

## مطالعه عددی تأثیر دما و رطوبت نسبی هوای محیط بر آتش استخری گازوئیل

سید احمد کبریایی<sup>۱</sup>، محمد مقیمان<sup>۲\*</sup>، حمید نیازمند<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، seyedahmad.kebriyae@mail.um.ac.ir

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، moghiman@um.ac.ir

۳- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، niazmand@um.ac.ir

\* نویسنده مخاطب

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۶، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۳/۰۵/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۳۰

### چکیده

شناخت رفتار آتش استخری در شرایط مختلف محیطی می‌تواند برای ارزیابی خطرات این نوع حریق و بهبود روش‌های پیشگیری و کنترل آتش‌سوزی در صنایع پتروشیمی و فرایندی مفید باشد. این پژوهش عددی باهدف بررسی تأثیر تغییرات دما و رطوبت نسبی هوای محیط بر رفتار آتش‌سوزی استخری گازوئیل انجام شد. تغییرات دمای حداکثر و میزان انتقال حرارت تشعشعی با استفاده از توانایی نرم‌افزار شبیه‌ساز دینامیک آتش (FDS) در مدل‌سازی آتش استخری شبیه‌سازی شد. برای بررسی اثر شرایط هوای محیط دو شاخص: توسعه آتش که برابر با نسبت دمای حداکثر شعله به مدت‌زمان رسیدن به این دما و شاخص شدت آتش به‌عنوان حاصل‌ضرب میانگین تشعشع حرارتی در مرحله کاملاً توسعه‌یافته در مدت‌زمان این مرحله بود، تعریف شد. یافته‌ها نشان داد که افزایش رطوبت نسبی باعث کاهش ۶/۷ درصد در میانگین شاخص توسعه آتش و افزایش دمای محیط منجر به افزایش ۱۲/۵ درصد در میانگین این شاخص می‌شود. بااین‌حال، افزایش دمای محیط یا رطوبت نسبی تأثیر قابل‌توجهی بر شاخص شدت آتش ندارد و تنها باعث کاهش کمتر از ۲ درصد آن می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها تطابق مناسبی با نتایج تجربی نشان دادند.

**کلیدواژگان:** آتش استخری گازوئیل، دمای حداکثر، انتقال حرارت تشعشعی، شرایط هوای محیط، نرم‌افزار FDS

### مقدمه

رطوبت نسبی هوا در سراسر جهان با تغییر شرایط آب‌وهوایی تغییر می‌کند. در شهرهای ایران، تغییرات رطوبت نسبی از ۱۰ درصد تا ۹۰ درصد و نوسانات دما در بازه‌های کوتاه رخ می‌دهد، که در شهرهای ساحلی و مناطق سردتر بیشتر مشهود است [۱]. در تمامی شرایط آب‌وهوایی، آتش‌سوزی‌هایی که روزانه در فضاهای بسته در تمامی کشورهای دنیا و نیز ایران رخ می‌دهد باعث ایجاد خسارت‌های قابل‌توجه و غیرقابل‌جبران می‌شود [۲]. یکی از رایج‌ترین علل انواع آتش‌سوزی در دنیا و کشور ایران در صنایع فرایندی، پتروشیمی و کارخانه‌های مواد شیمیایی، آتش استخری سوخت‌های مایع است [۳]. آتش‌سوزی‌های صنعتی می‌توانند خسارت‌های مالی قابل‌توجهی به بار آورند. به‌عنوان مثال، چهار مورد از پنج حادثه بزرگ در صنعت پالایش و فرآوری در ایالات‌متحده طی سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ که خسارتی بیش از ۱۷۰۰ میلیون دلار داشتند، مربوط به آتش‌سوزی بوده‌اند [۴].

دما و رطوبت نسبی از مهم‌ترین مشخصه‌های هوای محیط هستند که بر رفتار حریق اثر می‌گذارند. گسترش آتش با توجه به دمای محیط و رطوبت نسبی آن ویژگی‌های پیچیده و نامشخص قابل‌توجهی را نشان می‌دهد. با افزایش دما سرعت و محصولات واکنش زیاد می‌شود؛ بنابراین پیرولیز و تبخیر سوخت، و همچنین گسترش آتش و سرعت سوختن آن، با بالا رفتن

دمای محیط افزایش می‌یابد [۵]. با این حال، محیط‌ها با رطوبت نسبی بالا گسترش دود و تشعشع حرارتی لایه دود به سطح سوخت و محیط اطراف را کاهش می‌دهد [۶]. افزایش رطوبت نسبی باعث کند شدن واکنش می‌شود؛ بنابراین، پیرولیز و احتراق سوخت در هوای بسیار مرطوب تحت تأثیر قرار می‌گیرد و مهار می‌شود [۷]. وانگ و همکاران [۸] مشخص کردند که با افزایش رطوبت نسبی، حد پایین و بالایی قابل اشتعال متان افزایش یافت در حالی که محدوده اشتعال کمی محدود شده بود. موداک و کروس [۹] نشان دادند که رطوبت و سایر مواد موجود در جو می‌توانند تشعشعات حرارتی را جذب کنند. با هدف بررسی اثر رطوبت، در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی اثر رطوبت اولیه هوای محیط بر رفتار حریق چوب پرداخته شد. نتایج نشان داد که وجود رطوبت نسبی اولیه ۹۵ درصد نسبت به رطوبت نسبی اولیه ۳۵ درصد در محیط باعث می‌شود مرحله رشد حریق با تأخیری نزدیک به ۶۰ ثانیه آغاز شود [۱۰].

آتش استخری نوعی احتراق متلاطم است که در بالای حوضچه‌ای از سوخت هیدروکربنی مایع شکل می‌گیرد. در این نوع آتش، سوخت به‌طور کلی حرکت اولیه کمی دارد یا ساکن است [۱۱]. عوامل متعددی بر روی رفتار آتش استخری اثرگذار هستند. تأثیر شرایط خارجی بر آتش استخری به‌وسیله بلینو و همکاران [۱۲] و پالازی و همکاران [۱۳] مطالعه شد و آن‌ها اثرات اندازه و هندسه ظرف سوخت را به ترتیب بر سرعت سوختن و دقت مدل‌سازی بررسی کردند. بر اساس مطالعات قبلی برگس و همکاران [۱۴]، هایسکا [۱۵] و چن و همکاران [۵] که اساساً بر اساس آزمایش‌های آتش استخری بود، دریافتند که دمای سوخت بر سرعت سوختن تأثیر می‌گذارد.

انجام آزمایش‌های آتش استخری در مقیاس بزرگ و حتی در مقیاس کوچک دارای پیچیدگی فرایندهای فیزیکی و شیمیایی است. در نتیجه استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> توانسته است به‌عنوان ابزاری مقرون‌به‌صرفه و تکنیکی برای مدل‌سازی آتش استخری، جایگزین انجام آزمایش شود [۱۶]. استفاده از شبیه‌سازی حریق با علم دینامیک سیالات محاسباتی برای ارزیابی خطرات آتش‌سوزی و طراحی اقدامات حفاظتی مؤثر است. با پیشرفت‌های اخیر در سیستم‌ها و قابلیت‌های محاسباتی، کاربرد این شبیه‌سازی‌ها در ایمنی حریق و پیشگیری از خسارات انسانی افزایش یافته است [۱۷]. یکی از نرم‌افزارهای پرکاربرد در زمینه شبیه‌سازی حریق نرم‌افزار شبیه‌ساز دینامیک آتش (FDS)<sup>۲</sup> است.

مطالعات متعددی با هدف ارزیابی توانایی نرم‌افزار FDS در شبیه‌سازی آتش استخری انجام گرفته است. شبیه‌سازی آتش استخری در مقیاس بزرگ با استفاده از FDS به دلیل پیچیدگی آن همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. در راستای انجام این نوع مطالعه، پژوهشی توسط ابراهیم‌زاده و همکاران [۱۸] باهدف پیش‌بینی نرخ سوختن و انتشار حرارت در آتش‌سوزی استخر اتانول در مقیاس بزرگ، با استفاده از این نرم‌افزار انجام شد. تحلیل شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که وجود لبه مرزی بالاتر از سطح سوخت می‌تواند به‌طور قابل توجهی نرخ سوختن را افزایش دهد. از دیدگاه انتقال حرارتی، جریان حرارت تابشی اثر مهمی بر روی سطح سوخت داشته و تقریباً ۷۰ درصد از نرخ سوختن را تشکیل می‌دهد. احمدی و همکاران [۱۹]، با استفاده از FDS، شبیه‌سازی‌هایی حریق را در حوضچه‌های نفت خام ۱ متری و نفت سفید ۳۰ و ۵۰ متری در یک ترمینال نفتی انجام دادند. این شبیه‌سازی‌ها برای ارزیابی پتانسیل وقوع حریق در مخازن ذخیره‌سازی مجاور به دلیل تابش حرارتی انجام شد. پیش‌بینی‌های FDS از شار حرارتی تابشی با نتایج آزمایش‌های آتش‌سوزی حوضچه ۳۰ متری هم‌خوانی داشتند. شارهای حرارتی تابشی در فواصل نزدیک به آتش‌سوزی حوضچه ۵۰ متری بیش از حد پیش‌بینی شدند، در حالی که در فواصل دور، نتایج با نتایج تجربی هم‌خوانی داشتند.

شبیه‌سازی آتش استخری در محفظه‌های کوچک‌تر، امکان بررسی متغیرهای بیشتری را برای پژوهشگران فراهم می‌کند. هایاسکا [۱۵] میزان احتراق آتش‌سوزی‌های استخری کوچک غیرقابل تجدید را مورد مطالعه قرار داد. مشاهده شد که دمای سوخت بر سرعت سوختن تأثیر می‌گذارد و دلیل تغییرات مختلف سرعت سوختن، تفاوت در گرمای تبخیر سوخت است.

