

## اثر زمان احتراق و افت فشار انژکتور بر ناپایداری فرکانس پایین در محفظه احتراق یک موتور سوخت مایع

محمد جواد منتظری<sup>۱</sup>، اسماعیل ولی زاده<sup>۲</sup>

تهران - صندوق پستی ۲۸۱-۱۶۵۳۵  
[montazzeri@yahoo.com](mailto:montazzeri@yahoo.com)

### چکیده

مکانیزم برانگیزش نوسانات بسامد پایین در محفظه احتراق موتور سوخت مایع به دو صورت: «هیدرولیکی» و «درون محفظه‌ای» است که با توصیف این دو مکانیزم، نتایج کیفی مهمی در جهت رفع ناپایداری احتراق به دست می‌آید. اما برای یافتن نتایج کمی، باید با در نظر گرفتن مدل ساده‌ای از موتور سوخت مایع، معادلات دیفرانسیل حرکت سیال در لوله‌ها و معادله‌ی حالت محفظه نوشته شود. حل دستگاه این معادلات با اعمال شرایط مرزی، آستانه‌ی پایداری احتراق موتور را تعیین می‌کند. بررسی آستانه‌ی پایداری در مدهای مختلف نوسانی، نشان می‌دهد، ناحیه‌ی احتراق ناپایدار، با افزایش زمان احتراق و کاهش فشار نسبی پیش از انژکتورها، وسیع‌تر می‌شود اما افزایش حجم محفظه، این ناحیه را محدودتر می‌نماید. در این مقاله مرز پایداری احتراق برای یک موتور خاص به دست آمده و اثر پارامتر زمان احتراق و افت فشار انژکتور بر آن بررسی شده، اما نتایج حاصل قابل تعمیم هستند.

واژه‌های کلیدی: ناپایداری - بسامد پایین - موتور سوخت مایع - زمان احتراق.

### ۱- مقدمه

تجربه‌ی تست گرم موتورهای سوخت مایع نشان می‌دهد، نمودار تغییرات فشار محفظه بر حسب زمان، یک ارتعاش پریودیک با بسامد و دامنه‌های مختلف است و ناپایداری در صورتی به وجود می‌آید که یکی از این بسامدها، با یک عامل درونی یا بیرونی تحریک و تشدید شود. پیش‌بینی و رفع ناپایداری در موتور، یکی از موانع جدی در برابر پیشرفت صنایع موتورسازی و عامل کاهش قابلیت اطمینان موتور می‌باشد [۱]. در این مقاله، با بررسی مکانیزم‌های برانگیزش نوسانات بسامد پایین و مدل‌سازی آن، آستانه‌ی پایداری در این بازه بررسی شده و نتایج کیفی و کمی جالب توجهی برای یک موتور نمونه به دست آمده است. بسامدهایی که در بازه‌ی  $50-200\text{Hz}$  قرار دارد، «پایین» و بسامدهای  $200-500\text{Hz}$  «میانی» نامیده می‌شود و نتایج حاصل در این مقاله برای هر دو بازه معتبر است و به صورت کیفی برای دیگر موتورها قابل تعمیم.

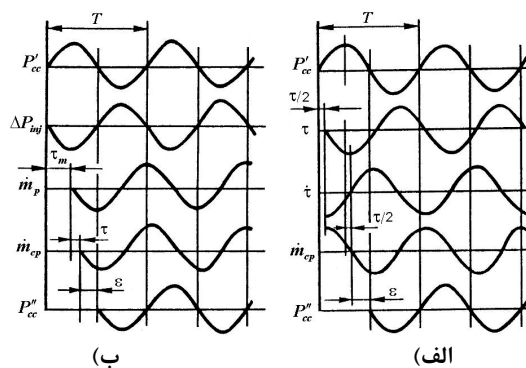
### ۲- مکانیزم برانگیزش نوسانات بسامد پایین احتراق

