

تحلیل اثر موج شوک حاصل از انفجار بر لوله‌های مغروق

حامد شاه محمدی^۱ و سهیل محمدی^{۲*}

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه های دریایی- پردیس دانشکده های فنی- دانشگاه تهران

^۲ دانشیار دانشکده عمران - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۶/۲۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۷/۱/۲۷، تاریخ تصویب ۸۸/۱۲/۲۰)

چکیده

انفجار یک ماده منفجره قوی در زیر آب، دو پالس فشاری تولید می‌کند: یک موج شوک که مدت آن بسیار کوتاه است (در حد چند ده تا چند صد میکرو ثانیه) و یک پالس حباب که مربوط به انبساط محصولات انفجار است و با موج شوک همراه می‌شود. تعیین نقش موج شوک، جریان و حباب ایجاد شده در فرآیند تخریب هنوز در مجامع علمی در دست مطالعه است. تحلیل اثر انفجار زیر آب بر لوله های مغروق می‌تواند کمک خوبی برای ارزیابی تأثیر حملات تروریستی و خرابکارانه بر سازه های مشابه، مانند پایه های سکوها های دریایی و اسکله‌ها، باشد. در این مقاله سعی می‌شود اثر پالس اولیه یعنی موج شوک بر لوله های توخالی مغروق در آب بررسی و مدل سازی عددی شود. بسته به شرایط، اعم از نوع و مقدار ماده منفجره و فاصله آن نسبت به سازه و سطح آب، پالس اولیه (موج شوک) می‌تواند قسمت عمده و یا بخشی از پاسخ سازه را باعث گردد. برای لوله و سیال مجاور آن همراه با مرزهای غیر انعکاسی در معرض انفجار مقدار مشخصی از یک ماده منفجره قرار می‌گیرند و تحلیل به طور کاملاً درگیر و با احتساب اثرات اندرکنش سازه و سیال انجام می‌گیرد.

واژه های کلیدی: انفجار زیر آب، موج شوک، محیط آکوستیک، اندرکنش سازه و سیال

مقدمه

انفجار یک ماده منفجره قوی^۲ در زیر آب، دو پالس فشاری^۳ تولید می‌کند: یک موج شوک^۴ که با یک پالس حباب^۵ که مربوط به انبساط محصولات انفجار است، همراه می‌شود [۲].

موج شوک و فشار آن با حرکت شعاعی آب به سمت بیرون کاهش می‌یابد. سپس جرم متراکم و زیاد گاز که بعد از انفجار باقی مانده، شروع به انبساط می‌کند و فشار آن کاهش یافته و فشار در آب نیز به سرعت افت می‌کند. برای مواد منفجره قوی مانند TNT، فشار شوک با یک کاهش نمایی همراه است و مدت زمان آن در بیشتر موارد در حدود چند میلی ثانیه است. برای نمونه، سرعت اولیه موج شوک نزدیک به نقطه انفجار حدود 3000 m/s و فشار در حدود 23000 atm می‌باشد. هم سرعت و هم فشار موج شوک به سرعت با فاصله و دور شدن از محل انفجار کاهش می‌یابد و در فواصل دور به مقادیر آکوستیک (مقادیر مربوط به انتشار صوت در آب) می‌رسد [۱ و ۳].

اما در مورد پالس حباب، محصولات گازی انفجار منبسط می‌شوند و آب اطراف محل انفجار را به سمت بیرون می‌رانند. شعاع حباب افزایش یافته و به بیش از شعاع تعادل متناظر با فشار هیدروستاتیکی در عمق مورد نظر می‌رسد. علت این موضوع اثر اینرسی آب در حال

توسعه روز افزون استفاده از نفت و گاز در صنعت و تکنولوژی و همچنین حمل و نقل کالاها از طریق راه‌های آبی بیش از پیش بر اهمیت سازه های دریایی افزوده است. سازه های دریایی اعم از سکوها، اسکله ها و خطوط لوله کف دریا علاوه بر بارهایی مانند بار باد، موج، جریان آب، جریان جزر و مدی، زلزله و بارهای مرده و زنده ممکن است تحت اثر بار ناشی از انفجار^۱ که می‌تواند اتفاقی و یا ناشی از حملات خرابکارانه باشد، نیز قرار بگیرند. به علت اهمیت این سازه ها، مقاومت آنها در برابر بارهای ناشی از انفجار عامل مهمی در ایمنی کلی سازه است و بررسی اثر انفجار بر این سازه ها در برخی مواقع لازم به نظر می‌رسد.

انفجار، یک واکنش شیمیایی در ماده منفجره است که مواد انفجاری را به گاز با دما و فشار بسیار بالا تبدیل می‌کند و این فرآیند با نهایت سرعت و ایجاد مقدار زیادی حرارت انجام می‌گیرد. دمای ایجاد شده در گازهای تولیدی در حدود 3000 °C است. بدین ترتیب هر ماده منفجره اعم از جامد، مایع یا گاز اساساً ترکیبی ناپایدار بوده که با آغاز انفجار، تغییرات شیمیایی آن را به محصول پایدارتر تبدیل می‌کند [۱].

سازه ها در عمقی از آب، دور از سطح و بستر دریا، در نظر گرفته می شوند تا بتوان از اثرات آنها بر عکس العمل سازه صرف نظر کرد.

فشار شوک

برای تعیین موج شوک ایجاد شده در اثر انفجار زیر آب تئوری ها و روابط تجربی مختلفی ارائه شده است. از آن جمله می توان به تئوری های Kirkwood-Bethe و Penney اشاره کرد [۱۲و۱].

موج شوک ایجاد شده در هر نقطه یک مقدار فشار حداکثر^۷ داشته که در کمتر از 10^{-7} s از زمان انفجار ایجاد می شود [۱۰] و سپس تقریباً به صورت نمایی در مدت کوتاهی کاهش می یابد [۱]. تحت شرایط متقارن کروی، حداکثر فشار شوک مربوط به ماده منفجره TNT از رابطه تجربی زیر بر حسب MPa به دست می آید [۱۰و۱۳]:

$$P_m = 52.16 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1.13} \quad (۱)$$

W وزن ماده منفجره TNT بر حسب kg و R فاصله از ماده منفجره بر حسب m است.

همان طور که گفته شد، فشار شوک در یک نقطه بر حسب زمان به صورت نمایی کاهش می یابد که رابطه زیر را می توان برای تغییرات زمانی فشار شوک ارائه کرد [۱۰و۱۳و۱۴]:

$$P(t) = P_m e^{-t/\theta} \quad (۲)$$

در این رابطه θ ثابت زمانی می باشد (زمان رسیدن فشار به مقدار P_m / e) که می توان آن را طبق رابطه تجربی زیر بر حسب میکرو ثانیه به دست آورد [۱۰و۱۳]:

$$\theta = 96.5 (W^{1/3}) \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{-0.22} \quad (۳)$$

فرمول بندی دینامیک سیال

در این بخش تحلیل محیط درگیر سازه و سیال^۸ به طور خلاصه ارائه می شود [۱۵].

