بسمه تعالی

دانشکده مهندسی مکانیک

مثال‌های درس سکوهای فراساحل در خصوص محاسبه پارامتر RSR (Reserved Strength Ratio)

استاد درس:

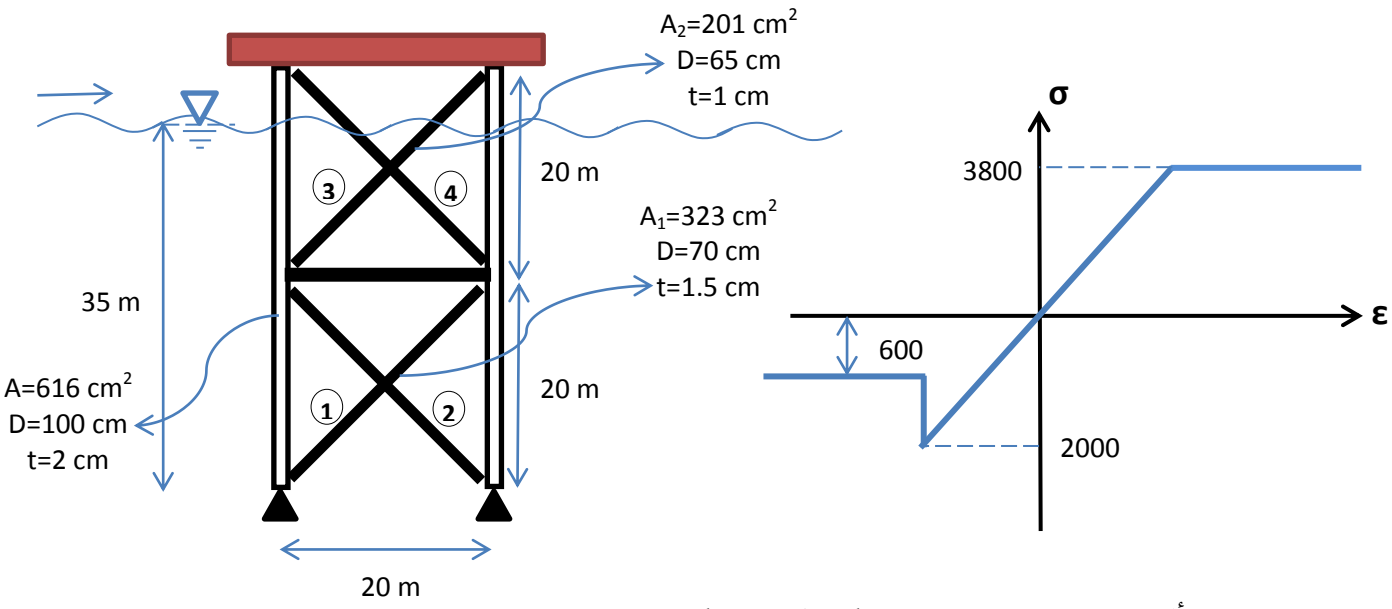
دکتر تابش پور

تهیه‌کننده:

محمدهادی عرفانی

بهار ۱۳۹۵

مثال ۱: مطلوبست محاسبه پارامتر RSR برای سکوی تیپ زیر:



فرضیات صورت مسأله: جرم عرشه برابر با جرم یک طبقه از سکو

ارتفاع بیشینه (H_{max}) موج ۱۰۰ ساله: ۱۰ متر و طول موج آن: ۱۲۰ متر

ضریب RSR برابر است با:

$$RSR=F_{collapse}/F_{100}$$

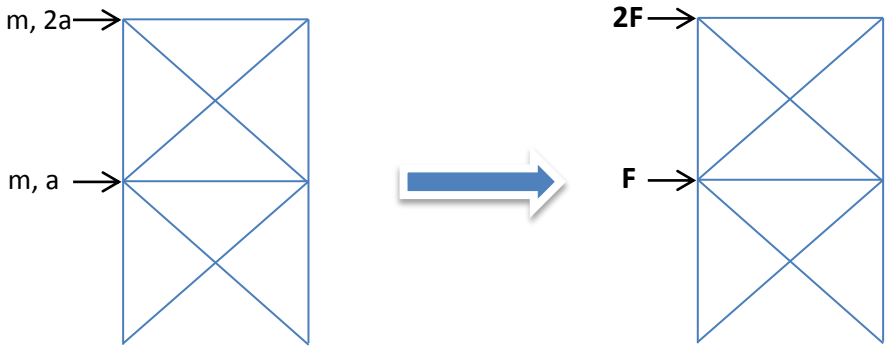
یعنی برابر با نسبت ظرفیت واژگونی به بار با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله. لذا محاسبه ظرفیت واژگونی سازه و در واقع همان محاسبه و رسم منحنی ظرفیت آن، اولین مرحله از محاسبه این ضریب خواهد بود بنابراین:

گام نخست: انتخاب الگوی مناسب بار جانبی

دو رویکرد داریم:

- زلزله ← در اینجا جرم‌ها مهم است نه مساحت پهنای اعضا.
- موج ← مساحت پهنای اعضا مهم است.

الگوی بار زلزله را بر اساس توزیع جرم و شتاب در ارتفاع انتخاب می‌کنیم پس:



ابتدا شیب منحنی یا همان k (سختی) را محاسبه می‌کنیم:

$$k_1 = \frac{EA}{L}Cos^2\theta = k_2 \;\rightarrow \left(\text{سختی تراز}\right)\; k^{(1)} = k_1 + k_2 = \frac{2EA_1}{L}Cos^2\theta$$
$$= 228396\ \frac{kg}{cm} = 228.4\ \frac{ton}{cm}$$
$$k^{(2)} = k_1 + k_2 = \frac{2EA_2}{L}Cos^2\theta = 142128\ \frac{kg}{cm} = 142.13\ \frac{ton}{cm}$$

$$\rightarrow\ k = \frac{k^{(1)}k^{(2)}}{k^{(1)} + k^{(2)}} = 87610\ \frac{kg}{cm} = 87.61\ \frac{ton}{cm}$$

حال باید بررسی شود که نیروی لازم برای کمانش عضو ٤ بیشتر است یا عضو ٢:

برای عضو ٢:

$$P_{cr}|_2 = 323 \times 2000 = 646\ ton$$
$$3F = 2PCos\theta \rightarrow F = 304.53\ ton$$

برای عضو ٤:

$$P_{cr}|_2 = 201 \times 2000 = 402\ ton$$
$$2F = 2PCos\theta \rightarrow F = 284.26\ ton$$

پس عضو ٤ ابتدا کمانش می‌کند.

$$\rightarrow 3F = 852.77\ ton$$

افت نیرو پس از کمانش:

$$P = (2000 - 600) \times 201 = 281.4\ ton$$
$$F = 281.4\ Cos\theta = 198.98\ ton$$
$$F_{res} = 852.77 - 198.98 = 653.79\ ton$$

