

کاربرد روش اجزاء محدود در تحلیل سازه کشتی

دکتر ایرج محمودزاده کنی

استادیار گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

مهندس مهرداد اللهیاری

کارشناس ارشد سازه - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

چکیده

چون برای سازه بزرگ و پیچیده‌ای مانند سازه کشتی، تحلیل کل سازه به همراه جزئیات آن یکجا ممکن نیست، لذا در عمل سازه کشتی را به صورت یک "تیر جعبه‌ای جدارنازک"^۱ تحلیل نموده و سپس آن را به یکسری زیرسازه تحت عنوان "مدول بدنه"^۲ تفکیک می‌نمایند. این زیرسازه‌ها که معمولاً به صورت بخشی از یک تیر جعبه‌ای انتخاب می‌شوند بستگی کامل به کاربری کشتی خواهند داشت و چون در ساخت آنها از انواع عناصر سازه‌یی مانند تیرها، ستونها، و ورقهای سخت شده استفاده می‌شوند، لذا کار تحلیل آنها را به دو بخش تحلیل سیستم باربر عرصی و تحلیل سیستم باربر طولی تقسیم می‌نمایند.

هدفی که در این مقاله دنبال شده است تدوین اجزای مناسب جهت تحلیل سیستمهای باربر کشتی با استفاده از روش "اجزای محدود"^۳ و متعاقباً کاربرد آنها در برنامه کامپیوتری است که با امکانات سخت‌افزاری موجود در کشور سازگار باشد.

مقدمه

محدود به کار گرفته می‌شوند. پس با توجه به این که تعریف توابع چند جمله‌یی مناسب که همگامی کافی بین تغییر شکل‌های واقعی سازه و مدل تحلیلی را ایجاد نماید تا چه حد بر میزان دقت نتایج مؤثر است، در ذیل به معرفی اجزای مناسب جهت تحلیل سازه کشتی خواهیم پرداخت.

۱- جزء مثلثی با تنش ثابت (CONSTANT STRESS TRIANGLE)

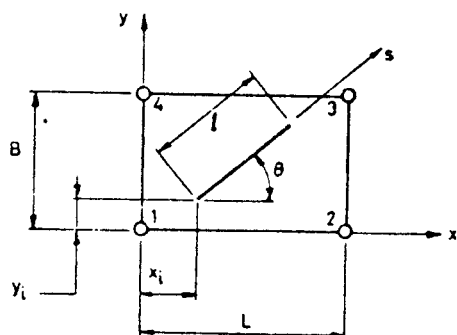
به عنوان اولین جزء مورد استفاده در روش اجزای محدود می‌توان از جزء مثلثی شکل با ضخامت ثابت و مصالح

امروزه روش اجزای محدود به عنوان یک تکنیک قدرتمند عددی در اختیار علوم مهندسی قرار گرفته است و دارای طیف گسترده‌ای در اکثر مسائل سازه‌یی و غیر سازه‌یی گردیده است. موفقیت هر چه بیشتر در بکارگیری این روش منوط به انتخاب مناسبترین متغیرهایی است که به نحو مطلوبی مدل رفتار سازه باشند. به عنوان مثال توابع چند جمله‌یی به علت قابلیتی که در افزایش پارامترهای مستقل آن وجود دارد از جمله توابع ریاضی هستند که در روش اجزای

فرض توزیع تنش جزء مستطیلی با برش ثابت و قابلیت آن برای خمش در صفحه موجب شده است که به عنوان یک جزء مناسب برای تحلیل مقطع اصلی بدنه کشتی و دیواره‌های طولی آن مشخص شود.

۴- جزء سخت‌شده مستطیلی با تنش برشی ثابت

سخت‌کننده‌هایی که در پنلهای سازه کشتی به کار می‌روند عموماً به صورت موازی با پنل و دارای طولی مساوی با آن هستند. اما بحثی که در این مقاله مطرح خواهیم کرد شامل سخت‌کننده‌هایی با هر طول و هر جهت دلخواه است. شکل (۱-۴) حالت کلی i امین سخت‌کننده با طول a_i و سطح مقطع a_i را نشان می‌دهد که در محل (x_i, y_i) از یک پنل مستطیلی به ضخامت t و با زاویه θ نسبت به محور x واقع شده است.



شکل ۱-۴ جزء سخت‌شده مستطیلی با تنش برشی ثابت

چنانچه تابع تغییر مکان که برای سخت‌کننده در نظر می‌گیریم سازگار با جزء مستطیلی با تنش برشی ثابت باشد تغییر مکان در هر نقطه را می‌توان توسط رابطه:

$$\delta(x,y) = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = H(x,y) C$$

بدست آورد، که در آن C ماتریس ستونی هشت عضوی ضرایب تغییر مکان خواهد بود. حال برای اینکه تغییر مکانهای گره‌ای را توسط بردار ضرایب C بیان کنیم از ماتریس ارتباط A به صورت زیر استفاده می‌نماییم، که در آن E ضریب ارتجاعی و ν ضریب پواسون است.

همسانگرد (ایزوتروپ) نام برد. تقریباً بسیاری از شکل‌های موجود در حالت دو بعدی و سه بعدی را می‌توان با سوارکردن این جزء بدست آورد. در این جزء برای بیان الگوی تغییر مکان از یک چند جمله‌یی درجه یک استفاده می‌شوند.