معادله تعادل برای حرکات کوچک یک سیال تراکم پذیر^۹ به صورت زیر است:

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \gamma(x, \theta_i) \dot{u}^f + \rho_f(x, \theta_i) \ddot{u}^f = 0 \quad (۴)$$

p اضافه فشار در سیال (فشار بیشتر از فشار، x موقعیت مکانی ذره سیال، \dot{u}^f سرعت ذره سیال، \ddot{u}^f

حرکت توسط پالس ایجاد شده است. سپس فشار در حباب کمتر از فشار هیدروستاتیک محل می شود. این موقعیت پایدار نبوده و حباب در اثر اضافه فشار هیدروستاتیکی منقبض شده و به اصطلاح فرو می ریزد و شعاع حباب این بار به مقداری کوچکتر از حالت تعادل می رسد و فشار درون آن بیشتر از فشار هیدروستاتیکی می شود که سبب انبساط دوباره آن می شود. این انبساط و انقباض به مرور با اتلاف انرژی همراه می شود و سبب حرکت حباب به سمت سطح آب می شود [۲].

برای پدیده انفجار زیر آب و اثر آن بر یک سازه مغروق کارهای تحلیلی و آزمایشگاهی مختلفی انجام شده است. Cole [۱]، در فاصله سال های ۱۹۴۱-۱۹۴۶، به خاطر نیاز مربوط به جنگ جهانی دوم، تئوری های مختلف در مورد انفجار زیر آب و برخی روابط تحلیلی و تجربی برای اثر آن بر سازه ها را جمع آوری کرد. Wang و Huang [۴و۵]، تحلیلی تئوریک برای اندرکنش امواج کروی و لوله های استوانه ای انجام دادند. Geers و Hunter [۶]، مدلی را برای پالس ثانویه انفجار یعنی پالس حباب و حرکت تغییرات شعاع حباب ارائه کردند. Nurick و Martin [۷و۸و۹]، روابطی تجربی و تحلیلی برای تغییر شکل صفحاتی که تحت اثر بارگذاری انفجاری قرار می گیرند ارائه دادند. Rajendran و Narasimhan [۱۰و۱۱]، با یک سری آزمایش روی صفحات مستطیلی و دایره ای شکل توانستند روابطی تجربی برای ماکزیمم تنش ایجاد شده در اثر انفجار، در مرکز این صفحات ارائه دهند.

در این مقاله بعد از بررسی انفجار زیر آب و تعیین مشخصات موج شوک حاصل از آن، با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS ابتدا صفحاتی تحت اثر موج شوک ناشی از انفجار مدل شده و نتایج حاصل از تحلیل های عددی با روابط تحلیلی و یا نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شده و کالیبراسیون نرم افزار و مدل سازی انجام و کارایی روابط تجربی سنجیده می شود. سپس، مجموعه ای از لوله ها که می تواند بخشی از پایه های فلزی سکوها دریایی و یا اسکله ها باشد، با شرایط مختلف مدل شده و تحت بارگذاری پالس اولیه انفجار زیر آب، یعنی موج شوک، قرار داده می شود و رفتار آنها بررسی می شود. خاطر نشان می شود که در این مطالعه فقط موج شوک در نظر گرفته می شود و پالس حباب و کالیبراسیون^۶ احتمالی در نظر گرفته نمی شود. همچنین

از طرف دیگر رفتار سازه ای با معادله کار مجازی تعریف می شود

$$\int_V \delta s \cdot \sigma dV + \int_V \alpha_c \rho \delta u^m \cdot \ddot{u}^m dV + \int_V \rho \delta u^m \cdot \ddot{u}^m dV \quad (17)$$

که در آن S_{fs} سطحی است که حرکت محیط آکوستیک به طور مستقیم به حرکت سازه متصل می شود، σ تنش در یک نقطه از سازه، p فشار اعمالی بر سطح مشترک سیال-سازه، n عمود بر سازه بسمت خارج، ρ چگالی ماده، α_c ضریب میرایی متناسب جرمی^{۱۷} (بخشی از فرض میرایی رایله برای سازه)، \ddot{u}^m شتاب یک نقطه در سازه، t نیروی سطحی اعمالی بر سازه، δu^m میدان تغییراتی تغییر مکان، و δs تغییر کرنش است.

مسئله با تعریف توابع درونیایی منفصل سازی^{۱۸} می شود، در سیال $p = H^p p^p$ ، $p = 1, 2, \dots$ و در سازه $u^m = N^N u^N$ ، $N = 1, 2, \dots$ که N و p به ترتیب به درجات آزادی فشار در سیال و تغییرمکان در سازه اشاره دارد. با استفاده از روش گالرکین برای سیستم سازه ای، میدان تغییراتی به صورت $\delta u^m = N^N \delta u^N$ برای سیال رابطه $\delta p = H^p \delta p^p$ را با جای گذاری رابطه (۱۸) استفاده می کنیم

$$\delta p^p = \frac{d^2}{dt^2} (\delta \hat{p}^p) \quad (18)$$

تابع جدید $\delta \hat{p}^p$ معادله تغییراتی واحدی را می سازد که از جمع معادلات (۱۶) و (۱۷) با سازگاری ابعادی به دست می آید:

$$-\delta \hat{p}^p \left\{ M_f^{p0} \ddot{p}^0 + C_f^{p0} \dot{p}^0 + (K_f^{p0} + K_{fi}^{p0}) p^0 - S_{fs}^{pm} \ddot{u}^m \right\} + \delta u^N \left\{ I^N + M^{NM} \ddot{u}^m + C_{(m)}^{NM} \dot{u}^m + [S_{fs}^{0N}]^T p^0 - P^N \right\} = 0 \quad (19)$$

اندیس های P و Q مربوط به درجات آزادی فشار در سیال و M و N مربوط به درجات آزادی تغییر مکان در سازه هستند و داریم:

$$C_f^{p0} = \int_{V_i} \frac{\gamma}{\rho_f K_f} H^p H^0 dV \quad (20)$$

$$M_f^{p0} = \int_{V_i} \frac{1}{K_f} H^p H^0 dV \quad (21)$$

$$K_{fi}^{p0} = \int_{S_{fs}} \frac{1}{a_1} H^p H^0 dS \quad (22)$$

$$K_f^{p0} = \int_{V_i} \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial H^p}{\partial x} \cdot \frac{\partial H^0}{\partial x} dV \quad (23)$$

شتاب ذره سیال، ρ_f چگالی سیال، γ درگ حجمی^{۱۹} (نیرو بر واحد حجم بر سرعت) و θ_i متغیرهای مستقلی مانند دما، رطوبت هوا و یا شوری آب هستند.

سیال، غیر لزج^{۱۱}، خطی و تراکم پذیر فرض می شود، بنابراین:

$$p = -K_f(x, \theta_i) \frac{\partial}{\partial x} \cdot u^f \quad (5)$$

K_f مدول بالک^{۱۲} سیال می باشد.

مرز یک ناحیه از محیط آکوستیک که از معادلات (۴) و (۵) پیروی می کند می تواند به زیر ناحیه های S مطابق زیر تقسیم شود:

S_{fp} : در این بخش از مرز مقدار فشار آکوستیک مشخص است.

S_{fi} : مرز آکوستیک تابشی^{۱۳}. اغلب در حالاتی که محیط آکوستیک به صورت نامحدود گسترش دارد، بهتر است که ناحیه محاسباتی را کوچک و یک شرط مرزی اعمال کرده تا امواج عبوری از ناحیه محاسباتی به سمت خارج را مدل کند.

