



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

**Omran Ahmadi**, PhD, Department of Occupational Health and Safety Engineering, Faculty of Medical Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

**Kazem sarvestani**, MSc, Department of Occupational Health and Safety Engineering, Faculty of Medical Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

✉ **Seyed Bagher Mortazavi**, (\*Corresponding author), Professor, Department of Occupational Health and Safety Engineering, Faculty of Medical Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. [mortazav@modares.ac.ir](mailto:mortazav@modares.ac.ir)

**Hassan Asilian mahabadi**, Associate Professor, Department of Occupational Health and 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

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, Tacoma 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 Tacoma 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

values of Amoco accident were obtained. In the Tacoma 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**



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

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

### چکیده

**زمینه و هدف:** Boilover یکی از خطرناک‌ترین پدیده‌های مرتبط با آتش‌سوزی مخازن ذخیره نفت خام (مخازن اتمسفریک) است. بسیاری از آتش‌سوزی‌های مخازن هیدروکربنی مایع با توجه به فاکتورهای مختلف، از جمله نوع مواد ذخیره‌شده در آن، می‌تواند به Boilover منجر شوند. پدیده Boilover باعث تشدید حادثه می‌شود و از جمله واکنش دهندگان به حادثه، به‌ویژه آتش‌نشان‌ها، را در معرض خطر جدی قرار می‌دهد. بنابراین پیش‌بینی زمان وقوع Boilover در حریق مخازن حاوی سوخت‌های با پتانسیل وقوع Boilover، برای تخلیه به‌هنگام افراد در معرض خطر از صحنه حادثه و اتخاذ تاکتیک‌های مناسب فرماندهی حادثه ضروری است. در دسترس بودن اطلاعات دقیق زمان وقوع Boilover نقش مهمی در تصمیم‌فرماندهی حادثه و اطفای بموقع آتش‌سوزی مخازن دارد. هدف از این مطالعه پیش‌بینی زمان وقوع Boilover در آتش‌سوزی مخازن ذخیره نفت خام با استفاده از مدل‌های تجربی است.

**روش بررسی:** پژوهش حاضر از نوع توصیفی - تحلیلی است. ابتدا روش‌های مختلف ارائه‌شده برای پیش‌بینی زمان وقوع Boilover از میان مطالعات قبلی شناسایی شد. برای این منظور در موتورهای جست‌وجوی گوگل اسکولار، اسکوپس، پایمد، ساینس دایرکت با استفاده از کلیدواژه‌های مناسب جست‌وجو انجام شد. ابتدا مدل‌های تجربی ارائه‌شده برای پیش‌بینی زمان وقوع Boilover شناسایی شد. سپس از این مدل‌ها برای پیش‌بینی زمان وقوع Boilover در یک مطالعه آزمایشگاهی و سه حادثه واقعی استفاده شد. نتایج پیش‌بینی مدل‌ها با داده‌های مطالعه 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 محاسبه 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 در نظر می‌گیرند، محاسبه شد.

**یافته‌ها:** در نهایت ۶ مدل مختلف برای پیش‌بینی زمان Boilover شناسایی و انتخاب شد. براساس نتایج، مدل‌های ارائه‌شده به‌وسیله بوانگ و میکائیل به‌ترتیب با درصد خطای ۶٪ و ۱۰٪ برای حوادث واقعی، و ۲۶٪ و ۱۷٪ برای مطالعات آزمایشگاهی، نسبت به بقیه مدل‌ها، زمان وقوع Boilover را دقیق‌تر پیش‌بینی کردند.

**نتیجه‌گیری:** براساس نتایج، مدل‌های ارائه‌شده به‌وسیله بوانگ و میکائیل با درصد خطای کمتر از سایر مدل‌ها، زمان وقوع Boilover را پیش‌بینی کردند. با توجه به وابستگی سه رابطه بوانگ و میکائیل و کازال به کسر گرمایی بازتابی به سطح سوخت، توسعه روشی برای محاسبه کسر گرمایی بازتابی به سطح سوخت که در شکل‌گیری ناحیه داغ شرکت دارد، باعث دستیابی به نتایج قابل‌اعتمادتری می‌شود. نتایج این مطالعه برای توسعه استراتژی اطفای حریق مؤثرتر و ایمن‌تر مخازن با پتانسیل وقوع Boilover کاربرد خواهد داشت. همچنین به‌کار بردن مدل‌ها برای یک محدوده‌ای از مقادیر گرمایی بازتابی نتایج دقیق‌تری از زمان Boilover ارائه داد که می‌تواند به‌منظور توسعه رابطه‌ای برای پیش‌بینی زمان وقوع Boilover دقیق‌تر در مطالعات آینده به‌کار گرفته شود.