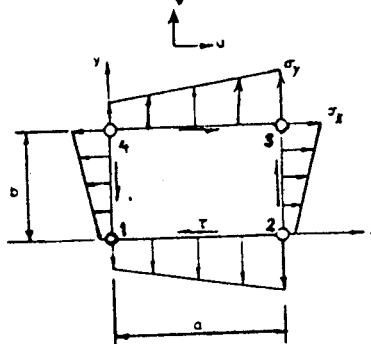
۲- جزء مستطیلی با کرنش خطی (LINEAR STRAIN RECTANGLE)

چنانچه برای جزئی به شکل مستطیل با ضخامت ثابت و مصالح همسانگرد دو درجه آزادی تغییر مکان برای هر گره در نظر بگیریم کافی است که از یک تابع چند جمله‌یی با هشت ضریب مجهول برای تعریف تغییر مکان نقاط داخلی جزء استفاده نماییم. با این فرض، برای تعریف تغییر مکان نقاط داخلی، کرنشهای نرمال هر جهت، به صورت خطی بر حسب جهت متعامد دیگر تغییر کرده و کرنش برشی به صورت خطی بر حسب هر دو جهت تغییر می‌کند. در این صورت تغییرات تنشهای نرمال و برشی به صورت خطی در طول آن جزء خواهند بود.

۳- جزء مستطیلی با تنش برشی ثابت

(CONSTANT SHEAR STRESS RECTANGLE)

در این جزء برای تعریف رفتار داخلی، به جای استفاده از توابع تغییر مکان، از توزیع تنش استفاده می‌شود به این ترتیب که برای تنشهای نرمال، یک توزیع خطی و برای تنش برشی یک مقدار ثابت فرض می‌شود (به شکل ۱-۳ توجه کنید):



شکل ۱-۳ جزء مستطیلی با تنش برشی ثابت

$$\sigma_x = C_1 + C_2 y$$

$$\sigma_y = C_3 + C_4 x$$

$$\tau = C_5$$

کار مجازی داخلی برابر است با:

$$w_{int} = \int [\varepsilon^0(x,y)]^T \sigma(x,y) d(rs) + \int [\varepsilon^0(x,y)]^T \sigma(x,y) d(rp)$$

که در آن rs و rp محدوده انتگرال گیری سخت کننده و ورق می باشند. همانگونه که ملاحظه می شود کار مجازی داخلی شامل دو بخش بوده که یک بخش آن مربوط به سخت کننده و بخش دیگر آن مربوط به ورق است. در این جا هدف ما بخش مربوط به سخت کننده بوده بنابراین بخش فوق را به صورت زیر بازنویسی می نماییم:

$$W_{int,s} = \int \varepsilon^0(\theta)^T \sigma(\theta) d(rs) = E f \delta^0{}^T B^T T^T T B \delta \delta d(rs)$$

حالا اگر δ^0 را مساوی واحد قرار داده و کار مجازی داخلی و خارجی را مساوی قرار دهیم خواهیم داشت:

$$K_s = E f B^T T^T T B d(rs)$$

برای سادگی محاسبه انتگرال فوق می توانیم با یک تبدیل مختصات از مختصات s که در طول سخت کننده واقع است

$$X = X_i + S \cos \theta \quad \text{استفاده نماییم:}$$

$$Y = Y_i + S \sin \theta$$

در اینجا ما توجه خود را به حالتی که در آن n سخت کننده موازی هم در تمام طول پنل به فاصله ای نامساوی از یکدیگر وجود دارند، معطوف می داریم. بنابراین برای i امین سخت کننده با سطح مقطع a_i که در ارتفاع y_i واقع شده است $x_i = 0$ و $l = L$ خواهد بود.

لذا ماتریس سختی از انتگرال زیر بدست می آید:

$$K_s = E f B^T B d(rs)$$

۵- تحلیل سیستم باربر طولی

چون جداره خارجی سازه کشتی را ورقهای نازک به همراه سخت کننده های طولی و عرضی تشکیل می دهند لذا در یک

$$A = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} H(L,B) & L & LB & -\nu L & \frac{-(\nu L + B)^2}{2} & (1+\nu)B & B & 1 & 0 \\ H(0,B) & -\nu B & \frac{-(\nu B + L)^2}{2} & B & LB & (1+\nu)L & -L & 0 & 1 \\ H(0,0) & 0 & 0 & 0 & \frac{-B^2}{2} & (1+\nu)B & B & 1 & 0 \\ H(L,0) & -\nu B & \frac{-\nu B^2}{2} & B & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ H(L,y) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ H(L,0) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ H(L,0) & L & 0 & -\nu L & \frac{-\nu L^2}{2} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ C & \frac{-L^2}{2} & 0 & 0 & 0 & (1+\nu)L & -L & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

با معکوس کردن ماتریس A ماتریس ضرایب C از رابطه $C = A^{-1} \delta$ بدست می آید. چنانچه تابع کرنش را بخواهیم

توسط تغییر مکانهای گره ای بیان کنیم خواهیم داشت:

$$\varepsilon(x,y) = 1/E \cdot [1 \quad y - \nu \quad \nu x \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \cdot C = G \cdot C = B \cdot \delta$$

که در رابطه فوق از ماتریس ضرایب کرنش $B = G \cdot A^{-1}$ استفاده شده است. چون در این حالت در سخت کننده ها فقط کرنش تک محوری ایجاد می شود بنابراین رابطه تنش کرنش به صورت $\sigma = E \cdot \varepsilon$ می باشد. از طرفی کرنش در جهت θ طبق تئوری تغییر شکلهای کوچک به صورت زیر می باشد:

$$\varepsilon(\theta) = T \cdot \varepsilon \quad \text{که} \quad T = [\cos^2 \theta \quad \sin^2 \theta \quad \sin \theta \cdot \cos \theta]$$