برای استخراج معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی مورد استفاده در انتگرال گیری مستقیم آنالیز گذرا^{۱۴} معادله (۴) را بر ρ_f تقسیم کرده، مشتق آنرا نسبت به x گرفته (با صرف نظر کردن از مشتق γ/ρ_f به علت کوچکی) و نتایج را با مشتقات زمانی معادله (۵) ترکیب کرده تا معادله حرکت برای سیال بر مبنای فشار سیال به دست آید:

$$\frac{1}{K_f} \ddot{p} + \frac{\gamma}{\rho_f K_f} \dot{p} - \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 0 \quad (6)$$

با استفاده از فرم ضعیف^{۱۵} معادله و اعمال روش جزء به جزء حالت تغییراتی نهایی برای محیط آکوستیک به دست می آید:

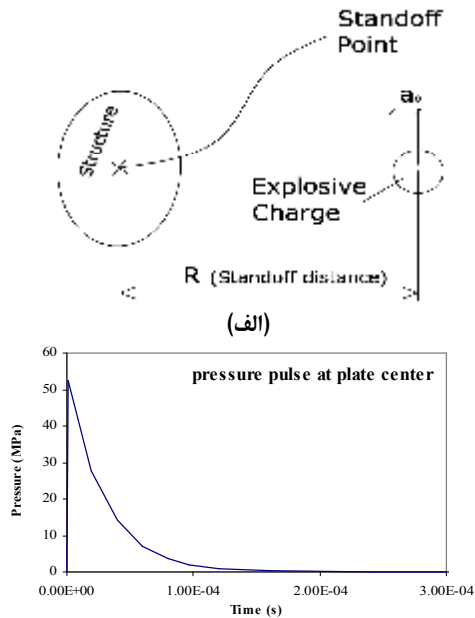
$$\int_{V_i} \left[\delta p \left(\frac{1}{K_f} \ddot{p} + \frac{\gamma}{\rho_f K_f} \dot{p} \right) + \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \delta p}{\partial x} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right] dV + \int_{S_{fs}} \delta p \left(\frac{1}{c_1} \dot{p} + \frac{1}{a_1} p \right) dS = 0 \quad (7)$$

که در آن پارامترهای c_1 و a_1 به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\frac{1}{c_1} = \left[\frac{\xi}{\sqrt{\rho_f K_f}} \right] \quad (8)$$

$$\frac{1}{a_1} = \xi \left[\frac{\beta}{\rho_f} + \frac{\gamma}{2 \rho_f \sqrt{\rho_f K_f}} \right] \quad (9)$$

اینکه در زمان صفر، مقدار فشار نیز صفر فرض می شود زیرا مدت زمانی در حدود 10^{-7} s از لحظه انفجار طول می کشد تا موج شوک به نقطه مورد نظر برسد. فولاد با چگالی 7800 kg/m^3 و مدول یانگ 210 GPa و تنش تسلیم 360 MPa در نظر گرفته می شود.



شکل ۱: (الف) شکل شماتیک از موقعیت standoff point و ماده منفجره (ب) پالس فشاری ناشی از 30 gr ماده منفجره TNT در فاصله 30 cm از مرکز صفحه.

صفحه فولادی با ۶۴۰ المان خطی ۴ گرهی پوسته ای S4R موجود در ABAQUS مش بندی می شود. بعد این المانها حدود 1 cm در نظر گرفته می شود. محیط سیال نیز با ۱۲۸۰۰ المان خطی آکوستیک شش وجهی و هشت گرهی به نام AC3D8R با همان بعد حدود 1 cm مش بندی می شود. نمایی از این مش بندی در شکل ۲ دیده می شود. برای در نظر گرفتن اندرکنش در سطح مشترک سیال و سازه، این دو سطح به صورت Tie به یکدیگر بسته شده اند. سطح لوله به عنوان سطح master و سطح سیال در تماس با لوله به عنوان سطح slave انتخاب می شود. بدین ترتیب تغییر مکان های سازه ای لوله به فشارهای آکوستیک مش سیال، که به حرکات ذرات سیال مربوط هستند، در سطح مشترک مرتبط می شوند. با توجه به اینکه در این مطالعه، فقط اثر موج شوک یعنی پالس اولیه فشار ناشی از انفجار بررسی می شود،

$$M^{NM} = \int_V \rho N^N \cdot N^M dV \quad (24)$$

$$S_{fs}^{PM} = \int_{S_{fs}} H^P \bar{n} \cdot N^M dS \quad (25)$$

$$I^N = \int_V \beta^N \cdot \sigma dV \quad (26)$$

$$C_{(m)}^{NM} = \int_V \alpha_c \rho N^N \cdot N^M dV \quad (27)$$

$$P^N = \int_{S_i} N^N \cdot t dS \quad (28)$$

که β^N تابع درون یاب کرنش^{۱۹} است.

معادلات در دامنه زمانی با استفاده از گزینه انتگرال گیری دینامیکی صریح^{۲۰} در نرم افزار انتگرال گیری می شوند. همچنین در کلیه مسائلی که در این مقاله مدل شده اند، مرز ناحیه آکوستیک (سیال) به صورت S_{fi} در نظر گرفته شده است.

شبیه سازی های عددی

بررسی انفجار بر روی یک صفحه دایره ای

در این مسأله یک صفحه در ابعاد به نسبت کوچک به شکل دایره تحت اثر انفجار مقدار کمی TNT توسط نرم افزار ABAQUS مدل می شود و تنش و تغییر مکان در مرکز آن با برخی روابط تجربی و تحلیلی که در این مورد وجود دارد مقایسه می شود. صفحه دایره ای شکل با قطر 25 cm و ضخامت 2 mm تحت اثر انفجار ماده منفجره TNT به مقدار 30 gr قرار می گیرد که در فاصله 30 cm از مرکز صفحه قرار دارد. صفحه از جنس فولاد بوده و فقط جلوی آن که در معرض انفجار قرار می گیرد در تماس با آب است (پشت صفحه در معرض هوا قرار دارد). آب جلوی لوله به صورت استوانه ای به قطر 25 cm و طول 20 cm مدل می شود، به طوری که سطح خارجی انتهای سیال در فاصله 10 cm از محل انفجار قرار دارد.

تاریخچه زمانی فشار شوک در نزدیکترین نقطه صفحه به محل انفجار یعنی مرکز صفحه اعمال می شود. این نقطه در اصطلاح standoff point نامیده می شود. در شکل (۱) موقعیت این نقطه و ماده منفجره و فاصله آن تا سازه نشان داده شده است. برای محاسبه نمودار فشار- زمان از روابط (۱) و (۲) و (۳) استفاده می شود. بر طبق این روابط ماکزیمم فشار شوک P_m و ثابت زمانی θ به ترتیب برابر 54.27 MPa و $29.75 \mu s$ به دست می آید. نمودار فشار- زمان اعمالی بر مرکز صفحه در شکل (۱) رسم شده است. قابل توجه

همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییر شکل صفحه به طور یکنواخت از لبه‌ها به سمت مرکز صفحه افزایش می‌یابد. نمودار تغییر مکان مرکز صفحه نیز بر حسب زمان در شکل (۴) رسم شده است. ماکزیمم این تغییر مکان برابر 19.1 mm می‌باشد.

برای ارزیابی نتایج عددی به دست آمده، آنها را با برخی روابط تجربی و تحلیلی مختلفی که برای پیش بینی تغییر مکان صفحات دایره‌ای تحت اثر انفجار زیر آب ارائه شده است مقایسه می‌کنیم.

