

## تأثیر دمای دیواره و طول لوله تخلیه بر نوسانات دما و فشار در احتراق ضربانی

ایمان زحمتکش<sup>۱</sup>، آرمان اکبرزاده<sup>۲</sup>، حمید ممهدی هروی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، گروه مکانیک، مشهد، ایران Zahmatkesh5310@mshdiau.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، گروه مکانیک، مشهد، ایران ArmanAkbarzadeh@hotmail.com

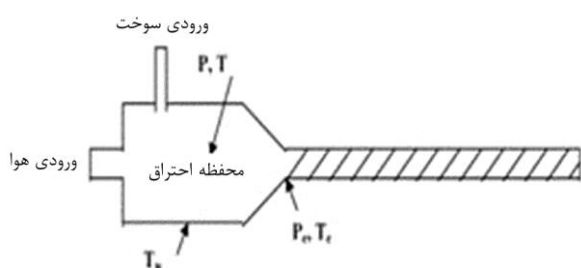
<sup>۳</sup> دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، گروه مکانیک، مشهد، ایران Momahdedi\_Heraviv@yahoo.com

### چکیده

استفاده از احتراق ضربانی مزایای بسیاری دارد که از آن جمله می‌توان به بازده گرمایی بالا، سرعت بالای انتقال حرارت و تولید کم آلاینده‌ها اشاره کرد. یک محفظه احتراق ضربانی دارای ساختاری ساده، قابلیت راه‌اندازی توسط انواع مختلف سوخت‌ها (گاز، مایع و جامد) و هزینه کارکرد بسیار پایین است. در این مقاله به شبیه‌سازی عددی فرآیند احتراق ضربانی سوخت پروپان پرداخته شده است. تأکید اصلی بر روی بررسی تأثیر دمای دیواره و طول لوله تخلیه بر نوسانات دما و فشار در محفظه احتراق می‌باشد. برای این منظور، نتایج محفظه‌هایی با دمای دیواره ۴۰۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۴۰۰ کلوین با یکدیگر مقایسه شده است. علاوه بر این، تأثیر طول لوله تخلیه با مقایسه نتایج لوله‌های تخلیه‌ای با طول‌های ۷۳۸، ۹۴۰، ۱۱۵۰ و ۱۴۴۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. حل معادلات با روش رانگ-کوتا مرتبه ۴ بوده که در نرم‌افزار متلب انجام شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که نوسانات دما و فشار در محفظه احتراق ضربانی به شدت به دمای دیواره محفظه و طول لوله تخلیه وابسته می‌باشد. مشخص می‌شود هنگامی که دمای دیواره محفظه پایین است، احتراق ضربانی به تدریج ضعیف شده و سپس خاتمه می‌یابد. در مقابل، نوسانات دمایی و فشاری بسیار کمی در محفظه با دمای دیواره زیاد مشاهده می‌شود. همچنین مشخص می‌شود هنگامی که دمای دیواره محفظه احتراق بالاست، طول لوله تخلیه تأثیر قابل توجهی بر دامنه نوسانات دمایی و فشاری به همراه ندارد.

### مقدمه

محفظه‌های احتراق ضربانی دستگاه‌های ساده‌ای هستند که از شیرهای ورودی سوخت و هوا، محفظه احتراق و لوله تخلیه تشکیل شده‌اند. شکل ۱ طرح شماتیک یک محفظه احتراق ضربانی را نشان می‌دهد [۱].



شکل ۱: طرح شماتیک یک محفظه احتراق ضربانی

در احتراق ضربانی، نخست احتراق مخلوط سوخت و هوا رخ می‌دهد. سپس، محصولات احتراق از طریق لوله تخلیه از محفظه خارج می‌شوند. خروج گازها سبب کاهش فشار محفظه شده که این امر، ورود سوخت و هوای جدید به محفظه احتراق را به دنبال دارد. در مطالعات گذشته نشان داده شده است که حضور نوسانات دما و فشار در احتراق ضربانی باعث بالابودن میزان تبادل حرارت در آن می‌شود [۳،۲]. این به آن علت است که انتقال حرارت جابجایی ناشی از جریان‌های نوسانی بسیار بیشتر از جریان‌های متلاطم پایدار با میانگین عدد رینولدز یکسان می‌باشد [۵،۴]. فشردگی محفظه‌های احتراق ضربانی، که ناشی از نرخ بالای انتقال حرارت آن‌ها بوده، از یک سو و قابلیت آنها در تامین هوای مصرفی خود بدون نیاز به وسیله خارجی، از سوی دیگر سبب شده که فناوری احتراق ضربانی به طور وسیعی مورد استفاده باشد به گونه‌ای که در سال ۱۹۹۳ شرکت لنوکس بیشتر از یک میلیون مشعل ضربانی را در آمریکا فروخته است [۶].

