

تحلیل الاستوپلاستیک ورق خن کشتی تحت اثر بار فشاری درون صفحه ای تک محوری

پدram عدالت^۱، محمدرضا خدمتی^{۲*}

۱- مربی، دانشگاه صنعت نفت، محمود آباد و دانشجوی دکتری مهندسی دریا، دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در این تحقیق به تحلیل الاستوپلاستیک غیرخطی ورق خمیده خن کشتی، واقع در محل اتصال کف به دیواره کناری، پرداخته شده است. با استخراج منحنی‌های تنش متوسط- کرنش متوسط از تحلیل‌های اجزای محدود بر روی مدل‌هایی با مشخصات ابعادی و مکانیکی متغیر، تاثیر هر یک از پارامترهای موثر بر رفتار این منحنی‌ها مطالعه و تفسیر شده‌اند. جهت انجام این تحلیل‌ها از یک نرم‌افزار تجاری اجزای محدود استفاده شده و سعی بر آن بوده تا شرایط مرزی و بارگذاری مطابق با واقعیت در نظر گرفته شود. با توجه به نتایج تحلیل‌های انجام شده، در این دسته از پوسته‌ها پس از تراز استحکام نهایی، کاهش قابل توجهی در ظرفیت باربری مشاهده شده که این رفتاری متفاوت از الگوی مفروض الاستیک-کاملاً پلاستیک بوده که تاکنون برای این ناحیه از کشتی در تحلیل تدریجی استحکام نهایی بدنه کشتی مورد استفاده قرار گرفته است. در انتها، بر اساس نتایج حاصل، روابطی تجربی به منظور شبیه سازی منحنی تنش متوسط-کرنش متوسط این بخش از بدنه کشتی ارائه گردیده که از این روابط می‌توان در تحلیل تدریجی استحکام نهایی بدنه کشتی استفاده نمود.

کلمات کلیدی: ورق خن، تحلیل الاستوپلاستیک غیرخطی، تغییر شکل اولیه، استحکام نهایی

ELASTIC-PLASTIC ANALYSIS OF SHIP BILGE PLATE UNDER IN-PLANE UNIAXIAL COMPRESSIVE LOAD

P. Edalat¹, M. R. Khedmati²

1- Lecturer, Petroleum University of Technology, Mahmood Abad and PhD Candidate, Faculty of Marine Technology, Amirkabir University of Technology

2- Associate Professor, Faculty of Marine Technology, Amirkabir University of Technology

Abstract

This research is concerned with the nonlinear elastic-plastic analysis of ship curved bilge plate, located at the junction between ship's side and its bottom. After derivation of average stress-average strain relationships by finite element analyses of the models with varying dimensional and mechanical characteristics, the effects of any of parameters on the trends of such relationships is studied and interpreted. A commercial finite element code is used in such analyses. The boundary and loading conditions are tried to be adopted according to real practice. It is finally observed that the behaviour of such curved plates is entirely different from elastic-perfectly plastic behaviour and there is a reduction in their load carrying capacity after ultimate strength level. Finally, based on the obtained results, a set of empirical formulations are

* نویسنده مسوول مقاله khedmati@cic.aut.ac.ir

introduced in order to simulate the average stress-average strain relationship of such plate sections of the ship. These formulations have the capability of being used in the progressive collapse analysis of ship's hull girder.

Keywords: Bilge plate, Nonlinear elastic-plastic analysis, Initial deflection, Ultimate strength

۱- مقدمه

توسط محققین در حوزه هوافضا و مکانیک متفاوت می‌باشد.

در این تحقیق نواحی از کف شناور به صورت پارامتریک مدل شده است. در این مرحله فشار جانبی و تنش پس‌ماند در نظر گرفته نشده و به تحقیقات آتی موقوف شده است. اما در مقابل اثر تغییر شکل‌های اولیه و رفتار غیرخطی مصالح در نظر گرفته شده است. در ادامه با تحلیل الاستوپلاستیک غیرخطی منحنی‌های تنش متوسط- کرنش متوسط برای مدل مفروض استخراج و پس از تفسیر و رفتارشناسی منحنی‌های مذکور روابط تجربی حاکم بر این نتایج نیز ارائه شده است.

۲- مدل برای تحلیل

در این پژوهش، جهت تحلیل از روش عددی اجزای محدود و به جهت قابلیت تعمیم مدل ایجاد شده به مدل‌های دیگر، از مدل پارامتریک با قابلیت تغییر در ابعاد و تنش جاری شدن استفاده شده است. مدل در نظر گرفته شده بخشی از پوسته یک استوانه با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ می‌باشد. در این جدول L فاصله بین دو فلور^۲ متوالی در کشتی واقعی و R شعاع خم کاری در این ناحیه با توجه به محدودیت‌های موجود در عملیات خم کاری فولادهای متداول در صنایع دریایی است. تاثیر تغییر در ضخامت، خواص مصالح و همچنین نسبت ابعادی ورق خن بر رفتار غیرخطی این جزء سازه‌ای مطالعه شده است. از آنجایی که پس از عملیات خمکاری تنش تسلیم افزایش می‌یابد؛ لذا جهت لحاظ نمودن حاشیه اطمینان بیشتر، از خواص مصالح قبل از خم کاری استفاده شده است.

به منظور استفاده از تحلیل الاستوپلاستیک غیرخطی، منحنی تنش کرنش مواد مورد استفاده (فولاد) مطابق شکل ۳ به صورت دوخطی در نظر گرفته شده است.

سازه کشتی عمدتاً از اجزای سازه‌ای جداره نازک، مانند ورق‌ها و تقویت‌کننده‌ها تشکیل می‌شود. با توجه به سیستم نیروی‌های منته‌ج از عملکرد کشتی در دریا، بارهای فشاری درون صفحه‌ای برای این دسته از اجزای سازه‌ای می‌توانند منشاء ایجاد کماتش و فروریزش سازه‌ای باشند. یکی از تحلیل‌های اساسی در طراحی سازه کشتی، تحلیل استحکام نهایی^۱ است. جهت انجام این تحلیل، نیاز به شناسایی رفتار غیرخطی اجزای سازنده کشتی، از جمله ورق‌ها می‌باشد.