**تعارض منافع:** گزارش نشده است.

**منبع حمایت‌کننده:** ندارد.

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

## مقدمه

مخازن ذخیره در شرکت‌های نفت، پالایش و پخش و پتروشیمی برای نگهداری حجم عظیمی از مواد خطرناک استفاده می‌شوند. حوادث مخازن هیدروکربنی مایع در صنعت نفت به دلیل ماهیت قابلیت اشتعال و حجم زیاد مواد محتوی آن‌ها، خسارات زیادی در پی داشته (۱) که نمونه بارز آن حادثه 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 واقعه آتش‌سوزی پایانه‌های ذخیره نفتی هرثفوردشایر (۲)، حادثه تأسیسات ذخیره‌سازی نفت بایامون در پورتوریکو (۳) و رخداد مربوط به آتش‌سوزی انبارهای نفتی جیپور هند اشاره کرد. (۴) براساس مطالعه چنگ و همکاران بر روی حوادث مخازن جهان در طول ۴۰ سال گذشته، ۲۴۲ حادثه در مخازن اتفاق افتاده که ۱۴۵ مورد از آن‌ها در 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) برپایه نتایج تحقیقات (۶، ۷)، سناریوهای آتش‌سوزی حوادث مخازن اتمسفریک را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

۱. آتش‌سوزی ناحیه نشست‌بند مخازن؛

۲. آتش‌سوزی مواد ریخته‌شده روی سقف مخازن؛

۳. آتش‌سوزی تمام سطح مخازن؛

۴. آتش‌سوزی ناحیه باندوال؛

۵. انفجار پانتون؛

۶. Boilover.

Boilover یکی از خطرناک‌ترین پدیده‌های مرتبط با آتش‌سوزی مخازن ذخیره نفت خام (مخازن اتمسفریک) است. در حادثه نیروگاه برق تاکوا ونزوئلا، شکل‌گیری توپ آتش به دنبال 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 حادثه مخزن نفت خام در پالایشگاه کزچویک در لهستان که حاوی نفت خام بود، وقوع Boilover نفت در حال سوختن را به همه جهات تا ۲۵۰ متر دورتر از مخزن پرتاب کرد. بر اثر وقوع این Boilover، ۳۰ نفر جان باختند و ۱۰۰ نفر دچار آسیب شدند.

در حادثه آتش‌سوزی مخزن پالایشگاه آموکو در میل‌فورد هاوِن، Boilover عظیم رخ داد و نفت در حال 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، از جمله 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 محدوده دمای جوش مختلف دچار حریق می‌شوند، فرایند تقطیر در سطح سوخت رخ می‌دهد. ترکیبات سبک‌تر در سطح سوخت تبخیر می‌شوند و شعله‌های حریق را تغذیه می‌کنند. بازتاب گرما از شعله به سطح سوخت (عمدتاً از طریق تابش) باعث تبخیر بیشتر ترکیبات سبک‌تر سوخت می‌شود و یک لایه هم‌دما و چگال موسوم به لایه داغ در پایین سطح مایع سوزان تشکیل می‌گردد. در صورتی که سرعت افزایش ضخامت لایه داغ به سمت پایین مخزن بزرگ‌تر از سرعت پایین آمدن سطح سوخت باشد، موج گرما (لایه داغ) به سمت پایین مخزن منتشر می‌شود. اگر مخزن محتوی یک لایه آب یا یک لایه معلق امولسیون آب و نفت درون سوخت باشد، در نقطه‌ای مشخص، موج گرما (در دمای بالاتر از دمای جوش آب) به این زیرلایه آب خواهد رسید. رسیدن موج گرما به آب باعث تبخیر اولیه بخشی از آب خواهد شد. توربلانس ایجادشده به دنبال تبخیر اولیه آب باعث اختلاط بیشتر دو لایه آب و سوخت می‌شود و به تبخیر گسترده آب می‌انجامد. عملاً به‌طور آبی مقدار عظیمی بخار ایجاد خواهد شد با حجم ویژه ۱۶۰۰ برابر آب که سبب فوران، بیرون رانی مایعات داغ و افزایش اندازه شعله‌های آتش خواهد شد. (۱۰)

(۱۱) پدیده Boilover می‌تواند باعث تشدید حادثه شود و واکنش دهندگان به حادثه، به‌ویژه آتش‌نشان‌ها، را در معرض خطر جدی قرار دهد. ترس از وقوع Boilover چه بسا عملکرد و تصمیمات فرمانده حادثه و آتش‌نشان‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. (۱۲، ۱۳) بنابراین پیش‌بینی زمان وقوع Boilover در حریق مخازن حاوی سوخت‌های با پتانسیل وقوع Boilover، برای تخلیه بموقع افراد در معرض خطر از صحنه حادثه و اتخاذ تاکتیک‌های مناسب فرماندهی حادثه، ضرورت دارد.

علاوه بر حریق تمام سطح مخزن، محققان شرط‌های زیادی را برای وقوع پدیده Boilover برشمرده‌اند. در

