

## بررسی تجربی و تحلیلی گسترش و دمای شعله در آتش استخری با تاثیر ذرات نانو

آرش نجفی\* و عبدالصمد زرین قلم مقدم\*\*

دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی شیمی

(دریافت: ۱۳۸۷/۱۲/۱۱، پذیرش: ۱۳۸۸/۸/۱۶)

در این مقاله، نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری دمای شعله در جسم احاطه شده در آتش گزارش شده است. اثر ذرات نانو در زمان گسترش شعله مطالعه شده و تاثیر متغیرهای ابعاد آتش استخری، فاصله از پایه شعله، نوع سوخت و ذرات نانو روی دمای شعله بررسی شده است. از نانو لوله کربنی چند دیواره به عنوان ذرات نانو و از نفت سفید و گازوییل به عنوان سوخت استفاده شده است. نتایج نشان داد که ابعاد استخر بیش‌ترین اثر را در افزایش دمای شعله دارد. در مجموع افزودن نانو لوله کربنی چند دیواره به سوخت باعث کاهش ۱۰ تا ۲۰ درصدی دمای شعله می‌شود؛ هم‌چنین باعث افزایش ۱۵ تا ۳۰ درصدی زمان گسترش شعله‌ی نفت سفید و افزایش ۶ تا ۲۶ درصدی زمان گسترش شعله‌ی گازوییل می‌شود.

**واژگان کلیدی:** دمای شعله، آتش استخری، گسترش شعله، احاطه شده در آتش، ذرات نانو.

### مقدمه

آتش سوزی از جمله حوادثی است که در صنایع شیمیایی و پتروشیمی و در حمل و نقل مواد آتشگیر به طور مکرر رخ می‌دهد. بررسی‌های به عمل آمده نشان می‌دهد که از انواع آتش سوزی‌ها در صنایع شیمیایی، آتش استخری بیش‌ترین تکرار را داشته و ۵۳ درصد این حوادث دربرگیرنده‌ی سوخت‌های مایع بوده است [۱]. در آتش استخری، سوخت مایع از سطح شعله‌ور شده و با عمل تبخیر به شعله تغذیه می‌شود [۲]. پلاناس و همکاران خطرات ثانویه پدید آمده از آتش استخری را بررسی کردند و نشان دادند که وقتی شعله به سطح تجهیزات فرایندی یا تانک‌های ذخیره برسد، می‌تواند برای آن‌ها حالت احاطه شده در آتش ایجاد نماید و ممکن است دیواره آن‌ها را از بین برده و باعث پدید آمدن خطرات جدی‌تری نظیر گسترش آتش و انفجار و آلودگی محیط زیست شود [۱]. امکان وقوع این نوع حوادث در کارخانه‌هایی با طراحی بسیار فشرده یا سکوها‌ی نفتی دریایی، بیش‌تر است. برای اعمال تدابیر ایمنی لازم برای پیش‌گیری و یا کاهش خطرات ذکر شده، آگاهی از رفتار آتش استخری و نیز پیش‌بینی آن از طریق مدل‌سازی ضروری است [۳ و ۴].

آگاهی از خواص و شناسایی رفتار آتش استخری برای طراحی ایمنی تانک‌های ذخیره نفت در مقابل آتش و طراحی سیستم اطفای آتش بسیار مهم و ضروری است. کازکی [۵] تحقیقات تجربی روی آتش استخری سوخت‌های هیدروکربنی را در ابعاد بزرگ برای مطالعه‌ی ویژگی‌های آتش انجام داد. آزمایش‌ها روی چند نوع نفت خام در ابعاد مختلف انجام شد و دمای شعله به کمک دوربین IR پایش شد.

وجود یک مدل قابل اعتماد برای پیش‌بینی تدابیر ایمنی در مرحله طراحی بسیار ضروری است؛ پلاناس و همکاران [۳]، توزیع دما در شعله و نیز جسم احاطه شده در آتش را اندازه‌گیری و با استفاده از مدل‌سازی ریاضی دمای شعله را پیش‌بینی کردند. نظر بر این که برای مدل‌سازی دقیق آتش‌های استخری داشتن اطلاعاتی نظیر اثر اندازه، شکل و توزیع دما در شعله و شدت اشتعال لازم است، لذا چتریس و همکاران [۶] بر روی آتش‌های استخری هیدروکربنی در ابعاد بزرگ با سوخت‌های بنزین و گازوییل مطالعات تجربی انجام دادند. هدف اصلی آن‌ها فراهم کردن اطلاعات لازم برای مدل‌سازی آتش بود.