<sup>1</sup> Computational Fluid Dynamics (CFD)

<sup>2</sup> Fire Dynamic Simulator (FDS)

یافته‌ها نشان دادند که نرخ‌های سوختن هیتان و نفت سفید با افزایش دماهای سوخت و مخزن افزایش می‌یابد. نرخ‌های سوختن هیتان در فرایند جوشش حدود ۱/۶۴ برابر بیشتر از فرایند پیش گرمایش و این میزان برای نفت سفید ۱/۳ برابر بود. رفتار آتش استخری گازوئیل مورد توجه پژوهشگران بوده است. در همین راستا پژوهشی آزمایشگاهی و عددی باهدف بررسی تأثیر ورود هوا بر روی آتش استخری گازوئیل در اتاق‌های بسته انجام گرفت. دو شرایط ورود هوا شامل: باز بودن کامل درب و نیمه‌باز بودن درب، در یک اتاق به ابعاد ۴ × ۴ × ۴ متر مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که حداکثر تفاوت دمای گاز گرم داخل محفظه بین ۱۵ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. تفاوت متوسط سرعت حرکت گاز در آزمایش‌های درب نیمه‌باز و درب کاملاً باز به ترتیب ۰/۳۸ متر بر ثانیه و ۰/۲۳ متر بر ثانیه در ناحیه پایین و بالا بوده محفظه بوده است. شبیه‌سازی‌های عددی نرم‌افزار FDS به‌ویژه در توزیع دما توسط نتایج آزمایش‌های تجربی تأیید شدند [۲۰]. مطالعه عددی باهدف اعتبارسنجی نتایج FDS بر روی تأثیر دو پارامتر میزان تمرکز اکسیژن در اطراف سوخت و مقدار حرارت تشعشعی بازگشتی از دیواره‌ها و نیز لایه دود آتش استخری گازوئیل انجام گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که میزان انتقال حرارت تشعشعی خارجی بیشتر از کسر حجمی اکسیژن به‌اندازه شبکه محاسباتی وابسته است، اما این اندازه تأثیر زیادی بر نرخ واقعی از دست دادن جرم سوخت نداشت. همچنین پیش‌بینی FDS نشان داد که در سناریوهای با تهویه مکانیکی و تهویه طبیعی مدل به خوبی عمل می‌کند [۲۱]. کای و چو [۲۲] آتش استخری را در داخل محفظه تحت عوامل مختلف تهویه با استفاده از FDS تجزیه و تحلیل کردند. یافته‌ها نشان دادند که پیش‌بینی نرخ آزادسازی گرما با استفاده از FDS به‌طور کلی دقیق است. پیش‌بینی‌ها با اندازه شبکه درشت از داده‌های تجربی بیشتر منحرف شدند در حالی که پیش‌بینی‌ها با شبکه متوسط تطابق خوبی با داده‌های تجربی داشتند و اندازه شبکه متوسط برای مطالعه انتخاب شد.

بررسی مطالعات موجود در این زمینه نشان می‌دهد که اغلب تنها یک پارامتر محیطی مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال، تأثیرات ترکیبی از متغیرهای محیطی مختلف بر رفتار و انتقال حرارتی آتش به‌طور جامع مورد بررسی قرار نگرفته است. کشاورز و همکاران [۲۳] پس از در نظر گرفتن اثرات متغیرهای محیطی مانند دما، قطرات آب-یخ و بازتاب سطحی، بر روی تشعشعات حرارتی، یک مدل جامع جدید برای مناطق سرد پیشنهاد کردند. فاس و همینس [۲۴] مدلی را برای برآورد تضعیف شار حرارتی تابشی ناشی از تغییرات در شرایط محیطی ایجاد کردند. اما مطالعه آن‌ها فقط یک آتش درخشان و به‌شدت دوده‌ای را تجزیه و تحلیل کرد و تأثیر آتش غیر درخشان (مانند الکل) بر تشعشعات حرارتی را نادیده گرفت.

بررسی آزمایشگاهی اثر دما و رطوبت نسبی هوای محیط بر رفتار آتش استخری سوخت‌هایی با میزان تولید دوده‌ی متفاوت انجام نگرفته بود. برای پاسخ به این خلأ پژوهشی، لی و ژانگ [۲۵] رفتار آتش‌سوزی‌های ناشی از سوخت‌های مایعی که سطوح مختلف دوده (دیزل و الکل) تولید می‌کنند در شرایط گرم و مرطوب با تهویه طبیعی مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند. آزمایش‌ها در دماهای مختلف اولیه محیط (۲۰ درجه سانتی‌گراد و ۳۰ درجه سانتی‌گراد) و سطوح رطوبت نسبی (۵۰ درصد و ۹۰ درصد) انجام شد و دمای شعله و تابش حرارتی اندازه‌گیری شد. شاخص توسعه آتش<sup>۱</sup> به‌عنوان نسبت دمای اوج شعله به مدت رسیدن دمای اوج تعریف شد، و شاخص شدت آتش<sup>۲</sup> به‌عنوان نسبت میانگین تابش حرارتی شعله در مرحله توسعه‌یافتگی کامل به مدت زمان آن تعریف شد. در مرحله اولیه حریق، افزایش دمای اولیه محیط باعث افزایش شاخص توسعه آتش شد، در حالی که افزایش رطوبت نسبی باعث کاهش آن شد. در طول مرحله کاملاً توسعه‌یافته، افزایش دمای اولیه محیط یا رطوبت منجر به کاهش شاخص شدت آتش در شرایط سوخت محدود شد و دمای محیط به‌طور قابل‌توجهی بر آتش استخری الکل نسبت به گازوئیل تأثیر گذاشت. علاوه بر این، در شرایط دمای بالا و رطوبت بالا، هر دو شاخص کاهش یافتند.

در جمع‌بندی بررسی پژوهش‌های عددی پیشین و شناسایی شکاف‌های پژوهشی، مطالعه‌ای که اثر دما و رطوبت نسبی هوای محیط را بر آتش استخری گازوئیل بررسی کند مشاهده نشد. همچنین با توجه به این موضوع که در پژوهش

<sup>۱</sup> Fire development index (FDI)

<sup>۲</sup> Fire severity index (FSI)

آزمایشگاهی لی و ژانگ [۲۵]، شرایط انجام آزمایش‌ها تنها محدود به دمای محیط ۲۰ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی محیط ۵۰ درصد و ۹۰ درصد بود، لازم است بررسی اثر طیف گسترده‌تری از دما و رطوبت نسبی محیط بر آتش استخری گازیول بررسی شود. با هدف پرکردن این خلأ پژوهشی، هدف اصلی مطالعه حاضر گسترش کار لی و ژانگ [۲۵] با استفاده از نرم‌افزار FDS برای پیش‌بینی تغییرات دما در آتش استخری گازیول تحت‌تأثیر تغییرات در بازه‌ای گسترده‌تر دما و رطوبت نسبی محیط است. این مطالعه شامل شبیه‌سازی آتش استخری گازیول در شرایطی مشابه شرایط آزمایش‌ها و نیز دماهای مختلف محیط و رطوبت‌های نسبی متفاوت است. همچنین این پژوهش ارزیابی توانایی نرم‌افزار FDS را برای شبیه‌سازی رفتار آتش استخری در شرایط محیطی با دما و رطوبت نسبی متغیر را نیز به‌عنوان هدف فرعی دنبال می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه می‌تواند برای ارزیابی خطرات آتش استخری که شامل سوخت‌هایی با سطوح تولید دوده بالا است، و برای بهبود درک رفتار آتش استخری در شرایط گرم و مرطوب مورد استفاده قرار گیرد.

## روش‌شناسی

روش مورد استفاده برای مطالعه حاضر مبتنی بر مقایسه مستقیم نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی است. به‌منظور بررسی حساسیت پارامترهای ورودی بر نتایج نرم‌افزار FDS و اعتبارسنجی نتایج آن، چهار آزمایش آتش استخری بر اساس مطالعه لی و ژانگ [۲۵] شبیه‌سازی شد. شرایط این آزمایش‌ها در جدول (۱) بیان شده است. برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، نتایج FDS با دمای بیشینه، انتقال حرارت تشعشعی، شاخص توسعه آتش و شاخص شدت آتش آزمایش‌ها مقایسه شدند.

جدول ۱- سناریوهای آزمایش‌های مورد استفاده برای صحت‌گذاری نتایج FDS

Table 1- Test scenarios used to validate FDS results

Fuel	Ambient RH (%)	Ambient temperature (°C)	Experiment number
Diesel	50	20	1
Diesel	90	20	2
Diesel	50	30	3
Diesel	90	30	4

FDS امکان تنظیم شرایط هوای محیط را فراهم می‌کند. این قسمت امکان تعریف شرایط هوای محیط شامل: دما، فشار، نسب جرمی اکسیژن و کربن منوکسید، رطوبت نسبی، قابلیت دید و شتاب گرانش را ایجاد می‌کند. در این مطالعه دو پارامتر دما و رطوبت نسبی مورد بررسی قرار گرفتند و بقیه پارامترها بر اساس تعریف نرم‌افزار ثابت بودند. برای انجام این پژوهش پس از انجام اعتبارسنجی نتایج، برای توسعه پژوهش لی و ژانگ [۲۵] شبیه‌سازی‌ها در بازه گسترده‌ای از اثر تغییرات دما و رطوبت نسبی هوای محفظه بر رفتار آتش استخری گازیول انجام شد. شرایط دما و رطوبت نسبی هوای محیط در شبیه‌سازی‌های انجام شده که باهدف توسعه نتایج آزمایشگاهی انجام شد، در جدول (۲) بیان شده است.

جدول ۲- شرایط شبیه‌سازی‌های انجام شده در FDS بر اساس تغییرات دما و رطوبت نسبی هوای محفظه

Table 2- The conditions of the simulations performed in FDS based on changes in temperature and relative humidity of the chamber air

Simulation number	Ambient temperature (°C)	Ambient RH (%)
1-4	0	30-50-70-90
5-8	10	30-50-70-90
9-12	20	30-50-70-90
13-16	30	30-50-70-90
17-20	40	30-50-70-90

## مدل سازی عددی

### توضیح مدل دینامیک سیالات محاسباتی

در مطالعه حاضر، شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از کد دینامیک سیالات محاسباتی، FDS نسخه ۶٫۷٫۱ انجام می‌شود. FDS به‌عنوان یکی از پرکاربردترین کدهای دینامیک سیالات محاسباتی توسط موسسه ملی استاندارد و فناوری<sup>۱</sup> توسعه داده شد. FDS به‌صورت عددی شکلی از معادلات ناویر-استوکس را که برای جریان‌های کم سرعت (عدد ماخ کمتر از ۰٫۳) مناسب است با تأکید بر انتقال دود و گرما ناشی از آتش‌سوزی حل می‌کند. در این مطالعه از مدل تابش پیش‌فرض FDS استفاده شد که معادلات انتقال حرارت تشعشعی مبتنی بر حجم محدود را برای یک گاز خاکستری حل می‌کند. FDS شامل شبیه‌سازی گردابی بزرگ<sup>۲</sup> و شبیه‌سازی عددی مستقیم<sup>۳</sup> است. وضوح شبکه در مدل آشفتگی شبیه‌سازی گردابی بزرگ در مقایسه با شبیه‌سازی عددی مستقیم بسیار کم‌تر است [۲۶].