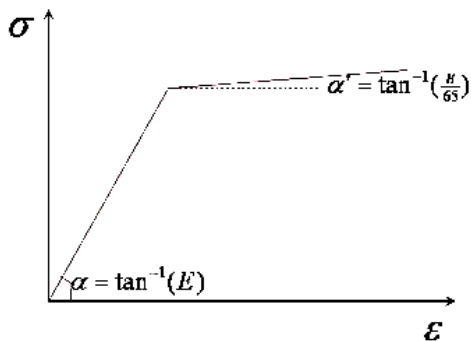
اجزای سازه کشتی عمدتاً به علت عملیات جوشکاری دارای عیوب اولیه‌ای می‌باشند که از جمله آنها می‌توان به تنش‌های پس‌ماند و تغییر شکل‌های اولیه اشاره کرد. از طرفی دیگر، تحقیقات بسیاری از محققین بر روی ورق‌های صاف و بدون تغییر شکل اولیه و تنش پس‌ماند معطوف بوده است. از جمله این تحقیقات می‌توان به [۱]، [۲]، [۳] و [۴] اشاره نمود.

در محل اتصال دیواره کناری کشتی به کف آن، ورق منحنی شکل واسطی به نام ورق خن وجود دارد که شماتیکی از این نحوه اتصال در شکل ۱ ارائه شده است. همانطور که در شکل ۲ مشخص است، این ورق دارای تغییر شکل‌های اولیه می‌باشد. عمدتاً در تحقیقات برای مدل سازی و تحلیل این محل، دو دسته ساده سازی انجام می‌گیرد. در دسته اول از وجود و تاثیر این ورق صرفه نظر می‌شود و در دسته دوم وجود این ورق در نظر گرفته شده است، ولی رفتار آن الاستیک-کاملاً پلاستیک فرض می‌شود [۵]. بنابراین احساس می‌شود که در زمینه شناسایی رفتار غیر خطی و پاسخ الاستوپلاستیک این نواحی از کشتی، پژوهشی مورد نیاز است که محققین این مقاله بر روی آن تاکید نموده‌اند.

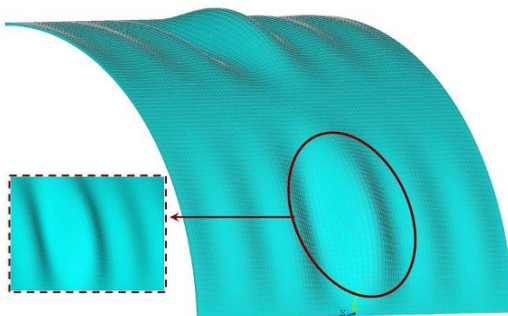
شرایط مرزی حاکم بر این ناحیه خمیده به گونه‌ای متفاوت، ویژه و وابسته به ماهیت و طبیعت سازه کشتی و نیروهای وارده بر آن است که با تحقیقات انجام شده

جدول ۱- مشخصات هندسی و مکانیکی مدل مورد مطالعه

2000, 2500, 3000, 5000, 5500 1800	طول (L) [mm]
9,10,12,14,16	شعاع (R) [mm]
ضخیم: 1 متوسط: 4 نازک: 1	ضخامت ورق (t) [mm]
235.2, 274.4, 313.6	ضریب لاغری ورق (β)
206000	تنش جاری شدن (σ_y) [MPa]
0.3	ضریب الاستیسیته (E) [MPa]
	ضریب پواسون (ν)



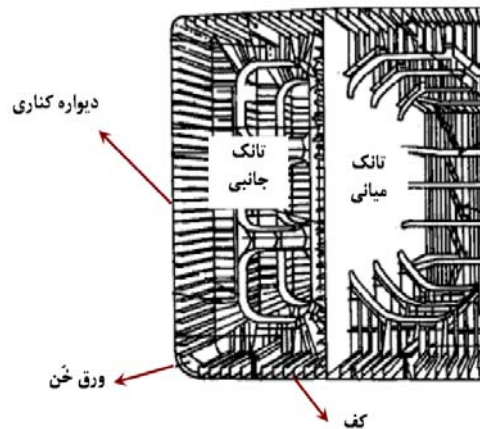
شکل ۳- رفتار مکانیکی در نظر گرفته شده برای مواد



شکل ۴- نمایی از مدل اجزای محدود به همراه تغییر شکل اولیه

۳- شرایط مرزی و بارگذاری

در این تحقیق برای اعمال شرایط مرزی ابتدا موقعیت قرارگیری ورق مورد نظر در سازه کشتی و تاثیر اجزای سازه‌ای اطراف آن بررسی شده است. شکل ۵ نمایی ساده شده از محل قرارگیری ورق خن و اجزای سازه‌ای اطراف آن را در کشتی نشان می‌دهد. مدل مفروض مطابق شکل از بالا به دیواره کناری شناور و از پایین به کف شناور محدود بوده و از اطراف نیز در محل میانه فاصله بین تقویت کننده‌های عرضی قرار دارد. از طرفی از یک بَرَاکت نیز در وسط فاصله طولی



شکل ۱- شماتیکی از نحوه اتصال ورق کف به دیواره کناری و محل ورق خن



شکل ۲- نمونه‌ای واقعی از تغییر شکل‌های اولیه در محل ورق خن کشتی

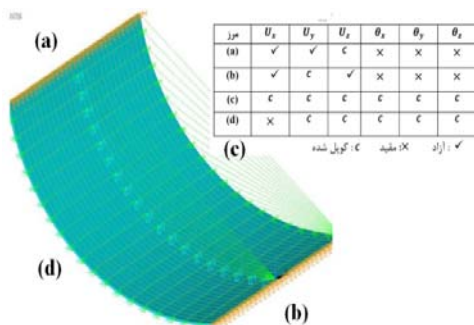
تغییر شکل اولیه در نظر گرفته شده جهت مدل نمودن اثرات ناشی از جوشکاری و نیز قرارگیری کشتی بر روی تکیه‌گاه‌های ویژه در هنگام تعمیرات در خارج از آب، با توجه به الگوی رابطه (۱) اعمال شده است، که در آن، $\alpha = 90^\circ$ ، $\lambda = 1/10$ ، $A_{0mn} = 1.8, 2.7, 9, 11$ و $m = 1, 3$ می‌باشند. w_0 در راستای شعاع استوانه فرض شده است. شکل ۴ نمایی از مدل اجزای محدود را به همراه تغییر شکل اولیه بر روی آن با ضریب بزرگ نمایی ۱۰۰ برابر نشان می‌دهد [۶].

$$w_0 = \sum_m \sum_n A_{0nm} \sin\left(\frac{m\pi x}{L}\right) \sin\left(\frac{n\pi \theta}{\lambda}\right) \quad (1)$$

محور X ، در راستای محورهای Y و Z و نیز حول هر سه محور مختصات با هم کوپل شده اند.

