

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

سید علی محمد میر جلیلی<sup>1\*</sup>، علی اکبر کریمی<sup>2</sup>، سعید هادی<sup>3</sup>

- 1- استادیار گروه مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه امام حسین (ع)
- 2- استادیار گروه مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه امام حسین (ع)
- 3- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه امام حسین (ع)

\* تهران، صندوق پستی 187 - 16535

S\_A\_M\_mirjalili@yahoo.com

(دریافت مقاله: آذر 1382، پذیرش مقاله: تیر 1384)

**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، بیان کننده 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 نرم افزار انسیس<sup>1</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.

## 1- 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 [1]:

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

(1980) [5]، بررسی اضمحلال حباب رینگگی نزدیک دیوار صلب توسط ژناکس<sup>6</sup> (1984) [6]، شبیه‌سازی برخورد سازه و سیال در دینامیک حباب به‌وسیله کوپل نرم‌افزارهای سازه‌ای و سیالاتی توسط کلومک<sup>7</sup> (1993) [7]، بررسی عددی برخورد حباب با سازه کروی زیر آب توسط می‌لیگان<sup>8</sup> (1994) [1]، بررسی رفتار حباب نزدیک دیوار انعطاف‌ناپذیر توسط دانکن<sup>9</sup> (1994) [8]، و تحلیل برخورد حباب با سازه‌های حلقوی توسط چاین<sup>10</sup> (1998) [9] 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.

## 2- 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.

### 2-1- 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 [11,12]. در تحلیل تنش

1- تخریبهای نقطه‌ای ناشی از حبابهایی در حد میکرون؛  
2- تحریک موده‌های ارتعاشی سازه در اثر نوسانات حباب [2]؛

3- 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.

بنا بر گفته یانگ<sup>1</sup> (1989)، نیوتن اولین فردی بود که در سال 1704 تولید و ایجاد حباب را مطالعه کرد. بیسانت<sup>2</sup> (1859) اولین کسی بود که رفتار حباب را به صورت تحلیلی بررسی کرد. رایلی<sup>3</sup> (1917) 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 [3]. پلیسیت<sup>4</sup> (1949) رابطه‌ای را مطرح کرد که معادله اصلی و پایه‌ای دینامیک حباب است [4]. تحقیقات انجام شده در باره حباب، تاریخچه‌ای نسبتاً طولانی (بیش از 200 سال) دارد، اما کارهای عددی در این زمینه نسبتاً جدید است. اولین کارها به پلیسیت (1971) نسبت داده می‌شود که به بررسی انبساط حباب نزدیک سطح و مرز صلب با استفاده از روش تفاضل محدود پرداخت [3]. 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>

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

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

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

زیرماتریس‌های A, B, C به خواص الاستیک تیر بدنه کشتی وابسته بوده و مولفه های آنها از روابط زیر به دست می آیند [12]:

$$\begin{aligned} a_{i,i-1} &= -6\alpha_{i-1} \\ a_{i,i} &= 6(\alpha_{i-1} + \alpha_i) \\ a_{i,i+1} &= -6\alpha_i \\ b_{i,i-1} &= -3\alpha_{i-1}l \\ b_{i,i} &= -3\alpha_{i-1}l + 3\alpha_i l \\ b_{i,i+1} &= 3\alpha_i l \\ c_{i,i-1} &= \alpha_{i-1}l^2(1 - \varepsilon_{i-1}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$c_{i,i} = \alpha_{i-1}l^2(2 + \varepsilon_{i-1}) + \alpha_i l^2(2 + \varepsilon_i)$$

$$c_{i,i+1} = \alpha_i l^2(1 - \varepsilon_i)$$

$$\varepsilon = \frac{12(1 + \nu)I_i}{A_{si}l^2}$$

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

$\alpha_n$  و  $\alpha_0$  صفر تعریف می شوند.

