هشتمین همایش صنایع دریایی
۹ لغایت ۱۱ آبانماه ۱۳۸۵
استان بوشهر

بررسی اثر تغییر شکل های اولیه بر روی رفتار کمانشی، فراکمانشی وانهدامی ورقهای واقع تحت فشار درون صفحه ای طولی

محمد رضا خدمتی[۱]، عبدالله برزگر بارگاهی[۲]

تهران- دانشگاه صنعتی امیر کبیر- دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی

khedmati@cic.aut.ac.ir

چکیده

شناخت رفتار ورقها یکی از پیش نیازهای مهم در تعیین استحکام نهایی منطقه ای و نهایی سازه های دریایی محسوب می شود. ورقها در ای‌نگونه سازه ها بنا به دلایل مختلفی از عیوب اولیه برخوردار هستند. این عیوب مشتمل بر تنشهای پسماند و همچنین تغییرشکلهای اولیه می شوند. تنشهای پسماند عمدتآ منجر به کاهش استحکام نهایی ورقها شده، در حالیکه تغییرشکلهای اولیه علاوه بر تاثیر بر روی مقدار استحکام نهایی موجب تغییر در رفتار الاستوپلاستیک ورقها نیز می گردند. در این مطالعه سعی می‌شود تا به کمک نرم افزار اجزای محدود ANSYS اثر تغییرشکلهای اولیه بر روی رفتار الاستوپلاستیک ورقها مورد بررسی قرار گیرد. ورقهای مورد مطالعه به شکل مستطیل با ابعاد واقعی بکاررفته در سازه های دریایی بوده و با احتساب شرایط مرزی ساده و پیوستگی در اطراف، در معرض تنشهای درون صفحه‌ای فشاری طولی در نظر گرفته می‌شوند.

کلمات کلیدی: ورق- تغییرشکلهای اولیه- استحکام نهایی- رفتار الاستوپلاستیک- روش اجزای محدود

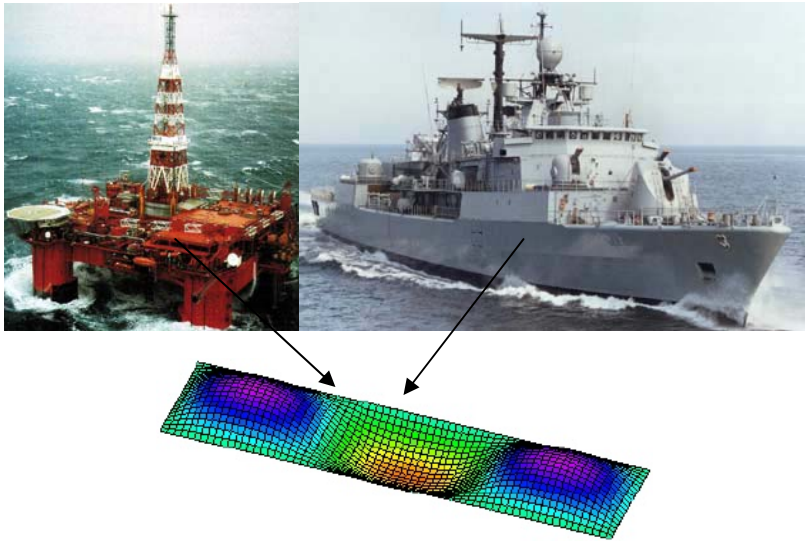
---

۱ - استادیار دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد گرایش سازه دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۱- مقدمه

ورقها کاربردهای فراوانی در بسیاری از سازه‌های مهندسی همچون ساختمان کشتی‌ها، پل‌های جعبه‌ای، سکوهای دریایی فراساحل، سازه‌های هوافضا و زیردریایی ها دارند, شکل (۱) . در بسیاری از حالات، این ورقها در معرض تنشهای درون صفحه‌ای فشاری از نوع تک محوری قرار داشته که این نوع بارگذاری می‌تواند موجب شود که این ورقها به سمت ناپایداری و یا کمانش گرایش پیدا کنند.



شکل ۱ ورقها در سازه های دریایی

در طی فرآیندهای ساخت خصوصاً به هنگام عملیات جوشکاری عیوبی در ورق ایجاد می‌گردند که به عیوب اولیه[۱] موسوم می باشند. این عیوب مشتمل بر تنشهای پسماند[۲] و همچنین تغییرشکلهای اولیه[۳] می شوند. تنشهای پسماند عمدتاً منجر به کاهش استحکام نهایی ورقها شده، در حالیکه تغییرشکلهای اولیه علاوه بر تاثیر بر روی مقدار استحکام نهایی موجب تغییر در رفتار الاستوپلاستیک ورقها نیز می گردند. در این مطالعه سعی می‌شود تا به کمک نرم افزار اجزای محدود ANSYS اثر تغییرشکلهای اولیه بر روی رفتار الاستوپلاستیک ورقها مورد بررسی قرار گیرد. ورقهای مورد مطالعه به شکل مستطیل با ابعاد واقعی بکاررفته در سازه های دریایی بوده و با احتساب شرایط مرزی ساده و پیوستگی در اطراف ، در معرض تنشهای درون صفحه‌ای فشاری طولی در نظر گرفته می‌شوند.

