

رسم نمودار حد نهایی فرم پذیری برای ورقه فولادی آستنیتی ۳۰۴ با روش شبیه سازی

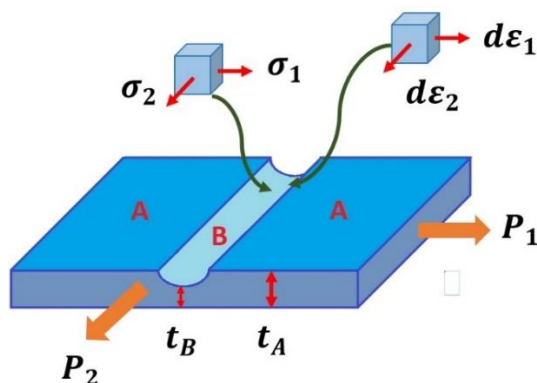
مسعود قرمزی^۱، علی نگهبان^۲، امیر حسین سوزنگرزاده^{۳*}

۱- استادیار، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، مرکز تحصیلات تکمیلی، تهران، Gmas23388@gmail.com

۲- استادیار، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، دانشکده هوافضا، تهران، Ali-negahban@ssau.ac.ir

۳- کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، amirsozangarzade@yahoo.com

* امیر حسین سوزنگرزاده



شکل ۱- مدل تئوری جدید حد نهایی کرنش

معباری که برای تعیین حد نهایی کرنش در این تئوری مد نظر گرفته شده این است که در اثر اعمال نیرو هر دو ناحیه ضخامت تحت کرنش قرار گرفته و با توجه به اینکه ضخامت در حین پروسه کاهش می یابد، در محدوده ناهمگونی ضخامت، کاهش ضخامت ناگهانی به وجود می آید که در واقع شروع تمرکز تنش می باشد. این معیار به صورت ریاضی در معادله (۱) آورده شده است که در واقع بیان می کند که شیب تغییرات ضخامت در راستای طول به سمت بی نهایت میل می کند [۴].

$$\frac{dS}{dH} \rightarrow \pm \infty \quad (1)$$

با اعمال نیرو در دو جهت عمود بر هم، کرنش ابتدا در کل صفحه به وجود می آید که میزان آن بستگی به نسبت بارگذاری در دو جهت دارد. آنچه مسلم است این است که پس از مدتی تمرکز تنش در قسمتی که دارای ضخامت کمتر می باشد اتفاق افتاده و این تئوری بیان می کند که در این لحظه شیب تغییرات ضخامت نسبت به طول به صورت ناگهانی شروع به افزایش کردن می کند. کرنش های به وجود آمده در این لحظه را می توان کرنش های نهایی دانست [۴].

۱-۱- تاریخچه مطالعات

در سال ۱۹۴۰ تحلیل حدود شکل پذیری فلزات ارائه شد، سال ۱۹۴۶ گنسامر نخستین نمودار شبه FLD را برای ورقه ارائه نمود و سال ۱۹۶۰ مارسینیاک و کوزینسکی نیرو در همه نقاط نمونه کرنش ایجاد کرده و در ضعیف ترین نقطه تمرکز تنش ایجاد شده و کرنش در بقیه نقاط به سمت صفر میل می کند، پس از آن کیلر و بکفن در سال ۱۹۶۳ نخستین بار تفکر نمودار های حد شکل پذیری را ارائه نمودن و در ادامه در سال ۱۹۶۸ کیلر و گودوین حالت توسعه یافته نمودار FLD را ارائه دادن در این راستا هاجسون و نیل سال ۱۹۷۸ تحلیل تئوری در مورد نمودار FLD مستقل از سرعت تغییر شکل و بدون عیب هندسی و تحت تنش صفحه ای پیشنهاد کردند و بهبود مدل M-K توسط گنجیانی و عاصم پور در سال ۲۰۰۷ انجام شد.

