

حل عددی اشتعال ماتریس قطرات سوخت در هوای داغ

سجاد رنجبران^۱، صادق تابع جماعت^۲، یاشار شرکا^۳

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
sajadranjbaran@aut.ac.ir

چکیده

در این حل عددی به منظور شبیه سازی اشتعال ماتریس قطرات سوخت در هوای داغ است. سوخت مورد استفاده در این تحقیق هپتان نرمال می باشد. نتایج کارهای تجربی نشان می دهد که زمان اشتعال برای ماتریس قطرات سوخت که در هوای داغ ساکن قرار می گیرند، کمتر از زمان اشتعال برای قطره تنها است. هدف از این مطالعه روشن ساختن این رفتار اشتعال بوسیله حل عددی است. قطر قطرات هپتان را از $0/75$ تا $1/25$ میلیمتر در یک ماتریس با فاصله 4 تا 20 میلی متر در هوای داغ با دمای 1123 در زمان صفر در نظر گرفته شده است. روش جدا سازی معادلات توسط روش تفاضل محدود انجام شده است. نتایج نشان می دهد که وقتی فاصله قطرات کاهش می یابد زمان اشتعال از حالت قطره تنها کمتر شده و با کاهش بیشتر فاصله این زمان سریعاً کم میشود. توزیع وابسته به زمان دما نشان میدهد که اولین مرحله اشتعال بین قطرات رخ می دهد. با کاهش بیشتر فاصله، ناحیه واکنش مثل یک لوله استوانه ای دور ماتریس را می گیرد. زمان اشتعال برای فواصل 16 تا $11/25$ میلیمتر کمتر از همین زمان در قطره تنهاست. اما این زمان با کاهش فاصله بین قطرات افزایش می یابد. به نظر میرسد که یک محدوده اشتعال پذیری وجود دارد. این امر با نتایج تجربی نیز انطباق دارد.

واژه های کلیدی: ماتریس قطرات- هپتان نرمال - هوای داغ - حل عددی

1- مقدمه

با وجود تحقیقات فراوانی که بر روی احتراق اسپری و قطرات سوخت به عنوان فاز مستهلک انجام شده، اما برای بررسی روابط بین احتراق قطرات و احتراق اسپری و اندرکنش قطرات با یکدیگر ضرورت انجام این گونه مطالعات احساس می شود. کارهای عددی و تجربی زیادی در زمینه اشتعال و احتراق قطره منفرد در محیط دما بالا برای فهم بهتر احتراق اسپری صورت گرفته است [1-2]. نتایج بدست آمده از این تحقیقات تاثیر قطر قطره را بر روی زمان اشتعال نشان می دهد. با افزایش قطر اولیه قطره زمان اشتعال به دلیل بالا رفتن ظرفیت گرمایی افزایش می یابد و برای قطرات خیلی کوچک زمان اشتعال به دلیل بالا رفتن زمان واکنش نیز افزایش می یابد.

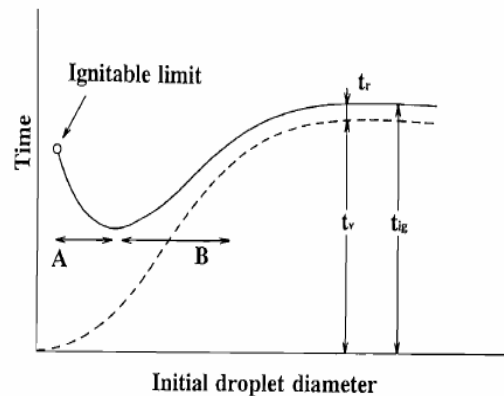
چند تئوری برای مطالعه اندرکنش احتراقی دو قطره ارائه شده است [3,4]. بررسی تجربی احتراق دو قطره در حالت میکروگراویتی [5] نشان می دهد که عمر دو قطره در فاصله مشخصی از عمر قطره منفرد کوتاه تر است. مطالعه تجربی پخش

1- دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی هوافضا

2- دانشیار- دانشکده مهندسی هوافضا

3- دانشجوی دکترا- دانشکده مهندسی هوافضا

شعله در میکروگراویتی از یک قطره به قطره کناری [6] وجود بیشترین سرعت در یک فاصله مشخصی را نشان می دهد. در مطالعه تجربی بعدی [7] تاثیر جریان هوا با سرعت پایین بر روی سرعت پخش مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی اشتعال در مورد قطره منفرد [8] نتایج زیر بدست می آید. زمان اشتعال در صورت کافی بودن اکسیژن و فراهم شدن انرژی اکتیواسیون در محیط داغ همان طور که در شکل 1 دیده می شود به دو قسمت تقسیم می شود: زمان تبخیر (t_v) و زمان واکنش (t_r). اگر قطر قطره افزایش یابد، زمان تبخیر نیز به دلیل افزایش ظرفیت حرارتی قطره افزایش می یابد (خط چین در شکل 1).

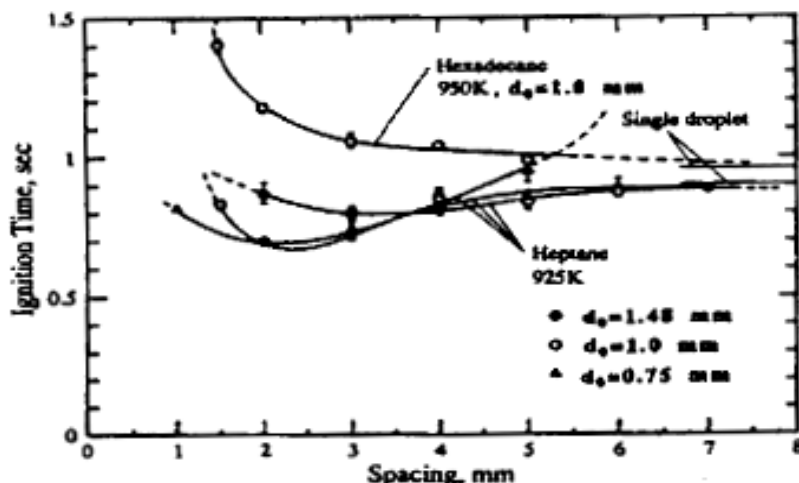


شکل 1- نمودار شماتیک زمان اشتعال قطره منفرد [8]

زمان واکنش کلا در مقایسه با زمان تبخیر کوتاهتر است. وقتی قطر قطره کاهش یابد زمان واکنش افزایش می یابد. در نتیجه در زمان اشتعال یک مینیمم وجود دارد. این نتیجه به صورت تحلیلی [9] و عددی [10] تصدیق شده است. اگر قطره اول به صورت کامل تبخیر شود و سپس مشتعل شود، حد اشتعال پذیری همان طور که در شکل 1 دیده می شود تعریف می شود.

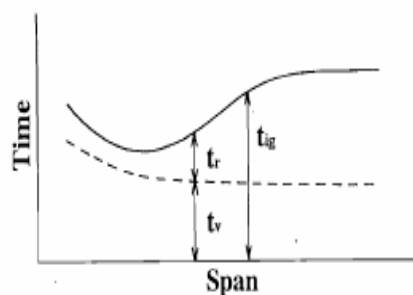
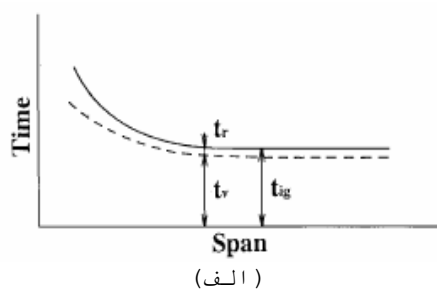
2- بررسی آزمایشات