• جهت مدل نمودن تاثیر براکت بر روی مدل، گره‌های موجود در محل قرارگیری براکت تمامی درجات آزادی آن به هم کوپل شده‌اند.

به علت این که در این تحقیق منحنی تنش-کرنش در حالت فشار درون صفحه ای مورد مطالعه است، به علت کوپل نمودن گره‌های واقع بر ضلع (c)، بار متمرکز فشاری بر روی هر گره این ضلع از جمله گره محل تقاطع دو ضلع (a) و (c) اعمال شده است. نمایی از اعمال شرایط مرزی در شکل ۶ ارائه شده است.

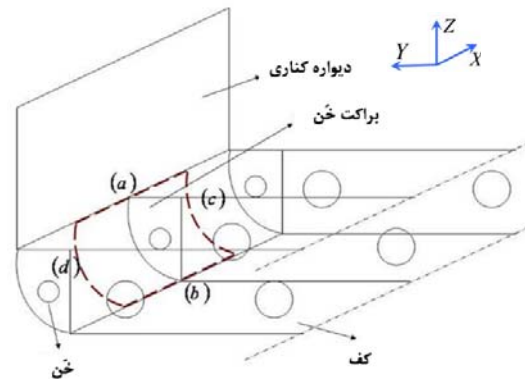


شکل ۶- نمایی از اعمال شرایط مرزی

۴- المان مورد استفاده

در مدل‌سازی و تحلیل به روش اجزای محدود توجه به دو اصل؛ استفاده از ساده‌ترین نوع اجزای محدود که می‌تواند رفتار سازه را شبیه‌سازی نماید و استفاده از کمترین تعداد اجزای محدود، باعث بهینه کردن محاسبات هم از لحاظ زمان و هم از لحاظ دقت است. از این روی در این تحقیق جهت مدل‌سازی در فضای نرم افزار المان محدود ANSYS از المان $SHELL43$ استفاده شده است. این المان دارای چهار گره و در هر گره دارای شش درجه آزادی می‌باشد. همچنین مناسب جهت تحلیل‌های الاستوپلاستیک و تغییر شکل‌های بزرگ است. نمایی از این المان در شکل ۷ ارائه شده است [۸].

مدل جهت بالا بردن استحکام موضعی سازه استفاده شده است.



شکل ۵- موقعیت قرارگیری مدل مورد بررسی و المان‌های اطراف آن

شرایط مرزی اعمال شده به شرح زیر در نظر گرفته شده است [۷]:

• حرکت انتقالی گره‌های قرار گرفته بر روی ضلع (a) در راستای Z به علت وجود دیوار جانبی، به هم کوپل و نیز تمامی حرکات دورانی حول هر سه محور به علت فرض در صلبیت بالای محل اتصال دیوار به مدل، مقید و صفر در نظر گرفته شده است.

• حرکت انتقالی گره‌های قرار گرفته بر روی ضلع (b) در راستای Y به علت وجود ورق کف شناور، به هم کوپل و نیز تمامی حرکات دورانی حول هر سه محور به علت فرض در صلبیت بالای اتصال مدل به ورق کف، مقید و صفر در نظر گرفته شده است.

حرکت انتقالی تمامی گره‌های قرار گرفته بر روی ضلع (c) در راستای X به هم کوپل و حرکت انتقالی گره‌های موجود بر روی ضلع (d) در راستای X مقید و صفر در نظر گرفته شده است و نیز گره‌های قرار گرفته شده بر روی اضلاع (c,d) به علت تقارن هندسی و فرض بر تقارن تغییر شکلی ورق بر روی اضلاع مورد نظر، دارای شرایط مرزی پیرویدیک می‌باشند. شرایط مرزی پیرویدیک به این صورت اعمال می‌شود که درجات آزادی دو گره انتهایی قرار گرفته شده در امتداد

تقویت شده تخت با تقویتی طولی بوده که در این مدل شرایط مرزی و بارگذاری کاملاً مطابق با بخش (۳) این مطالعه است. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج مدل موجود با نتایج مرجع مورد نظر تطبیق قابل قبولی را دارد.

۵- تحلیل و بررسی نتایج

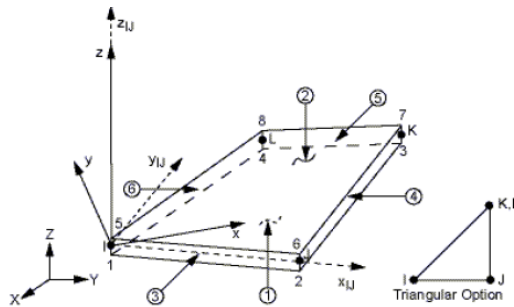
در این قسمت به استخراج منحنی‌های تنش- کرنش ورق خن کشتی پرداخته شده است. منحنی‌های مذکور، نماینده رفتار غیرخطی این جزء سازه‌ای از سازه کشتی با توجه به فرضیات انجام شده، است.

در نمودارهای ارائه شده در این بخش، محور افقی نماینده نسبت کرنش متوسط ورق (کرنش لبه (C) در شکل ۵) در راستای محور (X) به کرنش معادل تنش جاری شدن مصالح آن می‌باشد. محور عمودی نیز نمایانگر نسبت تنش متوسط (حاصل تقسیم نیروی وارده بر سطح مقطع مورد نظر) به تنش جاری شدن است.