در این مسأله ممان M در خلال حرکت وجود دارد، اما در عمل مشاهده می شود که تأثیر آن در نتایج کم است [12]، لذا:  $M=0$

در نتیجه داریم:

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

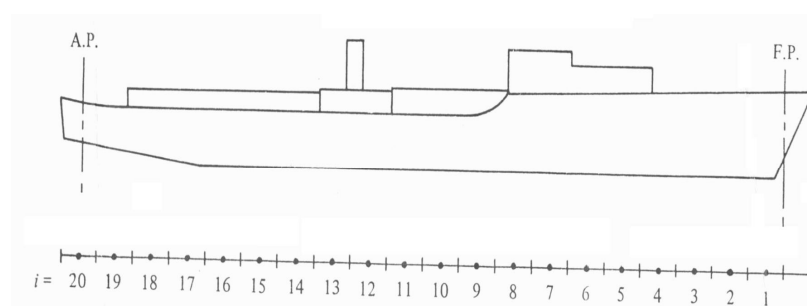
$$\theta = -C^{-1}B^T y \quad (6)$$

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

## 2-2- فرضیات هیدرودینامیک کشتی و حباب

مبنای بررسی هیدرودینامیک بدنه کشتی، روش نواری<sup>1</sup> است که در آن بدنه سه بعدی کشتی به وسیله تعداد زیادی مقاطع دوبعدی [17] (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 می شود [10-12,16]. در تحلیل این مسأله نیز بدنه کشتی با تیری با سختی غیریکنواخت مدل سازی می شود. پس از آن، این تیر به بیست قسمت (المان) با سختی متفاوت تقسیم و جرم هر قسمت در وسط آن قرار می گیرد. (شکل 1).



شکل 1 تبدیل کشتی به بیست المان

در بررسی این مسأله از روابط حاکم بر تیر الاستیک دوبعدی استفاده می شود که برای آن داریم [3]:

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

در این رابطه:  $\phi = \frac{12EI}{GA_s l^2}$

با تعویض ستونهای 2 و 3 و سطرهای 2 و 3، معادله تعادل به صورت زیر به دست می آید:

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

که این رابطه را به صورت زیر می توان نوشت.

1. Strip Theory

$$m_w = \frac{1}{2} C_V J_2 w \pi b^2 \quad (9)$$

که  $C_V$  به شکل سطح مقطع و نسبت  $\frac{2b}{D}$  بستگی دارد. زمانی که جریان اطراف کشتی واقعاً سه بعدی 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 [11]:

$$J = \frac{U_{3D}}{U_{2D}} \quad (10)$$

که  $U_{3D}$  انرژی جنبشی سیال احاطه کننده در حرکت سه بعدی و  $U_{2D}$  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 می توان محاسبه کرد.

#### 2-4- 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:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial r} + \rho \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2\rho u}{r} = 0 \quad (11)$$

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

با توجه به ثابت فرض کردن چگالی و تغییرات ناچیز آن، از معادله (11) داریم:

$$\frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{2u}{r} \quad (12)$$

با انتگرال گیری از این معادله داریم:

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

با جایگذاری معادله (13) در (11) داریم:

$$\frac{1}{r^2} \rho_0 \frac{du_1}{dt} + \frac{1}{2} \rho_0 \frac{\partial u^2}{\partial r} + \frac{\partial P}{\partial r} = 0 \quad (14)$$

با انتگرال گیری بر کره گازی که در آن برای  $P = P_a$  ,  $r = a$

معادلات حرکت جایگزین می شوند. فرضیات حاکم در روش نواری عبارتند از: 1- بدنه کشتی باریک است. 2- در محاسبه ضرایب هیدرودینامیک فرض بر آن است که بدنه کشتی صلب بوده و تغییر شکل در آن رخ نمی دهد. 3- سرعت کشتی در حد معمول بوده و نیروی بالابرنده قابل صرف نظر کردن است. 4- حرکتها دارای دامنه های کوچکی هستند. 5- هر یک از مقاطع کشتی دارای کنارهای عمودی هستند [17].

فرضیات حاکم بر هیدرودینامیک حباب عبارتند از:

1- نوسان در عمق ثابت و بدون حرکت انتقالی به سمت بالا انجام می شود. 2- جریان اطراف حباب تراکم ناپذیر فرض می شود. 3- در یک فاصله نامحدودی از حباب در هر جهتی، فشار مقدار مشابهی دارد. 4- قانون گاز ایدئال بر محصولات گازی حاصل از انفجار حاکم است [14,12].

#### 2-3- 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 صرف نظر می کنیم. نیروی اعمال شده به هر المان کشتی با حرکت ارتعاشی، از رابطه زیر به دست می آید [17].