چکیده

در مقاله حاضر حد نهایی فرم پذیری، رسم نمودار FLD و راه و روش ها جهت دست یافتن به نتایج دقیق برای ورقه های فولاد آستنیتی SS 304 به کمک نرم افزار آباکوس و حل اجزاء محدود (FEM) بررسی شده است. در این مقاله تئوری، قوانین و روش رسم نمودار حد نهایی فرم پذیری FLD مطالعه و ذکر شده و برای تئوری جدید حد نهایی فرم پذیری به صورت یک مدل که ضخامت ناحیه ناهمگون از آن با استفاده از یک رابطه سینوسی مشخص می شود و دارای ضخامت کمتری نسبت به ناحیه همگون می باشد، با استفاده از نرم افزار آباکوس یک حل مطلوب از روش شبیه سازی انجام گردید و نتایج به دست آمده با نتایج روش آزمایشگاهی مقایسه و به یک نتیجه و نمودار خوب که هم خوانی با روش آزمایشگاهی داشت دست یافتیم. این نتایج نشان داد که مقدار حد فرم پذیری مستقیماً به خواص مکانیکی و میزان کرنش پلاستیک ماده بستگی دارد.

واژه های کلیدی: حد نهایی فرم دهی - فلزات ورقه ای - شبیه سازی -

FLD - فولاد آستنیتی

۱- مقدمه

در علم فرم دهی فلزات ورقه ای، استفاده از نمودار FLD جهت مشخص نمودن حد نهایی فرم پذیری و کرنش نهایی اهمیت زیادی دارد. بر اساس کارهای ساچس و لوباهن (Sachs G, Lubahn I.D) حد نهایی کرنش زمانی می باشد که نیرو به ماکزیمم مقدار خود می رسد [۱]. در سال های ۱۹۵۰-۱۹۶۰ میلادی توسط نویسندگانی چون هیل، مارچینیاک و کوزینسکی (Marchiniak . Z & Kyzniski . K) ایده دیگری مورد بررسی قرار گرفت و در آن مطرح گردید که در اثر اعمال نیرو به نمونه، ابتدا در همه نقاط نمونه کرنش شروع به افزایش کرده و سپس با ایجاد تمرکز تنش در ضعیف ترین نقطه، تنش در بقیه نواحی به سمت صفر میل کرده و از این زمان به بعد فقط قسمت ضعیف تر نمونه تحت کرنش قرار می گیرد تا اینکه در نهایت کسینختگی صورت گیرد. کرنش در آغاز این مرحله را در واقع کرنش نهایی معرفی نمودند. [۲]-[۳] در تئوری مدل جدید حد نهایی کرنش نمونه انتخاب شده که در دو بعد تحت اثر نیرو قرار دارد، دارای یک ناهمگونی ضخامت به صورت کاهش ضخامت بوده که به صورت تابعی سینوسی از ضخامت همگون تعریف شده که در راستای عمود بر جهت تنش اصلی بزرگتر واقع شده است. در شکل ۱ این تئوری به تصویر کشیده شده است [۴].

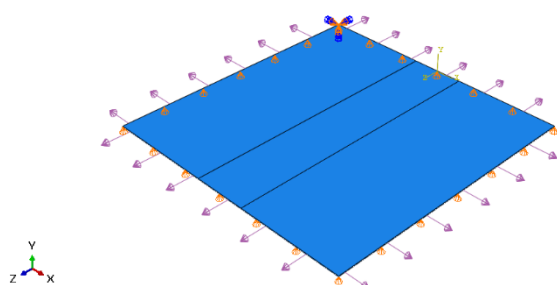
۲- شبیه سازی المان محدود

در این مقاله شبیه سازی با استفاده از نرم افزار آباکوس نسخه ABAQUS/CAE 2020 و روش اجزا محدود پویای صریح اجرا شده و هندسه فرم دهی ورق به صورت تئوری مدل جدید محاسبه حد نهایی کرنش جهت رسم نمودار FLD برای ورق فولاد آستنیتی SS 304 به کمک روش اجزاء محدود (FEM) بررسی شده است، اطلاعات اولیه شبیه سازی از جمله خواص و ابعاد ورق از مرجع [۵]-[۶] برگرفته شده است.