علیرغم مزایای ذکر شده، فرآیند احتراق ضربانی محدودیت‌هایی را از قبیل وجود صدای ناهنجار در خروجی، طبیعت تخریب‌کننده نوسانات جریان و حساسیت به ترکیبات گازی به همراه دارد به گونه‌ای که از صدای مربوط

به نوسانات فشاری در فرآیند احتراق ضربانی به عنوان مشکلی جدی یاد شده است. البته انتشار این صدای ناهنجار را می‌توان با استفاده از

### واژه‌های کلیدی

احتراق ضربانی - لوله تخلیه - انتقال حرارت - حل عددی

$$\frac{d}{dt} \oint_{cv} \rho \epsilon dv + \int_{cs} \rho \vec{v} \cdot \hat{n} \epsilon ds + \int_{cs} \vec{P} \cdot \hat{n} ds + \oint_{cv} \vec{q} \cdot \hat{n} ds = \int_{cv} Q dv \quad (1)$$

در رابطه بالا،  $\epsilon = e + v^2/2$  که در آن،  $e$  انرژی داخلی مخصوص و  $v^2/2$  انرژی جنبشی مخصوص می‌باشند. همچنین،  $Q$  نرخ تولید حرارت در واحد حجم محفظه و  $\vec{q}$  نرخ تبادل حرارت در واحد سطح آن می‌باشند.

معادله (۱) را می‌توان با فرضیات زیر ساده کرد: (۱) نقش انرژی جنبشی مخصوص در مقایسه با انرژی داخلی مخصوص بسیار کوچک است. (۲) محفظه احتراق ناحیه‌ای همگن می‌باشد. (۳) روابط گازهای ایده‌آل برقرار است.

بکارگیری فرضیات بالا و بیان نرخ تبادل حرارت بر حسب درجه حرارت دیواره ( $T_w$ ) و ضریب انتقال حرارت جابجایی ( $h$ )، معادله (۱) را به صورت زیر بدست می‌دهد:

$$\frac{1}{\gamma - 1} \frac{dP}{dt} = C_p \left[ \frac{\dot{m}_i T_i}{V} - \frac{\dot{m}_e T_e}{V} \right] + Q + \frac{h A_s}{V} (T_w - T_e) \quad (2)$$

که در آن،  $V$  حجم محفظه احتراق و  $A_s$  سطح آن بوده و  $\gamma$  نسبت گرمای ویژه،  $T_i$  و  $\dot{m}_i$  دما و دبی ورودی و  $T_e$  و  $\dot{m}_e$  دما و دبی خروجی از محفظه احتراق می‌باشند.

با اعمال اصل بقای جرم به محفظه احتراق و پس از ساده‌سازی و استفاده از فرضیات بالا خواهیم داشت که:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\dot{m}_i - \dot{m}_e}{V} \quad (3)$$

از طرف دیگر، مشتق‌گیری از معادله حالت گاز ایده‌آل نتیجه می‌دهد که:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{RT} \frac{d\rho}{dt} - \frac{\rho}{RT^2} \frac{dT}{dt} \quad (4)$$

ترکیب معادلات (۲)–(۴) و استفاده از متغیرهای زیر، معادلات (۵) و (۶) را بدست می‌دهد:

$$\bar{T} = T/T_0 \quad \text{دمای بی‌بعد}$$

$$\bar{P} = P/P_0 \quad \text{فشار بی‌بعد}$$

$$z_i = \dot{m}_i/V \quad \text{دبی ورودی بر واحد حجم محفظه}$$

$$z_e = \dot{m}_e/V \quad \text{دبی خروجی بر واحد حجم محفظه}$$

$$Lc_1 = V/A_s \quad \text{طول مشخصه اولیه}$$

$$\tau_f = \rho_0/z_i \quad \text{زمان مشخصه جریان}$$

$$\tau_{HT} = Lc_i \rho_0 C_p T_0 / h T_w \quad \text{زمان مشخصه انتقال حرارت}$$

$$\tau_c = Lc_i \rho_0 T_0 / Q \quad \text{زمان مشخصه احتراق}$$

$$\frac{d\bar{T}}{dt} = \gamma \left\{ \frac{1}{\tau_f} + \frac{1}{\tau_{HT}} + \frac{1}{\tau_c} \right\} \bar{T} \bar{P}$$

تکنیک‌های آکوستیکی صدا، همانند عایق‌کردن محفظه احتراق، کاهش داد. علاوه بر این، برای کنترل تخریب‌کنندگی نوسانات جریان در یک محفظه احتراق ضربانی می‌توان اجزای آن را از مواد مناسب با مقاومت بالا ساخت.

