

# چگونگی محاسبه دما در امتداد شعله و تأثیر عوامل موثر روی آن

رضا قاسم زاده

**چکیده:** طول شعله حاصل از احتراق گاز طبیعی با هوای سربه سر و همچنین با هوای اضافی برای مشعل‌های با توان ۱۵ MW که در کوره‌های بزرگ واحدهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد توسط روابط موجود در مراجع مدل سازی شده و با عوامل شیمیائی ایجاد شده در هر قسمت هماهنگ گردیده است. در تحلیل ریاضی آن از روش یک بعدی برای تعیین توزیع دما در امتداد مسیر شعله استفاده شده است.

عوامل موجود در محصولات احتراق هر قسمت نیز با توجه به دماهای مختلف آن از حل روابط ترمودینامیکی تعادل بین آنها بدست آمده است. در این پژوهش ارتباط بین دمای شعله در طول آن و نیز عوامل موجود در قسمت‌های مختلف شعله و تأثیر متغیرهایی از قبیل میزان احتراق<sup>۱</sup> و تأثیر دمای هوای ثانویه روی آن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل بیانگر آنست که دما در دهانه مشعل کم بوده ولی در امتداد شعله سریعاً افزایش می‌یابد و به میزان مشخص می‌رسد. عوامل مختلف موجود در محصولات احتراق تا دمای  $k$  ۱۵۰۰ محسوس نبوده و از آن پس افزایش قابل ملاحظه‌ای را دارا می‌باشد. افزایش دمای هوا نیز باعث افزایش طول شعله می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** سربه سر، میزان احتراق، گرمای درونداشت، هوای اضافی

## ۱. مقدمه

هر چند مطالعات جامعی روی جریان سیالات، چگونگی اختلاط سوخت و هوا و انتقال حرارت از مشعلها در کوره‌ها صورت گرفته و برخی از آنها در مقالات [1,8] ارائه شده است، اما موضوع این پژوهش در آنها بررسی نشده است. اخیراً مطالعات اندکی در کوره‌های سیمان صورت گرفته و طول شعله و تأثیر هوای دم روی آنها بررسی شده است [9]. یکی از پژوهشگران [10] درمقیاسی نیمه صنعتی توانست مدلی برای تعیین طول شعله در کوره دوار بصورت تابعی از ابعاد مشعل و دیگر متغیرهای درگیر ارائه دهد، هرچند که صحت این مدلها هیچگاه بصورت کامل امتحان نشده است. بررسی‌های انجام شده توسط دیگر پژوهشگران [11] بیانگر آنست که ویژگی هر شعله به مقدار زیاد به طراحی مشعل آن، شکل کوره و نیز چگونگی اختلاط هوای ثانویه با آن بستگی دارد. در این پژوهش از فرمولهای ارائه شده توسط پژوهشگران استفاده شده و توزیع دما در امتداد محور مشعل مشخص شده و با عوامل موجود در قسمت‌های مختلف شعله هماهنگ گردیده است.

مقاله در تاریخ ۱۳۸۳/۸/۱۶ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۴/۲/۲۰ به تصویب نهایی رسیده است.

دکتر رضا قاسم زاده دانشیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و

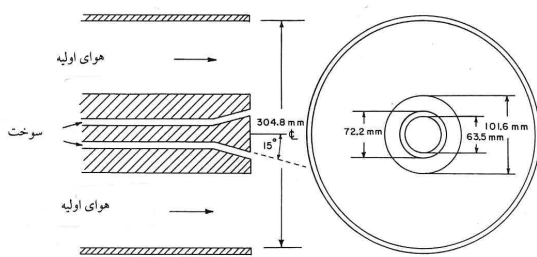
صنعت ایران، Rgzadeh@iust.ac.ir

جهت محاسبه دما از مدل تک بعدی استفاده شده است باین ترتیب که شعله را به ده قسمت مساوی همدم تقسیم کرده و بیلان حرارت روی نواحی مختلف آن در نظر گرفته شده تا دمای شعله در هر قسمت محاسبه شود.

