

# بررسی تأثیر حباب ناشی از انفجار زیر آب بر سازه کشتی

سید علی محمد میر جلیلی<sup>۱\*</sup>، علی اکبر کریمی<sup>۲</sup>، سعید هادی<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه امام حسین (ع)

۲- استادیار گروه مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه امام حسین (ع)

۳- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه امام حسین (ع)

\* تهران، صندوق پستی ۱۸۷-۱۶۵۳۵

S\_A\_M\_mirjalili@yahoo.com

(دریافت مقاله: آذر ۱۳۸۲، پذیرش مقاله: تیر ۱۳۸۴)

**چکیده-** در این تحقیق نوسانات حباب ناشی از انفجار زیر آب و تأثیر آن بر سازه کشتی مطالعه شده است. با شبیه‌سازی ریاضی، به دست آوردن معادلات حاکم و حل آنها، زمینه لازم برای تعیین میزان این تأثیر فراهم می‌شود. مدل ریاضی که در اینجا ارائه می‌شود، فیزیک حاکم بر تأثیر نوسانات حباب ناشی از انفجار زیر آب بر بدنه کشتی را نشان می‌دهد. حل این مدل که به کمک ترکیبی از روش‌های عددی اولر، روش صریح پنج گامی آدامز- بشفورث و روش ضمنی چهار گامی آدامز- مولتون انجام می‌شود، بیان‌کننده پاسخ سازه کشتی به نوسانات حباب است. به منظور تأیید روش حل، نمودار کرنش- زمان به دست آمده از تحلیل، با مقادیر تجربی موجود مقایسه شده است. همچنین نتایج این تحلیل با تحلیل به روش اجزای محدود - که به وسیله نرم‌افزار انسیس<sup>۱</sup> انجام می‌شود و در آن سازه شناور کشتی به صورت تیر دو سر آزاد با جرم و سختی غیریکنواخت و به کمک المانهای تیر، تجهیزات داخلی با المانهای جرم و شناوری با المانهای فنر مدل‌سازی شده - مقایسه می‌شود. در ادامه تأثیر پارامترهای عمق محل انفجار و جرم ماده منفجره روی میزان تنش ایجاد شده در کشتی بررسی می‌شود که نشان می‌دهد با افزایش عمق، میزان تنش کاهش می‌یابد و با افزایش جرم، میزان تنش افزایش می‌یابد.

**کلید واژگان:** انفجار زیر آب، حباب، کشتی، اجزای محدود.

## ۱- مقدمه

سازه کشتی است. حباب متناسب با اندازه خود و اندازه سازه مورد برخورد، آثار متفاوت و مختلفی بر سازه‌ها بر جای می‌گذارد. اندازه حباب از حد میکرون تا چند ده متر متغیر است، لذا اثر تخریبی آن نیز طیف گسترده‌ای را شامل می‌شود. به طور کلی تأثیر حباب بر سازه را می‌توان به سه دسته مهم تقسیم کرد که عبارتند از [۱]:

رفتار حباب در شرایط و محیط‌های مختلف یکی از پدیده‌های جالب طبیعی است که در عین حال اثر آن بر محیط اطراف مهم و قابل توجه است. عوامل مختلفی باعث به وجود آمدن حباب می‌شود. از آن جمله می‌توان به انفجار زیر آب اشاره کرد که محور این تحقیق نیز بررسی تأثیر نوسانات حباب ناشی از انفجار زیر آب بر

1. ANSYS

اضمحلال حباب رینگی نزدیک دیوار صلب توسط ژناکس<sup>6</sup> (۱۹۸۴) [۶]، شبیه‌سازی برخورد سازه و سیال در دینامیک حباب به‌وسیله کوپل نرم‌افزارهای سازه‌ای و سیالاتی توسط کلومک<sup>7</sup> (۱۹۹۳) [۷]، بررسی عددی برخورد حباب با سازه کروی زیر آب توسط می‌لیگان<sup>8</sup> (۱۹۹۴) [۱]، بررسی رفتار حباب نزدیک دیوار انعطاف‌ناپذیر توسط دانکن<sup>9</sup> (۱۹۹۴) [۸]، و تحلیل برخورد حباب با سازه‌های حلقوی توسط چاین<sup>10</sup> (۱۹۹۸) [۹] اشاره کرد.

در این مقاله به تحلیل و شبیه‌سازی تأثیر نوسانات حباب ناشی از انفجار زیر آب، بر سازه کشتی می‌پردازیم. بخش دوم مقاله چگونگی مدل‌سازی این فرآیند و بخش سوم، حل مدل به‌دست آمده را ارائه می‌کند.

## ۲- مبانی مدل‌سازی ریاضی

مدل ریاضی که در اینجا ارائه می‌شود فیزیک حاکم بر تأثیر نوسانات حباب ناشی از انفجار زیر آب بر سازه کشتی را نشان می‌دهد. به منظور دستیابی به این مدل و به علت پیچیدگی‌های موجود در فرآیند تأثیر حباب روی کشتی، این فرآیند به چند بخش تقسیم می‌شود. پس از به‌دست آوردن معادلات حاکم بر هر بخش، این معادلات ترکیب شده و معادله نهایی - که بیان‌کننده مدل ریاضی مورد نظر است - به‌دست می‌آید. در ادامه به حل این مدل و تعیین رفتار کشتی در این فرآیند می‌پردازیم.

### ۲-۱- مدل بدنه کشتی

بدنه کشتی مانند یک تیر توخالی غیر یکنواخت رفتار می‌کند و لذا معمولاً برای مدل‌سازی بدنه کشتی، از مدل تیر ساده - که بیان‌کننده خواص فیزیکی و الاستیک بدنه کشتی است - استفاده می‌شود [۱۱، ۱۲]. در تحلیل تنش

۱- تخریب‌های نقطه‌ای ناشی از حبابهایی در حد میکرون؛  
۲- تحریک موده‌های ارتعاشی سازه در اثر نوسانات حباب [۲]؛

۳- تخریب کلی سازه تحت تأثیر حبابهای بسیار بزرگ.  
حباب پس از تولید به‌سرعت منبسط می‌شود. به‌دلیل زیاد شدن حجم کره، فشار داخل کره کاهش می‌یابد و به‌دلیل اینرسی حرکتی در آب، فشار داخلی از فشار تعادل کمتر می‌شود و در نهایت، انبساط حباب متوقف شده و کره دوباره منقبض می‌شود. این روند و حرکت نوسانی در محدوده قطر تعادلی ادامه می‌یابد. به دلیل نیروی شناوری موجود، حباب به سمت بالا و سطح آب حرکت می‌کند. محققان مختلفی به بررسی حباب و معادلات حاکم بر آن پرداخته‌اند که در ادامه به بخشی از آن اشاره می‌شود.