ریچارد و همکاران [۷] یک مدل نظری جهت شبیه‌سازی فرآیند احتراق ضربانی ارائه کرده‌اند.

سوجیموتو و ماچی [۸] از روش مشخصه‌ها در تحلیل یک محفظه احتراق ضربانی استفاده کرده‌اند. آنها نتیجه گرفتند که تأخیر در احتراق نقش مهمی در عملکرد محفظه‌های احتراق ضربانی بازی می‌کند و بدین ترتیب، فرآیندهایی که این زمان تأخیر را تعیین می‌کنند، بر فرآیند احتراق ضربانی تأثیرگذارند.

مورل [۹] نتایجی از مدل تفاضل محدود بدست آورده است که معادلات یک بعدی بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی را حل می‌کند.

مقیمان و رضاپور [۱۰] یک شبیه‌سازی عددی برای نوسانات احتراقی و تولید دوده در یک محفظه احتراق ضربانی ارائه کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که هنگامی که هوای ورودی در دمای محیط بوده و دمای دیواره کمتر از ۱۱۰۰ کلوین باشد، تولید دوده در محفظه‌های احتراق ضربانی با سوخت پروپان ناچیز خواهد بود.

مقیمان و همکاران [۱۱] با شبیه‌سازی عددی تشکیل اکسیدهای نیتروژن در محفظه احتراق ضربانی تحقیقی ارائه داده‌اند که در آن تأثیر ضریب اصطکاک لوله، دمای هوای ورودی، نسبت هم‌ارزی و ضریب انتقال حرارت جابجایی بر انتشار اکسیدهای نیتروژن در احتراق ضربانی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آنها نشان می‌دهد که کاهش دمای دیواره و دمای هوای ورودی، تشکیل اکسیدهای نیتروژن را کاهش می‌دهد. آنها همچنین دریافتند که تشکیل اکسیدهای نیتروژن با افزایش طول لوله تخلیه و ضریب انتقال حرارت جابجایی کاهش خواهد یافت.

مهدی هروی و مقصودی [۱۲] با ساخت یک محفظه احتراق ضربانی به بررسی تجربی اثر برخی از عوامل مؤثر بر دمای شعله و فرکانس احتراق ضربانی و همچنین، انتشار اکسیدهای نیتروژن و مونوکسیدکربن پرداخته‌اند. نتایج آنها حاکی از آن است که با کاهش غلظت سوخت، انتشار اکسیدهای نیتروژن و مونوکسیدکربن کاهش می‌یابد.

### معادلات حاکم بر احتراق ضربانی

معادلات حاکم بر احتراق ضربانی توسط ریچارد و همکاران [۷] ارائه شده است که در این تجزیه و تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مدل، مخلوط سوخت و هوا در شرایط استوکیومتری در نظر گرفته می‌شود. اگرچه در یک محفظه احتراق ضربانی، سوخت و هوا به طور جداگانه به محفظه وارد می‌شوند، اما با توجه به نرخ بهم‌زنی بالا در این گونه محفظه‌ها، می‌توان احتراق را پیش‌آمیخته در نظر گرفت.

معادله بقای انرژی در یک محفظه احتراق ضربانی به صورت زیر است:

در اینجا،  $S_r$  نسبت جرمی استوکیومتری ( $S_r = 3.64$ )،  $Y_{Ox,i}$  کسر جرمی اکسیژن ورودی و  $\dot{m}_{Ox,e}$  دبی جرمی خروجی اکسیژن می‌باشند.

زمان مشخصه احتراق ( $\tau_c$ ) که در روابط (۱۲) و (۱۳) ظاهر شده به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\frac{1}{\tau_c} = A' \frac{\Delta H_f}{C_p T_o} \frac{\bar{P}^2}{\bar{T}^{3/2}} Y_f \frac{Y_{Ox}}{S_r} e^{-E/RT} \quad (14)$$

که در آن،  $A'$  ثابت جنبشی است.

