



بررسی تأثیر سخت شدگی مجدد بر رفتار کمانشی و انهدامی ورقها

محمدرضا خدمتی^۱، ایرج کیوانفر^۲

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

khedmati@cic.aut.ac.ir

چکیده

در این تحقیق سعی شده است تا با انجام تحلیل هایی به روش اجزای محدود، تأثیر نرخ سخت شدگی مجدد در رفتار کمانشی و انهدام ورقها بررسی شود. یک حالت از روابط تنش - کرنش مواد موسوم به دو خطی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و واقعیات زیر بدست آمده است:

۱. سخت شدگی مجدد تأثیر کمی بر استحکام نهایی ورقهای نازک دارد، ولی در مورد ورقهای ضخیم تأثیر سخت شدگی مجدد بر استحکام نهایی زیاد است.

۲. سخت شدگی مجدد تأثیر زیادی بر رفتار پس از استحکام نهایی ورقهای نازک و ضخیم دارد. بطوریکه با افزایش نرخ سخت شدگی مجدد، پس از عبور از نقطه استحکام نهایی همزمان با افزوده شدن تغییر شکل از میزان باربرداری کاسته شده و تنش متوسط زیاد می شود.

کلمات کلیدی: سخت شدگی مجدد - استحکام نهایی - منحنی های تنش - کرنش - مودهای تغییر شکل

1- استادیار دانشکده مهندسی کشتی سازی و مهندسی دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

2- دانشجوی دوره کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی کشتی سازی و مهندسی دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)



مقدمه

همانطور که می دانیم در تحلیل استحکام نهایی سازه های جدار نازک که از ورق تشکیل شده اند، معمولاً رفتار ورق به صورت الاستیک - کاملاً پلاستیک در نظر گرفته می شود. این در حالی است که در واقعیت، عملاً این اتفاق نمی افتد و مصالح رفتارهای متفاوتی از خود نشان می دهند. علت این امر را می توان در تغییر رفتار مصالح در اثر پدیده ای موسوم به سخت شدگی مجدد^۱ در ناحیه پلاستیک یا خمیری جستجو کرد. این تغییر در رفتار مصالح، سبب تغییر در نمودار تنش - کرنش این سازه ها شده و بر استحکام نهایی و کمانسی آنها تأثیر می گذارد. در این تحقیق سعی شده است تا با انجام تحلیل هایی به روش اجزای محدود، تأثیر نرخ سخت شدگی مجدد در رفتار کمانسی و انهدام ورقها بررسی شود. مدل مورد بررسی در این گزارش ورق های فولادی تحت فشار تک محوری در امتداد طول با ضخامت های ۱۰ و ۲۰ میلیمتر می باشد که نمودار تنش - کرنش فولاد در آنها بصورت دو خطی و شامل یک ضریب الاستیک ثابت و یک ضریب پلاستیک متغیر است. ضمن آنکه ورق دارای مود تغییر شکل اولیه در مودهای کمانسی و زین اسبی و نیز دارای شرایط تکیه گاهی ساده می باشد.

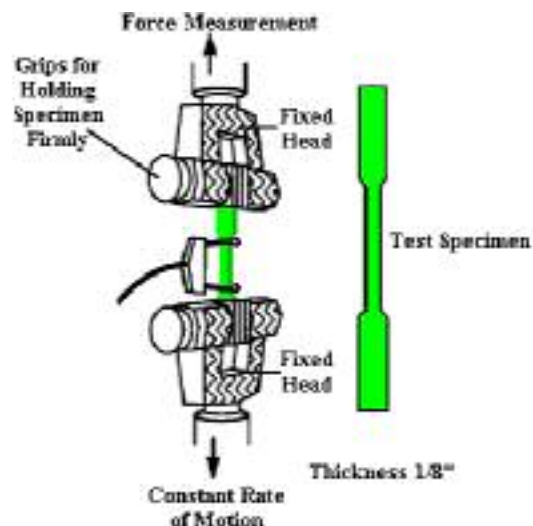
منحنی های تنش و کرنش

تئوریهای الاستیسیته و پلاستیسیته، مکانیک تغییر شکل اکثر جامدات مهندسی را توضیح می دهند. هر دو تئوری که برای فلزات و آلیاژها بکار می روند، مبتنی بر مطالعات آزمایشی بین تنش و کرنش در یک توده چند بلوری تحت شرایط بارگذاری ساده هستند. برای بدست آوردن منحنی تنش - کرنش یک ماده، معمولاً روی نمونه ای از آن آزمون کشش انجام می دهند، شکل (۱).

منحنی تنش - کرنش مواد گوناگون تفاوت زیادی با یکدیگر دارند، اشکال (۲) و (۳). باوجود این می توان در میان نمودارهای تنش - کرنش گروههای گوناگون مواد، مشخصه های مشترکی را تشخیص داد و براساس این مشخصه ها مواد