نمودار معرف رفتار غیرخطی ورق مورد نظر را می‌توان به دو ناحیه کلی تقسیم نمود. ناحیه اول یا بخش پیش از استحکام نهایی^۲ ورق است که به صورت خطی و صعودی می‌باشد. ناحیه دوم نیز مبین بخش پس از استحکام نهایی^۳ سازه بوده که دارای رفتاری غیرخطی و نزولی است. علت پیدایش روند نزولی در ناحیه پس از استحکام نهایی منحنی تنش-کرنش متوسط مدل را می‌توان در ایجاد و تجمع تغییر شکل‌های ماندگار پلاستیک در بخش‌هایی از مدل از یک سو و باربرداری از دیگر بخش‌های مدل از سوی دیگر جستجو نمود [۱۰].

نمونه‌ای از نحوه توزیع تنش معادل فون مایز^۴ در سازه مورد تحلیل در تراز استحکام نهایی (با بزرگنمایی ۷۰ برابر) و در انتهای محاسبات (با بزرگنمایی ۱۰ برابر)، برای نمونه در شکل ۹ ارائه شده است.

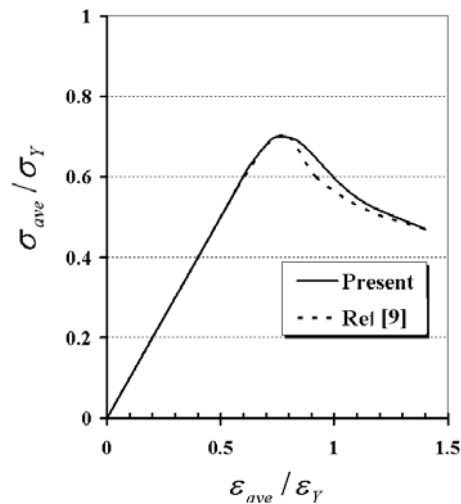
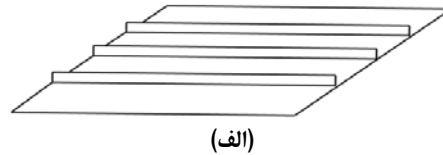
مقادیر تنش معادل فون مایز در نواحی علامت گذاری شده در شکل ۹ در جدول ۲ ارائه شده است. همانطور



x_{IJ} = Element x-axis if ESYS is not supplied.

x = Element x-axis if ESYS is supplied.

شکل ۷- نمایی از المان SHELL 43 در نرم‌افزار ANSYS



(ب)

شکل ۸- صحنه گذاری مدل اجزای محدود و نتایج آن
(الف) نمایی شماتیک از مدل SP45

(ب) مقایسه نتایج تحلیل در این مطالعه و مرجع مورد نظر

صحنه‌گذاری مدل اجزای محدود ایجاد شده و نتایج آن در شکل ۸ ارائه شده است. برای صحنه‌گذاری مدل اجزای محدود موجود از مدل SP45 در مرجع [۹] استفاده شده است. این مدل مطابق شکل ۸ - الف ورق

² Pre-Ultimate Strength Region

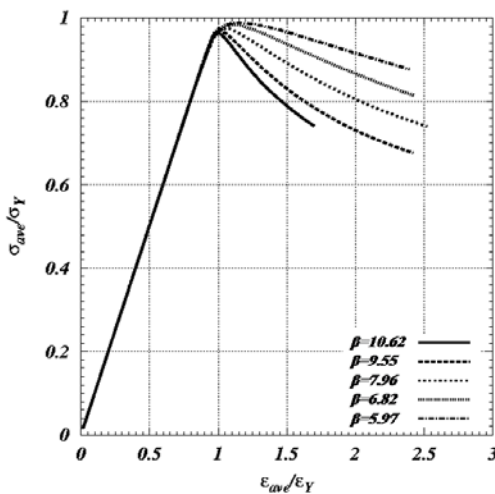
³ Post-Ultimate Strength Region

⁴ Von Misses Stress

جدول ۱ انجام پذیرفته است. از این رو نمودارهای ارائه شده در این بخش را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم نمود. برای هر یک از حالات در نظر گرفته شده برای تحلیل، نحوه و چگونگی توزیع تنش معادل فون مایز به همراه مود تغییر شکل مدل برای ناحیه تنش نهایی و آخرین مرحله بارگذاری به پیوست ارائه شده است.

جدول ۲- مقادیر تنش فون مایزز نواحی مشخص شده در "شکل ۹" تمامی واحدها بر حسب [MPa] است.

ناحیه شکل	A	B	C
الف	231.8	210.8	235.2
ب	154.9	101.5	261.6



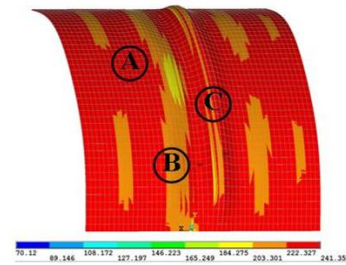
شکل ۱۰- نمودار تنش- کرنش برای حالت $\sigma_y = 235.2 [MPa]$

۵-۱) دسته اول: تاثیر تغییرات ضریب لاغری بر رفتار منحنی تنش-کرنش نمودارهای ارائه شده در این قسمت بر اساس تنش تسلیم دسته بندی شده‌اند. بر روی هر کدام از این نمودارها، تاثیر تغییرات ضخامت بر روی رفتار نمودار قابل رویت است.

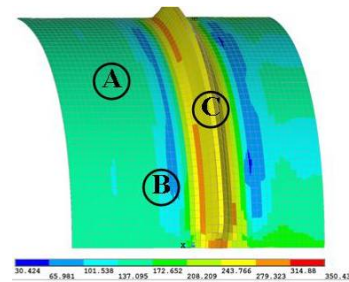
همان طور که در اشکال ۱۰ الی ۱۲ مشاهده می‌شود، ناحیه اول برای تمامی تنش‌های جاری شدن و ضخامت‌های متفاوت ورق، ثابت و شبیهی برابر با مدول الاستیسیته مصالح ورق دارد ولی برای ناحیه دوم نمودار، با در نظر گرفتن تنش جاری شدن ثابت، با

که از جدول مورد نظر مشخص می‌شود، مقدار تنش فون مایز در قسمت (A) شکل ۹، بیشتر از قسمت (B) آن است. تنش تسلیم در نظر گرفته شده در این حالت برابر با $235.2 [MPa]$ می‌باشد.