### تحلیل لوله تخلیه

هنگامی که اصل بقای اندازه حرکت به لوله تخلیه اعمال می‌شود، نیروهای فشار وارد شده به ابتدا و انتهای لوله تخلیه و نیروی ناشی از اصطکاک دیواره در طول لوله تخلیه ( $F_f$ )، تنها نیروهای اعمال شده در راستای محوری می‌باشند. بدین ترتیب، معادله بقای اندازه حرکت حاکم بر لوله تخلیه شکل زیر را به خود خواهد گرفت:

$$(p_e - p_o)A_e + F_f = \frac{du}{dt} \int_{tpv} \rho dv + u \left[ \frac{d}{dt} \int_{tpv} \rho dv + \oint_{cs} \rho \vec{v} \hat{n} ds \right] \quad (15)$$

در اینجا، جمله سمت راست داخل کروشه با توجه به اصل بقای جرم، برابر صفر می‌باشد. انتگرال چگالی روی حجم، به طور تقریبی برابر با حاصل ضرب چگالی گازهای ورودی به لوله تخلیه ( $\rho_e$ ) و حجم لوله تخلیه ( $V$ ) در نظر گرفته می‌شود.

سرعت در لوله تخلیه با تقسیم بر یک سرعت مشخصه ( $V_c$ ) بی‌بعد می‌شود. این سرعت مشخصه معرف سرعتی است که اگر جریان  $\dot{m}_i$  به صورت پایدار دما ثابت در لوله برقرار می‌بود، ایجاد می‌شد. بدین ترتیب

$$V_c = \frac{\dot{m}_i}{\rho_o A_e} = \frac{\dot{m}_i V}{\rho_o V A_e} = \frac{L_{c2}}{\tau_f} \quad (16)$$

در رابطه بالا،  $L_{c2}$  طول مشخصه ثانویه بوده که به صورت نسبت حجم محفظه احتراق ( $V$ ) به سطح لوله تخلیه ( $A_e$ ) تعریف می‌شود. بدین ترتیب، معادله حاکم بر سرعت بی‌بعد در لوله تخلیه ( $\tilde{u}$ ) به صورت زیر خواهد شد:

$$\frac{d\tilde{u}}{dt} = (\tilde{P}_e - 1) \left( \frac{RT_o \tau_f}{L_{tp} L_{c2}} \right) \frac{\tilde{T}_e}{\tilde{P}_e} - \frac{L_{c2} f}{2D_{tf} \tau_f} |\tilde{u}|^3 \quad (17)$$

که در آن،  $D_{tp}$  و  $L_{tp}$  به ترتیب قطر و طول لوله تخلیه می‌باشند.

### حل عددی معادلات حاکم

بدین ترتیب، معادلات حاکم بر فرآیند احتراق ضربانی را می‌توان در معادلات (۵)، (۶)، (۱۳) و (۱۷) جمع‌بندی کرد. برای حل عددی این معادلات روش رانگ-کوتای مرتبه ۴ در نرم‌افزار متلب بکار رفته است. در برنامه تهیه شده، از افزایش یا کاهش گام زمانی برای

$$- \left\{ (\gamma - 1) \frac{z_e}{\rho_o} + \frac{1}{\tau_f} + \frac{\gamma T_o}{\tau_{HT} T_w} \right\} \frac{\tilde{T}^2}{\tilde{P}} \quad (5)$$

$$\frac{d\tilde{P}}{dt} = \gamma \left\{ \frac{1}{\tau_f} + \frac{1}{\tau_{HT}} + \frac{1}{\tau_c} \right\} - \left\{ \frac{z_e}{\rho_o} + \frac{\gamma T_o}{\tau_{HT} T_w} \right\} \gamma \tilde{T} \quad (6)$$

در اینجا، اندیس ۰ نمایانگر شرایط محیط می‌باشد. دما و فشار خروجی از محفظه احتراق را با استفاده از روابط ایزنتروپیک می‌توان بر حسب دما و فشار درون محفظه به صورت زیر بدست آورد:

$$T_e = \tilde{T} + \frac{(1 - \gamma)u^2}{2\gamma RT_o} \quad (7)$$

$$P_e = \tilde{P} \left( \frac{2\gamma RT_o \tilde{T}}{2\gamma RT_o \tilde{T} + (1 - \gamma)u^2} \right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} \quad (8)$$

که در آن،  $u$  سرعت در لوله تخلیه است.

