمایشگاهی را نشان می دهد. مدل ارائه‌شده توسط میکائیل و بوانگ به‌ترتیب با درصد خطا ۳۹/۹۱ و ۴۷/۱۵ برای آزمایش اول، ۴/۰۲ و ۱۵/۵۱ برای آزمایش دوم و ۸/۷ و ۱۷/۸ برای آزمایش سوم توانستند زمان وقوع Boilover را پیش‌بینی نمایند. مدل‌های تان و کازال زمان وقوع Boilover را بیشتر از زمان واقعی برآورد کردند. مدل تان بیش از ۱۰۰ و مدل کازال تا ۸۱٪ خطای پیش بینی داشت (جدول ۶). مدل سیا تا ۷۵ و معادله کانگ تا ۷۷٪ خطای پیش بینی داشت. این موضوع در جدول ۶ قابل مشاهده است.

نتایج پیش بینی مدل های تجربی با حوادث واقعی در شکل ۳ ارائه شده است. درصد خطای معادلات ارائه‌شده از سوی بوانگ، میکائیل، سیا، تان، کانگ و کازال برای حادثهٔ پالایشگاه کزچویک به‌ترتیب برابر ۳/۹۴، ۱۵/۷۷، ۸/۵۷، ۶/۱۱، ۳۰/۰۵ و ۱۴۴/۴، برای واقعهٔ تاکوا به‌ترتیب برابر ۳/۰۴، ۹/۷۶، ۳۳/۴۴، ۱۶/۶۴، ۴/۴۸، و ۵۰/۷۲ و

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

جدول ٦ـ مقایسهٔ درصد خطای پیش بینی زمان وقوع Boilover با مدل های مختلف

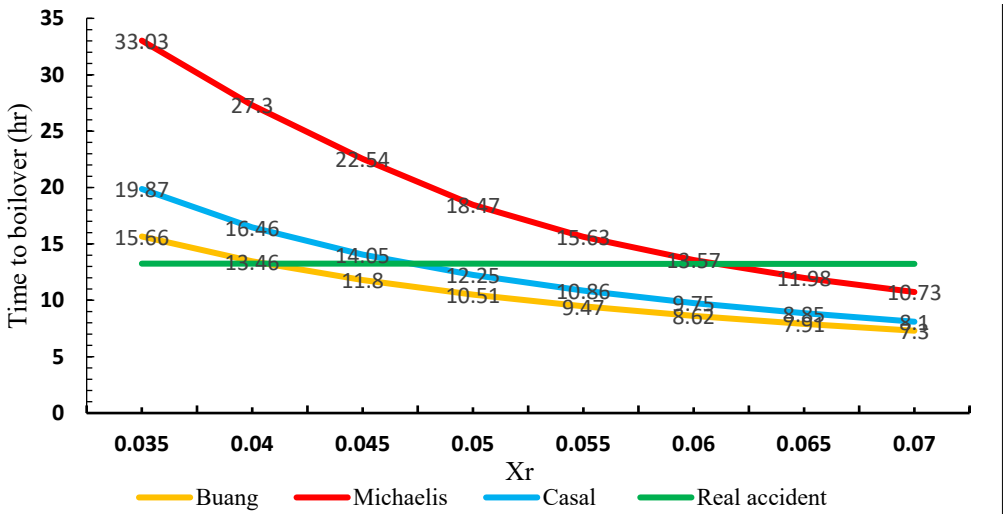
	درصد خطای پیش بینی زمان Boilover					
	بوانگ	کازال	کانگ	تان	سیا	میکائیل
آزمایش اول	۴۷/۱۵	۱۳/۳۳	۷۷/۹۶	۶۱/۸۶	۷۵/۳۶	۳۹/۹۱
آزمایش دوم	۱۵/۵۱	۸۱/۱	۶۵/۳۲	۲۹۱/۶۸	۶۰/۶۴	۴/۰۲
آزمایش سوم	۱۷/۸	۴۶/۹۳	۶۵/۵۴	۳۵۵/۳۸	۶۰/۹	۸/۷