از اینجا به بعد، سختی k_4 برداشته می‌شود بنابراین برای محاسبه k ثانویه خواهیم داشت:

$$k^{(1)} = 228.4\ \frac{ton}{cm}$$
$$k^{(2)} = 71.06\ \frac{ton}{cm}$$

$$\rightarrow k = 54.2\ \frac{ton}{cm}$$

حال باید بررسی گردد که از این پس عضو ۲ زودتر (با نیروی کمتری) کمانش می‌کند و یا اینکه عضو ۳ تحت کشش به تسلیم می‌رسد. می‌دانیم که عضو ٤ دیگر سختی ندارد و تنها نیروی زیر را تحمل می‌کند:

$$P_4 = 600 \times 201 = 120.6\ ton$$

نیروی تسلیم عضو ۳ برابر است با:

$$P_{yield}|_3 = 3800 \times 201 = 763.8\ ton$$

بنابراین نیروی لازم برای تسلیم عضو ۳ برابر است با:

$$2F = (P_4 + P_{yield}|_3) \times Cos\theta \rightarrow F = 312.68\ ton$$

و نیروی کمانش عضو ۲ برابر با ۳۰٤/۵۳ تن محاسبه گردیده بود.

بنابراین کمانش عضو ۲ زودتر از تسلیم کششی عضو ۳، رخ می‌دهد.

$$\rightarrow 3F = 913.58\ ton$$

افت نیرو پس از کمانش:

$$P = (2000 - 600) \times 323 = 452.2\ ton$$
$$F = 452.2\ Cos\theta = 319.75\ ton$$
$$F_{res} = 913.58 - 319.75 = 593.83\ ton$$

از اینجا به بعد، سختی k_2 نیز برداشته می‌شود بنابراین برای محاسبه k جدید خواهیم داشت:

$$k^{(1)} = 114.2\ \frac{ton}{cm}$$
$$k^{(2)} = 71.06\ \frac{ton}{cm}$$

$$\rightarrow k = 43.8\ \frac{ton}{cm}$$

در مرحله بعد، تسلیم کششی عضو ۱ و عضو ۳ مقایسه می‌گردد:

نیروی محوری تسلیم عضو ۱ برابر است با:

$$P_{yield}|_3 = 3800 \times 323 = 1227.4\ ton$$

می‌دانیم که عضو ۲ دیگر سختی ندارد و تنها نیروی زیر را تحمل می‌کند:

$$P_4 = 600 \times 323 = 193.8\ ton$$

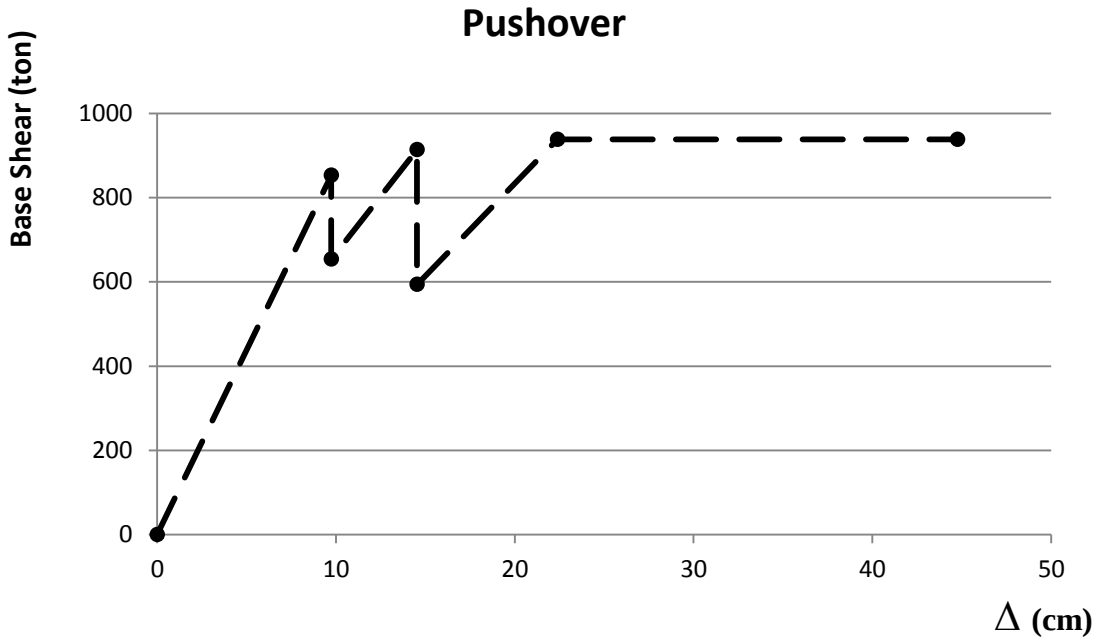
بنابراین نیروی افقی لازم برای تسلیم عضو ۱ برابر است با:

$$3F = (P_2 + P_{yield}|_1) \times Cos\theta \rightarrow F = 334.98\ ton$$

بنابراین تسلیم کششی عضو ۳ سریع‌تر از تسلیم عضو ۱ اتفاق خواهد افتاد.

$$\rightarrow 3F = 938.04\ ton$$

لذا منحنی ظرفیت سازه در این حالت (همان منحنی Pushover یا همان منحنی برش پایه نسبت به جابجایی عرشه) مطابق شکل زیر خواهد بود:



چنانچه بیشترین مقدار این نیرو را به‌عنوان ظرفیت نهایی سکو انتخاب کنیم (البته این فرض نیاز به بحث و بررسی بیشتر خواهد داشت) داریم:

$$\rightarrow F_{collapse} = 938.04\ ton$$

حال بیشینه نیروی وارده از طرف موج ۱۰۰ ساله به این سازه سکوی دوبعدی محاسبه می‌گردد:

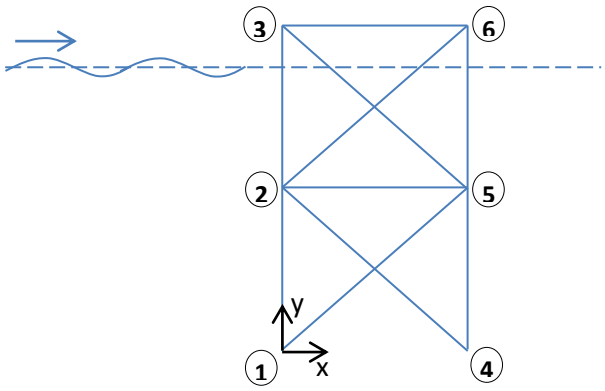
برای سهولت محاسبات از تئوری ایری استفاده می‌کنیم. به ازای $\omega t=6$ مقادیر نیرو را به‌دست می‌آوریم. مقدار $C_D=1$ و $C_I=2$ فرض می‌شود.

