هشتمین همایش صنایع دریایی
۹ لغایت ۱۱ آبانماه ۱۳۸۵
استان بوشهر

محاسبه عمر خستگی شناور آلومینیومی به روش متعین توسعه یافته

زراره حاج محمد اسماعیل نوری[۱]، محمد جواد کتابداری[۲]،

تهران ـ دانشگاه صنعتی امیرکبیر ـ دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی

nouri1360@yahoo.com

چکیده

در این مقاله طول عمر خستگی یک شناور کروبوت[۳] آلومینیومی با استفاده از آنالیز تنش سه بعدی در نرم افزار Maestro محاسبه گردیده است. روند کار به این صورت بوده که ابتدا مدل کل شناور را تحت اثر بارهای وارد بر آن آنالیز عمومی[۴] نموده و سپس به وسیله روش های بهبود مش بندی[۵] و برون یابی خطی تنش، تنش های نقاط تمرکز تنش را محاسبه می نماییم. در کل ۳۳۶ حالت بارگذاری مختلف آنالیز گردیده و نتایج تمرکز تنش در یک محل که آمادگی بیشتری برای شکست داشته است با استفاده از منحنی های S-N به روش متعین[۶] مورد بررسی قرار گرفته و عمر خستگی این محل محاسبه گردیده است. در انتها این نتیجه بدست آمد که عامل عمده ایجاد خستگی، موج های با ارتفاع متوسط هستند. زیرا امواج کم ارتفاع علی رغم تعداد زیاد چرخه، تغییرات تنش اندک ایجاد می کنند و از طرفی موج های مرتفع که می توانند تغییرات تنش بالاتری در اتصالات سازه ایجاد نمایند دارای تعداد چرخه محدودی هستند.

---

[1] کارشناس ارشد کشتی سازی - سازه از دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

[2] عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

[3] Crew boat
[4] Global Analysis
[5] Mesh Refinement
[6] Deterministic

کلمات کلیدی: خستگی – کشتی – تمرکز تنش – روش متعین

مقدمه

شناور ها در طول عمر بهره برداری خود در معرض طیف وسیعی از امواج قرار دارند که باعث ایجاد تعداد زیادی سیکل بارگذاری می گردد. ضمن اینکه فاز و زاویه برخورد این امواج موجب تغییرات شدید تنش در شناور مانند حالت های Hogging و Sagging می شود. به طور کلی حالات اصلی خرابی سازه کشتی عبارتند از:۱) خرابی ناشی از تنش تسلیم یا پلاستیک ۲) خرابی ناشی از کمانش اجزای سازه ای ۳) خرابی ناشی از خستگی و شکست. با کنترل حالت های اول و دوم خرابی از صحت عملکرد سازه کشتی پس از ساخت اطمینان حاصل می گردد ولی با کنترل حالت سوم خرابی طول عمر کاربری کشتی کنترل و محاسبه می شود. در نتیجه سازه اقتصادی تر و قابل اعتماد تر مورد بهره برداری قرار می گیرد.

پیشرفت های اخیر در آنالیز سازه ای از قبیل روش المان محدود، توانایی بشر در مدل واقعی تر کشتی تحت اثر نیروهای مختلف را به طور چشمگیری گسترش داده است. نرم افزار Maestro به عنوان اولین و کامل ترین نرم افزار تخصصی طراحی سازه ای شناورها می باشد که با استفاده از روش المان محدود و قابلیت های متنوع دیگر از قبیل بارگذاری امواج راه را برای تحقیقات بیشتر هموار نموده است.

مشخصات شناور

جهت مطالعه موردی و آنالیز خستگی یک شناور آلومینیومی انتخاب گردیده شد. مشخصات اصلی شناور آلومینیومی مدل شده را در جدول ۱ و مدل سه بعدی شناور را در شکل ۱ مشاهده می فرمایید.