فرض بر این است که شعله استوانه‌ای شکل بوده و بصورت شعاعی به گونه‌ای رفتار می‌کند که حرارت در امتداد اشعه آن انتقال می‌یابد و به عبارت دیگر انتقال حرارت در امتداد محور شعله در مقایسه با توزیع شعاعی آن اندک می‌باشد.

## ۲. مشخصات مشعل و سوخت مصرف شده

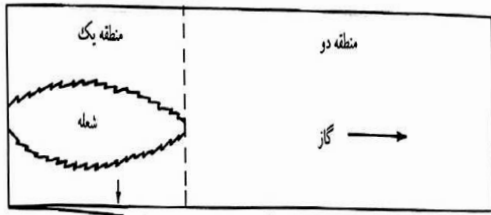
۲-۱- **مشعل:** مشخصات هندسی مشعل استفاده شده در شکل زیر ارائه شده است.



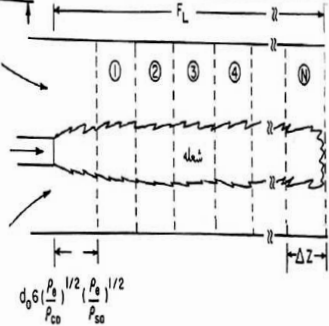
شکل ۱. شمائی از مشعل مورد استفاده در مدل محاسباتی

<sup>1</sup> Stockiometric

<sup>2</sup> Firing rate



(الف)



(ب)

شکل ۲. (الف) شمای شعله (ب) تقسیم‌بندی آن به N قسمت

همانگونه که در شکل نشان داده شده، شعله را به N قسمت مساوی به پهنای ۰/۵ متر تقسیم می‌کنیم.

تکرار محاسبات بیانگر آنست که تقسیم شعله به قسمت‌های ریزتر تأثیر چندانی در دقت برآورد دما ندارد. با برقراری بیلان حرارت<sup>۱</sup> روی هر قسمت داریم:

$$Q_z - Q_{gen} = Q_z - Q_{gh} - Q_{z+\Delta z} \quad (5)$$

که در آن:

$$Q_z = m_{T,z} \int_{298}^{T_z} C_{pcp} dT \quad (6)$$

$$Q_{gen} = (m_{en,z+\Delta z} - m_{en,z}) \frac{H_F(1-H_L)}{AF^*} \quad (7)$$

$$Q_s = \frac{A_s \epsilon_s}{\rho_s} (J_s - E_s) \quad (8)$$

$$Q_{sh} = A_{sh} h_{out} (T_{sh} - T_a) \quad (9)$$

و

$$Q_{z+\Delta z} = m_{T,z+\Delta z} \int_{298}^{T_{z+\Delta z}} C_{pcp} dT \quad (10)$$

با یکی کردن روابط ۱ و ۱۰ و مرتب کردن آن رابطه زیر حاصل می‌شود.

رابطه [11] دمای  $T_{z+\Delta z}$  را بر حسب  $T_z$  بیان می‌کند.

$$T_{z+\Delta z} = [m_{T,z} C_{pcp} (T_z - 298) + (m_{en,z+\Delta z} - m_{en,z}) \frac{H_F(l - H_L)}{AF^*} - A_{sh} h_{out} (T_{sh} - T_a) - \frac{A_s \epsilon_s}{\rho_s} (J_s - E_s) - m_{T,z+\Delta z} C_{pcp} 298] / (m_{T,z+\Delta z} C_{pcp}) \quad (11)$$

۲-۲. گاز مصرفی: آنالیز گاز مصرف شده براساس گزارش شرکت پخش فراورده‌های نفتی به قرار زیر بوده است.