از این مرحله به بعد برای دست آوردن ماتریس سختی جزء غشایی همراه با سخت کننده از اصل کار مجازی استفاده می نماییم. به این ترتیب که تغییر مکان گره ای مجازی δ^0 را در نظر گرفته و کار مجازی داخلی و خارجی را دست می آوریم.

$$W_{ext} = \delta^0{}^T F(s) + \delta^0{}^T F(p) \quad \text{با: برابر است}$$

که در آن $F(s)$ و $F(p)$ نیروهای گره ای سخت کننده و ورق

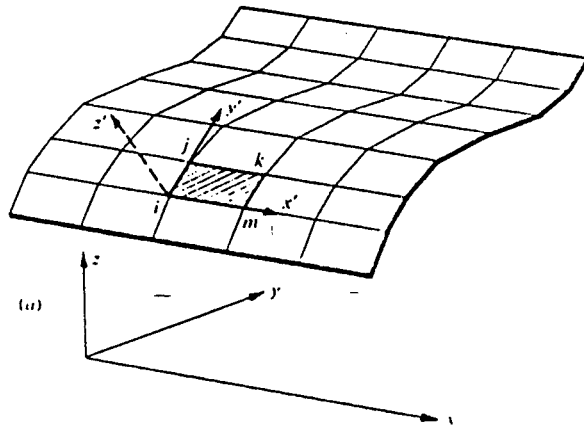
می باشند.

تحلیل بهینه طولی سازه کشتی باید روشی را به کار بست تا اثرات این سخت‌کننده‌ها نیز به حساب آورده شوند.

روشی که بدین منظور در این مقاله به معرفی آن خواهیم پرداخت روش تحلیل پوسته کشتی با استفاده از اجزای مسطح سخت شده می‌باشد.

هر پوسته تک‌انحنا را می‌توان مطابق شکل (۵-۱) به اجزای

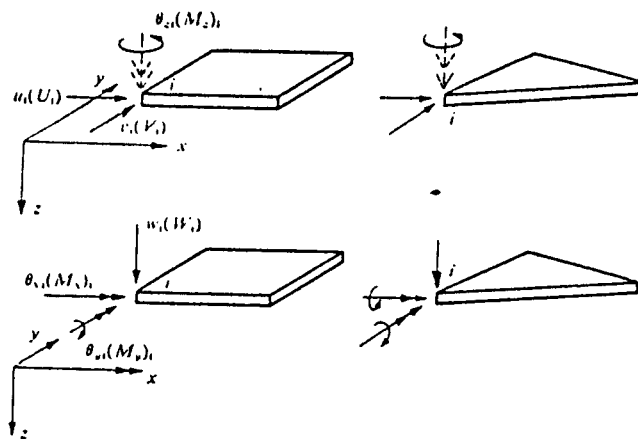
مسطحی تقسیم‌بندی نمود که با افزایش تعداد اجزا اختلاف هندسی بین پوسته واقعی و پوسته تقریبی کاهش می‌یابد. چون شکل واقعی پوسته سازه کشتی را براحتی می‌توان با اجزای مستطیلی مدل کرد لذا خطای حاصل از تقریبی بودن مدل محاسباتی بسیار ناچیز بوده و بکارگیری این روش را منطقی می‌سازد.



شکل ۵-۱- پوسته تک انحنا با جزءهای مستطیلی

در این روش برای هر گره از جزء مسطح در سیستم مختصات محلی پنج درجه آزادی در نظر گرفته می‌شود که دو درجه آزادی آن یعنی u_i و v_i مربوط به تغییر مکانهای گره در

جهت X و Y بوده و سه درجه آزادی آن یعنی w_i ، $\theta(x)$ و $\theta(y)$ مربوط به تغییر مکان گره در جهت Z و دوران حول محورهای X و Y می‌باشد (شکل ۵-۲).



شکل ۵-۲- درجات آزادی گره‌ای

از کمینه ساختن انرژی پتانسیل محوری و خمشی المان، ماتریسهای سختی $[k_{mm}]_2$ و $[k_{pp}]_3$ را خواهیم داشت که هر یک مستقل از دیگری می‌باشد زیرا تغییر مکانهای در جهت

X و Y المان هیچگونه تأثیری بر تغییر شکل‌های خمشی صفحه نخواهند داشت. برای کامل شدن تعداد درجات آزادی جزء فوق در سیستم مختصات کلی لازم است تا یک درجه

۲-۵- جزء مستطیلی ارتوتروپیک:

برای اینکه در بخش خمشی ماتریس سختی جزء پوسته، اثر سخت‌کننده‌ها نیز در نظر گرفته شود، بدین منظور از مولفه‌های ماتریس سختی جزء مستطیلی ارتوتروپیک استفاده می‌نماییم. چنانچه a و b نصف طول و عرض جزء مستطیلی مطابق شکل (۳-۵) باشد و D_x , D_y , D_{xy} , D_1 , ضرایب ارتوتروپی جزء به صورت زیر باشند:

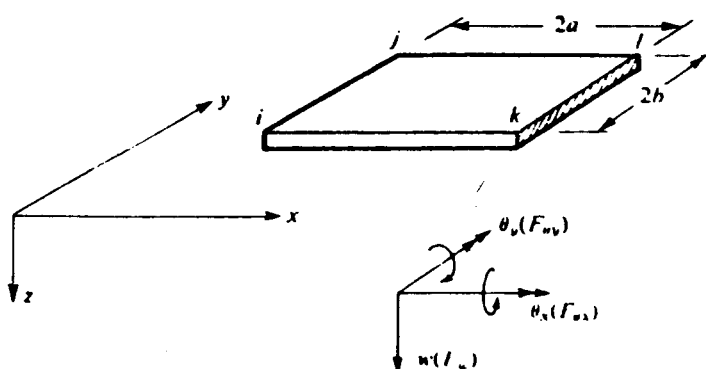
$$D_y = (E_y I_y) / (1 - \nu_y \nu_x) \quad , \quad D_x = (E_x I_x) / (1 - \nu_x \nu_y)$$

$$D_{xy} = 1/2 \cdot 1 - \nu_x \nu_y \sqrt{(D_x D_y)} \quad , \quad D_1 = \sqrt{(\nu_x \nu_y \cdot E_x \cdot E_y)}$$