جدول ۱ : مشخصات اصلی شناور آلومینیومی

مشخصه	مقدار	واحد	مشخصه	مقدار	واحد
طول سرتاسری	۴۹,۶۴	m	ارتفاع	۴,۰۲	m
طول بین دو عمود	۴۶,۹۸	m	آبخور طراحی	۲,۰۳	m
عرض	۹,۸۷	m	سرعت سرویس	۱۰	Knot

مدل سازی و بارگذاری

مدل سازی شناور بر اساس اصول نرم افزار Maestro به روش مدل سازی مستقیم انجام گرفته است. از اثر براکت ها چشم پوشی شده، ضمن اینکه تقویت کننده ها به طور کامل مدل نشده و فقط اثر خمشی آنها توسط نرم افزار بر روی ورق ها به صورت ورق ارتوتروپیک اعمال می گردد. تیر های طولی و عرضی توسط المان Beam و ورق ها توسط المان Quad مدل شده اند. مدل عمومی شامل ۵۰۱۲ المان و ۲۷۰۶ گره می باشد. همچنین مواد به کار رفته در شناور آلومینیوم ۶۰۶۱ و ۵۰۸۶ است.

به منظور جلوگیری از حرکت صلب شناور و همچنین معیاری برای نمایش و اندازه گیری تغییر شکل سازه حرکت در جهات X، Y و Z در یک گره در سینه شناور (تکیه گاه ساده سه بعدی)، حرکت در جهات Y و Z در یک گره در پاشنه شناور و حرکت در جهت Z در گره ای در امتداد عمودی گره قبلی در پاشنه شناور گرفته شده است (فرض عدم پیچش صفحه پاشنه حول محور طولی) (شکل ۲). نیرو های کوچکی که در اثر خطای المان محدود و خطای محاسبات تعادل شناور در آنالیز ایجاد می گردد توسط این تکیه گاه ها خنثی می گردد. البته به علت وجود این نیروها تنش های زیادی در این نقاط ایجاد گشته و نتایج در نزدیکی این نقاط قابل قبول نخواهد بود.

برای محاسبه عمر خستگی بر اساس توصیه آیین نامه ABS [۴]، ۱۴ فرکانس مختلف موج (از امواج خلیج فارس)، ۱۲ زاویه برخورد بین ۰ تا ۳۶۰ درجه با افزایش ۳۰ درجه ای و ۲ فاز برخورد ۰ و ۱۸۰ درجه در نظر گرفته شده است. به علت اینکه شناور مورد مطالعه مخصوص حمل گروه تحقیقاتی بوده و تقریبا در کل مدت بهره برداری دارای یک وزن مرده می باشد، یک وضعیت باربری برای آن انتخاب شده که بنابراین در کل ۳۳۶ حالت بارگذاری بر شناور اعمال گشته است. در شکل ۱ نمای کلی شناور در موج در یکی از حالات بارگذاری را مشاهده می فرمایید. امواج اعمالی به صورت موج سینوسی همراه با اثر فرود-کریلوف در نظر گرفته شده که پس از اعمال، نرم افزار مجدداً تعادل را با محاسبه مجدد آبخور، زاویه هیل و پیچ برقرار می نماید.

آنالیز تنش عمومی مدل

در ابتدا به منظور مقایسه فرکانس طبیعی سازه با فرکانس ارتعاشی تحریک (خصوصاً فرکانس موج) و جلوگیری از پدیده رزونانس، همچنین درک اولیه از رفتار سیستم و به طور کلی تایید یا رد صلاحیت آنالیز شبه استاتیکی، آنالیز مودال با در نظر گرفتن اثر جرم افزوده آب صورت گرفته است. در انتها فرکانس طبیعی شناور ۰,۶۴۷۵ هرتز بدست آمد. فرکانس تحریک برای شناور را می توان فرکانس برخورد شناور با موج فرض نمود که از معادله زیر بدست می آید:

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2 . V . Cos\,\mu}{g} \qquad (۱)$$

که در آن ω_e فرکانس برخورد [rad/s]، ω فرکانس موج، V سرعت کشتی [m/s^2]، μ زاویه برخورد کشتی و موج، g شتاب گرانش می باشد. طبق مرجع [۴] فرکانس امواج دریا بین ۰,۲ تا ۱,۸ [rad/s] در نظر گرفته می شود. با محاسبات انجام شده فرکانس برخورد با فرض سرعت ۱۰ [knot] ۰,۰۲۹ تا ۰,۵۵۷ هرتز خواهد بود و نتیجتاً فرکانس طبیعی شناور برابر با ۰,۶۴۷۵ هرتز در این محدوده قرار نگرفته و می توان آنالیز را با دقت قابل قبولی به صورت آنالیز شبه استاتیکی انجام داد. پس از تأیید آنالیز شبه استاتیکی به منظور اطمینان از صحت بارگذاری ها و کنترل سلامت مدل شناور، آنالیز تنش عمومی مدل انجام می گیرد. پس از آنالیز با کنترل تغییر شکل کلی و منطقه‌ای، تنش ها در شناور و یک قضاوت مهندسی از صحت مدل سازی و بارگذاری اطمینان حاصل شده و می توان نسبت به انتخاب نقاط مستعد برای شروع ترک و شکست به بررسی توزیع تنش عمومی در شناور پرداخت (شکل ۳). پس از بررسی های صورت گرفته، یک منطقه بر روی عرشه، محل اتصال روسازه به عرشه (شکل ۴) به عنوان منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد.