درصد	عامل
۸۸	CH <sub>۴</sub>
۳/۴	C <sub>۲</sub> H <sub>۶</sub>
۱/۳	C <sub>۳</sub> H <sub>۸</sub>
۰/۳	۱ - C <sub>۴</sub> H <sub>۱۰</sub>
۰/۴	N - C <sub>۴</sub> H <sub>۱۰</sub>
۰/۱	۱ - C <sub>۵</sub> H <sub>۱۲</sub>
۰/۱	N - C <sub>۵</sub> H <sub>۱۲</sub>
۰/۱	N - C <sub>۶</sub> H <sub>۱۴</sub>
۵/۸	N <sub>۲</sub>
۰/۵	CO <sub>۲</sub>

### ۳. روش کار

#### ۳-۱. تعیین طول شعله

برای تعیین طول شعله از معادلهٔ بیر [1] مطابق زیر استفاده می‌کنیم.

$$F_L = 6d_0(1 + AF^*) \left( \frac{\rho_e}{\rho_{cp}} \right)^{1/2} \left( \frac{\rho_e}{\rho_{sa}} \right)^{1/2} \quad (1)$$

برای یک مشعل دو لول داریم:

$$\rho_e = \frac{m_F + m_{pa}}{m_F + \frac{m_{pa}}{\rho_{pa}}} \quad (2)$$

$$d_0 = \frac{(m_F + m_{pa})}{[(G_F + G_{pa}) \eta p_e]^{1/2}} \quad (3)$$

$$AF^* = \frac{(AF)m_F - m_{pa}}{m_F} \quad (4)$$

عبارت  $\left( \frac{\rho_e}{\rho_{sa}} \right)^{1/2}$  موجود در رابطه ۱ و همچنین چگونگی تأثیر دمای

هوای ثانویه روی طول شعله از مرجع [11] اقتباس شده است.

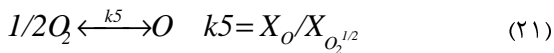
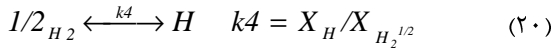
قابل ذکر است که این رابطه با تحقیقات پژوهشگران [9,10]

مطابقت داشته و تا ۲۰٪ با مقادیر واقعی سازگاری دارد.

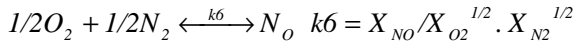
#### ۳-۲. تعیین دمای شعله

شکل ۲ یک شعله و تقسیم بندی آنرا به N قسمت نشان می‌دهد.

<sup>3</sup> heat balance



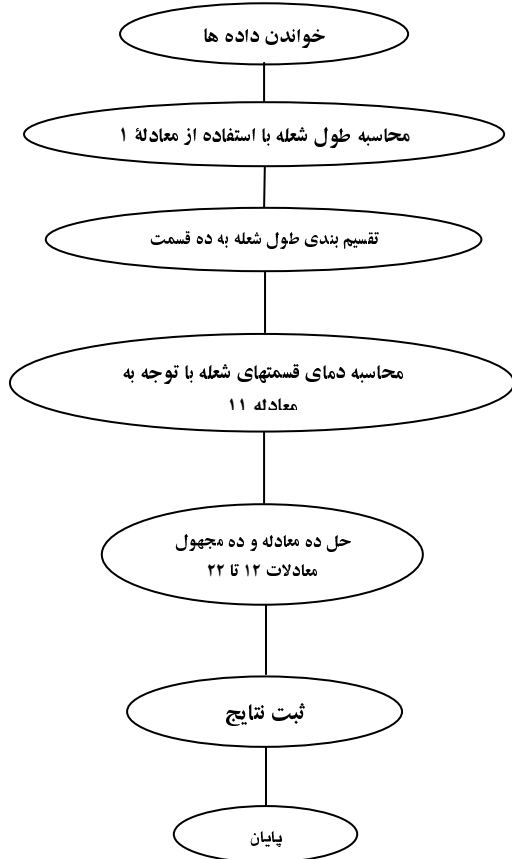
(۲۲)



از آنجا که  $k$  تابع دما است، برای محاسبه عوامل فوق، دارا بودن دمای محصولات احتراق الزامی است. اینست که دمای محصولات احتراق را در هر قسمت محاسبه کرده و آنگاه عوامل موجود در آنرا بدست می آوریم. برای سهولت می توان از برنامه مدون کامپیوتری استفاده کرد.