نوسانات بسامد پایین به دو صورت در محفظه احتراق موتورهای سوخت مایع، تشدید می‌شوند؛ یکی با «مکانیزم هیدرولیکی» و دیگری با «مکانیزم درون محفظه‌ای». از آنجایی که دبی پیش‌رانه‌های عبوری از انژکتورها ( $\dot{m}_{inj}$ ) وابسته به فشار پایین دست (back pressure) می‌باشد، هر اغتشاش پریودیک فشار محفظه ( $P'_{cc}$ )، منجر به تغییر در دبی ورودی پیش‌رانه (propellant) می‌گردد که این تغییر دارای تاخیری است که ناشی از اینرسی حرکت سیال در لوله‌ها و محدود بودن سرعت انتشار موج فشار در آن‌هاست ( $\tau_m$ ). محصولات احتراق حاصل ( $\dot{m}_{cp}$ ) نیز به نوبه‌ی خود با تاخیر زمانی دیگری ( $\tau$ ) ایجاد می‌شود و این محصولات برای طی کردن طول محفظه، نوسان فشار را با تاخیر دیگری روبرو می‌کنند (ع). در صورتی که مجموع سه تاخیر زمانی فوق، منجر به هم‌فاز شدن اغتشاش اولیه با موج نهایی فشار ( $P''_{cc}$ ) گردد، موجب تقویت و نوسان اجباری محفظه می‌گردد (شکل ۱ - الف) [۲].

طبیعت مکانیزم درون محفظه‌ای بسیار ساده است. هر نوسان فشار ( $P'_{cc}$ ) بر ریزفرآیندهای احتراق اثر می‌گذارد اما این اثر با تاخیر  $\tau$ ، و با نسبتی به صورت ذیل، صورت می‌پذیرد [۳]:

$$\tau = \tau_0 (P_{cc0}/P_{cc})^n \quad (1)$$

که در آن  $P_{cc0}$  و  $\tau_0$ ، فشار محفظه و زمان احتراق در رژیم پایا (stationary) و  $n$  نمای تاثیر فشار محفظه بر زمان احتراق می‌باشد. رابطه (۱) نشان می‌دهد تغییرات  $\tau$  هم‌نوا با تغییرات فشار اما در فاز متقابل انجام می‌گیرد. هر تغییر در  $\tau$  به نوبه‌ی خود موجب تغییر نرخ تولید محصولات احتراق می‌شود که مانند قبل، دارای تاخیری معادل  $\varepsilon$  است. این زنجیره نشان می‌دهد، ترکیب معینی از این تاخیرهای زمانی می‌تواند موجب تشدید نوسانات فشار محفظه گردد (شکل ۱ - ب). مکانیزم اول به دلیل اثر مستقیم بر دبی مولفه‌های ورودی به محفظه، مکانیزم هیدرولیکی نامیده می‌شود اما در مکانیزم دوم، اثر نوسان اتفاقی فشار بر ریزفرآیندهای احتراق، در نظر گرفته می‌شود بدین دلیل آن را، مکانیزم درون محفظه‌ای می‌نامیم. به هر ترتیب هر دو مکانیزم توجیه کننده‌ی نوسانات بسامد پایین می‌باشند. از این بحث کوتاه دو نتیجه‌ی کیفی می‌توان دریافت کرد؛ یکی آن که با کاهش حساسیت سیستم تغذیه به نوسانات فشار محفظه (یعنی افزایش افت فشار انژکتورها)، نوسانات بسامد پایین افت می‌کنند و دیگر آن که با کاهش زمان احتراق ( $\tau$ ) و افزایش  $\varepsilon$  (یعنی افزایش حجم محفظه)، پاسخ نوسانی فشار در رزنانس با نوسانات بسامد پایین اولیه قرار نمی‌گیرد. این دو نتیجه‌ی کیفی در ادامه به صورت کمی به دست خواهد آمد.

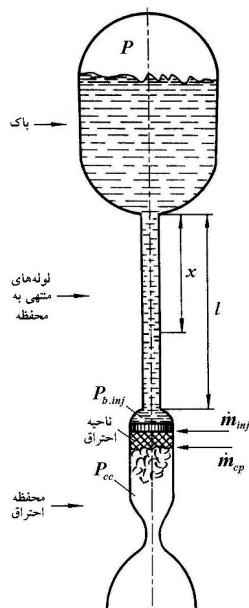


شکل ۱- ایجاد نوسانات بسامد پایین احتراق: الف. مکانیزم هیدرولیکی،  $\tau = const$ ؛ ب. مکانیزم درون محفظه‌ای  $\tau = f(P_{cc})$ .

