http://mechanics.journals.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

دوره ۱۲ شماره ۵ دی ۱۳۹۱ ص‌ص ۱۱۲-۱۲۱

تاریخچه مقاله:
دریافت ۹۰/۱۰/۴
پذیرش ۹۱/۴/۲۶
ارائه در سایت ۹۱/۸/۳۰

حل عددی تنش‌های مکانیکی و حرارتی در استوانه جدار نازک تحت انفجار گازی داخلی

احسان شیبانی[۱]، مجید میرزایی[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- دانشیار مهندسی هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۲۳۴۵۶۷۸۹، mmirzaei@modares.ac.ir

چکیده- انفجار گازی درون لوله‌ها باعث ایجاد همزمان موج‌های شاک فشاری- حرارتی می‌شود. انفجار گازی شامل یک موج شاک در جلو و یک منطقه واکنش در پشت آن می‌باشد که به شدت با هم کوپل شده‌اند. سرعت، فشار و دمای گاز بعد از انفجار بستگی به مقدار و نوع مخلوط سوخت مورد استفاده دارد. بیشینۀ فشار موج مکانیکی ناشی از انفجار می‌تواند ۲۰ تا ۳۰ برابر فشار محیط باشد و دمای گاز در انفجار به بیش از ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. موج شاک مکانیکی ناشی از انفجار گازی، در هر نقطه از لوله سبب ایجاد کرنش‌های نوسانی شده که گاهی اوقات چندین برابر کرنش‌های استاتیک معادل هستند. از طرفی حرارت زیاد ناشی از موج انفجار متوالی گازی داخلی، سبب ایجاد تنش‌های حرارتی در لوله می‌شود. در این مقاله، تنش‌های مکانیکی و حرارتی ناشی از انفجار گازی از طریق شبیه‌سازی عددی، بررسی شده است. در این خصوص، ابتدا تغییر مکان‌های مکانیکی و سپس تغییر مکان‌های حرارتی شبیه‌سازی شده است. در نهایت تنش‌های مکانیکی و حرارتی ناشی از انفجار، به صورت همزمان درون لوله محاسبه شده‌اند.

کلیدواژگان: موتور تراک ضربه‌ای- ارتعاش- تنش مکانیکی- تنش حرارتی- شبیه‌سازی عددی.

Numerical analysis of mechanical and thermal stress in thin cylindrical tube under internal gaseous detonation

E. Sheibani[1], M. Mirzaei[2*]

1- Graduate Student, Aerospace. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.
2- Associate Prof. of Aerospace. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.
* P.O.B. 123456789 Tehran, Iran. mmirzaei@modares.ac.ir

Abstract- Gaseous detonation in tubes produces moving pressure-thermal waves. A gaseous detonation consists of a shock wave and a reaction zone that are tightly coupled. The speed, pressure, and temperature of the products of detonation depend on the type and amount of the initial mixture. The maximum pressure of mechanical wave caused by detonation can be as high as 20-30 times the ambient pressure and temperature of gas in detonation may exceed 2000°C. The mechanical shock waves can cause oscillating strains in the tube wall, which can be several times higher than the equivalent static strains. On the other hand, the passage of the hot wave duo to sequential internal gaseous detonation produces thermal stresses in the tube wall. In the current study the resulting mechanical and thermal stresses have been assessed using numerical simulations. In practice, the mechanical and thermal displacements have been computed separately. Finally, the combined effects of mechanical and thermal stresses caused by gaseous detonation have been simulated.

Keywords: Pulse Detonation Engine, Vibration, Mechanical Stress, Thermal Stress, Numerical Simulation.

۱- مقدمه

طراحی مخازن و لوله‌هایی که بتوانند تنش‌های ناشی از بارگذاری مکانیکی-حرارتی انفجار گازی را تحمل کنند نیازمند درکی سیستماتیک از پاسخ سازه‌ای لوله به این نوع بارگذاری است. انفجار گازی[1] درون لوله سبب ایجاد بار فشاری-حرارتی متحرک و متغیر با زمان می‌شود.

موج خمشی[2] سازه‌ای مهم‌ترین عامل در ایجاد کرنش نوسانی در دیواره می‌باشد. تست‌های تجربی مختلفی در مورد واکنش لوله به انفجار گازی داخلی تا به حال در مؤسسات صنعتی و دانشگاه‌ها صورت گرفته است. اولین مدل تحلیلی برای پاسخ لوله به بارگذاری موج فشاری متحرک داخلی توسط تانگ در سال ۱۹۶۵ ارائه شد [۱]. تانگ در مدل خود، طول لوله را بی‌نهایت فرض کرد و اثرات برش عرضی و اینرسی دورانی را در نظر گرفت. به دلیل بی‌نهایت در نظر گرفتن طول لوله در این مدل، اثرات گذرا حذف شده بود. بلتمن و شپرد [۲] در سال ۲۰۰۱ مدل تحلیلی گذرا برای پاسخ لوله ارائه کردند. از آنجا که اثرات برش عرضی و اینرسی دورانی در مدل آنها در نظر گرفته نشده بود نتایج حاصل از آن با نتایج تست تجربی همخوانی دقیقی نداشت. آخرین مدل برای طراحی لوله‌های شاک[3]، توسط میرزایی و همکارانش [۵-۳] در سال ۲۰۰۵ توسعه داده شد که در آن طول لوله محدود در نظر گرفته و اثرات برش عرضی و اینرسی دورانی لحاظ شده است و نتایج حاصل از آن تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی [۲] شپرد داشت. از طرف دیگر، وجود انتقال حرارت از گازهای داغ به لوله، سبب به وجود آمدن تنش‌های حرارتی در لوله می‌شود. اگر تعداد انفجارهای صورت گرفته در لوله کم باشد (انفجار در مخازن CNG یا انفجار در خطوط انتقال گاز و نفت) از آنجا که پدیده انفجار، فرآیندی گذرا است بار حرارتی، تاثیر زیادی در ایجاد تنش ندارد. ولی در سازه‌هایی مانند لوله موتور تراک ضربه‌ای[4] که در آن انفجارهای گازی با فرکانس بالا ایجاد می‌شود و موتور برای تولید نیروی پیشران باید مدت طولانی کار کند تنش‌های حرارتی قابل توجه خواهند بود و هر چند لوله بتواند تنش‌های مکانیکی ناشی از انفجار را تحمل کند تنش‌های حرارتی باعث خستگی[5] زودرس و واماندگی[6] می‌شوند. تاکنون تحقیقی که در آن، به طور خاص به آنالیز تنش حرارتی موتور ترک ضربه‌ای پرداخته شود انجام نشده است. جیرو کاساهارا و همکارانش [۶] در سال ۲۰۰۲ آزمایشاتی را برای مطالعه و آنالیز تغییرات فشار، تراست تولیدی و مقدار گرمای ایجاد شده در ۲۸ سیکل از کارکرد موتور تراک ضربه‌ای انجام دادند. آنها برای انجام آزمایش از یک موتور تراک ضربه‌ای با دو لوله اصلی و یک نازل استفاده کرده و دمای دیواره موتور را اندازه‌گیری نمودند. جیاکسی زو و همکارانش [۷] نیز در سال ۲۰۱۰ به عنوان مطالعهٔ موردی و برای بررسی صحت روابطی که برای تحلیل حرارتی سیلندرهای جدار ضخیم غیر ایزوتروپیک استخراج نموده بودند روشی را برای تحلیل تنش حرارتی لوله‌ی موتور تراک ضربه‌ای به کار بردند. در مقاله حاضر، علاوه بر در نظر گرفتن تنش‌های مکانیکی موج انفجار گازی، تنش‌های حرارتی نیز در لوله موتور تراک ضربه‌ای بررسی می‌شود. در این خصوص ابتدا پاسخ لوله به موج شاک فشاری از طریق شبیه‌سازی بررسی شده و نتایج آن با نتایج تحلیلی و تست تجربی مقایسه می‌شوند. در ادامه و برای آنالیز تنش حرارتی لوله‌ی در معرض انفجارهای گازی متوالی داخلی، روشی پیشنهادی ارائه شده و از طریق مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی با نتایج تست تجربی، صحت روش اثبات می‌شود. در نهایت تنش‌های مکانیکی و حرارتی به صورت همزمان در لوله شبیه‌سازی می‌شود.