1 - Strain hardening

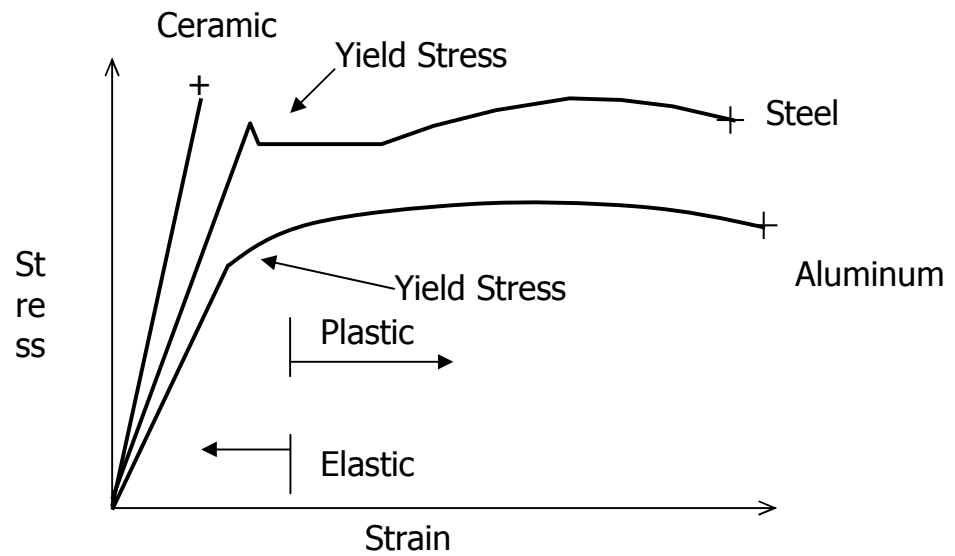
مختلف را به دو گروه اصلی مواد شکل پذیر^۱ و شکننده^۲ تقسیم بندی کرد. وقتی که نمونه شکل پذیر در معرض بار افزایش یابنده قرار می گیرد، ابتدا طولش بطور خطی و با آهنگی بسیار آهسته با بار افزایش می یابد. از این رو قسمت اول منحنی تنش- کرنش خطی مستقیم با شیبی تند است. اما پس از اینکه تنش به مقدار بحرانی σ_y رسید، نمونه با افزایش نسبتاً کم بار اعمال شده تغییر شکل زیادی می دهد. مشخصه مواد شکننده این است که گسیختگی آنها بدون تغییر قابل توجهی در آهنگ افزایش طول اتفاق می افتد. بدین ترتیب، در مواد شکننده تفاوتی میان استحکام نهایی و استحکام شکست وجود ندارد، شکل (۴). البته در رسم منحنی های زیر، تنش از تقسیم بار بر سطح مقطع نمونه پیش از آزمایش بدست آورده شده که به آن تنش مهندسی گفته می شود.