### ۳- معادلات حاکم بر فرآیند نوسانات بسامد پایین احتراق

توصیف مکانیزم‌های تشدید نوسانات بسامد پایین در پاراگراف قبل نشان می‌دهد، با آنالیز دو دسته معادله می‌توان این نوسانات را تحلیل نمود؛ یکی معادلات محفظه احتراق و دیگری معادلات سیستم تغذیه‌ی پیش‌رانه [۲] و [۴]. برای یافتن این معادلات بر اساس شکل (۲)، فرض‌هایی در نظر می‌گیریم که به اصل مساله خدشه‌ای وارد نمی‌کند:

- موتور سوخت مایع تک‌سوخت و از نوع دمشی (tank pressurizing) است؛
- حرکت سیال در لوله‌ها بدون اصطکاک فرض می‌شود؛
- کلاهک انژکتوری (combustion head) صلب و بدون خاصیت ارتجاعی است و سیال درون آن تراکم‌ناپذیر است؛
- فشار و دمای محفظه در همه جای آن یکسان است؛
- دما در محفظه به نوسانات  $P_{cc}$  و  $\tau$  بستگی ندارد؛



شکل ۲- مدل محاسباتی موتور نمونه با سیستم تغذیه‌ی دمشی.

- حجم ذرات مایع موجود در محفظه در مقایسه با حجم محفظه قابل صرف نظر کردن است.  
با در نظر گرفتن این فرضیات و پارامترهای بی بعد ذیل:

$$\eta = (P_{cc} - P_{cc0}) / P_{cc0} \quad (2)$$

$$v = (\dot{m}_{inj} - \dot{m}_{inj0}) / \dot{m}_{inj0} \quad (3)$$

که در آن  $\dot{m}_{inj}$  و  $\dot{m}_{inj0}$  دبی عبوری از انژکتور در رژیم پایا و دبی لحظه‌ای می‌باشد؛ با نوشتن معادله‌ی پیوستگی در محفظه و در نظر گرفتن معادله‌ی گازهای کامل، معادله‌ی تغییرات فشار و زمان احتراق، به صورت کلی ذیل در خواهد آمد [۴]:

$$\tau \cdot d\eta/dt + (1-n)\eta - v(t-\tau) + n \cdot \eta(t-\tau) = 0 \quad (4)$$

اگر سرعت بی‌بعد در لوله‌های منتهی به محفظه را برابر  $v = (V - V_0) / V_0$  فرض کنیم، با در نظر گرفتن فرضیات یادشده، معادله‌ی حرکت سیال در لوله به صورت ذیل خواهد بود:

$$\begin{aligned} \partial^2 \eta / \partial t^2 - a^2 \cdot \partial^2 \eta / \partial x^2 &= 0 \\ \partial^2 v / \partial t^2 - a^2 \cdot \partial^2 v / \partial x^2 &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

که در معادلات (۵)،  $a$  سرعت صوت در لوله‌هاست. حل مشترک دو دسته معادله‌ی (۴) و (۵) شرط پایداری محفظه را معین خواهد کرد.

#### ۴- شرایط مرزی و نگاشت به میدان مختلط

برای حل معادلات مذکور، شرایط مرزی ذیل را در نظر می‌گیریم:

الف. در لحظه‌ی صفر ( $t = 0$ )، سرعت و فشار در لوله برابر صفر است؛ یعنی:

$$\eta(0, x) = 0 \quad v(0, x) = 0$$

ب. در ابتدای لوله ( $x = 0$ )، نوسان فشار و تغییر سرعت صفر است؛ یعنی:

$$\eta(t, 0) = 0 \quad \partial v(t, x) / \partial x |_{x=0} = 0$$

ج. در انتهای لوله ( $x = l$ )، با در نظر گرفتن صلبیت کلاهدک انژکتوری و تراکم‌ناپذیر بودن سیال، می‌توان دبی گذرنده از لوله با سطح مقطع  $A$  را، برابر دبی عبوری از انژکتورها گرفت؛ یعنی:  $\dot{m}_{inj} = \rho AV(t, l)$ . اگر این رابطه را در رژیم‌های ناپایا نیز

صادق بدانیم، می توان نوشت:  $[\dot{m}_{inj}(t) - \dot{m}_{inj0}] / \dot{m}_{inj0} = [V(t, l) - V_0] / V_0$  یعنی  $v(t, l) = v(t)$  است. حال اگر فشار پیش از انژکتور  $P_{b, inj}$  باشد با تعریف پارامتر «تغییرات نسبی فشار پیش از انژکتور» به صورت:

$$h = 2(P_{b, inj} - P_{cc0}) / P_{cc} \quad (6)$$

و در نظر گرفتن روابط (۲) و (۳) می توان، شرط (ج) را به صورت  $v(t, l) = [\eta(t, l) - \eta(t)] / h$  نوشت. اکنون با نگاشت از میدان  $(t, x)$  به  $[z(i, \theta), x]$  و استفاده از تبدیل لاپلاس - هوی ساید، به صورت:

$$\bar{\Phi}(z, x) = \int_0^\infty e^{-zt} \Phi(t, x) . dt \quad (7)$$

معادلات (۴) و (۵) به ترتیب به شکل ذیل نوشته می شود:

$$\bar{\eta}(z)[z\varepsilon + (1-n) + ne^{-z\tau}] - e^{-z\tau} \bar{v}(z, l) = 0 \quad (8)$$

$$\bar{\eta}(z) + h[1 + \frac{\tau_l}{h\tau_a} . th(z\tau_a)] \bar{v}(z, l) = 0 \quad (9)$$

در رابطه ی (۹)،  $\tau_a = l/a$ ، زمان تاخیر ناشی از طول لوله ها و محدود بودن سرعت صوت در آن هاست و  $\tau_l = \rho_0 V_0 l / P_{cc0}$  زمان تاخیر ناشی از اینرسی سیال در لوله هاست و اندیس صفر مبین جریان پایا.

## ۵- حل معادلات در حالت کلی

دستگاه معادلات همگن (۸) و (۹)، تنها وقتی جواب غیر صفر دارد که دترمینان آن برابر صفر باشد:

$$\Delta = \begin{vmatrix} [z\varepsilon + (1-n) + ne^{-z\tau}] & e^{-z\tau} \\ 1 & h[1 + \frac{\tau_l}{h\tau_a} . th(z\tau_a)] \end{vmatrix} = 0 \quad (10)$$

بنابر معیار نایکوئیست، ناحیه ی پایداری در  $|z| < 0$  قرار دارد. با جایگذاری  $z = i\omega$  و جداکردن بخش موهومی و حقیقی از هم و برابر صفر قرار دادن آن ها، نهایتاً می توان پارامترهای  $\tau$  و  $h$  را به صورت ذیل به دست آورد:

$$\tau = [m\pi - (\alpha + \varphi) + \delta] / \omega \quad (11)$$

$$h = \frac{n}{(\omega\varepsilon)^2 + (1-2n)} + \frac{\sqrt{(\omega\varepsilon)^2 + (1-n)^2}}{\sqrt{[(\omega\varepsilon)^2 + (1-2n)]^2} - \frac{\tau_l}{\tau_a} tg(\omega\tau_a)} \quad (12)$$

در این دو رابطه  $\alpha$ ،  $\varphi$ ،  $\delta$  و  $\theta$  به صورت ذیل تعریف شده اند [۳ و ۴]:

$$tg\varphi = [\tau_l / (h\tau_a)] . tg\omega\tau_a \quad tg\alpha = \omega\varepsilon / (1-n) \quad (13)$$

$$tg\delta = n\tau_l tg\omega\tau_a / [\tau_a (1+nh)]$$

روابط (۱۱) و (۱۲)، ارتباط بین پارامترهای  $h$ ،  $\tau$ ،  $\varepsilon$ ،  $\tau_l$ ،  $\tau_a$ ،  $n$  و  $\omega$  را در مرز پایداری موتور نشان می دهد.  $m$  در رابطه ی (۱۱)، یک عدد طبیعی است و شماره ی ریشه ی معادلات (۸) و (۹) را تعیین می کند. چون  $\alpha$ ،  $\varphi$  و  $\delta$  اعداد حقیقی مثبت هستند،  $m$  نمی تواند یک عدد منفی باشد و گرنه مقدار  $\tau$  منفی خواهد شد.

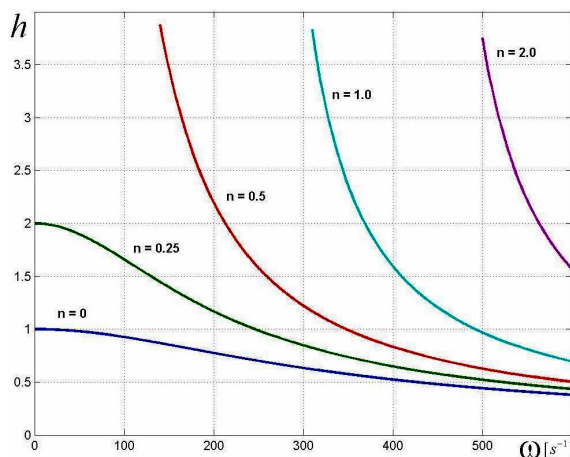
## ۶- پارامترهای موتور نمونه

در این بحث موتور سوخت مایع مورد بررسی، را «موتور نمونه» می نامیم. این موتور، موتوری است از نوع سیکل باز (open cycle) با سیستم تغذیه ی توربوپمپی. اما محدوده ی بسامدها (بسامدهای پایین)، امکان استفاده از روابط موتور دمشی را، مجاز می سازد. با توجه به نوع پیشرانه ی موتور و مشخصه های هندسی محفظه احتراق، پارامترهای این موتور، عبارتند از:

$$\tau_a \cong \tau_l = 4.15 \text{ ms} \quad ; \quad \tau \cong 8 \text{ ms} \quad ; \quad \varepsilon = 4.07 \text{ ms}$$