در FDS برای مدل‌سازی احتراق دو روش وجود دارد: روش استفاده از روند تغییرات نرخ انتشار حرارت<sup>۴</sup> و روش مدل‌سازی مستقیم احتراق به‌وسیله تعریف سوخت و شرایط واکنش آن. با توجه به این موضوع که روند تغییرات نرخ انتشار حرارت در شرایط آزمایشگاهی موجود نبود و نیز مدل‌سازی احتراق بر اساس تعریف سوخت نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهد از این روش استفاده شد [۲۷].

### معادلات حاکم

حریق یک جریان با آشفتگی بالاست. متمایزترین ویژگی هر مدل دینامیک سیالات محاسباتی چگونگی حل رفتار آشفتگی آن است. از سه روش اصلی حل معادلات در شرایط آشفتگی، FDS فقط از روش‌های شبیه‌سازی گردابی بزرگ و شبیه‌سازی عددی مستقیم استفاده می‌کند. FDS برای حل به روش شبیه‌سازی گردابی بزرگ سه مدل پیشنهاد می‌دهد: ۱- مدل شبیه‌سازی گردابی بزرگ، ۲- مدل شبیه‌سازی گردابی خیلی بزرگ<sup>۵</sup>، ۳- مدل ساده شبیه‌سازی گردابی خیلی بزرگ<sup>۶</sup>. در این مطالعه از مدل شبیه‌سازی گردابی خیلی بزرگ استفاده و ضرایب نیز، مقادیر پیش‌فرض نرم‌افزار در نظر گرفته شد. در حل معادلات دینامیک سیالات محاسباتی برای حل مشکل وجود نوسانات زمانی و مکانی که در مقیاس کوچک رخ می‌دهند، روش فیلترکردن<sup>۷</sup> در مدل شبیه‌سازی گردابی بزرگ استفاده می‌شود. فیلترکردن یک تغییر در معادلات ناویراستوکس است که بر اساس آن گردابه‌هایی که کوچک‌تر از اندازه فیلتر (که آن اغلب اندازه شبکه محاسباتی است)، حذف می‌شود [۲۶]. با این روش هر یک از معادلات حاکم به شرح ذیل است. معادله انتقال معادله پیوستگی به فرم معادله (۱) نوشته می‌شود:

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

در معادله (۱)،  $\bar{u}$  سرعت،  $t$  زمان و  $\bar{\rho}$  چگالی است. معادله بقای تکانه به‌صورت فیلترگیری شده در معادله (۲) بیان شده است:

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

در معادله بالا،  $\mu_{\text{eff}}$  ویسکوزیته دینامیکی و  $\bar{P}$  فشار است. ویسکوزیته دینامیکی، شامل مجموع  $\mu$  ویسکوزیته آرام و  $\mu_{\text{sgs}}$  ویسکوزیته مقیاس زیر شبکه است.  $\mu_{\text{sgs}}$  برابر حاصل ضرب  $\nu_{\text{sgs}}$  در  $\bar{\rho}$  است.  $\nu_{\text{sgs}}$  ویسکوزیته سینماتیکی زیر شبکه است که مقدار آن با استفاده از مدل اسمگورینسکی محاسبه می‌شود. شکل فیلترگیری شده بقای انرژی در معادله (۳) بیان شده است:

<sup>1</sup> National Institute of Standards and Technology (NIST)

<sup>2</sup> Large eddy simulation (LES)

<sup>3</sup> Direct numerical simulation (DNS)

<sup>4</sup> Heat release rate

<sup>5</sup> Very large eddy simulation (VLES)

<sup>6</sup> Simple very large eddy simulation (SVLES)

<sup>7</sup> filtering

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

در معادله (۳)،  $D_{th}$  ضریب انتشار حرارتی،  $\bar{q}_r''$  شار حرارتی تابشی،  $\bar{q}_c''$  نرخ آزاد شدن گرما در واحد حجم در اثر احتراق،  $\tilde{h}_s$  انرژی محسوس و  $pr_t$  عدد پرانتل جریان آشفته است. شکل فیلترگیری شده بقای گونه‌ها در معادله (۴) بیان شده است:

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

در معادله (۴)،  $D_k$  ضریب انتشار جرم گونه،  $\tilde{Y}_k$  کسر جرمی گونه،  $Sc_t$  عدد اشمیت آشفته هستند. در این معادله از تأثیر گرادیان فشار و دما بر ضریب نفوذ صرف نظر شده است.  $\bar{\omega}_k''$  نرخ واکنش گونه است که با استفاده از مدل احتراقی اتلاف گردابه‌ای (ای‌دی‌ام) محاسبه می‌شود.

در FDS انتقال حرارت تابشی به صورت یک معادله انتقال گاز خاکستری<sup>۲</sup> حل می‌شود. معادله انتقال تشعشعی<sup>۳</sup> برای محیطی شامل جذب<sup>۴</sup>، نشر<sup>۵</sup>، پخش<sup>۶</sup> به صورت رابطه (۵) است:

$$s \cdot \nabla I_\lambda(x, s) = -[k(x, \lambda) + \sigma_s(x, \lambda)]I(x, s) + B(x, \lambda) + \frac{\sigma_s(x, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s, s')I_\lambda(x, s')d\Omega' \quad (5)$$

که در آن  $I_\lambda(x, s)$  شدت تابش در طول موج  $\lambda$  است،  $s$  بردار جهت شدت،  $k(x, \lambda)$  و  $\sigma_s(x, \lambda)$  به ترتیب ضرایب جذب و پراکندگی محلی هستند و  $B(x, \lambda)$  عبارت منبع انتشار است و برابر با مقدار حرارتی است که توسط مخلوط محلی گاز، دوده و ذرات منتشر می‌شود. انتگرال در سمت راست، انرژی تشعشعی پراکنده شده از جهات دیگر را توصیف می‌کند. FDS معادله انتقال گاز خاکستری را برای انتقال حرارت تابشی به دو روش: حل مستقیم معادله انتقال و حل به روش مدل باند پهن<sup>۷</sup> حل می‌کند. در این مطالعه از روش حل مستقیم معادله انتقال استفاده و ضرایب نیز، مقادیر پیش فرض نرم‌افزار در نظر گرفته شد [۲۶].

## شرایط مرزی

خواص استیل در نظر گرفته شده برای ظرف حاوی سوخت و بدنه محفظه و نیز بستر بتنی زیر لایه استیلی که آزمایش‌ها بر روی آن انجام شده است و در FDS شبیه‌سازی شده است، در جدول (۳) ارائه شده است. خواص سوخت گازوئیل مورد استفاده برای واکنش احتراق و مدل تبخیر مایع شبیه‌سازی شده با FDS در جدول (۴) بیان شده است.

جدول ۳- خلاصه‌ای از خواص مواد مورد استفاده در شبیه‌سازی FDS

Table 3- Summary of properties of materials used in FDS simulation

Parameter	Units	Concrete	Steel
Density	kg . m <sup>-3</sup>	2430	7850
Specific heat capacity	kJ . kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup>	0.74	0.46
Thermal conductivity	W . m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup>	1.5	45.8
Emissivity	-	0.7	1

<sup>1</sup> Eddy Dissipation Model (EDM)

<sup>2</sup> Gray gas

<sup>3</sup> Radiative Transport Equation

<sup>4</sup> Absorption

<sup>5</sup> Emitting

<sup>6</sup> Scattering

<sup>7</sup> Wide Band Model

جدول ۴- مشخصات سوخت گازوئیل استفاده شده در FDS برای شبیه‌سازی

Table 4- Specifications of diesel fuel used in FDS for simulation.

Parameter	Units	Diesel
Chemical formula	$C_{12}H_{26}$	
Soot yield	$kg. kg^{-1}$	0.015
Carbon monoxide yield	$kg. kg^{-1}$	0.006
Heat of combustion	$MJ. kg^{-1}$	42.0
Radiative fraction	-	0.35
<b>Liquid Evaporation</b>		
Boiling temperature	$^{\circ}c$	216
Heat of vaporisation	$kJ. kg^{-1}$	280
Heat of gasification	$kJ. kg^{-1}$	737
Specific heat capacity	$kJ. kg^{-1}. K^{-1}$	2.4
Thermal conductivity	$W. m^{-1}. K^{-1}$	0.18
Absorption coefficient	$m^{-1}$	300
Emissivity	-	0.95
Density	$kg. m^{-3}$	749

برای اعمال شرایط مرزی در تعریف واکنش احتراق در FDS مشخصات سوخت گازوئیل که از مرجع [۲۸] برداشت و در جدول ۴ ارائه شد در دو مرحله وارد نرم‌افزار می‌شود. ابتدا در قسمت تعریف مواد، مشخصات گازوئیل شامل: چگالی، گرمای ویژه، ضریب انتقال حرارت هدایتی، ضریب تشعشع، ضریب جذب، گرمای احتراق، دمای جوش و گرمای تبخیر وارد می‌شود. در مرحله دوم در قسمت تعریف واکنش نیز مشخصات شامل: گرمای احتراق، بازده دوده و بازده کربن منوکسید وارد نرم‌افزار می‌شود.

## هندسه مسئله

محفظه احتراق در شبیه‌سازی‌های انجام شده (شکل ۱) کاملاً مشابه محفظه مطالعه لی و ژانگ [۲۵] بود. محفظه دارای ابعاد ۶ متر طول، ۱/۵ متر عرض و ۲ متر ارتفاع بود. جنس محفظه از استیل در نظر گرفته شد. در کف محفظه یک لایه‌ی بتن در زیر لایه استیل در نظر گرفته شد. ظرف حاوی سوخت از جنس استیل به ابعاد  $0.4 \times 0.4$  متر در وسط محفظه قرار گرفت. رطوبت نسبی و دمای اولیه هوای محفظه از طریق ورودی‌های تعبیه شده در محفظه با توجه به شرایط هر آزمایش کنترل می‌شد. این ورودی‌ها با ابعاد  $0.4 \times 0.4$  متر هوا را با سرعت  $0.75$  متر بر ثانیه با شرایط موردنظر وارد محفظه می‌کردند. همچنین برای خروجی هوا و محصولات ناشی از احتراق یک خروجی با ابعاد  $0.4 \times 0.8$  متر در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری دما یک ترموکوپل در فاصله  $0.3$  متری از بالای ظرف سوخت مشابه محل قرار گرفتن ترموکوپل  $L_1$  در مطالعه لی و ژانگ [۲۵] در نرم‌افزار FDS پیش‌بینی شد.

