

مدلسازی عددی پدیده ی ضربه قوچ با استفاده از یک مدل اندرکنش

سیال-سازه

چکیده

در این مقاله ما برای تحلیل مسائل ضربه آبی (قوچ) در لوله های دارای دیواره های ضخیم یک دستورالعمل عددی برای اندرکنش بین سیال و سازه ارائه می نماییم. مدلسازی لوله با استفاده از نظریه ی تیرهای مسطح برنولی-اویلر در ارتعاشات طولی و عرضی انجام گرفت. برای حرکت دیواره ی لوله از روش المان محدود و الگوریتم نیومارک استفاده شده است، و، در مورد سیال، روش مشخصه. بر عکس نظریه کلاسیک، این مدلسازی نشانگر اثرات جنبی اندرکنش سیال - سازه بر پارامترهای ضربه آبی در لوله ی الاستیک و ویسکوالاستیک می باشد.

کلمات کلیدی: کلید واژه ها: مکانیک سیالات محاسباتی- هیدرولیک -ساختار سیال- روش های مشخصه- عناصر

محدود

1.مقدمه

در مطالعه ی کلاسیک پدیده ی قوچ در لوله ها معمولاً جریان یک بعدی در نظر گرفته می شود. مطالعه ی انجام شده در اینجا، بر اساس نظریه ی تیرهای مسطح برنولی - اویلر، برای لوله ها در ارتعاشات طولی و عرضی می باشد.

2.معادلات پایه و فرضیات در نظر گرفته شده

معادلات پایه بر اساس قوانین بقای جرم، مومنتوم برای سیال و دیواره ی لوله در تبدیلهای بدون تغییر آنتروپی می باشد.

1.2. معادلات سیال

این فرضیات در نظر گرفته شدند، معادلات جریان در یک سطح مقطع لوله می توانند به صورت سیستم هیپربولیکی که برای روش مشخصه مناسب است بیان شوند:

$$\frac{\partial(\rho_f A_f)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f A_f V)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\rho_f \frac{dV}{dt} + \frac{\partial P}{\partial x} + \rho_f g \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{4T_f}{D} = 0 \quad (2)$$

اگر $\varepsilon^e = \frac{\alpha(p(x,t) - p(x,0)) D_m J(0)}{2e}$ را تغییر شکل ارتجاعی لحظه ای دیواره و $\varepsilon^r = \int_0^t \alpha(p(x,t - \tau) -$

ε^r کرنش ناشی از آن باشد، تغییر شکل دیواره می تواند به صورت مجموع دو عبارت $\frac{D_m}{2e} \frac{dJ(r)}{dr} dr$

$\varepsilon^e +$ در نظر گرفته شود، و α : پارامتری است که نوع مهار لوله را مشخص می کند، در حالتیکه لوله به صورت

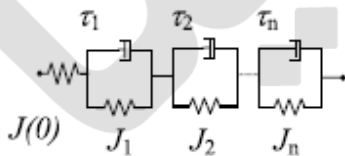
طولی مهار شده باشد، به صورت $\alpha = 1 + \frac{e^2}{D_m^2} + 2veD_m - v^2(1 - \frac{e}{D_m})^2$ بیان شده و بنابراین معادله

(1) به صورت زیر در می آید:

$$\frac{1}{\rho_f} \frac{dP}{dt} + \alpha^2 \frac{\partial V}{\partial x} - 2\alpha^2 v \frac{\partial \dot{u}}{\partial x} + 2\alpha^2 \frac{d\varepsilon^r}{dt} = 0 \quad (1')$$

که:

$$\alpha = \left(\rho_f \left(\frac{1}{k} + \frac{\alpha D_m J(0)}{e} \right) \right)^{-1/2}$$



تصویر 1. مدل.

تابع تسلیم خزش می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$J(t) = J(0) + \sum_{i=1}^n J_i (1 - \exp(-t/\tau_i))$$

که مطابق با مدل کلوین - وویگت که در تصویر 1 نشان داده شده است می باشد.