## ۷- تحلیل ناپایداری در $n=0$ و $l=0$

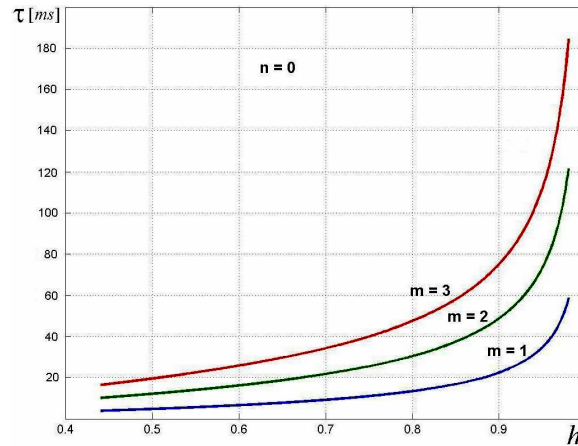
هنگامی که مکانیزم تولید نوسانات بسامد پایین از نوع «هیدرولیکی» باشد،  $n=0$  است و در صورتی که از طول لوله‌های پیش از محفظه صرف نظر کرده باشیم،  $l=0$  خواهد بود. برای تحلیل مرز ناپایداری موتور در این حالت، لازم است محدوده‌ی بسامدهای ممکن در مقادیر مختلف  $n$  به ویژه در  $n=0$  را تعیین نماییم. شکل (۳) نشان می‌دهد، حد پایین بسامد برای مقادیر  $n > 0.25$  محدود می‌شود و در آن  $h \rightarrow \infty$ ، اما در  $n < 0.25$  محدودیتی برای بسامدهای ممکن وجود ندارد. حال با توجه به بسامدهای ممکن در هر مقدار معین  $n$ ، مرز پایداری احتراق موتور را تعیین می‌کنیم.



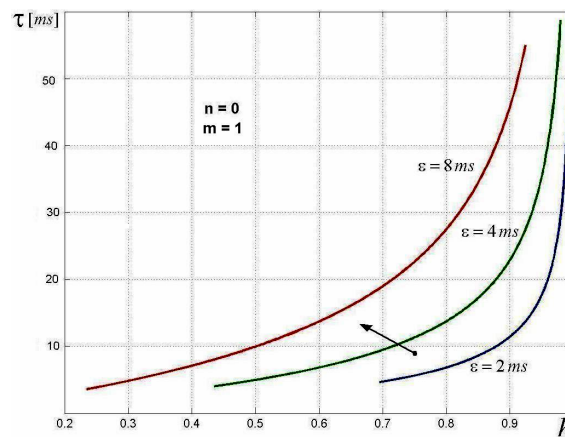
شکل ۳- بسامدهای امکان پذیر در مقادیر مختلف  $n$  در حالت  $l=0$  برای محفظه‌ی یک موتور سوخت مایع

با توجه به آن که روابط را بر حسب  $z = i\omega$ ، به دست آورده‌ایم، تمامی ریشه‌های معادلات (۸) و (۹)، موهومی هستند. بنابراین با افزایش عدد  $m$ ، بخش حقیقی ریشه‌های معادلات مذکور، از یک مقدار منفی - که متناظر با ناحیه‌ی پایداریست - به یک مقدار مثبت تبدیل می‌شود و طبیعتاً مقدار مثبت متناظر با ناحیه‌ی ناپایدار خواهد بود. پس بدین ترتیب پایین‌ترین مرز پایداری احتراق، متناظر با  $m=1$  می‌باشد و مساحت زیر منحنی  $h-\tau$  و محور  $h$ ، ناحیه‌ی پایدار و بالای آن، ناحیه‌ی ناپایدار را نشان می‌دهد. در شکل (۴)، مرز پایداری برای موتور نمونه، در  $m$ های مختلف نشان داده شده است.