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

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 می باشد که از رابطه زیر به دست می آید [11].

$$k = 2\rho gb \quad (8)$$

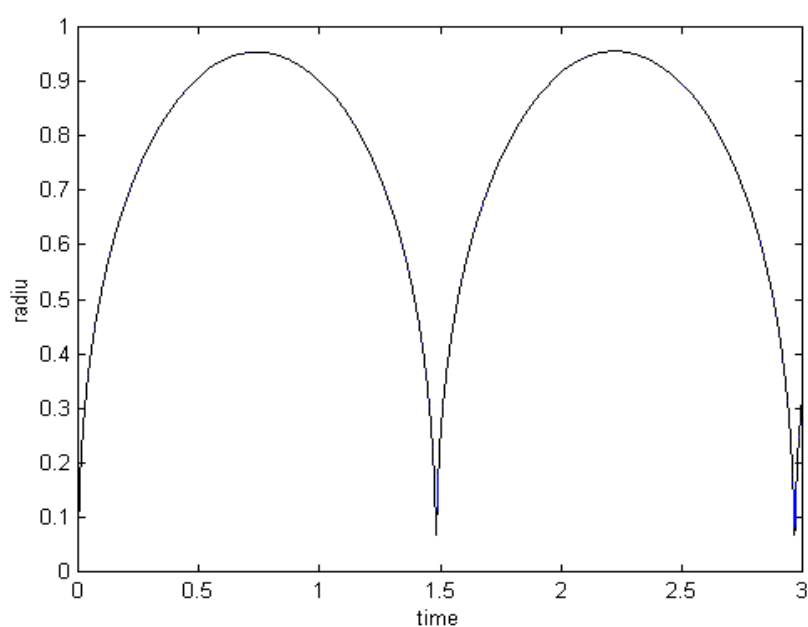
برای مقطع مشخص، وزن اضافه شده واحد طول برای ارتعاش عمودی از رابطه زیر به دست می آید [11].

معادله (19) از مرتبه 2 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:

$$\dot{a} = R$$

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

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 2 ارائه شده است.



شکل 2 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 [12].

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

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 (24) به دست آورد و با جایگذاری در رابطه (23)، شتاب را در فاصله  $r$  از مرکز حباب تعیین نمود:

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

$$\left. \begin{aligned} u = \dot{r} \\ r = a \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} u_a = \frac{dr}{dt} \Big|_{r=a} = \frac{da}{dt} \\ u(r,t) = \frac{u_1}{r^2} \rightarrow u(a,t) = \frac{u_1}{a^2} \end{aligned} \right\} u_1 = a^2 \frac{da}{dt} \quad (15)$$

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

$$\frac{\rho_0}{a} \cdot \frac{d}{dt} \left( a^2 \frac{da}{dt} \right) - \frac{1}{2} \rho_0 \left( \frac{da}{dt} \right)^2 - (P_a - P_0) = 0 \quad (16)$$

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

$$\frac{1}{2} \rho_0 a^3 \left( \frac{da}{dt} \right)^2 + \frac{1}{3} P_0 a^3 - \int_0^t P_0 a^2 da = C' \quad (17)$$

که  $C'$  ثابت انتگرال‌گیری است. با اعمال ضرب  $4\pi$ ، 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:

$$\frac{3}{2} \left( \frac{4\pi}{3} \rho_0 a^3 \right) \left( \frac{da}{dt} \right)^2 + \frac{4\pi}{3} P_0 a^3 + E(a) = y \quad (18)$$

اولین جمله، حاصل انتگرال روی مرز خارجی و جمله دوم، کار انجام شده در مقابل فشار هیدرواستاتیک است. معادله (18) بیان‌کننده رفتار دینامیکی و نوسانی حباب در عمق ثابت است که فرم بدون بعد آن به صورت زیر است [14]:

$$a^3 \left( \frac{da}{dt} \right)^2 + a^3 + na^{-3(\gamma-1)} = 1 \quad (19)$$

که ثابت گاز  $\gamma = 1/25$  و مقدار نیمه تجربی  $n$  برای TNT از رابطه زیر به دست می‌آید [14].

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

شرایط اولیه آن عبارتند از [12]:

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

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

## 2-5- 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 (25) 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 [12].

$$\rho A_0 l \ddot{u} = \bar{m} \ddot{u} \quad (26)$$

که این جمله نیز به رابطه (25) 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 (5) 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.