۲- انفجارگازی

انفجار گازی شامل یک موج شاک در جلو و یک منطقهٔ واکنش در پشت آن است که به شدت با هم کوپل شده‌اند. سرعت در یک انفجار گازی ایده‌ال برابر سرعتی ثابت موسوم به چاپمن-ژوگوت[7] می‌باشد که با V_{cj} نشان می‌دهند و مقدار آن برای ترکیب سوخت‌های هیدروکربنی با هوا یا اکسیژن برابر ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ m/s می‌باشد. فشار بلافاصله بعد از پیشانی موج انفجار به ۲۰ تا ۳۰ برابر فشار اولیه محیط ارتقاء می‌یابد. بعد از گذشت پیشانی موج از هر نقطه درون لوله، تغییرات فشار به

1. Detonation
2. Flexural Wave
3. Shock Tubes
4. Pulse Detonation Engine
5. Fatigue
6. Fail
7. Chapman-Jouguet

علت خواص دینامیکی عبور موج، ملایم‌تر می‌شود. در شکل ۱ چگونگی تغییرات فشار با زمان درون لوله نشان شده است.

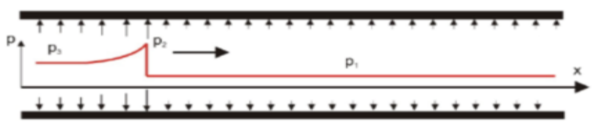
تغییرات فشار در لوله را می‌توان توسط رابطهٔ نمایی موسوم به تیلور-زلدویچ[1]، به صورت زیر تقریب زد [۲].

$$p(t)=(p_1-p_{atm})+[(p_3-p_1)+(p_2-p_3)e^{\frac{-(t-t_{cj})}{T}}] \times[1-H(x-V_{cj}t)] \quad (۱)$$

در عبارت بالا، p_1 فشار اولیه مخلوط گاز، p_{atm} فشار محیط، p_2 ماکزیمم فشار ناشی از انفجار، p_3 فشار نهایی گاز درون لوله، t زمان، T فاکتور نمایی کاهش فشار و $t_{cj}=x/V_{cj}$ برابر مدت زمانی است که طول می‌کشد تا پیشانی موج به مکان x از طول لوله برسد. همچنین V_{cj} سرعت موج موسوم به سرعت چاپمن-ژوگوت است. در شکل ۲ شماتیک لوله‌ای آزمایشگاهی که انفجار گازی درون آن رخ می‌دهد آورده شده است. همان گونه که از شکل مشاهده می‌شود لولهٔ شاک مورد بررسی در این تحقیق از سه قسمت تشکیل شده است که طول هرقسمت ۲/۳۸m است و با فلنج و قطعات T شکل به هم متصل شده‌اند.

۳- مدل‌سازی تحلیلی و عددی

حل تحلیلی موجود برای جابجایی ارتعاشی لوله در اثر حرکت موج انفجار گازی درون آن، توسط میرزایی و همکارانش [۳-۵] ارائه شده است که در آن طول لوله محدود می‌باشد و اثر برش عرضی و اینرسی دورانی در جابجایی دیواره لحاظ شده است.



شکل ۱ تغییرات فشار بر حسب زمان برای بارگذاری انفجار گازی [۸]

شکل ۲ شماتیک لوله موتور تراک ضربه‌ای [۲]

در اثر به وجود آمدن انفجار گازی و حرکت موج انفجار ناشی از آن درون لوله، امواج خمشی و برشی در دیواره به وجود می‌آیند که سبب جابجایی ناشی از برش و جابجایی ناشی از خمش در دیواره می‌شوند. جزئیات کامل حل در مرجع [۳] موجود می‌باشد. در این تحقیق فرض شده است که جابجایی دیواره در حوزه الاستیک خطی است زیرا که فشار ماکزیمم ناشی از انفجار به اندازه کافی کوچک فرض شده است. یکی از موضوعاتی که در طراحی استوانه‌ها یا لوله‌های در معرض بار متحرک داخلی، مطرح می‌شود محاسبه سرعت بحرانی است. اگر موج فشاری متحرک داخلی در استوانه‌ها در سرعت‌های بحرانی حرکت کند کرنش‌های دینامیکی تشدید شده و دامنهٔ نوسانات زیاد می‌شود. طبق تحلیل‌های انجام شده در مرجع [۳] سرعت‌های بحرانی برای یک استوانه تحت بارگذاری انفجار گازی داخلی را می‌توان در سه سرعت خلاصه کرد. اولین سرعت بحرانی که برابر سرعت انتشار امواج خمشی در لوله است و به جنس لوله و هندسه آن بستگی دارد. دومین سرعت بحرانی برابر سرعت انتشار امواج برشی در لوله است و فقط به جنس لوله بستگی دارد. سومین سرعت بحرانی بسیار نزدیک به سرعت انتشار امواج انبساطی در لوله است و به جنس لوله بستگی دارد.