Nurick برای تغییر شکل مرکز صفحات دایره‌ای δ_c ، فرمول زیر را پیشنهاد داده است [۸]:

$$\left(\frac{\delta}{t}\right)_c = 0.425\Phi_c + 0.227 \quad (20)$$

در این رابطه t ضخامت صفحه و Φ_c پارامتری بی بعد برای صفحات دایره‌ای است که از رابطه زیر و بر اساس واحدهای انگلیسی به دست می‌آید [۹ و ۱۰]:

$$\Phi_c = \frac{I_{tot}}{\pi r t^2 (\rho \sigma_y)^{1/2}} \quad (21)$$

r شعاع صفحه دایره‌ای، ρ چگالی آب، σ_y تنش تسلیم صفحه و I_{tot} ضربه 22 موج شوک یا سطح زیر منحنی فشار - زمان است (برحسب N.s) که بر روی کل صفحه انتگرالگیری می‌شود. ضربه در واحد سطح I سطح زیر منحنی فشار - زمان است [۱ و ۲ و ۱۰]:

$$I(t) = \int_0^t P(t) dt \quad (22)$$

که می‌توان آنرا از رابطه تجربی زیر برحسب $N.s/m^2$ به دست آورد [۱۰ و ۱۳]:

$$I = 5760 W^{1/3} \left(\frac{W^{1/3}}{R}\right)^{0.89} \quad (23)$$

که W برحسب kg و R برحسب m است. برای محاسبه I_{tot} باید سطح صفحه به سطوح کوچک‌تر حلقوی تقسیم شود و در هر قسمت I محاسبه و در مساحت آن ضرب شود تا بدین ترتیب I_{tot} برای کل صفحه به دست آید. مقادیر پارامترهای معرفی شده برای این مسئله عبارتند از:

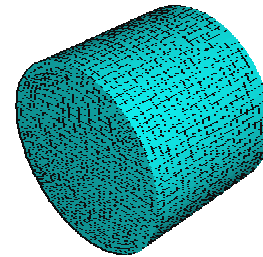
$$r = 12.5 \text{ cm} = 4.92 \text{ in}, \quad t = 2 \text{ mm} = 0.079 \text{ in}$$

$$W = 30 \text{ gr}, \quad R = 30 \text{ cm}, \quad \rho = 1025 \text{ kg/m}^3 = 64 \text{ pcf}$$

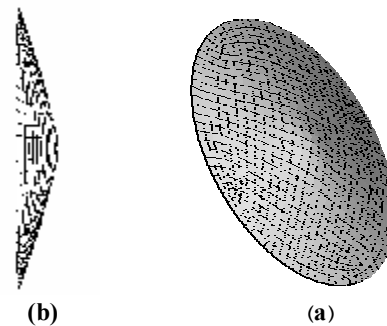
$$\sigma_y = 360 \text{ MPa} \approx 52 \text{ ksi}, \quad I_{tot} = 87.6 \text{ N.s} = 19.69 \text{ lb.s}$$

بدین ترتیب Φ_c برابر 16.115 و تغییر مکان مرکز صفحه 0.56 in یا 14.2 mm به دست می‌آید.

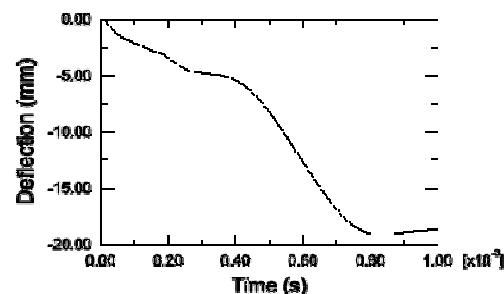
بنابراین زمان آنالیز 0.001 s در نظر گرفته می‌شود که در طی آن، بخش عمده واکنش سازه فقط ناشی از فشار شوک است.



شکل ۲: مش بندی سازه و سیال جلوی آن.



شکل ۳: تغییر شکل صفحه (a) نمای سه بعدی (b) نمای از کنار.



شکل ۴: نمودار تغییر مکان - زمان برای مرکز صفحه.

تغییر مکان‌های لبه صفحه در هر سه جهت، گیردار می‌شود تا کل صفحه به صورت جسم صلب حرکتی نداشته باشد. همچنین به این دلیل که صفحه در طرف انفجار در محیطی نامحدود از آب قرار گرفته، لذا فقط بخشی از سیال مدل شده و در سطح خارجی این ناحیه شرایط مرزی پرتوی (غیر انعکاسی) اعمال می‌شود که بدین معنی است که موج ایجاد شده از مرز این ناحیه بدون انعکاس عبور می‌کند و دیگر به داخل ناحیه بر نمی‌گردد. شکل تغییر شکل یافته صفحه بعد از 0.001 s از دو نمای مختلف در شکل (۳) نشان داده شده است.

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{6E\rho_p P_m^2 x^{2/(1-x)}}{\rho^2 c^2 (1-x)}} \quad (26)$$

که در آن E مدول یانگ صفحه، P_m فشار پیک، c سرعت صوت در آب و x معکوس عدد جرم^{۲۴} برای صفحه است که برابر است با:

$$x = \frac{\rho c \theta}{m} \quad (27)$$

که در آن θ ثابت زمانی و m جرم واحد سطح صفحه است. برای این مسئله داریم:

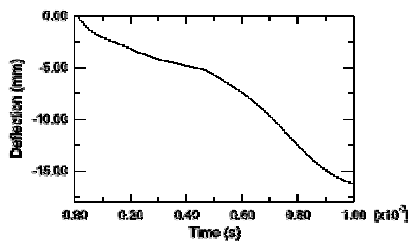
$$E = 2.1 \times 10^{11} \text{ Pa} = 4.39 \times 10^9 \text{ psf}, \quad \rho_p = 7800 \text{ kg/m}^3 = 486.95 \text{ pcf}$$

$$P_m = 54.27 \text{ MPa} = 1133446.8 \text{ psf}$$

$$\rho = 1025 \text{ kg/m}^3 = 64 \text{ pcf}, \quad c = 1463 \text{ m/s} = 4800 \text{ ft/s}$$

$$\nu = 0.3, \quad \theta = 29.75 \mu\text{s}, \quad m = 3.206 \text{ psf}, \quad x = 2.851$$

بدین ترتیب از فرمول (۲۶) مقدار σ_a برابر 8969.8 ksf یا 429.5 MPa به دست می آید. همان طور که ملاحظه می شود، این مقدار بسیار نزدیک به جوابی است که از تحلیل عددی به دست آمده است (417.6 MPa).



شکل ۶: نمودار تغییر مکان - زمان برای مرکز صفحه.

بررسی انفجار روی یک صفحه مستطیلی

در این قسمت اثر موج شوک ناشی از انفجار TNT روی یک صفحه مستطیلی با ابعاد کوچک بررسی شده و مانند بخش قبل، نتایج با روابط تجربی موجود مقایسه می شود. در این مسئله صفحه ای مستطیلی با ابعاد $0.3 \times 0.25 \text{ m}^2$ و با ضخامت 2 mm در معرض انفجار ۳۰ گرم TNT و در فاصله 30 cm از مرکز صفحه قرار می گیرد (شرایط انفجار مانند مسئله قبل است). در این جا هم پشت صفحه در معرض هوا قرار دارد و جلوی آن، آب به صورت مکعب مستطیلی با همان ابعاد صفحه و طول 20 cm مدل می شود و انتهای بخش سیال مدل شده، در فاصله 10 cm از محل ماده منفجره قرار می گیرد. نوع المان ها و اندرکنش سطح مشترک سازه و

رابطه دیگری توسط Rajendran به این شک پیشنهاد شده است [۱۶]:

$$\left(\frac{\delta}{t}\right)_c = 0.541 \Phi_c - 0.433 \quad (24)$$

که بر اساس این رابطه تغییر مکان برابر 0.65 in یا 16.6 mm به دست می آید.