مولفه‌های ماتریس سختی جزء مستطیلی ارتوتروپ در سیستم مختصات موضعی از رابطه زیر بدست می‌آید: (که در آن ماتریسها در مرجع ۱ توضیح داده شده‌اند) [مرجع ۱].

$$[K] = (1/60 \cdot a \cdot b) \cdot [L] \cdot \{D_x \cdot [K_1] + D_y \cdot [K_2] + D_1 \cdot [K_3] + D_{xy} \cdot [K_4]\} \cdot [L]$$

با تلفیق عناصر ماتریسهای سختی بخش غشایی و خمشی جزء، به یک ماتریس سختی 24×24 خواهیم رسید که از آن می‌توان در تهیه برنامه کامپیوتری استفاده نمود. در برنامه‌ای که بدین منظور تدوین گردیده، مبنای کار روش سختی بوده و حل دستگاه معادلات با استفاده از روش حذفی گوس انجام گرفته است.



شکل (۳-۵) جزء مستطیلی ارتوتروپیک

آزادی دوران حول محور Z ها یعنی $\theta(z)$ و لنگر ناشی از آن یعنی M_z را به صورت مجازی فرض نمائیم در این صورت تعداد درجات آزادی، نیروها و لنگرهای معادل گره‌ای که برای جزء می‌توان در نظر گرفت به صورت زیر خواهند بود:

$$[U] = \begin{bmatrix} u_{(i)} \\ v_{(i)} \\ w_{(i)} \\ \theta_{x(i)} \\ \theta_{y(i)} \\ \theta_{z(i)} \end{bmatrix} ; [F] = \begin{bmatrix} U_{(i)} \\ V_{(i)} \\ W_{(i)} \\ M_{x(i)} \\ M_{y(i)} \\ M_{z(i)} \end{bmatrix}$$

با این فرض تعداد درجات آزادی هر جزء از ۲۰ به ۲۴ افزایش می‌یابد.

در پوسته کشتی همانگونه که قبلاً نیز ذکر شد، جداره خارجی را ورقهای سخت‌شده‌ای تشکیل می‌دهند که بسته به نوع سیستم باربر، تعداد و نحوه توزیع سخت‌کننده‌ها متفاوت می‌باشند لذا در تحلیل پوسته کشتی انتخاب اجزای غشایی و خمشی که از ورقهای ساده بدون سخت‌کننده ساخته شده باشند انتخابی غیر مناسب می‌باشد. روشی را که در اینجا برای حل این مشکل به کار می‌بریم استفاده از مولفه‌های جزء مستطیلی با تنش برشی ثابت سخت‌شده برای بخش غشایی ماتریس سختی و جزء مستطیلی ارتوتروپیک برای بخش خمشی ماتریس سختی خواهد بود که در ذیل به ذکر جزئیات بیشتر در مورد این مؤلفه‌ها خواهیم پرداخت.

۱-۵- جزء سخت‌شده مستطیلی با تنش برشی ثابت:

مولفه‌هایی که برای ماتریس سختی این جزء فرض می‌شوند شامل دو بخش K_5 و K_6 خواهد بود که مولفه‌های K_6 مربوط به جزء مستطیلی با تنش برشی ثابت بوده و مولفه‌های K_5 مربوط به اثرات سخت‌کننده می‌باشد [مرجع ۱].

۶- مثال کاربردی:

مثالی را که ذیلاً به بررسی آن خواهیم پرداخت، مربوط به یک شناور گشتی بوده که جزء نخستین کارهای فولادی صنایع دریائی محسوب می گردد.

۱-۶ مشخصات شناور:

طول کلی: 18.7 متر سیستم باربر: قابهای عرضی
 عرض: 5.8 متر تعداد قابها: 44 عدد
 ارتفاع: 2.8 متر تعداد مدول: 5 عدد
 آبخور: 1.3 متر

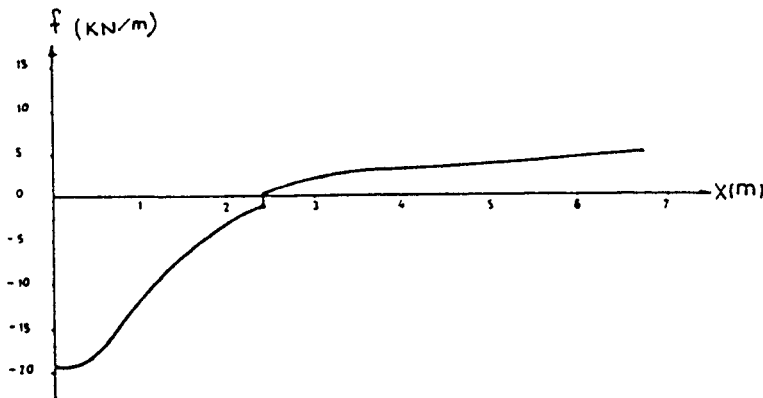
۲-۶ تحلیل شناور به صورت یک تیر جعبه ای:

پس از مشخص شدن شکل بدنه و تقسیم بندی فضای داخلی می توان تعداد مدولهای بدنه را که توسط دیوارهای آب بندی عرضی از یکدیگر جدا می شوند، مشخص نمود.