۴- نتایج پاسخ لوله به موج شاک فشاری متحرک داخلی

شبیه‌سازی عددی انفجار گازی درون لوله توسط نرم‌افزار المان محدود Abaqus\Explicit انجام شده است. برای شبیه‌سازی بارگذاری انفجار گازی از توانایی این نرم‌افزار در ارتباط کاربر از طریق زیر برنامه[2] با محیط نرم‌افزار استفاده شده است. در این راستا برای شبیه‌سازی بارگذاری انفجار گازی از فرمول ۱ و از آنالیز نوع صریح دینامیکی[3] استفاده شده است. برای شبیه‌سازی لوله از خاصیت تقارن محوری هندسه و بارگذاری استفاده کرده و مسئله به دو بعد تقلیل می‌یابد. در این قسمت نتایج بدست آمده از حل شبیه‌سازی عددی با نتایج مدل تحلیلی [۳-۵] و نتایج آزمایشگاهی بلتمن و شپرد [۲] مقایسه می‌شود. در این تحقیق مخلوط سوخت برای ایجاد انفجار گازی درون لوله، اکسیژن، هیدروژن و آرگون فرض شده است [۲]. جنس لوله‌ای که در این تحقیق بررسی شده از فولاد ضد زنگ

1. Taylor-Zeldovich

2. Subroutine
3. Dynamic Explicit

کلاس ۳۰۴ است و مشخصات و ابعاد آن در جدول ۱ آمده است.

طبق نتایج تست تجربی [۲]، سرعت بحرانی برای لوله با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ برابر ۱۴۵۰ m/s است. رژیم سرعتی که پاسخ سازه‌ای لوله در آن بررسی می‌شود رژیم سرعتی فرا بحرانی است که برای ایجاد انفجار گازی با این مشخصه از مخلوط سوخت زیر استفاده می‌شود [۲].

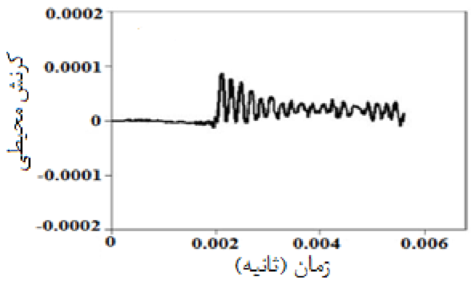
$2H_2 + O_2 + 6.85Ar$

برای مخلوط سوخت با ترکیب بالا، خصوصیات گاز بعد از انفجار با استفاده از کد کامپیوتری CEA[1] مطابق جدول ۲ بدست می‌آید.

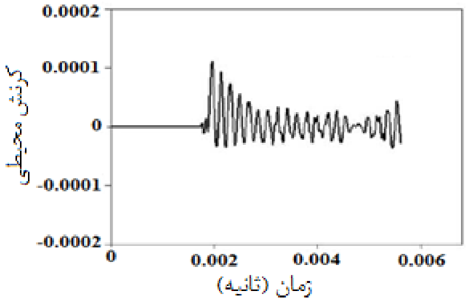
فاکتور نمایی کاهش طبق مرجع [۳] برابر مقدار ثابت ۴/۳۴ ×۱۰

در نظر گرفته شده است. از آنجا که نمودار تغییرات فشار در بخش دوم لوله، به حالت ایده‌آل نزدیکتر است لذا نتایج تست تجربی و مدل تحلیلی برای بخش دوم از لوله گزارش می‌شود [۲]. طبق مرجع [۴] تکیه‌گاه لوله برای شبیه‌سازی عددی، از نوع تکیه‌گاه ساده در نظر گرفته شده که در آن جابجایی در جهت y صفر است ولی در جهت x صفر نمی‌باشد و دوران حول محور z آزاد می‌باشد.

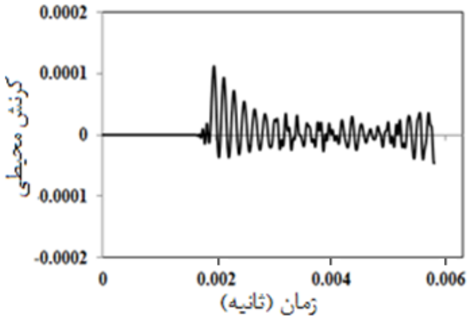
در شکل‌های ۳ تا ۵، به ترتیب نتایج تست تجربی، مدل تحلیلی و شبیه‌سازی عددی برای کرنش‌های نوسانی محیطی در محل گیج ۵ با هم مقایسه شده‌اند. بیشترین اختلاف مشاهده شده بین نتایج برابر ۲ درصد می‌باشد. گیج ۵ از ابتدای لوله، ۰/۷۹ m فاصله دارد. همان طور که مشاهده می‌شود نتیجه شبیه‌سازی عددی برای پاسخ لوله در محل گیج ۵، از لحاظ شکل موج، دامنه و فرکانس نوسانات کاملا با نتایج تحلیلی و تست تجربی همخوانی دارد.



شکل ۳ نمودار کرنش محیطی بر حسب زمان در محل گیج ۵ (تست تجربی شپرد)



شکل ۴ نمودار کرنش محیطی بر حسب زمان در محل گیج ۵ (مدل تحلیلی [۴])



شکل ۵ نمودار کرنش محیطی بر حسب زمان در محل گیج ۵ (شبیه‌سازی عددی)

۵- شبیه‌سازی تنش‌های حرارتی ناشی از انفجار گازی داخلی در لوله

همان گونه که قبلاً گفته شد در اثر ایجاد انفجار گازی درون لوله، علاوه بر موج شاک فشاری، موج شاک حرارتی نیز به طور همزمان، درون لوله به وجود می‌آید که ماکزیمم دمای آن در جبهه موج انفجار[2] است و با گذشت موج انفجار از هر نقطه درون لوله، دما متناسب با فشار کاهش می‌یابد. در بخش‌های بعدی بار حرارتی در لوله شبیه‌سازی خواهد شد.