2.2. معادلات دینامیکی دیواره ی لوله

بر اساس فرضیاتی که قبلا ذکر شد و همچنین در صورتیکه مقدار تغییر شکلها ناچیز باشد، معادلات دینامیکی دیواره

ی لوله در جهتهای طولی و عرضی به صورت زیر در می آید:

$$A_p E^* \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - m_p \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{A_p D v}{2e} \frac{\partial P}{\partial x} + T_f A_f = 0 \quad (3)$$

$$E^* I \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + 2vm_f \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} + V^2 m_f \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (4)$$

که در روابط بالا $E^* = E \left(1 + \frac{\tau \partial}{\partial t}\right)$ عملگر دیفرانسیلی است که مربوط به مدول مصالح دیواره ی لوله می باشد.

عبارت $\frac{A_p D v}{2e} \frac{\partial P}{\partial x}$ ، در معادله ی (3)، عبارتی است که در آن با استفاده ضریب پواسون تاثیرات انبساطی که در لوله

بر اثر فشار سیال وارد می شود بر رفتار طولی نشان داده می شود. در معادله ی (4) دو عبارت، $E^* I \frac{\partial^4 w}{\partial x^4}$

و $m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$ ، نشان دهنده ی سختی خمشی و نیروی لختی هستند، و دو عبارت دیگر، $2vm_f \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t}$ و $V^2 m_f \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$

بیانگر نیروهای مورد نیاز برای تغییر جهت گردش و پیچش المان سیال تحت اثر دیواره می باشند.

3. شرایط مرزی و اولیه

شرایط اولیه همان شرایط مربوط به جریان ماندگار و تعادل در دیواره ی لوله هستند.

4. حل عددی

حل عددی معادلات (1')، (2)، (3) و (4) در شرایط مرزی و اولیه با استفاده از روش اندرکنش سیال - سازه انجام

می شود: در هر گام زمانی ابتدا معادلات مربوط به سیال را با روش مشخصه (MOF) با یک شبکه ی منظم حل

نموده و سپس معادلات دینامیکی دیواره ی لوله با روشهای المان محدود در هر گره دارای سه درجات آزادی حل

می شوند. الگوریتم کلی به این صورت است:

(الف) در مورد سیالی که شیب منحنی های مشخصه آن: $dx/dt = V \pm a$ باشد

$$\frac{\delta P}{\delta t} \pm \rho_f a \frac{\delta V}{\delta t} + \frac{2\rho_f a^2}{V \pm a} \left\{ V \frac{\delta \varepsilon^r}{\delta t} \pm a \frac{\partial \varepsilon^r}{\partial t} \right\} \pm \rho_f a g \frac{\partial z}{\partial x} \mp \frac{4aT_f}{D} - 2v\rho_f a^2 \frac{\partial \dot{u}}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

(ب) در صورتیکه شیب منحنی مشخصه dx/dt برابر صفر باشد

$$\frac{\delta \varepsilon^r}{\delta t} = \int_0^t \frac{\alpha D_m}{2e} \frac{\partial P(x, t-\tau)}{\partial t} \frac{dJ(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (6)$$

(پ) استفاده از روش المان محدود برای دیواره ی لوله

دو معادله ی دینامیکی (3) و (4) که معادلات حرکت دیواره ی لوله می باشند را می توان به المانهای محدود مجزا نمود.