## 3- شبیه‌سازی عددی

به منظور تحلیل رفتار کشتی تحت تأثیر این بارگذاری، معادله (29) باید حل شود. در ادامه با استفاده از اطلاعات هیدرودینامیکی و سازه‌ای مربوط به یک کشتی 2500 تنی (جدول 1) [12] و حباب ناشی از انفجار 150 کیلوگرم TNT در عمق 10 متری آب، این معادله را حل می‌کنیم. جدول 1 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 (29) را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

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

$$M1 = M + M_w$$

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

$$G(t) = (\bar{M} + M_w) \frac{15/77W^{1/3}Z_0^{2/3}d}{r^3} (\ddot{a}^3)$$

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

## 3-1- حل دستگاه معادلات دیفرانسیل

معادله نهایی به دست آمده معادله پیچیده‌ای است، زیرا از طرفی شامل یک دستگاه معادلات دیفرانسیل با 20 معادله دیفرانسیل درجه 2 و از طرف دیگر، سمت راست هر یک از این 20 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 1 اطلاعات مربوط به المانهای مختلف کشتی 2500 تنی که I شماره المانهای کشتی و  $d_i$  فاصله مرکز المانها از ابتدای کشتی است

i	$d_i(m)$	m(kg)	$m_w(kg)$	$(Kg) \bar{m}$	K(N/m)	$A_0(m^2)$	$A_s(m^2)$	I(m <sup>4</sup> )
1	2/684	30838	2721	12698	7/2932e+004	0/21484	7/1613e+002	2/2326
2	8/052	37187	16326	38094	1/6658e+005	0/27226	7/0322e+002	2/6407
3	13/42	56234	42629	61676	2/6168e+005	0/32903	6/9032e+002	3/1448
4	18/788	58048	69839	85258	3/2936e+005	0/38903	6/8387e+002	3/6910
5	24/156	108840	102491	106119	3/9383e+005	0/44710	6/9677e+002	4/2791
6	29/524	204075	135143	125166	4/4488e+005	0/52452	7/8710e+002	5/1614
7	34/892	218587	166888	141492	4/8952e+005	0/69484	1/0452e+002	6/6078
8	40/26	93421	197726	156004	5/2628e+005	0/54516	8/7742e+002	4/1531
9	45/628	140585	216773	166888	5/4407e+005	0/55484	8/7742e+002	4/2971
10	50/996	123352	224936	175051	5/4932e+005	0/56451	8/8387e+002	4/3932
11	56/364	143306	230378	167795	5/5195e+005	0/56451	8/9032e+002	4/3692
12	61/732	173237	228564	167795	5/5136e+005	0/55677	8/9032e+002	4/2971
13	67/1	115189	214959	164167	5/4534e+005	0/54258	8/7742e+002	4/1051
14	72/468	124259	200447	156911	5/3619e+005	0/50516	8/3226e+002	3/7210
15	77/836	126073	184121	146934	5/2511e+005	0/46903	7/7419e+002	3/1688
16	83/204	215866	159632	131515	5/0323e+005	0/42193	6/9677e+002	2/5567
17	88/572	160539	136957	108840	4/8748e+005	0/35097	6/3226e+002	1/7285
18	93/94	54420	124259	83444	4/4926e+005	0/30839	5/2903e+002	1/1943
19	99/308	50792	78002	57141	3/5007e+005	0/27097	4/3226e+002	7/2019
20	104/67	48978	54420	31745	2/8881e+005			

بهرتر» 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 3 ثانیه به 5000 گام زمانی تقسیم شده و دستگاه معادلات 5 هزار بار حل شده که حاصل آن ماتریس  $20 \times 5000$  برای جابه‌جایی‌های 20 المان جرم است. پس از تعیین ماتریس جابه‌جایی  $y$ ، با استفاده از رابطه (6) 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 [18] 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 20 معادله دیفرانسیل مرتبه 2 است - به یک دستگاه معادلات شامل 40 معادله دیفرانسیل از مرتبه 1 تبدیل می‌شود. پس از آن از روش «اولر با تقریب