از معادلات زیر بر اساس نیروی موریسون، استفاده خواهد شد:

$$F = F_D + F_I$$

$$F_D = \frac{\rho C_D D}{32k}(\omega H)^2 \left(\frac{\sinh 2ky + 2ky}{sinh^2 kh}\right)|\cos \omega t| \cos \omega t$$

$$F_I = -\frac{\rho C_I}{2k}\frac{\pi D^2}{4}\omega^2 H \frac{\sinh ky}{\sinh kh}\sin \omega t$$



برای پایه‌های قائم داریم:

$$k = 0.0524\ m^{-1}\ , \omega = gk\tanh kh = 0.698\ \frac{rad}{sec}\ , H = 10m\ , \rho = 1025\ \frac{kg}{m^3}, h = 35\ m$$

$$F_{1-3} = 3218(\sinh 2ky + 2ky)|\cos \omega t|\cos \omega t - 24630 \sinh ky \sin \omega t$$

$$y = h + \eta = 35 + 5\cos \omega t$$

$$F_{4-6} = 3218(\sinh 2ky + 2ky)|\cos(\omega t - 20k)|\cos(\omega t - 20k) - 24630 \sinh ky \sin(\omega t - 20k)$$

$$y = h + \eta = 35 + 5\cos(\omega t - 20k)$$

برای $\omega t=6$:

$$\omega t = 6 \rightarrow y = h + \eta = 35 + 5\cos \omega t = 39.8\ m\ \rightarrow F_{1-3} = 135.38\ kN$$

$$\omega t = 6 \rightarrow y = h + \eta = 35 + 5\cos(\omega t - 20k) = 36.19\ m\ \rightarrow F_{4-6} = 82.494\ kN$$

برای اعضای قطری خواهیم داشت:

عضو ۶-۲:

$$\theta = 0\ , \emptyset = 45^\circ\ \rightarrow c_x = 0.707\ , c_y = 0.707\ , c_z = 0$$

$$f_x = 512.5Vu_n + 1610.07a_{nx}$$

$$V^2 = \frac{1}{2}(u - v)^2$$

برای عضو ۶-۲، مختصات x و y تا سطح آب تغییر می‌کند. تغییرات سطح آب را نیز برای این عضو باید منظور نمود.

$$y = 35 + 5\cos(\omega t - kx) \quad , \quad y = 20 + x$$

پس:

$$x = 15 + 5\cos(\omega t - kx)$$

با سعی و خطا داریم:

$$\omega t = 6 \rightarrow x = 16.26\ m$$

ارتفاع سطح آب در عضو برابر با ۳۶/۲۶ متر است. طول این عضو تحت اثر موج برابر است با:

$$L = 15.86\sqrt{2} = 23\ m$$

این طول را به دو قسمت با طول ۱۱/۵ متر تقسیم کرده و نیروی وارد بر هر قسمت محاسبه می‌شود:

x	y	u	v	ax	ay	un	vn	V	anx	any	fx
4.07	24.07	1.92	-0.88	-0.73	-1.14	1.40	-1.40	1.98	0.21	-0.21	1761.19
12.20	32.20	1.93	-2.38	-1.78	-1.26	2.16	-2.16	3.05	-0.26	0.26	2955.79

پس کل نیروی وارد بر این عضو مایل برابر است با:

$$F_{2-6} = (1761.19 + 2955.79) \times 11.5 = 54.234\ kN$$

نیروی وارد بر عضو ۳-۵ نیز برابر همین مقدار خواهد بود.

از نیروی وارد بر دو عضو ۵-۱ و ٤-۲ به‌دلیل قرارگیری در عمق و کم‌بودن نیروی وارده از طرف موج بر آنها، صرفنظر می‌کنیم.

بنابراین کل نیروی وارد بر اعضا در راستای افق برابر است با:

$$F_{Total} = 135.38 + 82.494 + 2 \times 54.234 = 326.34\ kN$$

پس مقدار F_{100} نیز در رابطه محاسبه ضریب RSR محاسبه گردید. در نتیجه این ضریب برابر خواهد شد با:

$$RSR = \frac{F_{collapse}}{F_{100}} = \frac{938.04}{326.34} = 28.74$$

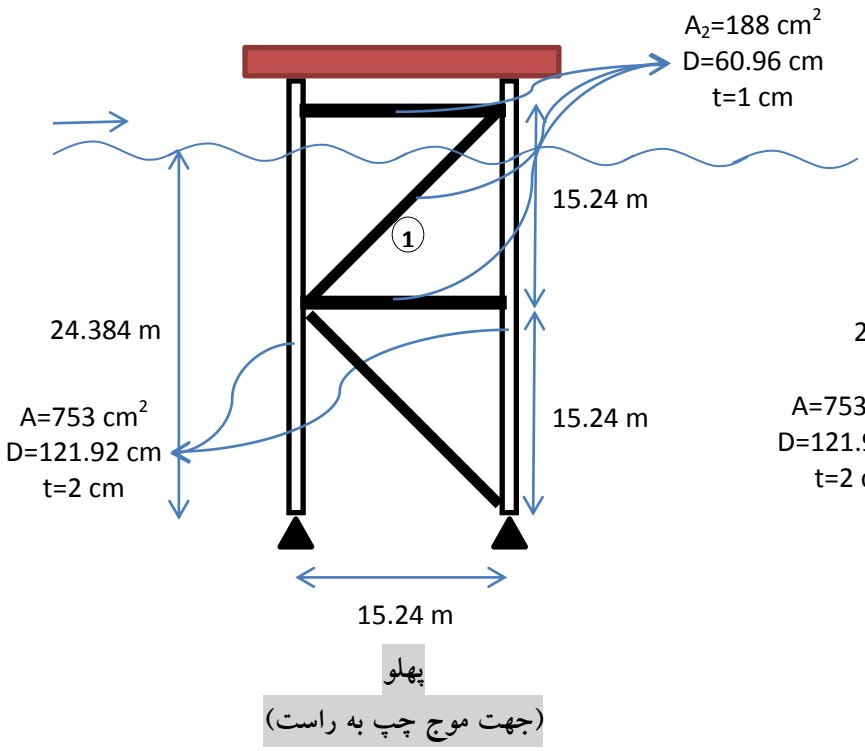
بنابراین این سازه، با این ابعاد و مشخصات، خیلی بیشتر از مقادیر ۱/۵ و ۲ که حدود مجاز آیین‌نامه‌ای می‌باشند بوده و لذا در مقابل موج ۱۰۰ ساله با ارتفاع ٦ متر، بسیار مقاوم خواهد بود.