بنابراین بعد از جداسازی سیستمهای ارتعاشی دینامیکی و تبدیل آنها به دو سیستم خواهیم داشت:

(پ.1) ارتعاشات طولی دینامیکی

$$[m] = \int_0^L \rho_p A_p [N]^T [N] dx$$

$$[c] = \int_0^L A_p E \tau [N']^T [N'] dx$$

$$[k] = \int_0^L A_p E [N']^T [N'] dx$$

$$\{f\} = - \int_0^L \left(A_f T_f + \frac{A_p D v}{2e} \frac{\partial P}{\partial x} \right) [N]^T dx + ([N]^T A_p E (\tau u' + u'))$$

(پ.2)

$$[m] = \int_0^L m [N]^T [N] dx$$

$$[c] = - \int_0^L 2 m_f V [N']^T [N'] dx + \int_0^L EI \tau [N''']^T [N'''] dx$$

$$[k] = \int_0^L EI [N''']^T [N'''] dx - \int_0^L m_f V^2 [N']^T [N'] dx$$

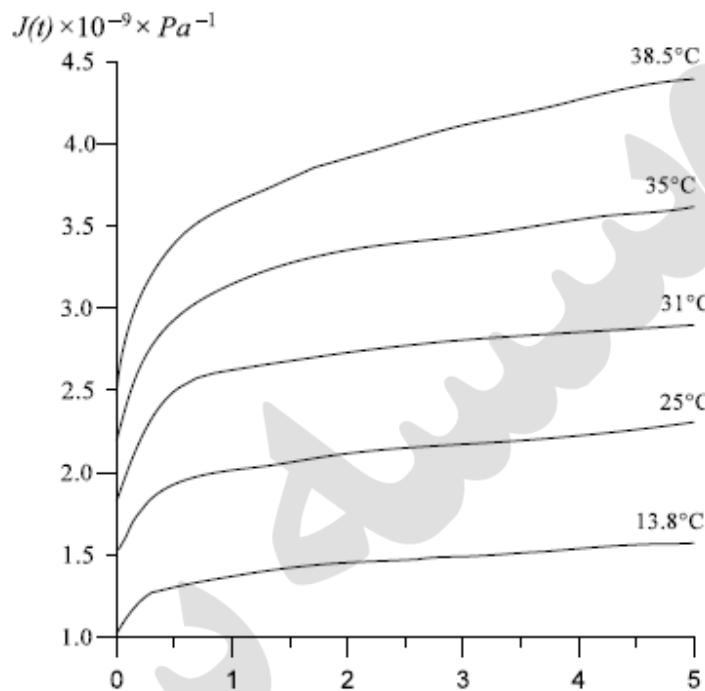
$$\{f\} = - ([N]^T (EI(W'''' + \tau W'''')) + m_f V^2 W' + 2m_f V \dot{W}) + ([N']^T EI(w'' + \tau \dot{W}'''))$$

در حالت مشابه با ترکیب دو سیستم بیان شده سیستم کلی زیر به دست می آید:

$$[M]\ddot{X}(t) + [c]\dot{X}(t) + [k]X(t) = \{F(t)\} \quad (7)$$

که در رابطه ی بالا $X(t) = (u_1, w_1, \theta_1, u_2, w_2, \theta_2, \dots, u_n, w_n, \theta_n)^T$ تابع بردار تغییر مکانهای دیواره

ی لوله در گره های المانها است.



تصویر 2. رابطه ی بین تابع خزش و دما.

برای تعیین پاسخهای دینامیکی دیواره ی لوله در یک جریان گذار، از روش ضمنی نیومارک استفاده می شود چرا که این روش دقت و پایداری بالایی دارد.

5. کاربرد روش ارائه شده و نتایج

مقدار سرعت اولیه برابر بود با $V=5\text{m/s}$ و همچنین هد پیزومتری در تانک $H=5\text{m}$ می باشد، برای جریان گذرای آب در دمای 25 درجه سانتیگراد؛ مقدار ویسکوزیته ی سینماتیک آن 10^{-6} متر مربع بر ثانیه و همچنین مقدار k برابر با 2.1×10^9 پاسکال می باشد.

1.5. مدل کلاسیک

در حالت ویسکو الاستیک، نتایج ارائه شده در تصویر 2 از آزمایشی که در آزمایشگاه مکانیک سیالات I.N.S.A لیون بر روی خط لوله پلی اتیلنی انجام شده به دست آمده اند.