شکل ۳ـ مقایسهٔ نتایج پیش بینی مدل های تجربی با حوادث واقعی

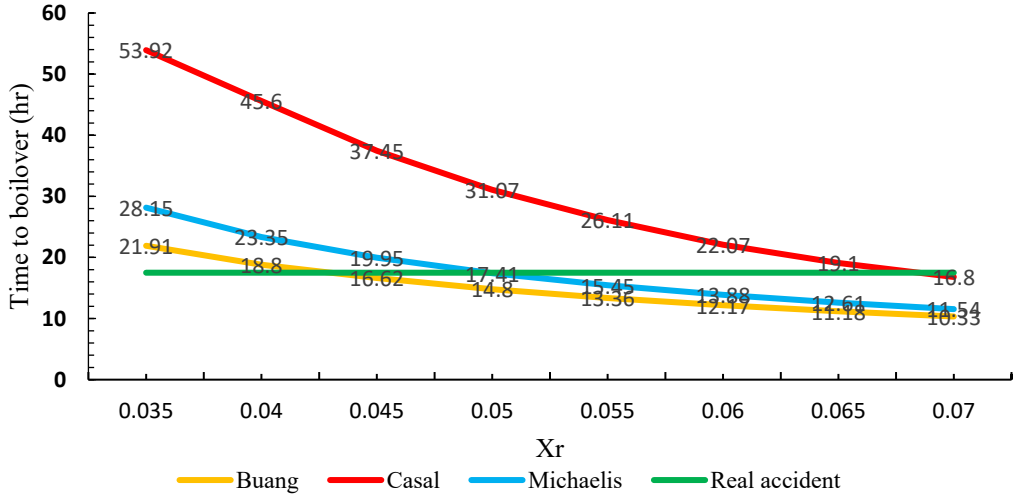
جدول ۷ـ مقایسهٔ درصد خطای پیش بینی مدل های مختلف برای حوادث

	درصد خطای پیش‌بینی زمان Boilover					
	بوانگ	کازال	کانگ	تان	سیا	میکائیل
حادثهٔ پالایشگاه کزچویک	۳/۹۴	۱۴۴/۴	۳۰/۰۵	۶/۱۱	۸/۵۷	۱۵/۷۷
حادثهٔ تاکوا	۳/۰۴	۵۰/۷۲	۴/۴۸	۱۶/۶۴	۳۳/۴۴	۹/۷۶
حادثهٔ پالایشگاه آموکو	۱۱/۳۹	۶۸/۴۵	۲۶/۲۶	۲۸/۵۲	۳/۵۴	۵/۲۸

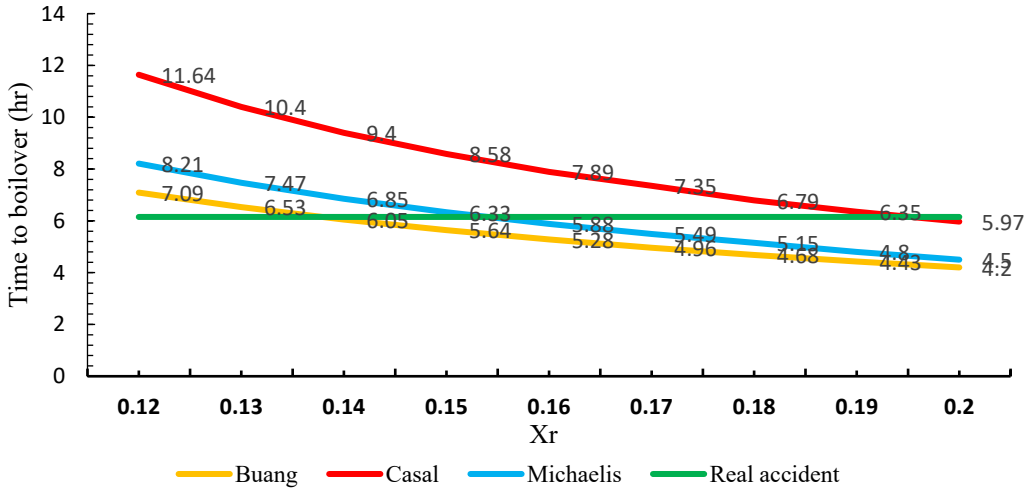


شکل ٤ـ زمان وقوع Boilover حادثهٔ پالایشگاه آموکو برای دامنه ای از کسر حرارتی بازتابی