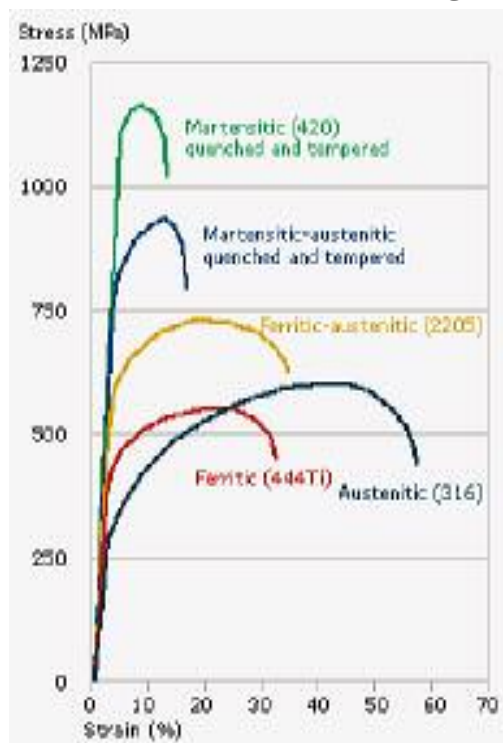
شکل ۱ نوعی آزمون - کشش نمونه

1 - Ductile materials

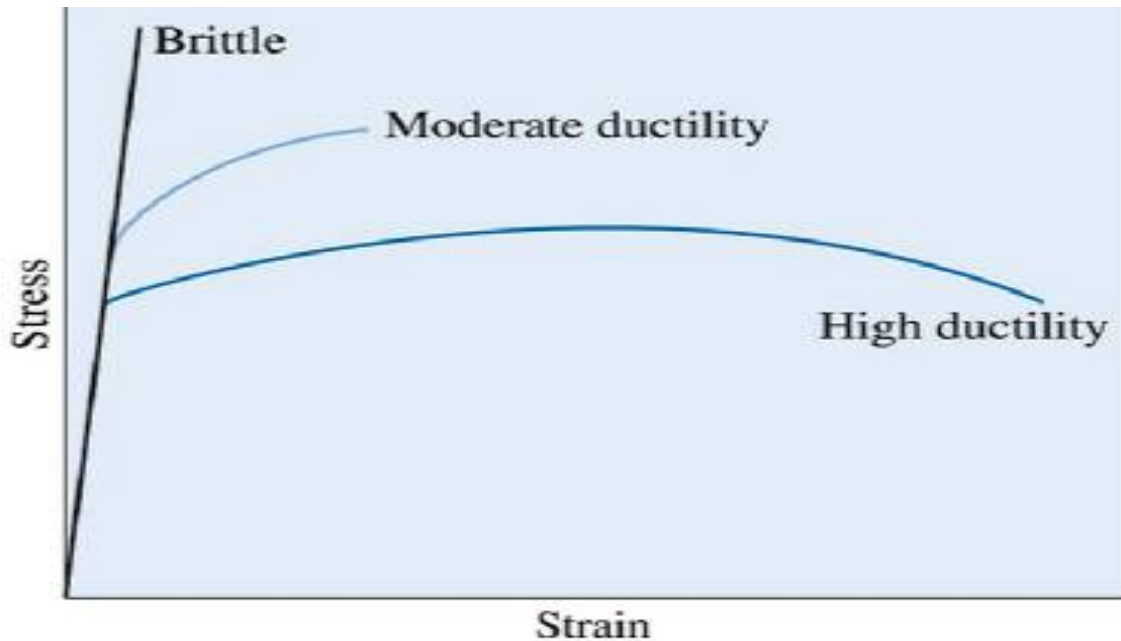
2 - Brittle materials



شکل ۲ منحنی تنش - کرنش برای فولاد، آلومینیوم و سرامیک



شکل ۳ منحنی تنش - کرنش برای فولادهای مختلف



شکل ۴ نمودار تنش - کرنش برای مواد شکل پذیر و شکننده

مواد

فولاد از مهمترین مصالح ساختمانی در ساخت سازه های دریایی محسوب می شود. مشخصات مهم فولاد که آن را نسبت به سایر مصالح ساختمانی ممتاز ساخته است، مقاومت بالا، شکل پذیری و یکسان بودن مقاومت آن در کشش و فشار می باشد. در کنار این مزایا، فراوانی معادن سنگ آهن نیز از عوامل مؤثر در عمومیت یافتن مصرف فولاد می باشد. فولادها بر حسب مشخصات مکانیکی و موارد مصرف، توسط مؤسسات استاندارد کشورهای مختلف تولید کننده فولاد، استاندارد شده و نام خاصی برای آنها انتخاب می شود.

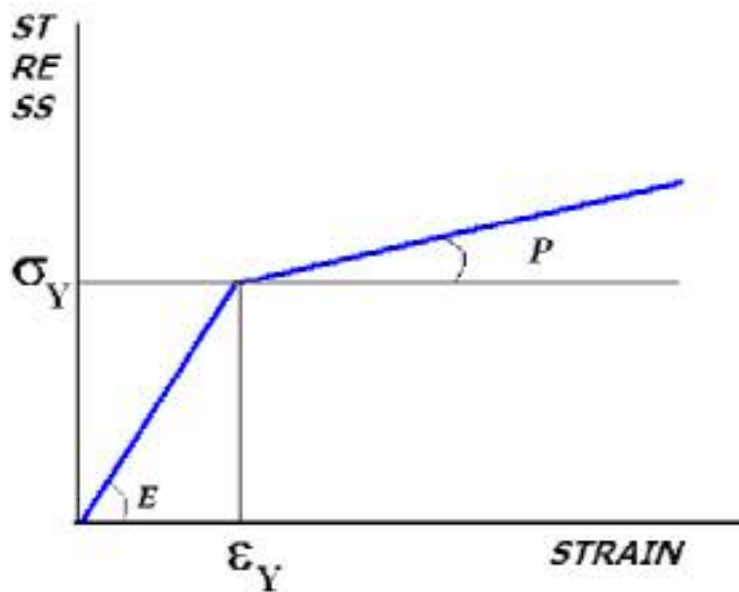
سخت شدگی مجدد

در آزمایش کشش فولاد، اگر بعد از اینکه کرنش از کرنش جاری شدن ($\epsilon_Y = \sigma_Y / E$) به مقدار قابل توجهی تجاوز نمود، نمونه باربرداری شود. نمودار تنش - کرنش حالت باربرداری با حالت بارگذاری متفاوت خواهد بود. اگر نمونه در محدوده الاستیک باربرداری شود، نمودار تنش - کرنش روی نمودار اولیه به سمت مبدأ



مدلسازی منحنی های تنش - کرنش

(۱) یک روش متداول برای نشان دادن تقریبی منحنی تنش - کرنش این است که از دو عبارت خطی (Bilinear) یا چند عبارت خطی (Multi linear) بین تنش و کرنش استفاده کرد. بدین صورت که $\sigma = E \cdot \varepsilon$ از ۰ تا σ_Y و $\sigma = \sigma_Y + P \cdot (\varepsilon - \varepsilon_Y)$ از σ_Y به بعد است. E را می توان به عنوان ضریب الاستیک، و P را ضریب پلاستیک فرض نمود.



شکل ۶ رابطه خطی دوگانه برای تنش و کرنش

(۲) عبارت Voce $\sigma = (b - a) [1 - \exp(-n\varepsilon)]$ را که در آن a و b و n اعداد ثابت هستند، پیشنهاد کرده است. این عبارت انطباق خوبی برای منحنی تنش - کرنش می دهد، اما به خاطر پیچیده بودن به ندرت در تحلیل های تئوری از آن استفاده می شود.

(۳) عبارت منصوب به Swift در اینجا به شکل ساده تری بیان می شود:

$$\sigma = c (a + \varepsilon)^n \quad 0 \leq n \leq 1$$

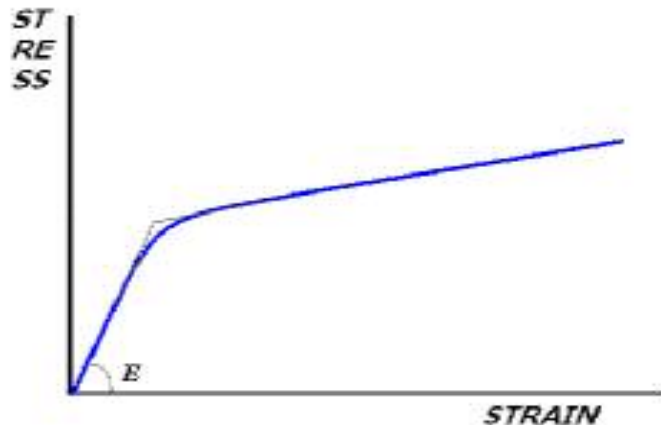
که c و a و n اعداد ثابت برای یک ماده خاص هستند. این معادله واقع بینانه تر بوده و برای کاربرد در مواردی که کرنشها بزرگتر از ۱ هستند مناسب است، اما عملیات جبری آن ممکن است مشکل باشد.