بنابر گفته یانگ<sup>1</sup> (۱۹۸۹)، نیوتن اولین فردی بود که در سال ۱۷۰۴ تولید و ایجاد حباب را مطالعه کرد. بیسانت<sup>2</sup> (۱۸۵۹) اولین کسی بود که رفتار حباب را به صورت تحلیلی بررسی کرد. رایلی<sup>3</sup> (۱۹۱۷) به منظور به‌دست آوردن معادلات حرکت، از اصل بقای انرژی استفاده کرد، معادله‌ای که او به‌دست آورد، پایه بسیاری از تحقیقات در این زمینه است [۳]. پلیسیت<sup>4</sup> (۱۹۴۹) رابطه‌ای را مطرح کرد که معادله اصلی و پایه‌ای دینامیک حباب است [۴]. تحقیقات انجام شده در باره حباب، تاریخچه‌ای نسبتاً طولانی (بیش از ۲۰۰ سال) دارد، اما کارهای عددی در این زمینه نسبتاً جدید است. اولین کارها به پلیسیت (۱۹۷۱) نسبت داده می‌شود که به بررسی انبساط حباب نزدیک سطح و مرز صلب با استفاده از روش تفاضل محدود پرداخت [۳]. پس از آن محققان متعددی به بررسی تأثیر متقابل محیط اطراف و حباب پرداختند که از آن میان می‌توان به بررسی اضمحلال حباب غیر کروی نزدیک دیوار صلب توسط بوویز<sup>5</sup> (۱۹۸۰) [۵]، بررسی

6. Genoux  
7. Kalumuck  
8. Miligan k  
9. Duncan  
10. Chahine

1. Young  
2. Besant  
3. Rayleigh  
4. Plesst  
5. Bovis

$$\begin{bmatrix} F \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B^T & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

زیرماتریس‌های A, B, C به خواص الاستیک تیر بدنه کشتی وابسته بوده و مولفه‌های آنها از روابط زیر به دست می‌آیند [۱۲]:

$$\begin{aligned} a_{i,i-1} &= -\phi \alpha_{i-1} \\ a_{i,i} &= \phi(\alpha_{i-1} + \alpha_i) \\ a_{i,i+1} &= -\phi \alpha_i \\ b_{i,i-1} &= -\alpha_i l \\ b_{i,i} &= -\alpha_i l + \alpha_{i+1} l \\ b_{i,i+1} &= \alpha_i l \\ c_{i,i-1} &= \alpha_{i-1} l^3 (1 - \epsilon_{i-1}) \\ c_{i,i} &= \alpha_{i-1} l^3 (\epsilon_{i-1} + \epsilon_i) + \alpha_i l^3 (\epsilon_i + \epsilon_{i+1}) \\ c_{i,i+1} &= \alpha_i l^3 (1 - \epsilon_i) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\epsilon = \frac{12(1+\nu)I_i}{A_s l^3}$$

$$\alpha_i = \frac{2EI_i}{l^3 (1 + 2\epsilon_i)}$$

$\alpha_n$  و  $\alpha_0$  صفر تعریف می‌شوند.

در این مسأله ممان M در خلال حرکت وجود دارد، اما در عمل مشاهده می‌شود که تأثیر آن در نتایج کم است [۱۲]، لذا:

$$M=0$$

در نتیجه داریم:

$$F = [A - BC^{-1}B^T] y \quad (5)$$

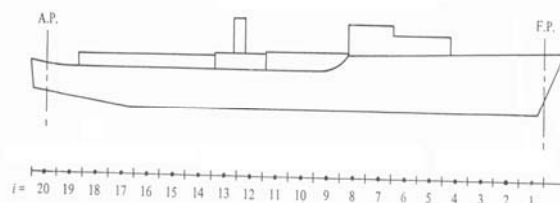
$$\theta = -C^{-1}B^T y \quad (6)$$

در این رابطه F کلیه نیروهای خارجی وارد بر بدنه کشتی است که در ادامه به بررسی آنها می‌پردازیم.

## ۲-۲- فرضیات هیدرودینامیک کشتی و حباب

مبنای بررسی هیدرودینامیک بدنه کشتی، روش نواری<sup>۱</sup> است که در آن بدنه سه‌بعدی کشتی به وسیله تعداد زیادی مقاطع دوبعدی [۱۷] (نوارهای عرضی) مدل شده و ضرایب هیدرودینامیکی کشتی با استفاده از تحلیل دوبعدی محاسبه و مقادیر به دست آمده از این تحلیل در

مقطع بدنه نیز، نظریه تیر ساده به کار گرفته می‌شود [۱۰-۱۲، ۱۶]. در تحلیل این مسأله نیز بدنه کشتی با تیری با سختی غیریکنواخت مدل‌سازی می‌شود. پس از آن، این تیر به بیست قسمت (المان) با سختی متفاوت تقسیم و جرم هر قسمت در وسط آن قرار می‌گیرد. (شکل ۱).



شکل ۱ تبدیل کشتی به بیست المان

در بررسی این مسأله از روابط حاکم بر تیر الاستیک دوبعدی استفاده می‌شود که برای آن داریم [۳]:

$$\begin{bmatrix} F_Y \\ M_Z \\ F_Y \\ M_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{l^3(1+\phi)} & \frac{6EI}{l^2(1+\phi)} & -\frac{12EI}{l^3(1+\phi)} & \frac{6EI}{l^2(1+\phi)} \\ \frac{6EI}{l^2(1+\phi)} & \frac{(4+\phi)EI}{l(1+\phi)} & -\frac{6EI}{l^2(1+\phi)} & \frac{(2-\phi)EI}{l(1+\phi)} \\ -\frac{12EI}{l^3(1+\phi)} & -\frac{6EI}{l^2(1+\phi)} & \frac{12EI}{l^3(1+\phi)} & -\frac{6EI}{l^2(1+\phi)} \\ \frac{6EI}{l^2(1+\phi)} & \frac{(2-\phi)EI}{l(1+\phi)} & -\frac{6EI}{l^2(1+\phi)} & \frac{(4+\phi)EI}{l(1+\phi)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ \theta \\ Y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{12EI}{GA_s l^2}$$

در این رابطه:

با تعویض ستونهای ۲ و ۳ و سطرهای ۲ و ۳، معادله تعادل به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} F_Y \\ F_Y \\ M_Z \\ M_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{l^3(1+\phi)} & \frac{12EI}{l^3(1+\phi)} & \frac{6EI}{l^2(1+\phi)} & \frac{6EI}{l^2(1+\phi)} \\ \frac{12EI}{l^3(1+\phi)} & \frac{12EI}{l^3(1+\phi)} & -\frac{6EI}{l^2(1+\phi)} & -\frac{6EI}{l^2(1+\phi)} \\ \frac{6EI}{l^2(1+\phi)} & \frac{6EI}{l^2(1+\phi)} & \frac{(4+\phi)EI}{l(1+\phi)} & \frac{(2-\phi)EI}{l(1+\phi)} \\ \frac{6EI}{l^2(1+\phi)} & \frac{6EI}{l^2(1+\phi)} & -\frac{(2-\phi)EI}{l(1+\phi)} & \frac{(4+\phi)EI}{l(1+\phi)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

که این رابطه را به صورت زیر می‌توان نوشت.

$$m_w = \frac{1}{\gamma} C_V J r \omega \pi b^2 \quad (9)$$

که  $C_V$  به شکل سطح مقطع و نسبت  $\frac{2b}{D}$  بستگی دارد. زمانی که جریان اطراف کشتی واقعاً سه‌بعدی در نظر گرفته شود، جرم و وزن اضافه کمتر از مقدار محاسبه شده آن به وسیله فرضیه دوبعدی است. برای بیان نسبت جرم اضافه در این دو حالت،  $J$  به صورت زیر تعریف شده است [۱۱]:

$$J = \frac{U_{rD}}{U_{\infty D}} \quad (10)$$

که  $U_{rD}$  انرژی جنبشی سیال احاطه کننده در حرکت سه‌بعدی و  $U_{\infty D}$  انرژی جنبشی سیال احاطه کننده در حرکت دو بعدی است. با توجه به اطلاعات موجود برای کشتی و با استفاده از نمودارهای موجود در کتب مرجع،  $C_V$  و  $J$  را برای هر مقطع کشتی می‌توان محاسبه کرد.