شکل 2 مربوط به نتایج آزمایش اندازه گیری زمان اشتعال ماتریس قطراتی است که وارد محیط داغ یک کوره الکتریکی شده اند [8]. قطره بر روی توپهای سرامیکی متخلخل که توسط سوخت تغذیه می شوند تشکیل می شود. در انتهای این ماتریس از قطرات برای جلوگیری از اشتعال زود رس و بالا رفتن دقت آزمایش بجای سوخت از قطرات آب استفاده میشود. با توجه به شکل 2 می توان دریافت که با کاهش فاصله بین قطرات در ماتریس برای سوخت هگزادکان زمان اشتعال به دلیل افزایش اندرکنش گرمایی بین قطرات افزایش می یابد. اما برای سوخت هپتان زمان اشتعال در ماتریس قطرات مقداری از زمان اشتعال برای قطره منفرد کمتر است و با کاهش فاصله بین قطرات افزایش می یابد. این موضوع قابل توجه است که در قطره منفرد هپتان با قطر 75/ میلی متر اشتعال اتفاق نمی افتد ولی برای ماتریس قطرات با همین قطر با فاصله کمتر از 0/5 میلی متر اشتعال داریم .

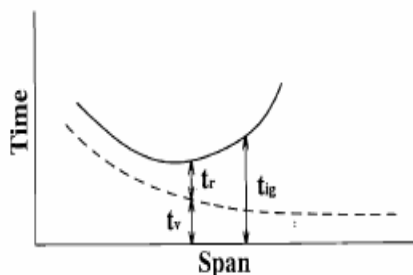


شکل 2 نتایج تجربی زمان اشتعال هگزادکان و هپتان نرمال برای فواصل مختلف بین قطرات [8]

برای توجیه این پدیده که در مورد سوخته‌های فرار اتفاق می‌افتد می‌توان گفت که: مقدار تبخیر سوخته‌هایی که فراریت بالایی دارند زیاد است در نتیجه زمان طولانی تری برای واکنش نیاز است (قسمت A شکل 1). اما به دلیل اندرکنش گرمایی برای فاصله کوتاه‌تر بین قطرات دبی جرمی سوخت کمتر شده و زمان واکنش مقداری کوتاه‌تر می‌شود، در نتیجه زمان اشتعال کاهش یافته و اشتعالی که برای قطره منفرد اتفاق نمی‌افتد برای ماتریس قطرات باهمان قطر امکان پذیر است. با توجه به نتایج تجربی [8] می‌توان رفتار اشتعالی ماتریس قطرات سوخت را توضیح داد. با توجه به شکل شماتیک 3، شکل 3 الف مربوط به زمان واکنش کوتاه برای سوخته‌های با فراریت کمتر، 3 ب زمان واکنش طولانی برای سوخته‌های با فراریت متوسط و 3 ج زمان واکنش طولانی تر برای سوخته‌های با فراریت زیاد را نشان می‌دهد. در شکل 3 الف قسمت بیشتر زمان اشتعال مربوط به زمان تبخیر می‌شود که با افزایش فاصله بین قطرات به دلیل کاهش اندرکنش حرارتی کاهش می‌یابد. در شکل‌های 3 ب و 3 ج زمان واکنش با افزایش فاصله بین قطرات به دلیل کاهش تأثیر قطرات مجاور افزایش می‌یابد. برای تایید موارد بالا از سوخته‌های الکلی نیز استفاده شده است. دکانل و اتانل به ترتیب برای فراریت کم و فراریت متوسط بجای هگزادکان و هپتان مورد آزمایش قرار گرفت. هدف از این مقاله ارائه نتایج شبیه سازی عددی موارد بالا می‌باشد.



(ب)



(ج)

شکل 3- شکل شماتیک رفتار اشتعال ماتریس قطرات- الف سوختهایی با زمان واکنش کوتاه-ب- سوختهایی با زمان واکنش طولانی - ج- سوختهایی با زمان واکنش طولانی تر [8]

3- مدل تحلیلی و پروسه حل

به دلیل نبود تغییرات در جهت θ سیستم به صورت تقارن محوری با مختصات (r, z) می باشد. فرضیات اعمال شده در معادلات به صورت زیر می باشد: 1- خواص فاز مایع ثابت است. 2- از اثرات شناوری صرف نظر شده است. 3- فشار ثابت است. 4- استهلاک ویسکوز و تشعشع قابل اغماض است. 5- اثرات سورت و دفور نیز صرف نظر شده است. 6- قطره سوخت تا پایان تبخیر کروی باقی ماند.