تمرین: به ازای چه نسبتی از وزن عرشه به وزن طبقات، این ضریب برابر ۲ خواهد شد؟

تمرین: با ثابت نگاه داشتن وزن عرشه، به ازای چه ابعادی از مهاربندها، این ضریب به مقدار ۲ خواهد رسید؟

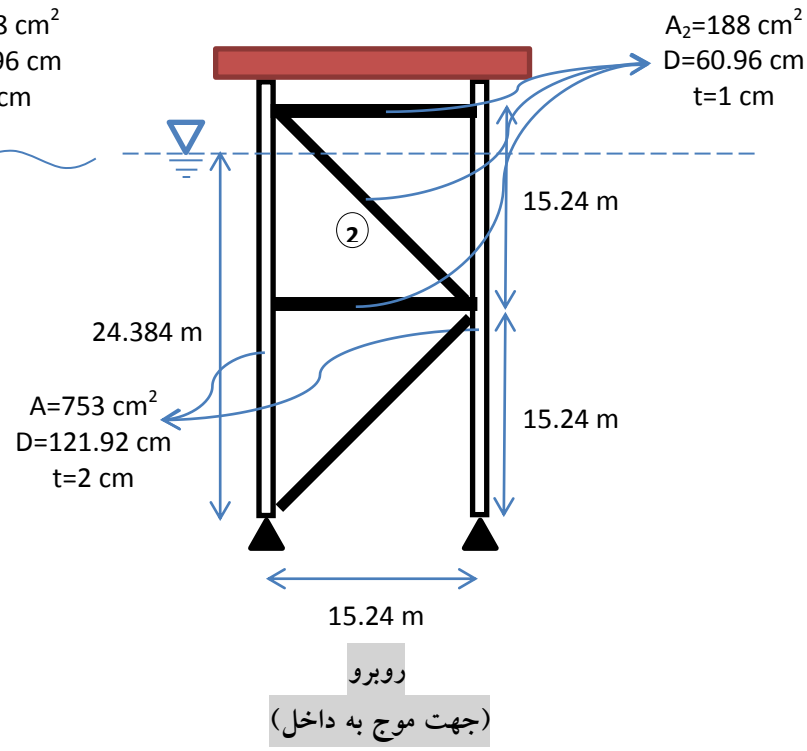
تمرین: با ثابت نگاه داشتن وزن عرشه و ابعاد، به ازای چه ارتفاعی از موج، این ضریب برابر ۲ خواهد شد؟

مثال ۲: مطلوبست محاسبه پارامتر RSR برای سکوی تیپ زیر:



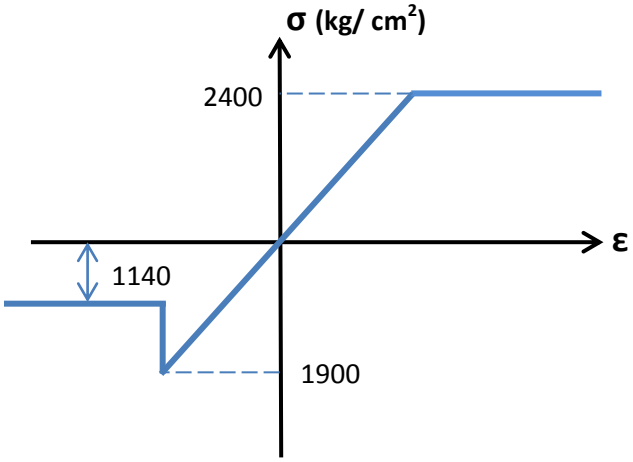
پهلو

(جهت موج چپ به راست)



روبرو

(جهت موج به داخل)



فرضیات صورت مسأله: جرم عرشه برابر با ۹۰۰ تن

ارتفاع بیشینه (H_{max}) موج ۱۰۰ ساله: ۱۰ متر و طول موج آن: ۱۵۰ متر

ضریب RSR برابر است با:

$$RSR=F_{collapse}/F_{100}$$

یعنی برابر با نسبت ظرفیت واژگونی به بار با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله. لذا محاسبه ظرفیت واژگونی سازه و در واقع همان محاسبه و رسم منحنی ظرفیت آن، اولین مرحله از محاسبه این ضریب خواهد بود بنابراین:

گام نخست: انتخاب الگوی مناسب بار جانبی

دو رویکرد داریم:

- زلزله ← در اینجا جرم‌ها مهم است نه مساحت پهنای اعضا.
- موج ← مساحت پهنای اعضا مهم است.

الگوی بار زلزله را بر اساس توزیع جرم و شتاب در ارتفاع انتخاب می‌کنیم.

برای به‌دست آوردن توزیع جرم، دوم جرم متمرکز، یکی در تراز میانی و دیگری در تراز عرشه در نظر گرفته می‌شود. جرم متمرکز در تراز عرشه، شامل وزن عرشه به‌علاوه نیمی از وزن طبقه بوده و جرم متمرکز در تراز میانی، شامل مجموع نیمی از وزن تراز فوقانی و نیمی از وزن تراز تحتانی می‌باشد که وزن ترازها، از وزن پایه‌ها و تیرهای افقی و مهاربندهای مایل محاسبه می‌شود. همچنین پایه‌ها به‌صورت پرشده از آب در نظر گرفته می‌شوند. همچنین فرض می‌شود ارزیابی‌های محیطی نشان داده‌اند که به‌دلیل خوردگی، ۳ میلی‌متر از ضخامت تمامی اعضا کم شده است؛ بنابراین داریم:

وزن اعضای قائم:

$$4 \times \left(\left(7850 \times \frac{\pi}{4} \times (121.92^2 - (121.92 - 2 \times 1.7)^2) \times 10^{-4} \times 15.24 \right) + \left(1025 \times \frac{\pi}{4} \times (121.92 - 2 \times 1.7)^2 \times 10^{-4} \times 15.24 \right) \right) = 99.66\ ton$$

وزن اعضای افقی:

$$4 \times \left(7850 \times \frac{\pi}{4} \times (60.96^2 - (60.96 - 2 \times 0.7)^2) \times 10^{-4} \times 15.24 \right) = 6.34\ ton$$

وزن اعضای مایل:

$$4 \times \left(7850 \times \frac{\pi}{4} \times (60.96^2 - (60.96 - 2 \times 0.7)^2) \times 10^{-4} \times \frac{21.55}{2} \right) = 4.48\ ton$$

بنابراین مقدار جرم متمرکز در تراز میانی برابراست با:

$$m^{(1)} = sum(99.66 + 6.34 + 4.48\ ) = 110.49\ ton$$

همانطور که پیش‌تر نیز توضیح داده شد، نیمی از جرم پایه‌ها، که البته تا ارتفاع مشخصی از آنها پر از آب و بقیه، خالی است، به‌علاوه جرم اعضای افقی در تراز فوقانی و نیمی از جرم مهاربندها، به‌صورت یک جرم متمرکز در تراز عرشه به‌همراه جرم خود عرشه قرار خواهند گرفت. بنابراین:

وزن اعضای قائم:

$$\frac{1}{2}\times\left(4\times\left(7850\times\frac{\pi}{4}\times(121.92^2-(121.92-2\times1.7)^2)\times10^{-4}\times15.24\right)\right)$$
$$+\left(1025\times\frac{\pi}{4}\times(121.92-2\times1.7)^2\times10^{-4}\right.$$
$$\left.\times\left(24.384-15.24-\frac{15.24}{2}\right)\right)=17.09\ ton$$

وزن اعضای افقی:

$$4\times\left(7850\times\frac{\pi}{4}\times(60.96^2-(60.96-2\times0.7)^2)\times10^{-4}\times15.24\right)=6.34\ ton$$