1- Initial imperfections

2- Welding-induced residual stresses

3 - Initial deflections

مدل موردمطالعه

مدل انتخاب شده برای تحلیل اجزای محدود مطابق شکل ۲ می‌باشد. همانطور که در این شکل نشان داده شده، شرایط مرزی در اطراف ورق به صورت تکیه گاه ساده انتخاب شده است. علاوه براین به دلیل پیوستگی ورق در سازه های دریایی، شرط صاف بودن لبه ها[1] نیز در امتداد لبه ها حاکم است. ابعاد هندسی مدل و خواص مکانیکی مواد عبارتند از :

عرض ورق : $b = 800\ mm$

نسبت ابعادی: $\frac{a}{b} = 3$

ضخامت ورق : $t = 12, 14, 16, 18, 20, 22\ mm$

فولاد :ماده انتخابی

ضریب پواسون فولاد : $v = 0.3$

مدول الاستیسیته فولاد: $E = 21000\ {Kgf}/{mm^2}$

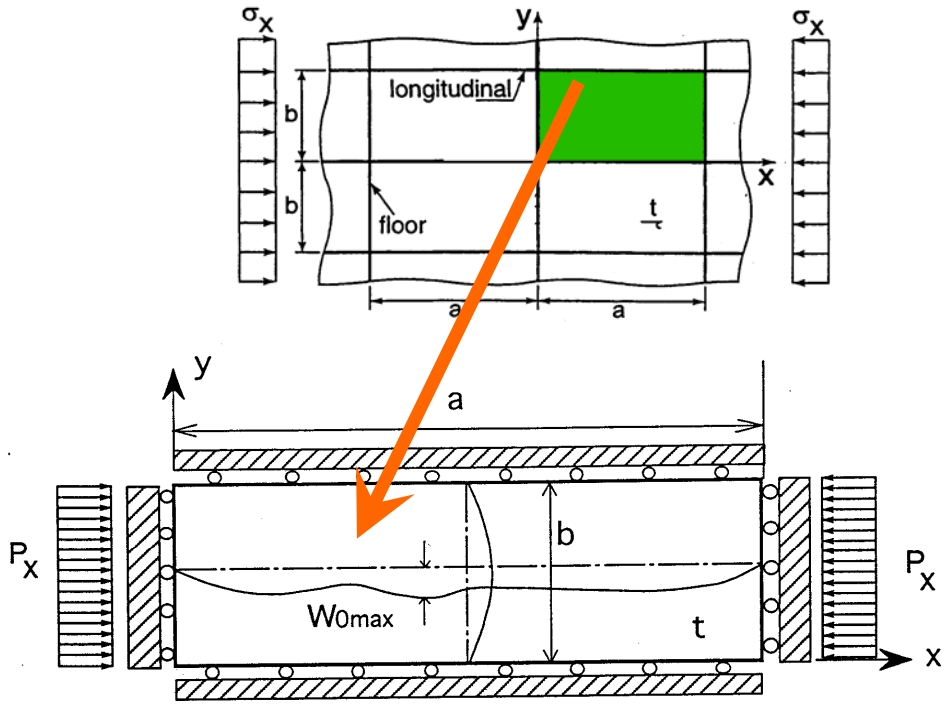
تنش تسلیم فولاد: $\sigma_Y = 32\ {Kgf}/{mm^2}$

تغییر شکل اولیه ورق های مستطیلی از فرم یا مودی پیچیده برخوردار است، شکل ۳. محققین مختلفی در زمینه اندازه گیری یا مدلسازی این مود مطالعه نموده اند. به منظور دستیابی به مروری بر این روشها میتوان به مرجع [۱] مراجعه نمود. آنچه که میتوان در اینجا به طور مختصر به آن اشاره کرد آنست که دو مود را میتوان برای نمایش تغییر شکل اولیه ورق در نظر گرفت: مود زین‌اسبی[2] و مود کمانشی[3].

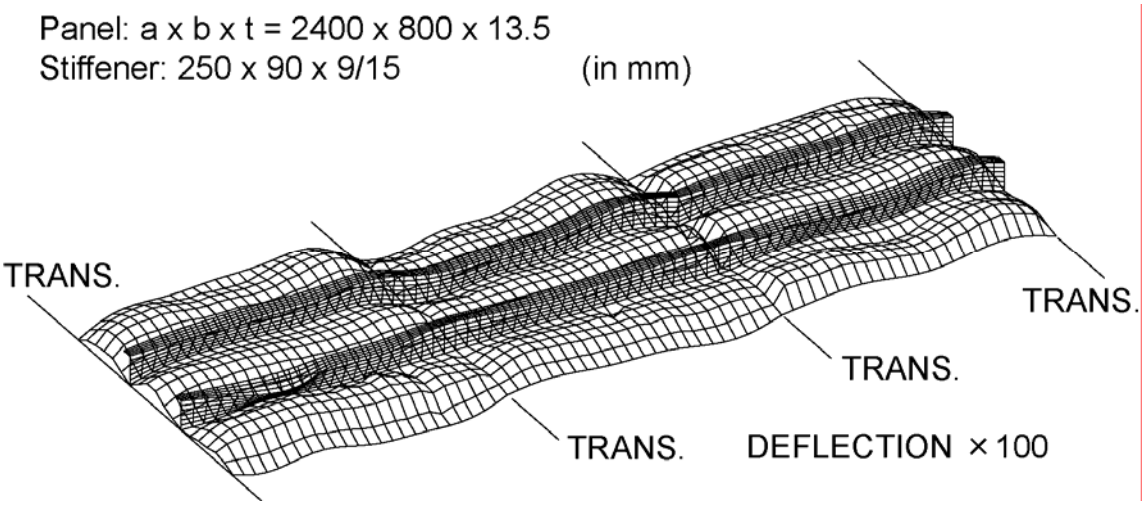
1- Straight-edge condition

2 - Hungry-horse mode initial deflection

3 - Buckling-mode initial deflection



شکل۲ مدل انتخاب شده برای تحلیل اجزای محدود



شکل ۳ نمونه ای از مود تغییرشکل اولیه اندازه گیری شده برای منطقه ای از سازه یک کشتی فله بر هندی سایز[۲]