\* دانشجوی دکتری (ایمیل: arash\_najafi@hotmail.com)

\*\* دانشیار - نویسنده مخاطب (ایمیل: zarrin@modares.ac.ir)

در مدل‌سازی توزیع دما در آتش استخری لازم است که مرحله ناپایا تا رسیدن به حالت پایا را نیز در نظر گرفت. مدت زمان این مرحله به طور تقریبی یک دقیقه است، اما بسیار با اهمیت است زیرا مقدار گرمای آزاد شده در مرحله ناپایا، خود می‌تواند بسیار قابل توجه باشد و باعث بروز حوادث ثانویه شود. در مواردی که مدل‌سازی آتش فقط در حالت پایا انجام می‌شود، می‌تواند منجر به خطا در نتیجه‌گیری شود [۱].

استفاده از ذرات نانو برای کنترل یا کاهش سرعت اشتعال سوخت‌های مایع زمینه‌ی جدیدی است که به تازگی مورد توجه محققان قرار گرفته است [۷ و ۸]. از جمله تحقیقات گزارش شده در این رابطه می‌توان به کار حسن و همکاران [۷] اشاره کرد که با افزودن نانو ذراتی با هدایت گرمایی بالا نظیر نانو لوله کربنی چند دیواره (MWNT) روی پروپانول توانستند سرعت گسترش شعله را کاهش دهند.

کاشیواگی و همکاران [۹] کاهش سرعت گسترش شعله توسط نانو لوله کربنی چند دیواره را در کامپوزیت‌های پلی پروپیلن مطالعه کردند. آن‌ها نشان دادند که افزودن این ذرات به نانو کامپوزیت باعث افزایش هدایت گرمایی و الکتریکی آن‌ها و نیز کاهش چشمگیر در شدت گرمای آزاد شده‌ی بیشینه می‌شود. در گزارشی دیگر پیتربروک و همکاران [۱۰] نشان دادند که با افزودن مقدار کمی از نانو لوله کربنی به توده‌های پلیمری مانند اتیلن وینیل استات می‌توان در زمان اشتعال تاخیر ایجاد کرد و اشتعال پذیری را کاهش داد.

این تحقیق با توجه به اهمیت کاربردی نانو ذرات در کاهش خطرات آتش مایعات مثل آتش مخازن و حوادث خودرو و هواپیماها انجام گرفته است. ابتدا تاثیر نانو لوله کربنی چند دیواره بر روی زمان گسترش شعله در سطح دو سوخت مایع گازوییل و نفت سفید مطالعه شده است. در مرحله بعد عوامل موثر بر دمای شعله روی جسم احاطه شده در آتش استخری بررسی شده است. متغیرهای موثر در آن از جمله اندازه‌ی آتش استخری، فاصله از پایه شعله، نوع سوخت و تاثیر ذرات نانو به طور تجربی ارزیابی شده‌اند.

## طراحی آزمایش و روش‌های تجربی

### زمان گسترش شعله

زمان گسترش شعله مدت زمانی است که شعله از ابتدا به انتهای سینی می‌رسد (شکل ۱). اندازه‌گیری زمان گسترش شعله با اعمال تغییر بر روی روش حسن و همکاران [۷] انجام شد. سینی گسترش شعله از جنس استیل به ابعاد  $2 \times 100$  سانتی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. افزودن سوخت به کمک یک فتیله انجام شد و شعله تشکیل شده از یک انتها به انتهای دیگر گسترش می‌یافت.