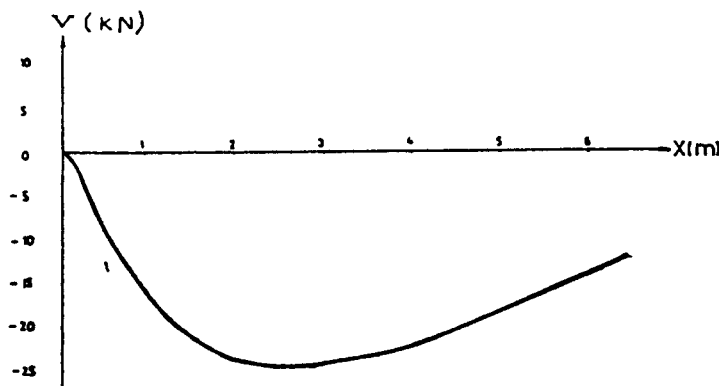
معمولاً هر یک از این مدولها جهت عملکرد خاصی انتخاب می شوند. در مورد این شناور، تعداد مدولهای انتخابی که با توجه به نیازهای آرشیفتکتی انتخاب گردیده است پنج عدد بوده که از سمت پاشنه به سمت سینه شناور دارای کاربری زیر می باشند:

- ۱- مدول سکون
- ۲- مدول ژنراتور
- ۳- مدول موتورخانه
- ۴- مدول آسایشگاه
- ۵- مدول چاه زنجیر و مخازن

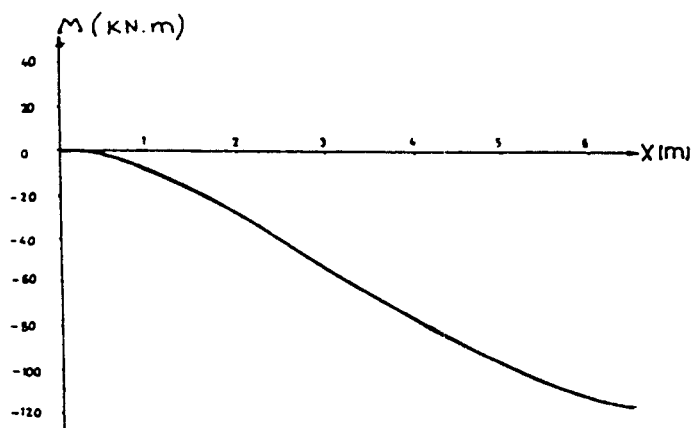
سپس باید به محاسبه بار خالص طولی که بر مدل تیر جعبه ای وارد می گردد، مبادرت نمود. بدین منظور لازم است که توزیع نیروی شناوری و نیروی وزن را با توجه به شکل بدنه، سیستم انتخابی سازه و وزن تجهیزات در طول سازه بدست آورد.



شکل (۱-۶): توزیع نیروی خالص $f(x)$ وارد بر شناور



شکل (۲-۶): توزیع نیروی برشی در طول دو مدول اول



شکل (۳-۶): توزیع لنگر خمشی در طول دو مدول اول

افزایش صلبیت عرضی دخالت دارند. در مدول شماره ۲ که جزء بحرانی ترین مدولها می باشد دو تیپ قاب عرضی وجود دارد. قاب شماره ۸ که علاوه بر بارهای جانبی، بار متمرکز ژنراتور را تحمل می کند و قاب شماره ۱۳ که شامل دیواره های مخزن سوخت ژنراتور بوده و لذا علاوه بر بارهای جانبی بار ناشی از مخزن سوخت را نیز تحمل می کند. برای تحلیل این دو تیپ قاب و دیواره های آب بندی انتهایی از برنامه FRAME که بدین منظور تدوین گردیده است استفاده می نمائیم. شکل (۴-۶) قاب شماره ۸ و بارگذاری آن را نشان می دهد. مدل تحلیلی و نحوه جزء بندی این قاب در شکل (۵-۶) به نمایش گذارده شده است. همانگونه که در این شکل ملاحظه می شود در محل اتصال اجزای تیر با اجزای مثلثی یا مستطیلی از جزء تیر خیلی سخت استفاده گردیده است.

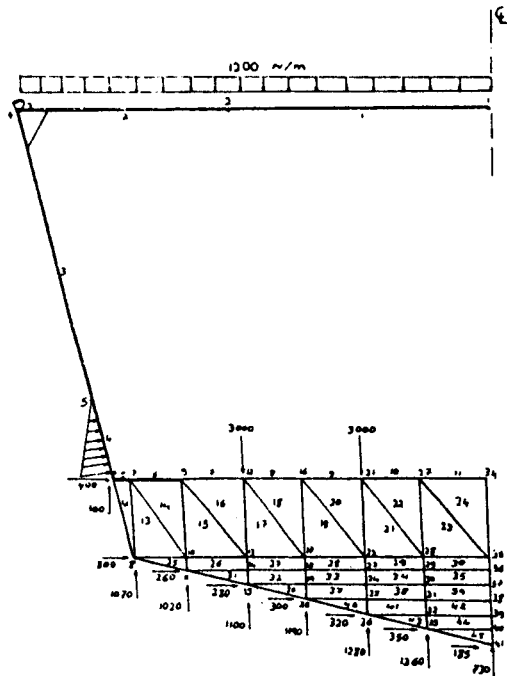
در این مثال منحنی توزیع بار $f(x)$ در طول دو مدول اول مطابق با شکل (۱-۶) بدست می آید. با انتگرال گیری از منحنی توزیع بار، نیروی برشی، $Q(x)$ و با انتگرال گیری از منحنی توزیع نیروی برشی، لنگر خمشی $M(x)$ در هر نقطه از شناور را مطابق با شکلهای (۲-۶) و (۳-۶) خواهیم داشت.