جدول ۱ مقدار ضریب A_{0i} در مود زین‌اسبی

a/b	A_{01}/t	A_{02}/t	A_{03}/t	A_{04}/t	A_{05}/t	A_{06}/t	A_{07}/t	A_{08}/t	A_{09}/t	A_{010}/t	A_{011}/t
$1<a/b<\sqrt{2}$	1.1158	-0.0276	0.1377	0.0025	-0.0123	-0.0009	-0.0043	0.0008	0.0039	-0.0002	-0.0011
$\sqrt{2}\le a/b<\sqrt{6}$	1.1421	-0.0457	0.2284	0.0065	0.0326	-0.0022	-0.0109	0.0010	-0.0049	-0.0005	0.0027
$\sqrt{6}\le a/b<\sqrt{12}$	1.1458	-0.0616	0.3079	0.0229	0.1146	-0.0065	0.0327	0.0000	0.0000	-0.0015	-0.0074
$\sqrt{12}\le a/b<\sqrt{20}$	1.1439	-0.0677	0.3385	0.0316	0.1579	-0.0149	0.0743	0.0059	0.0293	-0.0012	0.0062
$\sqrt{20}\le a/b<\sqrt{30}$	1.2171	-0.0697	0.3483	0.0375	0.1787	-0.0199	0.0995	0.0107	0.0537	-0.0051	0.0256

در مود زین‌اسبی، تغییرشکل اولیه ورق بر اساس معادله زیر بیان می شود :

$$w_0 = 0.05\beta^2 \sum_{i=1}^{11} A_{0i} \sin\frac{i\pi x}{a}\sin\frac{\pi y}{b} \qquad (۱)$$

مقدار A_{0i} مطابق با جدول ۱ محاسبه می‌شود. بر اساس این معادله، ماکزیمم مقدار تغییرشکل اولیه ورق، $w_{0\max}$ از رابطه (۲) بدست می‌آید:

$$w_{0\max} = 0.05\beta^2 t \qquad (۲)$$

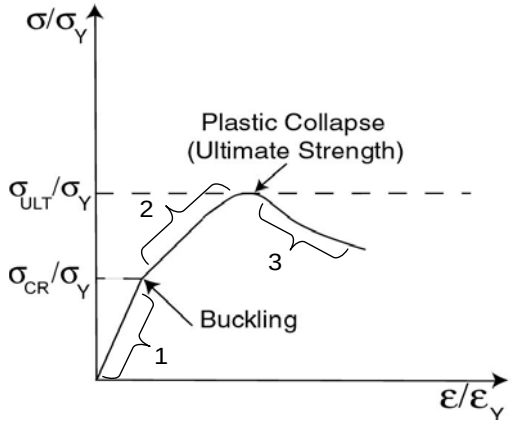
که در آن $\beta = \frac{b}{t}\sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}}$ برابر است با ضریب لاغری ورق. در این رابطه b و t به ترتیب عرض و ضخامت ورق، σ_Y تنش تسلیم و E مقدار مدول الاستیسیته ورق می‌باشد.

از سوئی دیگر، در مود کمانشی تغییرشکل اولیه ورق چنین است:

$$w_0 = A_{0m} \sin\frac{m\pi x}{a}\sin\frac{\pi y}{b} \qquad (۳)$$

مقدار A_{0m} طبق مطالعاتی که انجام شده است عموماً برابر $0.1t$، $0.01t$ و $0.15t$ پیشنهاد شده است. در این رابطه a طول ورق بین تقویت کننده‌های عرضی، b عرض ورق بین تقویت کننده طولی و m تعداد نیم‌موج های ایجاد شده در امتداد طول ورق در مود کمانش پایدار می‌باشد[۱] که برابر است با:

$$m = \begin{cases} 1: & a/b < 1.3 \\ k: & k\text{-}0.7 \le a/b < k + 0.3 \end{cases} \qquad (۴)$$



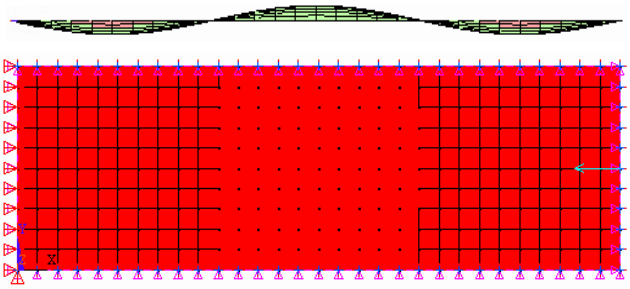
شکل۴ منحنی تنش-کرنش متوسط ورق

نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود

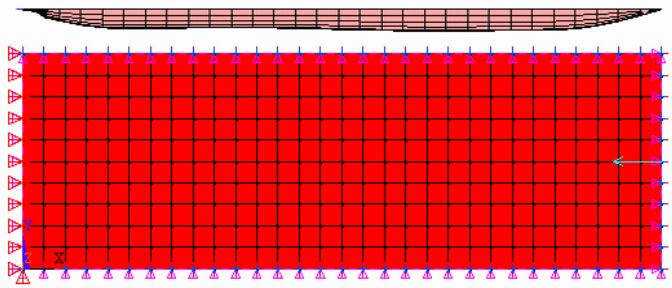
بر اساس مطالعات نظری یا تجربی پیشین، می توان گفت که رفتار ورقهای مستطیلی واقع تحت اثر بارگذاری و شرایط مرزی نشان داده شده در شکل ۲، مطابق شکل ۴ می‌باشد. همانطور که در این شکل دیده می شود، منحنی تنش درون صفحه ای- کرنش درون صفحه ای (یا به اختصار منحنی تنش-کرنش متوسط) این نوع ورقها تحت اثر بار محوری درون صفحه ای به ۳ ناحیه تقسیم می گردد. این نواحی عبارتند از: ناحیهٔ الاستیک[۱]، ناحیهٔ فرا کمانشی[۲] و ناحیهٔ پس از انهدام[۳] . در ناحیه اول ورق به صورت الاستیک رفتار کرده و منحنی تنش درون صفحه ای- کرنش درون صفحه ای آن به صورت خطی می‌باشد. در انتهای این ناحیه ورق دچار کمانش می‌شود. مقدار بارکمانشی را می توان از روابط مستخرج بطور مثال در مرجع[۳] بدست آورد. اگرچه در ناحیه دوم در ورق کمانش روی داده است، اما همچنان توانایی تحمل بار را دارد . در این ناحیه مقدار عرض مؤثر مبحث مهمی است که افراد مختلفی بر روی آن مطالعاتی را انجام داده‌اند. در انتهای ناحیه دوم ورق به استحکام نهایی[۴] خود رسیده و پس از آن منحنی تنش درون صفحه ای- کرنش درون صفحه ای عموماً به صورت نزولی می‌باشد. لازم به ذکر است که موارد گفته شده در نمودار رفتار ورقهای نازک بیشتر مشهود می‌باشد.