وزن اعضای مایل:

$$4\times\left(7850\times\frac{\pi}{4}\times(60.96^2-(60.96-2\times0.7)^2)\times10^{-4}\times\frac{21.55}{2}\right)=4.48\ ton$$

وزن جرم متمرکز در تراز عرشه حاصل از وزن نیم طبقه:

$$m_1=sum(17.09+6.34+4.48)=27.91\ ton$$

وزن عرشه:

$$m_2=900\ ton$$

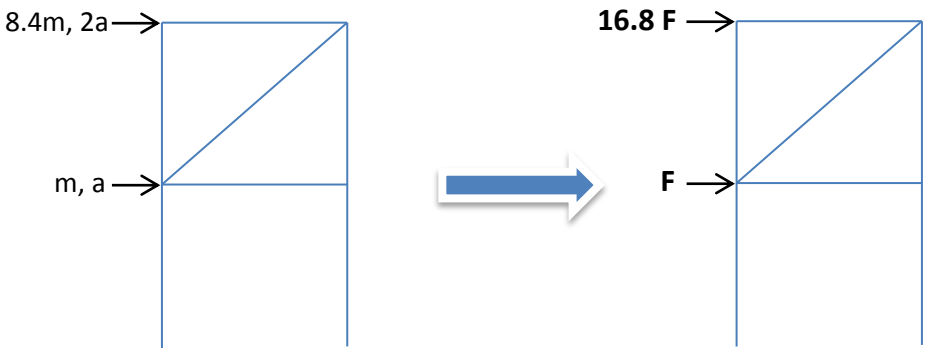
کل وزن جرم متمرکز در تراز عرشه:

$$m^{(2)}=m_1+m_2=927.91\ ton$$

بنابراین نسبت جرم متمرکز تراز عرشه به جرم متمرکز تراز میانی برابراست با:

$$\frac{m^{(2)}}{m^{(1)}}=\frac{927.91}{110.49}=8.4$$

پس:



نکته: درست است که مطابق شکل صورت مسأله، عضو قطری در تراز فوقانی، تحت اثر نیروی موج در کشش قرار می‌گیرد اما طبق گزارش A review of the ultimate strength of tubular framed structures[1]، پارامتر RSR برای امواج با جهات مختلف اندازه‌گیری می‌شود و کمترین مقدار آن به‌عنوان ضریب RSR آن سازه معرفی می‌گردد. در این مثال نیز فرض می‌شود موج ۱۰۰ ساله صورت مسأله، در جهت مخالف نیز به سازه تابیده شده ولذا عضو قطری تحت فشار قرار گرفته و به‌دلیل وقوع کمانش در این عضو، نیروی Collapse سازه و در نتیجه پارامتر RSR آن، مقدار کمتری به‌دست خواهد آمد.

ابتدا شیب منحنی یا همان k (سختی) را محاسبه می‌کنیم:

$$k = \frac{EA}{L}Cos^2\theta \rightarrow \left(\text{سختی تراز}\right)\ k = \frac{2 \times 10^{10} \times 132.52}{21.55}Cos^2 45 = 61486\ \frac{kg}{cm}$$
$$= 61.49\ \frac{ton}{cm}$$

به‌دلیل وجود دو عضو در دو قاب مقابل هم، سختی کل سازه برابر است با:

$$k_{Total} = 2 \times k = 2 \times 61.49 = 122.97\ \frac{ton}{cm}$$

حال باید بررسی شود که نیروی لازم برای کمانش دو عضو مورب چقدر است:

$$P_{cr}|_2 = 132 \times 1900 = 252\ ton$$
$$16.8F = 2PCos\theta \rightarrow F = 21.2\ ton$$

پس:

$$\rightarrow 17.8F = 377.28\ ton$$

افت نیرو پس از کمانش این دو عضو مورب:

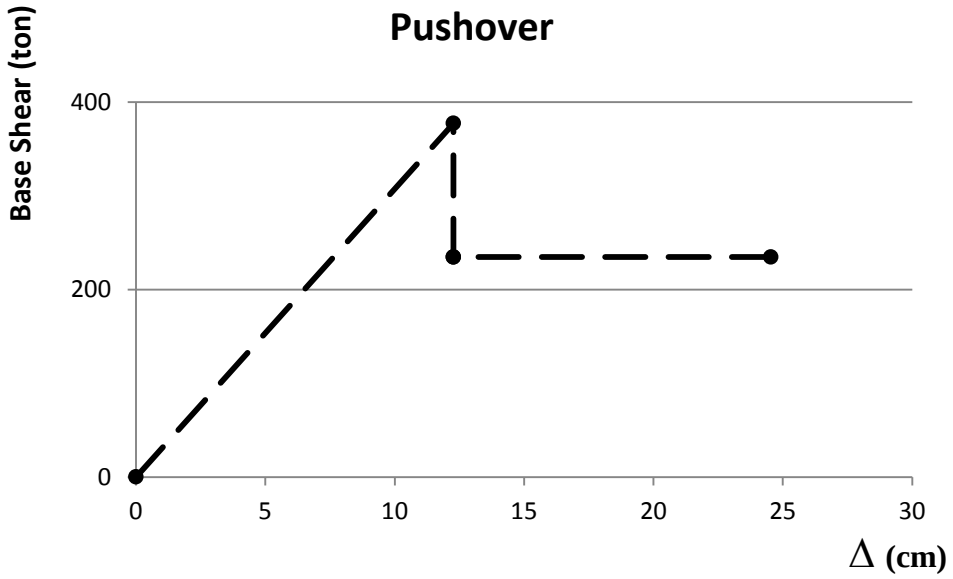
$$P = (1900 - 1140) \times 132 = 100.71\ ton$$
$$F = 2 \times 100.71\ Cos\theta = 142.43\ ton$$

[1] "A review of the ultimate strength of tubular framed structure", H. M. Bolt, C. J. Billington and J. K. Ward, Billington Osborne-Moss Engineering Limited, HSE Books, First published 1996.

$$F_{res} = 377.28 - 142.43 = 234.85\ ton$$

از اینجا به بعد، سیستم همین مقدار نیرو را تحمل می‌کند.

لذا منحنی ظرفیت سازه در این حالت (همان منحنی Pushover یا همان منحنی برش پایه نسبت به جابجایی عرشه) مطابق شکل زیر خواهد بود:



چنانچه بیشترین مقدار این نیرو را به‌عنوان ظرفیت نهایی سکو انتخاب کنیم (البته این فرض نیاز به بحث و بررسی بیشتر خواهد داشت) داریم:

$$\rightarrow F_{collapse} = 377.28\ ton$$

البته قابل ذکر است که تمامی اتصالات مفصلی فرض شده ولذا سختی واقعی، بیشتر از مقادیر فوق است.