### 3-2- 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 [15]:

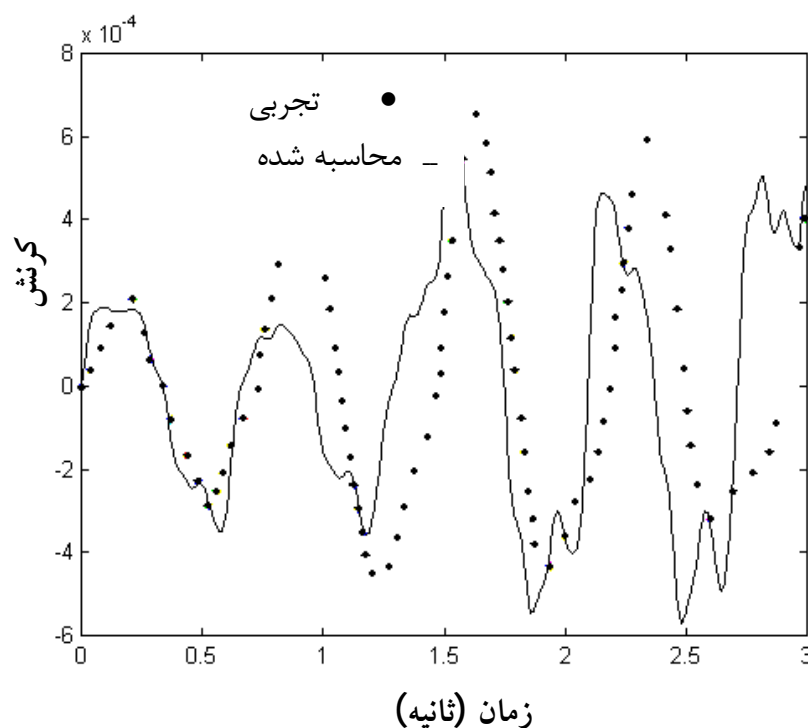
$$M = \frac{EI}{l^2} [6\xi q_1 + (3\xi - 1)lq_2 - 6\xi q_3 + (3\xi + 1)lq_4] \quad (31)$$

که  $q_3, q_4$  جابه‌جایی و  $q_2, q_4$  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.

### 3-3- نتایج

به منظور تأیید صحت نتایج به دست آمده، نمودار تغییرات کرنش - زمان تجربی کشتی 2500 تنی (شکل 3) به عنوان تنها مرجعی که برای مقایسه و تأیید نتایج حل عددی در اختیار است، استفاده شد [12].

در شکل 3 نمودار کرنش - زمان حاصل از اجرای برنامه با نمودار کرنش - زمان تجربی موجود مقایسه شده است.



شکل 3 مقایسه نتایج حاصل از تحلیل با نتایج تجربی

روند کلی نمودار به دست آمده، انطباق خوبی با مقادیر تجربی دارد و از نظر پریود زمانی بر مقادیر تجربی منطبق است. اختلافات موجود در بعضی از نقاط دامنه نیز با توجه به ساده سازی‌های 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.

### 3-5- 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 129 مگا پاسکال است که از مقدار تنش تسلیم، فاصله زیادی دارد (شکل 7). همچنین بیشینه جابه‌جایی ایجاد شده برابر 1/33 متر است که در مقایسه با طول زیاد کشتی (بیش از 100 متر) کم و قابل قبول است (شکل 5).

### 4- مدل سازی 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،

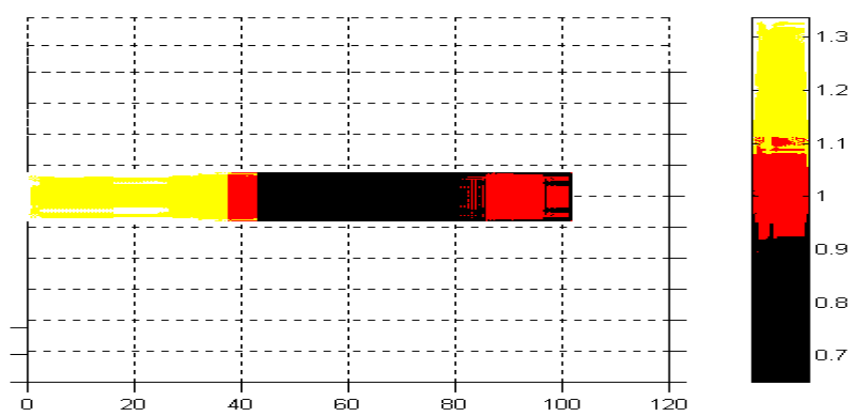


فاصله  $r$  هر المان تا مرکز حباب، مقادیر فشار در روی هر المان، در آن گام بارگذاری، مشخص می‌شود.

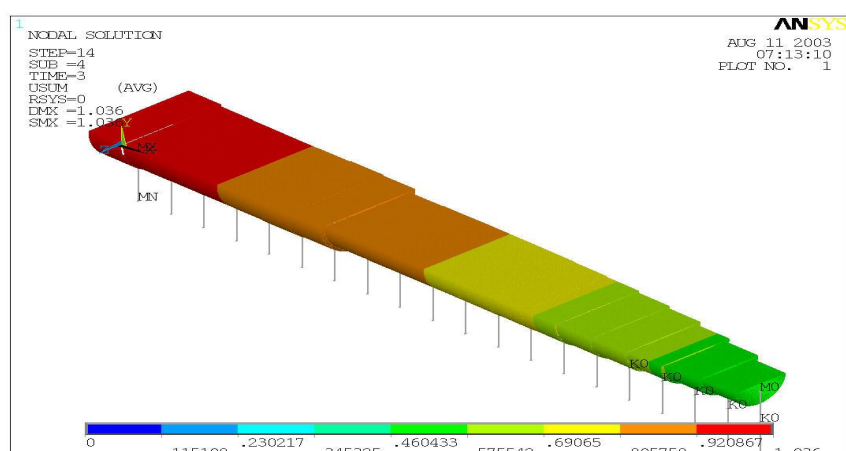
#### 4-2- مقایسه حل عددی و حل نرم افزاری