آنالیز منطقه ای[1] مدل

به منظور محاسبه دقیق تر تنش در نقاط مستعد ترک و شکست از روش بهبود مش بندی در این مناطق استفاده گردیده است. در صورت بزرگ بودن اندازه المان ها در این آنالیز تنش ها دارای خطا خواهند بود و در صورتی که اندازه المان ها بسیار کوچک باشند تنش به سمت بینهایت میل می نماید و قابل استفاده

[1] Local Analysis

نیست. اندازه مناسب المان ها در نزدیکی نقاط تمرکز تنش باید حدود ضخامت ورق مورد آنالیز باشد [۴].

بهبود مش بندی بدین ترتیب صورت گرفته است که ابتدا المان های قبلی در اطراف منطقه مورد آنالیز پاک شده و با استفاده از المان های سه وجهی و چهار وجهی با در نظر گرفتن محدودیت های نسبت ابعادی و زاویه ای بهبود مش بندی انجام شده است و اندازه المان ها در دو ردیف همسایگی منطقه مورد آنالیز در حدود ضخامت ورق آن منطقه می باشد. ضخامت ورق ۶,۳۵ میلی متر و ابعاد المان های اطراف ۵*۵ میلیمتر مربع است (شکل ۵).

تنش در نقاط تمرکز تنش

محاسبه دقیق تمرکز تنش نیازمند مدل دقیق جوش و اثرات حاصل از آن می باشد. که این مسئله غیر از زمان گیر بودن دارای پارامترهای نامشخصی می باشد لذا برای محاسبه این تنش ها از روش برون یابی خطی طبق آیین نامه ABS [۴] استفاده می نماییم. بدین ترتیب که ابتدا تنش در فاصله ۱,۵ برابری ضخامت و ۰,۵ برابری ضخامت از لبه اتصال منطقه تمرکز تنش را خوانده و سپس با فرض خطی بودن تغییرات تنش، تنش در لبه جوش را محاسبه می نماییم (شکل ۶). این عمل را برای همه حالات بارگذاری انجام می دهیم. بارهای وارد بر اجزای شناور موجب ایجاد تنش هایی در نقاط خاصی از سازه به خصوص محل جوش ها می گردد که مقدار این تنش ها چندین برابر بزرگ تر از تنش های اسمی (تنش در حالت آنالیز عمومی) است. به نسبت بین تنش ماکزیمم موجود در مناطق بحرانی و تنش اسمی، ضریب تمرکز تنش گویند. طبق نتایج به دست آمده از این آنالیز [۱] بیشترین ضریب تمرکز تنش ۴,۱ می باشد و مربوط به حالت های بارگذاری ۲۷۵ و ۲۸۷ است. بیشترین محدوده تنش [MPa] ۱۱۱,۲ و در حالت های بارگذاری ۱۴۵-۱۴۶ و ۱۵۷-۱۵۸ رخ می دهد. بیشترین تنش فون مایز علامت دار ناشی از بارهای اعمال شده [MPa] ۲۲,۹ در حالت های بارگذاری ۱۴۵، ۱۵۷ و کمترین تنش فون مایز علامت دار [MPa] ۸۸,۴- در حالت های بارگذاری ۱۴۶ و ۱۵۸ بدست آمده است. منظور از تنش فون مایز علامت دار همان تنش فون مایز است که علامت خود را از علامت بزرگترین تنش اصلی می گیرد [۷] و با توجه به اهمیت محدوده تنش در محاسبه عمر خستگی از این تنش در ادامه استفاده شده است.