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]



شکل ۵ـ زمان وقوع Boilover حادثهٔ پالایشگاه کزچویک برای دامنه ای از کسر حرارتی بازتابی



شکل ٦ـ زمان وقوع Boilover حادثهٔ پالایشگاه تاکوا برای دامنه ای از کسر حرارتی بازتابی

برای رخداد پالایشگاه آموکو برابر ۱۱/۳۹، ۵/۲۸، ۲۸/۵۲، ۳/۵۴، ۲۶/۲۶ و ۶۸/۴۵ است (جدول ۷). براساس نتایج، روابط میکائیل و بوانگ برآورده دقیق تری از زمان وقوع Boilover دارند.

نتایج مدل‌های تجربی بوانگ و میکائیل با کسر بازتابی بین ۳/۵ تا ۵٪ برابر با زمان دقیق وقوع Boilover در حادثهٔ پالایشگاه آموکو است؛ درحالی که این مقدار برای معادلهٔ کازال نزدیک ۷٪ است (شکل ۴). نتایج برای حادثهٔ پالایشگاه کزچویک نیز مقادیر مشابه حادثهٔ آموکو است (شکل ۵).

برای حادثهٔ نیروگاه برق تاکوا نیز مقدار گرمای بازتابی به سطح سوخت برای بوانگ و میکائیل بین ۱۴ تا ۱۵ و برای کازال نزدیک ۱۸٪، نتایجی برابر با زمان Boilover واقعی ارائه می‌دهد (شکل ۶).

بحث و نتیجه‌گیری

هنگام مواجهه با حریق مخازن، چالش اساسی فرماندهان حاضر در صحنهٔ حادثه پیش بینی احتمال وقوع یا عدم وقوع Boilover به‌عنوان یکی از خطرناک‌ترین سناریوهای آتش‌سوزی مخازن است. پیش‌بینی دقیق زمان وقوع Boilover برای توسعهٔ استراتژی مدیریت حریق مخازن با پتانسیل وقوع Boilover بسیار مهم است. در این مطالعه، ابتدا مدل های ارائه‌شده برای پیش‌بینی زمان وقوع Boilover از منابع معتبر شناسایی شد. سپس

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

مدل‌ها با استفاده از نتایج مطالعهٔ آزمایشگاهی و داده‌های به‌دست‌آمده از پیش‌بینی زمان وقوع Boilover سه حادثهٔ واقعی با هم مقایسه و درصد خطای هرکدام در هر دو شرایط آزمایشگاهی و واقعی برآورد شد.

مدل تان زمان وقوع Boilover را بیشتر از زمان واقعی برآورد کرد. مدل تان فقط از دو پارامتر قطر و ضخامت سوخت برای پیش بینی زمان وقوع Boilover استفاده کرده است و سایر پارامترهای اثرگذار بر زمان Boilover، مانند شار حرارتی بازتابی به سطح سوخت، دمای ناحیهٔ داغ، سرعت گسترش ناحیهٔ داغ و ویژگی های سوخت در مدل لحاظ نشده‌اند. در پژوهش یانگ برای پیش‌بینی زمان وقوع Boilover با استفاده از دو مدل تان و مدل سیا نیز، این دو مدل زمان وقوع Boilover را بیش از مقدار واقعی پیش‌بینی کردند که با یافته‌های مطالعهٔ حاضر سازگاری دارد. (۳۴) مدل‌های کانگ و سیا زمان Boilover را بسیار کمتر از زمان واقعی برآورد کردند. مدل کانگ نشان می دهد زمان شروع Boilover به ضخامت لایهٔ ابتدایی سوخت و نرخ سوختن پایدار وابسته است که عمدتاً متأثر از قطر مخزن هستند. شار حرارتی منتقل‌شده به سطح سوخت که باعث تشکیل ناحیهٔ داغ و شروع Boilover می شود، در این مدل لحاظ نشده و پیشنهادی برای محاسبهٔ سرعت ناحیهٔ داغ ارائه نگردیده است.