۵-۱- محاسبه گرمای آزاد شده در یک سیکل از کارکرد موتور تراک ضربه‌ای

قانون اول ترمودینامیک مطابق رابطه (۲) بیان می شود.

$$Q - W = m[(h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) - g(z_2 - z_1)] \quad (۲)$$

که در آن h_2 آنتالپی وزنی محصولات و h_1 آنتالپی وزنی واکنش‌دهنده‌ها است.

1. Chemical Equilibrium Application

2. Detonation Front

جدول ۱ خصوصیات لوله‌ی شبیه‌سازی شده [۲]

ضریب پواسون	مدول الاستیک E (N/m^2)	چگالی ρ (kg/m^3)	طول L (m)	شعاع داخلی Rin (m)	شعاع خارجی $Rout$ (m)
۰/۲۳	۱۹۳×۱۰۹	۸۰۰۰	۲/۳۸	۰/۱۳۹۷	۰/۱۶۵۱

جدول ۲ خصوصیات موج انفجار

دمای ماکزیمم K	فشار ماکزیمم $P_2=P_{cj}$ (MPa)	سرعت موج V_{cj}(m/s)	ثابت گاز R	نرخ گرمای ویژه بعد از انفجار γ_2	نرخ گرمای ویژه قبل از انفجار γ_1
۳۰۸۳	۱/۷	۱۶۹۹/۷	۲۴۴/۱۲۸	۱/۲۲	۱/۵۵

بیشترین گرمای ایجاد شده در یک سیکل از کارکرد موتور تراک ضربه‌ای در فرایند انفجار به وجود می‌آید و در این فرایند دمای گاز به بیشتر از ۲۰۰۰ درجه می‌رسد و لذا در محاسبهٔ گرمای ایجاد شده در یک سیکل از کارکرد موتور تراک ضربه‌ای، فقط فرایند انفجار گازی بررسی می‌شود. در طول این فاز از کارکرد موتور، ترم‌های ورودی و خروجی به لوله در نظر گرفته نمی‌شوند و همچنین فرض می‌شود که تغییری در جرم در این فاز نداریم و گاز قبل و بعد از انفجار ساکن است و بنابراین ترم‌های انرژی جنبشی نیز از معادله حذف می‌شوند و معادله انرژی به صورت رابطه (۳) در می‌آید.

$$Q = m(h_{pr} - h_{re}) \tag{۳}$$

$$Q = h_f + h_s = h_f + c_p \Delta T \tag{۴}$$

در این رابطه h_f بیان‌گر آنتالپی تشکیل[۱]، h_s بیان‌گر آنتالپی محسوس[۲]، c_p گرمای ویژه در فشار ثابت و ΔT تغییر در دما می‌باشد. مقدار آنتالپی کل نیز از رابطه (۵) محاسبه می‌شود [۹].

$$h = \frac{\bar{h}}{MW} \tag{۵}$$

در این رابطه $\bar{h}$ آنتالپی مولی و MW وزن مولکولی است [۹].

$$\bar{h}(T) = \bar{h}^0_{f,i}(T_{ref}) - \Delta\bar{h}^0_{s,i}(T_{ref}) \tag{۶}$$

در این رابطه $\bar{h}(T)$ آنتالپی کل در دمای T، $\bar{h}^0_{f,i}(T_{ref})$ آنتالپی تشکیل در دمای مرجع و $\Delta\bar{h}^0_{s,i}(T_{ref})$ تغییر در آنتالپی محسوس از دمای مرجع به دمای مورد نظر می‌باشد.

$$\Delta\bar{h}^0_{s,i}(T_{ref}) = \bar{h}_i(T) - \bar{h}^0_{f,i}(T_{ref}) \tag{۷}$$

با استفاده از معادلات بالا می‌توان گرمای آزاد شده در فرایند انفجار گازی را به صورت زیر حساب کرد [۹].

$$Q = m\,\frac{\bar{h}(T)_{pr} - \bar{h}(T)_{re}}{MW} \tag{۸}$$

مقادیر آنتالپی تشکیل و آنتالپی محسوس در جداول استاندارد موجود است [۹]. نحوه ترکیب واکنش دهنده‌ها و محصولات نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$2H_2 + O_2 + 6.85\,Ar \rightarrow a\,Ar + b\,H + c\,HO_2 + d\,H_2 + e\,H_2O + f\,O + g\,OH + n\,O_2$$

حروف a, b, c, d, e, f, g, n معرف تعداد مول محصولات هستند. با استفاده از کد CEA کسر مولی محصولات را بدست آورده و سپس با استفاده از جداول استاندارد مرجع [۹] و روابط (۳ تا ۹)، مقدار گرمای ایجاد شده در یک سیکل از کارکرد موتور تراک ضربه‌ای برای مخلوط سوخت مورد بررسی در این تحقیق، برابر مقدار زیر بدست می‌آید:

Q=-۸۸/۲۴۲۳ kJ

شار حرارتی سطحی[۳] که در یک سیکل از کارکرد موتور بر روی سطح داخلی لوله وجود دارد از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$q = \frac{Q}{A\,t_{det}} \tag{۹}$$

که در این رابطه A مساحت داخلی لوله و برابر با مقدار زیر است:

$A = ۲\pi R_{in}$= ۲/۰۸ m^2

t_{det} مدت زمانی است که طول می‌کشد تا جبهه موج با سرعت ۱۶۹۹/۷ m/s طول ۲/۳۸ m لوله را طی کند.

t_{det}= ۰/۰۰۱۴ s

شار حرارتی سطحی به صورت زیر بدست می‌آید:

q= -۳۰۳۰۲/۹۵۳ kW/m^2

1. Formation Enthalpy
2. Sensible Enthalpy
3. Surface Heat Flux

۵-۲- روش پیشنهادی برای شبیه‌سازی تنش حرارتی در لوله

پدیده انفجار گازی درون لوله بسیار پیچیده است طوری که در یک سیکل از کارکرد موتور تراک ضربه‌ای با خارج شدن امواج انفجار از انتهای باز لوله، امواج انبساطی به درون لوله منعکس شده که این امواج نیز با انتهای بسته لوله برخورد کرده و دوباره به سمت انتهای باز لوله منعکس می‌شوند [۱۰]. بنابراین به دلیل پیچیدگی پروسه، تحلیل حرارتی مشکل می‌باشد. سرعت موج انفجار درون لوله زیاد است و در مدت زمان خیلی کمی، موج طول لوله را طی می‌کند. لذا با توجه به موارد گفته شده، فرض می‌شود انتقال حرارت در راستای طولی لوله قابل صرف‌نظر است و فقط در راستای شعاعی لوله، انتقال حرارت رخ می‌دهد. بنابراین در یک سیکل از کارکرد موتور به اندازه زمانی که طول می‌کشد تا موج انفجار لوله را طی کند شار حرارتی ثابتی بر روی دیواره داخلی لوله، شبیه‌سازی شود. لذا فرضیاتی که در این راستا در نظر گرفته می‌شوند به صورت زیر هستند:

۱- خصوصیات فیزیکی- حرارتی در طول فرایند انفجار ثابت در نظر گرفته می‌شوند.