در زیر معادلات حل شده آورده شده است. معادله انرژی فاز مایع:

(1)

$$\frac{\partial T_l}{\partial t} = \alpha_l \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_l}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_l}{\partial z^2} \right\}$$

در ادامه معادلات بقای جرم، ممنتوم، انرژی و بقای اجزا فاز گاز آورده شده است.

(3)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u_r) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z) = 0$$

(4)

$$\rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r}$$

(5)

$$\rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z}$$

$$\rho \left(\frac{\partial c_p T}{\partial t} + u_r \frac{\partial c_p T}{\partial r} + u_z \frac{\partial c_p T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \sum_{i=1}^N h_i \dot{\omega}_i$$

(6)

$$\rho \left(\frac{\partial Y_i}{\partial t} + u_r \frac{\partial Y_i}{\partial r} + u_z \frac{\partial Y_i}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\rho D_i r \frac{\partial Y_i}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial z} \right) + \dot{\omega}_i$$

شرایط اولیه:

$$0 \leq r \leq R(0); T_l = T_{l0} \quad (7)$$

(8)

$$r \geq R(0); T = T_\infty, Y_i = Y_{i\infty}, u_r = 0, u_z = 0$$

شرایط مرزی:

$$r = 0; \frac{\partial T_l}{\partial r} = 0, \frac{\partial}{\partial r}(T, Y_i) = 0, u_r = 0 \quad (9)$$

(10)

$$r \rightarrow \infty; T = T_\infty, Y_i = Y_{i\infty}, \frac{\partial}{\partial r}(u_r, u_z) = 0 \quad (11)$$

(12)

$$z = S/2; \frac{\partial}{\partial z}(T, Y_i) = 0, u_z = 0 \quad (13)$$

(14)

$$r = R(t); Y_{fs} = \exp\left\{-\frac{L}{RT_b}\left(\frac{T_b}{T_s}-1\right)\right\} \quad (15)$$

(16)

$$-\rho D_f \frac{\partial Y_f}{\partial r}\bigg|_s = \rho u_r (1 - Y_{fs}) \quad (17)$$

(18)

$$u_r = \frac{dR}{dt} \left(1 - \frac{\rho_l}{\rho}\right) \quad (19)$$

(20)

$$-\rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial r}\bigg|_s = \rho u_r Y_{is} \quad (21)$$

(22)

$$\rho_l L \frac{dR}{dt} = \lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial r}\bigg|_s - \lambda \frac{\partial T}{\partial r}\bigg|_s$$

ضریب پخش گرمایی a گرمای مخصوص در فشار ثابت c_p قطر قطره d ضریب پخش D گرمای مخصوص تشکیل h گرمی نهان تبخیر L فشار P جهت شعاعی r شعاع قطرات R فاصله بین قطرات S زمان t دما T سرعت u جز جرمی Y جهت محوری z ضریب رسانش گرمایی λ چگالی ρ نرخ واکنش ω .
 واکنش در این آزمایش یک مرحله ای در نظر گرفته شده است انرژی اکتیواسیون و ضریب فرکانس به ترتیب $E = 125.6 \text{ kJ/mol}$ و $B = 1.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mol/s}$ است. دما اولیه محیط 1123 کلوین و دمای اولیه قطره 300 کلوین می باشد. خواص متغیر ترمودینامیکی فاز گاز از منبع [11] استفاده شده است. غلظت بخار سوخت در سطح

قطره از معادله کلازیوس کلاپیرون بدست می آید که در معادلات بالا آمده است از معادلات زیر برای بی بعد کردن معادلات بقا استفاده می کنیم