محاسبه عمر خستگی

جهت پیش بینی عمر خستگی دو روش کلی وجود دارد: ۱) روش مکانیک شکست ۲) روش کلاسیک. در واقع در روش مکانیک شکست چگونگی رشد ترک ها مورد بررسی قرار می گیرد، در حالی که در روش کلاسیک عمر اتصال به کمک روش های آماری و منحنی های S-N یا ε-N تعیین می گردد. منحنی های S-N برای خستگی های پر چرخه و منحنی های ε-N برای خستگی های کم چرخه مورد استفاده قرار می گیرند. به دلیل سهولت استفاده از روش کلاسیک در آنالیز خستگی، اکثر آیین نامه ها این روش را مبنای کار خود قرار می دهند. برای به کارگیری این روش لازم است برای هر یک از نقاط بحرانی سازه در اثر بارگذاری موج، محدوده تنش ایجاد شده و تعداد سیکل بارگذاری در طول طراحی سازه معین شود. بر این اساس به چهار روش زیر که بر مبنای منحنی تنش-چرخه می باشند، می توان اشاره کرد: ۱) روش ساده ۲) روش متعین ۳) روش طیفی ۴) روش تاریخچه زمانی.

یکی از روش های طیفی جهت محاسبه عمر خستگی به منظور طراحی، روش در نظر گرفتن توزیع ویبول برای محدوده تنش است. همان طور که در نمودار ۲ مشاهده می فرمایید این توزیع برای شناور مورد مطالعه نیز صادق است. در این روش در ابتدا فرض می شود در کل طول عمر شناور N_T چرخه تنش اعمال می گردد در نتیجه:

$$p(s > S_0) = \frac{1}{N_T} \qquad (۲)$$

به طوری که S_0 حداکثر محدوده تنش در طول عمر شناور و p احتمال وقوع محدوده تنش s بزرگتر از S_0 می باشد. فرض می گردد که محدوده تنش از توزیع ویبول با پارامترهای ζ (پارامتر شکل) و δ (پارامتر مقیاس) پیروی می نماید. در نتیجه تابع مجموع احتمال به صورت زیر ارائه می گردد:

$$p(s > 0) = F_s(S) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{S}{\delta}\right)^{\zeta}\right];\ S > 0 \qquad (۳)$$

و با استفاده از توزیع گاما (Γ) مقدار مورد انتظار برای S^m به صورت زیر به دست می آید:

$$E(S^m) = \delta^m \Gamma\left(\frac{m}{\zeta} + 1\right) \qquad (۴)$$

حل معادله ۳ با استفاده از معادله ۲ برای S_0 نتیجه می دهد:

$$S_0 = [\ln(N_T)]^{\frac{1}{\zeta}} \delta \qquad (۵)$$

آسیب خستگی برای N_T چرخه، با فرض منحنی S-N خطی به صورت $NS^m=A$ بدین ترتیب بدست می آید:

$$D = \frac{N_T}{A} E(S^m) \qquad (۶)$$

با جایگذاری معادلات ۵ در ۴ و ۴ در ۶ معادله زیر برای آسیب خستگی بدست می آید:

$$D_B = \frac{N_T}{A} S_0^m [\ln(N_T)]^{\frac{m}{\zeta}} \Gamma(1+\frac{m}{\zeta}) \qquad (۷)$$

روش متعین یک روش جهت تحلیل خستگی است که در آن امواج هارمونیک با ارتفاع و تعداد مشخص (در طول یک سال) به شناور اعمال شده و محدوده تنش حاد مورد نظر تعیین و به کمک رابطه ماینر عمر خستگی حاصل می گردد. هر یک از امواجی که دارای ارتفاع و پریود مشخص است و تعداد سیکل های آن نیز به کمک دیاگرام توزیع ارتفاع موج تعیین گردیده است به سازه مورد نظر اعمال گشته، بزرگ ترین محدوده تنشی که توسط هر ارتفاع در اتصال مورد نظر ایجاد می شود؛ تعیین می گردد. سپس به کمک منحنی S-N و رابطه ماینر، آسیب انباشتگی برای محل مفروض محاسبه می گردد. نهایتاً ضریب آسیب کل، در اتصال مورد نظر از حاصل جمع آسیب ها در ارتفاعات مختلف موج نتیجه می شود. فرمول محاسبه خستگی ماینر به شرح زیر می باشد.

$$D = \sum_{i=1}^{1=n} \frac{n_i}{N_i} \qquad (۸)$$

که در این رابطه n تعداد تنش هایی که در حالت های بارگذاری مختلف در محاسبه عمر خستگی محاسبه شده اند، n_i تعداد چرخه تنش محاسبه شده، N_i تعداد چرخه تنش بدست آمده که منجر به خرابی سازه می شود و از منحنی S-N به دست می آید، D ضریب آسیب انباشتگی که باید مساوی یا کمتر از یک باشد، مثلا" ۰,۵ یا ۰,۳۳ جهت ضریب اطمینان بیشتر.