۲- انتقال حرارت همرفتی[1] در راستای طولی درون لوله در نظر گرفته نمی‌شود و فقط در جهت شعاعی انتقال حرارت در جداره لوله رخ می‌دهد.

۳- شار حرارتی موجود درون لوله از رابطه ۹ محاسبه می‌شود.

۴- فرض می‌شود که شار حرارتی در مدت زمانی که طول می‌کشد تا موج انفجار لوله را طی کند درون لوله ثابت است.

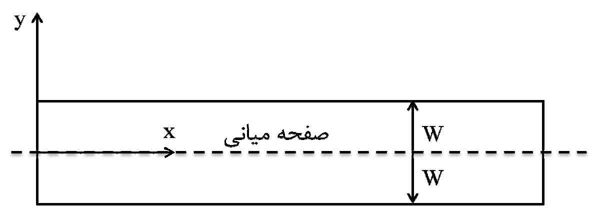
در این قسمت برای اطمینان از نتایج شبیه‌سازی عددی، موارد بررسی شده توسط جیرو کاساهارا [۶] و جیاکسی زو [۷] شبیه‌سازی شده و نتایج حاصله با نتایج آنها مقایسه می‌شوند. خصوصیات حرارتی فولاد کلاس ۳۰۴ که در این تحقیق استفاده شده، اعم از رسانندگی حرارتی، ضریب انبساط حرارتی و گرمای ویژه از جداول استاندارد برگرفته شده است.

۵-۳- مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج حل تحلیلی جیاکسی زو [۷]

جیاکسی زو و همکارانش در سال ۲۰۱۰ روشی تحلیلی برای بررسی پاسخ حرارتی سازه‌ای یک سیلندر خالی اورتوتروپیک با طول محدود با استفاده از تئوری پوسته‌ها، ارائه کردند. آنها برای بررسی صحت نتایج بدست آمده از حل تحلیلی، به عنوان مطالعه موردی، پاسخ حرارتی لوله موتور تراک ضربه‌ای را به شاک حرارتی بررسی نمودند. جزئیات کامل در مرجع [۷] موجود است. جهت بررسی تنش در دیواره لوله، سیستم مختصاتی مطابق شکل ۶ در صفحه میانی ضخامت دیواره لوله تعریف شده و تنش‌ها در بالا و پایین صفحه میانی بررسی می‌شوند. W برابر نصف ضخامت لوله و برابر ۰/۰۱۲۷ m است. مختصات بی بعد z در راستای ضخامت به صورت $z = y/W$ تعریف می‌شود. زو و همکارانش با در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده برای جریان گاز درون لوله، ضریب انتقال حرارت جابجایی گاز را محاسبه نموده و سپس شار حرارتی موجود در لوله را به صورت زیر تقریب زدند:

$$h = ۱۹۷\ \mathrm{W/m^2.K}$$
$$T_f = ۲۰۰۰\ ^{\circ}\mathrm{C} \quad , \quad T_{ref} = ۳۰۰\ ^{\circ}\mathrm{C}$$
$$q = h\,(T_f - T_{ref}) = -۳۸۹۰۴۵\ \mathrm{W/m^2}$$

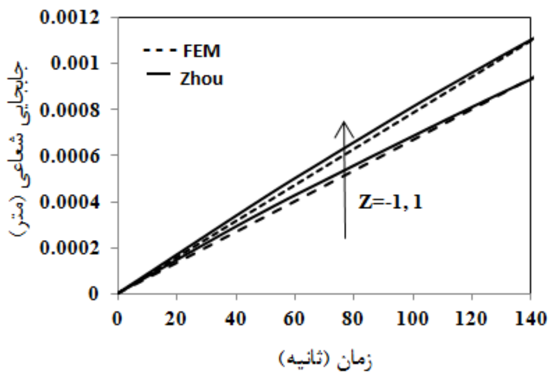
در روابط بالا h ضریب انتقال حرارت جابجایی گاز بعد از انفجار، T_f دمای نهایی گاز، T_{ref} دمای مرجع و q شار حرارتی سطحی است. مشخصات ابعادی و جنس لوله مطابق جدول ۱ می‌باشد. آنها برای بررسی درستی صحت روابط استخراج شده خود، فرض کردند در مدتی که موتور تراک ضربه‌ای کار می‌کند و انفجار درون لوله رخ می‌دهد شار حرارتی سطحی محاسبه شده در بالا، به صورت ثابت بر روی سطح داخلی لوله قرار دارد. برای شبیه‌سازی عددی از خاصیت تقارن محوری بار و هندسه استفاده کرده و لوله به صورت دوبعدی شبیه‌سازی و شار حرارتی سطحی به مدت ۱۴۰ ثانیه روی سطح داخلی قرار داده شده است. برای المان‌بندی لوله از المان‌های CAX4RT (المان چهار ضلعی درجه یک متقارن محوری با درجه آزادی جابجایی و حرارت) استفاده شده است.