در صورتی که به هر دلیل زمان ماندگاری گاز در محفظه ( $\varepsilon$ ) افزایش یابد، بر طبق شکل (۵) ناحیه‌ی ناپایداری احتراق، محدودتر می‌شود. در صورت افت رژیم موتور (throttling)، مقدار  $h$  کاهش می‌یابد و نقطه‌ی کاری موتور در جهت پیکان (شکل ۵)، حرکت می‌کند و امکان قطع مرز پایداری و ورود به ناحیه‌ی ناپایدار وجود دارد. این امر نشان می‌دهد، هر موتور دارای یک «آستانه‌ی پایداری» است و با کاهش مداوم رژیم موتور، خواه ناخواه، به آن خواهیم رسید [۴ و ۵]. همین نمودار نشان می‌دهد، از دیدگاه بسامدهای پایین نواحی پایدار موتور، متناظر با مقادیر بزرگ  $h$  و  $\varepsilon$  و مقادیر کوچک  $\tau$ ، می‌باشد. این نمودار، نتایج کیفی به دست آمده‌ی پیشین را تایید می‌کند. افزایش فشار نسبی پیش از انژکتورها ( $h$  بزرگ) و همچنین کاهش زمان احتراق  $\tau$  - که می‌تواند در نتیجه‌ی بهبود پاشش و اختلاط در محفظه، یا به‌کارگیری پیش‌رانه‌هایی با میل ترکیبی بالاتر باشد - ناحیه‌ی پایداری موتور را وسیع‌تر می‌کند. از سوی دیگر افزایش حجم محفظه ( $\varepsilon$  بزرگ)، نقطه‌ی کاری موتور را به سمت چپ نمودار شکل (۵) - یعنی نواحی پایدارتر - منتقل می‌کند.



شکل ۴- مرز پایداری احتراق در  $m$  های مختلف به ازای  $\varepsilon = 4.07 \text{ ms}$  برای موتور نمونه در حالت  $l = 0$

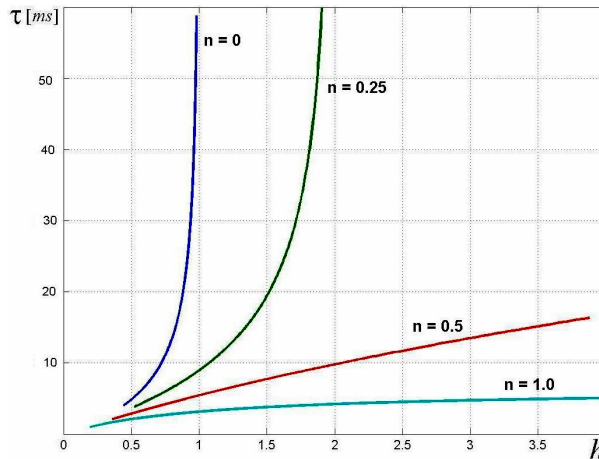


شکل ۵- مقایسه‌ی مرز پایداری احتراق در مقادیر مختلف  $\varepsilon$  و انتقال نقطه‌ی کاری موتور با افت رژیم برای  $l = 0$

## ۸- تحلیل ناپایداری در $n > 0$ و $l = 0$

حال ببینیم اگر مکانیزم‌های درون محفظه‌ای در ایجاد نوسانات بسامد پایین دخالت داشته باشند، مرز پایداری موتور، چگونه تغییر می‌کند. در این حالت  $n > 0$  خواهد بود و هر چه  $n$  بزرگ‌تر باشد فشار محفظه بر  $\tau$  اثر بیش‌تری خواهد داشت. در این حالت نیز پایین‌ترین مرز پایداری ( $m = 1$ ) را برای موتور نمونه، بر اساس روابط (۱۱) و (۱۲) و با در نظر گرفتن پارامترهای موتور نمونه، به دست می‌آوریم (شکل ۶).