۳-۶- تحلیل مدولهای بدنه شناور:

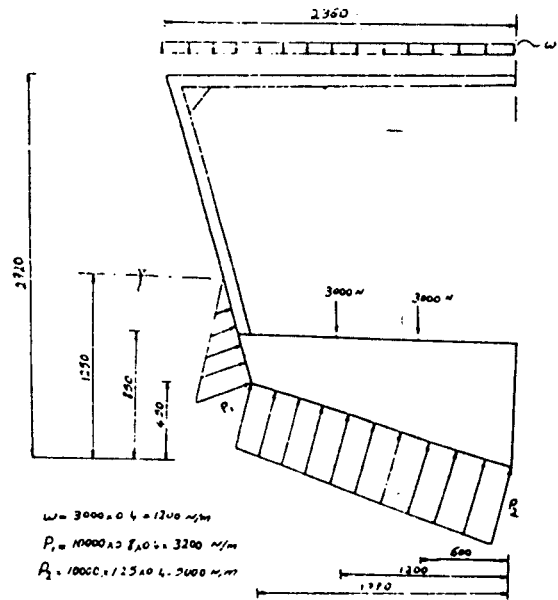
برای این شناور نیز تحلیل مدولهای بدنه، به دو بخش تحلیل سیستم باربر عرضی و تحلیل سیستم باربر طولی تفکیک می گردد که در ذیل به بررسی هر یک از آنها خواهیم پرداخت:

۱-۳-۶- تحلیل سیستم باربر عرضی شناور:

سیستم باربر عرضی این شناور را که در واقع سیستم اصلی باربر نیز می باشد قابهای عرضی تشکیل داده است که به فاصله ۴۰ سانتیمتر از یکدیگر واقع شده اند. در ابتدا و انتهای هر مدول دیواره های آب بندی قرار دارند که به نوعی در



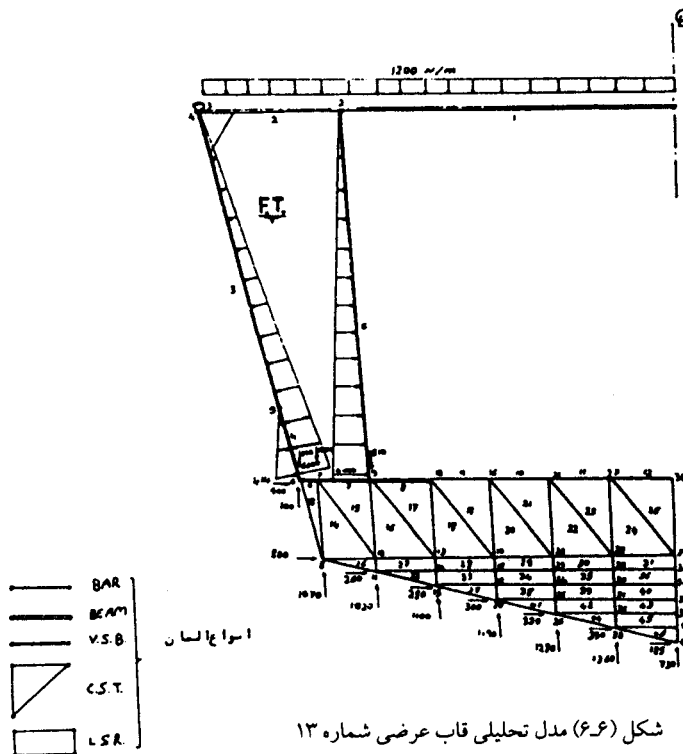
شکل (۵۶) المان بندی قالب عرضی شماره ۸



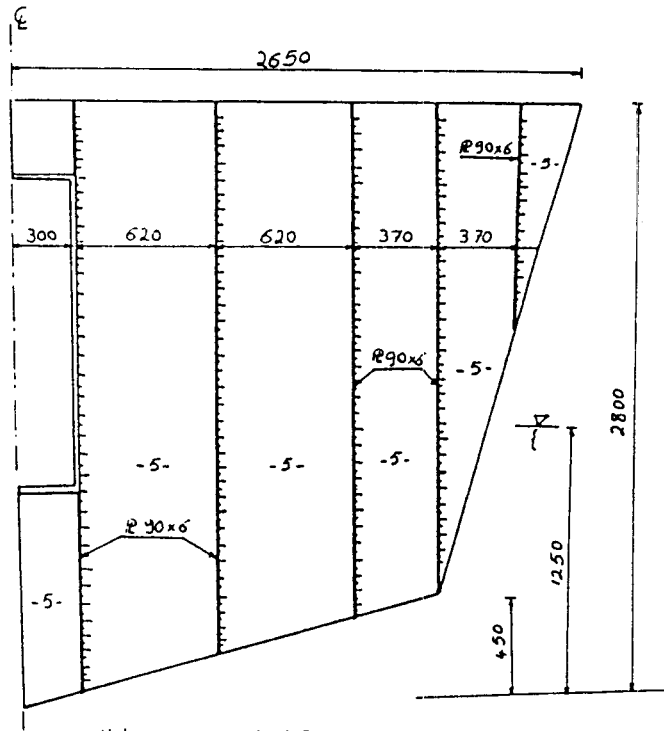
شکل (۴۶) قالب عرضی شماره ۸ و بارگذاری آن

انتهائی در مدول شماره ۲ (قاب شماره ۱۵) و مدل تحلیلی آن را نشان می دهد.