شکل ۱- گسترش شعله در سینی

### دمای شعله

برای مطالعه‌ی دمای شعله از استوانه‌ای به قطر داخلی  $20/5$  سانتی‌متر و ضخامت  $0/5$  سانتی‌متر و طول  $35$  سانتی‌متر استفاده شد که در  $8$  نقطه از سطح آن ترموکوپل قرار داده شده بود. ترموکوپل‌ها با زاویه  $45$  درجه، نسبت به هم قرار داشتند. این ترموکوپل‌ها به یک سیستم داده‌پرداز متصل می‌شد که سیگنال‌های الکترونیکی را تبدیل به دما می‌کرد و برای ثبت به رایانه

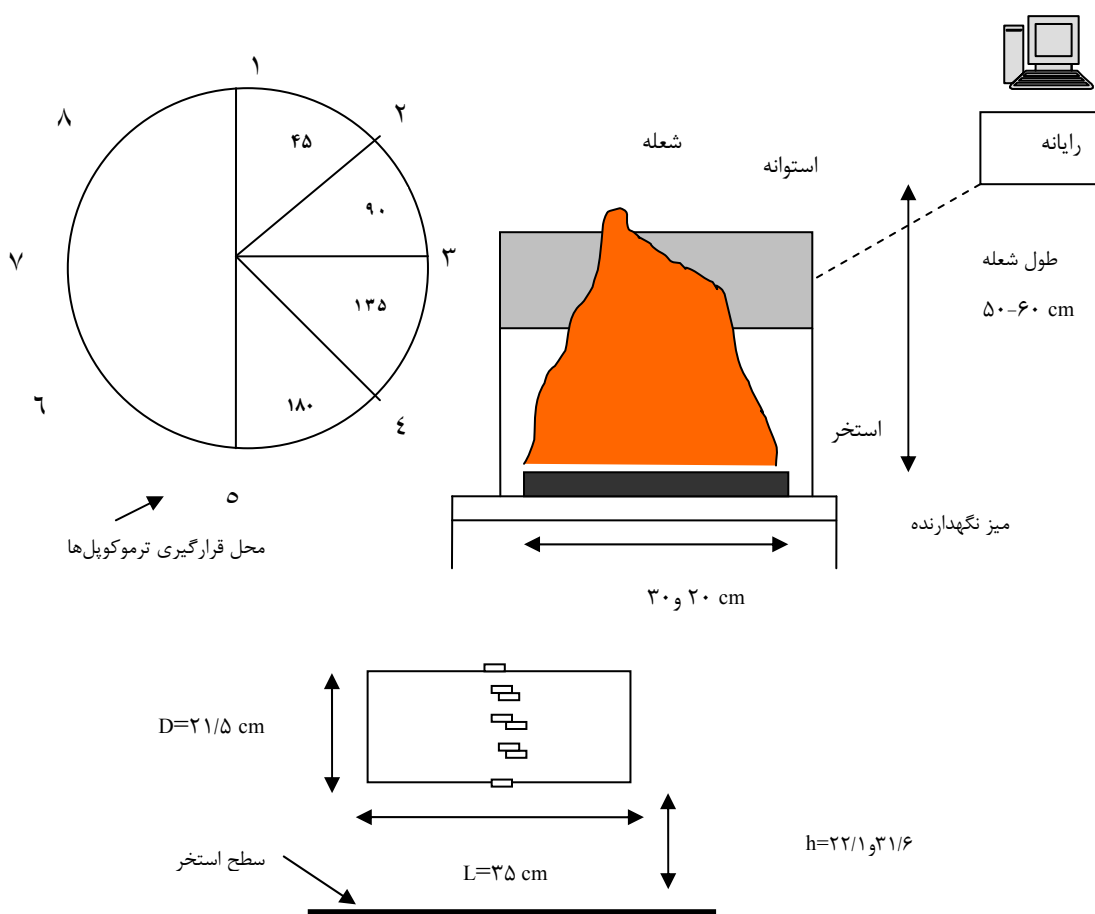
ارسال می‌کرد. این استوانه به کمک یک پایه در ارتفاع معینی از سطح سوخت قرار می‌گرفت. در شکل (۲) تصویری از سیستم آزمایش نشان داده شده است.



(ب)

(الف)

شکل ۲- الف) سیستم اندازه‌گیری توزیع دما در سطح لوله، ب) محل قرارگیری ترموکوپل‌ها



شکل ۳- جزییات جسم احاطه شده در آتش استخری، بسته به نوع آزمایش از دو استخر به قطر ۲۰ و یا ۳۰ سانتی‌متری استفاده شده است،  $h$  ارتفاع لوله از سطح استخر بوده که بسته به نوع آزمایش در دو ارتفاع ۲۲/۱ و ۳۱/۶ سانتی‌متر آزمایش شده است. طول تقریبی شعله بین ۵۰ تا ۶۰ سانتی‌متر متغیر بوده است.