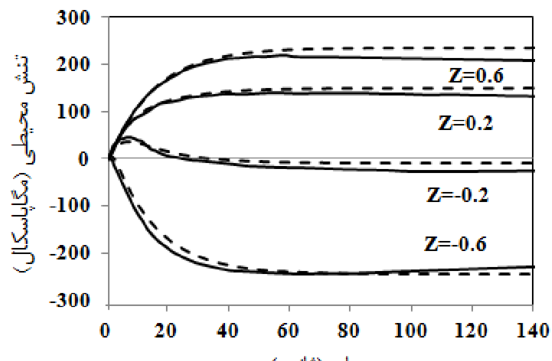
شکل ۶ سیستم مختصات جدید در صفحه میانی ضخامت لوله

1. Conduction

در نمودارهای شکل ۷ و ۸ نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تحلیلی زو مقایسه شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از شبیه‌سازی تطابق قابل قبولی با نتایج تحلیلی زو دارند. بیشترین اختلاف مشاهده شده برابر ۳ درصد می‌باشد. در نمودار ۷ تغییرات جابجایی دیواره در سطح داخلی و سطح بیرونی با زمان کاملاً خطی است و با افزایش زمان جابجایی در حال افزایش است زیرا که با گذشت زمان به دلیل وجود شار حرارتی ثابت روی سطح داخلی، دما به صورت خطی در سطوح لوله در حال افزایش است. در نمودار ۸ تغییرات تنش هوپ با زمان مشاهده می‌شود. تنش در بالای صفحه میانی به صورت کششی و تنش در پایین صفحه میانی به صورت فشاری است و تغییرات تنش با زمان در لحظات اولیه شدید است و رفته رفته با زمان این تغییرات کاسته می‌شود.



شکل ۷ تغییرات جابجایی بر حسب زمان



شکل ۸ تغییرات تنش هوپ بر حسب زمان

۵-۴- مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی جیرو کاساهارا [۶]

جیرو کاساهارا و همکارانش [۶] در سال ۲۰۰۲ برای بررسی تغییرات فشار در لوله موتور تراک ضربه‌ای، تعیین مومنتوم خالص خروجی از لوله با اندازه‌گیری مستقیم سرعت گازهای خروجی و انتقال حرارت از گازهای سوخته شده به لوله، موتور تراک ضربه‌ای با دو لوله اصلی و یک نازل را تست نمودند. آنها برای ایجاد انفجار درون لوله از ترکیب هیدروژن و اکسیژن $(2H_2 + O_2)$ در دمای ۲۸۷ K و فشار اولیه ۱۰۱ kPa استفاده کردند.جنس لوله از فولاد ضد زنگ کلاس ۳۰۴ است. طول لوله اول برابر ۲/۱۵۲ m و طول لوله دوم ۱/۵۷۶ m، شعاع داخلی لوله‌ها برابر ۲۵ mm، شعاع خارجی برابر ۳۵ mm، طول نازل برابر ۰/۵۷۶ m، شعاع ورودی نازل برابر ۲۵ mm و شعاع خروجی برابر ۷۵ mm می‌باشد. آنها افزایش دمای لوله نسبت به دمای مرجع ۲۸۲ K، بعد از ۲۸ سیکل از کارکرد موتور با فرکانس ۳/۰۷۷ Hz را برابر ۲۵ K – ۲۰ گزارش کردند. جهت بررسی تحقیق انجام شده توسط جیرو کاساهارا، شرایط انفجار درون لوله شبیه‌سازی شده و دما روی سطح داخلی و بیرونی آن گزارش می‌شود. برای شبیه‌سازی شرایط انفجار درون لوله و تعیین دمای سطح خارجی و داخلی لوله، طبق روش پیشنهادی در بخش ۵-۲ عمل شده و فرض می‌شود در مدت زمانی که طول می‌کشد تا موج انفجار طول لوله اول را طی کند شار حرارتی سطحی ثابتی بر روی سطح داخلی آن وجود دارد.

طبق نتایج بدست آمده از بخش قبل، از انفجار مخلوط هیدروژن و اکسیژن با ترکیب مولی ذکر شده، مقدار گرمای Q= -۸۸/۲۴۲۳ kJ آزاد می‌شود. مقدار شار حرارتی موجود، مطابق رابطه ۹ محاسبه می‌شود. با استفاده از کد CEA سرعت موج انفجار ناشی از مخلوط سوخت برابر ۲۸۰۳ m/s بدست می‌آید. مدت زمانی که طول می‌کشد تا جبهه انفجار طول لوله اول را طی کند برابر زیر است:

$$t= L/V_{cj} = ۷/۶۷۷\times ۱۰^{-۴}\ \mathrm{s}$$

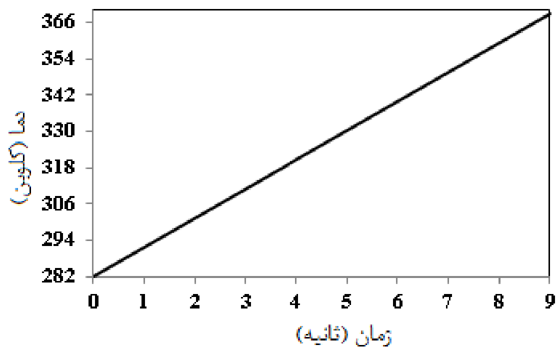
بنابراین شار حرارتی برابر مقدار زیر بدست می‌آید:

$$q= -۳۲۶۸۲۲/۹۶\times ۱۰^{۳}\ \mathrm{W/m^2}$$

فرکانس کارکرد موتور برابر ۳/۰۷۷ Hz است و در هر ۰/۳۲ ثانیه یک سیکل از کارکرد موتور انجام می‌شود. بنابراین برای شبیه‌سازی بار حرارتی ناشی از انفجار فرض می‌شود که از هر ۰/۳۲ ثانیه که یک سیکل انجام می‌شود به مدت ۰/۷۶۷۷ میلی ثانیه شار حرارتی (q) بر روی سطح داخلی لوله قرار دارد. در کل به مدت ۲۸ سیکل موتور کار کرده است که تقریباً برابر ۹ ثانیه می‌شود. برای شبیه‌سازی از خاصیت تقارن محوری هندسه و بار استفاده شده و شبیه‌سازی انجام می‌شود.

تکیه‌گاه‌های انتهایی لوله به صورت تکیه‌گاه ساده مدل شده است. لوله در راستای طولی به ۱۰۰۰ و در راستای شعاعی به ۱۰ قسمت تقسیم بندی شده است. برای مش‌بندی از المان‌های نوع CAX4RT (المان چهار ضلعی درجه‌ی یک متقارن محوری با درجه آزادی جابجایی و حرارت) استفاده شده است. نمودار تغییرات دمای سطح بیرونی و سطح خارجی لوله به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ آورده شده است.