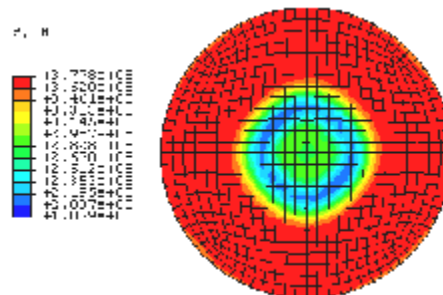
اما Jones نیز روابطی تحلیلی برای پیش بینی نسبت تغییر مکان مرکز صفحات دایره ای به ضخامت آنها ارائه داده است که به این صورت است [۱۰]:

$$\left(\frac{\delta}{t}\right)_c = 0.817 \Phi_c \quad (25)$$

بدین ترتیب پیش بینی Jones برای تغییر مکان مرکز این صفحه طبق رابطه (۲۵) 1.04 in معادل 26.4 mm به دست می آید.

همان طور که ملاحظه می شود روابط تجربی و تحلیلی پیش بینی های به نسبت نزدیکی با نتایج مدل سازی عددی ارائه می دهند با این تفاوت که روابط تجربی مقادیر کوچک تر و روابط تحلیلی مقادیر بزرگ تر از نتایج عددی به دست می دهند.

در شکل (۵) تنش فون میس^{۲۳} ایجاد شده روی صفحه بعد از 0.001 s مشاهده می شود. همان طور که دیده می شود تنش از لبه ها به سمت مرکز در چند ناحیه به طور حلقوی کم و زیاد می شود، به طوری که میزان تنش در لبه ها از مرکز صفحه بیشتر است که علت آن می تواند شرایط تکیه گاهی لبه صفحه باشد که از حرکت آزاد صفحه جلوگیری می کند.

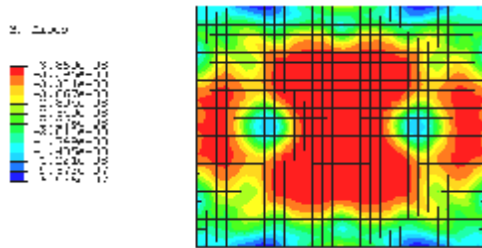


شکل ۵: توزیع تنش فون میس روی صفحه در زمان 0.001 s.

ماکزیمم تنش فون میس در مرکز صفحه برابر 417.6 MPa است. برای صفحات دایره ای ماکزیمم تنش فون میس σ_a از رابطه تجربی زیر قابل پیش بینی است [۱۱]:

اختلاف کمی با مدل سازی دارد، اما پیش بینی تحلیلی Jones جواب بزرگتری ارائه می دهد.

در شکل (۷) تنش فون میسز ایجاد شده روی صفحه بعد از 0.001s مشاهده می شود. همان طور که دیده می شود به طور کلی تنش از لبه ها به سمت مرکز افزایش می یابد اما در بعضی نقاط یکنواختی به چشم نمی خورد که می تواند به علت شرایط تکیه گاهی لبه صفحه باشد.



شکل ۷: تنش ون میسز صفحه در زمان 0.001 s .

ماکزیمم تنش فون میسز در مرکز صفحه برابر 435.02 MPa است. مانند صفحات دایره ای برای ماکزیمم تنش در مرکز صفحات مستطیلی رابطه زیر در دست است [۱۱]:

$$\sigma_a = 0.867 \sqrt{\frac{14E\rho_p P_m^2 x^{2/(1-x)}}{\rho^2 c^2}} \quad (32)$$

پارامترهای این رابطه مانند رابطه (۲۶) است. بدین ترتیب از فرمول (۳۲) مقدار σ_a برابر 9938.9 ksf یا 475.9 MPa به دست می آید که کمی بیش از نتیجه مدل عددی است.

بررسی اثر انفجار زیر آب بر روی لوله ها با ضخامت ها و شرایط مختلف انفجار

در این بخش، مدل های مختلفی از لوله که می تواند بخشی از پایه jacket یک سکوی دریایی باشد، مدل سازی شده و تحت اثر انفجار زیر آب بررسی و با هم مقایسه می شود. لوله ها دارای طول و قطر یکسانی با ضخامت های مختلف هستند که ماده منفجره TNT با مقادیر متغیر و در فواصل مختلف از هر یک از آنها قرار می گیرد و نتایج آنها با هم مقایسه می شود. طول لوله ها همگی 10 m و قطر آنها 80 cm است. طول بلند (10 m) به این خاطر انتخاب شده که شرایط تکیه گاهی دو سر لوله که گیردار در نظر گرفته می شود، کم ترین اثر را

سیال مانند مسئله قبل است. تاریخچه زمانی فشار اعمالی بر نزدیک ترین نقطه به انفجار یعنی مرکز صفحه، با توجه به اینکه شرایط انفجار مانند مسأله قبل می باشد، مطابق شکل (۱) است. نمودار تغییر مکان مرکز صفحه نیز بر حسب زمان در شکل (۶) رسم شده است. ماکزیمم این تغییر مکان برابر 16.3 mm است. پیش بینی Nurick برای تغییر شکل مرکز صفحات مستطیلی به صورت زیر است [۸]:

$$\left(\frac{\delta}{t}\right)_r = 0.471\Phi_r + 0.001 \quad (28)$$

Φ_r پارامتری بعد برای صفحات مستطیلی است و براساس واحدهای انگلیسی از رابطه زیر به دست می آید [۹ و ۱۰]:

$$\Phi_r = \frac{I_{tot}}{2t^2(4ab\rho\sigma_y)^{1/2}} \quad (29)$$

در این رابطه a و b به ترتیب نصف طول و نصف عرض صفحه هستند که در این جا:

$$a = 15 \text{ cm} = 5.91 \text{ in}, \quad b = 12.5 \text{ cm} = 4.92 \text{ in}$$

برای محاسبه I_{tot} مانند حالت قبل باید سطح مستطیل به سطوح کوچکتر تقسیم و در هر یک I در مرکز آن حساب و در مساحت آن ضرب شود و از مجموع آنها I_{tot} به دست آید. در این مسئله مستطیل را به ۲۵ مستطیل $6 \times 5 \text{ cm}^2$ تقسیم می کنیم و در نهایت خواهیم داشت:

$$I_{tot} = 131 \text{ N.s} = 29.45 \text{ lb.s}$$

بدین ترتیب Φ_r برابر 17.270 و تغییر مکان مرکز صفحه 0.64 in یا 16.3 mm به دست می آید.