۱-۲ ایجاد مدل هندسی

در این مدل مطابق شکل ۲ ورق مربعی تغییر شکل پذیر با ابعاد 80×80 میلیمتر و ضخامت $0.7/2$ میلیمتر ایجاد و ناحیه ناهمگون ضخامت با استفاده از رابطه (۲) به دست می آید در این رابطه، A تعیین کننده مینیمم ضخامت موجود که در واقع نقطه وسط موج سینوسی (منطقه ای که ضخامت کاهش یافته است) می باشد ضخامت نمونه انتخاب شده برابر SC و X طول قسمت فرورفته (ضخامت ناهمگون) می باشد. [۴] خواص فیزیکی فولاد آستنیتی SS 304 که در جدول ۱ آمده باعث ایجاد ناحیه الاستیک در شبیه سازی می شود و اطلاعات مربوط به رفتار یک ماده (خواص مکانیکی) پس از نقطه تسلیم در جدول ۲ آمده است. جهت مدل کردن در محدوده تغییر شکل پلاستیک نیاز به استخراج نقاط تنش - کرنش پلاستیک می باشد، ابتدا با استفاده از معادله تنش سیلان رابطه (۳) تنش و کرنش نامی را به دست می آوریم، مساله بسیار مهمی در مدل کردن ماده در محدوده پلاستیک مطرح است و آن این است که در تست کشش نتایجی که از دستگاه به دست می آید، تنش و کرنش مهندسی یا نامی ماده است، لذا برای تبدیل تنش و کرنش نامی به تنش و کرنش واقعی از روابط (۴) استفاده می شود. خواص ناهمسانگردی فلزات و این موضوع که مقایسه روش های عددی، تحلیلی و شبیه سازی در راستای صفر بررسی می شود فرض خواص ناهمسانگرد را به صورت ایزوتروپیک در نظر گرفته و تمامی مقادیر مطابق رابطه (۵) یک وارد می کنیم. خواص مکانیکی رادرتمام جهات یکسان در نظر می گیریم [۷].

به دلیل کوچک بودن ابعاد و اندازه های این مدل در سطح مقطع هندسه ناهمگونی ضخامت به طور کامل مشاهده نمی شود، اما ایجاد این ناهمگونی باعث اتفاق افتادن تمرکز تنش و گلوئی شدن در یک ناحیه خاص می شود که ما خود آن ناحیه را مشخص می نماییم. برای فرآیند کشش ورق از دو جهت در لبه های اطراف ورق، ابتدا شرایط مرزی را جهت مقید نمودن مدل تعریف می نماییم. در مدل جدید محاسبه نهایی کرنش در ابعاد و اندازه های بزرگ سطح مقطع قسمتی که دارای ناهمگونی ضخامت است به خوبی مشخص می باشد و تحت نسبت های مختلف بارگذاری قرار داده می شود. این نسبت های مختلف بارگذاری از طریق کاهش نیرو در راستای σ_2 در وجوه جانبی ورق، حاصل می شود.



شکل ۲- شرایط مرزی و نحوه بارگذاری اعمال شده به مدل

۲-۲ معیار جدایش (دوشاخه شدن)