نرخ تولید حرارت در واحد حجم محفظه با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$Q = \Delta H_f \cdot R_f \quad (9)$$

که در آن،  $\Delta H_f$  گرمای واکنش و  $R_f$  نرخ واکنش احتراق می‌باشند. مقدار  $\Delta H_f$  برای سوخت پروپان (که در این مقاله مطالعه می‌شود) در متون موجود می‌باشد. نرخ واکنش احتراق نیز با استفاده از یک مدل واکنش تک مرحله‌ای بین سوخت ( $f$ ) و اکسیژن ( $ox$ ) به دست می‌آید:

$$R_f = AT^{1/2} \rho^2 Y_{Ox} Y_f e^{-E/RT} \quad (10)$$

که در آن،  $A$  ثابت جنبشی و  $E$  انرژی فعالسازی بوده و  $Y_f$  و  $Y_{Ox}$  به ترتیب، کسر جرمی اکسیژن و سوخت در محفظه احتراق می‌باشند. کسر جرمی سوخت از موازنه آن در محفظه احتراق محاسبه می‌شود:

$$\frac{d}{dt} \int_{cv} \rho Y_f dV = - \oint \rho Y_f \vec{v} \hat{n} ds - \int_{cv} R_f dV \quad (11)$$

این معادله را می‌توان با فرضیات بکاررفته در استخراج رابطه (۲) به صورت زیر ساده‌تر کرد:

$$\frac{dY_f}{dt} = (Y_{f,i} - Y_f) \frac{\tilde{T}}{\tilde{P}} \frac{1}{\tau_f} - \frac{\tilde{T}}{\tilde{P}} \left( \frac{C_p T_o}{\Delta H_f} \right) \frac{1}{\tau_c} \quad (12)$$

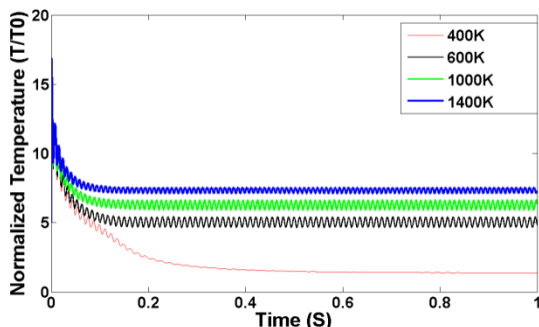
که در آن،  $Y_{f,i}$  کسر جرمی سوخت ورودی در شرایط استوکیومتری می‌باشد.

در شرایط استوکیومتری می‌توان  $Y_f$  را با  $Y_{Ox}/S_r$  جایگزین کرد و به رابطه زیر برای کسر جرمی اکسیژن رسید:

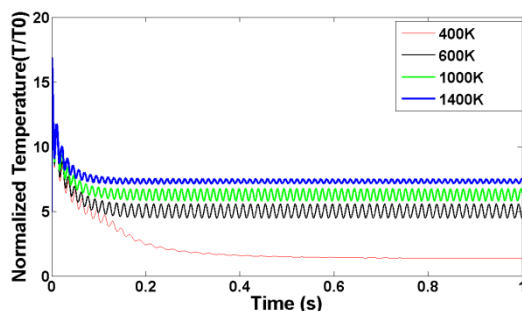
$$\frac{dY_{Ox}}{dt} = (Y_{Ox,i} - Y_{Ox}) \frac{\tilde{T}}{\tilde{P}} \frac{1}{\tau_f} - Y_{Ox} \frac{\tilde{T}}{\tilde{P}} \frac{z_e}{\rho_o} - \dot{m}_{Ox,e} \frac{\tilde{T}}{\tilde{P}} \frac{1}{\rho_o V} - S_r \frac{\tilde{T}}{\tilde{P}} \left( \frac{C_p T_o}{\Delta H_f} \right) \frac{1}{\tau_c} \quad (13)$$

شکل ۴ نوسانات دمایی در محفظه احتراق ضربانی با دمای دیواره ۶۰۰ کلوین را به ازای چهار طول مختلف برای لوله تخلیه را نشان می‌دهد. پیداست که هرچه طول لوله تخلیه افزایش می‌یابد، دامنه نوسانات دمایی نیز بیشتر می‌شود به گونه‌ای که محفظه احتراق ضربانی با طول لوله تخلیه ۱۴۴۰ میلی‌متر بیشترین دامنه نوسان را داراست.