اما رابطه تجربی Rajendran برای صفحات مستطیلی به صورت زیر است [۱۶]:

$$\left(\frac{\delta}{t}\right)_r = 0.553\Phi_r + 0.741 \quad (30)$$

بر طبق این رابطه خواهیم داشت:

$$\delta_r = 0.813 \text{ in} = 20.7 \text{ mm}$$

بر اساس پیش بینی تحلیلی Jones نسبت تغییر شکل به ضخامت برای صفحات مستطیلی با نسبت طول به عرض 1.2 به صورت زیر است [۱۰]:

$$\left(\frac{\delta}{t}\right)_r = 0.95 [(1+0.6637\Phi_r^2)^{1/2} - 1] \quad (31)$$

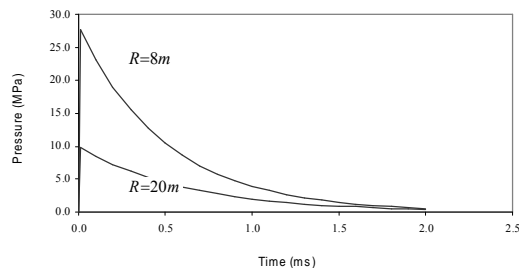
لذا پیش بینی Jones برای تغییر مکان مرکز این صفحه طبق رابطه (۳۱) 0.98 in معادل 25.0 mm به دست می آید. بنابراین رابطه Nurick تطابق بسیار خوبی با مدل عددی دارد و پیش بینی Rajendran نیز به نسبت

از پایه های جکت سکوهای دریایی هستند، بنابراین دو انتهای آنها به صورت گیردار در نظر گرفته می شود که با توجه به اینکه پاسخ سازه در وسط آن مد نظر است، چندان دور از واقعیت نیست. هم چنین به علت اینکه فقط بخشی از سیال که به طور نامحدود اطراف لوله را فرا گرفته مدل می شود، مانند موارد قبل قسمتی از سیال اطراف لوله به صورت محیط آکوستیک مدل شده و در سطح خارجی این ناحیه شرط مرزی پرتوی و غیر انعکاسی اعمال می شود. هم چنین این لوله ها در عمقی از آب فرض می شوند که فواصل به نسبت زیادی از سطح آب و بستر دریا دارند و بنابراین از اثر این دو سطح صرف نظر می شود. هم چنین اثر پالس حباب نیز در نظر گرفته نمی شود و فقط اثر موج شوک روی لوله ها دیده می شود. مدت زمان آنالیز که پاسخ لوله در این مدت بررسی شده برابر 0.002 s است.

در جدول (۱) مشخصات و نتایج مدل های ساخته شده آمده است. لوله های با ضخامت ۱ تا ۲/۵ سانتی متر به ترتیب با A تا D نام گذاری شده اند. در این جداول ماکزیمم تنش فون میسس از رابطه (۲۶) و (۳۲) و تغییر مکان با استفاده از روابط تجربی گفته شده با فرض صفحه دایره ای با قطر برابر با یک پنجم قطر لوله ها و صفحه مستطیلی با عرض برابر یک پنجم قطر لوله و طول 1.2 برابر عرض محاسبه شده است. به طور کلی رابطه Nurick برای هر دو حالت صفحه نتایج بهتری برای اثر موج شوک به دست می دهد، البته در ضخامت های بیشتر (2.5 cm) رابطه مربوط به صفحه مستطیلی آن در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد کوچک تر از نتایج عددی می شود. برای تنش نیز برای ضخامت های پایین (1.5 cm, 1) حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد و برای ضخامت های بزرگتر حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد کوچک تر از نتایج عددی هستند. همان طور که گفته شد، برای لوله با ضخامت 1 cm اثر انفجار با $R/a_o = 60$ که در حقیقت همگی فشار پیک یکسانی دارند نیز بررسی و نتایج آن در جدول (۱) (مدل های A5 تا A8) آمده است و اگر چه با افزایش فاصله (و هم چنین وزن TNT) تنش و تغییر مکان افزایش می یابند اما در مجموع، به ویژه در مورد تنش، نتایج اختلاف زیادی با هم ندارند. نتیجه قابل انتظار دیگر این است که با افزایش ضخامت، تنش و تغییر مکان کاهش می یابد. در شکل های (۹) و (۱۰) تنش فون میسس به ترتیب برای مدل های A

روی عکس العمل لوله در وسط آن، که مورد بررسی این تحقیق است، داشته باشد. اطراف لوله، آب به صورت استوانه ای تا فاصله 2.2 m از سطح سازه مدل می شود. لوله ها با ضخامت های 1، 1.5، 2 و 2.5 سانتی متر انتخاب شده اند. ماده منفجره، TNT 100 kg بوده که برای هر ضخامت لوله در فواصل 8، 12، 16 و 20 متری از سطح لوله و در مقابل وسط لوله (با فاصله برابر از دو سر آن) قرار داده شده است. علاوه بر این مدل ها، برای لوله با ضخامت 1 cm، ماده منفجره TNT با وزن های مختلف نیز در فواصل 8 تا 20 متری بررسی شده است، به گونه ای که برای همه آنها نسبت فاصله به شعاع ماده منفجره برابر 60 است ($R/a_o = 60$) قابل توجه اینکه چگالی TNT برابر 1.52 gr/cm^3 در نظر گرفته شده است.

تاریخچه زمانی فشار شوک در نزدیکترین نقطه سطح لوله به محل انفجار یعنی مرکز سطح لوله با استفاده از همان روابط تجربی مربوط به P_m و $P(t)$ اعمال می شود. در شکل (۸) برای نمونه، تاریخچه زمانی فشار شوک مربوط به TNT 100 kg در فاصله ۸ و ۲۰ متری رسم شده است:



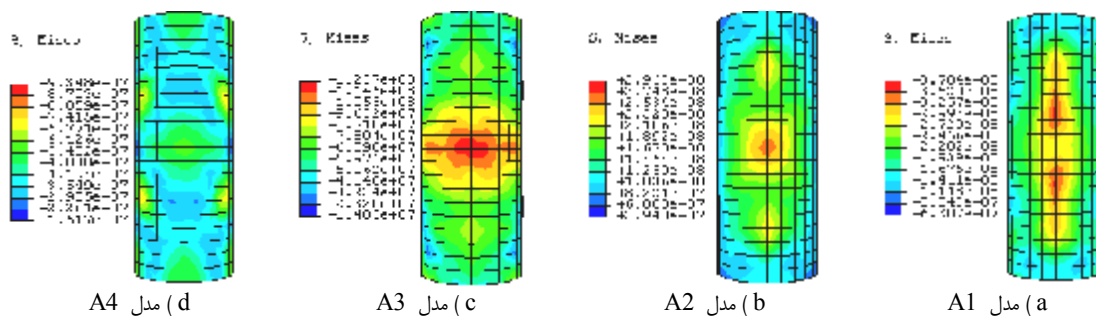
شکل ۸ : تاریخچه زمانی فشار شوک برای 100 kg TNT در فواصل ۸ و ۲۰ متری.