#### ۲-۴- معادلات هیدرودینامیک حباب

به منظور به دست آوردن معادلات حاکم بر رفتار حباب، اگر جریان شعاعی در نظر گرفته شود، معادلات پیوستگی و حرکت برای آب به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial r} + \rho \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\rho u}{r} = 0 \quad (11)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial P}{\partial r} = 0$$

با توجه به ثابت فرض کردن چگالی و تغییرات ناچیز آن، از معادله (۱۱) داریم:

$$\frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{\rho u}{r} \quad (12)$$

با انتگرال‌گیری از این معادله داریم:

$$u(r, t) = \frac{u_1(t)}{r^2} \quad (13)$$

با جایگذاری معادله (۱۳) در (۱۱) داریم:

$$\frac{1}{r^2} \rho \frac{du_1}{dt} + \frac{1}{r} \rho \frac{\partial u_1}{\partial r} + \frac{\partial P}{\partial r} = 0 \quad (14)$$

با انتگرال‌گیری بر کره گازی که در آن برای

$$P = P_a, r = a$$

معادلات حرکت جایگزین می‌شوند. فرضیات حاکم در روش نواری عبارتند از: ۱- بدنه کشتی باریک است. ۲- در محاسبه ضرایب هیدرودینامیک فرض بر آن است که بدنه کشتی صلب بوده و تغییر شکل در آن رخ نمی‌دهد. ۳- سرعت کشتی در حد معمول بوده و نیروی بالابرنده قابل صرف‌نظر کردن است. ۴- حرکتها دارای دامنه‌های کوچکی هستند. ۵- هر یک از مقاطع کشتی دارای کنارهای عمودی هستند [۱۷].

فرضیات حاکم بر هیدرودینامیک حباب عبارتند از:

۱- نوسان در عمق ثابت و بدون حرکت انتقالی به سمت بالا انجام می‌شود. ۲- جریان اطراف حباب تراکم ناپذیر فرض می‌شود. ۳- در یک فاصله نامحدودی از حباب در هر جهتی، فشار مقدار مشابهی دارد. ۴- قانون گاز ایدئال بر محصولات گازی حاصل از انفجار حاکم است [۱۲، ۱۴].

#### ۲-۳- هیدرودینامیک بدنه کشتی

به منظور به دست آوردن روابط حاکم و همچنین اعمال شرایط مورد نظر در این مسأله، فقط حرکت قائم کشتی و در جهت  $Y$  را در نظر گرفته و از استهلاک و ضرایب مربوطه صرف‌نظر می‌کنم. نیروی اعمال شده به هر المان کشتی با حرکت ارتعاشی، از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۷].

$$F = -(m + m_w) \ddot{y} - ky \quad (7)$$

در این معادله،  $m_w$  ضریب جرم اضافی هیدرودینامیکی و  $k$  ضریب هیدرواستاتیک است. ضرایب هیدرواستاتیک یا سختی  $k$  در معادلات روش نواری، تابعی از تغییرات نیروی شناوری بر اثر جابجایی دائمی هر یک از نوارها می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۱].

$$k = \rho g b \quad (8)$$

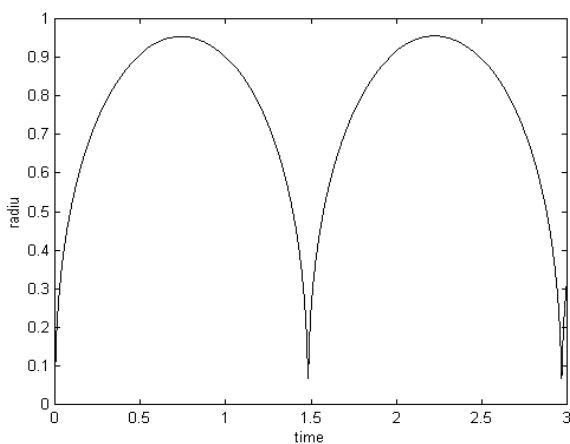
برای مقطع مشخص، وزن اضافه شده واحد طول برای ارتعاش عمودی از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۱].

معادله (۱۹) از مرتبه ۲ است و برای حل آن ابتدا باید به دو معادله از مرتبه یک تبدیل شود به این منظور معادله حباب را به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$\dot{a} = R$$

$$\dot{R} = \frac{3}{2} \left[ (\gamma - 1)na^{-(\gamma+1)} - \frac{(1+R^2)}{a} \right] \quad (22)$$

حل عددی این دو معادله با توجه به شرایط اولیه و استفاده از امکانات نرم‌افزار متلب و به روش رانگ‌کوتا امکان‌پذیر است، که نتیجه آن به صورت نمودار نوسانی حباب در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲ نمودار تغییرات شعاع- زمان حباب

نوسان حباب باعث ایجاد شتاب در سیال می‌شود که این شتاب در فاصله  $r$  از مرکز حباب از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۲].

$$\ddot{u} = \frac{cd}{r^3} (\ddot{a}^3), \quad c = 15.77W^{1/2}Z_0^{1/2} \quad (23)$$

در این رابطه  $\ddot{a}^3$  تابعی از نوسانات حباب است. پس از حل معادله حباب و تعیین مقادیر  $\dot{a}$ ،  $a$  می‌توان  $\ddot{a}^3$  را از رابطه (۲۴) به دست آورد و با جایگذاری در رابطه (۲۳)، شتاب را در فاصله  $r$  از مرکز حباب تعیین نمود:

$$\ddot{a}^3 = \frac{9}{\gamma} a \left[ (\gamma - 1)na^{-\gamma} - (1 + R^2) \right] + 6aR^2 \quad (24)$$

$$u = \dot{r} \left. \begin{matrix} u_a = \frac{dr}{dt} \Big|_{r=a} = \frac{da}{dt} \\ r = a \end{matrix} \right\} u_1 = a^\gamma \frac{da}{dt} \quad (15)$$

$$u(r, t) = \frac{u_1}{r^\gamma} \rightarrow u(a, t) = \frac{u_1}{a^\gamma}$$

و برای یک فاصله نامحدودی که  $u = 0, P = P_0$  است، داریم:

$$\frac{\rho}{a} \cdot \frac{d}{dt} \left( a^\gamma \frac{da}{dt} \right) - \frac{1}{2} \rho \cdot \left( \frac{da}{dt} \right)^2 - (P_a - P) = 0 \quad (16)$$

با انتگرال‌گیری نسبت به زمان از این معادله، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{1}{2} \rho \cdot a^\gamma \left( \frac{da}{dt} \right)^2 + \frac{1}{3} P \cdot a^\gamma - \int P \cdot a^\gamma da = C' \quad (17)$$

که  $C'$  ثابت انتگرال‌گیری است. با اعمال ضریب  $4\pi$ ، انتگرال‌گیری روی  $a$ ، مقدار کار انجام شده به وسیله فشار  $P_a$  در خلال انبساط کره و رسیدن به شعاع  $a(t)$  را بیان می‌کند از طرفی انتگرال باید با کاهش در انرژی داخلی گاز به  $E(a)$  معادل باشد. با فرض کردن این مقدار اولیه به عنوان ثابت انتگرال‌گیری جدید  $y$  و مرتب کردن معادله فوق داریم:

$$\frac{3}{2} \left( \frac{4\pi}{3} \rho \cdot a^\gamma \right) \left( \frac{da}{dt} \right)^2 + \frac{4\pi}{3} P \cdot a^\gamma + E(a) = y \quad (18)$$