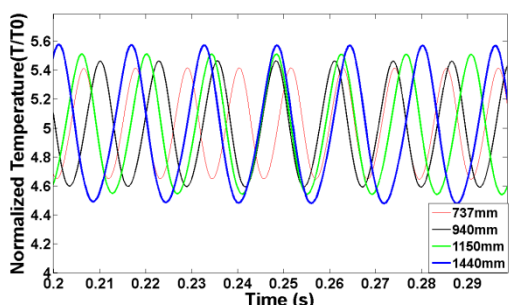
شکل ۵ نوسانات دمایی در محفظه احتراق ضربانی با دمای دیواره ۱۴۰۰ کلوین را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، سطح دما در محفظه احتراق ضربانی در شکل ۵ بیشتر از شکل ۴ است اما دامنه نوسانات مقداری کاهش یافته‌اند که البته اندازه دامنه نوسانات برای تمامی لوله‌های تخلیه تقریباً یکسان می‌باشد.



شکل ۲: نوسانات دمایی در محفظه احتراق با لوله تخلیه ۷۳۸ میلی‌متری



شکل ۳: نوسانات دمایی در محفظه احتراق با لوله تخلیه ۱۴۴۰ میلی‌متر



شکل ۴: نوسانات دمایی در محفظه احتراق با دمای دیواره ۶۰۰ کلوین

رسیدن به بهترین حالت میانی مابین سرعت و دقت محاسبات استفاده می‌شود.

مقادیر عددی متغیرهای عملکردی مورد نیاز برای اجرای برنامه در جدول ۱ آورده شده است که مربوط به احتراق ضربانی سوخت پروپان می‌باشند.

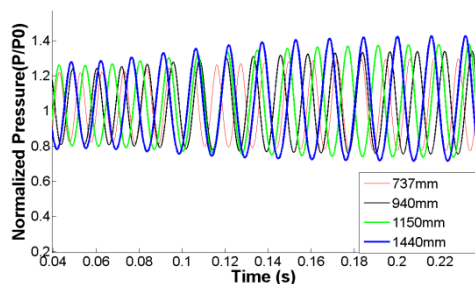
جدول ۱: مقادیر عددی متغیرهای عملکردی

متغیر	واحد	مقادیر
چگالی محیط	$\text{kg. m}^{-3}$	۱/۲۹
حجم محفظه احتراق	$\text{m}^3$	۰/۰۰۴۹۶
سطح محفظه احتراق	$\text{m}^2$	۰/۱۷۸۴۲
طول مشخصه اولیه	m	۰/۰۲۷۸
گرمای ویژه	$\text{J. kg}^{-1}. \text{K}^{-1}$	۱۰۹۰
دمای محیط	K	۲۹۳
نسبت گرمای ویژه	—	۱/۳۷۴
ثابت گاز	$\text{J. kg}^{-1}. \text{K}^{-1}$	۲۸۷
قطر لوله تخلیه	m	۰/۰۵
طول لوله تخلیه	mm	۷۳۸, ۹۴۰, ۱۱۵۰, ۱۴۴۰
طول مشخصه ثانویه	m	۲/۵۳۱
ضریب انتقال حرارت جابجایی	$\text{W. m}^{-2}. \text{K}^{-1}$	۱۲۰
دبی جرمی میانگین هوای ورودی	$\text{kg. s}^{-1}$	۰/۰۵۸۷۵
ضریب اصطکاک	—	۰/۰۳
کسر جرمی اولیه سوخت	—	۰/۰۶
ثابت جنبشی	$\text{m}^3. \text{mol}^{-1}. \text{s}^{-1}$	$۳.۸۵ \times 10^8$
حرارت واکنش بر واحد جرم سوخت	$\text{J. kg}^{-1}$	$۳۳ \times 10^6$

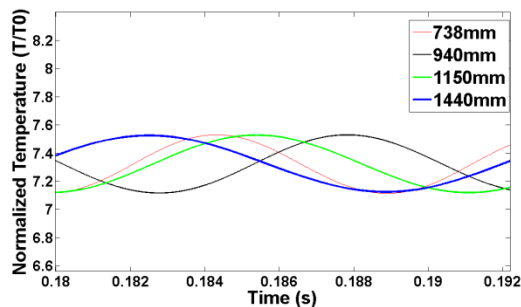
### نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی ارائه می‌شوند. در شکل‌های ۲ و ۳ نوسانات دمایی بی‌بعد با زمان در محفظه احتراق ضربانی به ازای چهار دمای مختلف برای دیواره محفظه آمده است که به ترتیب مربوط به طول‌های ۷۳۸ میلی‌متر و ۱۴۴۰ میلی‌متر می‌باشند.