حال بیشینه نیروی وارده از طرف موج ۱۰۰ ساله به این سازه سکوی سه‌بعدی محاسبه می‌گردد:

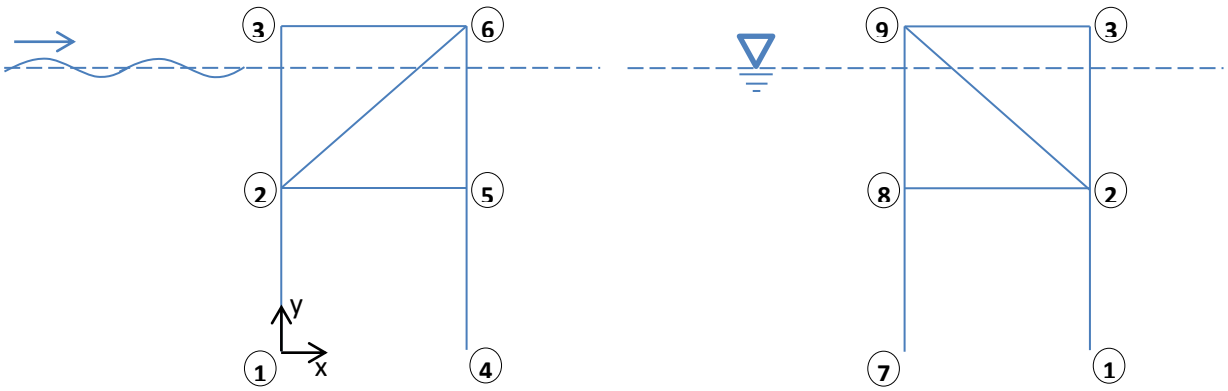
برای سهولت محاسبات از تئوری ایری استفاده می‌کنیم. به ازای $\omega t=6$ مقادیر نیرو را به‌دست می‌آوریم. مقدار $C_D=1$ و $C_I=2$ فرض می‌شود. بخاطر Marine Growth، قطر خارجی همه اعضا، ۵ سانتی‌متر افزایش می‌یابد.

از معادلات زیر بر اساس نیروی موریسون، استفاده خواهد شد:

$$F = F_D + F_I$$

$$F_D = \frac{\rho C_D D}{32k}(\omega H)^2 \left(\frac{\sinh 2ky + 2ky}{sinh^2 kh}\right)|\cos \omega t| \cos \omega t$$

$$F_I = -\frac{\rho C_I}{2k}\frac{\pi D^2}{4}\omega^2 H \frac{\sinh ky}{\sinh kh}\sin \omega t$$



برای پایه‌های قائم:

$$k = 0.0419\ m^{-1}\ ,\omega = gk\tanh kh = 0.563\ \frac{rad}{sec}\ ,H = 10m\ ,\rho = 1025\ \frac{kg}{m^3}, h = 24.384\ m$$

$$F_{1-3} = 60778(\sinh 2ky + 2ky)|\cos\omega t|\cos\omega t - 137819\sinh ky\sin\omega t$$

$$y = h + \eta = 24.384 + 8.5\cos\omega t$$

$$F_{4-6} = 60778(\sinh 2ky + 2ky)|\cos(\omega t - 15.24k)|\cos(\omega t - 15.24k) - 137819\sinh ky\sin(\omega t - 15.24k)$$

$$y = h + \eta = 24.384 + 8.5\cos(\omega t - 15.24k)$$

برای $\omega t = 6$:

$$\omega t = 6 \rightarrow y = h + \eta = 24.384 + 8.5\cos\omega t = 32.55\ m\ \rightarrow F_{1-3} = 649.359\ kN$$

$$\omega t = 6 \rightarrow y = h + \eta = 24.384 + 8.5\cos(\omega t - 15.24k) = 29.52\ m\ \rightarrow F_{4-6} = 291.794\ kN$$

در مختصات *x=0* و *x=15.24*، هر کدام دو شمع وجود دارد لذا:

$$F_P = 2(F_{1-3} + F_{4-6}) = 2(649.359 + 291.794) = 1882.307\ kN$$

برای اعضای افقی:

- اعضای افقی سطح روبرو:

$$\theta = -90°\ ,\emptyset = 90°\ \rightarrow c_x = 0\ ,c_y = 0\ ,c_z = -1$$

$$f_x = 338.05Vu_n + 700.5a_{nx}$$

مقادیر سرعت و شتاب برای اعضای ۸-۲ و ۱۱-۵ به‌ترتیب با مختصات *x=0* و *y=15.24* و *x=15.24* و *y=15.24* به‌دست خواهند آمد.

x	y	u	v	ax	ay	un	vn	V	anx	any	fx
0.00	15.24	4.60	-0.75	-0.75	-1.46	4.60	-0.75	4.66	-0.75	-1.46	6720.79
15.24	15.24	2.90	-2.15	-2.15	-0.92	2.90	-2.15	3.61	-2.15	-0.92	2028.84

پس کل نیروی وارد بر دو عضو افقی سطح روبرو (۸–۲ و ۱۱–۵) برابر است با:

$$F_H = (6720.79 + 2028.84) \times 15.24 = 266.689\ kN$$

برای اعضای قطری:

- اعضای قطری سطح روبرو:

عضو ۹–۲:

$$\theta = -90\,, \emptyset = 45° \rightarrow c_x = 0\,, c_y = 0.707\,, c_z = -0.707$$
$$f_x = 338.05 V u_n + 700.5 a_{nx}$$
$$V^2 = \frac{1}{2}(u - v)^2$$

عضو ۹–۲ در $x=0$ واقع شده و مقدار y از ۱۵/۲٤ متر تا سطح آب تغییر می‌کند. تغییرات سطح آب را نیز برای این عضو باید منظور نمود.

$$y = 24.384 + 8.5 \cos \omega t$$

به‌ازای $\omega t = 6$:

$$y = 32.55\ m$$

طول این عضو تحت اثر موج برابر است با:

$$L = (32.55 - 15.24)\sqrt{2} = 24.48\ m$$

این طول را به دو قسمت با طول ۱۲/۲٤ متر تقسیم کرده و نیروی وارد بر هر قسمت محاسبه می‌شود:

x	y	u	v	ax	ay	un	vn	V	anx	any	fx
0.00	19.57	5.15	-1.01	-0.84	-1.95	5.15	-0.51	5.20	-0.84	-0.98	8455.04
0.00	28.22	6.78	-1.63	-1.11	-3.16	6.78	-0.82	6.87	-1.11	-1.58	14972.30

پس کل نیروی وارد بر این عضو مایل برابر است با:

$$F_{2-9} = (8455.04 + 14972.30) \times 12.24 = 286.676\ kN$$

عضو ۱۲–۵:

به‌طور مشابه برای $x=15.24$ در این عضو محاسبات انجام می‌گردد.

x	y	u	v	ax	ay	un	vn	V	anx	any	fx
15.24	18.81	3.17	-2.75	-2.35	-1.17	3.17	-1.37	3.72	-2.35	-0.59	2345.30
15.24	25.95	3.95	-4.14	-2.93	-1.77	3.95	-2.07	4.92	-2.93	-0.88	4516.22

پس کل نیروی وارد بر این عضو مایل برابر است با:

$$F_{2-9} = (2345.30 + 4516.22) \times 10.1 = 69.298\ kN$$

- اعضای قطری سطح جانبی:

عضو ٦-٢:

$\theta = 0\,, \emptyset = 45° \rightarrow c_x = 0.707\,, c_y = 0.707\,, c_z = 0$

$f_x = 338.05 V u_n + 700.5 a_{nx}$

$V^2 = \frac{1}{2}(u - v)^2$

برای عضو ٦-٢، مختصات x و y تا سطح آب تغییر می‌کند. تغییرات سطح آب را نیز برای این عضو باید منظور نمود.