Prager (۴) این عبارت را پیشنهاد کرده است :

$$\sigma = Y \tanh (E \varepsilon / Y)$$

این منحنی در کرنش صفر دارای ضریب تانژانت E بوده و به طرف Y به صورت متجانب با یک نرخ سریع نزدیک میشود.



شکل ۷ رابطه نمایی بین تنش و کرنش

مدل جهت تحلیل: شرایط مرزی و بارگذاری

جهت بررسی استحکام نهایی و کممانشی در اثر سخت شدگی مجدد، ورق های فولادی با مشخصات زیر انتخاب شده اند:

- 1) $a*b*t = 2400*800*10$ mm (a/b = 3)
- 2) $a*b*t = 640*800*10$ mm (a/b = 0.8)
- 3) $a*b*t = 2400*800*20$ mm (a/b = 3)
- 4) $a*b*t = 640*800*20$ mm (a/b = 0.8)

ضمناً ورق دارای تغییر شکل اولیه برابر 0.01 میلیمتر می باشد که یکبار در مود تغییر شکل اولیه کممانشی^۱ و یکبار نیز

در مود تغییر شکل اولیه زین اسبی^۲ فرض می شود. علاوه بر این تنش تسلیم مواد برابر 30 kgf/mm^2 و منحنی تنش

– کرنش فولاد، ترکیبی از دو ناحیه خطی^۳ (یک ناحیه خطی با شیب E برابر 21000 kgf/mm^2 از مبدأ تا نقطه

متناظر با تنش تسلیم و ناحیه خطی دیگر با شیبهای 0 و $E/30$ و $E/20$ و $E/10$ از نقطه تسلیم به بعد) فرض میشود.

¹ . Buckling Mode

² . Hungry-Horse Mode

³ . Bilinear Stress-Strain Curve



شرایط مرزی برای این ورق در صفحه XY را می توان بصورت زیر بیان کرد:

$$x=0, y=0 \text{ to } b : U_x = U_y = U_z = 0$$

$$x=a, y=0 \text{ to } b : \theta_z = U_z = U_y = 0$$

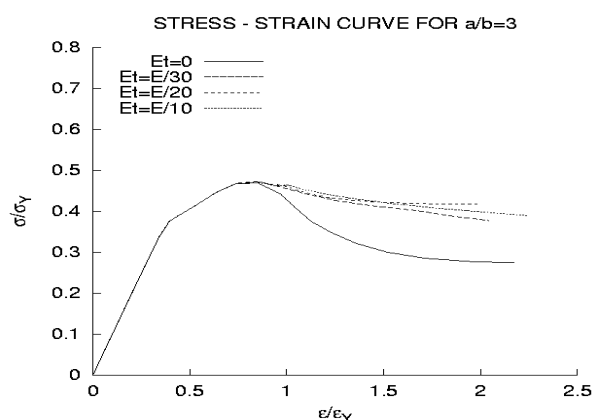
$$x=0 \text{ to } a, y=0 : \theta_z = U_z = U_y = 0$$

$$x=0 \text{ to } a, y=b : \theta_z = U_z = U_y = 0$$

پس از مهیا نمودن شرایط اولیه، با قرار دادن ورق، تحت فشار درون صفحه ای می توان منحنی های تنش متوسط - کرنش متوسط را از تحلیل به روش اجزای محدود برای حالات متفاوت ضریب پلاستیک و نسبت ابعادی بدست آورد. در ادامه برخی نتایج تحلیل برای حالات مختلف آورده شده است.

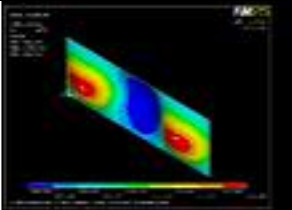
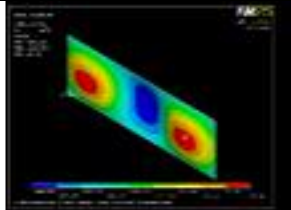
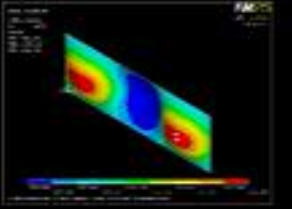
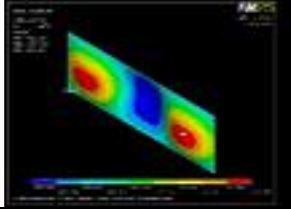
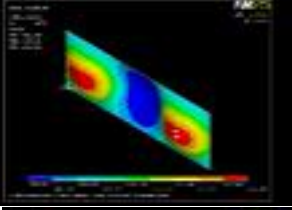
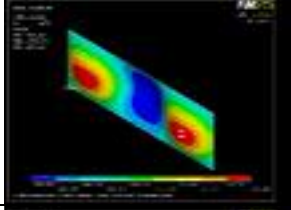
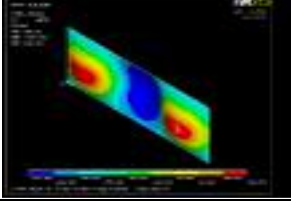
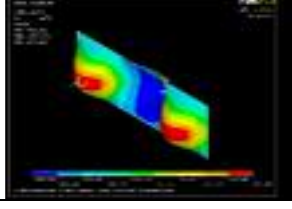
نتایج و تفسیر آنها