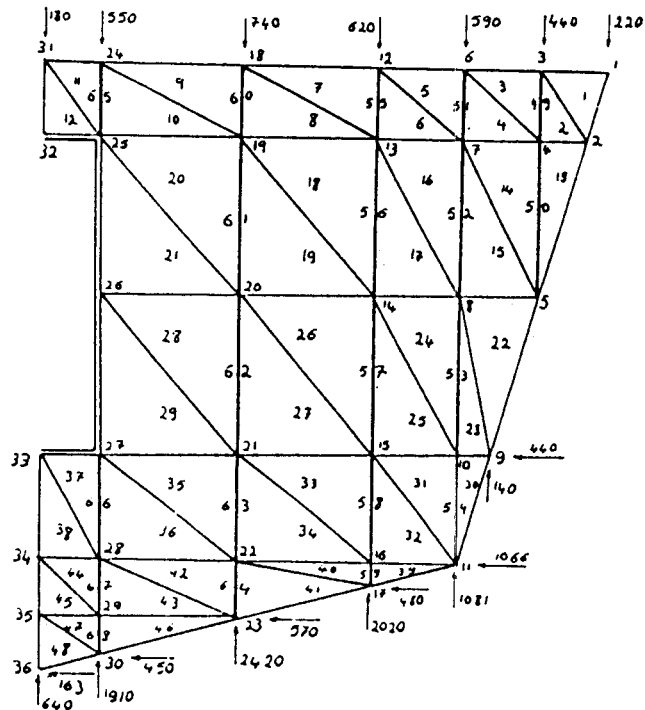
شکل (۶۶) مدل تحلیلی قاب شماره ۱۳ را نشان می دهد که علاوه بر شرایط حاکم بر قاب شماره ۸ دارای دیواره مخزن سوخت نیز می باشد و بالاخره شکل (۷۶) دیواره آب بندی



شکل (۶۶) مدل تحلیلی قاب عرضی شماره ۱۳



Bulkhead : FR-15



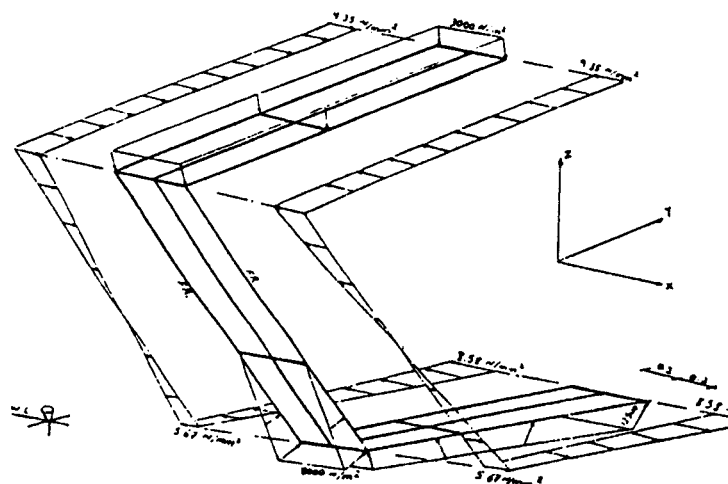
شکل (۷-۶) دیواره آب بندی انتهائی و مدل تحلیلی آن

۲-۳-۶- تحلیل سیستم باربر طولی شناور:

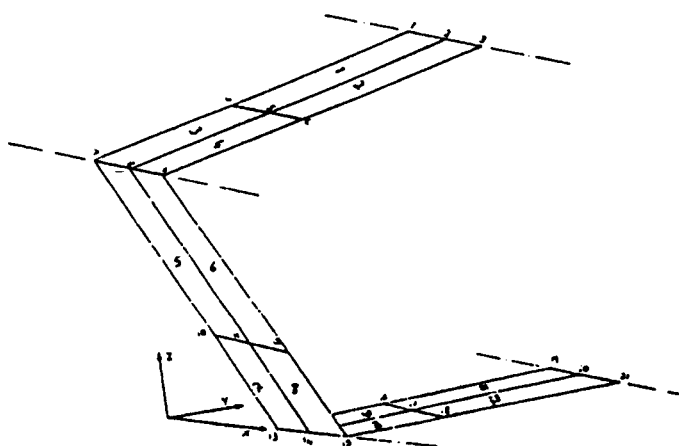
معمولاً جداره خارجی سازه کشتی را ورقهای نازک به همراه سخت‌کننده‌های طولی تشکیل می‌دهند، اما در این شناور فاصله بسیار کم بین قابهای عرضی سبب گردیده است تا در طراحی جداره خارجی آن از هیچ نوع سخت‌کننده‌های طولی استفاده نگردد.

تحلیل جداره خارجی شناور را بین قاب شماره ۸ و شماره ۹ با استفاده از برنامه SHELL انجام می‌دهیم.

نیروهای وارد بر این جداره همانگونه که در شکل (۸۶) نشان داده شده است. عبارت است از نیروی وزن خدومه، فشار هیدرواستاتیک و تنشهای حاصله از تحلیل "تیرجعبه‌ای جدار نازک"^۱. جزءبندی مدل تحلیلی مطابق شکل (۹۶) در فاصله ۲۰ سانتیمتری طولی صورت گرفته است. با محاسبه اطلاعات ورودی برنامه، انتخاب یک دستگاه مختصات و بارهای گره‌ای معادل می‌توان از این برنامه استفاده نمود.



شکل (۸۶) نیروهای وارده بر جدار خارجی



شکل (۹۶) المان‌بندی مدل تحلیلی

۷-۱-۷ کنترل و نتیجه گیری:

با مقایسه نتایج بدست آمده از محاسبات مستقیم و نتایج برنامه‌های کامپیوتری با مقادیر مجاز آئین نامه ABS^۱ به کنترل و نتیجه گیری در مورد طراحی سازه مورد مثال می‌پردازیم.