$y = 24.384 + 8.5\cos(\omega t - kx) \quad , \quad y = 15.24 + x$

پس:

$x = 9.144 + 8.5\cos(\omega t - kx)$

با سعی و خطا داریم:

$\omega t = 6 \rightarrow x = 14.49\,m$

ارتفاع سطح آب در عضو برابر با ٢٥/٩٨ متر است. طول این عضو تحت اثر موج برابر است با:

$L = 14.49\sqrt{2} = 20.49\,m$

این طول را به دو قسمت با طول ١٠/٢٥ متر تقسیم کرده و نیروی وارد بر هر قسمت محاسبه می‌شود:

x	y	u	v	ax	ay	un	vn	V	anx	any	fx
3.62	18.86	4.77	-1.46	-1.25	-1.77	3.11	-3.11	4.40	0.26	-0.26	4815.75
10.87	26.11	4.86	-3.53	-2.49	-2.18	4.19	-4.19	5.93	-0.15	0.15	8298.30

پس کل نیروی وارد بر این عضو مایل برابر است با:

$F_{2-6} = (4815.75 + 8298.3) \times 10.25 = 134.366\,kN$

نیروی وارد بر عضو ١٢-٨ نیز برابر همین مقدار است.

$F_{8-12} = 134.366\,kN$

بنابراین کل نیروی وارد بر اعضا در راستای افق برابر است با:

$F_{Total} = 1882.307 + 266.689 + 286.676 + 69.298 + 2 \times 134.366 = 2773.702\,kN$

پس مقدار F_{100} نیز در رابطه محاسبه ضریب RSR محاسبه گردید. در نتیجه این ضریب برابر خواهد شد با:

$$RSR = \frac{F_{collapse}}{F_{100}} = \frac{3772.8}{2773.702} = 1.36$$

این درحالی‌است که چنانچه پایه‌ها به‌صورت توخالی در نظر گرفته شوند به‌طور مشابه خواهیم داشت:

وزن اعضای قائم: $30.72\ ton$

وزن اعضای افقی: $6.34\ ton$

وزن اعضای مایل: $4.48\ ton$

بنابراین مقدار جرم متمرکز در تراز میانی برابراست با:

$$m^{(1)} = sum(30.72 + 6.34 + 4.48) = 41.55\ ton$$

در تراز عرشه نیز داریم:

وزن اعضای قائم: $15.36\ ton$

وزن اعضای افقی: $6.34\ ton$

وزن اعضای مایل: $4.48\ ton$

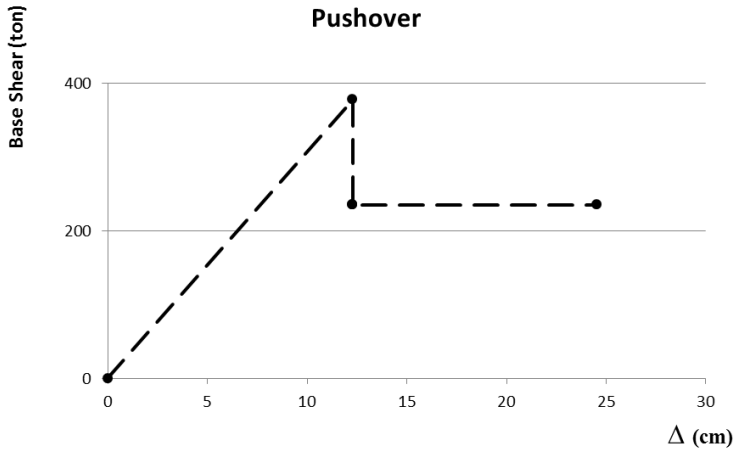
کل وزن جرم متمرکز در تراز عرشه:

$$m^{(2)} = 926.19\ ton$$

بنابراین نسبت جرم متمرکز تراز عرشه به جرم متمرکز تراز میانی برابراست با:

$$\frac{m^{(2)}}{m^{(1)}} = \frac{926.19}{41.55} = 22.29$$

در ادامه، مشابه حل قبل، منحنی ظرفیت سازه مطابق شکل زیر خواهد بود:



چنانچه بیشترین مقدار این نیرو را به‌عنوان ظرفیت نهایی سکو انتخاب کنیم (البته این فرض نیاز به بحث و بررسی بیشتر خواهد داشت) داریم:

$$\rightarrow F_{collapse} = 364.07\ ton$$

ولذا خواهیم داشت:

$$RSR = \frac{F_{collapse}}{F_{100}} = \frac{3640.7}{2773.7} = 1.31$$

بنابراین توپو یا توخالی فرض نمودن اعضا، با هندسه این مثال، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در پاسخ‌ها نخواهد داشت.

با توجه به جدول ذیل ارائه‌شده در صفحه ۱۱۸ آیین‌نامه *API RP2A WSD-2007*، این سازه در طبقه‌بندی ارزیابی *A-2* قرار خواهد داشت.

Table 17.5.2b–ASSESSMENT CRITERIA–OTHER U.S. AREAS
(see Table 17.6.2-2)

Assessment Category	Exposure Category		Design Level Analysis (see Notes 1 and 2)	Ultimate Strength Analysis
	Consequence of Failure	Life Safety		
A-1	High	Manned-Non-Evacuated or Unmanned	85% of lateral loading caused by 100-year environmental conditions (see Section 17.6.2b)	Reserve strength ratio (RSR) [3] 1.6 (see Section 17.6.2b)
A-3	Low	Unmanned	50% of lateral loading caused by 100-year environmental conditions (see Section 17.6.2b)	(RSR) [3] 0.8 (see Section 17.6.2b)

Notes 1. Design level analysis not applicable for platforms with inadequate deck height.
2. One-third increase in allowable stress is permitted for design level analysis (all categories).