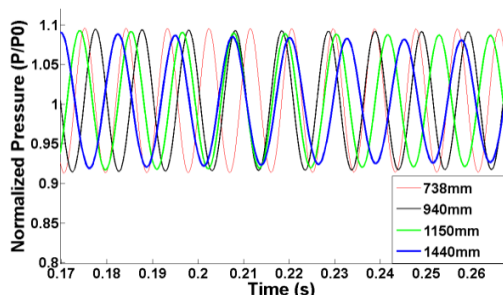
در اینجا دمای دیواره ۴۰۰ کلوین معرف حالتی با بیشترین گرمای اتلافی بوده، دماهای ۶۰۰ و ۱۰۰۰ کلوین معرف حالت‌های معمولی و دمای ۱۴۰۰ کلوین معرف حالتی با حداکثر عایق کاری می‌باشد. مشاهده این دو شکل نشان می‌دهد که به ازای هر دو طول لوله تخلیه، در سردترین دمای دیواره (۴۰۰ کلوین)، احتراق نوسانی بعد از گذشت زمانی کوتاه به سادگی خاتمه می‌یابد و شعله خاموش می‌شود که این امر با نتایج مقیمان و رضاپور همخوانی دارد [۱۲]. در بالاترین درجه حرارت دیواره (۱۴۰۰ کلوین) نوسان بسیار کمی قابل مشاهده است که نشان‌دهنده سرعت بالای مصرف سوخت می‌باشد.



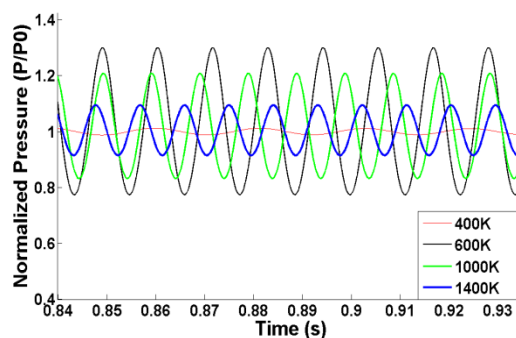
شکل ۸: نوسانات فشاری در محفظه احتراق با دمای دیواره ۶۰۰ کلوین



شکل ۵: نوسانات دمایی در محفظه احتراق با دمای دیواره ۱۴۰۰ کلوین



شکل ۹: نوسانات فشاری در محفظه احتراق با دمای دیواره ۱۴۰۰ کلوین

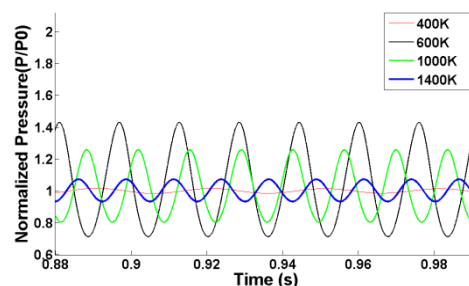


شکل ۶: نوسانات فشاری در محفظه احتراق با لوله تخلیه ۷۳۸ میلی متری

شکل ۷ نوسانات فشاری در محفظه احتراق ضربانی با لوله تخلیه ۱۴۴۰ میلی متری را نشان می دهد. همانطور که مشخص است، نتایج حاصل مشابه نتایج شکل ۶ می باشد، با این تفاوت که دامنه نوسانات فشاری اندکی افزایش پیدا کرده است.

شکل ۸ نوسانات فشاری در محفظه احتراق ضربانی با دمای دیواره ۶۰۰ کلوین را به ازای چهار طول مختلف برای لوله تخلیه نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که هرچه طول لوله تخلیه افزایش یابد، نوسانات فشاری نیز افزایش پیدا می کند. بدین ترتیب می توان چنین نتیجه گیری کرد که محفظه احتراق ضربانی با طول لوله تخلیه ۱۴۴۰ میلی متر در دمای ۶۰۰ کلوین بیشترین مقدار نوسانات را داراست.