نفت سفید و گازوییل به عنوان سوخت‌های مصرفی از پالایشگاه نفت تهران و نانو لوله کربنی چند دیواره به عنوان ذرات نانو مصرفی از پژوهشگاه نفت تهیه شدند. در شکل (۳) جزییات انجام آزمایش و تجهیزات به صورت طرحواره نشان داده شده است.

## نتایج و بحث

### آزمایش گسترش شعله

در آزمایش گسترش شعله از ۵ سطح غلظت ذرات نانو و دو نوع سوخت استفاده شد که هر آزمایش سه بار تکرار شد. زمان گسترش شعله به کمک یک زمان‌سنج (Chronometer) با دقت ۰/۱ ثانیه اندازه‌گیری شد و نتایج به صورت دقیقه گزارش شد که در جدول‌های (۱) و (۲) آمده است.

برای تحلیل نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری زمان گسترش شعله از روش آماری ANOVA استفاده شد. برای تایید یا رد تفاوت فیزیکی واقعی بین میانگین‌های m آزمایش که هر کدام n بار تکرار شده باشد از این روش آماری استفاده می‌شود [۱۱]. در این روش به کمک آزمون F داده‌های جدول‌های (۱) و (۲) تحلیل می‌شوند.

برای محاسبه F، دو واریانس زیر تعریف می‌شود:  $S_b^2$  واریانس بین میانگین‌ها بوده و  $S_w^2$  واریانس نشانگر خطای آزمایشگاهی است.

$$S_b^2 = \{(\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + (\bar{x}_2 - \bar{x})^2 + \dots + (\bar{x}_m - \bar{x})^2\} / m - 1 \quad (1)$$

$$S_w^2 = \{(x_{11} - \bar{x}_1)^2 + (x_{12} - \bar{x}_2)^2 + \dots + (x_{mn} - \bar{x}_m)^2\} / m(n - 1) \quad (2)$$

مقدار F به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F = \frac{S_b^2}{S_w^2} \quad (3)$$

$$\phi_1 = m - 1 \quad , \quad \phi_2 = m(n - 1) \quad \text{و}$$

اگر F تجربی از F جدول مقادیر بحرانی با درجات آزادی ( $\phi$ ) بزرگ‌تر باشد، تفاوت معنادار بین میانگین‌ها وجود دارد [۱۱].

جدول ۱- آزمایش‌های زمان گسترش شعله‌ی نفت سفید (نتایج سه مشاهده برای پنج آزمایش)

شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵
نمونه	سوخت خالص	۱ گرم نانو لوله/ لیتر سوخت	۲ گرم/ لیتر	۴ گرم/ لیتر	۸ گرم/ لیتر
شماره مشاهده	زمان گسترش شعله (دقیقه)				
۱	۷/۷۲	۸/۳۱	۷/۸۱	۷/۷۵	۸/۹۴
۲	۶/۳۲	۸/۱۲	۷/۹۴	۸/۱۹	۸/۷۴
۳	۶/۵۶	۸/۳۸	۸/۰۲	۷/۹۱	۹/۱۱
جمع	۲۰/۶	۲۴/۸	۲۳/۸	۲۳/۹	۲۶/۸
میانگین	۶/۸۷	۸/۲۷	۷/۹۲	۷/۹۵	۸/۹۳
میانگین کل	۷/۹۸۸				

با مقایسه F تجربی با  $F_{4,10}$  جدول مقادیر بحرانی، نتیجه می‌شود ذرات نانو روی زمان گسترش شعله در نفت سفید با احتمال ۹۷/۵ درصد موثرند. نتایج به شرح زیر است:

$$S_b^2 = 0.555720 \quad , \quad S_w^2 = 0.134760 \quad , \quad F = 4.123776$$

$$\phi_1 = 4 \quad , \quad \phi_2 = 10$$

$$F_{4,10}(\alpha = 0.05) = 3.48 < F < F_{4,10}(\alpha = 0.025) = 4.47$$

جدول ۲- آزمایش‌های زمان گسترش شعله‌ی گازوییل (نتایج سه مشاهده برای پنج آزمایش)

شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵
نمونه	سوخت خالص	۱ گرم نانو لوله/ لیتر سوخت	۲ گرم/ لیتر	۴ گرم/ لیتر	۸ گرم/ لیتر
شماره مشاهده	زمان گسترش شعله (دقیقه)				
۱	۱۸/۵۳	۲۰/۲۵	۲۰/۱۲	۲۲/۱۹	۲۳/۵۵
۲	۱۸/۴۳	۱۹/۶۸	۱۹/۸۶	۲۴/۵۳	۲۱/۸۷
۳	۱۸/۲۵	۱۸/۹۵	۲۰/۸۲	۲۳/۰۴	۲۲/۱۱
جمع	۵۵/۲	۵۸/۹	۶۰/۸	۶۹/۸	۶۷/۵
میانگین	۱۸/۴۰	۱۹/۶۳	۲۰/۲۷	۲۳/۲۵	۲۲/۵۱
میانگین کل	۲۰/۸۱۲				

با مقایسه F تجربی با  $F_{4,10}$  جدول مقادیر بحرانی، نتیجه می‌شود ذرات نانو روی زمان گسترش شعله در گازوییل با احتمال ۹۹ درصد موثرند. نتایج به شرح زیر است:

$$S_b^2 = 4.083920, S_w^2 = 0.584000, F = 6.993014$$

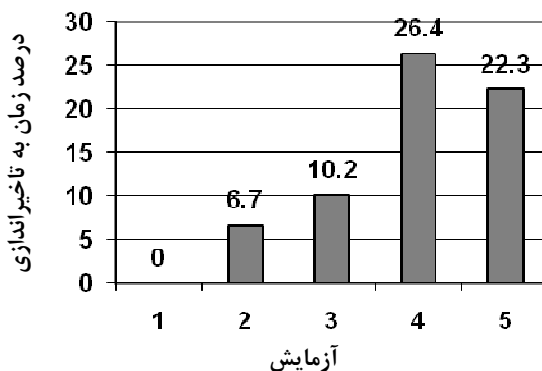
$$\phi_1 = 4, \phi_2 = 10$$

$$F_{4,10}(\alpha = 0.01) = 5.99 < F < F_{4,10}(\alpha = 0.001) = 11.28$$

در شکل‌های (۴) و (۵) دیده می‌شود که نانو لوله چند دیواره کربنی افزوده شده در همه حالت‌ها بین ۶/۷ و ۳۰ درصد باعث افزایش زمان گسترش شعله شده است که البته بسته به نوع سوخت این درصدها متفاوت‌اند.



شکل ۴- اثر ذرات نانو بر روی زمان گسترش شعله- نفت سفید



شکل ۵- اثر ذرات نانو بر روی زمان گسترش شعله- گازوییل

با توجه به نتایج، افزایش زمان گسترش شعله‌ی نفت سفید در مقایسه با گازوییل چشمگیرتر است. افزایش غلظت ذرات نانو سبب افزایش به تاخیراندازی گسترش شعله می‌شود اما هدف اصلی دستیابی به بالاترین افزایش زمان گسترش شعله با حداقل مقدار ذرات نانو اضافه شده است. با تحلیل نتایج شکل‌های (۴) و (۵) می‌توان به ترکیب بهینه از سوخت و ذرات نانو که کم‌ترین سرعت گسترش شعله را به همراه دارد، دست یافت. در مورد نفت سفید افزایش درصد زمان گسترش شعله بین ۲۰/۴ و ۳/۸ تغییر می‌کند که بالاترین درصد افزایش زمان در ۱ گرم در لیتر به دست می‌آید؛ اما در گازوییل به دلیل سنگینی سوخت و کندسوز بودن، این محدوده بین ۶/۷ تا ۲/۸ بوده و برای کمیت‌های ۱ تا ۴ گرم در لیتر از ذرات نانو این نسبت تقریباً ثابت می‌ماند (تغییر در حدود ۵ درصد) می‌توان نتیجه گرفت که نانو ذرات تاثیر قابل توجه روی گازوییل ندارد.

تحقیقات حسن و همکاران [۷]، نشان می‌دهد که افزودن نانو لوله کربنی چند دیواره به پروپانول باعث کاهش سرعت گسترش شعله می‌شود. به طور مثال مخلوط سوخت با ۲ درصد وزنی نانو لوله کربنی چند دیواره کاهش ۹ تا ۱۵ درصدی در سرعت گسترش شعله نشان می‌دهد.