#### ۴. روش محاسبه

جهت محاسبه دمای شعله و تعیین عوامل موجود در آن از برنامه کامپیوتری که فلوجارت آن در زیر ارائه شده استفاده شده است.



نمودار ۳. فلوجارت

#### ۵. نتایج و بحث

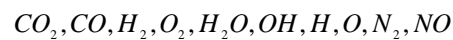
نتایج حاصل از این پژوهش در زیر ارائه شده است.

الف - عوامل موجود: عوامل موجود در محصولات حاصل از احتراق گاز طبیعی با هوای سربه سر در نمودار ۴ ارائه شده است.

#### ۳-۳. نوع و میزان عوامل موجود در محصولات احتراق

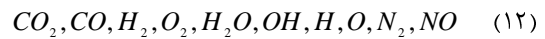
در خلال سوختن گاز طبیعی با هوا تعادلی بین عوامل قابل سوختن، اکسیژن و محصولات احتراق یعنی دی اکسید کربن، بخار آب و دیگر عوامل بوجود می آید. در دمای بالا تفکیک اکسید دو کربن به منو اکسید کربن و اکسیژن و نیز تفکیک بخار آب به اکسیژن و هیدروژن صورت می گیرد.

این واکنشها در بیش از  $1500K$  قابل ملاحظه بوده و روال به گونه ای است که در دمای زیادتر دیگر واکنشهای تفکیکی نیز صورت می گیرد. جهت تعیین این عوامل روش زیر را اتخاذ می کنیم. فرض کنید که گاز طبیعی با هوا سوخته و عوامل زیر را تولید کند.

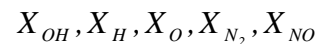
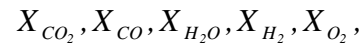


در اینصورت داریم:

$\leftrightarrow$  (هوای سربه سر)  $e$  + گاز طبیعی



برای تعیین میزان هر یک از عوامل فوق به ۱۰ معادله که دربرگیرنده روابط بین آنهاست نیاز می باشد. برای اینکار جزء ملکولی عوامل حاصل از احتراق را بترتیب:



در نظر می گیریم. با برقرار کردن روابط بیلان جرم بین کربن، هیدروژن، اکسیژن و ازت داریم:

$$\sum_{i=1}^{10} X_i = 1 \quad (13)$$

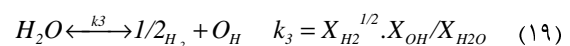
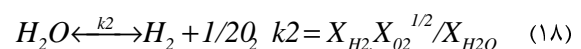
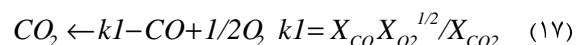
توازن مقادیر  $(nC), (nH), (nO), (nH), (nN), (nH)$  را مطابق زیر برقرار می کنیم.

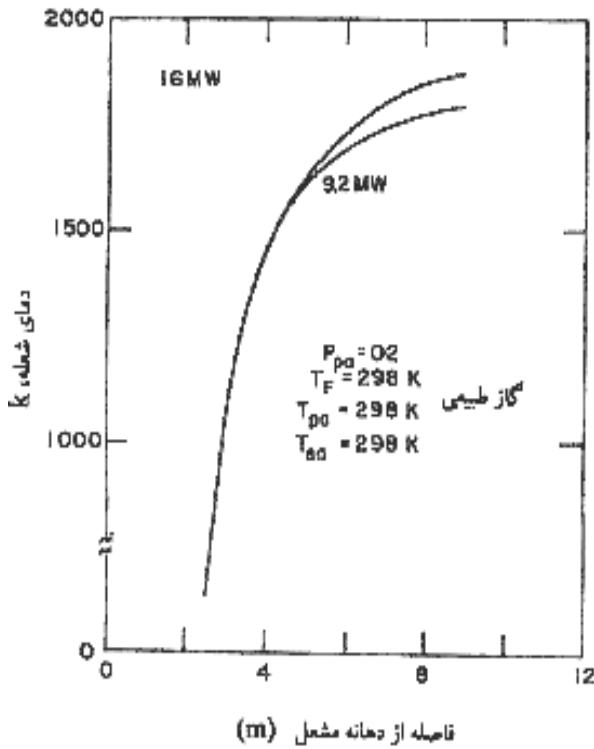
$$nC/nH = (X_{CO} + X_{CO_2}) / (2X_{H_2} + 2X_{H_2O} + X_{OH} + X_H) \quad (14)$$