داده های لوله ی مورد نظر به این صورت هستند: $L=43.1\text{m}$ ، $D=50\text{mm}$ ، $e=4.2\text{mm}$ ، $\rho_m =$

$$\nu = .43.930\text{kg/m}^3$$

$$J(t) = J_0 + \sum_{i=1}^3 J_i (1 - \exp(-t/\tau_i)), \quad J_0 = 1.542 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}, \quad J_1 = 0.754 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$$

$$J_2 = 1.046 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}, \quad J_3 = 1.237 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}, \quad \tau_1 = 0.89 \times 10^{-4} \text{ s}, \quad \tau_2 = 0.022 \text{ s}, \quad \tau_3 = 1.864 \text{ s}$$

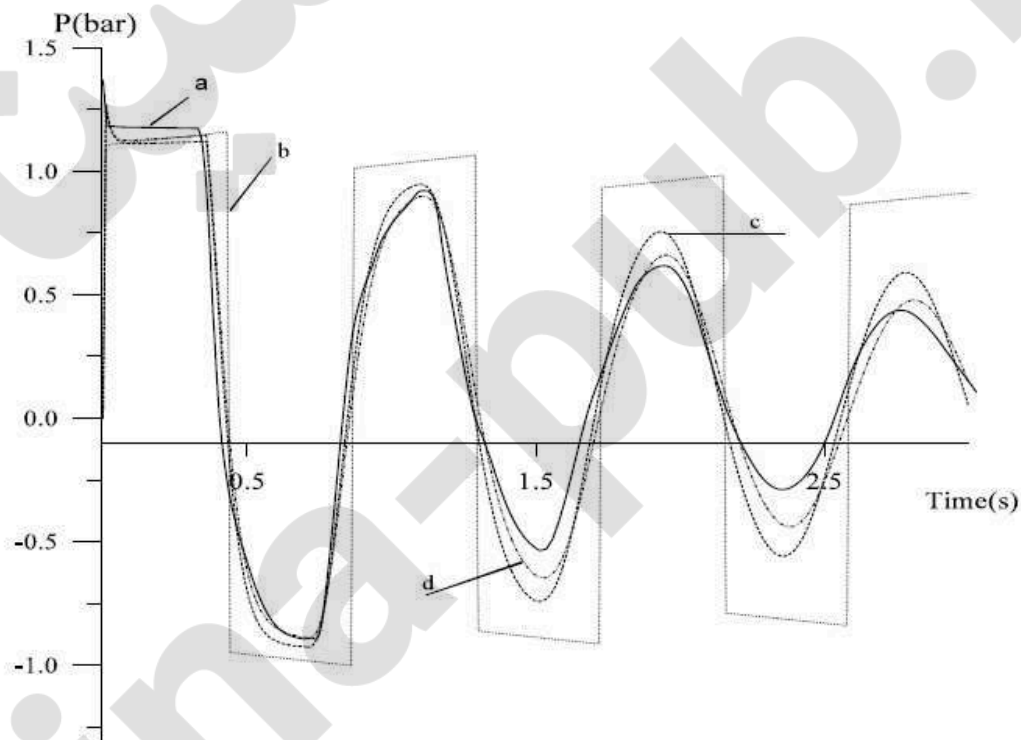
نتایج ارائه شده در تصویر 3 به ترتیب متناظرند با:

- نمودار *a*: نتایج اندازه گیری.