1- Elastic region
2- Post-buckling region
3- Post-ultimate region
4- Collapse or maximum load carrying capacity or ultimate strength

اشکال ۵ و ۶ مدل هایی از ورقهای تحلیل شده با نسبت های ابعادی مختلف رابه همراه شرایط مرزی و بارگذاری به نمایش می گذارند. نرم افزار اجزای محدود ANSYS [۴] برای انجام تحلیل ها مورد استفاده قرار گرفته است. از مجموعه اجزای موجود در کتابخانه این نرم افزار، جزء محدود SHELL43 انتخاب شده است.



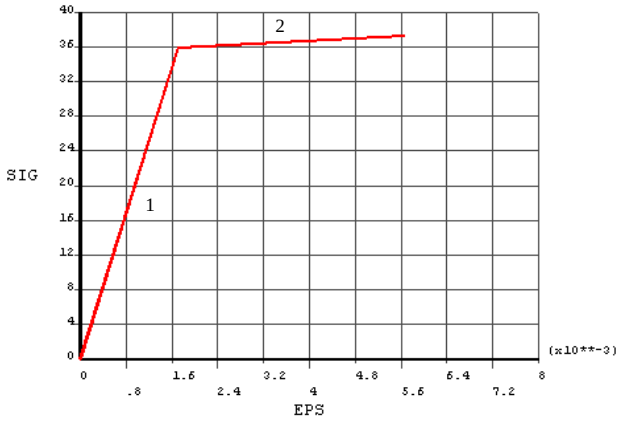
شکل۵ مدل ورق با نسبت ابعادی ۳ و تغییر شکل اولیه در مود کمانشی



شکل۶ مدل ورق با نسبت ابعادی ۳ و تغییر شکل اولیه در مود زین اسبی

در نرم افزار ANSYS رفتار ماده مطابق شکل ۷ بصورت دوخطی مدل می‌شود. مقدار شیب در دو ناحیه این نمودار برابر اند با[۲]:

$$Slope = \begin{cases} \dfrac{\sigma_Y}{E} & \text{in the region 1} \\ \dfrac{\sigma_Y}{65E} & \text{in the region 2} \end{cases} \qquad (۵)$$