$$nO/nH = (X_{CO} + 2X_{CO_2} + 2X_{O_2} + X_{H_2O} + X_O + X_{NO} + X_{OH}) / (2X_{H_2} + 2X_{H_2O} + X_{OH} + X_H) \quad (15)$$

$$nN_2/nH = (X_{NO} + X_{N_2}) / (2X_{H_2} + X_{OH} + X_H) \quad (16)$$

دیگر معادلات را براساس ثابت تعادل واکنشها ( $k$ ) مطابق زیر برقرار می کنیم:

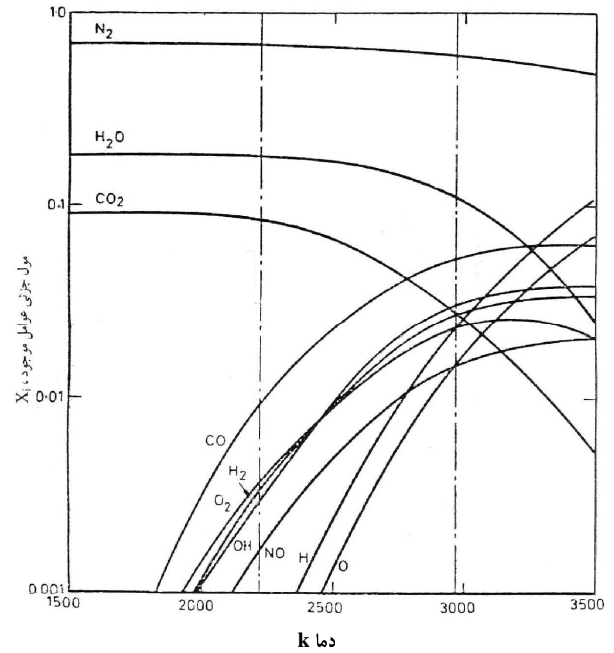




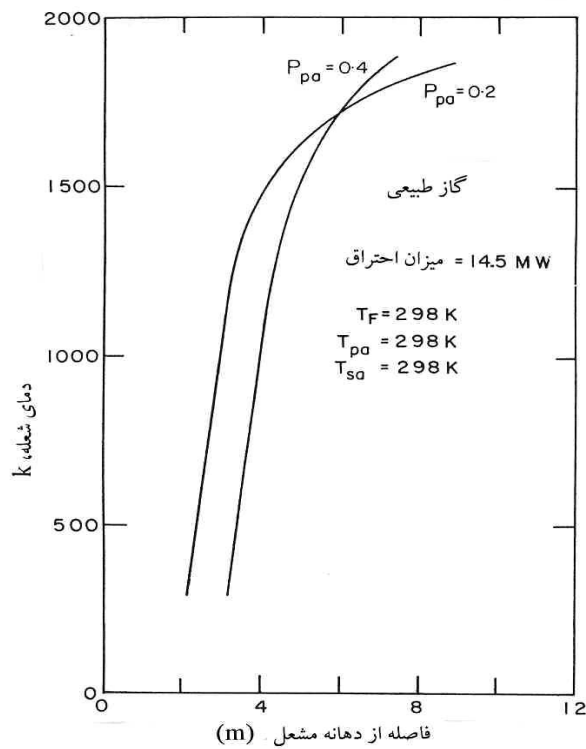
نمودار ۶. تأثیر میزان سوخت روی دمای شعله

ب- دما: تغییرات دما نسبت به فاصله از دهانه مشعل با توان حرارتی ۱۴/۵ MW در نمودار ۵ ارائه شده است.