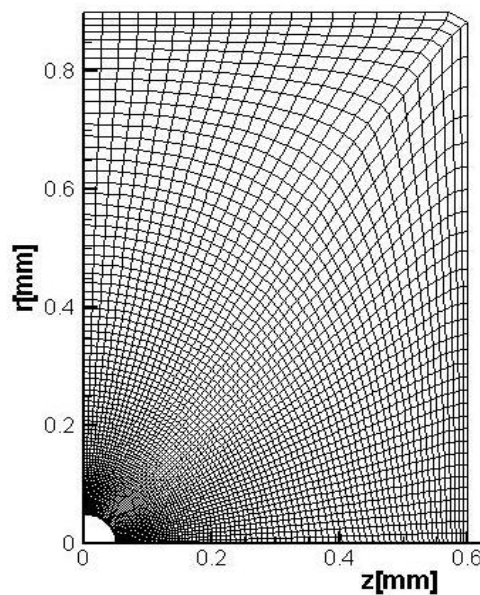
$$(17)$$

$$t^+ = \frac{\alpha_l}{R_0^2} t, r^+ = \frac{r}{R_0}, z^+ = \frac{z}{R_0}$$

$$T^+ = \frac{T}{T_{10}}, (u_r^+, u_z^+) = \frac{R_0}{\alpha_l} (u_r, u_z)$$

$$\rho^+ = \frac{\rho}{\rho_l}, D_l^+ = \frac{D_l}{\alpha_l}$$

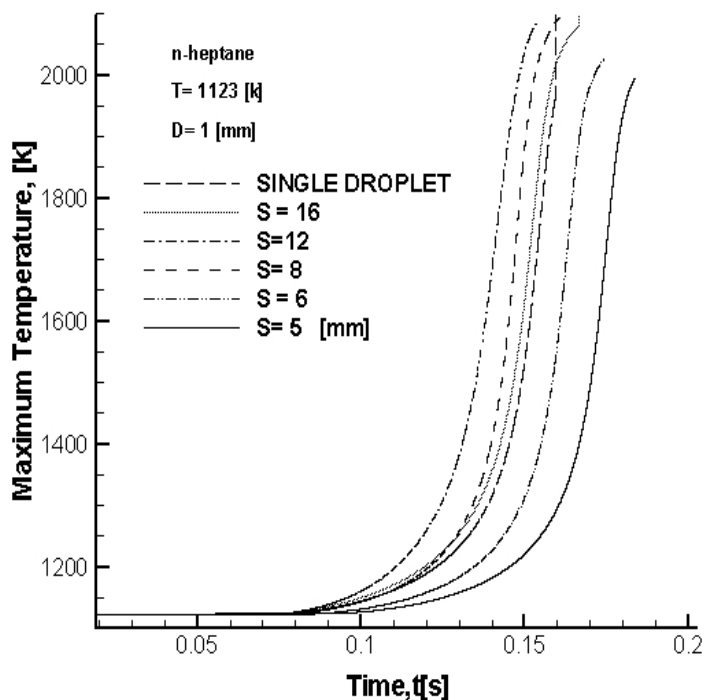
در هر گام زمانی بردارهای سرعت توسط روش MAC بدست می آیند سپس معادلات بقای انرژی و اجزا که با روش تفاضل محدود جدا سازی شده اند حل می شوند. برای ترمهای جابجایی و پخش به ترتیب از روش درجه اول (Up-wind) و درجه دو تفاضل مرکزی استفاده شده است. به دلیل وجود تبخیر و حل گذرا معادلات حاکم، قطر قطره سوخت کاهش می یابد شبکه از دو قسمت ثابت و متحرک تشکیل شده است. برای بدست آوردن شبکه متحرک از روش ماری - لندیس استفاده شده است. شکل 4 نمونه شبکه استفاده شده در این حل را نشان می دهد. این شبکه از حل معادله پواسون بدست آمده است و محاسبات برای شبکه با تعداد مختلف تست شده است تا در نتایج بدست آمده با افزایش تعداد شبکه تغییری حاصل نشود.