شکل ۹ نوسانات فشار در محفظه احتراق ضربانی با دمای دیواره ۱۴۰۰ کلوین را نشان می دهد. با توجه به شکل مشخص است که در دمای دیواره ۱۴۰۰ کلوین دامنه نوسانات فشاری تحت تأثیر طول لوله تخلیه نمی باشد به گونه ای که مقدار نوسانات فشار در تمامی لوله های تخلیه تقریباً برابرند.



شکل ۷: نوسانات فشاری در محفظه احتراق با لوله تخلیه ۱۴۴۰ میلی متری

نتایج ارائه شده تاکنون مربوط به نوسانات دمایی در محفظه احتراق بوده اند. در ادامه، نتایج مربوط به نوسانات فشاری مورد بررسی قرار می گیرند.

شکل ۶ نوسانات فشاری در محفظه احتراق ضربانی با لوله تخلیه ۷۳۸ میلی متری را نشان می دهد که در آن بیشترین نوسانات در دمای دیواره ۶۰۰ کلوین رخ داده است و کمترین نوسانات مربوط به محفظه احتراق با دمای دیواره ۱۴۰۰ کلوین می باشد. در دمای ۴۰۰ کلوین به دلیل خاموش شدن شعله، نوسانی مشاهده نمی شود.

## نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله شبیه‌سازی عددی فرآیند احتراق ضربانی سوخت پروپان مورد بررسی قرار گرفت. هدف، بررسی اثر دمای دیواره و طول لوله تخلیه بر نوسانات دما و فشار در احتراق ضربانی بود. نتایج نشان داد که نوسانات دما و فشار در احتراق ضربانی به شدت به دمای دیواره محفظه و طول لوله تخلیه وابسته است. مشخص شد هنگامی که دمای دیواره محفظه احتراق پایین است، احتراق ضربانی به تدریج ضعیف شده و سپس خاتمه می‌یابد. در مقابل، نوسانات بسیار کمی در محفظه احتراق با دمای دیواره زیاد مشاهده شد. همچنین مشخص شد هنگامی که دمای دیواره محفظه احتراق بالاست طول لوله تخلیه تأثیر قابل توجهی بر دامنه نوسانات دمایی و فشاری ندارد.

## مراجع

- [1] Heravi, H.M., Dawson, J.R., Bowen, P.J., Syred, N. (2005). "Primary pollutant prediction from integrated thermofluid-kinetic pulse combustor models." *Journal of Propulsion and Power*, 21, pp 1092-1097.
- [2] Kretschmer, D., Odgers, J. (1972). "Modeling of gas turbine combustors a convenient reaction rate equation." *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 94, pp 173-180.
- [3] Gemmen, R., Keller, J., Arpaci, V. (1993). "Heat/mass transfer from a cylinder in the strongly oscillating flow of a pulse combustor tailpipe." *Combustion Science and Technology*, 94, pp 103-130.

- [4] Dec, J.E., Keller, Jo. (1989). "Pulse combustor tailpipe heat transfer dependence on frequency, amplitude, and mean flow rate." *Combustion and Flame*, 77, pp 359-374.
- [5] Lundgren, E., Marksten, U., Moller, S. (1998). "The enhancement of heat transfer in the tail pipe of pulse combustors." *Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp 3215-3220.
- [6] Kezerle, J. (1993). "Future applications of pulsating combustion." *Workshop in Pulsating Combustion and Its Application*. Sweden, pp 63-69.
- [7] Richards, G., Morris, G., Shaw, D., Keely, S., Welter, M. (1993). "Thermal pulse combustion." *Combustion Science and Technology*, 94, pp 57-85.
- [8] Tsujimoto, Y., Machii, N. (1986). "Numerical analysis of a pulse combustion burner." *Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp 1297-1305.
- [9] Morel, T. (1993). "Comprehensive model of a pulse combustor." *Combustion Science and Technology*, 94, pp 379-409.
- [10] Moghiman, M., Rezapoor, B. (2003). "Modeling of combustion oscillation and soot formation in aerovalved combustors." *IJE Transactions*, pp 293-307.
- [11] Moghiman, M., Zangoee, MR., Saeedi, A. (2009). "Numerical modeling of NOx formation in pulse combustor using thermal and prompt models." *Icator Journal of Engineering*, 2, pp 277-292.
- [12] ممهدی هروی، حمید. مقصودی، امیر. (۱۳۹۰). "بررسی آزمایشگاهی اکسید نیتروژن و دی اکسیدکربن در محفظه احتراق ضربانی غیر پیش آمیخته." سوخت و احتراق، سال چهارم، ص ۹۱.