به دلیل استفاده از ۳۳۶ محدوده تنش در این روش و دقت بیشتر آن نسبت به روش های متعین عادی که در حدود ۵ تا ۱۰ محدوده تنش برای آن در نظر گرفته می شود به این روش متعین توسعه یافته می گویند. در جدول ۲ محاسبات انجام شده جهت تعیین عمر خستگی با ضریب اطمینان ۱,۰۵ را ملاحظه می فرمایید.

جدول ۲ : خلاصه نتایج محاسبات خستگی شناور تحت اثر امواج خلیج فارس

Wave Type	Wave Parameters				Max Stress Range	Safety Factor	Final Stress Range	Mean Stress Range	Fatigue Damage
	Height [m]	Period [s]	Length [m]	Num of Occurrence per Year					
1	6.7	8.6	115.1	2	69.5	1.05	72.9	-28.0	0.00000008
2	6.2	8.1	102.3	4	78.2	1.05	82.1	-29.2	0.00000040
3	5.7	7.6	90.1	13	87.8	1.05	92.2	-30.5	0.00000304
4	5.2	7.1	78.7	44	98.2	1.05	103.1	-32.0	0.00002328
5	4.7	6.7	70.1	144	104.3	1.05	109.5	-32.7	0.00011840
6	4.2	6.3	62.0	470	109.2	1.05	114.7	-33.1	0.00054254
7	3.7	5.9	54.3	1,538	111.2	1.05	116.8	-32.8	0.00202740
8	3.2	5.5	47.2	5,031	107.3	1.05	112.7	-31.5	0.00510780
9	2.7	5.1	40.6	16,457	96.3	1.05	101.1	-29.2	0.00757480
10	2.2	4.8	36.0	53,830	77.7	1.05	81.6	-26.9	0.00515645
11	1.7	4.5	31.6	176,077	59.2	1.05	62.1	-25.2	0.00229392
12	1.2	4.3	28.9	577,944	38.2	1.05	40.1	-25.3	0.00030462
13	0.7	4.1	26.2	1,883,451	18.9	1.05	19.8	-24.9	0.00000583
14	0.2	3.9	23.7	5,170,480	5.5	1.05	5.7	-24.9	0.00000000
	Total Occurrence per Year			7,885,485		Mean Stress Range in Life			-24.9
						Cumulative Fatigue per Year			0.02316
						Cumulative Fatigue per 20 Year			0.46317
						Fatigue Life [Year]			43.2

نتیجه گیری و پیشنهادات

با توجه به جدول ۲ بیشترین محدوده تنش در نسبت طول موج به طول شناور ۱,۱۶ رخ داده است. البته محل مورد بررسی کاملاً در وسط طولی شناور نبوده و اوج و حضیض موج نسبت به این نقطه کمی فاصله دارد ولی در کل می توان نتیجه گیری نمود که بیشترین ممان خمشی که مهمترین عامل ایجاد تنش در شناور است؛ در حالتی رخ می دهد که طول موج تقریباً برابر با طول شناور باشد. در نمودار ۱ تغییرات محدوده تنش برای نسبت بی بعد طول موج به طول شناور در منطقه مورد آنالیز را مشاهده می فرمایید. در نمودار ۲ بیشترین محدوده تنش برای هر ارتفاع موج و در نمودار ۴ آسیب خستگی در یک سال برای ارتفاع های مختلف موج را مشاهده می فرمایید. نکته قابل توجه جابجایی اوج منحنی در نمودار ۴ با نمودار ۲ می باشد. این مسئله به این علت است که در آسیب خستگی به غیر از محدوده تنش، احتمال وقوع (نمودار ۳) نیز بسیار مهم می باشد. طبق جدول ۲ بیشترین آسیب خستگی در سال برابر با ۰,۰۰۷۵۷۴۸۰ (۳۳٪ آسیب کل) و برای موج شماره ۹ با ارتفاع ۲,۷ متر اتفاق می افتد. در واقع بیشترین آسیب خستگی در شناور ها از آن امواج با ارتفاع متوسط می باشد. زیرا هم احتمال وقوع متوسطی دارند و هم محدوده تنش بالایی (به علت نزدیک بودن طول موج به طول شناور) ایجاد می نمایند. به طوری که ۹۶٪ آسیب خستگی توسط ۵ موج ۱۰،۹،۸،۷ و ۱۱ ایجاد شده است. نتیجه جالب دیگری که در این بخش از نمودار ۵ حاصل می شود، این است که در این شناور با افزایش ۱۰ درصدی محدوده تنش عمر خستگی نصف شده است. از این مطلب