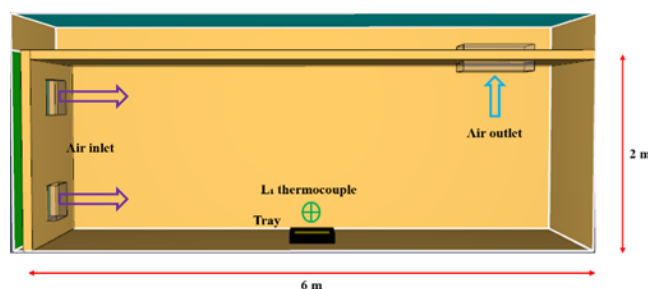


Figure 1- The dimensions and geometry of the fire chamber in the simulation similar to the chamber studied by Li and Zhang [25]

شکل ۱- ابعاد و هندسه محفظه حریق در شبیه‌سازی مشابه با محفظه مطالعه لی و ژانگ [۲۵]

## وضوح شبکه

انتخاب دقیق اندازه سلول‌های شبکه‌بندی برای دقت نتایج در مطالعات عددی حیاتی است. این اندازه‌ها در هر مسئله متفاوت بوده و باید تا حدی کوچک شوند که تغییری در نتایج نهایی دیده نشود. به این فرایند، تحلیل حساسیت شبکه‌بندی گفته می‌شود [۲۹]. شبکه‌های محاسباتی مورد استفاده در این کار شامل سلول‌های شبکه‌ای کارتیزین با ابعادی بر اساس قطر مشخصه آتش،  $D^*$ ، است که توسط معادله (۶) مرجع [۲۶] محاسبه شده است. در اینجا  $\dot{Q}$  نرخ انتشار حرارت آتش برحسب کیلووات است.  $\rho_\infty$ ،  $c_p$  و  $T_\infty$  به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه برحسب کیلو ژول بر کیلوگرم درجه کلونین، چگالی محیط برحسب کیلوگرم بر متر مکعب و دما برحسب کلونین هستند.

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (۶)$$

حساسیت مدل به انتخاب وضوح شبکه عددی با استفاده از طیفی از شبکه‌ها با طول شبکه،  $\delta x$ ، به شرط  $16 \leq \left( \frac{D^*}{\delta x} \right) \leq 4$  باشد، مورد ارزیابی قرار گرفت. در این مطالعه مقدار  $D^*$ ،  $0.551$  محاسبه شد. تعداد کل سلول‌ها بین  $8100$  تا  $607500$  در طیف وسیعی از شبیه‌سازی‌های انجام شده استفاده شد. برای این مطالعه از نسبت  $\frac{D^*}{\delta x} = 10$  با تعداد سلول  $189720$  استفاده شد. شرایط شبکه‌بندی‌های استفاده شده در شبیه‌سازی در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵- تعداد شبکه محاسباتی بر اساس اندازه سلول‌ها مختلف برای شبیه‌سازی FDS

Simulation	Mesh type	Grid resolution $\left(\frac{D^*}{\delta x}\right)$	Mesh size (cm)	Number of cells
1	coarse	4	14	8100
2	moderate	10	5	189720
3	fine	16	3.4	614250

شکل ۲ نتایج دمای محفظه آتش استخری گازوئیل مطالعه لی و ژانگ [۲۵] در دما  $20^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی  $50\%$  درصد را با نتایج شبیه‌سازی FDS برای سه اندازه شبکه مقایسه می‌کند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که میانگین خطای نسبی دمای پیش‌بینی شده محفظه در شبیه‌سازی در مقایسه با آزمایش، در شبیه‌سازی استفاده از شبکه درشت  $37\%$  درصد، شبکه متوسط  $10/5\%$  درصد، و شبکه ریز  $8\%$  درصد است. بنابراین با توجه به نتایج مناسب شبکه با اندازه متوسط و نیز با هدف صرفه‌جویی در وقت و هزینه این شبکه برای انجام شبیه‌سازی در این مطالعه انتخاب شد.

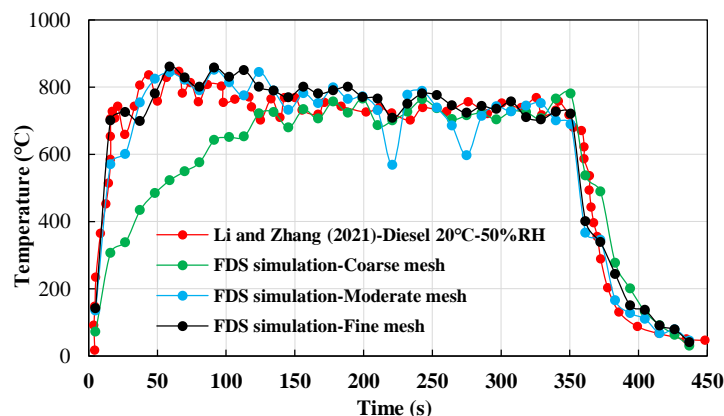


Figure 2 - Comparison of chamber temperature results in Li and Zhang's study at  $20^\circ\text{C}$  temperature and  $50\%$  relative humidity [25] with FDS simulation results for different grid sizes

شکل ۲ - مقایسه نتایج دمای محفظه در مطالعه لی و ژانگ در دما  $20^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی  $50\%$  [۲۵] با نتایج شبیه‌سازی FDS برای اندازه‌های متفاوت شبکه

## صحت‌سنجی نتایج دمای بیشینه و شاخص توسعه آتش

### صحت‌سنجی نتایج دمای بیشینه

شکل ۳ نتایج حاصل از شبیه‌سازی FDS را با نتایج آزمایش‌های لی و ژانگ [۲۵] برای بیشترین دمای ثبت شده نزدیک به شعله مقایسه و صحت‌سنجی می‌کند. شکل‌های ۳(الف) و ۳(ب) نتایج شبیه‌سازی را برای آتش استخری گازوئیل در رطوبت نسبی ۵۰ درصد و دمای اولیه محفظه ۲۰ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ارائه و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌کنند. در رطوبت نسبی ۵۰ درصد، میانگین خطای نسبی برای دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد ۱۰/۵ درصد و برای ۳۰ درجه سانتی‌گراد ۸/۴ درصد محاسبه شد.

نتایج شبیه‌سازی با FDS برای آتش استخری گازوئیل در شرایط رطوبت نسبی ۹۰ درصد و دمای اولیه محفظه ۲۰ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب در شکل‌های ۳(ج) و ۳(د) ارائه و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. میانگین خطای نسبی برای دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد ۱۲/۸ درصد و برای ۳۰ درجه سانتی‌گراد ۱۵/۷ درصد محاسبه شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با

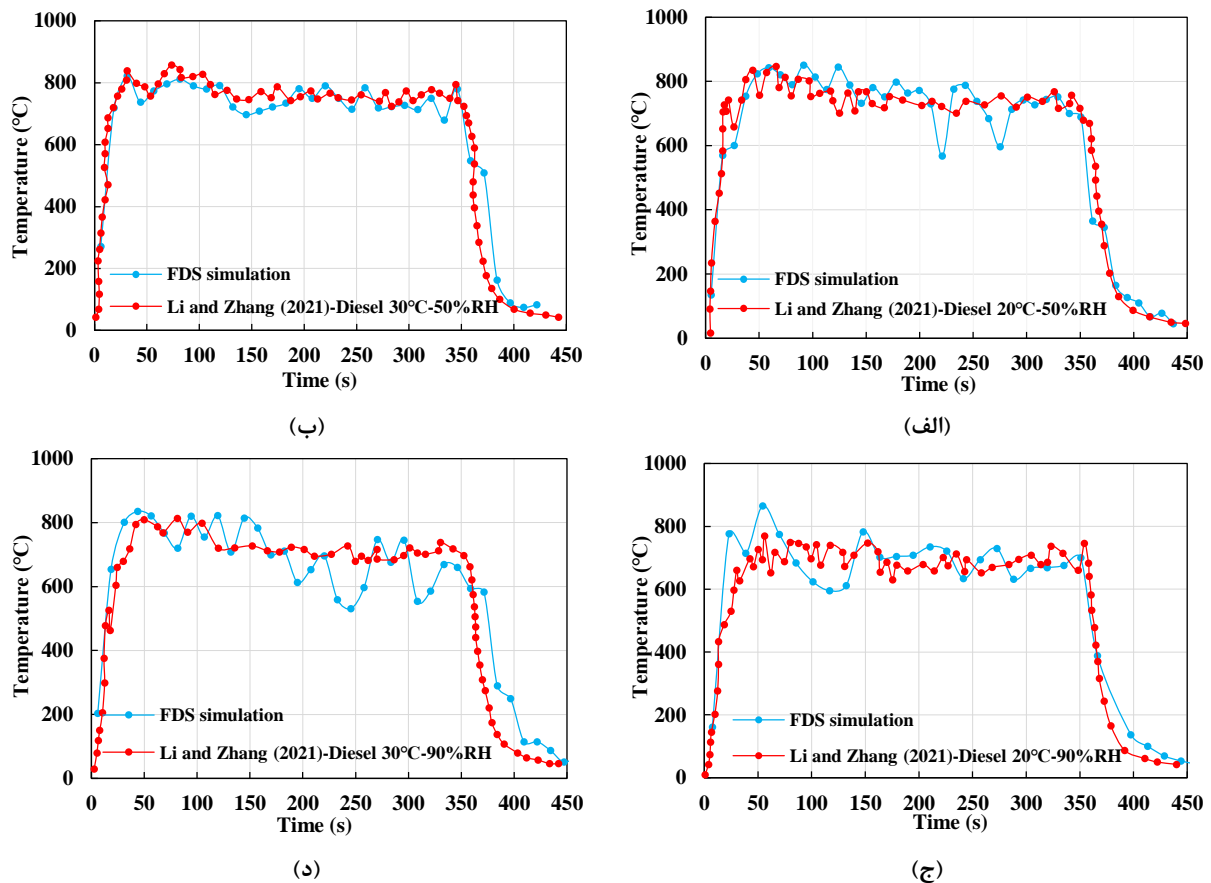


Figure 3 - Comparison of chamber temperature results in Li and Zhang's [25] study with software simulation results for diesel fuel at different temperature and relative humidity of the chamber air. (a) Temperature 20 C and relative humidity 50%. (b) temperature 30 C and relative humidity 50%. (c) temperature 20 C and relative humidity 90%. (d) temperature 30 C and relative humidity 90%

شکل ۳ - مقایسه نتایج دمای محفظه در مطالعه لی و ژانگ [۲۵] با نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزاری برای سوخت گازوئیل در دما و رطوبت نسبی متفاوت هوای محفظه. (الف) دما ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰٪. (ب) دما ۳۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰٪. (ج) دما ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۹۰٪. (د) دما ۳۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۹۰٪.

نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش رطوبت نسبی هوای محفظه، خطای نسبی افزایش پیدا می‌کند. میانگین خطای نسبی ۱۱/۸۵ درصد است که نشان می‌دهد نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزاری برای تغییرات دمای محفظه تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

### تعریف و صحت‌سنجی نتایج شاخص توسعه آتش

لی و ژانگ [۲۵] در مطالعه خود شاخص توسعه آتش را پیشنهاد کردند که به‌عنوان معیاری برای تجزیه‌وتحلیل تأثیر تغییرات رطوبت نسبی هوا بر ویژگی‌های آتش استخری گازوئیل عمل می‌کند. این شاخص نسبت دمای حداکثر شعله به مدت زمان رسیدن به این دمای حداکثر را کمی‌سازی می‌کند. در تحقیق حاضر، این شاخص برای ارزیابی تأثیر رطوبت نسبی و دمای هوای ورودی به محفظه بر رفتار آتش‌سوزی استفاده شد. منحنی مشخصه که حداکثر دمای شبیه‌سازی شده آتش استخری گازوئیل را در شرایط رطوبت نسبی ۹۰ درصد و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد، در شکل ۴ ارائه شده است. این منحنی به‌عنوان مبنایی برای تعریف شاخص و بررسی تأثیر رطوبت نسبی و دمای اولیه محیط بر آتش استخری گازوئیل در محفظه عمل کرد.

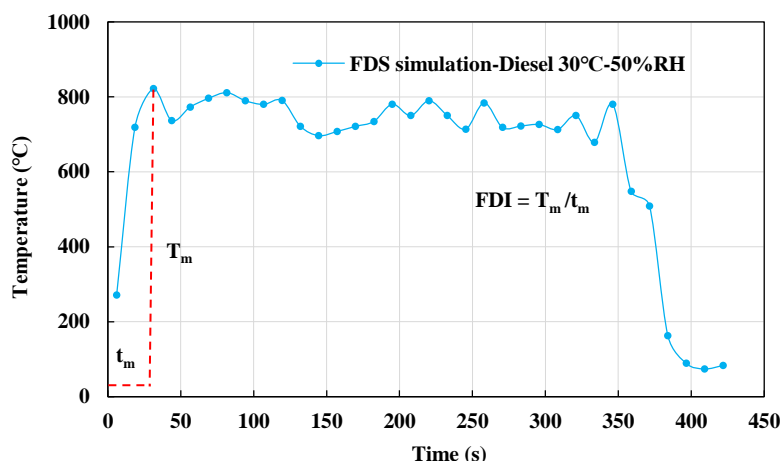


Figure 4 – Definition of fire development index value

شکل ۴ – تعریف مقدار شاخص توسعه آتش

شکل ۵ نتایج شاخص توسعه آتش حاصل از شبیه‌سازی‌ها را با نتایج آزمایش‌های لی و ژانگ [۲۵] برای سوخت گازوئیل مقایسه می‌کند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که روند تغییرات شاخص توسعه آتش در شبیه‌سازی‌ها با روند آزمایش‌ها تطابق دارد. میانگین خطای نسبی نتایج شبیه‌سازی‌های FDS حدود ۶/۵ درصد بود. بیشترین خطا در محاسبات شبیه‌سازی مربوط به شرایط آزمایش با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۹۰ درصد بود که شاخص توسعه آتش را ۱۰ درصد بیشتر، یعنی ۲۰/۹، محاسبه کرد؛ در حالی که این شاخص در آزمایش‌ها ۱۹/۱ بود. مقایسه مقادیر این شاخص نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی با آزمایش‌ها تطابق مناسبی دارد.

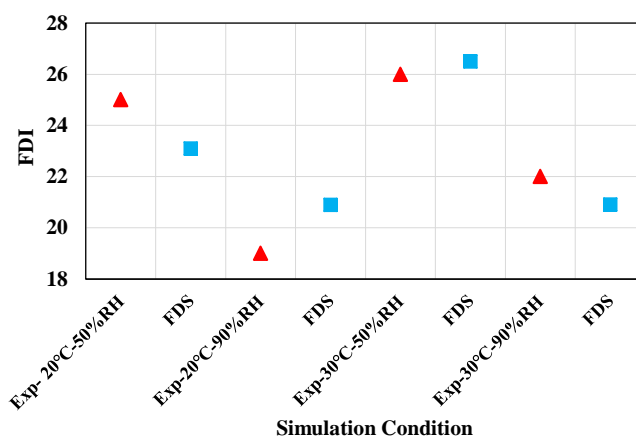


Figure 5 - Comparison of Li and Zhang's [25] study results with simulation results for fire development index  
 شکل ۵- مقایسه نتایج مطالعه لی و ژانگ [۲۵] با نتایج شبیه‌سازی برای شاخص توسعه آتش

### تجزیه و تحلیل شاخص توسعه آتش

شکل ۶ اثر تغییرات رطوبت نسبی هوا بر شاخص توسعه آتش در دمای ثابت هوای محفظه را مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد. بررسی روند تغییرات شاخص توسعه آتش نشان می‌دهد که به‌طور کلی، در یک دمای ثابت در محفظه، این شاخص با افزایش رطوبت کاهش می‌یابد. رطوبت نسبی موجود در هوای محفظه باعث کندی فرآیند پایداری سوخت و در نتیجه به تأخیر افتادن رسیدن به دمای حداکثر شعله می‌شود که منجر به کاهش شاخص توسعه آتش می‌شود.

بررسی شکل ۶ نشان می‌دهد که در دمای ۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش ۲۰ درصد رطوبت نسبی به‌طور میانگین ۶ درصد شاخص توسعه آتش را کاهش می‌دهد. در این دما، با افزایش رطوبت نسبی از ۳۰ درصد به ۹۰ درصد، شاخص توسعه آتش از ۱۷ به ۱۴ کاهش یافته و به میزان ۱۷ درصد کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دمای محفظه به ۱۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش رطوبت نسبی از ۳۰ درصد به ۹۰ درصد باعث کاهش ۲۱ درصد شاخص شده و میانگین کاهش شاخص نیز به ۷/۷ درصد می‌رسد. این میانگین کاهش شاخص توسعه آتش برای دماهای محفظه ۲۰ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۴/۵ درصد و ۷/۵ درصد بوده است. شکل ۶ بیان می‌کند که در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد، با افزایش رطوبت محفظه از ۳۰ درصد به ۹۰ درصد، شاخص حدود ۲۱ درصد کاهش پیدا کرده و از ۲۶/۶ به ۲۰/۹ رسیده است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که میانگین کاهش شاخص توسعه آتش در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد حدود ۷/۷ درصد بوده است.

توضیح ممکن این است که یک سوخت کم‌فرار مانند گازوئیل به تغییرات دمای محیط و رطوبت نسبی حساس‌تر است. کمترین شاخص توسعه آتش محاسبه شده عدد ۱۴ بود که مربوط به شرایط ۹۰ درصد رطوبت نسبی و دمای اولیه ۰ درجه سانتی‌گراد هوای محفظه بود. بیشترین عدد شاخص ۲۶/۹ بود که در شرایط مدل‌سازی دمای اولیه ۴۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۳۰ درصد هوای محفظه محاسبه شد. نتایج ارائه شده در شکل ۶ نشان می‌دهد که افزایش رطوبت اثر سرکوب‌کننده و افزایش دمای اولیه هوای محفظه اثر تقویت‌کننده بر شاخص توسعه آتش دارد. در مرحله اولیه آتش‌سوزی، بخار قابل‌احتراق بیشتری در دمای محیط بالا تولید می‌شود که احتراق را تقویت می‌کند. افزایش رطوبت نسبی به معنای افزایش میزان بخار آب در هوا است. بخار آب ظرفیت گرمایی ویژه بالایی دارد و می‌تواند گرمای زیادی را جذب کند. این خاصیت باعث می‌شود تا دمای بیشینه شعله کاهش یابد؛ زیرا بخار آب موجود در هوا بخشی از انرژی حرارتی را جذب کرده و باعث کاهش دمای محیط احتراق می‌شود و در نتیجه کاهش دمای بیشینه شعله منجر به کاهش قابل‌توجه شاخص توسعه آتش در مرحله اولیه می‌شود. هنگامی که رطوبت نسبی بالا باشد، فرآیند تبخیر آب از محیط اطراف سوخت به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. تبخیر آب یک فرآیند گرماگیر است که انرژی زیادی را جذب می‌کند و این انرژی جذب شده از محیط اطراف

سوخت و شعله گرفته می‌شود. این فرایند می‌تواند به کاهش دمای بیشینه سوخت و محیط احتراق منجر شود که در نتیجه باعث کاهش شاخص توسعه آتش می‌شود. روند تغییرات متفاوت شاخص توسعه آتش در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد را می‌توان به اثر برهم‌نهی دما و رطوبت نسبی بالای هوای محیط بر احتراق آتش استخری گازوئیل نسبت داد. به طوری که اگر رطوبت نسبی و دمای هوا هر دو افزایش یابند، اثرات این دو می‌تواند با هم ترکیب شود. دمای بالا ممکن است تا حدی اثر منفی رطوبت نسبی بالا بر کاهش احتراق را جبران کند. با این حال، اگر رطوبت نسبی به حدی باشد که کاهش اکسیژن بیش از حد شود، حتی با دمای بالا هم ممکن است احتراق به خوبی انجام نشود.

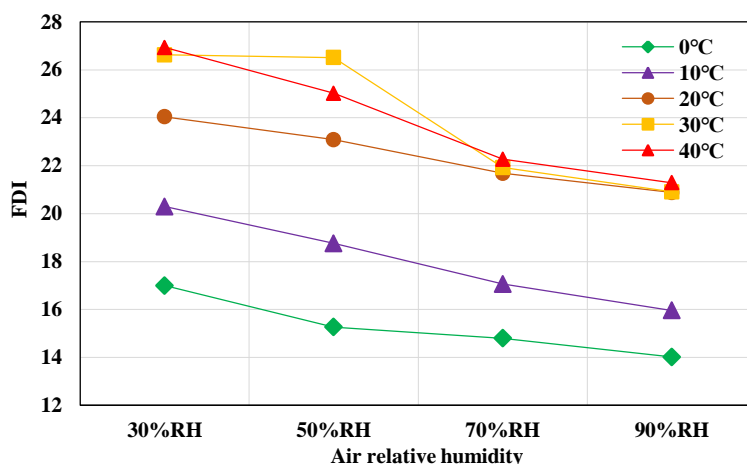


Figure 6- The effect of changes in the relative humidity of the chamber air on the fire development index at a constant temperature

شکل ۶- اثر تغییرات رطوبت نسبی هوای محفظه بر شاخص توسعه آتش در دمای ثابت

شکل ۷ اثر تغییرات دمای اولیه هوای محفظه را بر شاخص توسعه آتش در رطوبت نسبی ثابت هوای محفظه نشان می‌دهد. بررسی این شکل نشان می‌دهد که با افزایش دمای اولیه هوای محفظه، شاخص توسعه آتش به طور کلی افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که در رطوبت نسبی ۳۰ درصد هوای محفظه، با افزایش هر ۱۰ درجه سانتی‌گراد، شاخص توسعه آتش به طور میانگین حدود ۱۲ درصد افزایش می‌یابد. این افزایش در رطوبت نسبی ۵۰ درصد به حدود ۱۴ درصد می‌رسد. در رطوبت نسبی ۷۰ درصد و ۹۰ درصد، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با افزایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد، شاخص توسعه آتش حدود ۱۱/۵ درصد افزایش می‌یابد.