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 4، این مسأله به کمک نرم‌افزار انسیس بررسی و تحلیل شده است. در اینجا به مقایسه نتایج به دست آمده از این دو روش برای تأثیر حباب ناشی از انفجار 150 کیلوگرم ماده TNT بر کشتی در عمق 10 متری آب، می‌پردازیم.

در شکل 5 کانتور جابه‌جایی کشتی حاصل از حل عددی و در شکل 6 کانتور جابه‌جایی حاصل از حل به کمک نرم‌افزار مشاهده می‌شود.

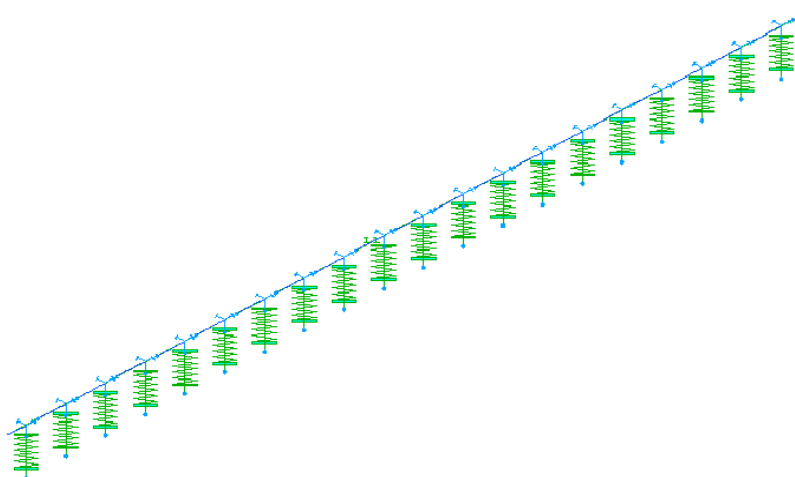


شکل 5 کانتور جابه‌جایی حاصل از حل عددی  
به کمک نرم‌افزار تهیه شده



شکل 6 کانتور جابه‌جایی حاصل از تحلیل اجزاء محدود  
به کمک نرم‌افزار انسیس

مدل‌سازی کشتی به صورت تیر دو سر آزاد با جرم و سختی غیریکنواخت انجام می‌شود [10]. 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 فر استفاده شد. طرحواره مدل‌سازی کشتی با این روش در شکل 4 مشاهده می‌شود.



شکل 4 طرحواره مدل کشتی در نرم‌افزار انسیس

بارگذاری روی مدل، در 14 گام بارگذاری انجام می‌شود که در هر گام بارگذاری، روی هر المان تیر، بارگذاری فشاری متفاوت وجود دارد. نکته قابل ذکر این‌که تمامی مراحل شبیه‌سازی، شامل مدل‌سازی، بارگذاری و حل توسط یک ماکرو نوشته شده در محیط انسیس انجام می‌شود.

#### 4-1- بارگذاری

فشار ناشی از نوسانات حباب در هر لحظه و در روی هر المان از رابطه زیر به دست می‌آید [12].