ماکزیمم دمای سطح داخلی لوله بعد از گذشت ۹ ثانیه برابر ۳۷۰ کلوین است. بنابراین نسبت به دمای مرجع ۲۸۲ کلوین، افزایش دما روی سطح داخلی ۸۸ کلوین است. اما روی سطح خارجی لوله ماکزیمم دما بعد از گذشت ۹ ثانیه برابر ۳۱۰ کلوین است که نسبت به دمای مرجع، ۲۸ درجه افزایش دما داشته است. جیرو کاساهارا افزایش دمای سطح خارجی لوله را پس از گذشت ۹ ثانیه برابر ۲۰ تا ۲۵ درجه گزارش کرده است. از آنجا که شبیه‌سازی شرایط واقعی آزمایشگاهی مشکل می‌باشد می‌توان گفت که روش پیشنهادی جهت شبیه‌سازی بار حرارتی ناشی از انفجار گازی درون لوله، با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده، روش تقریبی مناسبی خواهد بود.

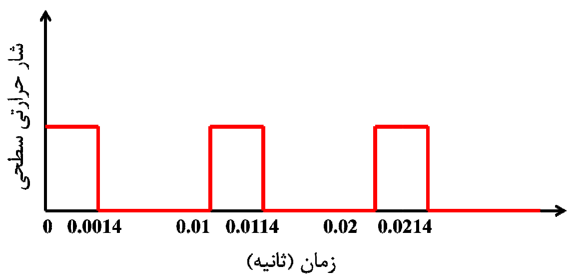


شکل ۹ تغییرات دمای سطح داخلی لوله

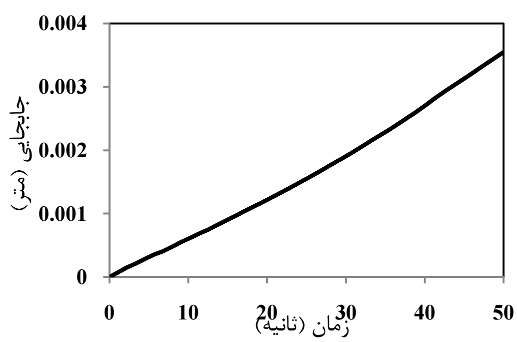
شکل ۱۰ تغییرات دمای سطح بیرونی لوله

۵-۵- محاسبه تنش‌های مکانیکی و حرارتی

در این بخش، تنش‌های مکانیکی و حرارتی مربوط به لوله با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ و برای موج انفجار با مشخصات مذکور در جدول ۲، به صورت همزمان شبیه‌سازی شده است. جدار لوله در راستای شعاعی به ۱۰ و در طول به ۱۰۰۰ قسمت تقسیم بندی شده است. تکیه‌گاه‌ها نیز ساده در نظر گرفته و دمای اولیه لوله ۳۰۰ درجه اعمال شده است. زمان انجام هر سیکل در موتور تراک ضربه ای در این تحقیق با توجه به اینکه فرکانس ۱۰۰ Hz برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است برابر ۰/۰۱ s و مدت زمانی که طول می‌کشد تا موج انفجار گازی با سرعت ۱۶۹۹/۷ m/s طول ۲/۳۸ m لوله را طی کند برابر ۰/۰۰۱۴ s است و لذا در هر سیکل از کارکرد موتور (مطابق روش پیشنهادی)، به مدت ۰/۰۰۱۴ s از ابتدای سیکل، شار حرارتی به صورت یکنواخت در سطح داخلی لوله شبیه‌سازی می‌شود. در شکل ۱۱ این موضوع به خوبی نشان داده شده است. شکل ۱۲ تغییرات جابجایی بر حسب زمان در جداره داخلی لوله در اثر اعمال بار حرارتی را نشان می‌دهد. این تغییرات برای مدت ۵۰ ثانیه از کارکرد موتور است که در این مدت، ۵۰۰۰ بار انفجار در لوله رخ می‌دهد.



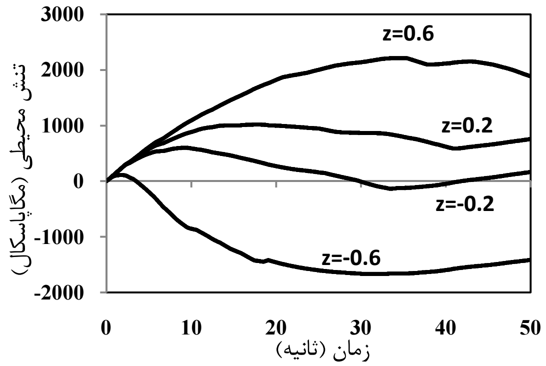
شکل ۱۱ نحوه اعمال بار حرارتی در لوله



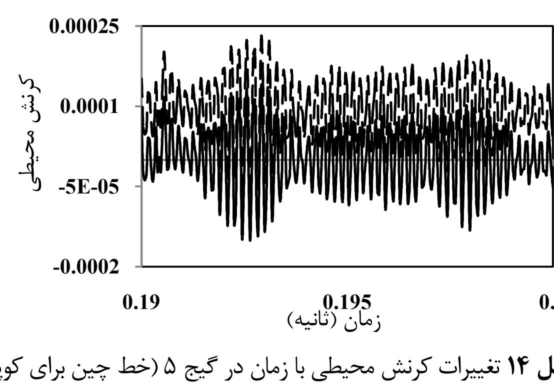
شکل ۱۲ نمودار جابجایی ناشی از شار حرارتی روی سطح داخلی بر حسب زمان در محل گیج ۵

شکل ۱۳ تغییرات تنش محیطی بر حسب زمان در چند موقعیت مختلف از ضخامت لوله را نشان می‌دهد.

برای اعمال همزمان بار مکانیکی و حرارتی در لوله، علاوه بر اعمال کردن شار حرارتی ناشی از انفجار گازی در هر سیکل، بار فشاری نیز همزمان در Abaqus/Explicit شبیه‌سازی می‌شود. به صورت ساده می‌توان گفت که جابجایی‌های نهایی، برابر مجموع جابجایی ناشی از بار حرارتی و جابجایی ناشی از بار مکانیکی می‌باشند. برای المان بندی لوله از المان‌های CAX4RT (المان چهار ضلعی درجه‌ی یک متقارن محوری با درجه آزادی جابجایی و حرارت) استفاده شده است. در نمودار شکل ۱۴ تغییرات کرنش محیطی بر حسب زمان در گیج ۵ برای دو حالت ۱- اعمال بار مکانیکی و ۲- اعمال بار مکانیکی و حرارتی به صورت همزمان و برای بیستمین سیکل انفجار پی در پی (در بازه زمانی ۰/۲-۰/۱۹ که در هر s ۰/۰۱ یک انفجار رخ می‌دهد) آورده شده است. محل گیج ۵ طبق مختصات بی بعد در z =-۱ (جداره داخلی لوله) قرار دارد. نمودار خط چین مربوط به کوپل بار حرارتی-فشاری و نمودار توپر مربوط به حالت اعمال بار فشاری می‌باشد.