به طور کلی، بیشترین افزایش شاخص توسعه آتش مربوط به افزایش دمای محفظه از ۱۰ به ۲۰ درجه سانتی‌گراد است که حدود ۲۵ درصد افزایش را نشان می‌دهد. کمترین افزایش شاخص نیز مربوط به افزایش دما از ۳۰ به ۴۰ درجه سانتی‌گراد و حدود ۲ درصد است. تحلیل یافته‌های شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش دمای محیط، دمای مایع گازوئیل به نقطه اشتعال آن نزدیک‌تر می‌شود و نرخ تبخیر گازوئیل افزایش می‌یابد و مقدار بخار قابل احتراق بیشتری از سطح سوخت پیرولیز می‌شود، که باعث افزایش غلظت بخارات قابل اشتعال در هوا می‌شود و در نتیجه شدت احتراق افزایش می‌یابد که منجر به افزایش شاخص توسعه آتش می‌شود. افزایش رطوبت نسبی هوای محفظه نقش سرکوب‌کننده در فرایند پیرولیز و شدت احتراق دارد. این موضوع را می‌توان در روند کاهشی بیشینه شاخص توسعه آتش از عدد ۲۶/۹ تا عدد ۲۱/۲ مشاهده کرد. روند تغییرات متفاوت شاخص توسعه آتش در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد نسبت به دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند به تأثیر متقابل دما و رطوبت نسبی بالا بر احتراق آتش استخری گازوئیل نسبت داده شود.

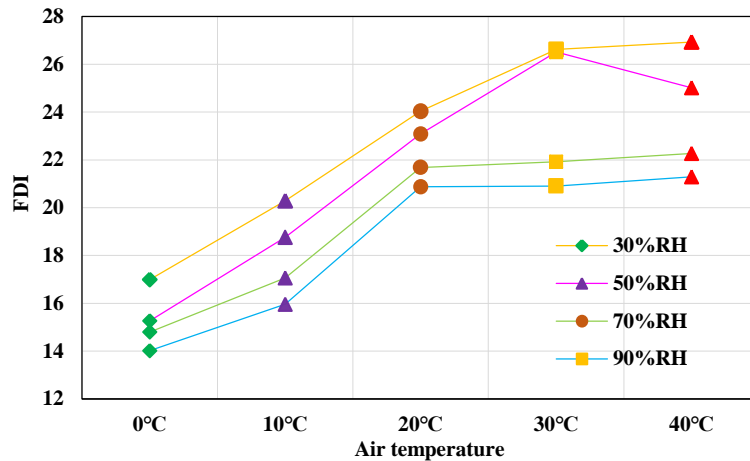


Figure 7- Effect of chamber air temperature changes on the fire development index at constant relative humidity (RH)

شکل ۷- اثر تغییرات دمای هوای محفظه بر شاخص توسعه آتش در رطوبت نسبی ثابت

### صحت‌سنجی نتایج انتقال حرارت تشعشی و شاخص شدت آتش صحت‌سنجی نتایج انتقال حرارت تشعشی

شکل ۸ نتایج حاصل از شبیه‌سازی FDS را با نتایج آزمایش‌های لی و ژانگ [۲۵] برای انتقال حرارت تشعشی مقایسه و صحت‌سنجی می‌کند. در شکل ۸ (الف)، که بیانگر نتایج شبیه‌سازی در شرایط رطوبت نسبی ۵۰ درصد و دمای اولیه ۲۰ درجه سانتی‌گراد محفظه است، مشاهده می‌شود که مقدار انتقال حرارت تشعشی محاسبه شده در نرم‌افزار کمتر از مقادیر آزمایش‌ها بوده و دارای میانگین خطای نسبی حدود ۵/۵ درصد است. این میانگین خطای نسبی برای شبیه‌سازی احتراق در محفظه با شرایط رطوبت نسبی ۵۰ درصد و دمای اولیه ۳۰ درجه سانتی‌گراد به حدود ۷ درصد می‌رسد. خطای محاسباتی نرم‌افزار در میزان انتقال حرارت تشعشی را می‌توان به توانایی نرم‌افزار در مدل‌سازی تشعشع در ذرات دوده نسبت داد. نتایج مدل‌سازی نرم‌افزاری تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

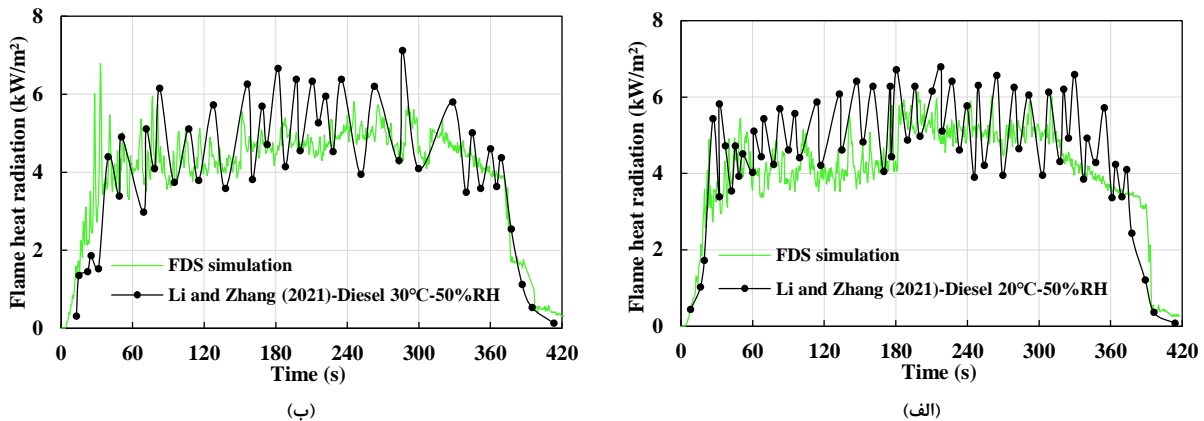


Figure 8- Comparison of the radiation heat transfer results of the chamber in Li and Zhang's [25] study with the results of software simulation for diesel fuel at different temperature and relative humidity (RH) of the chamber air. (a) Temperature 20 °C and RH 50%. (b) temperature 30 °C and RH 50%

شکل ۸- مقایسه نتایج انتقال حرارت تشعشی محفظه در مطالعه لی و ژانگ [۲۵] با نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزاری برای سوخت گازوئیل در دما و رطوبت نسبی متفاوت هوای محفظه. (الف) دما ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰٪. (ب) دما ۳۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰٪

### تعریف و صحت‌سنجی نتایج شاخص شدت آتش

در مرحله کاملاً توسعه‌یافته آتش، تشعشع حرارتی شعله و مدت زمان آن از پارامترهای مهمی هستند که شدت آتش را تعیین می‌کنند. هرچه تشعشع حرارتی و مدت زمان آن بیشتر باشد، خسارات و آسیب‌ها بیشتر خواهد بود. برای بررسی اثر رطوبت نسبی و دمای اولیه هوای محفظه بر انتقال حرارت تشعشعی، لی و ژانگ [۲۵] شاخص شدت آتش را پیشنهاد دادند. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، در شرایط دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد، شاخص شدت آتش بر اساس منحنی تشعشع حرارتی شعله آتش استخری دیزل محاسبه شده است. این مقدار حاصل ضرب میانگین تشعشع حرارتی  $(R_{av})$  به‌ازای هر واحد سطح استخر در مرحله کاملاً توسعه‌یافته و مدت زمان  $(t_d)$  تحت فرض محدود بودن سوخت به‌عنوان شاخص شدت آتش تعریف می‌شود.

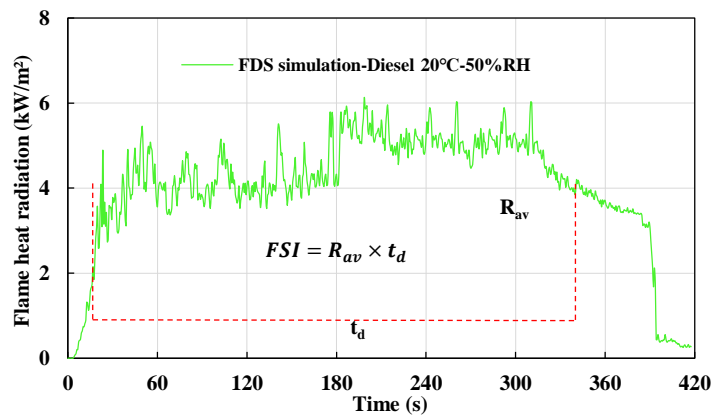


Figure 9- Definition of fire intensity index value

شکل ۹- تعریف مقدار شاخص شدت آتش

شکل ۱۰ نتایج شاخص شدت آتش حاصل از شبیه‌سازی‌ها را با نتایج آزمایش‌های لی و ژانگ [۲۵] برای سوخت گازوئیل مقایسه می‌کند. بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که روند تغییرات شاخص برای نتایج مدل‌سازی مشابه روند تغییرات شاخص در آزمایش‌ها بود. با این حال، به‌طور کلی اعداد شاخص برای نتایج مدل‌سازی به‌طور میانگین ۵ درصد کمتر از نتایج آزمایش‌ها بود. بیشترین شاخص محاسبه شده در آزمایش‌ها ۱۶۳۸ بود که در شرایط هوای محفظه با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد محاسبه شده بود، اما شاخص بر اساس نتایج شبیه‌سازی برای همین شرایط ۱۵۵۷ محاسبه شد. مقایسه مقادیر این شاخص نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی با آزمایش‌ها تطابق خوبی دارد.