در مقابل با در نظر گرفتن ضریب بزرگ نمایی، مقدار تغییر شکل‌های سازه‌ای در قسمت (B) به مراتب بیشتر از قسمت (A) است. این تفاوت را می‌توان در ناحیه (C) که محل قرارگیری براکت است، به وضوح ملاحظه نمود.



(الف)



(ب)

شکل ۹- نحوه توزیع تنش فون مایز در تراز استحکام نهایی و انتهای بارگذاری

(الف) توزیع تنش فون مایز در تراز استحکام نهایی

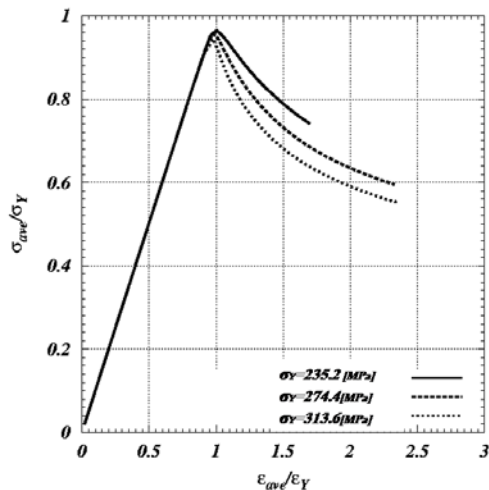
(ب) توزیع تنش فون مایز در انتهای محاسبات

همانطور که از مقایسه این دو شکل مشخص است، با افزایش مقدار تغییر شکل‌های ایجاد شده در ورق در اثر اعمال بار محوری، از مقدار تنش معادل فون مایز در نواحی مختلف سازه کاسته می‌شود.

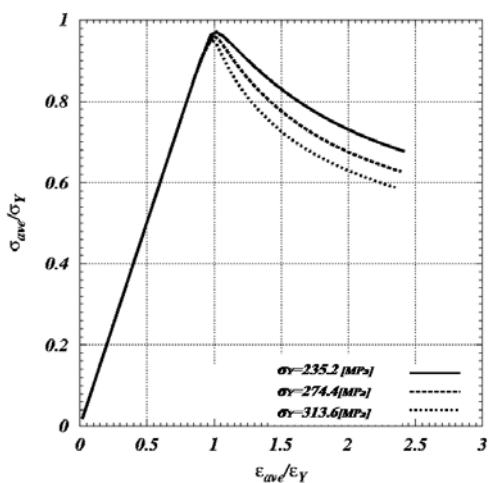
نمودارهای بدست آمده، مناسب جهت بررسی تاثیر تغییر در مشخصات ابعادی و مکانیکی بر روی رفتار غیرخطی ورق می‌باشند. این تغییرات مطابق

تغییرات در تنش تسلیم مطالعه شده است. نتایج این قسمت در نمودارهای اشکال ۱۳ الی ۱۷ ارائه شده است. در این دسته از نمودارها نیز دو ناحیه خطی و غیرخطی که متناظر با ناحیه پیش از استحکام نهایی و پس از استحکام نهایی است، مشاهده می‌شود.

همانطور که ملاحظه می‌شود، به دلیل افزایش میزان تجمع تغییر شکل‌های خمیری و افزایش سطوح باربرداری شده در مدل‌های تحلیل شده، پیوست ۱؛ با افزایش تنش تسلیم در ضخامت یکسان، شیب ناحیه نزولی پس از استحکام نهایی افزایش می‌یابد و در مقدار استحکام نهایی تغییر محسوسی حاصل نمی‌شود.

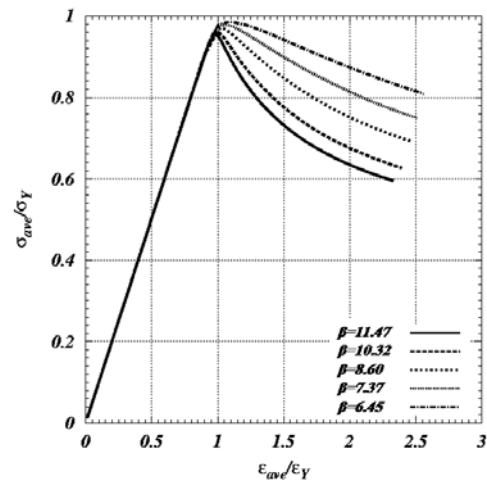


شکل ۱۳- نمودار تنش- کرنش برای حالت $t = 9 [mm]$

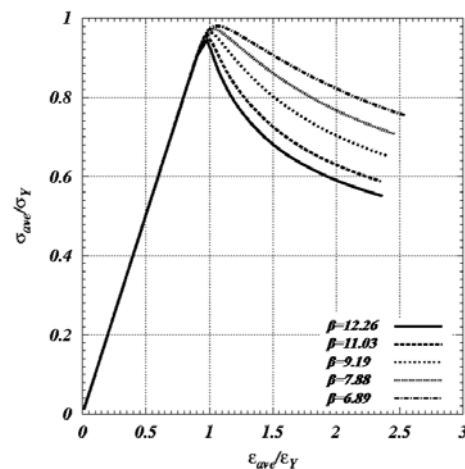


شکل ۱۴- نمودار تنش- کرنش برای حالت $t = 10 [mm]$

افزایش ضخامت ورق، شیب بخش نزولی نمودار، کاهش یافته و با نرخ ملایم‌تری تغییرات جهت کاهش تنش متوسط، طی می‌شود زیرا با افزایش ضخامت، چین خوردگی در ورق با سرعت ملایم‌تری نسبت به ضخامت‌های کم‌تر، اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت، نقطه بیشینه نمودار یا همان حد تسلیم نهایی سازه افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱- نمودار تنش- کرنش برای حالت $\sigma_Y = 274.4 [MPa]$