شکل 4- نمونه شبکه استفاده شده در حل عددی

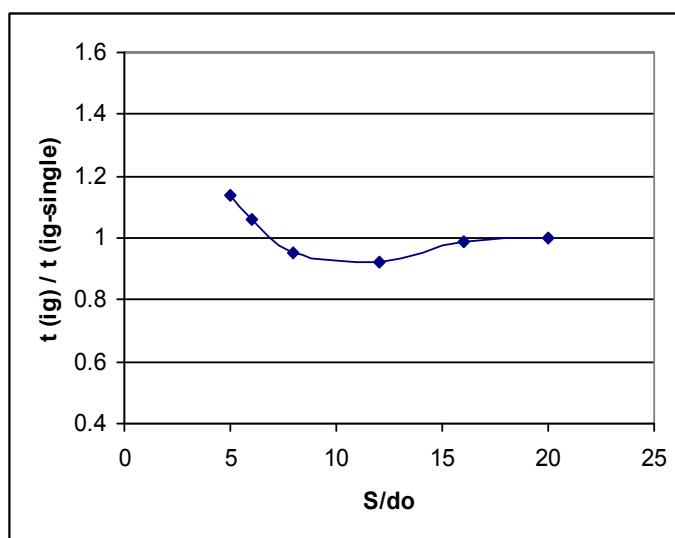
4- نتایج و بحث در مورد آنها

روند پیشرفت دما با زمان با فواصل مختلف بین قطرات با قطر یک میلیمتر در شکل 5 آمده است. زمان مشتعل شدن قطرات از قرار دادن قطره در محیط داغ تا افزایش ناگهانی دما محاسبه و تعریف می شود. در این شکل دیده میشود که برای فاصله های 16 و 12 میلیمتر زمان اشتعال کمتر از زمان اشتعال قطره منفرد است و زمان اشتعال برای فواصل کمتر دوباره افزایش می یابد.



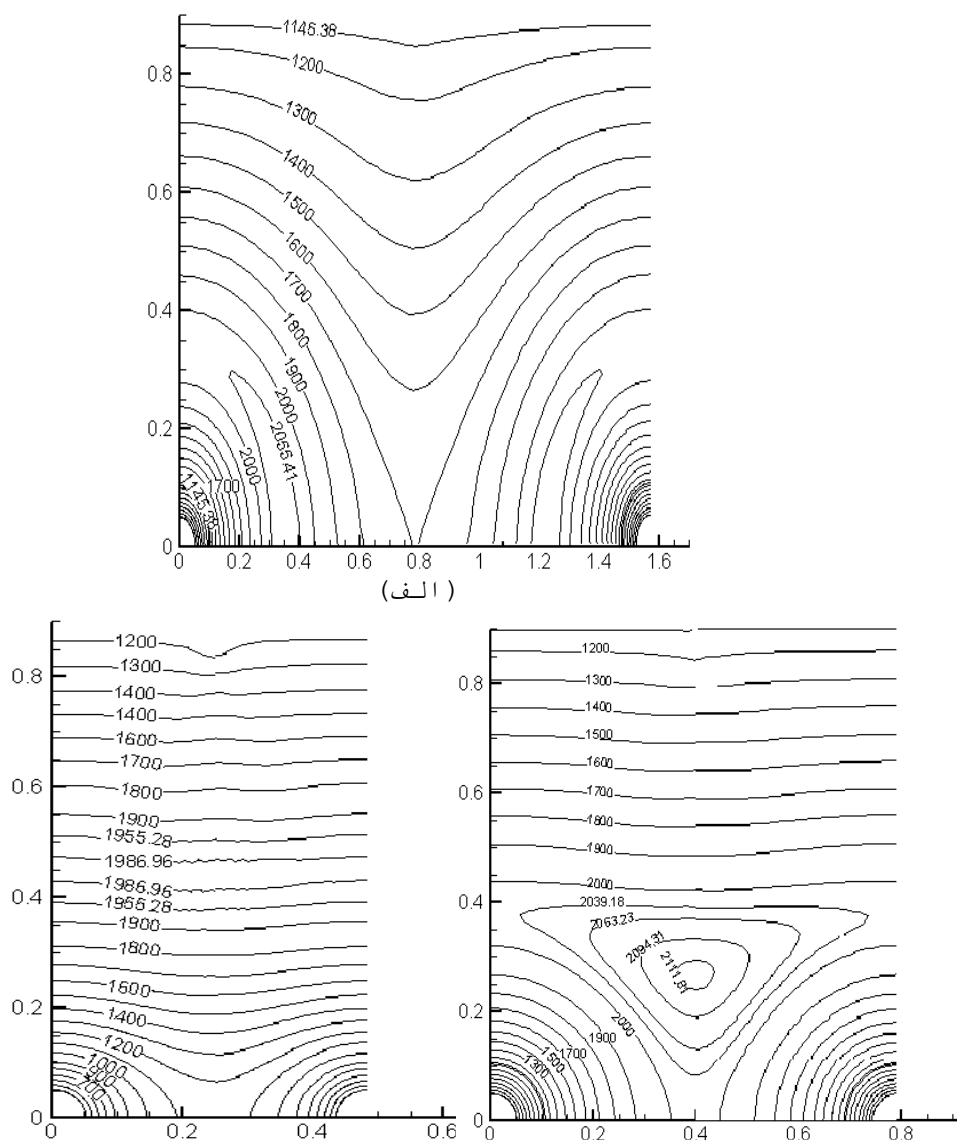
شکل 5- روند تغییرات بیشترین دما برای قطر 1 میلیمتر فواصل مختلف بین قطرات