اولین جمله، حاصل انتگرال روی مرز خارجی و جمله دوم، کار انجام شده در مقابل فشار هیدرواستاتیک است. معادله (۱۸) بیان‌کننده رفتار دینامیکی و نوسانی حباب در عمق ثابت است که فرم بدون بعد آن به صورت زیر است [۱۴]:

$$a^\gamma \left( \frac{da}{dt} \right)^2 + a^\gamma + na^{-(\gamma-1)} = 1 \quad (19)$$

که ثابت گاز  $\gamma = 1/25$  و مقدار نیمه تجربی  $n$  برای TNT از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۴]:

$$n = 0.0743Z_0^{(\gamma-1)} \quad (20)$$

شرایط اولیه آن عبارتند از [۱۲]:

$$a(0) \equiv n^{1/(\gamma-1)} \left[ 1 + \frac{n^{1/(\gamma-1)}}{3(\gamma-1)} \right] \quad (21)$$

$$\dot{a}(0) = 0$$

### ۲-۵- تأثیر حباب بر کشتی

همان‌طور که در بخش هیدرودینامیک کشتی بیان شد، نیروی اعمال شده به هر المان کشتی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F = -(m + m_w)\ddot{y} - ky \quad (25)$$

این رابطه بدون حضور و وجود حباب در آب است. وجود حباب و نوسانات آن باعث ایجاد شتاب  $\ddot{u}$  در سیال و تغییراتی در رابطه می‌شود. می‌دانیم که جمله جرم اضافه ( $M_w$ ) ناشی از حرکت شتابدار المان جرم است. پس از وقوع انفجار و تولید حباب، شتاب نسبی بین آب و کشتی به صورت  $(\ddot{y} - \ddot{u})$  است در نتیجه جمله اول رابطه (۲۵) به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$-m\ddot{y} - m_w(\ddot{y} - \ddot{u})$$

از طرفی لازمه وجود شتاب  $\ddot{u}$  در سیال وجود گرادیان فشار است که این گرادیان نیز بر اثر نوسانات حباب بوجود می‌آید. این گرادیان فشار باعث اعمال نیرویی با رابطه زیر بر المان جرم و کشتی می‌شود [۱۲].

$$\rho A \cdot l \ddot{u} = \bar{m} \ddot{u} \quad (26)$$

که این جمله نیز به رابطه (۲۵) اضافه می‌شود. در نتیجه کل نیروهای خارجی که به کشتی اعمال می‌شود، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F = -m\ddot{y} - m_w(\ddot{y} - \ddot{u}) + \bar{m}\ddot{u} - ky \quad (27)$$

این رابطه را در رابطه (۵) قرار می‌دهیم:

$$-ky - m\ddot{y} - m_w(\ddot{y} - \ddot{u}) + \bar{m}\ddot{u} = [A - BC^{-1}B^T]y \quad (28)$$

با دسته‌بندی آن داریم:

$$(m + m_w)\ddot{y} + [A - BC^{-1}B^T + k]y = (m_w + \bar{m})\ddot{u} \quad (29)$$

این معادله، حاکم بر فرایند تأثیر حباب بر کشتی است. این معادله بیان‌کننده پاسخ دینامیکی بدنه کشتی به عنوان یک سیستم الاستیک، تحت تأثیر نیروهای ناشی از نوسان حباب است.

### ۳- شبیه‌سازی عددی

به منظور تحلیل رفتار کشتی تحت تأثیر این بارگذاری، معادله (۲۹) باید حل شود. در ادامه با استفاده از اطلاعات هیدرودینامیکی و سازه‌ای مربوط به یک کشتی ۲۵۰۰ تنی (جدول ۱) [۱۲] و حباب ناشی از انفجار ۱۵۰ کیلوگرم TNT در عمق ۱۰ متری آب، این معادله را حل می‌کنیم. جدول ۱ حاوی پارامترهای مختلف مربوط به هر یک از المانهای کشتی است و با توجه به غیریکنواخت بودن سازه کشتی در مقاطع مختلف، اطلاعات هیدرودینامیکی و سازه‌ای مربوط به این مقاطع نیز با یکدیگر متفاوت است. معادله (۲۹) را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$M_1 \ddot{y} + Sy = G(t)$$

$$M_1 = M + M_w$$

$$S = A + k - BC^{-1}B^T \quad (30)$$

$$G(t) = (\bar{M} + M_w) \frac{15/77W^{1/3} Z_0^{1/3} d}{r^3} (\ddot{a}^3)$$

به این ترتیب با توجه به این که کشتی به وسیله ۲۰ المان مدل‌سازی شده، یک دستگاه معادلات دیفرانسیل با ۲۰ متغیر  $y_1$  تا  $y_{20}$  حاصل می‌شود که این متغیرها بیانگر جابه‌جایی المان‌های جرم، تحت تأثیر نوسان حباب است.

### ۳-۱- حل دستگاه معادلات دیفرانسیل

معادله نهایی به دست آمده معادله پیچیده‌ای است، زیرا از طرفی شامل یک دستگاه معادلات دیفرانسیل با ۲۰ معادله دیفرانسیل درجه ۲ و از طرف دیگر، سمت راست هر یک از این ۲۰ معادله، خود یک معادله دیفرانسیل نسبتاً پیچیده است که رفتار دینامیکی و نوسانی حباب را توصیف می‌کند. در طی این تحقیق و پس از رسیدن به این دستگاه معادلات، چند روش ریاضی مورد توجه قرار گرفت. در این مسیر برنامه‌های مختلفی بر اساس روشهای عددی نوشته شد.

جدول ۱ اطلاعات مربوط به المانهای مختلف کشتی ۲۵۰۰ تنی که I شماره المانهای کشتی و  $d_i$  فاصله مرکز المانها از ابتدای کشتی است