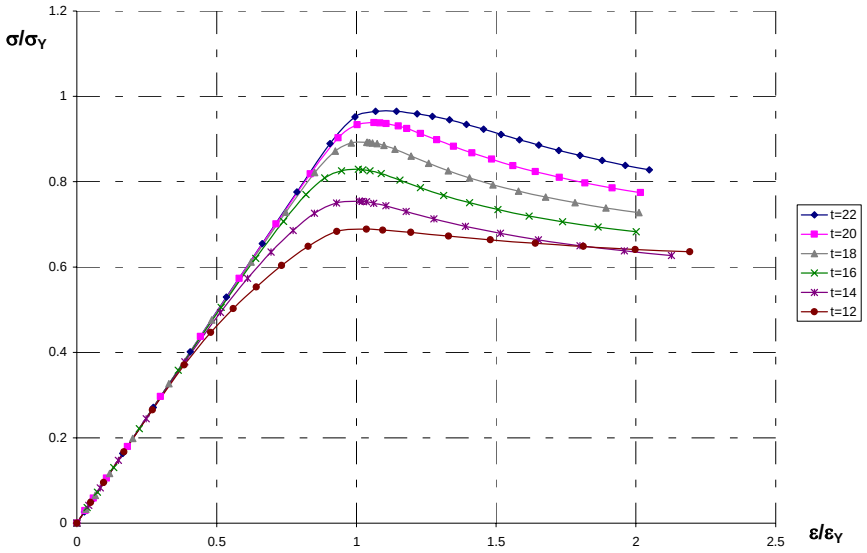


شکل۷ مدل رفتار ماده درANSYS

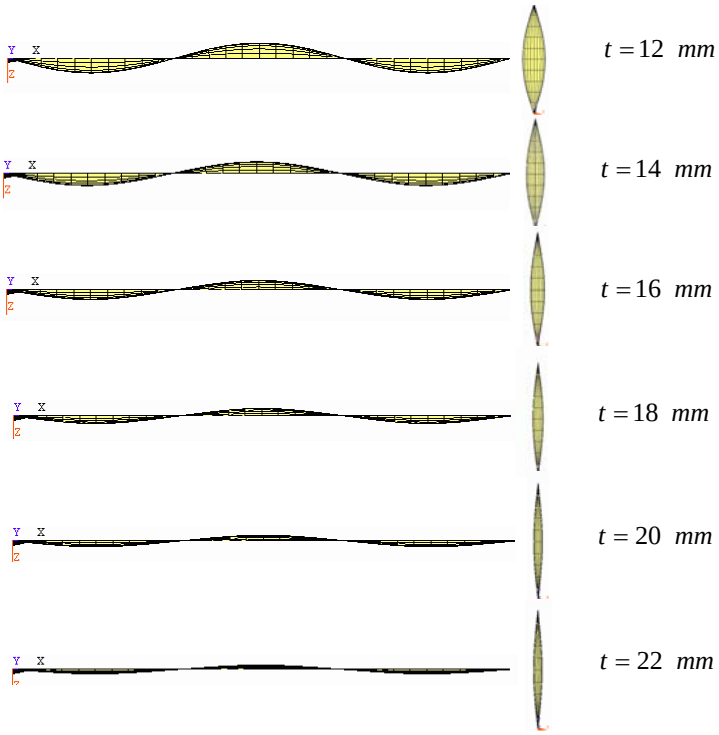
نتایج حاصل از تحلیلهای اجزای محدود بر روی مدلهای با نسبت ابعادی ۳ دردو مود تغییر شکل زین اسبی و کمانشی در اشکال ۸ و ۹ نشان داده شده اند . همانطور که در این اشکال دیده میشود، استحکام کمانشی و همچنین استحکام نهایی ورقها در یک نسبت ابعادی مشخص، با افزایش ضخامت افزوده می شوند . این رفتار در هر دو مود تغییر شکل اولیه کمانشی و یا زین اسبی در ورقها دیده می شود . آنچه که مهمتر است این میباشد هنگامیکه ورق دارای مود تغییر شکل اولیه کمانشی است ، در زمان رسیدن به نقطه استحکام نهایی و یا نقطه انهدام ، نیم موجهایی منظم و با قاعده[1] با طول هایی برابر در طول ورق ایجاد میشوند . این در حالیست که نیم موج های ایجاد شده در ورقهای با تغییر شکل اولیه در مود زین اسبی ، در امتداد طول نامنظم و بدون هر قاعده ای[2] هستند . از سویی دیگر دیده میشود که استحکام کمانشی ورقها زمانیکه دارای تغییر شکل اولیه در مود زین اسبی هستند نسبت به زمانیکه از تغییر شکل اولیه در مود کمانشی برخوردارند ، بیشتر میشود . این امر بدلیل آنست که در مورد تغییر شکل زین اسبی ، ورق مبادرت به مقاومت بیشتری نسبت به تغییر مود (از مود زین اسبی به مود کمانشی) از خود نشان میدهد.

1- Regular half-waves

2- Irregular half-waves

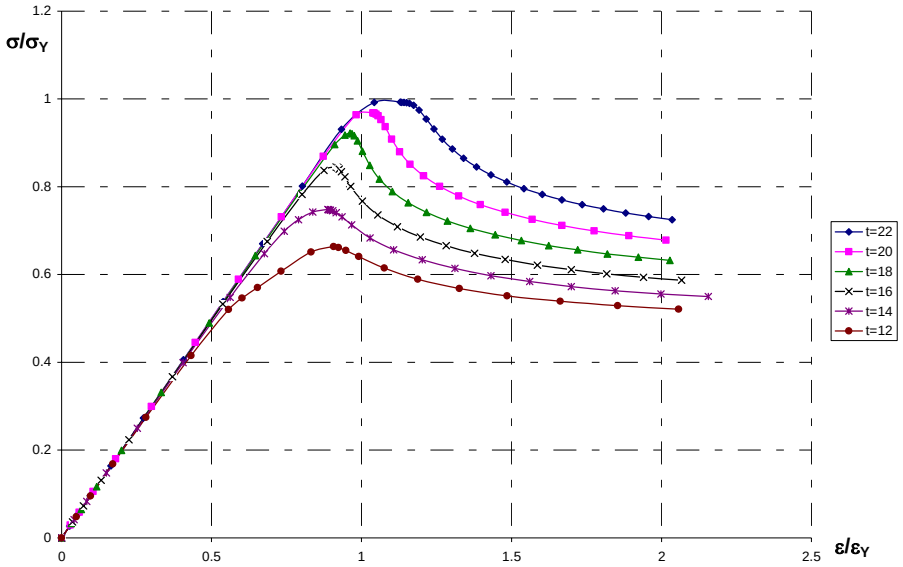


الف. منحنی تنش_کرنش متوسط ورق در ضخامتهای ۱۲ تا ۲۲ میلیمتر

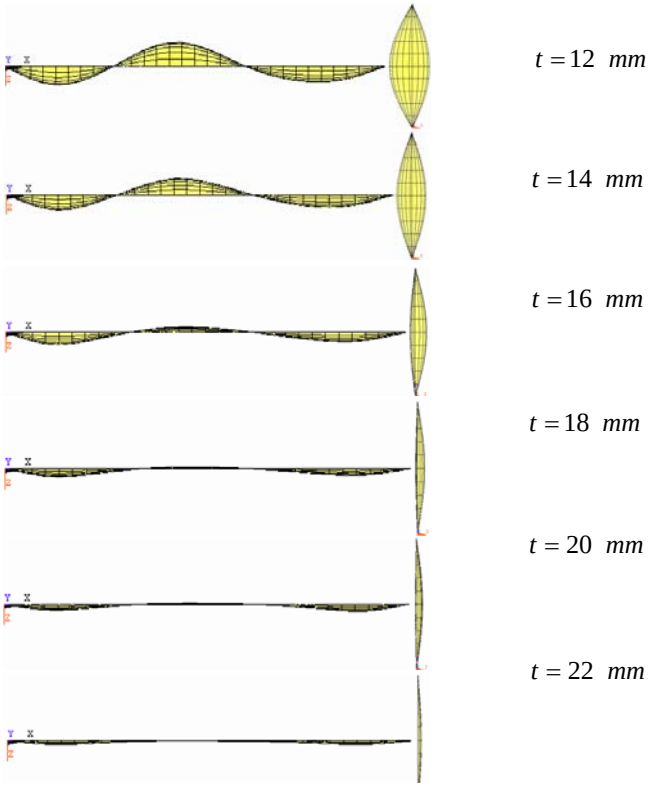


ب. تغییر شکل ایجاد شده در ورق در ضخامتهای نشان داده شده در نقطه استحکام نهایی

شکل ۸ نتایج تحلیل های انجام شده توسط ANSYS بر روی مدل با نسبت ابعادی ۳ و تغییر شکل اولیه با مود کمانشی