می توان به اهمیت محاسبه محدود تنش در آنالیز خستگی پی برد. یعنی در حالی که محدوده تنش منطقه ای نسبت به این منطقه با افزایش ۱۶ درصدی روبرو شود، عمر خستگی آن منطقه حدود ۲۰ سال یعنی عمر معمول طراحی یک شناور می شود. در این شناور با فرض ضریب افزایش ۵ درصدی [۱] عمر خستگی شناور تحت اثر امواج خلیج فارس برابر با ۴۳,۲ سال بدست می آید.

آنالیز تعیین عمر خستگی شامل مراحل پیچیده هیدرودینامیکی و سازه ای بوده و بسیار وقت گیر است. با وجود سعی در واقعی مدل نمودن کشتی و رفتار آن در دریا این مسئله شامل عدم قطعیت های زیادی بوده و هنوز حل این مسئله در ابتدای راه خود می باشد. پیشنهاد می گردد برای تخمین دقیق تر عمر خستگی ترک های اولیه ناشی از عیوب ساخت و اثر خوردگی در افزایش تنش و رشد ترک نیز در نظر گرفته شود. ضمنا" پیشنهاد می گردد عمر شناور به وسیله روش طیفی و تاریخچه زمانی محاسبه و نتایج آن با روش متعین مقایسه گردد تا بتوان رقم دقیق تری برای D در روش متعین به عنوان معادل محاسبه روش طیفی یا تاریخچه زمانی در نظر گرفت و در نهایت بتوان یک معادله ساده تر که دارای پارامترهای کمتری باشد جهت محاسبه تقریبی عمر خستگی شناور ها پیشنهاد نمود.

مراجع

۱-نوری، زراره، "آنالیز خستگی شناور به روش طیفی تحت اثر امواج دریا"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۴

۲-صادقی، کبیر، "مهندسی سواحل، بنادر و سازه های دریایی"، دانشکده صنعت آب و برق، ۱۳۸۰

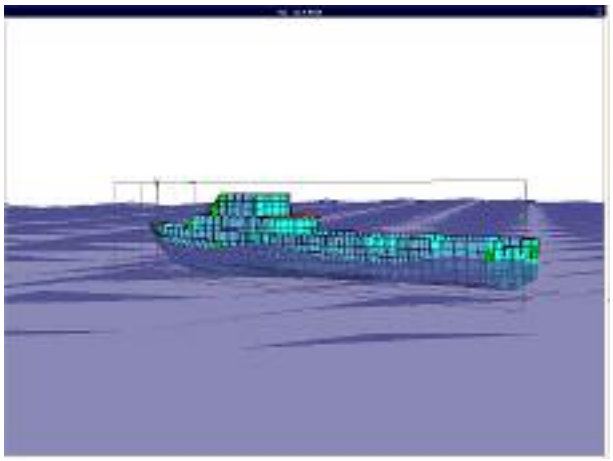
۳-داغیانی، حمید رضا، "مقدمه ای بر مکانیک شکست اجسام"، گردآوری و تألیف، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۱۳۷۹

4- Rules for the Classification of Ships, Spectral Fatigue Analysis, ABS, 2005

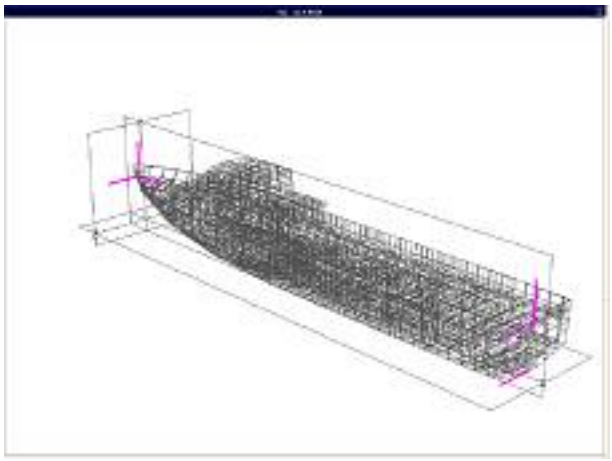
5- Hughes, O.F., "Ship Structural Design", Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City, NJ, 1988.