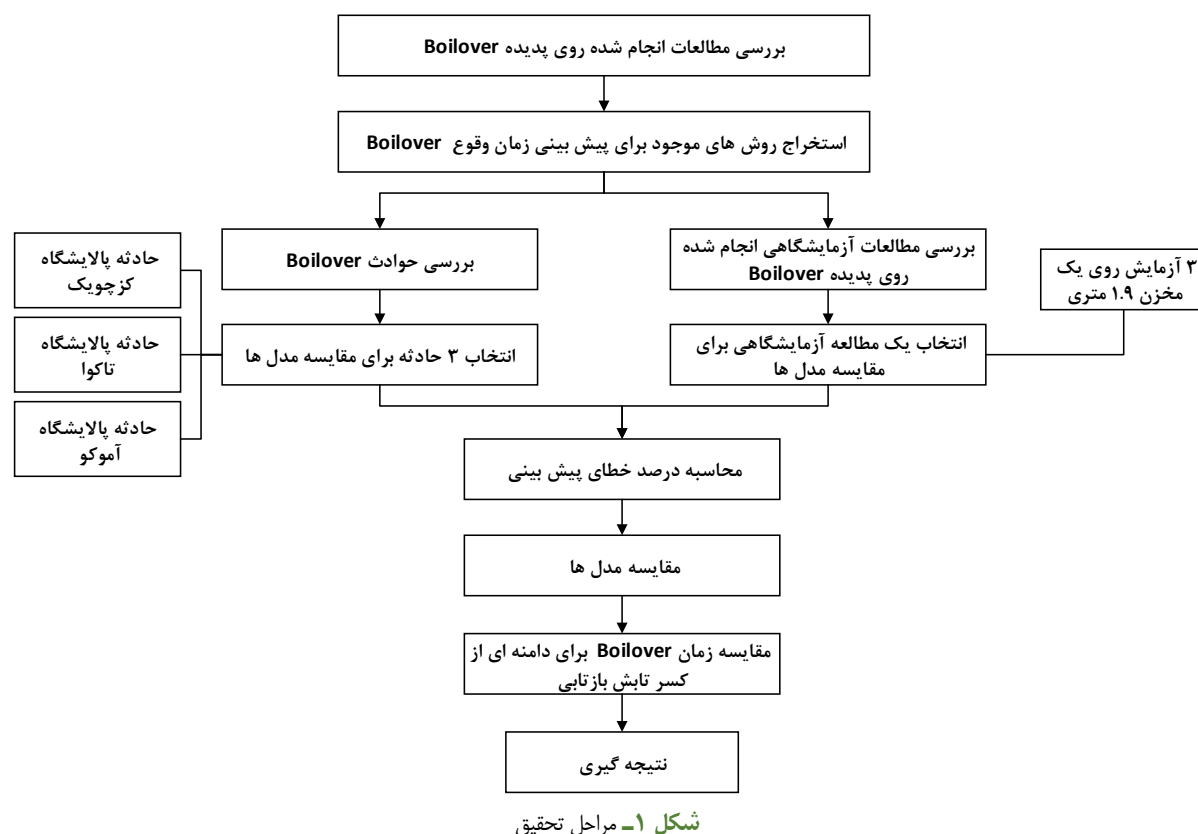
وقوع Boilover تعیین سرعت موج گرما یا همان ناحیه داغ است. شالوف و همکاران یک آزمایش تجربی برای تعیین سرعت گسترش ناحیه داغ به سمت کف مخزن انجام دادند. براساس تغییرات پروفایل دمای اندازه‌گیری شده در سوخت، سرعت گسترش ناحیه داغ تقریباً  $mm/s$   $0/1$  برآورد شد. (۳۰) کاسوکی در یک آزمایش تجربی، میزان سوختن و سرعت گسترش ناحیه 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 ناحیه داغ، بیشتر است؛ ولی برای قطرهای بزرگ‌تر این نسبت تقریباً ثابت است. (۳۱) روش‌های مختلفی با در نظر گرفتن مواردی مانند انرژی دریافتی از شعله، ارتفاع سطح سوخت، میانگین نقطه جوش سوخت، دمای ذخیره 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 (۳۲-۳۳)، در مطالعه 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 - تحلیلی است. ابتدا روش‌های مختلف ارائه‌شده برای پیش‌بینی 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. در نهایت ۶ مدل مختلف برای پیش‌بینی زمان Boilover شناسایی و انتخاب شد. خلاصه اطلاعات مربوط به مدل‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

در مرحله بعد، تحقیقات آزمایشگاهی انجام‌شده درباره زمان وقوع Boilover بررسی شد. در نهایت مطالعه آزمایشگاهی کاسوکی و همکاران در سال ۲۰۰۳ روی مخازن با قطر  $1/9$  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 لایه آب و سوخت متفاوت در مطالعه کاسوکی و همکاران انجام شده است. در آزمایش شماره (۴) بدلیل صفر بودن