در تحقیق کانگ که مطالعه‌ای آزمایشگاهی جهت تعیین ویژگی‌های Boilover بود، مدل کانگ برای پیش‌بینی Boilover ارائه شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که زمان وقوع Boilover به‌صورت خطی با افزایش ضخامت اولیهٔ ضخامت سوخت و کاهش قطر حریق استخری، زمان Boilover افزایش می‌یابد. مدل کانگ براساس کار آزمایشگاهی در اندازهٔ کوچک توسعه یافته است. بنابراین برای مخازن با قطر بزرگ‌تر مورد استفاده قرار نگرفته و نیازمند مطالعهٔ بیشتر است. (۳۶)

مدل سیا رابطهٔ ساده‌ای برای پیش‌بینی زمان وقوع Boilover براساس ضخامت اولیهٔ لایه سوخت در مخزن و سرعت لایهٔ داغ پیشنهاد داده است. تعیین سرعت لایهٔ داغ عامل مهمی برای این مدل است. مدل سیا نیز براساس ضخامت لایهٔ سوخت و سرعت موج گرما توسعه یافته و سایر پارامترهای اثر گذار در زمان Boilover (چگالی، شار گرمایی منتقل‌شده به سطح سوخت و دمای ناحیهٔ داغ) در مدل لحاظ نشده است. (۳۴)

در حریق تمام سطح مخازن اتمسفریک، بخشی از کل گرمای آزادشده از شعله ها از طریق تابش به سطح سوخت بازتاب می شود. بخشی از این گرما سبب افزایش دمای سوخت و تبخیر ترکیبات با نقطهٔ جوش سبک تر می شود. بخشی از این گرما نیز باعث شکل گیری و گسترش ناحیهٔ داغ می شود. کسر گرمای بازتابی به سطح سوخت برای تعیین شار حرارتی منتقل‌شده به سطح سوخت بسیار مهم است. طبق مطالعات، تقریباً ۵٪ از کل انرژی شعلهٔ آتش از طریق حرارت تابشی به سطح سوخت منعکس می‌شود (X_{ri}) و درصد کمی از این مقدار در تشکیل ناحیهٔ داغ شرکت می‌کند. (۲۶، ۳۱، ۴۰ـ۴۱) با توجه به مشخص نبودن مقدار دقیق حرارت تابشی منعکس‌شده به سطح سوخت، زمان وقوع Boilover برای مطالعات آزمایشگاهی و حوادث واقعی برای دامنه ای از کسر گرمای بازتابی محاسبه شد.

متغیر مقدار دقیق حرارت تابشی منعکس‌شده به سطح سوخت، در مدل‌های بوانگ، کازال و میکائیل لحاظ شده است. با توجه به اینکه هنوز روشی برای محاسبهٔ دقیق کسر گرمای بازتابی به سطح سوخت توسعه نیافته است، نتایج این مطالعه نشان داد با به‌کار بردن روش بوانگ و میکائیل به‌طور هم‌زمان و با استفاده از کسر گرمای بازتابی مختلف به سطح سوخت می‌توان زمان وقوع Boilover را دقیق‌تر پیش‌بینی کرد. بوانگ در مطالعهٔ خود مدل پیش‌بینی زمان Boilover را برای پیش‌بینی زمان Boilover سه حادثهٔ واقعی به‌کار برد که با استفاده از کسر گرمای بازتابی به سطح سوخت مختلف توانست به‌طور قابل قبولی زمان وقوع Boilover را پیش‌بینی کند. مدل بوانگ توسعه یافتهٔ مدل میکائیل و همکاران بود. (۸)

نتایج مطالعهٔ حاضر نشان داد می‌توان با استفاده از روش‌های پیش‌بینی زمان وقوع Boilover با درصد خطای قابل قبولی زمان وقوع Boilover را پیش‌بینی کرد که برای پیش‌بینی دقیق زمان Boilover با روابط تجربی، تعیین دقیق انرژی حرارتی منعکس‌شده از شعله به سطح سوخت و همچنین سرعت لایهٔ داغ مهم‌ترین عامل محسوب می‌شوند. (۸) مدل‌های مورد مطالعه دارای درصد خطای مختلفی در پیش‌بینی زمان وقوع پدیدهٔ Boilover بودند. مقایسهٔ مدل‌های مختلف پیش بینی زمان وقوع Boilover با استفاده از داده های آزمایشگاهی و با اطلاعات به‌دست‌آمده از حوادث Boilover مشخص نمود که مدل های بوانگ و میکائیل با درصد خطای کمتر از سایر مدل ها زمان وقوع Boilover را پیش‌بینی