باید توجه شود که در زمان صفر مقدار فشار نیز صفر فرض می شود زیرا همان طور که گفته شد مدت زمانی در حدود 10^{-7} s از لحظه انفجار طول می کشد تا موج شوک به نقطه مورد نظر برسد. لوله از جنس فولاد پر مقاومت ST 52 که تنش تسلیم برابر 385 MPa دارد، در نظر گرفته می شود. لوله با ۲۴۰۰ المان ۴ گرهی S4R با بُد حدود 0.1 m و محیط سیال با ۳۳۸۰۰ المان AC3D8R و با بُد حدود 0.2 m مش بندی می شوند. سطح مشترک سازه و سیال مانند مسائل قبل با همان ویژگی ذکر شده به هم بسته می شوند. چون این لوله ها در حقیقت بخشی

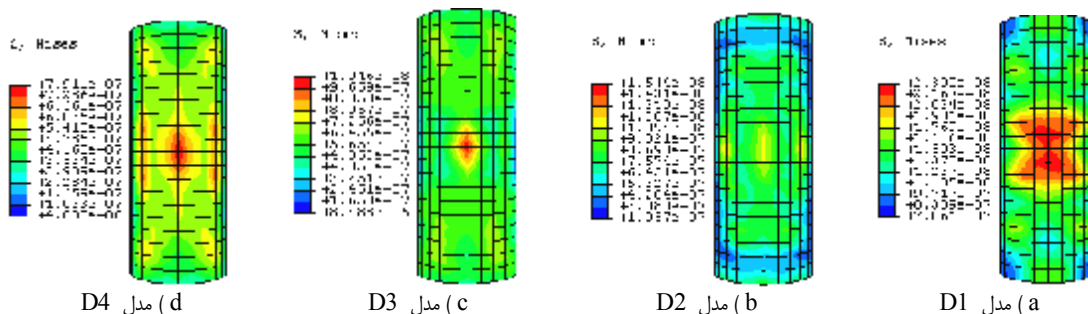
در شکل های (۱۱) تا (۱۴)، نمودار تغییر مکان نقطه وسط لوله و رو به روی انفجار در راستای انتشار موج شوک (که عمده تغییر مکان در همین جهت است) در فواصل مختلف از ماده منفجره برای ضخامت های مختلف لوله (t1 تا 2.5) با هم مقایسه شده اند. همان طور که انتظار می رود با افزایش ضخامت تغییر مکان کاهش می یابد. همچنین از این نمودارها می توان دریافت که در هر فاصله از محل انفجار تغییر مکان مربوط به ضخامت 1 cm (t1) حدود 30 درصد کمتر از تغییر مکان مربوط به ضخامت 2.5 cm (2.5) است و برای ضخامت های میانی نیز این تغییر مکان به طور یکنواخت و مساوی تغییر می کند.

(ضخامت 1 cm) و D (ضخامت 2.5 cm) در پایان زمان آنالیز (0.002 s) و برای دو متر میانه و رو به روی انفجار لوله ها نشان داده شده است.

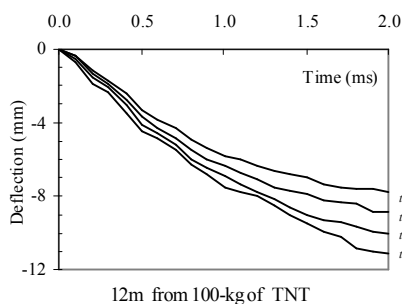
در بعضی موارد از شکل های (۹) و (۱۰) مشخص است که تنش در برخی نقاط اطراف مرکز لوله بیشتر از خود مرکز است، دلیل این موضوع می تواند انتشار کروی موج شوک و محاسبه تاریخچه فشار با تأخیر مکانی و زمانی نسبت به نقطه وسط لوله که نزدیکترین نقطه سطح لوله به محل انفجار است باشد که باعث می شود در زمان مثلاً 0.002 s چنین توزیع تنشی روی سطح لوله شاهد باشیم.



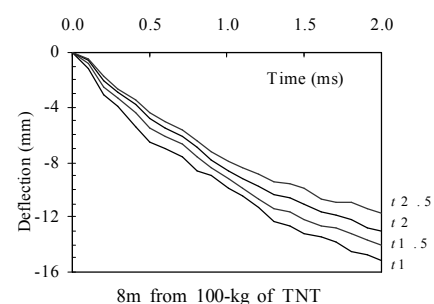
شکل ۹: تنش فون میسز در زمان 0.002 s برای لوله های با ضخامت 1 cm در محدوده دو متر میانی لوله و روبروی انفجار.



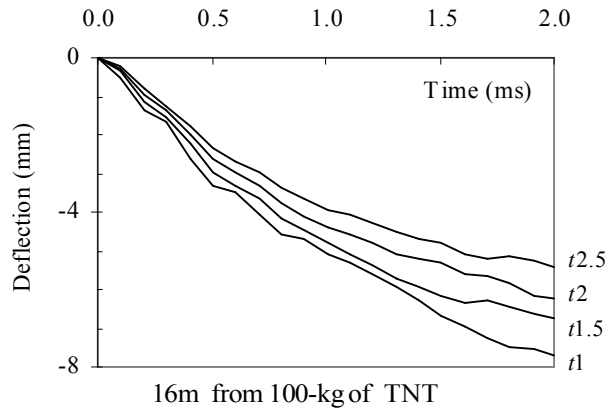
شکل ۱۰: تنش فون میسز در زمان 0.002 s برای لوله های با ضخامت 2.5 cm در محدوده دو متر میانی لوله و روبروی انفجار.



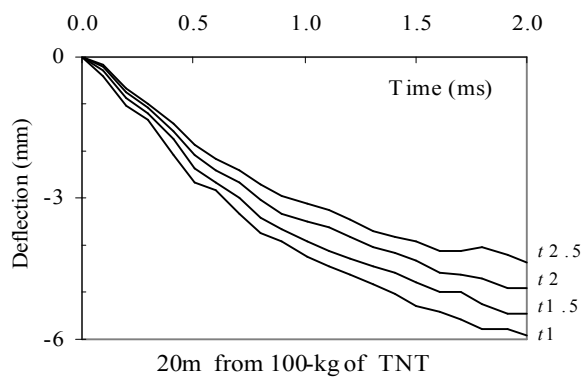
شکل ۱۱: نمودار تغییر مکان برای انفجار در فاصله ۱۲ متری.



شکل ۱۲: نمودار تغییر مکان برای انفجار در فاصله ۸ متری.



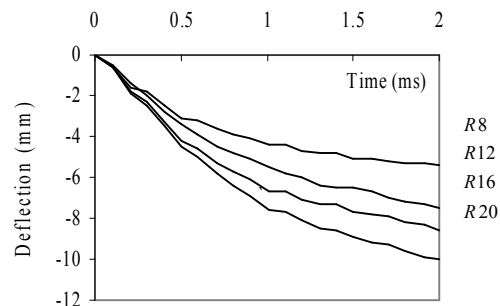
شکل ۱۳: نمودار تغییر مکان برای انفجار در فاصله ۱۶ متری.



شکل ۱۴: نمودار تغییر مکان برای انفجار در فاصله ۲۰ متری.

در شکل (۱۵) نیز سری دوم مدل های A تا A5 بررسی شده‌اند. در این شکل نمودار تغییر مکان نقطه وسط لوله و رو به روی انفجار برای لوله با ضخامت 1 cm برای حالت‌های مختلف انفجار که همگی R/a_0 برابر 60 دارند را نشان می‌دهد. در این جا اختلاف حداکثر و حداقل تغییر مکان (در زمان 0.002 s) حدود 45 درصد است.

در این مقاله، شبیه سازی عددی مسائل انفجار زیر آب در مجاور سازه های مغروق انجام شده و با روابط تحلیلی و تجربی موجود مقایسه شده است. نزدیکی نتایج با مشاهدات تجربی در مسائل به نسبت ساده، نشان گر دقت کافی مدل عددی برای تحلیل مسائل پیچیده انفجار زیر آب بر سازه های مختلف است. برای لوله های مغروق اگر آنها را معادل صفحه دایروی با قطر یک پنجم قطر لوله



شکل ۱۵: نمودار تغییر مکان برای حالات انفجار با $R/a_0 = 60$.