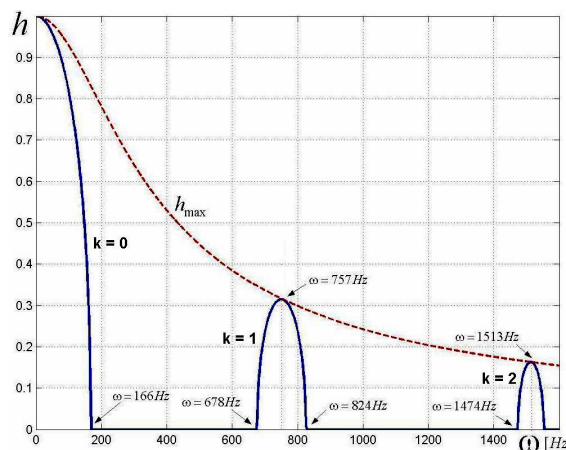
که باز هم بین نمودارها و محور  $\tau$ ، ناحیه‌ی ناپایدار موتور می‌باشد. نمودار شکل (۶) نشان می‌دهد، به طور کلی با افزایش  $n$  ناحیه‌ی پایداری موتور محدودتر می‌شود. نکته‌ی جالب توجه در این نمودار آن است که در مقادیر  $n = 0, 0.25$  موتور دارای ناحیه‌ی مطلقاً پایدار است. به عبارت دیگر سمت راست نمودارهای  $\tau - h$  برای این دو مقدار، ناحیه‌هایی است که هر چه  $\tau$  افزایش یابد، باز هم موتور پایدار خواهد بود. در این دو ناحیه، تنها مکانیزم موثر بر نوسانات بسامد پایین، مکانیزم هیدرولیکی است. اما به ازای هر  $n \geq 0.5$ ، یک مقدار  $\tau_{\max}$  وجود دارد که در  $\tau$  های بزرگ‌تر از آن، موتور همواره ناپایدار خواهد بود (ناحیه‌ی مطلقاً ناپایدار). بنابراین در حالت کلی که  $h < \infty$  و  $n > 0$  است، هر دو مکانیزم درون محفظه‌ای و هیدرولیکی در ایجاد نوسانات بسامد پایین نقش دارند و از این رو محدود شدن نواحی پایدار در  $n > 0$ ، منطقی است.



شکل ۶- پایین ترین مرز پایداری احتراق در  $n$  های مختلف برای موتور نمونه ( $l = 0$  و  $m = 1$ ).

### ۹- تحلیل ناپایداری در $n = 0$ و $l \neq 0$

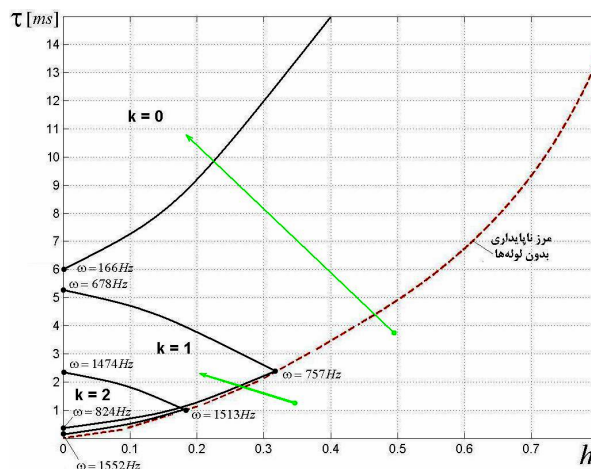
گرچه نتایج کیفی به دست آمده در حالتی که طول لوله‌های منتهی به محفظه کوتاه و قابل صرف نظر باشد، معتبر است، اما در عمل این لوله‌ها وجود دارند و باید اثر آن‌ها را بر نوسانات بسامد پایین در نظر گرفت. در این حالت نیز، برای یافتن مرز پایداری بایستی ابتداء بسامدهای ممکن را بیابیم. برای این منظور نمودار  $h - \omega$  را با در نظر گرفتن پارامترهای موتور نمونه و روابط (۱۱) و (۱۲) ترسیم می‌کنیم (شکل ۷). این شکل نشان می‌دهد، با وجود لوله‌ها، بسامدهای امکان‌پذیر به بازهای مشخصی محدود می‌گردد. رابطه‌ی (۱۲) نیز مبین امر است چرا که، بر طبق این رابطه هرگاه لوله با بسامد طبیعی خود ( $\omega = k\pi/\tau_a$ ) نوسان کند،  $h$  مقدار بیشینه‌ی خود را خواهد یافت و چون  $h$  همواره حقیقی و مثبت است، بسامدها نمی‌تواند انحراف زیادی از مقدار بسامد طبیعی لوله‌ها داشته باشد. بنابراین در این حالت بسامد نوسانات بسامد پایین محفظه، به بسامدهای طبیعی لوله‌های منتهی به محفظه، نزدیک است. از سوی دیگر به دلیل وجود اصطکاک در لوله‌ها - که در این جا از آن صرف نظر شده است - هارمونی‌های بالاتر از سوم، به سرعت میرا می‌شوند و نیازی به بررسی آن‌ها نیست.