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

می‌کنند. با توجه به وابستگی سه رابطهٔ بوانگ، میکائیل و کازال به کسر گرمای بازتابی به سطح سوخت، توسعهٔ روشی برای محاسبهٔ کسر گرمای بازتابی به سطح سوخت که در شکل گیری ناحیهٔ داغ شرکت دارد، باعث دستیابی به نتایج قابل اعتماد تر می شود.

نتایج این مطالعه می‌تواند برای توسعهٔ استراتژی اطفای حریق مؤثرتر و ایمن‌تر مخازن با پتانسیل وقوع Boilover مورد استفاده قرار گیرد. همچنین به‌کار بردن مدل‌ها برای محدوده‌ای از مقادیر گرمای بازتابی نتایج دقیق‌تری از زمان Boilover را ارائه داد که می تواند به‌منظور توسعهٔ رابطه ای برای پیش‌بینی زمان وقوع Boilover دقیق تر در مطالعات آینده به‌کار رود.

از محدودیت‌های مطالعهٔ حاضر نبود داده‌های آزمایشگاهی Boilover بر روی مخازن با قطر بزرگ و همچنین امکان‌پذیر نبودن کنترل دقیق برخی از پارامترهای تأثیرگذار در وقوع Boilover در حوادث واقعی بوده است.

References

1. Ahmadi O, Mortazavi SB, Mahabadi HA. Review of Atmospheric Storage Tank Fire Scenarios: Costs and Causes. Journal of Failure Analysis and Prevention. 2020: 1-22.
2. Health and Safety Executive U. The Buncefield Incident 11 December 2005, The final report of the Major Incident Investigation Board Volume 1 and 2 2011.
3. Caribbean Petroleum Refining Tank Explosion and Fire: Chemical Safety Board,USA; 2011 [http://www.csb.gov/].
4. Oil Industry Safety Directorate MoPaNGM, Government of India. IOC Fire Accident Investigation Report 2011.
5. Chang JI, Lin C-C. A study of storage tank accidents. Journal of loss prevention in the process industries. 2006; 19(1): 51-9.
6. Mansour KA. Fires in large atmospheric storage tanks and their effect on adjacent tanks: © Khalid Mansour; 2012.
7. Argyropoulos C, Christolis M, Nivolianitou Z, Markatos N. A hazards assessment methodology for large liquid hydrocarbon fuel tanks. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2012; 25(2): 329-35.
8. Buang A. Boilover in liquid hydrocarbon tank fires: © Azizul Buang; 2014.
9. Phillips CA, Rogers III IP. Storage tank fire supression system. Google Patents; 2015.
10. Broeckmann B, Schecker H-G. Heat transfer mechanisms and boilover in burning oil-water systems. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 1995; 8(3): 137-47.
11. Koseki H, Natsume Y, Iwata Y, Takahashi T, Hirano T. A study on large-scale boilover using crude oil containing emulsified water. Fire safety journal. 2004; 39(2): 143-55.
12. Stambaugh BA, Badger SR. Oil Fire and Boil Over Attenuation Using Buoyant Glass Materials. Google Patents; 2011.
13. Hristov J, Planas-Cuchi E, Arnaldos J, Casal J. Accidental burning of a fuel layer on a waterbed: a scale analysis of the models predicting the pre-boilover time and tests to published data. International journal of thermal sciences. 2004; 43(3): 221-39.
14. Hall H. Oil tank fire boilover. Mechanical Engineering. 1925; 47: 540.
15. Arai M, Saito K, Altenkirch R. A Study of Boilover in Liquid Pool Fires Supported on Water Part I: Effects of a Water Sublayer on Pool Fires. Combustion Science and Technology. 1990; 71(1-3): 25-40.
16. Babrauskas V. Estimating large pool fire burning rates. Fire technology. 1983; 19(4): 251-61.
17. Inamura T, Saito K, Tagavi K. A study of boilover in liquid pool fires supported on water. Part II: Effects of in-depth radiation absorption. Combustion science and technology. 1992; 86(1-6): 105-19.
18. Persson H, Lönnermark A. Tank Fires-Review of fire incidents 1951-2003. 2004.
19. Garo J, Vantelon J, Fernandez-Pello A, editors. Boilover burning of oil spilled on water. Symposium (International) on Combustion; 1994: Elsevier.
20. Koseki H. Boilover and crude oil fire. Applied Fire Science. 1994; 3(3): 243.
21. Garo J-P, Koseki H, Vantelon J-P, Fernandez-Pello C. Combustion of liquid fuels floating on water. Thermal Science. 2007; 11(2): 119-40.
22. Rathnayaka S, Khan F, Amyotte P. SHIPP methodology: Predictive accident modeling approach. Part II. Validation with case study. Process safety and environmental protection. 2011; 89(2): 75-88.
23. (RPI) ePI. LASTFIRE – Large Atmospheric Tank FIRE. 2007.
24. (RPI) RPI. oilover Study PHASE 1 – Preliminary Test Series, Report for LASTFIRE Update Group. 2004.
25. (RPI) RPI. Boilover Study PHASE 4, Report for LASTFIRE Update Group. 2006.
26. Hasegawa K. Experimental study on the mechanism of hot zone formation in open-tank fires. Fire Safety Science. 1989; 2: 221-30.
27. Koseki H, Kokkala M, Mulholland GW. Experimental study of boilover in crude oil fires. Fire safety science. 1991; 3: 865-74.
28. Garo J, Vantelon J. Thin layer boilover of pure or multicomponent fuels. Prevention of hazardous Fires and Explosions: Springer; 1999. p. 167-82.