شکل۱۳ نمودار تغییرات تنش هوپ بر حسب زمان



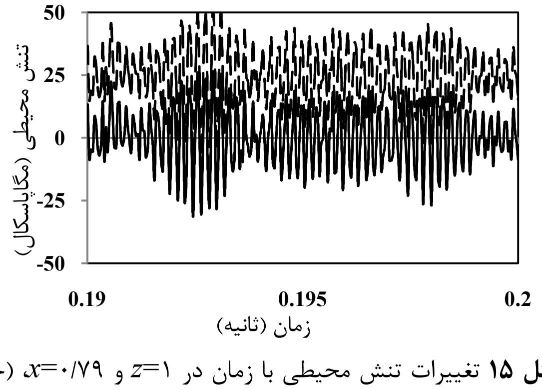
شکل ۱۴ تغییرات کرنش محیطی با زمان در گیج ۵ (خط چین برای کوپل بار مکانیکی و حرارتی، خط ممتد برای اعمال بار مکانیکی)

همان طور که مشاهده می‌شود فرکانس نوسانات، تغییری نمی‌کند و تنها دامنه نوسانات است که افزایش می‌یابد. نمودار شکل ۱۵ تغییرات تنش محیطی بر حسب زمان در محل مختصات z=۱ و x=۰/۷۹ (بر روی جداره خارجی دیواره لوله که در آن تنش محیطی مقدار بیشینه دارد) را نشان می‌دهد. نمودار خط چین مربوط به کوپل بار حرارتی-فشاری و نمودار توپر مربوط به حالت اعمال بار فشاری می‌باشد.

همان طور که از نمودار تنش محیطی مشاهده می‌شود دامنه نوسانات تنش در حالت اعمال همزمان بار مکانیکی و حرارتی، نسبت به حالت اعمال بار مکانیکی، افزایش یافته است. در این تحقیق شبیه‌سازی کوپل بار مکانیکی و حرارتی در لوله، فقط برای ۲۰ سیکل انفجار صورت گرفته است. بنابراین با افزایش تعداد انفجارها تاثیر تنش‌های حرارتی بیشتر خواهد شد.

۶- نتیجه‌گیری

بررسی نتایج حاصل از اعمال همزمان بار مکانیکی و حرارتی ناشی از انفجار گازی درون لوله، نشان می‌دهد که بار حرارتی در لوله ناشی از انفجار گازی می‌تواند تنش‌های حرارتی قابل توجهی ایجاد کند. هرچند تنش‌های حرارتی در مدت زمان کم و تعداد محدودی از انفجارها تاثیر زیادی در ایجاد تنش ندارد ولی در سازه‌هایی مانند لوله موتور تراک ضربه‌ای که در آن انفجارهای متمادی با فرکانس بالا ایجاد می‌شود انتقال حرارت از گازهای داغ ناشی از انفجار گازی به جداره لوله، سبب افزایش دامنهٔ نوسانات کرنش محیطی شده و با افزایش زمان، کرنش حرارتی افزایش خواهد یافت طوری که وجود آنها، سبب خستگی شده و عمر سازه کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵ تغییرات تنش محیطی با زمان در z=۱ و x=۰/۷۹ (خط چین برای اعمال همزمان بار مکانیکی و حرارتی، خط ممتد برای اعمال بار مکانیکی)

از طرفی روش پیشنهادی جهت شبیه‌سازی تنش‌های حرارتی درون لوله، اگرچه دمای هر نقطه را کمی بیشتر از مقدار واقعی پیش بینی می‌کند ولی با توجه به فرضیات انجام شده در روش پیشنهادی، راهی مناسب برای تحلیل تنش حرارتی ناشی از انفجار در لوله‌ها و مخازن است و طراحی انجام شده بر اساس این روش، محافظه کارانه‌تر خواهد بود.

۷- مراجع

[1] Tang S, "Dynamic Response of Tube under moving Pressure", *Proceeding American Society of Civil Engineering,* Engineering Mechanic Division, 1965, pp. 97-122.

[2] Beltman W. M., Shepherd J. E., "Linear Elastic Response of Tubes to Internal Detonation Loading", *International Journal of Sound and Vibration*, 2001, 252(4), pp. 617-655.

[3] Mirzaei M., "On Amplification of Stress Waves In Cylindrical Tubes under Internal Dynamic Pressures", *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 50, 2008, pp. 1292-1303.

[4] Mirzaei M., Biglari H., Salavatian M., "Analytical and Numerical Modelling of the Transient Elasto-Dynamic Response of a Cylindrical Tube to Internal Gaseous Detonation", *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 83, 2006, pp. 531-539.

[5] Mirzaei M., Mazaheri K., Biglari H., "Analytical Modeling of the Elastic Structural Response of Tubes to Internal Detonation Loading", *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 82, 2005, pp. 883-895.

[6] Kasahara J., Takazawa K., Arai T., Tanahashi Y., Chiba S., Matso A., "Experimental Investigations of Momentum and heat Transfer in Pulse Detonation Engines", Proceedings of the combustion Institute, Volume 29,2002.

[7] Zhou J., Deng Z., Hou X., "Transient Thermal Response in Thick Orthotropic Hollow Cylinders with Finite Length: High Order Shell Theory", *Acta Mechanica Solidica*, Vol. 23, No. 2, 2010.

[8] Mirzaei M., "Finite Element Analysis of Deformation and Fracture of Cylindrical Tubes under Internal Moving Pressures", *Finite element analysis*, David Moratal (Ed.), ISBN: 978-953-307-123-7, InTech, 2010.

[9] Stephan R. Turns, *An Introduction to Combustion: Concepts and Application*, Second Edition, Mc Graw Hill, 2000.

[10] Takuma Endo, Toshi Fujiwara, "A Simplified Analysis on a Pulse Detonation Engine Model", Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci. pp. 217-222, 2002.