الف. منحنی تنش_کرنش متوسط ورق در ضخامتهای ۱۲ تا ۲۲ میلیمتر



ب. تغییر شکل ایجاد شده در ورق در ضخامتهای نشان داده شده در نقطه استحکام

شکل۹ نتایج تحلیل های انجام شده توسط ANSYS بر روی مدل با نسبت ابعادی ۳ و تغییر شکل اولیه با مود زین اسبی

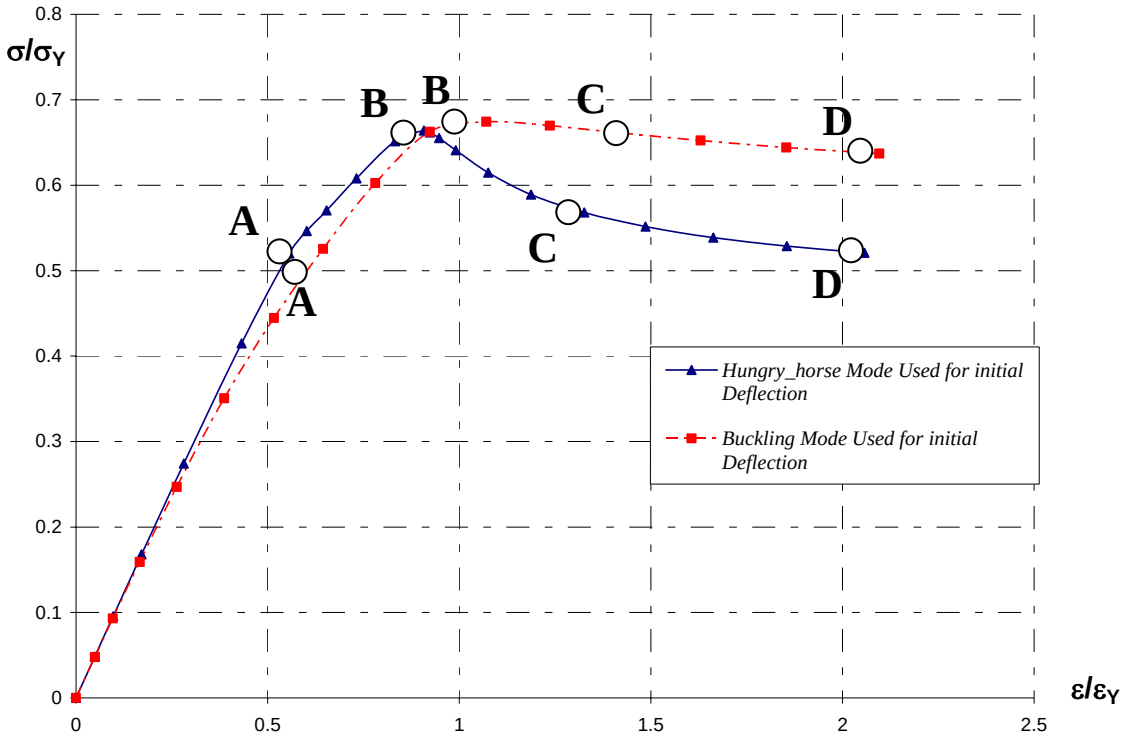
همانطور که در اشکال قبل مشاهده گردید با افزایش ضخامت مقدار تغییر شکل ایجاد شده در ورق نیز کاهش می‌یابد. نکتهٔ دیگر آنکه تغییر شکل های ایجاد شده در ورق در دو مود مورد مطالعه متفاوت بوده و توزیع آنها نیز متفاوت از یکدیگرند. در ذیل به بحث درباره این موضوع می پردازیم.

ورق نازک

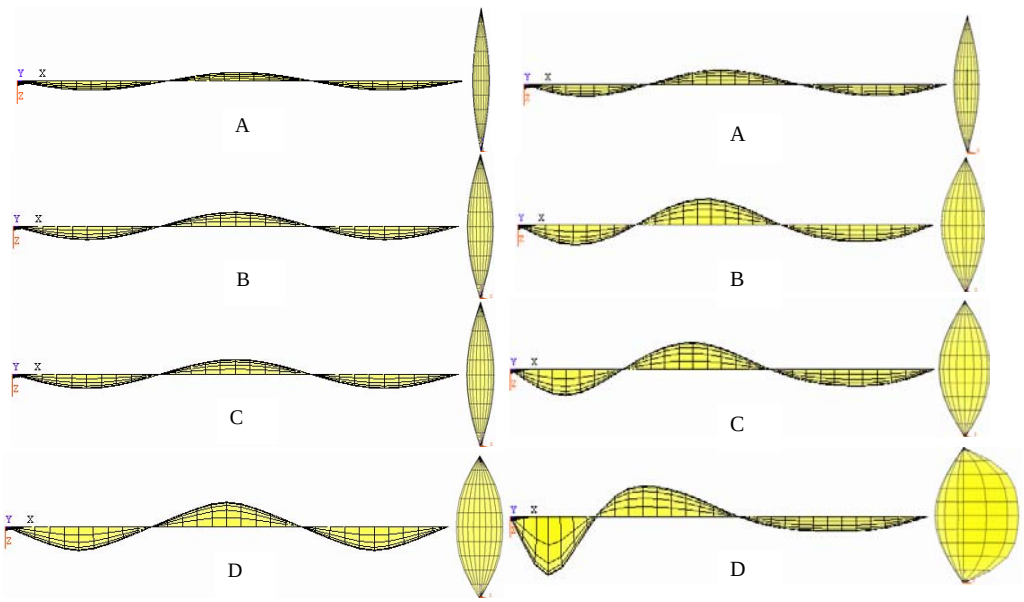
مطالعه رفتار الاستوپلاستیک ورق ۱۲ میلیمتری به عنوان یک ورق نازک، مثالی مناسب می‌باشد. منحنی های تنش-کرنش متوسط این ورق در دو مود کمانشی و زین‌اسبی در شکل ۱۰ و همچنین تغییرات در تغییر شکل های ایجاد شده در آن برای دو مود مذکور در شکل ۱۱ ارائه شده است. با توجه به این اشکال می توان نکات زیر را جمع بندی کرد:

- با افزایش بارگذاری و پیش رفتن در طول منحنی تنش-کرنش متوسط ، مقدار تغییر شکل اولیه ایجاد شده در ورق نیز بیشتر می‌شود.
- در مود زین‌اسبی طول موجهای کمانش‌ی با هم برابر نیستند. این در حالی است که در مود کمانشی طول موجها با هم برابر است.
- برای حالت تغییر شکل اولیه در مود کمانشی، مود تغییر شکل ایجاد شده در ورق از سینوسی به سقفی[1] تغییر می‌یابد.
- برای حالت تغییر شکل اولیه در مود زین‌اسبی، پس از نقطه استحکام نهایی در بخشهای‌ی از ورق باربرداری اتفاق می‌افتد، در حال‌ی که در دی‌گر بخشها تمرکز تغ‌یی‌ر شکلهای پلاست‌ی‌ک روی می‌دهد.

1- Roof mode



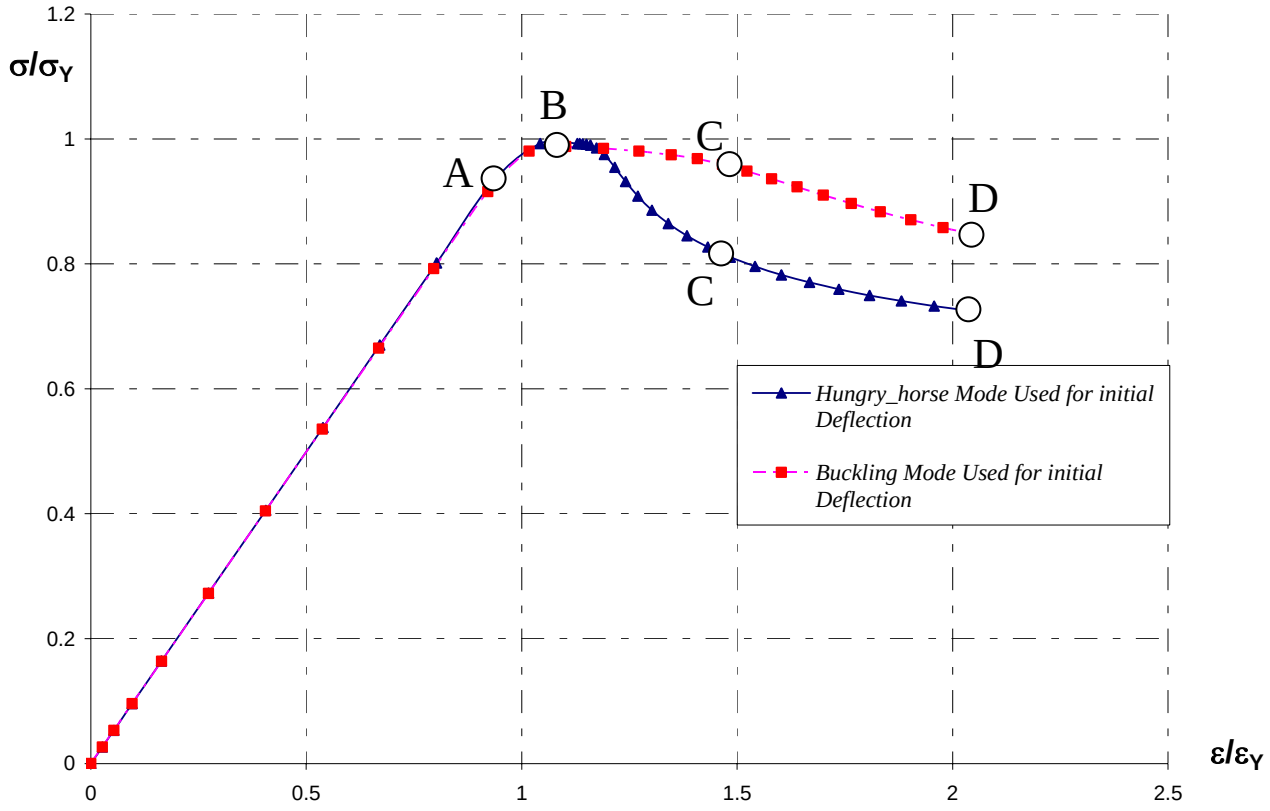
شکل ۱۰ مقایسه منحنی تنش-کرنش متوسط مود کمانشی و زین‌اسبی برای ورق نازک با نسبت ابعادی ۳