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]

29. Koseki H, Natsume Y, Iwata Y, Takahashi T, Hirano T. A study on large-scale boilover using crude oil containing emulsified water. Fire safety journal. 2003; 38(8): 665-77.
30. Shaluf IM, Abdullah SA. Floating roof storage tank boilover. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2011; 24(1): 1-7.
31. Koseki H. Large scale pool fires: results of recent experiments. Fire Safety Science. 2000; 6: 115-32.
32. Ahmadi O, Asilian H. Prediction of fireball consequences caused by Boilover occurrence in the atmospheric storage tanks. Journal of Occupational Hygiene Engineering. 2019: 1-8.
33. Ahmadi O, Mortazavi SB, Pasdarshahri H, Mahabadi HA, Sarvestani K. Modeling of boilover phenomenon consequences: Computational fluid dynamics (CFD) and empirical correlations. Process Safety and Environmental Protection. 2019; 129: 25-39.
34. Yang DW, Zhang PH, Chen BZ, editors. Boilover Starting Time of Small-Scale Crude Oil Tank. Applied Mechanics and Materials; 2013: Trans Tech Publ.
35. Casal J. Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants 2008.
36. Kong D, Liu P, Zhang J, Fan M, Tao C. Small scale experiment study on the characteristics of boilover. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2017; 48: 101-10.
37. Wu G, Baraldo M, Furlanut M. Calculating percentage prediction error: a user's note. Pharmacological research. 1995; 32(4): 241-8.
38. Bennett JO, Briggs WL, Badalamenti A. Using and understanding mathematics: A quantitative reasoning approach: Pearson Addison Wesley Reading, MA; 2008.
39. Hamins A, Klassen M, Gore J, Kashiwagi T. Estimate of flame radiance via a single location measurement in liquid pool fires. Combustion and flame. 1991; 86(3): 223-8.
40. LASTFIRE. Large Atmospheric Storage Tank Fires. 2007.
41. Garo J, Gillard P, Vantelon J, Fernandez-Pello A. Combustion of liquid fuels spilled on water. Prediction of time to start of boilover. Combustion science and technology. 1999; 147(1-6): 39-59.

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-21]