i	$d_i(m)$	m(kg)	$m_w(kg)$	$\bar{m}(Kg)$	K(N/m)	$A_0(m^2)$	$A_s(m^2)$	I(m <sup>4</sup> )
۱	۲/۶۸۴	۳۰۸۳۸	۲۷۲۱	۱۲۶۹۸	۷/۲۹۳۲e+۰۰۴	۰/۲۱۴۸۴	۷/۱۶۱۳e+۰۰۲	۲/۲۳۲۶
۲	۸/۰۵۲	۳۷۱۸۷	۱۶۳۲۶	۳۸۰۹۴	۱/۶۶۵۸e+۰۰۵	۰/۲۷۲۲۶	۷/۰۳۲۲e+۰۰۲	۲/۶۴۰۷
۳	۱۳/۴۲	۵۶۲۳۴	۴۲۶۲۹	۶۱۶۷۶	۲/۶۱۶۸e+۰۰۵	۰/۳۲۹۰۳	۶/۹۰۳۲e+۰۰۲	۳/۱۴۴۸
۴	۱۸/۷۸۸	۵۸۰۴۸	۶۹۸۳۹	۸۵۲۵۸	۳/۲۹۳۶e+۰۰۵	۰/۳۸۹۰۳	۶/۸۳۸۷e+۰۰۲	۳/۶۹۱۰
۵	۲۴/۱۵۶	۱۰۸۸۴۰	۱۰۲۴۹۱	۱۰۶۱۱۹	۳/۹۳۸۳e+۰۰۵	۰/۴۴۷۱۰	۶/۹۶۷۷e+۰۰۲	۴/۲۷۹۱
۶	۲۹/۵۲۴	۲۰۴۰۷۵	۱۳۵۱۴۳	۱۲۵۱۶۶	۴/۴۴۸۱e+۰۰۵	۰/۵۲۴۵۲	۷/۸۷۱۰e+۰۰۲	۵/۱۶۱۴
۷	۳۴/۸۹۲	۲۱۸۵۸۷	۱۶۷۸۸	۱۴۱۴۹۲	۴/۸۹۵۲e+۰۰۵	۰/۶۹۴۸۴	۱/۰۴۵۲e+۰۰۲	۶/۶۰۷۸
۸	۴۰/۲۶	۹۳۴۲۱	۱۹۷۷۲۶	۱۵۶۰۰۴	۵/۲۶۲۸e+۰۰۵	۰/۵۴۵۱۶	۸/۷۷۴۲e+۰۰۲	۴/۱۵۳۱
۹	۴۵/۶۲۸	۱۴۰۵۸۵	۲۱۶۷۷۳	۱۶۶۸۸۸	۵/۴۴۰۷e+۰۰۵	۰/۵۵۴۸۴	۸/۷۷۴۲e+۰۰۲	۴/۲۹۷۱
۱۰	۵۰/۹۹۶	۱۲۳۳۵۲	۲۲۴۹۳۶	۱۷۵۰۵۱	۵/۴۹۳۲e+۰۰۵	۰/۵۶۴۵۱	۸/۸۳۸۷e+۰۰۲	۴/۳۹۳۲
۱۱	۵۶/۳۶۴	۱۴۳۳۰۶	۲۳۰۳۷۸	۱۶۷۷۹۵	۵/۵۱۹۵e+۰۰۵	۰/۵۶۴۵۱	۸/۹۰۳۲e+۰۰۲	۴/۳۶۹۲
۱۲	۶۱/۷۳۲	۱۷۳۳۳۷	۲۲۸۵۶۴	۱۶۷۷۹۵	۵/۵۱۳۶e+۰۰۵	۰/۵۵۶۷۷	۸/۹۰۳۲e+۰۰۲	۴/۲۹۷۱
۱۳	۶۷/۱	۱۱۵۱۸۹	۲۱۴۹۵۹	۱۶۴۱۶۷	۵/۴۵۳۴e+۰۰۵	۰/۵۴۲۵۸	۸/۷۷۴۲e+۰۰۲	۴/۱۰۵۱
۱۴	۷۲/۴۶۸	۱۲۴۲۵۹	۲۰۰۴۴۷	۱۵۶۹۱۱	۵/۳۶۱۹e+۰۰۵	۰/۵۰۵۱۶	۸/۳۲۲۶e+۰۰۲	۳/۷۲۱۰
۱۵	۷۷/۸۳۶	۱۲۶۰۷۳	۱۸۴۱۲۱	۱۴۶۹۳۴	۵/۲۵۱۱e+۰۰۵	۰/۴۶۹۰۳	۷/۷۴۱۹e+۰۰۲	۳/۱۶۸۸
۱۶	۸۳/۲۰۴	۲۱۵۸۶۶	۱۵۹۶۳۲	۱۳۱۵۱۵	۵/۰۳۲۳e+۰۰۵	۰/۴۲۱۹۳	۶/۹۶۷۷e+۰۰۲	۲/۵۵۶۷
۱۷	۸۸/۵۷۲	۱۶۰۵۳۹	۱۳۶۹۵۷	۱۰۸۸۴۰	۴/۸۷۴۸e+۰۰۵	۰/۳۵۰۹۷	۶/۳۲۲۶e+۰۰۲	۱/۷۲۸۵
۱۸	۹۳/۹۴	۵۴۴۲۰	۱۲۴۲۵۹	۸۳۴۴۴	۴/۴۹۲۶e+۰۰۵	۰/۳۰۸۳۹	۵/۲۹۰۳e+۰۰۲	۱/۱۹۴۳
۱۹	۹۹/۳۰۸	۵۰۷۹۲	۷۸۰۰۲	۵۷۱۴۱	۳/۵۰۰۷e+۰۰۵	۰/۲۷۰۹۷	۴/۳۲۲۶e+۰۰۲	۷/۲۰۱۹
۲۰	۱۰۴/۶۷	۴۸۹۷۸	۵۴۴۲۰	۳۱۷۴۵	۲/۸۸۸۱e+۰۰۵			

بهتر» برای تعیین مقادیر اولیه مورد نیاز برای روشهای چندگامی استفاده می‌شود. بعد از تعیین مقادیر اولیه، از روش صریح پنج‌گامی آدامز- بشفورث برای حل معادله و تعیین مقادیر  $y$  ها و از روش ضمنی چهارگامی آدامز-مولتون برای اصلاح این مقادیر محاسبه شده، استفاده می‌شود. در حل این معادله مدت زمان ۳ ثانیه به ۵۰۰۰ گام زمانی تقسیم شده و دستگاه معادلات ۵ هزار بار حل شده که حاصل آن ماتریس  $20 \times 5000$  برای جابه‌جایی‌های ۲۰ المان جرم است. پس از تعیین ماتریس جابه‌جایی  $y$ ، با استفاده از رابطه (۶) ماتریس  $\theta$  نیز تعیین می‌شود.

$$\theta = -C^{-1}B^T y$$

همچنین امکانات موجود در نرم‌افزارهای میپل و متلب مورد بررسی و استفاده قرار گرفت که این روشها و امکانات و ابزار، هر یک به دلیل محدودیتها یا نقصهای موجود، امکان حل مسأله را فراهم نکردند. در نهایت روشی که مورد استفاده قرار گرفت، روشهای چندگامی آدامز- بشفورث و آدامز- مولتون [۱۸] بود. در ادامه توضیح مختصری در باره روش حل دستگاه معادلات ارائه می‌شود.

به منظور حل مسأله مورد نظر، ابتدا این دستگاه معادلات- که حاوی ۲۰ معادله دیفرانسیل مرتبه ۲ است- به یک دستگاه معادلات شامل ۴۰ معادله دیفرانسیل از مرتبه ۱ تبدیل می‌شود. پس از آن از روش «اولر با تقریب

### ۳-۲- تعیین تنش و کرنش

از دو ماتریس  $y$  و  $\theta$  در تعیین تنش ناشی از این بارگذاری استفاده می‌شود. در مباحث اجزای محدود مربوط به المان تیر، ممان خمشی در هر المان از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۵]:

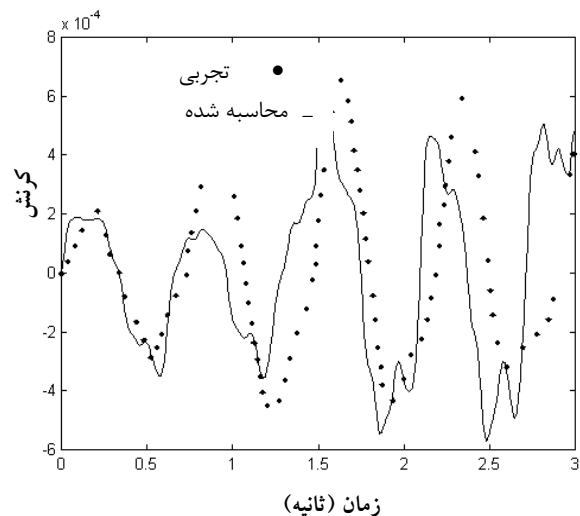
$$M = \frac{EI}{l^3} [6\xi_1 q_1 + (3\xi_1 - 1)lq_2 - 6\xi_2 q_3 + (3\xi_2 + 1)lq_4] \quad (31)$$

که  $q_3, q_1$  جابه‌جایی و  $q_4, q_2$  دوران دو انتهای المان هستند. پس از تعیین ممان بر هر المان، تنش روی آن با استفاده از روابط تنش و کرنش تیرها محاسبه می‌شود. تمامی مراحل حل معادله نهایی و تعیین مقادیر و کانتورهای تنش، کرنش و جابه‌جایی ایجاد شده در کشتی، به وسیله نرم‌افزاری که در محیط متلب طراحی شده، انجام می‌شود.