برای تاخیراندازی گسترش آتش هیدروکربن‌های مایع و الکل‌ها توسط نانو لوله کربنی چند دیواره دو دلیل پیشنهاد شده است: اول این که، وجود ذرات سه بعدی متخلخل در داخل سوخت مایع، باعث کندشدن حرکت چرخشی مایع در زیر سطح شعله می‌شود. دوم این که، قابلیت گرمایی نانو لوله‌ها از سوخت مایع بالاتر است. این ذرات در داخل سوخت تشکیل ساختار شبکه‌ی سه بعدی می‌دهند و گرما را به دیواره ظرف منتقل می‌کنند. به این ترتیب باعث می‌شوند دمای سوخت از حد طبیعی پایین‌تر باشد [۷].

### آزمایش دمای شعله

طراحی آزمایش فاکتوریل یک روش کامل و دقیق در مقایسه با سایر روش‌هاست. در یک کار مشابه، طراحی فاکتوریل نسبت به طراحی کلاسیک تعداد فاکتورهای بیش‌تری را ارزیابی و اثر متقابل آن‌ها را نیز بررسی می‌کند [۱۱]. در این روش متغیرهای مورد بررسی در دو سطح بالا (H) و پایین (L) در نظر گرفته می‌شوند که در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳- متغیرهای مورد بررسی در آزمایش دمای شعله در جسم احاطه شده

ابعاد آتش استخری	A	۲ قطر - L=20cm H=30cm
فاصله استوانه از سطح استخر	B	۲ فاصله - L=31.6 cm H=22.1 cm
نوع سوخت	C	نفت سفید (L)، گازوییل (H)
ذرات نانو MWNTs	D	۴ گرم در لیتر (H) و سوخت خالص (L)

همان‌طور که در جدول (۴) نشان داده شده است، تعداد  $2^4=16$  ترکیب ممکن وجود دارد. برای به دست آوردن این ترکیب‌ها طبق روش طراحی فاکتوریل [۱۱]، عمل می‌شود. سطح پایین هر متغیر با L نشان داده می‌شود و برابر ۱ لحاظ می‌شود. سطح بالای آن را با H نشان می‌دهیم سپس به صورت جبری در هم ضرب می‌شود [۱۱] و حاصل ضرب، پاسخ نامیده می‌شود که در ستون ۶ آورده شده است. دو نمونه محاسبه پاسخ در زیر نشان داده شده است:

high A. high B. low C. high D = a.b.(1).d = abd

low A. low B. low C. low D = (1).(1).(1).(1) = 1

در جدول (۵) تفسیر نتایج طراحی فاکتوریل نشان داده شده است. ستون سوم (از راست) جدول عامل اثرگذار را معرفی می‌کند. میانگین دمای شعله در حالت پایا برای ترموکوپل‌های یک تا پنج (شکل ۳) در ستون چهارم جدول (۵) آورده شده است. آزمایش‌های احتراق پس از ۹۰ ثانیه به حالت پایا رسیده است. البته در آزمایش‌های پلاناس و همکاران [۳] در طی ۶۰ ثانیه به حالت پایا رسیدند که به دلیل ابعاد بزرگ‌تر شعله است.

جدول ۴- طراحی فاکتوریل برای چهار متغیر در دو سطح

آزمایش	متغیر A	متغیر B	متغیر C	متغیر D	TCs- پاسخ
۱	L	L	L	L	۱
۲	H	L	L	L	۲
۳	L	H	L	L	۳
۴	H	H	L	L	۴
۵	L	L	H	L	۵
۶	H	L	H	L	۶
۷	L	H	H	L	۷
۸	H	H	H	L	۸
۹	L	L	L	H	۹
۱۰	H	L	L	H	۱۰
۱۱	L	H	L	H	۱۱
۱۲	H	H	L	H	۱۲
۱۳	L	L	H	H	۱۳
۱۴	H	H	H	L	۱۴
۱۵	L	L	H	H	۱۵
۱۶	H	H	H	H	۱۶