استورن و رایس [۸] معیار دوشاخه ای شدن را برای پیش بینی پارگی ارائه کردند که در آن، یک اختلاف سرعت در تغییر شکل موجب تمرکز تنش و وقوع گلوئی موضعی می شود. پیتک و همکارانش [۸] با استفاده از معیار دوشاخه ای شدن، الگوریتمی برای تعیین زمان وقوع گلوئی موضعی در مدل سازی المان محدود ارائه نموده اند. برون [۹] پیشنهاد کرد که ماده در زمانی که نازک شدگی شتاب می گیرد، شروع به گلوئی موضعی می کند در این پژوهش معیار دو شاخه ای شدن برای تعیین آغاز تمرکز تنش و گلوئی موضعی استفاده شده است. با رسم نمودار تغییرات کرنش های اصلی در راستای σ_1 برحسب زمان، یک زانویی مشاهده میشود که نمایانگر تغییرات بیشتر کرنش نسبت به زمان است. برای تعیین نمودار دو شاخه شدن و پیدا کردن اولین نقطه نمودار حد شکل دهی باید دو المان را که یکی دارای بیشترین کرنش در راستای و در کمترین اندازه قسمت ناهمگون واقع می شود را انتخاب نموده و با المان دیگری که در همان راستای المان اولیه و قبل از یکنواخت شدن رنگ المان ها تا لبه مدل قرار دارد مقایسه کنیم. چنانچه المان دوم را در راستای المان اول انتخاب نکنیم اختلافی بین 0.004 الی 0.008 در مقادیر ظاهر خواهد شد. نکته بسیار مهمی که پس از حل نرم افزار و قبل از انتخاب المان ها جهت پیدا کردن دو شاخه شدن باید به آن توجه کرد شکل ظاهری کانتورها تنش فون میسز و کرنش اصلی در جهت PE11 می باشد، در شکل ۳ و ۴ این موضوع به تصویر در آمده. چنانچه شکل دارای ناهمگنی باشد باید مجدداً مدل بررسی شود. با داشتن اطلاعات مربوط به کرنش دو المان در راستای PE11 با استفاده از plot نرم افزار نمودار مقایسه ای دو المان را ترسیم می نمایم.

جدول ۱- خواص فیزیکی فولاد آستنیتی SS 304

چگالی (Kg/m3)	p	۸۰۳۰
مدول الاستیک (Pa)	E	192×10^9
ضریب پواسون	v	۰.۳

جدول ۲- خواص مکانیکی فولاد آستنیتی SS 304

ضریب سختی کرنش	n	۰/۵۰۸
ضریب استحکام (MPa)	K	۱۴۸۰
تنش کشش نهایی (MPa)	UTS	۲۰۵
تنش تسلیم (MPa)	YS	۲۲۰

$$S = S_c - A(\sin(\pi \times X)) \quad (2)$$

$$\sigma_0 = K \varepsilon_0^n \quad (3)$$

$$\sigma = \sigma_0(1 + \varepsilon_0) \quad \varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_0) \quad (4)$$

$$R_{11} = R_{22} = R_{33} = R_{12} = R_{13} = R_{23} = 1 \quad (5)$$

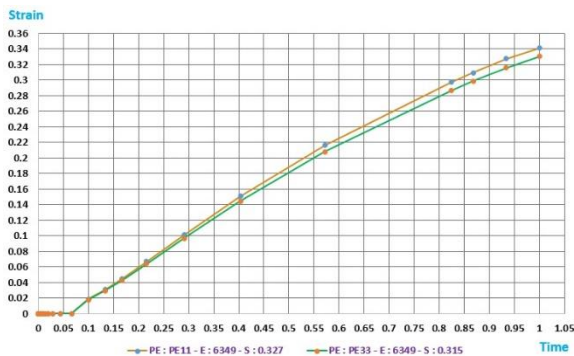
ero21-01720145

می خوانیم تا هردو کرنش اصلی و فرعی را برای یک المان به دست آوریم این عمل روش به دست آوردن نقاط مورد نیاز برای نمودار حد نهایی فرم دهی مدل می باشد. برای رسم نمودار حد نهایی فرم دهی هرچه تعداد نقاط بدست آمده بیشتر باشد دقت نمودار نیز افزایش می یابد و کامل تر است. در این مقاله تعداد یازده نقطه مطابق جدول ۳ جهت ترسیم نمودار حد نهایی فرم دهی فولاد آستینیتی SS 304 بدست آورده شده است. برای بدست آوردن نقاط باید با توجه به نسبت عمل کرد، پس از مشخص شدن نمودار دوشاخ شدن و به دست آمدن نقطه اول در حالت $\sigma_1 = \sigma_2$ برای به دست آوردن دیگر نقاط با توجه به نسبت $\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ شروع به کاهش نیرو در راستای σ_2 می نمایم و نیرو در راستای σ_1 ثابت نگه می داریم، این کار معادل کاهش پهنای مدل در آزمایش محدوده ارتفاع گنبد (LDH) می باشد.