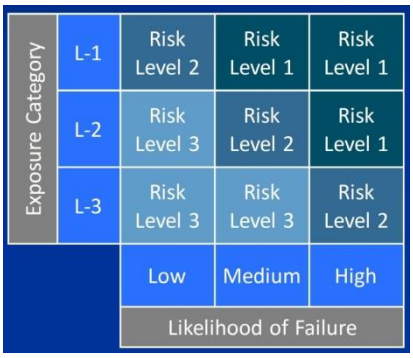
Table 17.5.2a–ASSESSMENT CRITERIA–U.S. GULF OF MEXICO
(see Table 17.6.2-1)

Assessment Category	Exposure Category		Design Level Analysis (see Notes 1 and 2)	Ultimate Strength Analysis
	Consequence of Failure	Life Safety		
A-1	High	Manned-Non-Evacuated, Manned-Evacuated or Unmanned	High Consequence design level analysis loading (see Figure 17.6.2-2a)	High Consequence ultimate strength analysis loading (see Figure 17.6.2-2a)
A-2	Medium	Manned-Evacuated or Unmanned	Sudden hurricane design level analysis loading (see Figure 17.6.2-3a)	Sudden hurricane ultimate strength analysis loading (see Figure 17.6.2-3a)
A-3	Low	Unmanned	Minimum consequence design level analysis loading (see Figure 17.6.2-5a)	Minimum consequence ultimate strength analysis loading (see Figure 17.6.2-5a)

(البته این جداول برای ایالات متحده تهیه شده است)

طبقه‌بندی A-2 معادل با سطح Medium برای عواقب ناشی از شکست می‌باشد. ایمنی جانی در این دسته‌بندی، برای دو حالت سکوی خالی از سرنشینان و یا سکوی بدون سرنشین خواهد بود. چنانچه شدت عواقب ناشی از خرابی سکوی مورد نظر این مثال، بسیار زیاد باشد، باید ضریب RSR بزرگتر از ۱/٦ معادل با سطح ارزیابی A-1 به‌دست بیاید.

Risk Category	Interval
Risk Level 1	3-5 years
Risk Level 2	6-10 years
Risk Level 3	11-15 years
Requires a baseline inspection prior to adoption.	



طبق جداول فوق، با اتخاذ سطح ریسک ۲ معادل با احتمال خرابی متوسط و دسته‌بندی خطر L-2، این ضریب RSR برابر با ۱/۳٦ مناسب و پاسخگو خواهد بود.

بنابراین دو راهکار وجود خواهد داشت:

تغییر کاربری سکو: از حالت دارای سرنشین خارج نشده و عواقب ناشی از خرابی زیاد، به سکوی با دسته‌بندی خطر نوع متوسط (L-2)

تقویت سیستم: به یک یا ترکیبی از روش‌های افزایش ضخامت و قطر اعضا، تغییرچیدمان اعضای قطری و یا اضافه نمودن اعضای قطری جدید، زاویه‌دار نمودن و افزایش یا کاهش طول برخی اعضا، کاهش وزن عرشه، جلوگیری از رشد Marine Growth به روش‌های مختلف، جلوگیری از خوردگی به روش‌های متفاوت، تزریق (Grout) میان شمع و پایه و ...

منحنی مارشال[1]

پوش مارشال، مدل الاستیسیته خرابی پس از کمانش و پاسخ چرخه هسترتیک را تعریف می‌کند. برای تشکیل این منحنی، مقادیر P_{cr} و هفت ثابت زیر لازم هستند:

[1] Marshall Strut Envelope

ξ ضریبی است با تعریف $P_y = \xi\sigma^0 A \ \ (\xi = 0.95)$

γ ضریب شیب سخت‌شوندگی همگن است (۰/۰۲)

α_0 ضریبی است با تعریف $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \frac{L}{D}\ , (\alpha_0 = 0.03)$

α_1 ضریبی است با تعریف $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \frac{L}{D}\ , (\alpha_0 = 0.004$

κ ضریب نیرو است (۰/۲۸)

β ضریب شیب است (۰/۰۲) و

ζ ضریب نیرو است (حداقل مقادیر ۱ و $\xi /\ 5.8\left(\frac{t}{D}\right)^{0.7}$)

مقادیر داخل پرانتز، مقادیر پیش‌فرض نرم‌افزار آباکوس هستند و مقدار P_{cr} از رابطه استاندارد *ISO* به‌دست می‌آید. پوش مارشال، پاسخ فشاری و کششی یک عضو لوله‌ای را مطابق شکل زیر در نظر می‌گیرد. خط‌چین‌های داخلی، مدول الاستیک خرابی هستند که بارگذاری و باربرداری را نسبت به مسیر کرنش بیان می‌کنند.

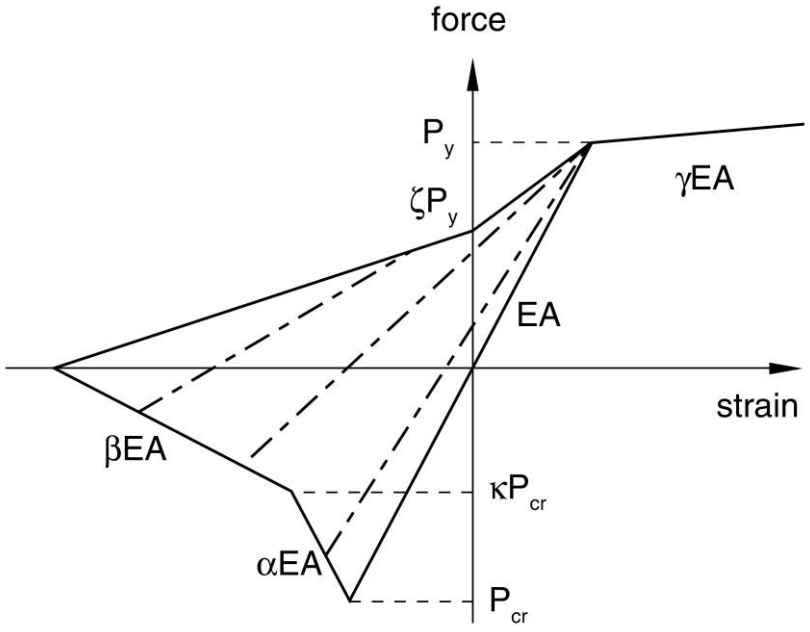


Figure 3.9.3–1 Marshall strut theory buckling envelope.

در مثال فوق، همین منحنی با فرض $\alpha = \infty$ و $\beta = 0$ رسم شده است. مقدار P_{cr} باید از رابطه زیر که در استاندارد *ISO* بیان شده است، به‌دست آورده شود لیکن در این مثال، ضریبی از P_y یا همان تنش تسلیم در نظر گرفته شده است.

$$I(f_c, f_{b1}, f_{b2}) = \frac{f_c}{F_c} + \frac{1}{F_b}\sqrt{\left[\frac{c_{m1} f_{b1}}{1 - \frac{f_c}{f_{e1}}}\right]^2 + \left[\frac{c_{m2} f_{b2}}{1 - \frac{f_c}{f_{e2}}}\right]^2}$$

مادامی که نامساوی $I(f_c, f_{b1}, f_{b2}) < 1.0$ برقرار باشد، طبق گفته استاندارد *ISO*، هیچگونه کمانشی رخ نخواهد داد. چنانچه از تنش‌ها و مقاومت‌های خمشی عضو صرفنظر شود، ترم‌های زیر رادیکال صفر خواهند شد.

در این مثال، مقدار κ نیز برابر $0.6P_{cr}$ قرار داده شده است. همچنین در رفتار کششی، $\gamma = 0$ فرض شده است.