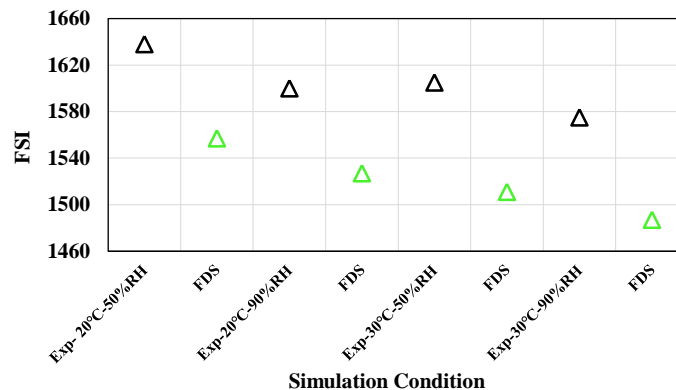


Figure 10- Comparison of Li and Zhang's [27] study results with simulation results for fire intensity index

شکل ۱۰- مقایسه نتایج مطالعه لی و ژانگ [۲۵] با نتایج شبیه‌سازی برای شاخص شدت آتش

## تجزیه و تحلیل شاخص شدت آتش

این بخش به تجزیه و تحلیل تأثیر تغییرات رطوبت نسبی هوا بر شاخص شدت آتش در دمای ثابت هوای محفظه اختصاص دارد که در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. با توجه به تعریف شاخص شدت آتش در شکل ۹، تغییرات  $R_{av}$  یا  $t_d$  عامل مستقیمی در تغییر این شاخص هستند. نتایج تحلیل شکل ۱۱ نشان می‌دهند که با افزایش رطوبت نسبی هوا در دمای ثابت، شاخص شدت آتش کاهش می‌یابد. در تمامی شبیه‌سازی‌های انجام شده در دمای ثابت اولیه محفظه، افزایش رطوبت نسبی هوا باعث کاهش شاخص شدت آتش به میزان کمتر از ۱ درصد می‌شود.

این نتیجه با تحقیقات انجام شده توسط بابر اسکاس [۳۰] و وین [۳۱] همخوانی دارد که نشان داده‌اند افزایش رطوبت نسبی ناشی از هوای اولیه مرطوب و بخار آب تولید شده در طی احتراق، و همچنین مواد دیگر موجود در محیط، تابش شعله را به اطراف تا حدودی تضعیف می‌کند. این موضوع موجب کاهش مقدار  $R_{av}$  و در نتیجه کاهشی جزئی در شاخص شدت آتش می‌شود. اثر ذرات بخار آب در کاهش انتقال حرارت تشعشعی بین ذرات پایداریز شده سوخت، ذرات سوخت در حال احتراق و ذرات دوده به محیط اطراف نیز توجیه این موضوع را تأیید می‌کند. به بیان دیگر تحلیل یافته‌های شکل ۱۱ بیان می‌کند که بخار آب موجود در هوا تشعشعات حرارتی را جذب و پراکنده می‌کند. این جذب و پراکندگی باعث کاهش مقدار انرژی تشعشعی می‌شود که از آتش به محیط اطراف منتقل می‌شود. نتایج شکل ۱۱ نشان می‌دهند که افزایش رطوبت نسبی هوای محفظه در دمای ثابت منجر به کاهشی جزئی در شاخص شدت آتش می‌شود.

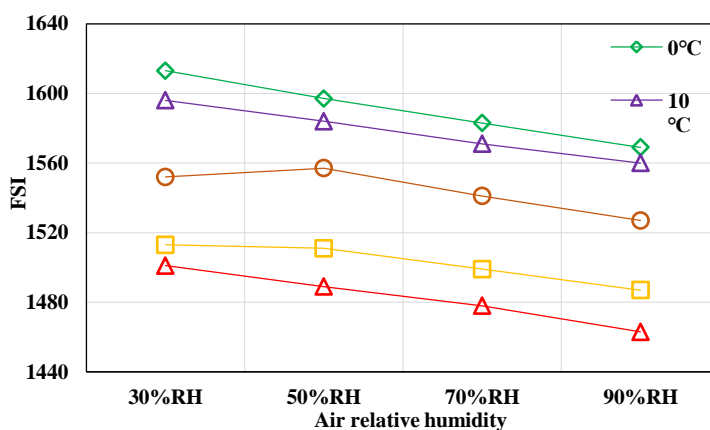


Figure 11- The effect of changes in the relative humidity of the chamber air on the fire intensity index at a constant temperature

شکل ۱۱- اثر تغییرات رطوبت نسبی هوای محفظه بر شاخص شدت آتش در دمای ثابت

شکل ۱۲ اثر تغییرات دمای اولیه هوای محفظه را بر شاخص شدت آتش در رطوبت نسبی ثابت ارائه می‌دهد. بررسی این شکل نشان می‌دهد که با افزایش دمای اولیه هوای محفظه، شاخص توسعه آتش به‌طور کلی کاهش می‌یابد. اثر افزایش دما بر کاهش شاخص شدت آتش کمی بیشتر از اثر کاهشی افزایش رطوبت نسبی و به مقدار میانگین ۲ درصد بود. چن و همکاران [۵] بر اساس مطالعه آزمایشگاهی نشان دادند که افزایش دمای محیط، مدت مرحله کاملاً توسعه یافته را کوتاه می‌کند که منجر به کاهش شاخص شدت آتش می‌شود. این اثر با تقسیم سوخت به لایه‌های نازک‌تر در جهت عمودی توضیح داده می‌شود. با تقریب دمای سطح سوخت به نقطه جوش، احتراق وارد مرحله کاملاً توسعه یافته می‌شود. پس از مصرف سوخت سطحی، احتراق به سمت پایین ادامه می‌دهد و لایه احتراق جدید تا نقطه جوش گرم می‌شود تا مرحله کاملاً توسعه یافته حفظ شود.

نتایج شبیه‌سازی ارائه شده در شکل ۱۲ نشان می‌دهد، هر چه دمای اولیه محیط، که با دمای اولیه سوخت مطابقت دارد، بالاتر باشد، زمان کمتری برای گرم شدن لایه احتراق جدید تا نقطه جوش مورد نیاز است. بنابراین،  $t_d$  پس از برهم نهی اثر

رطوبت نسبی و دمای اولیه محیط کوتاه‌تر شد. پدیده‌ای که توضیح می‌دهد تغییرات در شاخص شدت آتش، آتش استخری دیزل ناچیز است را می‌توان با ذرات دوده در سوخت دوده‌ای تر توضیح داد. ذرات دوده‌ی تولید شده باعث می‌شود که انتقال حرارت تابشی به اطراف افزایش یابد و در افزایش رطوبت نسبی و دمای محیط تأثیر ناچیزی بر شاخص شدت آتش داشته باشد.

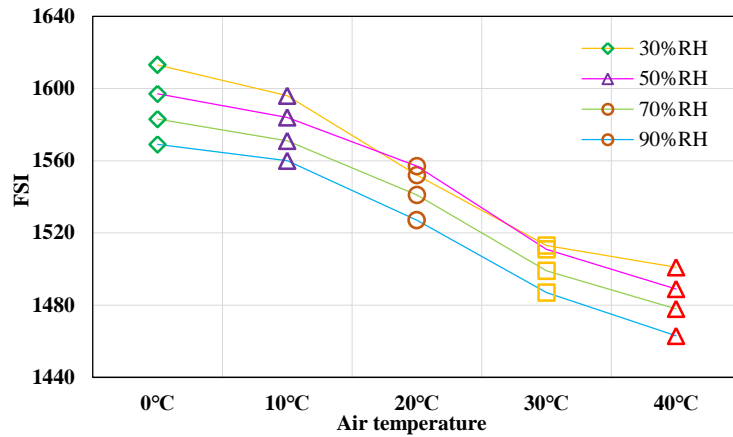


Figure 12- The effect of changes in chamber air temperature on the fire intensity index at constant relative humidity (RH)

شکل ۱۲- اثر تغییرات دمای هوای محفظه بر شاخص شدت آتش در رطوبت نسبی ثابت

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر رطوبت نسبی و دمای هوای محیط بر آتش استخری با سوخت دیزل به صورت عددی در یک محفظه ۶ متر × ۱/۵ متر × ۲ متر با استفاده از نرم‌افزار FDS بررسی شد. این پژوهش عددی توسعه مطالعه آزمایشگاهی لی و ژانگ [۲۵] بوده است. هدف از این بررسی، محاسبه دمای شعله و تابش حرارتی در شرایط مختلف محیطی و تحلیل اثرات آن‌ها بر رفتار آتش استخری بود. برای این منظور، دو شاخص توسعه آتش و شدت آتش تعریف شدند. شاخص توسعه آتش به عنوان نسبت دمای حداکثر شعله به مدت زمان رسیدن به این دما و شاخص شدت آتش به عنوان حاصل ضرب میانگین تشعشع حرارتی در مرحله‌ی کاملاً توسعه‌یافته و مدت زمان مرحله‌ی توسعه‌یافتگی کامل تحت فرض محدود بودن سوخت، تعیین شد. نتایج اصلی به شرح زیر است:

- دقت شبیه‌سازی:** مقایسه نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزاری با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که میانگین خطای نسبی برای تغییرات دمای محفظه ۱۱/۸۵ درصد و برای شاخص توسعه آتش ۶/۵ درصد بود. همچنین، میانگین خطای نسبی برای انتقال حرارت تشعشعی ۶/۲۵ درصد و برای شاخص شدت آتش ۵ درصد بود. این مقادیر میانگین خطای نسبی نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی‌ها داری تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی بودند.
- اثر رطوبت نسبی بر شاخص توسعه آتش:** افزایش رطوبت نسبی باعث کاهش شاخص توسعه آتش می‌شود. این کاهش ناشی از کند شدن فرایند پیرولیز سوخت و تأخیر در رسیدن به دمای بیشینه شعله است. علاوه بر این، با افزایش دمای محفظه، شاخص توسعه آتش به طور میانگین افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تأثیر تقویت‌کننده دمای اولیه محیط بر احتراق است.
- اثر دما و رطوبت بر مرحله کاملاً توسعه‌یافته حریق:** در این مرحله، افزایش دمای اولیه محیط باعث کوتاه‌تر شدن مدت زمان مرحله کاملاً توسعه‌یافته به دلیل محدودیت سوخت می‌شود. همچنین، تابش حرارتی با افزایش

رطوبت نسبی اولیه محیط کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل تأثیر سرکوب‌کننده بخار آب در انتقال حرارت تشعشعی است.