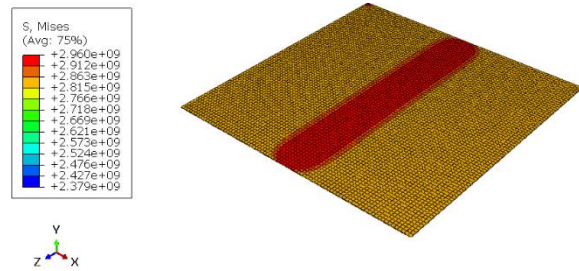
جدول ۳- نیرو های اعمالی در هر یک از حالت ها بر اساس Mpa

σ_2/σ_1	σ_1	σ_2
۱	۲۸۵۰	۲۸۵۰
۰/۹	۲۸۵۰	۲۵۶۵
۰/۸	۲۸۵۰	۲۲۸۰
۰/۷	۲۸۵۰	۱۹۹۵
۰/۶	۲۸۵۰	۱۷۱۰
۰/۵	۲۸۵۰	۱۴۲۵
۰/۴	۲۸۵۰	۱۱۴۰
۰/۳	۲۸۵۰	۸۵۵
۰/۲	۲۸۵۰	۵۷۰
۰/۱	۲۸۵۰	۲۸۵
۰	۲۸۵۰	۰

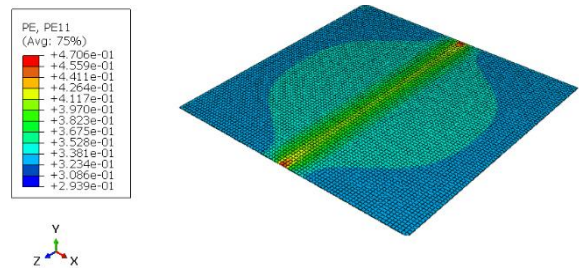
نمودار های PE11 و PE33 یازده نقطه به دست آمده و نحوه حرکت نمودار PE33 از ناحیه مثبت به ناحیه منفی در شکل ۶ الی ۱۶ به تصویر کشیده شده است. در این حرکت نمودار PE11 ثابت و نمودار PE33 تغییر می کند. به این موضوع توجه شود که نمودار های ترسیم شده نباید دارای نقاط خارج از راستای نمودار باشند.



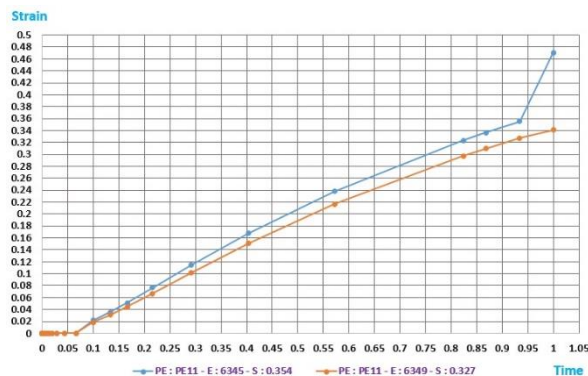
شکل ۶- کرنش - زمان نقطه اول در حالت $\sigma_1 = \sigma_2$