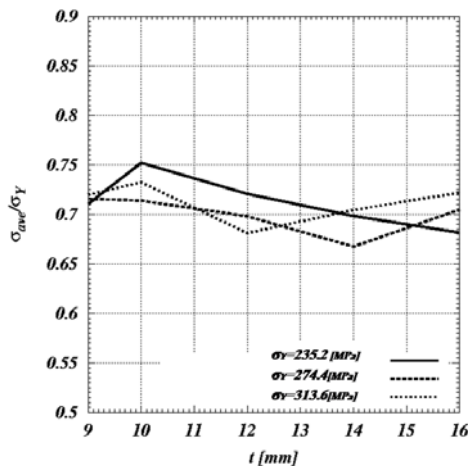
شکل ۱۲- نمودار تنش- کرنش برای حالت $\sigma_Y = 313.6 [MPa]$

۵-۲) دسته دوم: تاثیر تغییرات تنش جاری شدن بر رفتار منحنی تنش-کرنش نمودارهای ارائه شده در این قسمت بر اساس ضخامت ورق دسته بندی و بر روی هر کدام از این نمودارها تاثیر

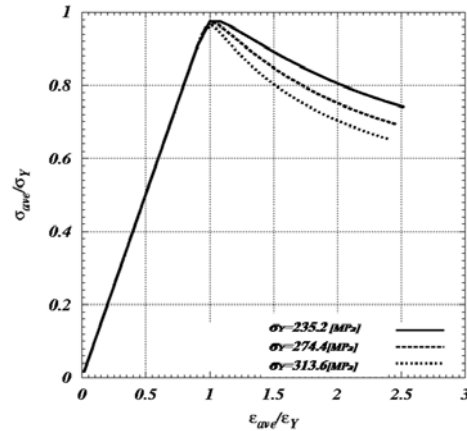
در اینجا منظور از تنش معادل شروع تسلیم شدگی، مقداری از تنش موثر می باشد که به ازای آن تسلیم شدگی در نقطه یا نقاطی از مدل ورق خن شروع می شود.

در این تحقیق مقدار تنش فون مایز برای هر المان در طول بازه بارگذاری ثبت و بررسی شده و اولین المانی که تنش فون مایز آن به تنش جاری شدن برسد تنش متوسط بار معادل آن در نمودار شکل ۱۸ وارد شده است.

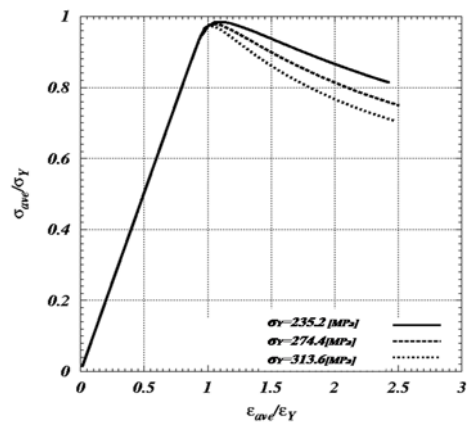
تاثیر تغییرات در دو پارامتر ضخامت و تنش جاری شدن مصالح بر روی تنش تسلیم شدگی اولیه ورق خن در نمودار شکل ۱۸ ارائه شده است. همان طور که در نمودار مورد نظر مشاهده می شود، مقدار متوسط نسبت بی بعد شده تنش تسلیم شدگی اولیه حدود 0.72 بوده و در اثر اعمال تغییر در مقدار دو پارامتر ضخامت و یا تنش جاری شدن مصالح، نسبت بی بعد شده تنش تسلیم شدگی اولیه ورق خن تغییراتی در حدود ± 0.07 نسبت به مقدار متوسط خود خواهد داشت. علت این گونه تغییرات می تواند ناشی از میزان دقت در محاسبات و بیش از آن ناشی از استخراج نتایج باشد.



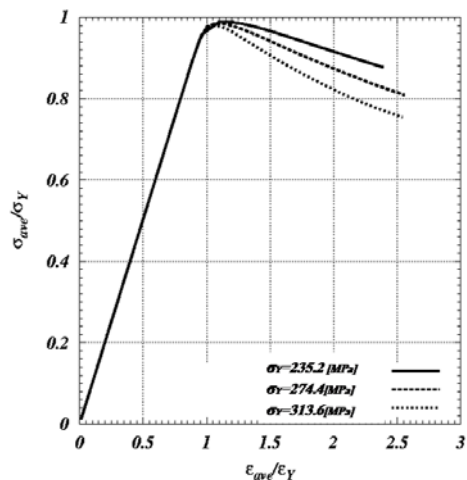
شکل ۱۸- نمودار تاثیر تغییرات در ضخامت و تنش جاری شدن بر تنش معادل شروع تسلیم شدگی



شکل ۱۵- نمودار تنش- کرنش برای حالت $t = 12 [mm]$



شکل ۱۶- نمودار تنش- کرنش برای حالت $t = 14 [mm]$



شکل ۱۷- نمودار تنش- کرنش برای حالت $t = 16 [mm]$

۳-۵) دسته سوم: تاثیر تغییرات در ضخامت و تنش جاری شدن بر تنش معادل شروع تسلیم شدگی.



شکل ۱۹- نمایی از دو نیم شدگی کشتی پرستیژ [۱۱]

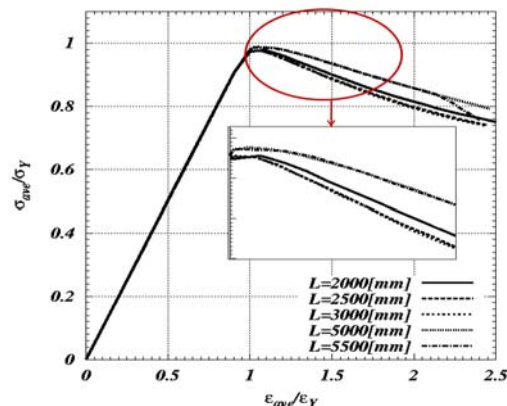
شده‌اند، و با تغییر طول مدل، تاثیر طول بر رفتار پس از کمانش و نیز استحکام نهایی آن مورد مطالعه قرار گرفته شده است. جهت انجام این مطالعه، مدلی با مشخصات $\beta = 7.96$ ، $\sigma_y = 233.2$ [MPa] و $t = 12$ [mm] تحلیل شده که نمودار تنش-کرنش متوسط آن در شکل ۲۰ ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، رفتار پس از استحکام نهایی ورق خن با ازدیاد طول آن از 2000[mm] تا 5500[mm] به دو گونه عمده قابل رویت است. در رفتار اول برای طول های 2000[mm] تا 3000[mm] از ورق خن، شیب این بخش نزولی از منحنی تنش-کرنش بیشتر شده، در حالی که در رفتار دوم متعلق به دو طول 5000[mm] و 5500[mm] ناحیه پس از استحکام نهایی دارای شیبی کمتر از حالت‌های قبلی است و در نتیجه ظرفیت باربری سازه در بخش نزولی افزایش می‌یابد.