### ۳-۳- نتایج

به منظور تأیید صحت نتایج به دست آمده، نمودار تغییرات کرنش- زمان تجربی کشتی ۲۵۰۰ تنی (شکل ۳) به عنوان تنها مرجعی که برای مقایسه و تأیید نتایج حل عددی در اختیار است، استفاده شد [۱۲].

در شکل ۳ نمودار کرنش- زمان حاصل از اجرای برنامه با نمودار کرنش- زمان تجربی موجود مقایسه شده است.



شکل ۳ مقایسه نتایج حاصل از تحلیل با نتایج تجربی

روند کلی نمودار به دست آمده، انطباق خوبی با مقادیر تجربی دارد و از نظر پیروید زمانی بر مقادیر تجربی منطبق است. اختلافات موجود در بعضی از نقاط دامنه نیز با توجه به ساده‌سازیهای انجام شده طبیعی است.

پس از تأیید روش تحلیل و نتایج حاصل از حل عددی که با نمودار تجربی موجود با دقت خوبی نزدیک بود، در این مرحله به بررسی تنش و جابه‌جایی ایجاد شده در کشتی بر مبنای اطلاعات کشتی به عنوان ورودی ثابت و مقادیر جرم ماده منفجرشونده و عمق محل انفجار به عنوان ورودی‌های متغیر برنامه تهیه شده می‌پردازیم.

### ۳-۵- کانتور تنش و جابه‌جایی

با بررسی کانتور تنش ایجاد شده در کشتی، تحت تأثیر نوسان و بارگذاری حباب مشاهده می‌شود که بیشینه تنش در وسط کشتی و برابر ۱۲۹ مگا پاسکال است که از مقدار تنش تسلیم، فاصله زیادی دارد (شکل ۷). همچنین بیشینه جابه‌جایی ایجاد شده برابر ۱/۳۳ متر است که در مقایسه با طول زیاد کشتی (بیش از ۱۰۰ متر) کم و قابل قبول است (شکل ۵).

### ۴- مدل‌سازی و تحلیل تأثیر حباب ناشی از انفجار زیر آب بر کشتی به وسیله نرم‌افزار انسیس

در مسأله مورد نظر، وجود پدیده حباب و بارگذاری حاصل از نوسانات آن، به پیچیدگی تحلیل کشتی می‌افزاید و انجام تحلیل دینامیکی و هیدرودینامیکی الزامی می‌شود.

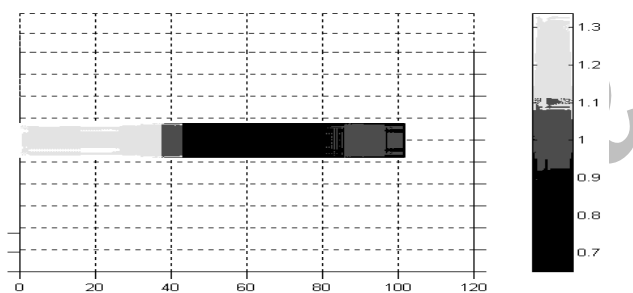
شبیه‌سازی و تحلیل کشتی با جزئیات کامل، به نرم‌افزارهای مخصوص تحلیل کشتی نیاز دارد. به منظور مدل‌سازی کشتی به کمک نرم‌افزارهای عمومی اجزاء محدود، ساده‌سازیها و روشهای مختلفی پیشنهاد و اجرا شده است. در این تحقیق به منظور تحلیل اجزای محدود کشتی تحت تأثیر حباب ناشی از انفجار زیر آب،



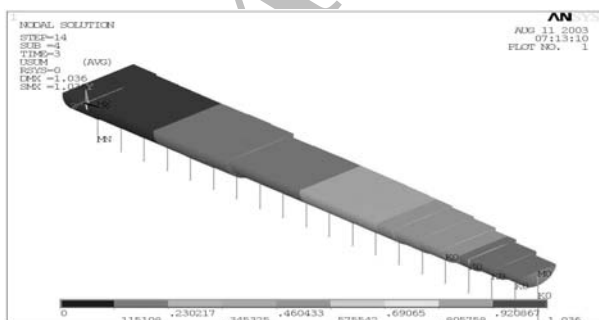
فاصله ۲ هر المان تا مرکز حباب، مقادیر فشار در روی هر المان، در آن گام بارگذاری، مشخص می شود.

#### ۴-۲- مقایسه حل عددی و حل نرم افزاری

در بخش دوم مقاله، به منظور بررسی تأثیر حباب ناشی از انفجار زیر آب، به بررسی این پدیده، از طریق به دست آوردن معادلات حاکم و حل آنها پرداخته شد. در بخش ۴، این مسأله به کمک نرم افزار انسیس بررسی و تحلیل شده است. در اینجا به مقایسه نتایج به دست آمده از این دو روش برای تأثیر حباب ناشی از انفجار ۱۵۰ کیلوگرم ماده TNT بر کشتی در عمق ۱۰ متری آب، می پردازیم. در شکل ۵ کانتور جابه جایی کشتی حاصل از حل عددی و در شکل ۶ کانتور جابه جایی حاصل از حل به کمک نرم افزار مشاهده می شود.

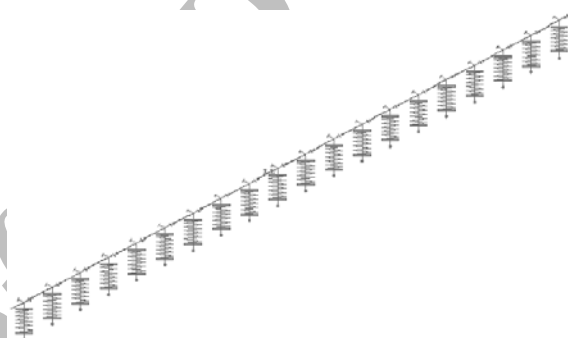


شکل ۵ کانتور جابه جایی حاصل از حل عددی به کمک نرم افزار تهیه شده



شکل ۶ کانتور جابه جایی حاصل از تحلیل اجزاء محدود به کمک نرم افزار انسیس

مدل سازی کشتی به صورت تیر دو سر آزاد با جرم و سختی غیریکنواخت انجام می شود [۱۰]. اطلاعات مورد استفاده، همان اطلاعات قسمت قبل است. به منظور تحلیل نزدیک به واقع مسأله، باید همزمان با بارگذاری دینامیکی، نوسانات حباب روی کشتی، تغییرات نیروی شناوری بر اثر بالا و پایین رفتن کشتی به واسطه نوسانات حباب نیز منظور و اعمال شود. به این منظور از المان فنر استفاده شد. طرحواره مدل سازی کشتی با این روش در شکل ۴ مشاهده می شود.