شکل ۳- کانتور تنش فون میسز مدل



شکل ۴- کانتور کرنش اصلی در جهت PE11 مدل

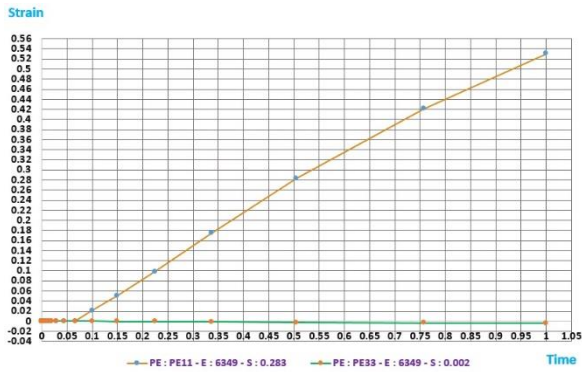


شکل ۵- جدایش (دو شاخ شدن) در حالت $\sigma_1 = \sigma_2$

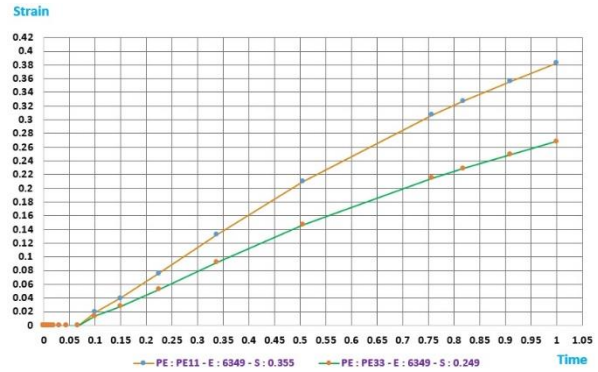
۳- رسم نمودار حد فرم دهی FLD

نمودار حد فرم دهی (FLD) از ترسیم فضای کرنش های اصلی صفحه ای بزرگ و کوچک به دست می آید. کرنش اصلی صفحه ای کمینه برابر با مقادیر ϵ_1 در نمودار FLD بوده و از سوی دیگر، کرنش اصلی صفحه ای بیشینه برابر با ϵ_2 در نمودار FLD است. در نمودار دو شاخ شده در نقطه ای که زانویی شدن یا به اصطلاح شکست برای المان اول اتفاق می افتد مقدار کرنش و زمان را خوانده و در نمودار المان دوم در همان زمان نیز مقدار کرنش را می خوانیم، مقدار خوانده شده اولین عدد کرنش اصلی به دست آمده در ناحیه نازک شده در راستای ϵ_1 برای نقطه اول در حالت $\sigma_1 = \sigma_2$ می باشد که برای ترسیم نمودار حد فرم دهی نهایی مورد نیاز است. برای مشخص شدن نقطه اول نمودار حد نهایی فرم دهی نیاز به داشتن عدد کرنش فرعی در ناحیه نازک شده در راستای ϵ_2 نیز می باشد، حال المان دوم را انتخاب کرده و تمامی مراحل قبل را برای ترسیم نمودار طی می کنیم تنها علاوه بر کرنش پلاستیک در راستای PE11 کرنش در راستای PE33 را نیز

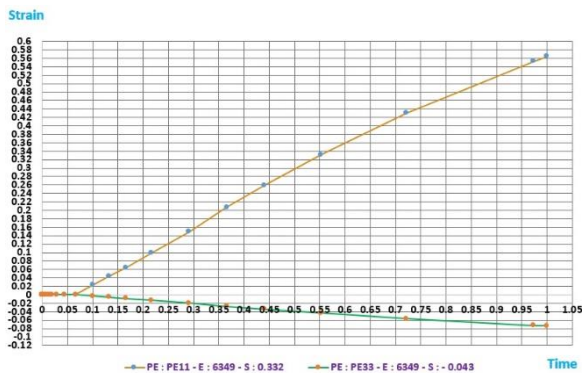
ero21-01720145



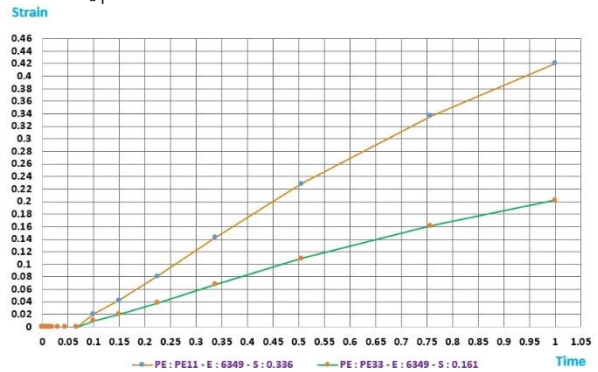
شکل ۱۱- کرنش - زمان نقطه ششم در حالت $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0.5$