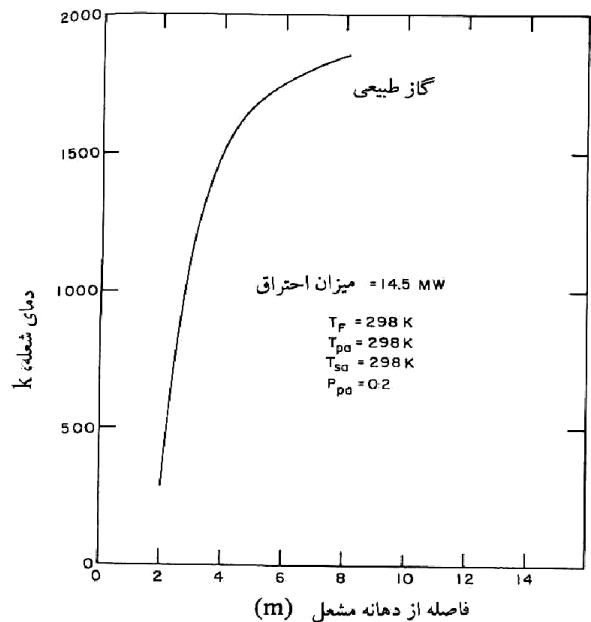
ج- میزان گاز: تغییر در میزان گاز طبیعی مصرف شده از توان ۹/۲ به ۱۶ MW همراه با تغییرات دما در نمودار ۶ ارائه شده است.



نمودار ۴. عوامل موجود در محصولات حاصل از احتراق گاز طبیعی بر حسب دما



نمودار ۷. تأثیر هوای اضافی روی دمای شعله



نمودار ۵. دمای شعله حاصل از احتراق گاز طبیعی نسبت به فاصله از دهانه مشعل

ه- دمای هوای ثانویه: تأثیر دمای هوای ثانویه نیز از ۲۹۸ به ۷۷۳ کلوین در نمودار ۸ ارائه شده است.

د- هوای اضافی: تأثیر افزایش میزان هوای اضافی از ۲۰ به ۴۰ درصد نسبت به حالت سربه سر در نمودار ۷ ارائه شده است.

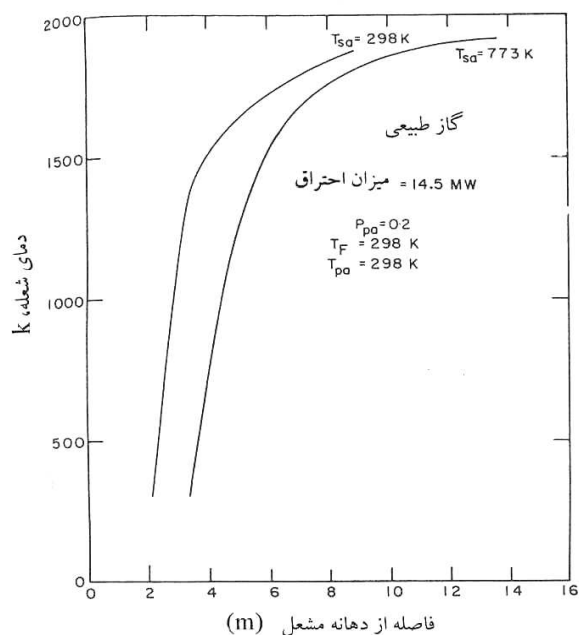
۲- حرارت درونداشت اضافی ناشی از پیش گرم کردن هوای ثانویه باعث افزایش دمای شعله می‌شود.