شکل ۴ طرحواره مدل کشتی در نرم افزار انسیس

بارگذاری روی مدل، در ۱۴ گام بارگذاری انجام می شود که در هر گام بارگذاری، روی هر المان تیر، بارگذاری فشاری متفاوت وجود دارد. نکته قابل ذکر این که تمامی مراحل شبیه سازی، شامل مدل سازی، بارگذاری و حل توسط یک ماکرو نوشته شده در محیط انسیس انجام می شود.

#### ۴-۱- بارگذاری

فشار ناشی از نوسانات حباب در هر لحظه و در روی هر المان از رابطه زیر به دست می آید [۱۲].

$$Pr = \frac{1}{1} W \frac{Z}{r} (\ddot{a}^3) \quad KPa.m \quad (32)$$

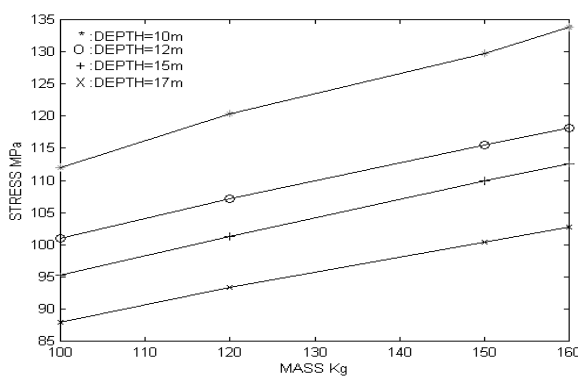
که  $\ddot{a}^3$  تابعی از نوسانات حباب و متغیر با زمان است و در قسمت قبل، از حل معادله نوسانی حباب تعیین شد. برای هر گام بارگذاری و هر  $t_n$ ، مقدار مشخصی دارد که با قرار دادن آن در رابطه (۳۲) و همچنین جایگذاری

## ۵- بررسی پارامترهای مؤثر بر تنش ایجاد شده در کشتی

عمده‌ترین پارامترهای مؤثر بر رفتار حباب، جرم ماده منفجرشونده و عمق محل انفجار است. این پارامترها باعث تغییر در پرپود نوسان حباب، شعاع بیشینه حباب و تعداد نوسانات حباب تا رسیدن به سطح آب می‌شود. به تبع تغییر در رفتار حباب، پاسخ دینامیکی کشتی به حباب نیز تغییر می‌کند. در این قسمت به بررسی نقش این دو عامل یعنی جرم ماده منفجرشونده و عمق محل انفجار در میزان تنشها و جابه‌جایی ایجاد شده در سازه کشتی و پاسخ کشتی به این عوامل بررسی می‌شود.

### ۵-۱- تأثیر جرم ماده منفجر شونده

میزان و چگونگی تأثیر تغییرات جرم ماده منفجرشونده بر مقدار تنش ایجاد شده در کشتی، در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

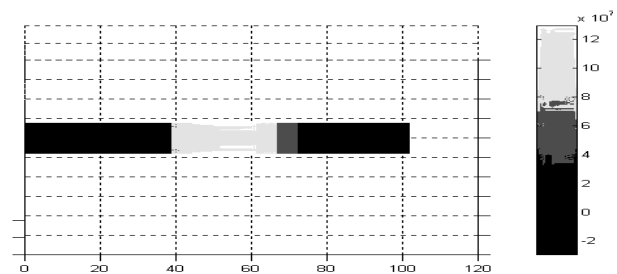


شکل ۹ تغییرات تنش ایجاد شده نسبت به تغییر جرم ماده منفجرشونده در عمقهای ثابت

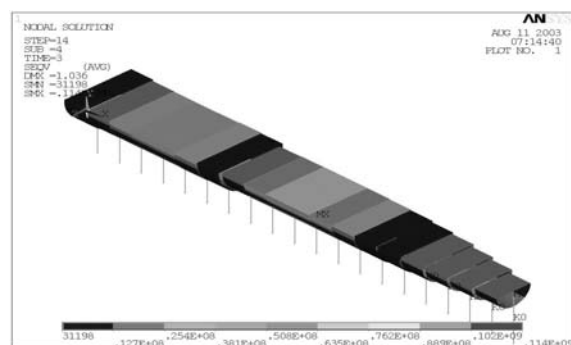
همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش جرم ماده منفجرشونده، به تنشهای ایجاد شده در کشتی نیز افزوده می‌شود که طبیعی است. قدرت انفجار افزایش می‌یابد و محصولات گازی تولید شده نیز قویتر شده و باعث افزایش تنش و جابه‌جایی در کشتی می‌شود.

بیشینه جابه‌جایی به‌دست آمده از حل عددی ۱/۳۳ متر و بیشینه جابه‌جایی به‌دست آمده از حل اجزای محدود ۱/۰۳۶ متر است که نشان‌دهنده اختلاف ۳۰٪ در این دو حل است اما در عین حال روند کلی این دو نمودار بر هم منطبق است.

در شکل ۷ کانتور تنش کشتی حاصل از حل عددی و در شکل ۸ کانتور تنش حاصل از حل به کمک نرم‌افزار مشاهده می‌شود. بیشینه تنش به‌دست آمده از حل عددی ۱۲۹ مگا پاسکال و بیشینه تنش به‌دست آمده از حل اجزای محدود ۱۱۴ مگا پاسکال است که نشان‌دهنده اختلاف ۱۳٪ در این دو حل است. این اختلاف کم در مقایسه نتایج، انطباق خوبی را نشان می‌دهد. اختلاف موجود در نتایج حاصل از این دو روش، با توجه به تفاوت‌های موجود در روش حل عددی مورد استفاده فنون موجود در نرم‌افزار انسیس برای مدل‌سازی مسأله، قابل توجیه است.



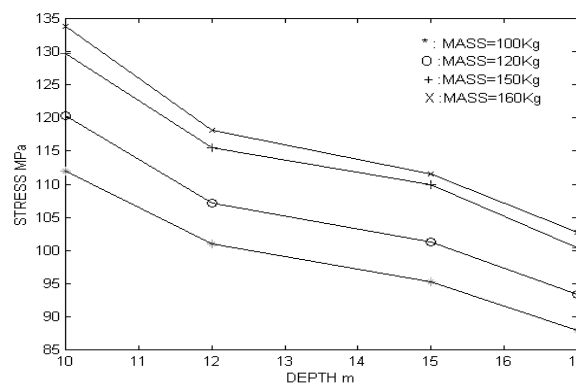
شکل ۷ کانتور تنش حاصل از حل عددی به کمک نرم‌افزار تهیه شده



شکل ۸ کانتور تنش حاصل از تحلیل اجزاء محدود به کمک نرم‌افزار انسیس

## ۵-۲- تأثیر عمق محل انفجار

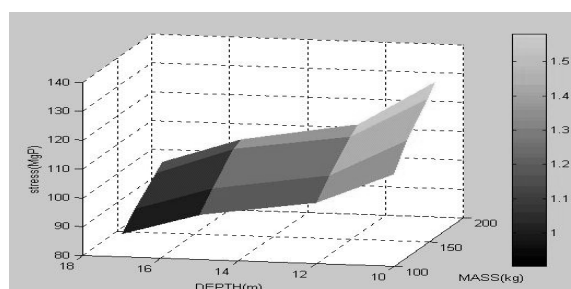
میزان تأثیر و چگونگی تأثیر عمق محل قرار گرفتن ماده منفجرشونده بر تنش ایجاد شده در کشتی، در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰ تغییرات تنش ایجاد شده نسبت به تغییر عمق محل انفجار در جرمهای ثابت

با توجه به اینکه شدت فشار و شتاب ایجاد شده در سیال و بر روی کشتی، نسبت عکس با فاصله مرکز حباب تا کشتی دارد، لذا با افزایش عمق، فشار اعمال شده به کشتی و شتاب ایجاد شده در سیال نیز کاهش می‌یابد که نتیجه طبیعی آن کاهش تنش و جابه‌جایی ایجاد شده در کشتی است.