در این نمودار مشاهده می شود که با وجود اینکه فشار پیک برای حالات مختلف انفجار مساوی است

العمل سازه بزرگتر خواهد شد، زیرا نرخ کاهش فشار کاهش یافته و میزان ضربه و یا به عبارتی سطح زیر منحنی فشار - زمان افزایش می‌یابد. البته بدیهی است که این نتیجه به معنی رابطه مستقیم عکس العمل سازه با فاصله از محل انفجار نیست.

و صفحه مستطیلی با عرض یک پنجم قطر لوله و طول 1.2 برابر عرض بگیریم، پیش بینی Nurick نتایج به نسبت نزدیکی با نتایج عددی دارد. نتیجه حاصله دیگر این است که در شرایط ثابت بودن فشار پیک در فواصل مختلف هر چه فاصله محل انفجار تا سازه افزایش یابد (که همراه با افزایش شعاع ماده منفجره نیز خواهد بود) عکس

جدول ۱: مشخصات و نتایج مدل‌ها با ضخامت‌های مختلف.

Model	Change weight (kg)	Distance between charge and pipe (m)	Max. Von-Mises stress (Numerical) (MPa)	Max. Von-Mises stress (from Eq. (26)) (circular plate)	Max. Von-Mises stress (from Eq. (27)) (rectangular plate)	Max. deflection (Numerical) (mm)	Nurick prediction (Eq. (20)) (mm)	Rajendran prediction (Eq. (24)) (mm)	Jones prediction (Eq. (25)) (mm)	Nurick prediction (Eq. (28)) (mm)	Rajendran prediction (Eq. (30)) (mm)	Jones prediction (Eq. (31)) (mm)
t = 1 cm	A1	8	400.10	302.20	335.96	18.39	18.08	15.87	30.44	19.23	29.91	23.55
	A2	12	333.08	194.70	215.75	10.29	13.28	9.75	21.21	13.40	23.07	14.53
	A3	16	254.92	142.12	157.48	7.72	10.79	6.58	16.41	10.38	19.51	10.05
	A4	20	200.05	111.31	123.33	5.91	9.25	4.62	13.45	8.51	17.32	7.43
	A5	8	270.44	134.67	149.22	5.43	7.06	1.83	9.24	5.84	14.19	4.03
	A6	12	256.10	146.45	162.27	7.53	9.46	4.89	13.86	8.76	17.62	7.78
	A7	16	276.00	153.76	170.38	8.63	11.86	7.95	18.48	11.68	21.05	11.95
	A8	20	287.23	158.84	176.00	10.04	14.27	11.01	23.10	14.60	24.47	16.35
t = 1.5 cm	B1	8	385.61	279.41	309.60	14.08	13.87	6.83	20.12	12.72	26.02	11.03
	B2	12	292.89	180.14	199.60	10.02	10.69	2.79	14.02	8.87	21.50	6.12
	B3	16	218.1	131.86	146.10	6.71	9.03	0.70	10.85	6.87	19.15	3.91
	B4	20	170.79	103.48	114.66	5.45	8.03	-0.60	8.89	5.63	17.70	2.73
	C1	8	369.3	260.60	288.76	13.06	12.37	1.26	15.03	9.51	26.01	5.57
	C2	12	256.9	168.55	186.76	8.89	10.00	-1.76	10.47	6.63	22.63	2.88
	C3	16	188.71	123.65	137.01	6.24	8.77	-3.32	8.10	5.14	20.88	1.77
	C4	20	147.61	97.21	107.71	4.90	8.01	-4.29	6.64	4.21	19.79	1.21
t = 2 cm	D1	8	338.46	245.78	272.34	11.74	11.95	-2.76	12.11	7.67	27.43	3.13
	D2	12	228.17	159.38	176.60	7.78	10.04	-5.19	8.44	5.36	24.70	1.57
	D3	16	167.39	117.13	129.78	5.45	9.05	-4.45	6.53	4.15	23.29	0.95
	D4	20	130.83	92.20	102.16	4.38	8.44	-7.23	5.35	3.41	22.41	0.64

مراجع

- 1 - Cole, R. H. (1948). *Underwater explosions*. NJ, USA, Princeton University Press.
- 2 - Smith, P. D. and Hetherington, J. G. (1994). *Blast and ballistic loading of structures*. Butterworth-Heinemann.
- 3 - Chung, M. and Brett, J. (1997). "Assessment of underwater blast effects on scaled, submerged cylindrical objects." DSTO, Aeronautical and Maritime Research Laboratory.
- 4 - Huang, H. and Wang, Y. F. (1970). "Transient interactions of spherical acoustic waves and a cylindrical elastic shell." *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 48, No.1, PP. 228-235.
- 5 - Huang, H. and Wang, Y. F. (1971). "Early-time interaction of spherical acoustic waves and a cylindrical elastic shell." *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 50, No.3, PP. 885-891.
- 6 - Geers, T. L. and Hunter, K. S. (2002). "An integrated wave-effects model for an underwater explosion bubble." *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 111, No.4, PP. 1584-1601.
- 7 - Nurick, G.N. and Martin, J. B. (1989). "Deformation of thin plates subjected to impulsive loading-a review, Part I : theoretical consideration." *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 8, No.2, PP.159-170.
- 8 - Nurick, G. N. and Martin, J. B. (1989). "Deformation of thin plates subjected to impulsive loading-a review, Part II : experimental studies." *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 8, No.2, PP.171-186.
- 9 - Teeling-Smith, R.G. and Nurick, G. N. (1991). "Deformation and rupture of blast loaded circular plates-predictions and experiments." *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 11, No.1, PP.77-91.
- 10 - Rajendran, R. and Narasimhan, K. (2006). "Deformation and fracture behaviour of plate specimens subjected to underwater explosion-a review." *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, PP.1945-1963.
- 11 - Rajendran, R. and Narasimhan, K. (2001). "Linear elastic shock response of plane plates subjected to underwater explosion." *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 25, PP. 493-506.
- 12 - Bangash, R.Y. H. (1993). *Impact and Explosion*. Oxford, Blackwell scientific publications.
- 13 - Lam, K.Y., Zong, Z. and Wang, Q. X. (2003). "Dynamic response of a laminated pipeline on the seabed subjected to underwater shock." *Composites Part B*, Vol. 34, PP. 59-66.
- 14 - Zong, Z., Lam, K.Y. (2000). "The flexural response of a submarine pipeline to an underwater explosion bubble." *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 122, PP. 194-199.
- 15 - *ABAQUS User's Manual*. (2003). Ver. 6.4.
- 16 - Rajendran, R. and Narasimhan, K. (2001). "Performance evaluation of HSLA steel subjected to underwater explosion." *ASM, Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 10, PP. 66-74.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- | | |
|--------------------------------------|--|
| 1- Explosion | 2- High explosive |
| 3- Pressure pulse | 4- Shock wave |
| 5- Bubble pulse | 6- Cavitation |
| 7- Peak pressure | 8- Coupled acoustic-structural medium analysis |
| 9- Compressible | 10- Volumetric drag |
| 11- Inviscid | 12- Bulk modulus |
| 13- Radiating acoustic boundary | 14- Transient analysis |
| 15- Weak form | 16- Traction |
| 17- Mass proportional damping factor | 18- Discretize |
| 19- Strain interpolator | 20- Explicit dynamic integration |
| 21- Nonreflecting | 22- Impulse |
| 23- Von-Mises | 24- Inverse mass number |