مطالعه تجربی که هال با استفاده از مخازن با قطرهای متفاوت و سوخت‌های گوناگون انجام داد، وجود زیرلایه آب، شکل‌گیری ناحیه داغ و سوخت مایع با ویسکوزیته بالا سه شرط ضروری برای وقوع پدیده Boilover شناخته شد. (۱۴) علاوه بر این سه عنصر، محققان مختلفی شکل‌گیری حباب در لایه مشترک آب - نفت را شرط ضروری برای وقوع پدیده Boilover دانسته‌اند. (۱۵-۱۸) در آزمایش‌های تجربی کاسوکی مشخص شد که بالاتر بودن دمای ناحیه داغ از نقطه جوش آب و بالا بودن سرعت رشد ناحیه داغ از سرعت نرخ سوختن سوخت نیز از عناصر ضروری برای وقوع Boilover است. (۱۹-۲۰) بعضی مطالعات هسته‌زایی آب در ناحیه مشترک آب - سوخت را نیز عنصر ضروری برای وقوع Boilover معرفی کرده‌اند. (۱۹، ۲۱) بنابراین همه مخازن درگیر حریق تمام سطح منجر به پدیده Boilover نمی‌شوند. فقط سوخت‌هایی قابلیت Boilover را دارند که توانایی تشکیل ناحیه داغ را داشته باشند. شکل‌گیری ناحیه داغ برای سوخت‌های ترکیبی با دامنه وسیعی از نقطه جوش امکان‌پذیر است. (۱۴) مطالعات مختلف سوخت‌ها را به دو دسته تقسیم کردند: ۱. سوخت‌های تشکیل‌دهنده ناحیه داغ شامل سوخت‌های با دامنه وسیع از نقطه جوش مانند نفت خام، نفت کوره و مخلوط دیزل و بیودیزل و ۲. سوخت‌هایی که ناحیه داغ تشکیل نمی‌دهند شامل سوخت‌هایی که نقطه جوش نزدیک به هم دارند مانند سوخت‌های تصفیه‌شده و خالص، حلال‌ها و بیودیزل. (۱۰، ۲۲-۲۶) آزمایش دیگری که کاسوکی و همکاران انجام دادند، مشخص نمود که شدت و زمان Boilover با ضخامت اولیه سوخت رابطه مستقیم دارند. (۲۷) زمان شروع Boilover به صورت خطی با ضخامت لایه اولیه 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  $3/0\%$  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 لایه سوخت و کاهش ضخامت لایه آب افزایش یافت و سرعت پایه ناحیه داغ ۱۰ برابر سریع‌تر از مطالعات قبلی بود. (۲۹) یکی از فاکتورهای بسیار مهم برای تعیین دقیق زمان



داده‌های کامل برای مقایسه مدل‌های تجربی پیش‌بینی زمان Boilover انتخاب شد.

#### الف. حادثه پالایشگاه کزچویک لهستان

در ۲۶ ژوئن ۱۹۷۱ ساعت ۱۹:۵۰ صاعقه 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 در حال سوختن را به همه جهات تا ۲۵۰ متر دورتر از مخزن پرتاب کرد. در نتیجه وقوع این Boilover، ۳۳ نفر جان باختند. خلاصه اطلاعات مربوط به این حادثه در جدول ۳ ارائه شده است.

#### ب. حادثه نیروگاه برق تاکوا ونزوئلا

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

ضخامت زیرلایه آب، Boilover رخ نداد. برای مقایسه مدل‌های تجربی در پیش‌بینی زمان Boilover از نتایج آزمایش‌های شماره ۱، ۲ و ۳ استفاده شد. در مرحله بعد، برای کاهش خطا و تسریع محاسبات، تمام فرمول‌ها به نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۶ منتقل شد. زمان Boilover با استفاده از روش‌های مختلف برای ۳ آزمایش محاسبه شد (شکل ۱). درصد خطای پیش‌بینی هر یک از مدل‌ها با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد. (۳۷-۳۸)

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

در این رابطه: A مقدار به دست آمده از نتایج آزمایش، B مقدار پیش‌بینی شده با استفاده از مدل است.

با توجه به تأثیر زیاد ابعاد مخزن در زمان شروع Boilover، نتایج پیش‌بینی مدل‌های تجربی با اطلاعات به دست آمده از ۳ حادثه Boilover در مقیاس بزرگ‌تر نیز مقایسه شد. مجموعاً ۲۰ حادثه Boilover براساس جست‌وجو در پایگاه داده حوادث eMARS، CSB، FACTS، ARIA و سایر پایگاه داده معتبر و مطالعات قبلی شناسایی شد. از بین ۲۰ حادثه، ۳ رخداد به دلیل داشتن گزارش و

جدول ۱- مدل های ارائه شده برای پیش بینی زمان وقوع Boilover

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

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،

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

**جدول ۲- خلاصه نتایج آزمایش های کاسوکی و همکاران (۲۹)**

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

**جدول ۳- اطلاعات عمومی حادثه پالایشگاه کزچویک**

ظرفیت مخزن (m <sup>3</sup> )	۱۲۰۰۰	چگالی سوخت (kg/m <sup>3</sup> )	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 اولیه سوخت (m)	۱۱/۷	نرخ سوختن در واحد سطح (kg/m <sup>2</sup> .s)	۰/۰۴۱
زمان Boilover (hour)	۱۷:۳۰	گرمای احتراق (J/kg)	۰/۰۰۰۰۰۴۳۳
رطوبت نسبی (%)	۷۲	شار گرمایی بازتابی به سطح سوخت (W/m <sup>2</sup> )	۷۸۹۵۱/۷
میانگین نقطه جوش (K)	۶۲۵/۷	دمای ناحیه داغ (K)	۴۴۹/۷