۷-۱-۷ کنترل تنش:

تنشهای بدست آمده از محاسبات مستقیم در بخش تحلیل "تیر جعبه‌ای جدار نازک"^۲ و نتایج برنامه‌های کامپیوتری در بحرانی‌ترین حالت دارای مقادیر ماکزیمم زیر می‌باشند:

$$\text{تنش مجاز } 13.12 \text{ N/mm}^2 < 150 \text{ N/mm}^2 = \text{ماکزیمم تنش خمشی مقایسه‌ای تیرجعبه‌ای}$$

$$\text{تنش مجاز } 5.16 \text{ N/mm}^2 < 104 \text{ N/mm}^2 = \text{ماکزیمم تنش برشی قائم تیرجعبه‌ای}$$

$$\text{تنش مجاز } 13.12 \text{ N/mm}^2 < 150 \text{ N/mm}^2 = \text{ماکزیمم تنش نرمال ورقها در جهت محور X ها}$$

$$\text{تنش مجاز } 11.70 \text{ N/mm}^2 < 150 \text{ N/mm}^2 = \text{ماکزیمم تنش نرمال ورقها در جهت محور Y ها}$$

$$\text{تنش مجاز } 1.70 \text{ N/mm}^2 < 150 \text{ N/mm}^2 = \text{ماکزیمم تنش برشی ورقها}$$

۷-۲-۷ کنترل خیز:

$$\text{خیز مجاز } L/D = 6.68 < 15 = \text{ماکزیمم خیز طولی}$$

$$\text{خیز مجاز } h/l = .108 < .128 = \text{ماکزیمم خیز موضعی}$$

۷-۳-۷ کنترل ضخامت:

$$\text{مدول مقطع مجاز } 52334 \text{ cm}^3 > 20760 \text{ cm}^3 = \text{مدول مقطع موجود در سازه شناور}$$

۷-۴-۷ کنترل ضخامت:

$$\text{ضخامت مجاز } 5 \text{ mm} > 4.85 \text{ mm} = \text{ضخامت موجود در پوسته جانبی}$$

$$\text{ضخامت مجاز } 6 \text{ mm} > 2.50 \text{ mm} = \text{ضخامت موجود در پوسته کف}$$

$$\text{ضخامت مجاز } 5 \text{ mm} > 3.40 \text{ mm} = \text{ضخامت موجود در عرشه اصلی}$$

$$\text{ضخامت مجاز } 5 \text{ mm} < 5.36 \text{ mm} = \text{ضخامت موجود در دیواره‌های آب‌بندی}$$

۷-۵-۷ نتیجه:

با توجه به مقایسه فوق ملاحظه می‌گردد که شناور مزبور به لحاظ پاسخگوئی به تنشهای وارده دارای طراحی محافظه کارانه می‌باشد. به لحاظ خیز طولی و موضعی و همچنین مدول مقطع لازم کاملاً رضایت‌بخش بوده و به لحاظ ضخامتهای انتخابی به جز در مورد دیواره آب‌بندی دارای طرح مناسبی می‌باشد. در مجموع چنین به نظر می‌رسد که برای شناور فوق می‌توان با حفظ ضخامتهای انتخابی مبادرت به افزایش فاصله قابهای عرضی نموده و از وزن سازه شناور به مقدار زیادی کاست بدون اینکه تأثیر سوئی در کارائی و سرویس‌دهی آن ایجاد گردد. این پژوهش با استفاده از اعتبارات شورای پژوهشی دانشگاه تهران انجام گردیده است، که بدینوسیله از ایشان تشکر می‌گردد.

- 1- Hughes Owen F., "Ship Structural Design", N.Y. John Wiley [1983].
- 2- Rawson K.J. and Tupper E.C., "Basic Ship Theory" Vol. 1 and 2 Longman Scientific and Technical [1984].
- 3- Clayton B.R. and Bishop R.E.D., "Mechanics of Marine Vehicles", Arrowsmith Ltd., Bristol [1982] (p.p. 440-494)
- 4- Muckle W., "Strength of Ships' Structures", Edward Arnold Ltd., London [1967](p.p. 168-365)
- 5- Comstock J.P., "Principles of Naval Architecture", The Society of Naval Architects and Marine Engineers, N.Y. [1967]
- 6- A B S, "American Bureau of Shipping", Rules for Building and Classing; Steel Vessels, N.Y. [1974]
- 7- "Ship Design and Constructions", The Society of Naval Architects and Marine Engineers ,N.Y. [1967]
- 8- Zienkiewicz O.C. and Taylor R.L., "The Finite Element Method", 4th ed. U.K. Mc Graw-Hill [1989]
- 9- Zienkiewicz O.C., "The Finite Element Method in Engineering Sience", N.Y. Mc Graw-Hill [1977]
- 10- Timoshenko S. and Woinowsky - Krieger, "Theory of plates and Shells", N.Y. Mc Graw -Hill [1959]
- 11- Clough R. and Tocher, "Finite Element Matrices for Analysis of Plates In Bending" N.Y. Mc Graw-Hill [1975]

۱۲- جزوه درسی "روش اجزاء محدود" دکتر ایرج محمودزاده کنی، دانشکده فنی - دانشگاه تهران

۱۳- طرح پژوهشی ۹۵۵، "کاربرد روش اجزاء محدود در تحلیل سازه کشتی"، دکتر ایرج محمودزاده کنی، مهندس الیهیاری،

[۱۳۷۱]مهرداد، دانشکده فنی دانشگاه تهران