شکل ۷- بسامدهای امکان‌پذیر در مدهای اول تا سوم محفظه‌ی نمونه

نمودار خط‌چین بر روی شکل (۷)، نمودار  $h - \omega$  برای  $l = 0$  است و متناظر با مقدار  $h_{max}$  در  $l \neq 0$  می‌باشد. برای موتور نمونه مقدار بسامدهای ممکن، بر روی نمودار ارایه شده است.

حال بر حسب بسامدهای ممکن، مرز پایداری موتور را روی نمودار  $\tau - h$ ، نمایش می‌دهیم (شکل ۸). بر روی این شکل، مرز پایداری برای حالت بدون لوله نیز با خط چین، ترسیم شده است. در این نمودار نیز، حد فاصل بین خطوط  $\tau - h$  و محور  $\tau$ ، ناحیه‌ی ناپایدار موتور می‌باشد. اولین نتیجه‌ای که از مقایسه‌ی مرز خط‌چین و خطوط پر، گرفته می‌شود آن است که، ناحیه‌ی پایداری موتور با در نظر گرفتن لوله‌ها، محدودتر می‌شود. دیگر آن که رژیم‌های پایدار در  $h = 0$  نیز امکان‌پذیر است؛ مثلاً در مد اول ( $k = 0$ ) نوسانات بسامد پایین ( $\omega = 166\text{Hz}$ ) در ناحیه‌ی متناظر با  $\tau < 6\text{ms}$ ، چنین شرایطی برقرار است در حالی که در  $l = 0$  چنین چیزی ممکن نبود. این امر نشان می‌دهد، در بسامدهای دور از بسامدهای طبیعی لوله‌ها، لوله‌ها نقش میراکنندگی و متعادل‌کنندگی نوسانات را بازی می‌کند و برانگیزش نوسانات حتی در  $h = 0$  نیز، میراشدنی است. جهت فلش‌های نشان داده شده در شکل (۸)، جهت حرکت نقطه‌ی کاری موتور در صورت افت رژیم موتور و امکان قطع مرز پایداری و ورود به مد اول یا مد دوم ناپایداری بسامد پایین، را نشان می‌دهد. این امر مجدداً وجود «آستانه‌ی پایداری» را تایید می‌کند.



شکل ۸- مرز پایداری احتراق در مدهای اول تا سوم محفظه‌ی نمونه برای  $n = 0$ ،  $l \neq 0$  و  $m = 1$ .

## ۱۰- نتیجه

حل مشترک معادلات دیفرانسیل محفظه احتراق و لوله‌های منتهی به محفظه موتور سوخت مایع، در حالت کلی نشان می‌دهد نواحی ناپایدار نسبت به برانگیزش بسامدهای پایین، در محدوده‌ی مقادیر بزرگ زمان احتراق ( $\tau$ ) و مقادیر کوچک فشار نسبی پیش از انژکتورها ( $h$ ) قرار دارد که از لحاظ عملی به معنای آن است که «سوخت‌های با میل ترکیبی کم‌تر» یا «پاشش و اختلاط نامناسب‌تر» در محفظه احتراق به کار گرفته شده است. ثابت گردید که هر موتور دارای یک آستانه‌ی پایداری است و افت رژیم امکان انتقال نقطه‌ی کاری موتور به ناحیه‌ی ناپایدار را ایجاد می‌نماید. همچنین بر اساس نتایج حاصل، مشخص گردید که نقش لوله‌ها در بسامدهای دور از مقدار بسامد طبیعی آن‌ها، نقش میراکنندگی است.

## ۱۱- مراجع

۱- جعفرقلی ع، رمش د، عبیات ج، منتظری م.ج.، طراحی موتورهای سوخت مایع، ساختار و سازه؛ انتشارات سازمان صنایع هوافضا، ۱۳۸۴.

2- V.M. Kodryatcev, Fundamental of Theory and Calculation of LPE, Moscow. Vishaya Shkola pub, 1993, in Russian.

3- Luigi Croco, Sin-I Cheng Theory of combustion instability in liquid propellant rocket motors, Butterworth scientific pub., 1956.

4- M. S. Natanzon, Combustion Instability, Moscow, Mashinostroenye pub, 1986, in Russian.

5- F.H.Reardon, D.T.Harrje, Liquid propellant rocket combustion instability, Aeronautics and space administration, Washington 1975. Russian translated, 1975.