### مراجع

- [1] Gorog, J.P., Brimacombe, J.K., and Adams, T.N., Metall.Trans. vol.12B, B.1981, pp.55-70.
- [2] Gorog, J.P., Adams, T.N., and Brimacombe, J.K., Metall.Trans.B,2, vol.13B, pp.153-63.
- [3] Trinks, W., Mawhinney, M.H., Industrial Furnaces, John Wiley Sons, Now York, NY, 1991, vols. I and II.
- [4] Read, R.T., ed.: North American Combustion Handbook, North American Mfg. Co., Cleveland, OH, 1978.
- [5] Thring, M.W., The Science of Flames and Furnaces, Chapman and Hall, London, 1962.
- [6] Beer, T.M., and Ghigier, M.A., Combustion Aerodynamics, Applied Science Publishers, London, 1972.
- [7] Lockwood, F.C., Whitelaw, J.H., and Gosman, A.D., "The Prediction of the Performance of Combustion chambers and Furnaces", Short course at Pennsylvania State University, April 1998.
- [8] Afgan, N.H., and Beer, J.M., Heat Transfer in Flames, Scripta Book Co., Washington, DC, 1979.
- [9] Ruhland, W., J. Inst. Of Fuel, vol. 40, pp. 69-75., 1973.
- [10] Pearce, K.W.: J. Inst. Of Fuel, vol.46, pp. 363-71., 1973.
- [11] Ricou, F.P. and Spaulding, D.B., J. Fluid Mech., vol. 11, pp. 21-32. 1991.

### علائم اختصار

مساحت $m^2$	$A$
محیط	$a$
نسبت سربه سر سوخت و هوا بر مبنای جرم	$AF$
نسبت سربه سر سوخت و هوا برای مشعل دولول (معادله ۴)	$AF^*$
گرمای ویژه $KJ/kgk$	$Cp$
قطر معادل مشعل	$do$
ضریب سربه سر	$e$
شعله	$f$
سوخت	$F$
طول شعله، $m$	$Fl$
اندازه حرکت سیال، $kgm/s^2$	$\theta$
تولید شده	$gen$



نمودار ۸. تأثیر دمای هوای ورودی روی دمای شعله

### ۶. نتیجه گیری

- تحلیل نتایج حاصل از این پژوهش در زیر ارائه شده است.
- الف** - تغییر ناشی از عوامل موجود در محصولات احتراق تا حدود دمای  $1500\text{ K}$  محسوس نبوده ولی در دمای زیادتر صورت می‌گیرد. در هر حال در این مشعل‌ها تأثیر تفکیک عوامل روی دمای شعله اندک بوده و قابل صرف‌نظر می‌باشد.
- ب** - افزایش نهائی دما به گونه‌ای است که در هشت متری دهانه مشعل، در حدود  $2000\text{ K}$  تقریباً ثابت می‌ماند.
- ج** - با توجه به نمودار ۶ دمای شعله در فاصله چهار متری دهانه مشعل با توان بیشتر افزایش می‌یابد. این بررسی با مشاهدات حاصل از مرجع [6] سازگاری دارد. در این مورد طول شعله نیز تغییر نمی‌کند.
- د** - هوای اضافی باعث کاهش طول شعله شده در حالیکه دمای پیک آنرا افزایش می‌دهد.
- ه** - با توجه به نمودار ۸ ملاحظه می‌شود که با افزایش دمای هوای ثانویه، طول شعله به گونه قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد، اما بر روی ماکزیمم دمای شعله تأثیر چندانی ندارد.
- افزایش طول شعله ناشی از کاهش میزان اختلاط هوای ثانویه با چگالی کمتر می‌باشد.
- براساس معادله (۱) تأثیر اندک دمای هوای ثانویه روی ماکزیمم دمای شعله ناشی از تأثیر موارد زیر است.
- ۱- انتقال حرارت زیادتر از شعله که در سطح بیشتری صورت می‌گیرد، افت دمای آنرا سبب می‌شود.

هوای ثانویه	$Sa$	تالابو $W/m^2$	$J$
لایه بیرونی	$Sh$	ارزش حرارتی خالص سوخت $kJ/kg$	$H_F$
دما، $k$	$T$	ثابت تعادل	$K$
ضریب نشر	$\mathcal{E}$	درصد ئیدروژن تلف شده	$H_L$
چگالی جریان $kg/m^3$	$\rho$	ضریب انتقال حرارت	$h$
چگالی معادل سوخت و گاز	$\rho_e$	سرعت جریان $kg/s$	$W/m^2kM$
کسر ملکولی	$X$	هوای اولیه	$Pa$
موقعیت مقطع	$Z$	شار حرارت، $W$	$Q$
		سطح	$s$