**جدول ۴- اطلاعات عمومی حادثه تاکوا**

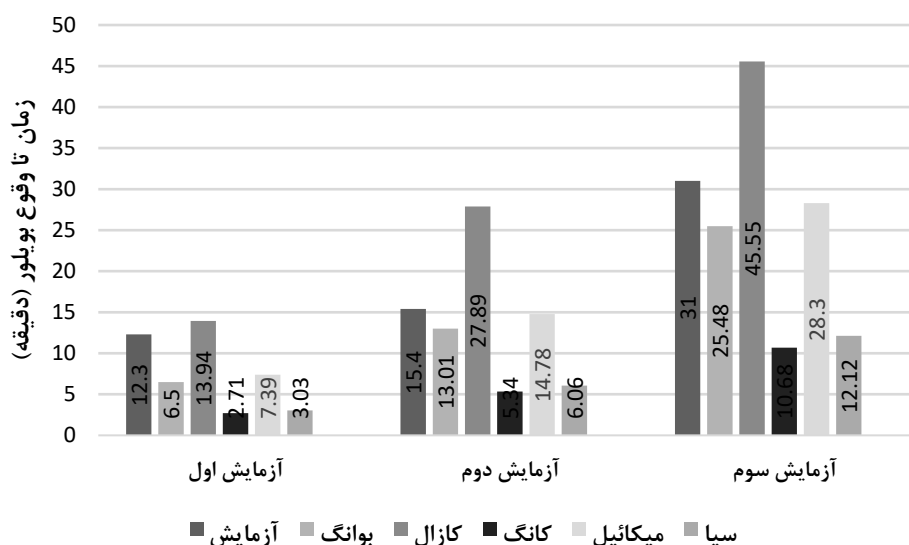
ظرفیت مخزن (m <sup>3</sup> )	۴۰۰۰۰	چگالی سوخت (kg/m <sup>3</sup> )	۸۹۰
قطر مخزن (m)	۵۵	گرمای نهان تبخیر (J/kg)	۱۳۴۵۶۸/۱
ارتفاع مخزن (m)	۱۷	گرمای ویژه (J/kg.K)	۴۲۶۲/۴
دمای ذخیره (K)	۳۳۳	نرخ سوختن (kg/s)	۸۳/۱
دمای محیط (K)	۲۹۸	نرخ بازگشت سطح سوخت (m/s)	۰/۰۰۰۰۳۹۳
ارتفاع اولیه سوخت (m)	۶/۱	نرخ سوختن در واحد سطح (kg/m <sup>2</sup> .s)	۰/۰۳۵
زمان Boilover (hour)	۶:۱۵	گرمای احتراق (J/kg)	۰/۰۰۰۰۰۴۳۳
رطوبت نسبی (%)	۷۵	شار گرمایی بازتابی به سطح سوخت (W/m <sup>2</sup> )	۲۰۷۰۵۷/۳
میانگین نقطه جوش (K)	۶۲۱/۶	دمای ناحیه داغ (K)	۵۲۳/۸۱

به نرخ شار گرمایی بازتابی از شعله به سوخت دارد و روشی برای محاسبه 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 آزاد شده از شعله ها به سطح سوخت بازتاب می شود. (۸، ۲۸) این

سقف مخزن یک پارچگی خود را از دست داد و غرق شد. افزایش دامنه حریق باعث شد تیم آتش نشانی محل حادثه را تخلیه کند. تقریباً ۱۳ ساعت بعد از شروع حریق، یک Boilover عظیم رخ داد و نفت در حال سوختن را به بیرون مخزن و تا ارتفاع ۹۰۰ متر پرتاب کرد. خلاصه اطلاعات حادثه به صورت خلاصه در جدول ۵ قابل مشاهده است. با توجه به اینکه زمان شروع Boilover وابستگی زیادی

جدول ۵- اطلاعات عمومی حادثه آموکو

۸۰۲	چگالی سوخت (kg/m <sup>3</sup> )	۹۴۰۰۰	ظرفیت مخزن (m <sup>3</sup> )
۱۸۹۲۱۰/۵	گرمای نهان تبخیر (J/kg)	۷۸	قطر مخزن (m)
۳۱۸۵	گرمای ویژه (J/kg.K)	۲۰	ارتفاع مخزن (m)
۲۲۵/۷	نرخ سوختن (kg/s)	۳۰۳	دمای ذخیره (K)
۰/۰۰۰۰۵۸۹	نرخ بازگشت سطح سوخت (m/s)	۲۹۳	دمای محیط (K)
۰/۰۴۷	نرخ سوختن در واحد سطح (kg/m <sup>2</sup> .s)	۱۰	ارتفاع اولیه سوخت (m)
۰/۰۰۰۰۰۰۴۳۳	گرمای احتراق (J/kg)	۱۳:۱۵	زمان Boilover (hour)
۹۲۰۳۶/۵	شار گرمایی بازتابی به سطح سوخت (W/m <sup>2</sup> )	۸۸	رطوبت نسبی (%)
۴۵۰/۲۱	دمای ناحیه داغ (K)	۵۳۶/۷	میانگین نقطه جوش (K)



شکل ۲- مقایسه نتایج پیش بینی مدل‌های تجربی با داده‌های آزمایش ۱/۹

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 پیش‌بینی داشت (جدول ۶). مدل سیا تا ۷۵ و معادله کانگ تا ۷۷٪ خطای پیش‌بینی داشت. این موضوع در جدول ۶ قابل مشاهده است.