با ترکیب شکل‌های ۹ و ۱۰ می‌توان یک منحنی یا رویه رسم کرد (شکل ۱۱) که بیان‌کننده رفتار کشتی و تنش و جابه‌جایی بیشینه آن در مقابل تغییرات جرم و عمق ماده منفجرشونده باشد.



شکل ۱۱ تنش و جابه‌جایی بیشینه ایجاد شده در کشتی در مقابل تغییرات جرم و عمق ماده منفجرشونده

محورهای منحنی شامل جرم ماده منفجرشونده، عمق محل انفجار و تنش ایجاد شده در کشتی ناشی از این جرم و عمق است. بعد چهارم منحنی که به وسیله کانتور رنگ نمایش داده شده بیانگر میزان جابه‌جایی ایجاد شده در کشتی است.

## ۶- نتیجه‌گیری

بررسیها نشان می‌دهد که روش عددی مورد استفاده، معادلات به دست آمده و نتایج حاصل از آن، در حد بالایی قابل اطمینان است و می‌تواند مبنای مناسبی برای تحقیقات بعدی باشد. دیگر نتایج این بررسی عبارتند از:

- انطباق خوب نتایج به دست آمده از حل عددی و نرم‌افزاری.
- حباب ناشی از انفجار زیر آب معمولاً برای در تخریب سازه‌های زیر دریایی و سطحی استفاده می‌شود. با شناخت رفتار و میزان تأثیر حباب، می‌توان تخریب مورد نیاز را بر روی سازه مورد نظر ایجاد کرد. از طرفی با شناخت مکانیزم تأثیر حباب بر سازه‌های دریایی، زمینه برای مقاوم‌سازی این سازه‌ها در مقابل اثر تخریبی حباب و کاهش خسارات وارد شده به سازه نیز فراهم می‌شود. تحقیق حاضر زمینه این شناخت را فراهم می‌سازد.
- موفقیت‌آمیز بودن ترکیب روشهای عددی اولر، روش صریح پنج گامی آدامز- بشفورث و روش ضمنی چهار گامی آدامز- مولتون در حل معادلات سازه و حباب.
- با افزایش جرم ماده منفجرشونده و کاهش عمق محل انفجار، شدت تنش و جابه‌جایی ایجاد شده در کشتی تحت تأثیر این انفجار و حباب ناشی از آن، افزایش می‌یابد.

## ۷- فهرست علائم

a	شعاع حباب
$A_0$	سطح مقطع
$A_s$	سطح مقطع برشی
A,B,C	ماتریسهای وابسته خواص الاستیک

Solid Wall; *ASME Cavitation and Polyphase Flow Froum*; New Orleans, LO, 1980.

[6] Ph. F. Genoux; "Collapse of a Toroidal Bubble Near a Solid Wall"; *Cavitation and Multiphase Flow Froum*; New Orleans, Louisiana, 1984.

[7] Kalumuck, K.M.; "Fluid-structure Interaction Simulation of Bubble Dynamics by Coupling Fluid BEM and Structural FEM Codes"; *4th ASME International Symposium on Bubble Noise and Cavitation Erosion in Fluid Systems*; New Orleans, LA Dec, 1993.

[8] J.H. Duncan; The Behavior of a Cavitation Bubble Near a Rigid Wall"; *Bubble Dynamics and Interface Phenomena*, Kluwer Academic Publisher, pp.429-436, 1994.

[9] G.L. Chahine ; "Interaction between cavitating bubbles and vortical structures"; *Third International Symposium on Cavitation, Grenoble, France, April 7-10, 1998*.

[10] J.Horvay Evans; "Ship Structural Design Concept"; *Cornell Maritime Press, Inc*; 1983; pp. 165-166.

[11] F.H. ToDD, "Ship Hull Vibration", *Belfast*, 1961; pp. 65-105.

[12] A.N. Hicks, "explosion induced hull whipping", *Admiralty Research Establishment Teddington*, 1985.

[13] J. S.Przemieniecki, *Theory of Matrix Structural Analysis*, McGraw-Hill, New York 1968.

[14] R. H.Cole, *underwater explosion*; New York Dover Publication INC 1965; pp. 270-330.

[15] T.R.Chandrupatla, *introduction to finite elements in engineering*; Prentice-Hall, Inc; Newjersey; 1997; pp. 238-247.

[۱۶] سیف-محمد سعید، اصول طراحی کشتی، انتشارات صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۳، ص.ص. ۹۵-۱۰۱.

[۱۷] سیف-محمد سعید، دینامیک کشتی، انتشارات دانشگاه هرمزگان، ۱۳۷۳، ص.ص. ۱۳۷-۱۴۵.

[۱۸] بابلیان-اسماعیل، محاسبات عددی، انتشارات نور،

۱۳۶۹

2b	پهنای کشتی
$C_v$	ضریب وزن اضافه شده برای حرکت عمودی و افقی
d	فاصله حباب تا کشتی
E(a)	انرژی داخلی حباب
J	ضریب اصلاح برای جرم اضافه
K	ضریب هیدرواستاتیک
l	طول المان
m	جرم المان
M	ماتریس جرم کشتی
$M_w, m_w$	جرم اضافه و ماتریس آن
r	فاصله از مرکز حباب
u	سرعت سیال
W	وزن ماده منفجرشونده
Y	انرژی کل حباب
y	خیز المان
$Z_0$	عمق محل انفجار
$\gamma$	ثابت گاز
$\theta$	شیب المان
$\rho$	چگالی سیال

## ۸- منابع

[1] C.D. Milligan, J.H. Duncan, "Nmerical simulation of the interaction of an explosion bubble with a submerged spherical pressure vessel"; 1994.

[2] J. Waldman, "Structural Design for Reliability and Survivability"; *36<sup>th</sup> Annual Symposium-23 April 1999*.

[3] A. Karimi, *The effects of heat transfer on vapour gas and vapour-gas cavity bubbles*; A Thesis Submitted in Fulfilment of the Requirment for the Award of the Degree of Doctor Philosphy From University of Wollongong; 1995; pp. 5-36.

[4] G. L. Chahine<sup>1</sup> and K. M. Kalumuck<sup>2</sup>, "Simulation of Surface Piercing Body Coupled Response to Underwater Bubble Dynamics Utilizing 3DYNAPS, a Three-Dimensional BEM Code"; USA, May 28-30, 2002.

[5] A.G. Bovis; "Asymptotic Study of the Non-spherical Collapse of a Bubble Near a