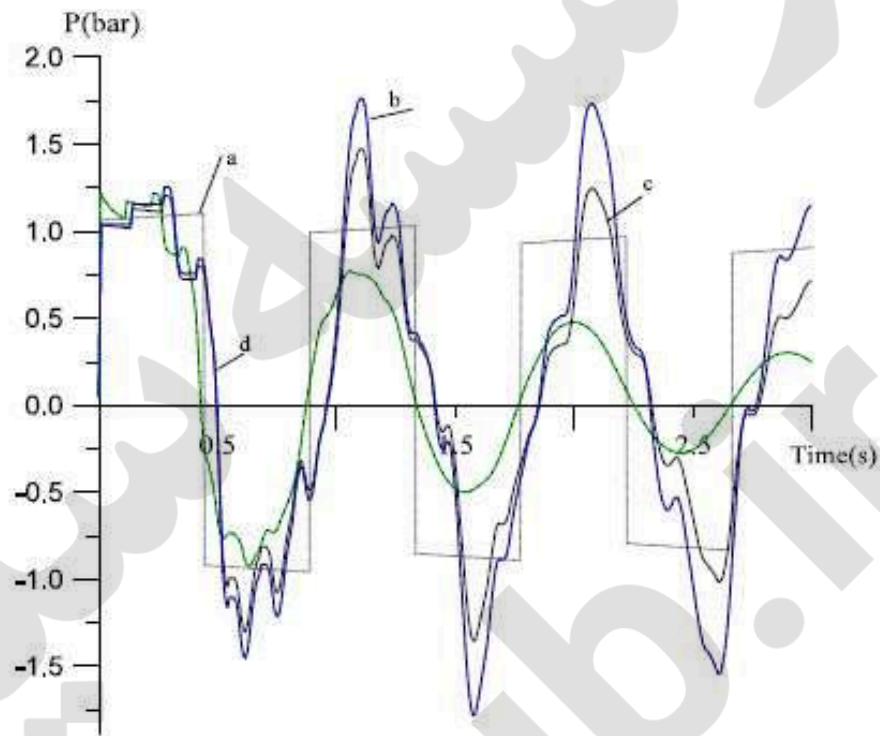
- نمودار *b*: محاسبه ی تئوری در حالت رفتار ارتجاعی تحت شرایط ذکر شده در بالا، افتها متنظرند با یک ترم اصطکاک ثابت.

- نمودار *c*: محاسبات تئوری در حالت ویسکو الاستیک، افتها در اینجا نیز مربوط می شوند به عبارت اصطکاک ثابت.

- نمودار *d*: محاسبات تئوری در حالت ویسکو الاستیک، همچنان تحت همان شرایط، با این تفاوت که در اینجا قسمت متغیر عبارت اصطکاک در نظر گرفته می شود.



تصویر 3. تعیین پاسخ فشار در انتهای پایین دست لوله ی پلی اتیلنی هنگام بسته شده ناگهانی دریچه با استفاده از مدل کلاسیک - مقایسه نتایج بدست آمده بر اساس نظریه ی بیان شده با نتایج آزمایش در دمای 25 درجه سانتیگراد.



تصویر 4. پاسخ فشار در انتهای پایین دست لوله ی پلی اتیلنی هنگام بسته شده ناگهانی دریچه.