نتایج پیش‌بینی مدل‌های تجربی با حوادث واقعی در شکل ۳ ارائه شده است. درصد خطای معادلات ارائه شده از سوی بوانگ، میکائیل، سیا، تان، کانگ و کازال برای حادثه پالایشگاه کزچویک به ترتیب برابر ۳/۹۴، ۱۵/۷۷، ۸/۵۷، ۶/۱۱، ۳۰/۰۵، ۱۴۴/۴، برای واقعه تاکوا به ترتیب برابر ۳/۰۴، ۹/۷۶، ۳۳/۴۴، ۱۶/۶۴، ۴/۴۸ و ۵۰/۷۲ و

مقدار برای مخازن با قطر کوچک (کمتر از ۵ متر) بین ۱ تا ۲٪ است. (۲۳-۲۵) نرخ گرمای بازتابی به سطح سوخت را می‌توان براساس کل انرژی آزادشده از حریق به‌دست آورد (معادله ۲).

$$\dot{Q} = X_r \dot{m}_s \Delta h_c \quad (1)$$

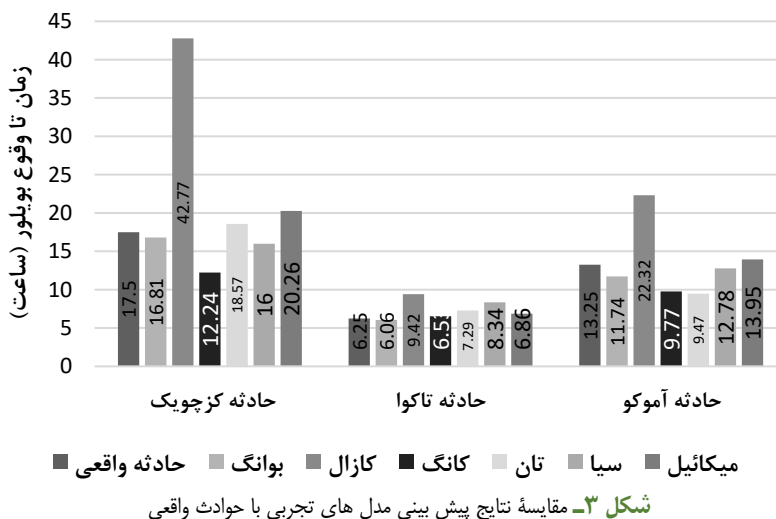
$X_r$  کسری از نرخ گرمای آزادشده است از شعله که به سطح سوخت برمی‌گردد؛  $\dot{m}_s$  (Kg/m<sup>2</sup>.s) نرخ سوختن و  $\Delta h_c$  (j/kg) ارزش حرارتی سوخت است. (۳۹)

## نتایج

شکل ۱ نتایج پیش‌بینی زمان Boilover با استفاده از مدل‌های تجربی برای مطالعه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. مدل ارائه شده توسط میکائیل و بوانگ به ترتیب

جدول ۶- مقایسه درصد خطای پیش‌بینی زمان وقوع Boilover با مدل‌های مختلف

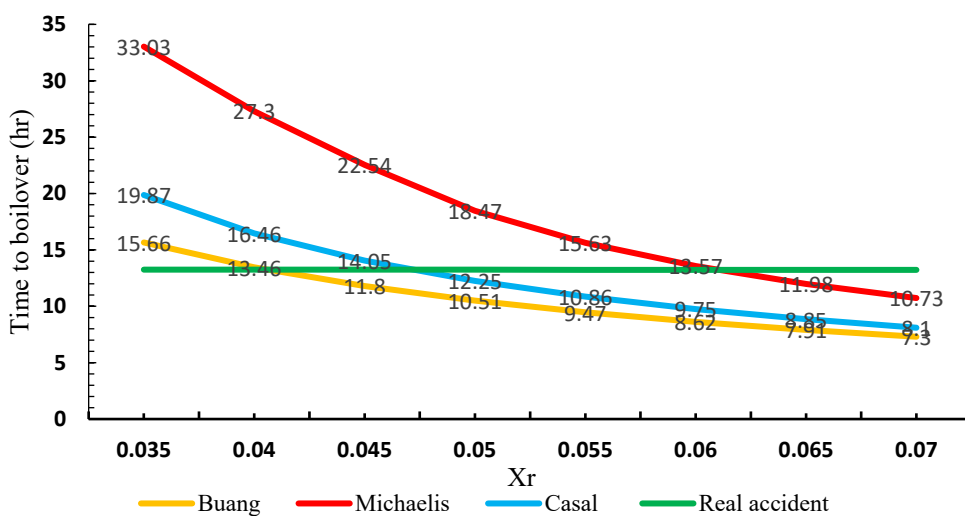
درصد خطای پیش‌بینی زمان Boilover						
میکائیل	سیا	تان	کانگ	کازال	بوانگ	
۳۹/۹۱	۷۵/۳۶	۶۱/۸۶	۷۷/۹۶	۱۳/۳۳	۴۷/۱۵	آزمایش اول
۴/۰۲	۶۰/۶۴	۲۹۱/۶۸	۶۵/۳۲	۸۱/۱	۱۵/۵۱	آزمایش دوم
۸/۷	۶۰/۹	۳۵۵/۳۸	۶۵/۵۴	۴۶/۹۳	۱۷/۸	آزمایش سوم