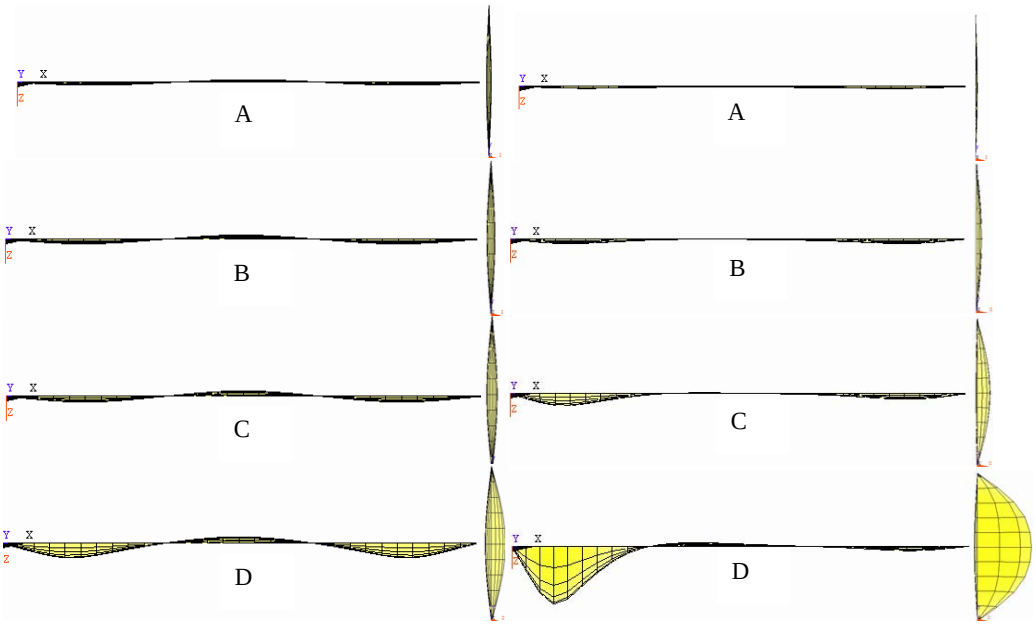
شکل ۱۱ تغییرات در مود تغییر شکل برای ورق نازک با نسبت ابعادی ۳ تحت اثر فشار محوری

(راست: مود زین اسبی تغییرشکل اولیه، چپ: مود کمانشی تغییرشکل اولیه)

A) شروع کمانش B) نقطه استحکام نهایی C) نقطه ای از ناحیه پس از انهدام D) انتهای تحلیل



شکل۱۲ مقایسه منحنی تنش-کرنش مود کمانشی و مود زین‌اسبی برای ورق ضخیم با نسبت ابعادی ۳



شکل ۱۳ تغییرات در مود تغییر شکل برای ورق ضخیم با نسبت ابعادی ۳ تحت اثر فشار محوری

(راست: مود زین اسبی تغییرشکل اولیه، چپ: مود کمانشی تغییرشکل اولیه)

A) شروع کمانش B) نقطه استحکام نهایی C) نقطه ای از ناحیه پس از انهدام D) انتهای تحلیل

ورق ضخیم

مطالعه رفتار الاستوپلاستیک ورق ۲۲ میلیمتری به عنوان یک ورق ضخیم، مثالی مناسب می‌باشد. منحنی های تنش-کرنش متوسط این ورق در دو مود کمانشی و زین‌اسبی در شکل ۱۲ و همچنین تغییرات در تغییر شکل های ایجاد شده در آن برای دو مود مذکور در شکل ۱۳ ارائه شده است. با توجه به این اشکال می توان نکات زیر را جمع بندی کرد:

- با افزایش بارگذاری و پیش رفتن در طول منحنی تنش-کرنش متوسط ، مقدار تغییر شکل اولیه ایجاد شده در ورق نیز بیشتر می‌شود.
- در مود زین‌اسبی طول موجهای کمانش‌ی با هم برابر نیستند. این رفتار در مود کمانشی نیز دیده می شود.
- برای حالت تغییر شکل اولیه در مود کمانشی، مود تغییر شکل ایجاد شده در ورق از سینوسی نامنظم به سقفی تغییر می‌یابد.
- برای حالت تغییر شکل اولیه در مود زین‌اسبی، پس از نقطه استحکام نهایی در بخشهای‌ی از ورق باربرداری اتفاق می‌افتد، در حال‌ی که در دی‌گر بخشها تمرکز تغ‌یی‌ر شکلهای پلاست‌ی‌ک روی م‌ی‌دهد.

نتیجه‌گیری

تغییر شکل اولیه ورقها در دو مود کمانشی و زین اسبی در نظر گرفته می‌شود. در مود کمانشی تغییر شکل اولیه در دو طرف ورق فرض شده، در حالی که در مود زین‌اسبی تغییر شکل اولیه در یک طرف ورق در نظر گرفته می‌شود. بررسی های محلی نشان داده است که مود زین‌اسبی به واقعیت نزدیکتر می‌باشد.

با فرض دو مود تغییر شکل اولیه رفتار ورقها تحت اثر بار فشاری بعد از عبور از استحکام نهایی متفاوت خواهد بود. این رفتار به ضخامت ورق نیز بستگی دارد.

در ورقهای نازک با فرض مود کمانشی تغییر شکل اولیه، تغییر شکل ایجاد شده تا نقطهٔ استحکام نهایی به صورت سینوسی بوده و پس از آن به تدریج به مود سقفی تغییر شکل پیدا می‌کند. اما در هر صورت توزیع نیم‌موجها در طول ورق به صورت یکنواخت می‌باشد. چنانچه در این ورقها مود زین‌اسبی به عنوان تغییر شکل اولیه در نظر گرفته

در مورد ورقهای ضخیم با فرض مود زین‌اسبی رفتار ورق پس از استحکام نهایی مانند ورقهای نازک می‌باشد. اما چنانچه از مود کمانشی استفاده شود، رفتار ورق پس از استحکام نهایی با ورقهای نازک متفاوت می‌باشد.

منابع

[1] Khedmati, M.R. 'Some Considerations on Welding-Induced Imperfections for Buckling /Plastic Collapse Analysis of Ship Structural Members and Systems', 2nd Int. Conf. On Welding (ICW2002), Iranian Welding Research and Engineering Center, March 10-13, (2002).

[2] Fujikubo, M., Harada, M., Yao, T., Khedmati, M.R., and Yanagihara, D., "Estimation of ultimate strength of continuous stiffened panel under combined transverse thrust and lateral pressure Part 2: Continuous stiffened panel ",Marine Structures, Volume 8, Issues 5-6, (2005).

[3] Timoshenkoh, S.P., and Gere, J.M., "Theory of Elastic Stability", New York, N.Y., 1961, pp 319-328.

[4] ANSYS user manual, Version 9.0

[5] Gerstle, K.H., "Basic Structure Design", New York, N.Y., 1967, pp 88-90