جدول ۵- جدول یتس (Yates) در تفسیر نتایج طراحی فاکتوریل

شماره آزمایش	پاسخ TCs	عامل	نتیجه	ستون تحلیل ۴	اثر عامل = ستون تحلیل ۸/۴	واریانس = (ستون تحلیل ۴) ۱۶/۲	واریانس / واریانس خطا (آزمون F)	مقایسه با جدول F <sub>1,5</sub>
۱	a	$\epsilon_A$	۲۶۲/۲	۴۵۱۵/۶	جمع			
۲	b	$\epsilon_B$	۳۲۷/۴	۷۱۹/۶	۸۹/۹۵	۳۲۳۶۴	۱۲۰/۷۲	۹۹/۹
۳	ab	$\epsilon_{AB}$	۳۰۸/۰	۳۶۴/۴	۴۵/۵۵	۸۲۹۹	۳۰/۹۵	۹۹
۴	c	$\epsilon_C$	۳۶۳/۲	-۱/۶	-۰/۲۰	۰/۱۶	۰/۰۰۰۶	<۹۰
۵	ac	$\epsilon_{AC}$	۲۲۵/۶	-۱۴۷/۲	-۱۸/۴۰	۱۳۵۴	۵/۰۵	۹۰
۶	bc	$\epsilon_{BC}$	۲۸۹/۸	۱۵۷/۶	۱۹/۷۰	۱۵۵۲	۵/۷۹	۹۰
۷	abc	$\epsilon_{ABC}$	۲۶۵/۶	۲/۰	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۰۰۰۹	<۹۰
۸	d	$\epsilon_D$	۳۴۱/۸	۷۸/۰	۹/۷۵	۳۸۰	-	
۹	ad	$\epsilon_{AD}$	۱۹۷/۴	-۲۵۱/۶	-۳۱/۴۵	۳۹۵۶	۱۴/۷۶	۹۷/۵
۱۰	bd	$\epsilon_{BD}$	۲۹۲/۶	۱۹۸/۰	۲۴/۷۵	۲۴۵۰	۹/۱۴	۹۵
۱۱	abd	$\epsilon_{ABD}$	۲۵۷/۶	-۰/۸	-۰/۱۰	۰/۰۴	۰/۰۰۰۱	<۹۰
۱۲	cd	$\epsilon_{CD}$	۳۲۳/۰	-۵/۶	-۰/۷۰	۱/۹۶	-	
۱۳	acd	$\epsilon_{ACD}$	۱۷۶/۸	۱۲۸/۸	۱۶/۱۰	۱۰۳۷	۳/۸۷	<۹۰
۱۴	bcd	$\epsilon_{BCD}$	۳۱۲/۸	۱۱۷/۶	۱۴/۷۰	۸۶۴	-	
۱۵	abcd	$\epsilon_{ABCD}$	۲۰۴/۸	-۱۸/۸	-۲/۳۵	۲۲/۱	-	
۱۶			۳۶۷/۰	۳۴/۰	۴/۲۵	۷۲/۳	-	

جدول یتس (Yates) با تکمیل ستون‌های مربوطه خطای کل و معنادار بودن هر کدام از اثرات را نشان می‌دهد. واریانس خطا با تقسیم باقی‌مانده جمع مربعات (RSS) بر درجه آزادی ( $\phi$ ) به دست می‌آید که نشانگر خطا بوده و مبنای مقایسه در آزمون F است [۱۱]. اثر متقابل سه جمله و بالاتر به عنوان واریانس خطا در نظر گرفته می‌شود، لذا:

$$RSS = SS_{ABCD} + SS_{BCD} + SS_{ACD} + SS_{ABD} + SS_{ABC} = 72.3 + 22.1 + 864 + 1.96 + 380 \quad (5)$$

خطای آزادی درجه = 5

$$\text{خطای واریانس} = \frac{RSS}{5} = \frac{1340.4}{5} = 268.1$$

ستون نهم جدول (5)، با استفاده از جدولهای F به دست آمده است و درصد احتمال معنادار بودن اثر عوامل را نشان می‌دهد [11]. لذا می‌توان نتایج حاصل از جدول را به شکل زیر جمع‌بندی کرد که: ابعاد آتش استخری و پس از آن فاصله از سطح سوخت متغیرهای افزاینده دمای شعله‌اند و نیز وجود ذرات نانو عامل کاهنده‌ی دمای شعله است.

### نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که نانو لوله کربنی چند دیواره می‌تواند سرعت گسترش شعله را در نفت سفید و گازوییل بین ۶/۷ تا ۳۰ درصد کاهش دهد. دمای شعله با قطر آتش استخری ارتباط مستقیم داشته و در بین متغیرهای بررسی شده قطر آتش بیش‌ترین اثر را در دمای شعله دارد. نوع سوخت و نیز حضور ذرات نانو متغیرهای موثر در دمای شعله هستند. در این اندازه‌گیری هیدروکربن سنگین‌تر دمای شعله پایین‌تری نشان می‌دهد. ذرات نانو در کاهش دمای شعله موثر بوده و در هیدروکربن سبک‌تر این اثر بیش‌تر است.

### تشکر و قدردانی

بدین وسیله از شرکت ملی پالایش و پخش فراورده‌های نفتی ایران و نیز ستاد ویژه فناوری نانو که از این تحقیق حمایت کرده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

### مراجع

1. Planas Cuchi, E., and Casal, J., "Modeling Temperature Evolution in Equipment Engulfed in a Pool-Fire," *Fire Safety Journal*, 30, pp. 251-268, 1998.
2. Novozhilov, V., and Koseki, H., "Computational Fluid Dynamics Prediction of Self-Sustained Pool Fire Combustion," *Journal of the Institution of Engineers, Singapore*, 1, No. 5, pp. 69-82, 2004.
3. Planas Cuchi, E., and Casal, J., "Flame Temperature Distribution in a Pool Fire," *Journal of Hazardous Materials*, 62, pp. 231-241, 1998.
4. Nivolianitou, Z., Konstandinidou, M., and Michalis, Ch., "Statistical Analysis of Major Accidents in Petrochemical Industry Notified to the Major Accident Reporting System," *Journal of Hazardous Materials*, A137, pp. 1-7, 2006.
5. Koseki, H., "Radiation Properties and Flame Structure of Large Hydrocarbon Pool Fires," *Thirteenth Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety*, 2, pp. 41-50, March, 1996.
6. Chatris, J. M., Quintela, J., Folch, J., Planas, E., Arnaldos, J., and Casal, J., "Experimental Study of Burning Rate in Hydrocarbon Pool Fire," *Combustion and Flame*, 126, pp. 1373-1383, 2001.
7. Hassan, M. I., Grulke, E., Chuah, K., and Saito, K., "Effects of Carbon Nanotubes on Flame Spread Rate over 1-Propanol," *Fire Safety Journal*, 40, pp. 425-438, 2005.
8. Kim, I., and Sirignano, W. A., "Computational Study of Opposed-Force-Flow Flame Spread across Propanol Pools," *Combustion and Flame*, 132, pp. 611-627, 2003.
9. Kashiwagi, T., Grulke, E., Hilding, J., Groth, K., Harris, R., Butler, K., Shields, J., Kharchenko, S., and Douglas, J., "Thermal and Flammability Properties of Polypropylene/Carbon Nanotube Nanocomposites," *Polymer*, 45, pp. 4227-4239, 2004.
10. Peeterbroeck, S., Lautid, F., Swoboda, B., Lopez, J., Morean, N., Nagy, J. B., Alexandre, M., and Dubios, Ph., "How Carbon Nanotube Crushing Can Improve Flame Retardant Behavior in Polymer Nano Composites," *Macromolecular Rapid Communications*, 28, pp. 260-264, 2007.
11. Davies, L., *Efficiency in Research, Development and Production: The Statistical Design and Analysis of Chemical Experiments*, the Royal Society of Chemistry publication, 1993.



## English Abstract

# Experimental and Theoretical Analysis of Flame Spread and Temperature in a Pool Fire-with Nanoparticle Effects

A. Najafi and A. Z. Moghaddam

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University

*In this article, results of flame temperature measurements of a fire engulfed object are presented. The effects of nano particles at the time of flame spread, as well as the effect of such parameters as pool fire dimension, height from fuel surface, and fuel type on flame temperature are investigated. Multi-walled Carbon nanotubes were used as nano particles, and Kerosene as well as diesel oil were used as fuels. The results show that pool dimension is the most effective parameter for flame temperature rise. They also indicated that, altogether, presence of MWNT reduces flame temperature by 10-20%, while it increases the flame spread time of kerosene by 15-30% and that of diesel oil by 6-26%.*

**Keywords:** Flame temperature, Pool fire, Flame spread, Engulfed in fire, Nanoparticles.