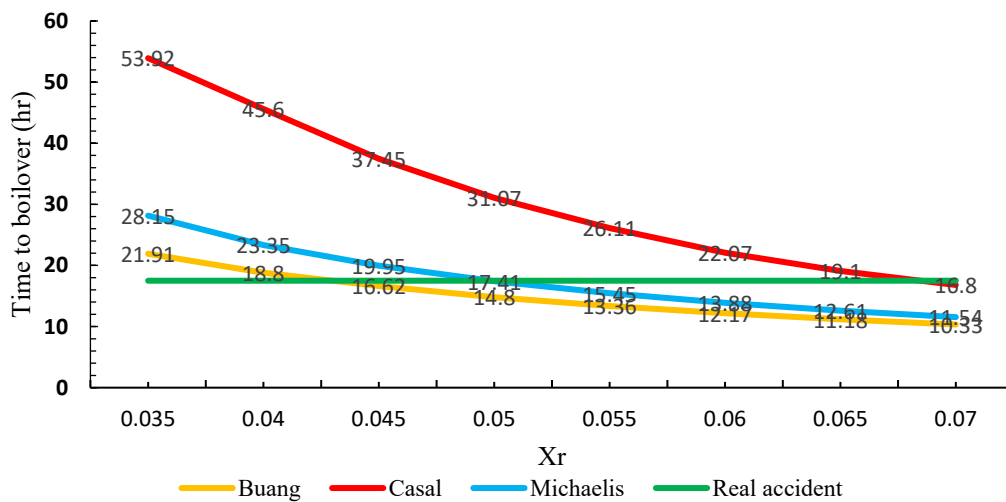
شکل ۳- مقایسه نتایج پیش‌بینی مدل‌های تجربی با حوادث واقعی

جدول ۷- مقایسه درصد خطای پیش‌بینی مدل‌های مختلف برای حوادث

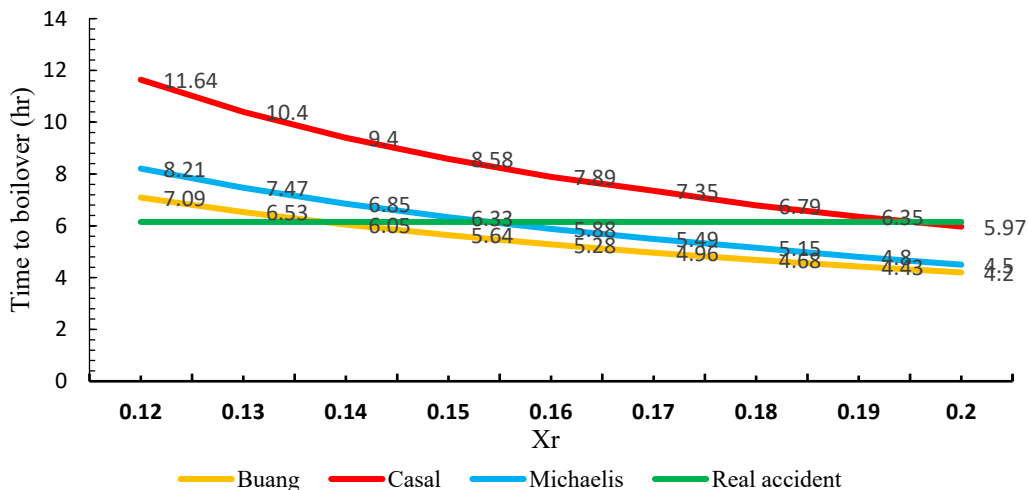
درصد خطای پیش‌بینی زمان Boilover						
میکائیل	سیا	تان	کانگ	کازال	بوانگ	
۱۵/۷۷	۸/۵۷	۶/۱۱	۳۰/۰۵	۱۴۴/۴	۳/۹۴	حادثه پالایشگاه کزچویک
۹/۷۶	۳۳/۴۴	۱۶/۶۴	۴/۴۸	۵۰/۷۲	۳/۰۴	حادثه تاکوا
۵/۲۸	۳/۵۴	۲۸/۵۲	۲۶/۲۶	۶۸/۴۵	۱۱/۳۹	حادثه پالایشگاه آموکو



شکل ۴- زمان وقوع Boilover حادثه پالایشگاه آموکو برای دامنه ای از کسر حرارتی بازتابی



شکل ۵- زمان وقوع Boilover حادثه پالایشگاه کزچوپک برای دامنه ای از کسر حرارتی بازتابی



شکل ۶- زمان وقوع Boilover حادثه پالایشگاه تاکوا برای دامنه ای از کسر حرارتی بازتابی

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 صحنه حادثه پیش‌بینی احتمال وقوع یا عدم وقوع Boilover به‌عنوان یکی از خطرناک‌ترین سناریوهای آتش‌سوزی مخازن است. پیش‌بینی دقیق زمان وقوع Boilover برای توسعه استراتژی مدیریت حریق مخازن با پتانسیل وقوع Boilover بسیار مهم است. در این مطالعه، ابتدا مدل‌های ارائه‌شده برای پیش‌بینی زمان وقوع Boilover از منابع معتبر شناسایی شد. سپس

برای رخداد پالایشگاه آموکو برابر ۱۱/۳۹، ۲۸/۵۲، ۲۸/۵۲، ۳/۵۴، ۲۶/۲۶ و ۶۸/۴۵ است (جدول ۷). براساس نتایج، روابط میکائیل و بوانگ برآورده دقیق‌تری 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 حادثه پالایشگاه آموکو است؛ درحالی‌که این مقدار برای معادله کازال نزدیک ۷٪ است (شکل ۴). نتایج برای حادثه پالایشگاه کزچوپک نیز مقادیر مشابه حادثه آموکو است (شکل ۵).