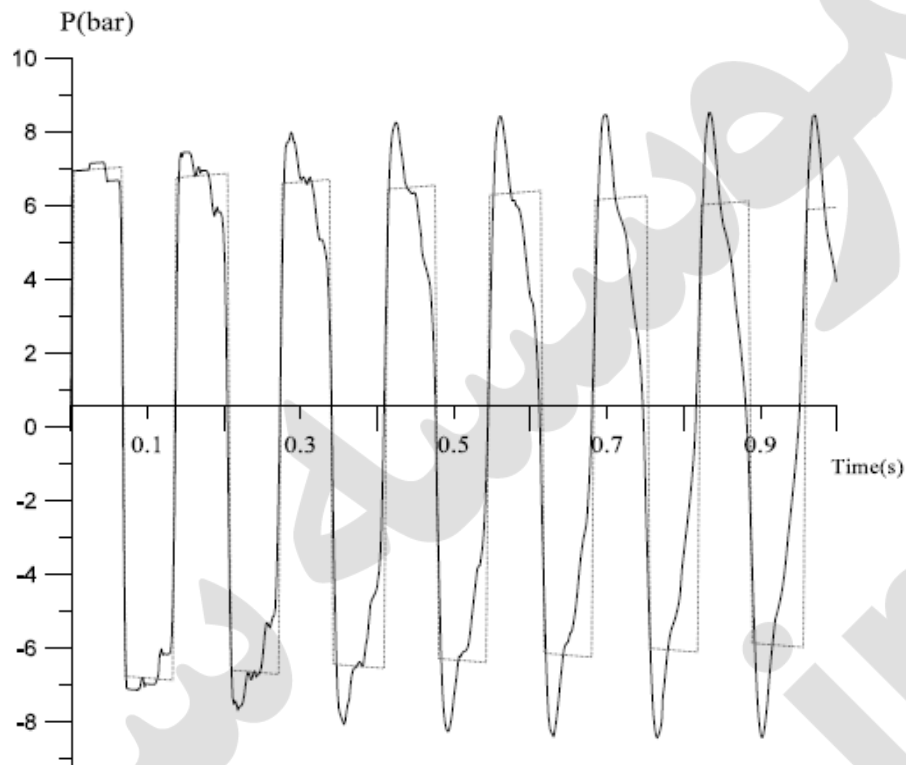
2.5. مدل اندرکنش سازه - سیال

در این حالت محاسبات برای یک لوله پلی اتیلنی و یک لوله مسی انجام شدند.

نتایج عددی در تصاویر 4 و 5 نشان داده شده اند. تصویر 4 که مطابق با لوله ی پلی اتیلنی است، نمودارها به ترتیب متناظرند با:

-نمودار *a*: نظریه کلاسیک.

-نمودارهای *b*، *c* و *d*: مدل اندرکنش سیال - سازه در حالت الاستیک: *b* و حالت‌های ویسکوالاستیک: *c* و *d*.



تصویر 5. پاسخ فشار در انتهای پایین دست یک لوله ی صلب (مسی) هنگام بسته شدن ناگهانی یکی از دریچه ها. در تصویر 5 نیز برای بررسی تغییرات فشار نسبت به زمان در محل درچه همان شرایط برقرار است، جایی که در آن رفتار ارتجاعی به طور کامل حکمفرما بوده و صلبیت لوله نیز بیشتر می باشد که داده های مربوط به آن عبارتند از

$$v=.33, \rho_m = 8920\text{kg/m}^3, E=1.2 \times 10^{11}\text{Pa}, e=1\text{mm}, D=20\text{mm}, L=26\text{m}$$

همانگونه که مشاهده می کنیم این تصویر مشابه تصویر قبل است با این تفاوت که در این تصویر میزان نوسانات فشار کم است.

6. نتیجه گیری

در این مطالعه ما تلاش کردیم، که برای محاسبه ی گذرها در لوله های الاستیک و ویسکوالاستیک یک مدل عددی مبتنی بر اندرکشتش سازه و سیال ارائه کنیم. این مدل تغییر شکل دیواره ی لوله و رفتار دینامیکی آنرا شامل می شود. بر عکس نظریه کلاسیک، با استفاده از این روش می توان پدیده ی قوچ را با دقت بالایی پیش بینی نمود. با استفاده از این روش می توان اختلالات اضافی را که در اثر انتشار موج در لوله ایجاد می شوند را به خوبی مشاهده

نمود. این اختلالات در یک اندرکنش پیچیده به اختلال اصلی اضافه می شوند. مقدار فشار حاصل از موج ترکیبی می تواند نسبتاً زیاد باشد. وسیکوزیته ی سیال و همچنین ماهیت ویسکوالاستیک ماده باعث میرایی امواج فشاری می گردد. از این مدل می توان برای پیش بینی ارتعاشات صوتی در لوله های صنعتی استفاده نمود و به علاوه، می توان برای بیماری که مربوط به شریانهای بدن باشد، این مدل را شبیه سازی نموده و از آن استفاده نمود.