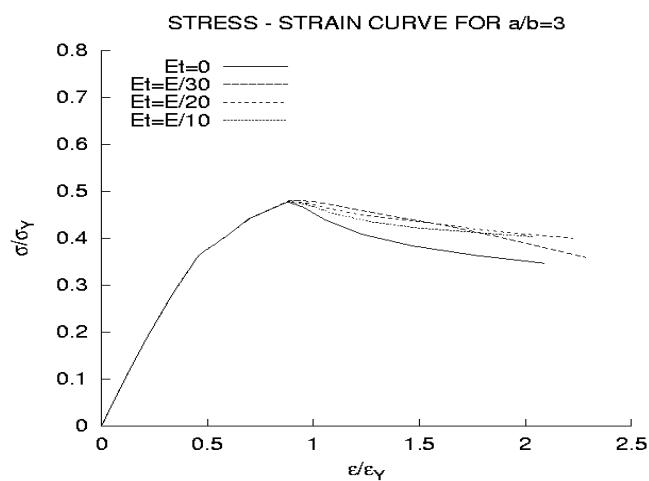
در ذیل نتایج تحلیل های اجزا محدود برای ورق های مختلف در نظر گرفته شده، جمع بندی شده اند. این نتایج شامل منحنی تنش - کرنش ورق و همچنین تغییر شکل ورق و گسترش تسلیم شدگی در نقطه استحکام نهایی و در آخرین مرحله از تحلیل در حالات مختلف سخت شدگی مجدد می باشد پس از ارائه کلیه نتایج تحلیلها، برخی نکات جمع بندی میشوند.



شکل ۸ منحنی تنش - کرنش برای ورق $10 \times 800 \times 2400$ تحت اثر بار فشاری با تغییر شکل اولیه در مود کمانشی

جدول ۱ مودهای تغییر شکل برای ورق $۱۰*۸۰۰*۲۴۰۰$ تحت اثر بار فشاری با تغییر شکل اولیه در مود کمانشی

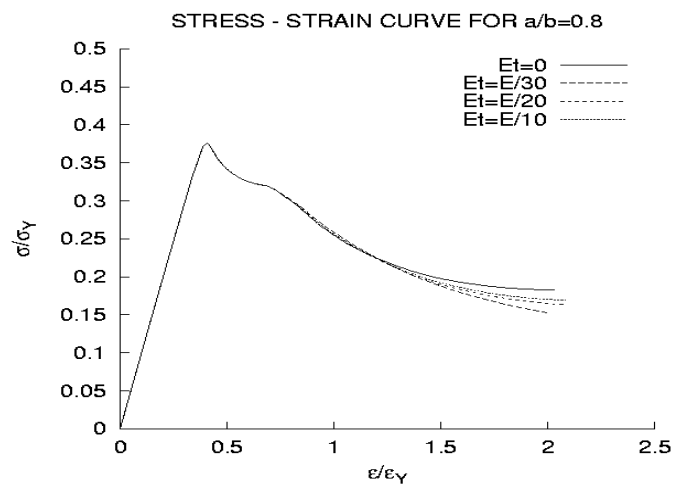
ورق $۱۰*۸۰۰*۲۴۰۰$ با تغییر شکل اولیه در مود کمانشی		
Strain hardening rate: $E_t = P$	Deflection mode at ultimate strength	Deflection mode at final stage of calculation
$E_t = 0$		
$E_t = E/30$		
$E_t = E/20$		
$E_t = E/10$		

شکل ۹ منحنی تنش_ کرنش برای ورق $۱۰*۸۰۰*۲۴۰۰$ تحت اثر بار فشاری با تغییر شکل اولیه در مود زین اسبی



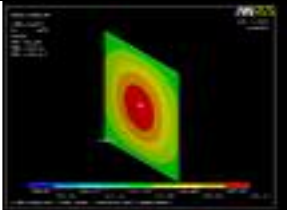
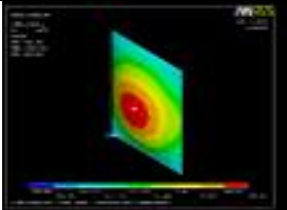
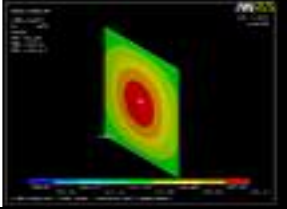
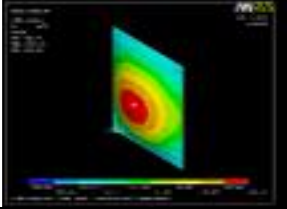
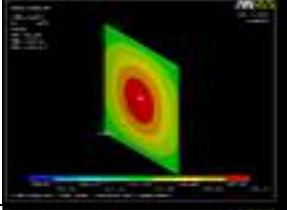
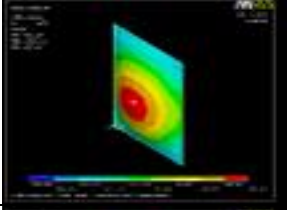
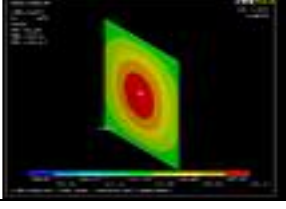
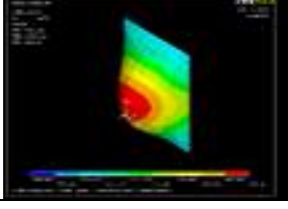
جدول ۲ مودهای تغییر شکل برای ورق $۱۰*۸۰۰*۲۴۰۰$ تحت اثر بار فشاری با تغییر شکل اولیه در مود زین اسبی