6- Maestro help, version 8.7, Proteus Engineering

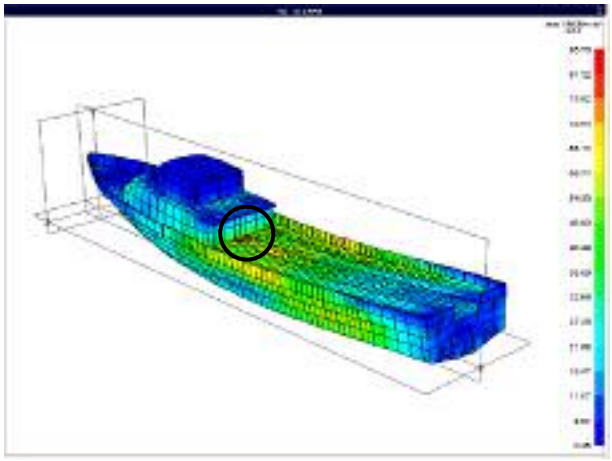
7- Alfred Hancq, D., Fatigue Analysis Using ANSYS, ANSYS Inc.



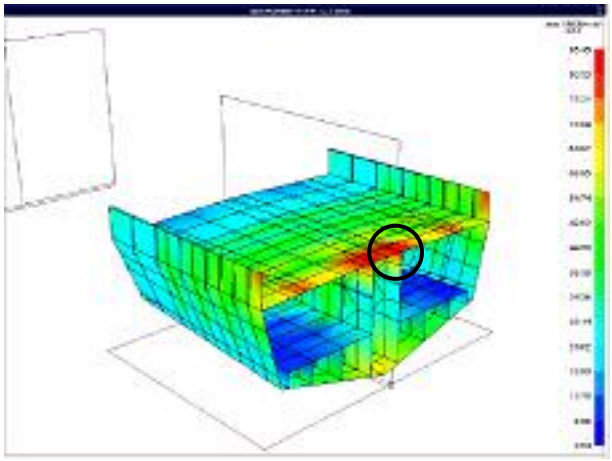
شکل ۱ : مدل سه بعدی شناور در نرم افزار



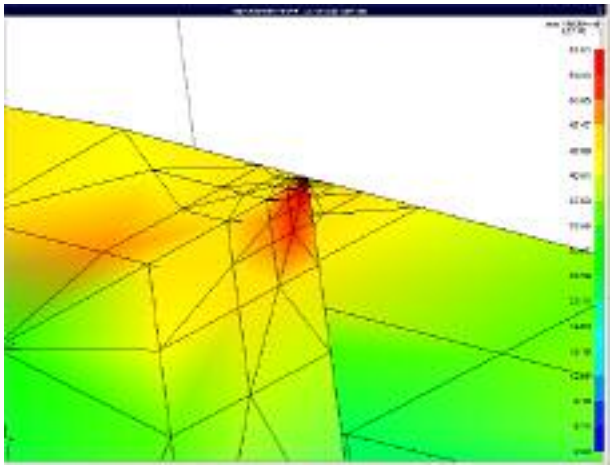
شکل ۲ : تکیه گاه های شناور جهت آنالیز شبه استاتیکی