در شکل 6 تغییرات زمان اشتعال برای ماتریس قطرات با زمان اشتعال قطره منفرد و فاصله بین قطرات با قطر قطره بی بعد می شود. با توجه به شکل با زیاد شدن فاصله به زمان اشتعال قطره منفرد نزدیک می شویم. با کم شدن فاصله بین قطرات در مورد سوخت هگزاکان و با توجه به شکل 2 می توان دید که زمان اشتعال افزایش می یابد اما در مورد سوخت هپتان در نتایج تجربی و عددی مشاهده می شود که ابتدا زمان اشتعال کاهش می یابد و پس از رسیدن به مینیمم شروع به افزایش می نماید در نتیجه یک حد اشتعال خاص برای فاصله بین قطرات وجود دارد. اختلاف کمی در زمان اشتعال بین نتایج عددی حاصل و نتایج تجربی [8] به دلیل اختلاف در دمای اولیه محیط داغ است.



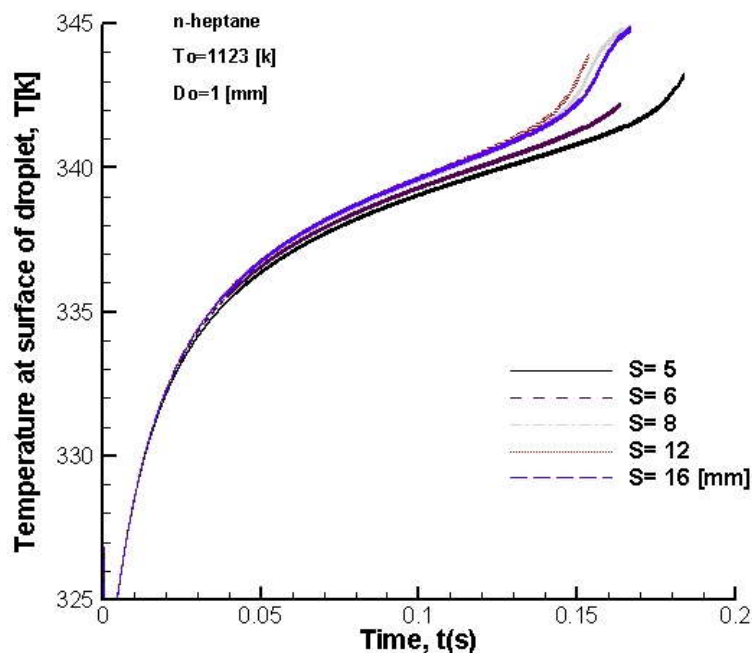
شکل 6- تغییرات زمان اشتعال بی بعد بر اساس فاصله بی بعد

توزیع دمای بدست آمده در زمان اشتعال برای قطر 1 میلیمتر در شکل 7 آمده است. در شکل 7 الف موقعیت اشتعال در فاصله 16 میلیمتر بین قطرات نشان داده شده است. زمانی که سوخت فرارایت کمتری دارد موقعیت اشتعال در بالای قطره است. در مورد سوخته‌های فرار به دلیل وجود بخار سوخت اشتعال به سختی در بالا رخ میدهد. زمانی که دو قطره بهم نزدیکتر شده، شکل 7 ب، خطوط بیشترین دما بهم می رسند. و در شکل 7 ج در فاصله 5 میلیمتری بین قطرات اشتعال بین آنها رخ نمی دهد و به صورت سیلندر دور ماتریس را می گیرد.