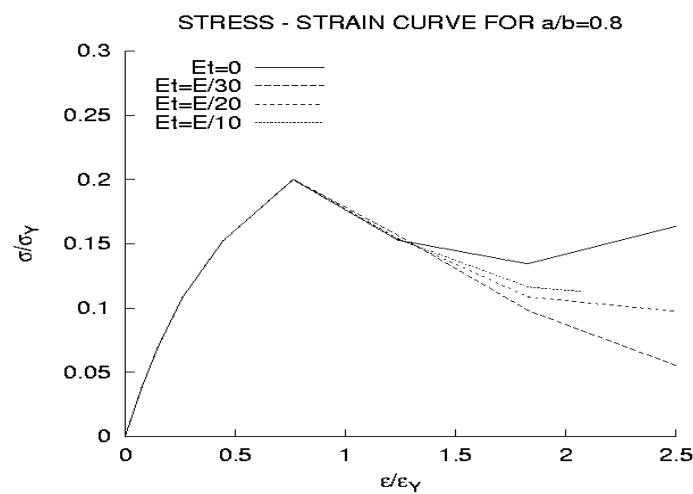
ورق $۱۰*۸۰۰*۲۴۰۰$ با تغییر شکل اولیه در مود زین اسبی		
Strain hardening rate: $E_t = P$	Deflection mode at ultimate strength	Deflection mode at final stage of calculation
$E_t = 0$		
$E_t = E/30$		
$E_t = E/20$		
$E_t = E/10$		



شکل ۱۰ منحنی تنش_ کرنش برای ورق $۱۰*۸۰۰*۶۴۰$ تحت اثر بار فشاری با تغییر شکل اولیه در مود کمانشی

جدول ۳ مودهای تغییر شکل برای ورق $۱۰*۸۰۰*۶۴۰$ تحت اثر بار فشاری با تغییر شکل اولیه در مود کمانشی

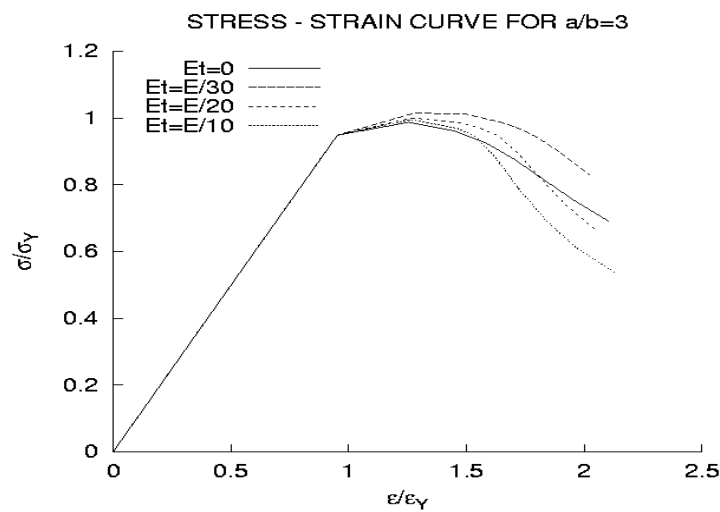
ورق $۱۰*۸۰۰*۶۴۰$ با تغییر شکل اولیه در مود کمانشی		
Strain hardening rate: $E_t = P$	Deflection mode at ultimate strength	Deflection mode at final stage of calculation
$E_t = 0$		
$E_t = E/30$		
$E_t = E/20$		
$E_t = E/10$		

شکل ۱۱ منحنی تنش_ کرنش برای ورق $۱۰*۸۰۰*۶۴۰$ تحت اثر بار فشاری با تغییر شکل اولیه در مود زین اسبی



جدول ۴ مدهای تغییر شکل برای ورق $۱۰ \times ۸۰۰ \times ۶۴۰$ تحت اثر بار فشاری با تغییر شکل اولیه در مود زین اسبی

ورق $۱۰ \times ۸۰۰ \times ۶۴۰$ با تغییر شکل اولیه در مود زین اسبی		
Strain hardening rate: $E_t = P$	Deflection mode at ultimate strength	Deflection mode at final stage of calculation
$E_t = 0$		
$E_t = E/30$		
$E_t = E/20$		
$E_t = E/10$		

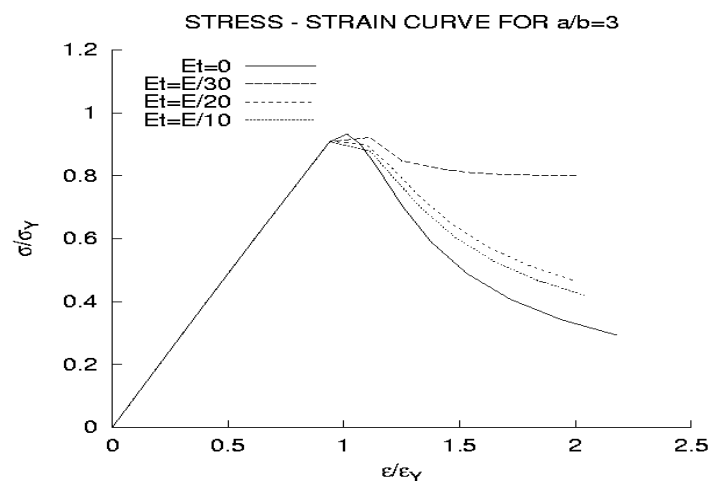


شکل ۱۲ منحنی تنش_ کرنش برای ورق $۲۰ \times ۸۰۰ \times ۲۴۰$ تحت اثر بار فشاری با تغییر شکل اولیه در مود کمانشی