$$Pr = 8/1 W^{1/3} Z^{2/3} (\ddot{a}^3) \quad KPa.m \quad (32)$$

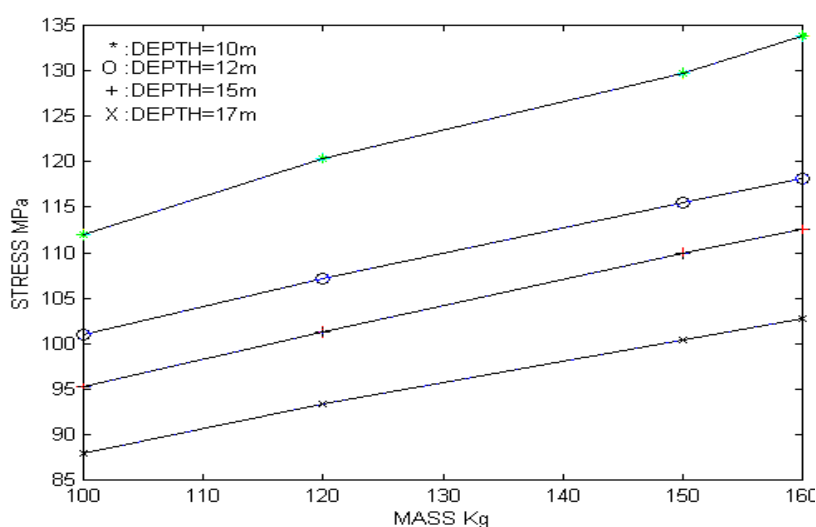
که  $\ddot{a}^3$  تابعی از نوسانات حباب و متغیر با زمان است، و در قسمت قبل، از حل معادله نوسانی حباب تعیین شد. برای هر گام بارگذاری و هر  $t_n$  مقدار مشخصی دارد که با قراردادن آن در رابطه (32) و همچنین جایگذاری

## 5- 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 پریرود 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.

### 5-1- تأثیر جرم ماده منفجر شونده

میزان و چگونگی تأثیر تغییرات جرم ماده منفجرشونده بر مقدار تنش ایجاد شده در کشتی، در شکل 9 مشاهده می‌شود.



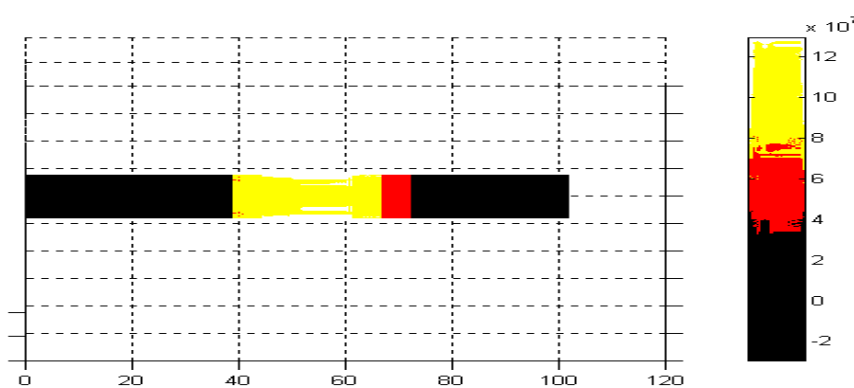
شکل 9 تغییرات تنش ایجاد شده نسبت به تغییر

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.

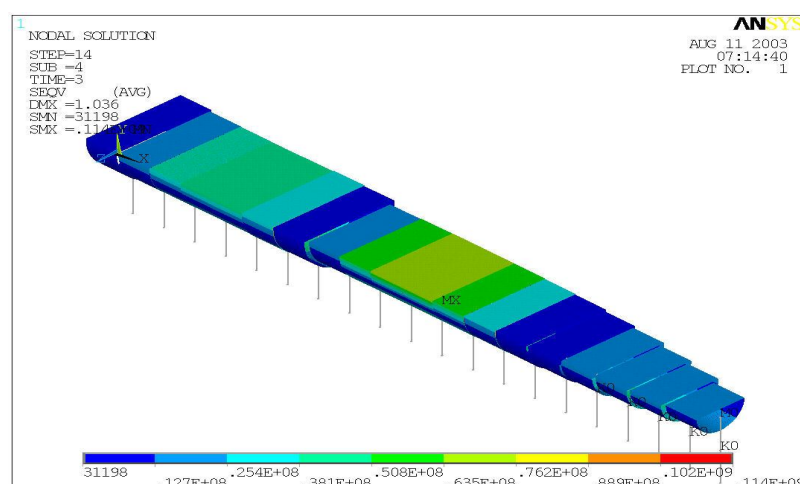
بیشینه جابه‌جایی به‌دست آمده از حل عددی 1/33 متر و بیشینه جابه‌جایی به‌دست آمده از حل اجزای محدود 1/036 متر است که نشان‌دهنده اختلاف 30% در این دو حل است اما در عین حال روند کلی این دو نمودار بر هم منطبق است.

در شکل 7 کانتور تنش کشتی حاصل از حل عددی و در شکل 8 کانتور تنش حاصل از حل به کمک نرم‌افزار مشاهده می‌شود. بیشینه تنش به‌دست آمده از حل عددی 129 مگا پاسکال و بیشینه تنش به‌دست آمده از حل اجزای محدود 114 مگا پاسکال است که نشان‌دهنده اختلاف 13% 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 7 کانتور تنش حاصل از حل عددی

به کمک نرم‌افزار تهیه شده



شکل 8 کانتور تنش حاصل از تحلیل اجزاء محدود

به کمک نرم‌افزار انسیس

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.