شکل 7 - توزیع دما در اشتعال قطر قطرات 1 میلیمتر (الف) S= 16 [mm] (ب) S= 8 [mm] (ج) S= 5 [mm]

روند تغییر دمای سطح قطرات در شکل 8 آمده است. می توان دید که با کاهش فاصله افزایش درجه حرارت متوقف می شود. در انتهای تمام نمودارها به دمایی می رسند که در فاز گاز اشتعال اتفاق می افتد. دمای انتهایی برای تمام موارد موجود در حدود 340 کلویم است که این امر نشان میدهد که با وجود اشتعال در فاز گاز در سطح قطره همچنان تبخیر وجود دارد. این موضوع یکی از مباحث بحث بر انگیز در ارتباط با اشعال و احتراق قطرات است.



شکل 8- روند تغییرات دمای سطح قطرات برای قطر 1 میلیمتر و فواصل مختلف بین قطرات

5- نتیجه گیری

- نتایج زیر از حل عددی ماتریس قطرات سوخت هپتان نرمال که در محیط داغ قرار می گیرند بدست آمده است:
- 1- با افزایش فاصله بین قطرات، زمان اشتعال به زمان اشتعال قطره منفرد نزدیک می شود اما با کاهش فاصله محدوده ای وجود دارد که زمان اشتعال از زمان اشتعال قطره منفرد کمتر می شود با کاهش بیشتر فاصله زمان اشتعال به سرعت افزایش می یابد.
 - 2- در محدوده ای که زمان اشتعال از زمان اشتعال قطره منفرد کمتر می شود محل بیشترین دما بین قطرات است. در فاصله کمتر ناحیه اشتعال مانند سیلندر ماتریس قطرات را احاطه می کند.
 - 3- زمان اشتعال کمتر در ماتریس قطرات نسبت به قطره منفرد به دلیل دبی کمتر بخار سوخت با کاهش دمای سطح قطره است این پدیده زمانی اتفاق می افتد که مشخصه انتقال جرم برای قطره منفرد بزرگتر از مشخصه نرخ واکنش باشد.

مراجع

- 1- Faeth , G.M. and Olson , D.R.: SAE Trans ., Vo1.77(1968), p.1793.
- 2- 7. Takei, M., Kobayashi, Hand Niioka, T. : Microgravity Sci . Technol., Vo1.3(1993), p.184.
- 3- 1. Umemura. A.. Ogawa. S.. and Oshim a. N.. Combust.Flame 41:45-55 (1981)
- 4- 2 Umemura , A.. in Eighteenth Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute ,Pittsburgh, 1981. pp. 1355-1363
- 5- 3. Mikami, I.1 .. Kato, H.. Sato. J.. and Kono , M., in Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute ,Pittsburgh. 1994 . pp.431-438
- 6- 4. Kato, S., Mizuno, H.. Kobayashi, H., and Niioka, T.,in Proceedings of the Third KSME-JSME Thermal Engineering Conjerence, Kyongju, 1996, pp . 1126:1-11268
- 7- Kato, S., Kobayashi, H.. and Niioka. T. "Experiment on Flame Spread of a Fuel Droplet Array in Opposed Flow: Space Forum 1998.Vol 4.33-48.
- 8- Niioka, T., Kobayashi , H., and Mito, D., in Mechanics and Combustion of Droplet. and Sprays (Chiu , H. H. and Chigier, N., eds .), Begell House, New York. 1995, pp . 364--375.
- 9- Mawid, M. and Aggarwal, S.K. : Comb. Sci. Technol., Vo1.65(1989), p.137.
- 10- Niioka, T., Ishiguro, S. and Saitoh, T.: Technical Report of National Aerospace Laboratory TR -628T , 1980.
- 11- R.J. Kee, G.Dixon-Lewis, J.Warnatz, M.E. Coltrin, and J.A. Miller. A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multicomponent Transport Properties. Technical Report SAND86-8246, Sandia National Laboratories, 1994