۴. **اثر دما و رطوبت بر شاخص شدت آتش:** افزایش دمای محیط یا رطوبت نسبی به صورت جداگانه در مرحله کاملاً توسعه‌یافته تأثیر قابل توجهی بر شاخص شدت آتش ندارد و تنها کاهش جزئی مشاهده می‌شود. اثر همزمان دمای بالا و رطوبت نسبی بالا نیز باعث کاهش جزئی شدت آتش استخری می‌شود. در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری FDS می‌توانند با دقت بالایی رفتار دمایی و میزان انتقال حرارت تابشی را تحت شرایط مختلف محیطی مدل‌سازی کنند. این یافته‌ها می‌توانند به‌عنوان مبنایی برای توسعه و بهبود مدل‌های شبیه‌سازی و مدیریت ریسک آتش‌سوزی‌های استخری در شرایط مختلف محیطی استفاده شوند. بهبود دقت در مدل‌سازی‌های نرم‌افزاری می‌تواند به طراحی بهتر سیستم‌های ایمنی و کاهش خسارات ناشی از آتش‌سوزی کمک کند.

### پیشنهاد‌های پژوهش‌های آینده

بر اساس نتایج این مطالعه و قابلیت‌های نرم‌افزار FDS پیشنهاد‌های جهت بهبود مدل‌ها و کاهش خطاها که می‌تواند مبنای تعریف مطالعات آینده برای پژوهشگران باشد ارائه می‌شوند:

- بررسی اثر تغییر مدل حل معادله انتقال حرارت تشعشعی بر نتایج
- بررسی اثر تغییر مدل حل معادله آشفستگی بر نتایج
- بررسی اثر استفاده از شبکه حل متراکم در پیرامون آتش استخری بر نتایج

### منابع

- [1] M. Asadi and M. Karami, "Modeling of relative humidity trends in Iran," *Model. Earth Syst. Environ.*, vol. 8, no. 1, pp. 1035–1045, 2022, doi: 10.1007/s40808-021-01093-9.
- [2] Araujo Lima, Geovana Pires, Viana Barbosa, Josiane Dantas Beal, Valter Estevão Marcelo, Marcelo Albano, Souza Machado, Bruna Aparecida Gerber, Juliano Zaffalon, Lazarus Benjamin S., "Exploratory analysis of fire statistical data and prospective study applied to security and protection systems," *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 61, no. April, 2021, doi: 10.1016/j.ijdr.2021.102308.
- [3] S. Vasanth, S. M. Tauseef, T. Abbasi, and S. A. Abbasi, "Assessment of four turbulence models in simulation of large-scale pool fires in the presence of wind using computational fluid dynamics (CFD)," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 26, no. 6, pp. 1071–1084, 2013, doi: 10.1016/j.jlp.2013.04.001.
- [4] Marsh & McLennan, "The 100 Largest Losses 1978-2017," p. 38, no. March, 2018.
- [5] B. Chen, S. X. Lu, C. H. Li, Q. S. Kang, and V. Lecoustre, "Initial fuel temperature effects on burning rate of pool fire," *J. Hazard. Mater.*, vol. 188, no. 1–3, pp. 369–374, 2011, doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.01.122.
- [6] J. R. Howell, R. Siegel, and M. P. Mengüç, *Thermal Radiation Heat Transfer, 5th Edition*. 2010.
- [7] M. M. Khan, J. L. De Ris, and S. D. Ogden, "Effect of moisture on ignition time of cellulosic materials," *Fire Saf. Sci.*, pp. 167–178, no. February, 2008, doi: 10.3801/IAFSS.FSS.9-167.
- [8] Wang Tao, Zhou You, Luo Zhenmin, Wen Hu, Zhao Jingyu, Su Bin, Cheng Fangming, Deng Junet, "Flammability limit behavior of methane with the addition of gaseous fuel at various relative humidities," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 140, pp. 178–189, 2020, doi: 10.1016/j.psep.2020.05.005.
- [9] A. T. Modak and P. A. Croce, "Plastic pool fires," *Combust. Flame*, vol. 30, no. C, pp. 251–265, 1977, doi: 10.1016/0010-2180(77)90074-8.
- [10] S. A. Kebriyae, M. Moghiman, and H. Niazmand, "Empirical study on the influence of initial relative humidity on wood crib fire behavior in compartment under varied natural ventilation conditions," *Fire Saf. J.*, vol. 148, p. 104229, no. April, 2024, doi: 10.1016/j.firesaf.2024.104229.
- [11] H. Chun, K. D. Wehrstedt, I. Vela, and A. Schönbacher, "Thermal radiation of di-tert-butyl peroxide pool fires- Experimental investigation and CFD simulation," *J. Hazard. Mater.*, vol. 167, no. 1–3, pp. 105–113, 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.12.088.
- [12] V. Blinov and G. N. Khudiakov, "Diffusive Burning of Liquids," 1961.
- [13] E. Palazzi, C. Caviglione, A. P. Reverberi, and B. Fabiano, "A short-cut analytical model of hydrocarbon pool fire of different geometries, with enhanced view factor evaluation," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 110, no. 2004, pp. 89–101, 2017, doi: 10.1016/j.psep.2017.08.021.

- [14] D. Burgess, A. Strasser, and J. Grumer, "Diffusive burning of liquid fuels in open trays," *Symp. Am. Chem. Soc.*, vol. 3, no. 3, pp. 91–106, 1961, [Online]. Available: [http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti\\_id=7321723%5Chttp://www.nap.edu/catalog/18852](http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=7321723%5Chttp://www.nap.edu/catalog/18852)
- [15] H. Hayasaka, "Unsteady Burning Rates Of Small Pool Fires," *Fire Saf. Sci.*, vol. 5, pp. 499–510, 1997, doi: 10.3801/iafss.fss.5-499.
- [16] V. Novozhilov and H. Koseki, "CFD prediction of pool fire burning rates and flame feedback," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 176, no. 8, pp. 1283–1307, 2004, doi: 10.1080/00102200490457484.
- [17] R. Shen, Z. Jiao, T. Parker, Y. Sun, and Q. Wang, "Recent application of Computational Fluid Dynamics (CFD) in process safety and loss prevention: A review," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 67, no. March, 2020, doi: 10.1016/j.jlp.2020.104252.
- [18] S. Ebrahim Zadeh, T. Beji, and B. Merci, "Assesment of FDS 6 Simulation Results for a Large-Scale Ethanol Pool Fire," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 188, no. 4–5, pp. 571–580, 2016, doi: 10.1080/00102202.2016.1139367.
- [19] O. Ahmadi, S. B. Mortazavi, H. Pasharshahi, and H. A. Mohabadi, "Consequence analysis of large-scale pool fire in oil storage terminal based on computational fluid dynamic (CFD)," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 123, pp. 379–389, 2019, doi: 10.1016/j.psep.2019.01.006.
- [20] A. G. Deepak Sahu, Shashi Kumar, Shorab Jain, "Experimental and numerical simulation studies on diesel pool fire," *FIRE Mater.*, no. February, 2016, doi: 10.1002/fam.
- [21] J. Wahlqvist and P. van Hees, "Implementation and validation of an environmental feedback pool fire model based on oxygen depletion and radiative feedback in FDS," *Fire Saf. J.*, vol. 85, pp. 35–49, 2016, doi: 10.1016/j.firesaf.2016.08.003.
- [22] N. Cai and W. K. Chow, "Numerical studies on heat release rate in room fire on liquid fuel under different ventilation factors," *Int. J. Chem. Eng.*, 2012, doi: 10.1155/2012/910869.
- [23] G. Keshavarz, F. Khan, and K. Hawboldt, "Modeling of pool fires in cold regions," *Fire Saf. J.*, vol. 48, pp. 1–10, 2012, doi: 10.1016/j.firesaf.2011.11.003.
- [24] S. P. Fuss and A. Hamins, "An estimate of the correction applied to radiant flame measurements due to attenuation by atmospheric CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O," *Fire Saf. J.*, vol. 37, no. 2, pp. 181–190, 2002, doi: 10.1016/S0379-7112(01)00032-7.
- [25] Z. Li and P. Zhang, "Fire behaviors of fuels with different sootiness levels in hot and humid conditions," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 146, pp. 350–359, 2021, doi: 10.1016/j.psep.2020.09.018.
- [26] B. Kevin and P. Glenn, "Fire dynamics simulator (version 4): user's guide".
- [27] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, R. McDermott, and M. Vanella, "Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model," Gaithersburg, MD, 2010. doi: 10.6028/NIST.SP.1018.
- [28] M. J. Hurley, P. DiNenno, D. Drysdale, C. Beyler, D. Walton, R.L Custer, J.R. Hall, J.M. Watts, "SFPE handbook of fire protection engineering, fifth edition," *SFPE Handb. Fire Prot. Eng. Fifth Ed.*, pp. 1–3493, 2016, doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0.
- [29] R. K. Yahya Shams, Sareshki Farhang, "Evaluation of FDS simulation in critical speed estimation for fire Small scale ponds in the curved tunnel," *Q. J. Transp. Eng.*, 2021.
- [30] V. Babrauskas, *Ignition Handbook: Principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science*, vol. 40, no. 3. 2004. doi: 10.1023/b:fire.0000026981.83829.a5.
- [31] F. David Wayne, "An economical formula for calculating atmospheric infrared transmissivities," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 4, no. 2, pp. 86–92, 1991, doi: 10.1016/0950-4230(91)80012-J.

## English Abstract

### Numerical study on the effect of ambient air temperature and relative humidity on diesel pool fire

Seyed Ahmad Kebriyae<sup>1</sup>, Mohammad Moghiman<sup>2\*</sup>, Hamid Niazmand<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, seyedahmad.kebriyae@mail.um.ac.ir

2- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, moghiman@um.ac.ir

3- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, niazmand@um.ac.ir

\* Corresponding author

(Received: 2024/06/15, Received in revised form: 2024/08/10, Accepted: 2024/08/20)

Understanding the behavior of pool fires under various environmental conditions can be valuable for assessing the risks of such fires and improving fire prevention and control methods in petrochemical and process industries. This numerical study aimed to investigate the impact of changes in ambient temperature and relative humidity on the behavior of diesel pool fires. The variations in maximum temperature and radiative heat transfer were simulated using the capabilities of Fire Dynamics Simulator (FDS) software in modeling pool fires. To examine the effect of ambient air conditions, two indexes were defined: fire development index, which is the ratio of maximum flame temperature to the time required to reach this temperature, and fire intensity index, defined as the product of average radiative heat flux during the fully developed stage and the duration of this stage. The findings indicated that an increase in relative humidity resulted in a 6.7% decrease in the average fire development index, while an increase in ambient temperature led to a 12.5% rise in this index. However, an increase in ambient temperature or relative humidity had no significant effects on the fire intensity index, reducing it by less than 2%. Also, the simulation results showed good agreement with experimental data.

**Keywords:** Diesel pool fire, maximum temperature, radiant heat transfer, ambient air conditions, FDS software