برای حادثه نیروگاه برق تاکوا نیز مقدار گرمای بازتابی به سطح سوخت برای بوانگ و میکائیل بین ۱۴ تا ۱۵ و

گرمای آزاد شده از شعله‌ها از طریق تابش به سطح سوخت بازتاب می‌شود. بخشی از این گرما سبب افزایش دمای سوخت و تبخیر ترکیبات با نقطه جوش سبک‌تر می‌شود. بخشی از این گرما نیز باعث شکل‌گیری و گسترش ناحیه داغ می‌شود. کسر گرمای بازتابی به سطح سوخت برای تعیین شار حرارتی منتقل شده به سطح سوخت بسیار مهم است. طبق مطالعات، تقریباً ۵٪ از کل انرژی شعله آتش از طریق حرارت تابشی به سطح سوخت منعکس می‌شود ( $X_{\text{R}}$ ) و درصد کمی از این مقدار در تشکیل ناحیه داغ شرکت می‌کند. (۲۶، ۳۱، ۴۰-۴۱) با توجه به مشخص نبودن مقدار دقیق حرارت تابشی منعکس شده به سطح سوخت، زمان وقوع Boilover برای مطالعات آزمایشگاهی و حوادث واقعی برای دامنه‌ای از کسر گرمای بازتابی محاسبه شد.

متغیر مقدار دقیق حرارت تابشی منعکس شده به سطح سوخت، در مدل‌های بوانگ، کزال و میکائیل لحاظ شده است. با توجه به اینکه هنوز روشی برای محاسبه 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 مطالعه خود مدل پیش‌بینی زمان Boilover را برای پیش‌بینی زمان Boilover سه حادثه 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 یافته مدل میکائیل و همکاران بود. (۸)

نتایج مطالعه 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 منعکس شده از شعله به سطح سوخت و همچنین سرعت لایه داغ مهم‌ترین عامل محسوب می‌شوند. (۸) مدل‌های مورد مطالعه دارای درصد خطای مختلفی در پیش‌بینی زمان وقوع پدیده Boilover بودند. مقایسه مدل‌های مختلف پیش‌بینی زمان وقوع Boilover با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و با اطلاعات به‌دست‌آمده از حوادث Boilover مشخص نمود که مدل‌های بوانگ و میکائیل با درصد خطای کمتر از سایر مدل‌ها زمان وقوع Boilover را پیش‌بینی

مدل‌ها با استفاده از نتایج مطالعه آزمایشگاهی و داده‌های به‌دست‌آمده از پیش‌بینی زمان وقوع Boilover سه حادثه واقعی با هم مقایسه و درصد خطای هر کدام 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 پیش‌بینی زمان وقوع Boilover استفاده کرده است و سایر پارامترهای اثرگذار بر زمان Boilover، مانند شار حرارتی بازتابی به سطح سوخت، دمای ناحیه داغ، سرعت گسترش ناحیه داغ و ویژگی‌های 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 مطالعه حاضر سازگاری دارد. (۳۴) مدل‌های کانگ و سیا زمان Boilover را بسیار کمتر از زمان واقعی برآورد کردند. مدل کانگ نشان می‌دهد زمان شروع Boilover به ضخامت لایه ابتدایی سوخت و نرخ سوختن پایدار وابسته است که عمدتاً متأثر از قطر مخزن هستند. شار حرارتی منتقل شده به سطح سوخت که باعث تشکیل ناحیه داغ و شروع Boilover می‌شود، در این مدل لحاظ نشده و پیشنهادی برای محاسبه سرعت ناحیه 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 اولیه ضخامت سوخت و کاهش قطر حریق استخری، زمان Boilover افزایش می‌یابد. مدل کانگ براساس کار آزمایشگاهی در اندازه کوچک توسعه یافته است. بنابراین برای مخازن با قطر بزرگ‌تر مورد استفاده قرار نگرفته و نیازمند مطالعه بیشتر است. (۳۶)

مدل سیا رابطه ساده‌ای برای پیش‌بینی زمان وقوع Boilover براساس ضخامت اولیه لایه سوخت در مخزن و سرعت لایه داغ پیشنهاد داده است. تعیین سرعت لایه داغ عامل مهمی برای این مدل است. مدل سیا نیز براساس ضخامت لایه سوخت و سرعت موج گرما توسعه یافته و سایر پارامترهای اثرگذار در زمان Boilover (چگالی، شار گرمایی منتقل شده به سطح سوخت و دمای ناحیه داغ) در مدل لحاظ نشده است. (۳۴)

در حریق تمام سطح مخازن اتمسفریک، بخشی از کل

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.

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

نتایج این مطالعه می‌تواند برای توسعه استراتژی اطفای حریق مؤثرتر و ایمن تر مخازن با پتانسیل وقوع Boilover مورد استفاده قرار گیرد. همچنین به کار بردن مدل‌ها برای محدوده‌ای از مقادیر گرمای بازتابی نتایج دقیق تری از زمان Boilover را ارائه داد که می‌تواند به منظور توسعه رابطه‌ای برای پیش‌بینی زمان وقوع Boilover دقیق تر در مطالعات آینده به کار رود.

از محدودیت‌های مطالعه حاضر نبود داده‌های آزمایشگاهی Boilover بر روی مخازن با قطر بزرگ و همچنین امکان پذیر 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 suppression 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.

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.
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, Pasharshahi 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.