جدول ۵ مودهای تغییر شکل برای ورق $۲۴۰۰ \times ۸۰۰ \times ۲۰$ تحت اثر بار فشاری با تغییر شکل اولیه در مود کمانشی

ورق $۲۴۰۰ \times ۸۰۰ \times ۲۰$ با تغییر شکل اولیه در مود کمانشی		
Strain hardening rate: $E_t = P$	Deflection mode at ultimate strength	Deflection mode at final stage of calculation
$E_t = 0$		
$E_t = E/30$		
$E_t = E/20$		
$E_t = E/10$		

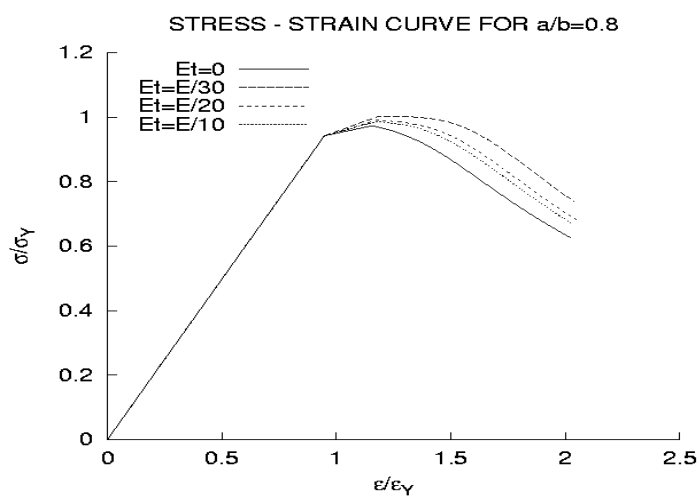


شکل ۱۳ منحنی تنش_ کرنش برای ورق $۲۴۰۰ \times ۸۰۰ \times ۲۰$ تحت اثر بار فشاری با تغییر شکل اولیه در مود زین اسبی



جدول ۶ مودهای تغییر شکل برای ورق ۲۰*۸۰*۲۴۰۰ تحت اثر بار فشاری با تغییر شکل اولیه در مود زین اسبی

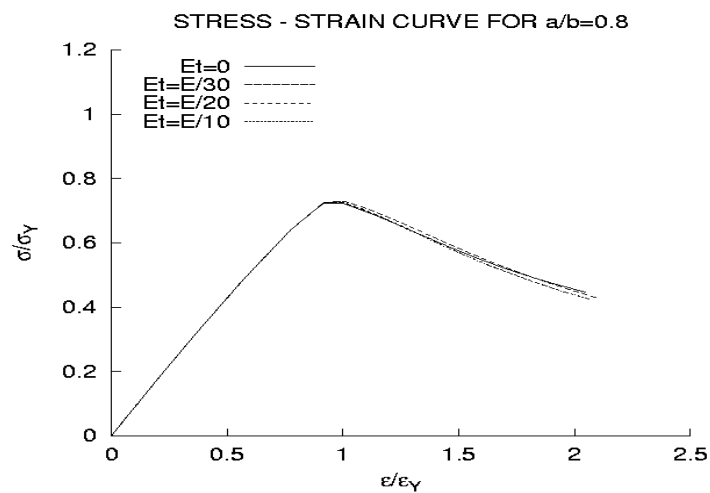
ورق ۲۰*۸۰*۲۴۰۰ با تغییر شکل اولیه در مود زین اسبی		
Strain hardening rate: $E_t = P$	Deflection mode at ultimate strength	Deflection mode at final stage of calculation
$E_t = 0$		
$E_t = E/30$		
$E_t = E/20$		
$E_t = E/10$		



شکل ۱۴ منحنی تنش_ کرنش برای ورق ۲۰*۸۰*۶۴۰۰ تحت اثر بار فشاری با تغییر شکل اولیه در مود کمانشی

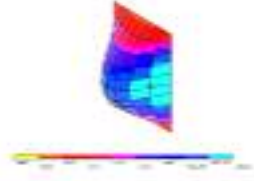
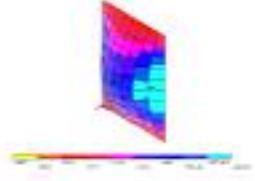
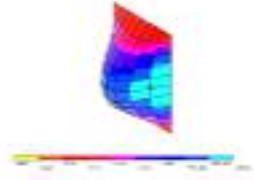
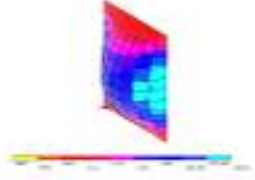
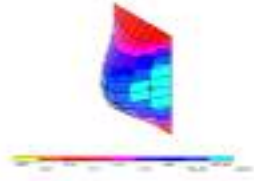
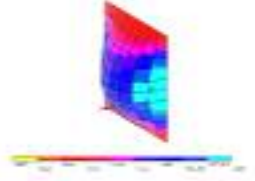
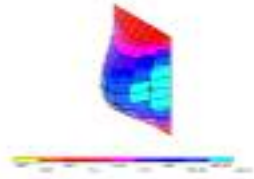
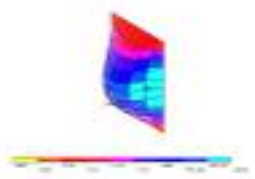
جدول ۷ مودهای تغییر شکل برای ورق $۲۰*۸۰۰*۶۴۰$ تحت اثر بار فشاری با تغییر شکل اولیه در مود کمانشی