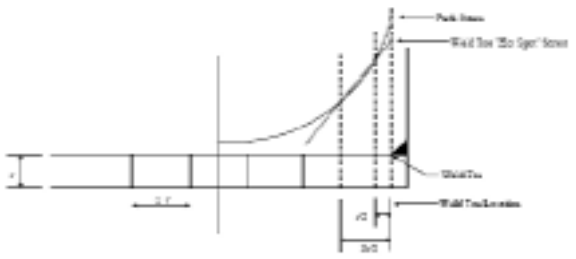
شکل ۳ : آنالیز عمومی شناور



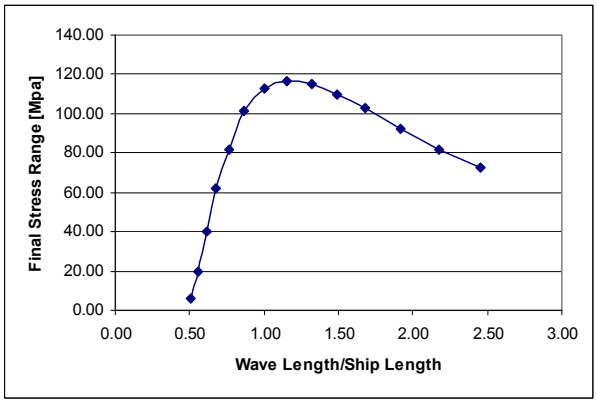
شکل ۴ : منطقه انتخابی جهت بررسی خستگی



شکل ۵ : آنالیز منطقه ای مدل

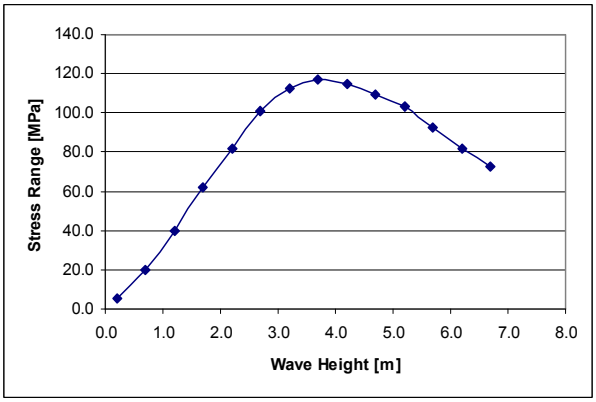


شکل ۶ : برونیابی تنش [۴]

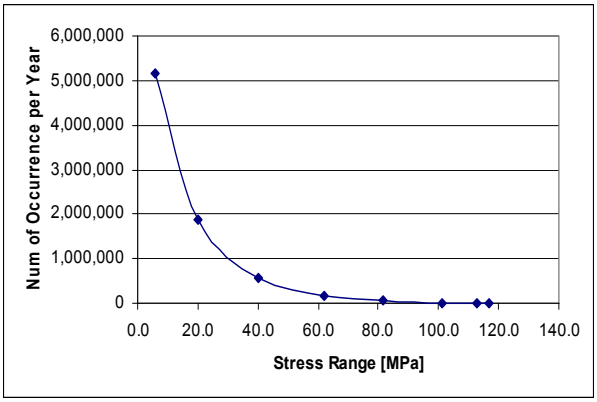


نمودار ۱ : محدوده تنش برای نسبت بی بعد طول موج به

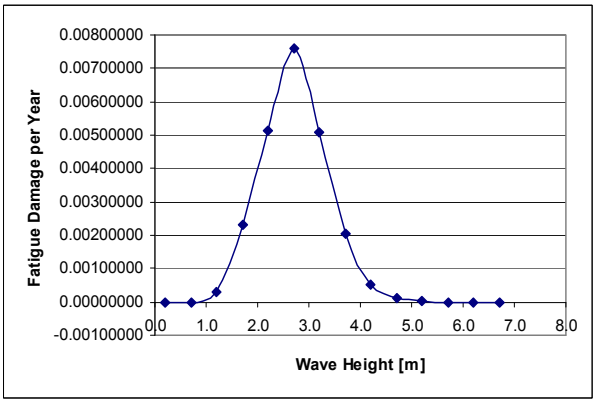
طول شناور در منطقه مورد آنالیز



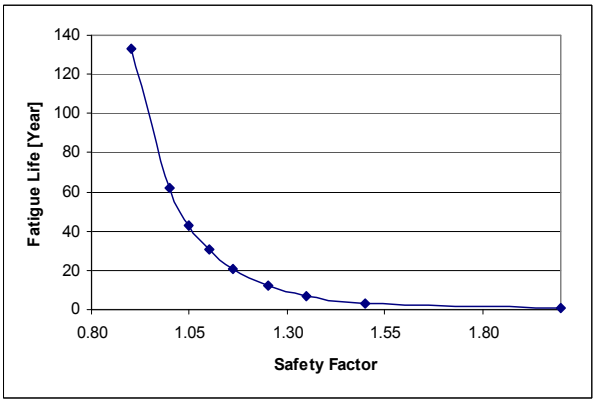
نمودار ۲ : بیشترین محدوده تنش برای هر ارتفاع موج



نمودار ۳ : احتمال وقوع در سال برای هر محدوده تنش



نمودار ۴ : آسیب خستگی در یک سال برای ارتفاع های مختلف موج



نمودار ۵ : اثرات افزایش محدوده تنش