## 6- 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.

- حساب 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.

- موفقیت آمیز بودن ترکیب روشهای عددی اولر، روش صریح پنج گامی آدامز- بشفورث و روش ضمنی چهار گامی آدامز- مولتون در حل معادلات سازه و حباب.

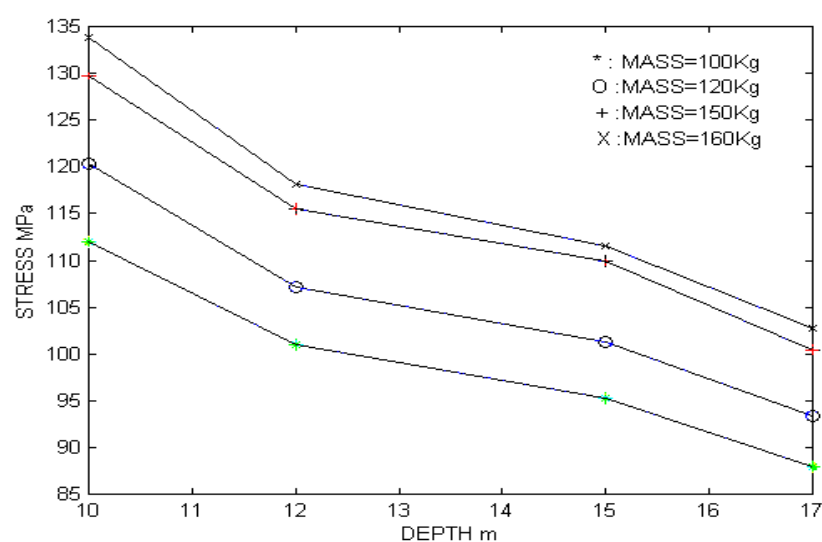
- با افزایش جرم ماده منفجرشونده و کاهش عمق محل انفجار، شدت تنش و جابه‌جایی ایجاد شده در کشتی تحت تأثیر این انفجار و حباب ناشی از آن، افزایش می‌یابد.

## 7- فهرست علائم

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

## 5-2- تأثیر عمق محل انفجار

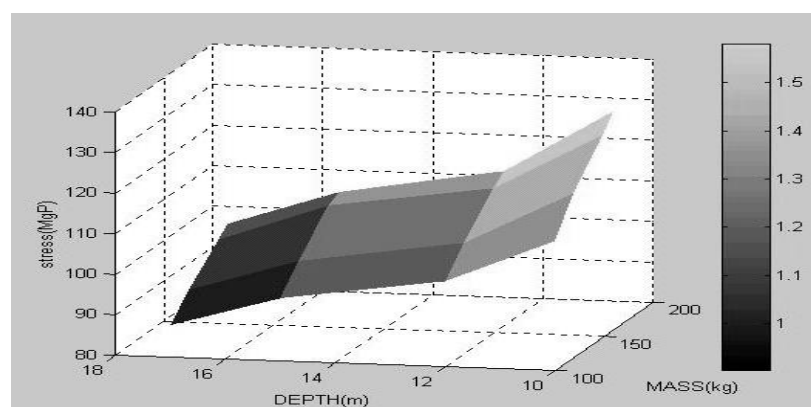
میزان تأثیر و چگونگی تأثیر عمق محل قرار گرفتن ماده منفجرشونده بر تنش ایجاد شده در کشتی، در شکل 10 مشاهده می‌شود.



شکل 10 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 9 و 10 می‌توان یک منحنی یا رویه رسم کرد (شکل 11) که بیان‌کننده رفتار کشتی و تنش و جابه‌جایی بیشینه آن در مقابل تغییرات جرم و عمق ماده منفجرشونده باشد.



شکل 11 تنش و جابه‌جایی بیشینه ایجاد شده در کشتی در مقابل تغییرات جرم و عمق ماده منفجرشونده

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.

[16] سیف-محمد سعید، اصول طراحی کشتی، انتشارات صنعتی امیرکبیر، 1373، ص.ص. 95-101.

[17] سیف-محمد سعید، دینامیک کشتی، انتشارات دانشگاه هرمزگان، 1373، ص.ص. 137-145.

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

1369

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

## 8- 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 effcts 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 3DYNAFS, 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