ورق $۲۰*۸۰۰*۶۴۰$ با تغییر شکل اولیه در مود کمانشی		
Strain hardening rate: $E_t = P$	Deflection mode at ultimate strength	Deflection mode at final stage of calculation
$E_t = 0$		
$E_t = E/30$		
$E_t = E/20$		
$E_t = E/10$		

شکل ۱۵ منحنی تنش_ کرنش برای ورق $۲۰*۸۰۰*۶۴۰$ تحت اثر بار فشاری با تغییر شکل اولیه در مود زین اسبی



جدول ۸ مدهای تغییر شکل برای ورق ۲۰*۸۰۰*۶۴۰ تحت اثر بار فشاری با تغییر شکل اولیه در مود زین اسبی

ورق ۲۰*۸۰۰*۶۴۰ با تغییر شکل اولیه در مود زین اسبی		
Strain hardening rate: $E_t = P$	Deflection mode at ultimate strength	Deflection mode at final stage of calculation
$E_t = 0$		
$E_t = E/30$		
$E_t = E/20$		
$E_t = E/10$		

با توجه به نتایج حاصله و تغییرات مشاهده شده در نمودارهای تنش - کرنش می توان گفت:

- سخت شدگی مجدد تأثیر کمی بر استحکام نهایی ورقهای نازک با نسبت ابعادی برابر با ۱ یا بزرگتر از ۱ دارد، ولی در عوض بر رفتار پس از استحکام نهایی^۱ آنها بسیار مؤثر است و حتماً باید در نظر گرفته شود. بطوریکه با افزایش نرخ سخت شدگی مجدد، پس از عبور از نقطه استحکام نهایی همزمان با افزوده شدن تغییر شکل، استحکام پس ماند ورق^۲ نیز زیاد می شود.

1 - Post - ultimate strength behaviour

2 - Reserve strength



- از سویی دیگر با افزایش نرخ سخت شدگی مجدد در مورد ورقهای نازک با نسبت ابعادی برابر با ۱ یا بزرگتر از ۱ با تغییر شکل اولیه در مود کمانشی، مود انهدام آنها تاثیر چندانی نیافته در حالی که تمرکز تغییر شکلهای خمیری در مود تعییر شکل آنها پس از گذر از ناحیه انهدام، بیشتر می شود.
- در مورد ورقهای نازک با نسبت ابعادی برابر با ۱ یا بزرگتر از ۱ با تغییر شکل اولیه در مود زین اسبی، با افزایش نرخ سخت شدگی مجدد، از تمرکز تغییر شکلهای خمیری در مود انهدام آنها کاسته شده در حالی که بر میزان تمرکز تغییر شکلهای خمیری و همچنین باربرداری در مود تعییر شکل آنها پس از گذر از ناحیه انهدام افزوده شده و در نتیجه کاهش استحکام بیشتری را دارند.
- سخت شدگی مجدد تأثیر کمی بر استحکام نهایی و همچنین رفتار پس از استحکام نهایی ورقهای نازک با نسبت ابعادی کمتر از ۱ با تغییر شکل اولیه در مود کمانشی دارد. با افزایش نرخ سخت شدگی مجدد، تغییری محسوس در مود انهدام و یا مود تعییر شکل آنها پس از گذر از ناحیه انهدام آنها دیده نمی شود.
- در مورد ورقهای نازک با نسبت ابعادی کمتر از ۱ با تغییر شکل اولیه در مود زین اسبی، با افزایش نرخ سخت شدگی مجدد بر میزان تمرکز تغییر شکلهای خمیری در مود تعییر شکل آنها پس از گذر از ناحیه انهدام افزوده شده و در نتیجه کاهش استحکام نسبتا بیشتری را دارند.
- سخت شدگی مجدد تأثیر زیادی بر استحکام نهایی و استحکام پس ماند ورقهای ضخیم با هر نسبت ابعادی دارد. با افزایش نرخ سخت شدگی مجدد در مورد این ورقها، رفتار فراکمانشی^۱، رفتار انهدامی^۲ و رفتار فرانهامی^۳ به کلی تغییر می کند.
- نتیجه گیری عمومی آنست که در محاسبات استحکام نهایی سازه های دریایی میبایست نسبت به استفاده از مدل های رفتاری الاستیک-کاملا پلاستیک برای مواد محتاط بود و ترجیحا از مدل های رفتاری با قدری سخت شدگی استفاده نمود.

منابع

[1] جانسون، ویلیام؛ ملور، پیتر؛ ترجمه: ابری نیا، کارن؛ "پلاستیسیته مهندسی"، انتشارات یا مهدی(عج)، ۱۳۷۸

[2] ANSYS Version 9 User Manual.

1 - Post-buckling behaviour

2 - Collapse behaviour

3 - Post-collapse behaviour