۶- رابطه تجربی تخمین استحکام نهایی ورق خن با توجه به نتایج گسترده حاصل از تحلیل‌های غیرخطی الاستیک-پلاستیک، ابتدا پایگاهی از داده‌های اطلاعاتی متشکل از مشخصات هندسی مدل‌ها و مقادیر استحکام نهایی آنها جمع‌آوری گردید، سپس با توجه به اطلاعات مندرج در این پایگاه داده‌ها و نیز استفاده از رگرسیون خطی رابطه تجربی (۲) به منظور تخمین استحکام نهایی ورق خن کشتی بدست آمد.

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_y} = -3\pi \times 10^{-9} \left(\frac{R}{t}\right) \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} + 1.0233 \quad (2)$$

در جدول ۳ نمونه‌ای از این داده‌ها و نتایج تخمینی آن از رابطه تجربی (۲) ارائه شده است. شکل ۲۱ دقت مطلوب حاصل از کاربرد این رابطه را در مقایسه با نتایج تحلیل‌های غیرخطی الاستیک-پلاستیک به نمایش می‌گذارد. در این نمودار β همان پارامتر لاغری بوده که با توجه به رابطه ارائه شده در جدول ۱ با مشخصات هندسی و مصالح ورق در ارتباط است.

همانطور که از نمودارهای ارائه شده بر می‌آید، رفتار ورق خن منطبق بر رفتار الاستیک-کاملاً پلاستیک نمی‌باشد. از اینرو، فرضیاتی که عمدتاً در ارزیابی استحکام نهایی کشتی مبنی بر در نظر نگرفتن ورق خن و یا احتساب فرض رفتار الاستیک-کاملاً پلاستیک برای این ورق صورت می‌گیرند، منجر به محاسباتی نامطمئن خواهند شد. به عبارتی دیگر، این نوع فرضیات منجر به تخمین مقادیری خوش بینانه و بالاتر از واقعیت از استحکام نهایی کشتی می‌گردند. این دسته بیش تخمین‌ها برای سازه کشتی که در معرض امواج متلاطم دریایی است، نامناسب می‌باشند. واقعه اتفاق افتاده برای کشتی پرستیژ^۴ (شکل ۱۹)، نمونه‌ای از حوادث محتمل برای کشتی‌ها می‌باشد.



شکل ۲۰- نمودار تنش-کرنش متوسط برای حالت

$$\beta = 7.93, \sigma_y = 233.2$$

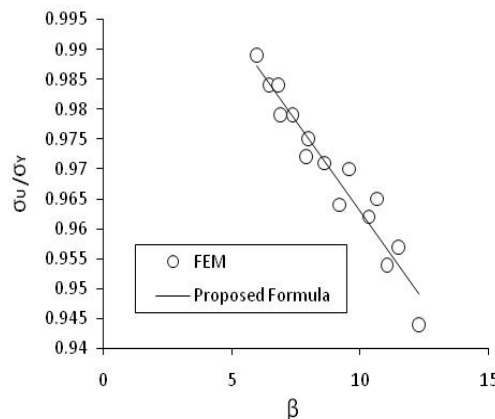
$$t = 12$$

دسته ۴-۵) تاثیر تغییرات در طول ورق خن بر روی رفتار غیرخطی آن.

در این بخش، با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای موثر بر استحکام نهایی ورق خن که تا به اینجا بررسی

جدول ۳- نمونه‌ای از داده‌های مبنای استخراج رابطه (۲) و نتایج آن

β	$(\sigma_u/\sigma_y)_{FEM}$	$(\sigma_u/\sigma_y)_{Eq}$	Error(%)
5.97	0.99	0.99	0.18
6.45	0.98	0.98	0.03
6.89	0.98	0.98	0.27
7.88	0.97	0.98	0.38
8.6	0.97	0.97	0.04
9.55	0.97	0.97	0.44
10.62	0.97	0.96	0.59
11.03	0.95	0.96	0.30



شکل ۲۱- مقایسه نتایج حاصل از تحلیل‌های اجزای محدود و مقادیر تخمین زده شده با کمک رابطه تجربی پیشنهاد شده برای استحکام نهایی ورق خن

۷- شبیه سازی منحنی تنش متوسط- کرنش متوسط

همانطور که پیشتر نیز به آن اشاره شد، دستیابی به منحنی تنش متوسط-کرنش متوسط اجزای ورقه‌ای تشکیل دهنده مقطع عرضی یک کشتی، یکی از اصلی ترین بخش های محاسباتی در تخمین استحکام نهایی آن کشتی و یا به عبارتی تحلیل تدریجی آن کشتی می باشد. بر اساس منحنی‌های تنش متوسط-کرنش متوسط حاصل از تحلیل‌های اجزای محدود، و مطالعه رفتار این منحنی ها از منظر ریاضی و نیز اعمال روش رگرسیون خطی بر اساس بانک داده‌های حاصل از این تحلیل‌ها رابطه (۳) برای شبیه سازی دو ناحیه پیش از تراز استحکام نهایی و پس از تراز استحکام نهایی ارائه گردید:

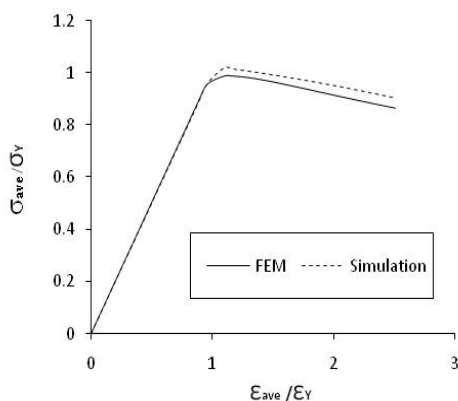
(۳)

$$\frac{\sigma_{ave}}{\sigma_y} = \begin{cases} \frac{\sigma_{ave}}{\sigma_y} & \frac{\sigma_{ave}}{\sigma_y} \leq 1 \\ a \left(\frac{\sigma_{ave}}{\sigma_y} \right)^2 + b \left(\frac{\sigma_{ave}}{\sigma_y} \right) + c & \frac{\sigma_{ave}}{\sigma_y} > 1 \end{cases}$$

که در آن:

$$\begin{aligned} a &= 4.100 \times 10^{-3} \beta^3 - 9.760 \times 10^{-2} \beta^2 + 0.803 \beta - 2.201 \\ b &= -1.210 \times 10^{-2} \beta^3 + 0.297 \beta^2 - 2.535 \beta + 7.089 \\ c &= 7.6 \times 10^{-3} \beta^3 - 0.189 \beta^2 + 1.645 \beta - 3.629 \end{aligned}$$

در شکل ۲۲ برای یک نمونه از ورق های خن، نتیجه حاصل از کاربرد روابط پیشنهادی در شبیه سازی منحنی تنش متوسط-کرنش متوسط نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می گردد، روابط پیشنهاد شده علی رغم سادگی، از دقت مناسب نیز برخوردارند.



شکل ۲۲- مقایسه منحنی تنش متوسط-کرنش متوسط حاصل از تحلیل اجزای محدود با منحنی شبیه سازی شده برای یک نمونه از ورق های خن با ضریب لاغری ۵/۹۷ و نسبت R/t برابر با ۱۱۲/۵

۸- نتیجه گیری

در این مطالعه رفتار غیرخطی ناحیه خن در کشتی‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. مدل اجزای محدود ساخته شده در این تحقیق، متناسب با شرایط بارگذاری و مرزی واقعی در این ناحیه است. محاسبات پارامتریک بر روی مدل به روش اجزای محدود صورت گرفت. برخی از نتایج حاصله به شرح زیر است.

Part 2 stiffened panels. Ocean Engineering, Vol. 35, Issues. 2, pp. 271-280.

2-Paik J.K., Kim B.J, Seo J.K., (2008). Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures: Part 1 unstiffened panels. Ocean Engineering, Vol. 35, Issues. 2, pp. 261-270.

3-Paik J.K., Kim B.J., Seo J.K., (2008). Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures: Part 3 Hull girders. Ocean Engineering, Vol. 35, Issues. 2, pp. 281-286.

4-Paik J.K, Thayamballi A.K., (2003). Ultimate limit state design of steel plated structures. Wiley, Chichester, UK.

5-Kumar M.S., Alagusundaramoorthy P., Sundaravadivelu R., (2006). Ultimate strength of ship plating under axial compression. Ocean Engineering, Vol. 33, Issues. 8-9, pp. 1249-1259.

6-Yao T., Nikolov P.I. and Miyagawa Y., (1992). Influence of welding imperfections on stiffness of rectangular plates under thrust. On Mechanical Effects of Welding, Lulea, Sweden, pp. 261-265.

7-Hughes O.F., (1988). Ship structural design. SNAME, Jersey City, NJ, second edition.

8-ANSYS user manual, Version 10.

9-Ozguç O., Das P.K., Barltrop N., (2007). The new simple design equations for the ultimate compressive strength of imperfect stiffened plates. Ocean Engineering Vol. 34, pp. 970-986.

10-Yao T., Fujikubo M., Yanagihara D., (1997). Buckling/plastic collapse behaviour and strength of stiffened plates under thrust. International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 7, No. 4.

11-<http://www.maritime-executive.com/article/intertanko-horrified-echr-decision>.

- ❖ بر خلاف تصورات موجود مبنی بر بی تاثیر بودن ورق خن در استحکام نهایی شناور و یا در نظر گرفتن رفتار آن به صورت الاستیک-کاملا پلاستیک، ملاحظه می‌شود که این ورق رفتاری کاملاً غیر خطی و متأثر از ضخامت و تنش جاری شدن مصالح داشته و لذا لحاظ نمودن آن در استحکام نهایی شناور، لازم است.
- ❖ با شروع و افزایش تغییر شکل‌های پلاستیک و بزرگ ملاحظه می‌شود که از مقدار تنش معادل فون مایز به طور نسبی کاسته شده و به عبارتی دیگر نوعی باربرداری از سازه اتفاق می‌افتد.
- ❖ در ناحیه پس از استحکام نهایی، رفتار غیرخطی ورق متأثر از ضخامت ورق و تنش جاری شدن مصالح می‌باشد و این در صورتی است که در ناحیه پیش از استحکام نهایی، رفتاری مستقل از ضخامت و تنش جاری شدن مصالح، مشاهده می‌شود.
- ❖ نسبت تنش معادل شروع تسلیم شدگی به تنش جاری شدن تا حد زیادی مستقل از ضخامت ورق و تنش جاری شدن مصالح می‌باشد و دارای مقداری برابر با 0.7 با نوسانات 7% است.
- ❖ براساس نتایج حاصل از تحلیل‌ها، روابطی تجربی و کاربردی به منظور شبیه سازی منحنی تنش متوسط- کرنش متوسط ورق خن کشتی ارائه گردید.

کلید واژگان:

- 1-Ultimate Strength Analysis
- 2-Floor
- 3-Dry-Docking of Ships
- 4-Prestige Casualty

۹- مراجع

1-Paik J.K., Kim B.J, Seo J.K., (2008). Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures:

پیوست ۱ - نحوه توزیع تنش فون مایزر در تراز استحکام نهایی و آخرین مرحله از محاسبات برای مصالح با تنش تسلیم $235.2 [MPa]$