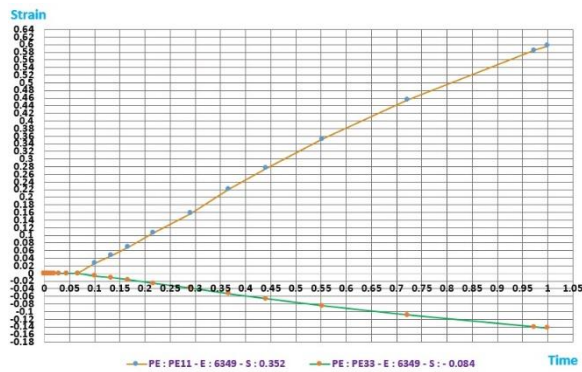
شکل ۷- کرنش - زمان نقطه دوم در حالت $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0.9$



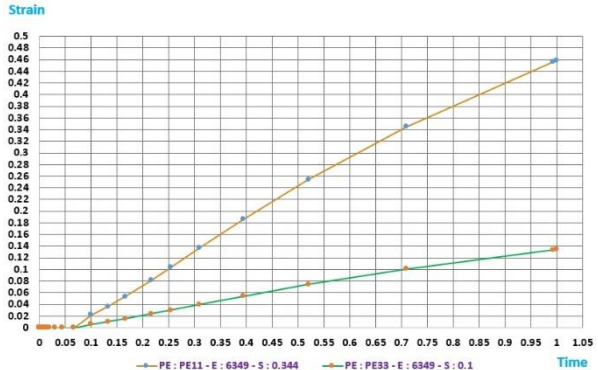
شکل ۱۲- کرنش - زمان نقطه هفتم در حالت $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0.4$



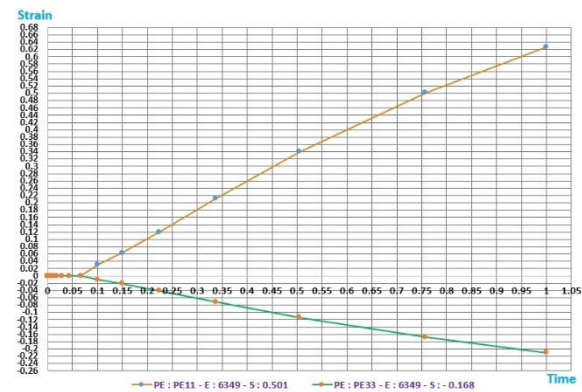
شکل ۸- کرنش - زمان نقطه سوم در حالت $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0.8$



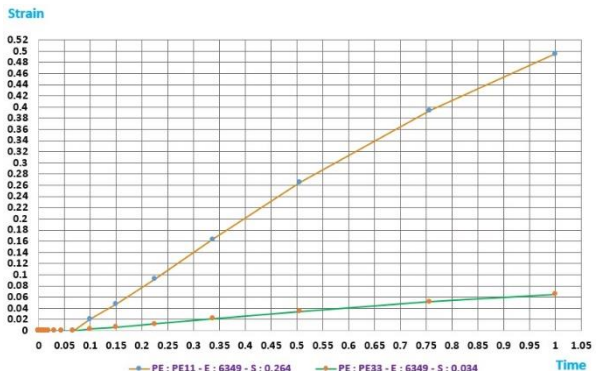
شکل ۱۳- کرنش - زمان نقطه هشتم در حالت $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0.3$



شکل ۹- کرنش - زمان نقطه چهارم در حالت $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0.7$

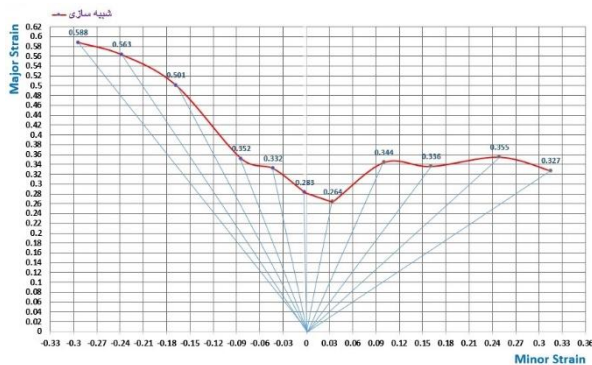


شکل ۱۴- کرنش - زمان نقطه نهم در حالت $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0.2$

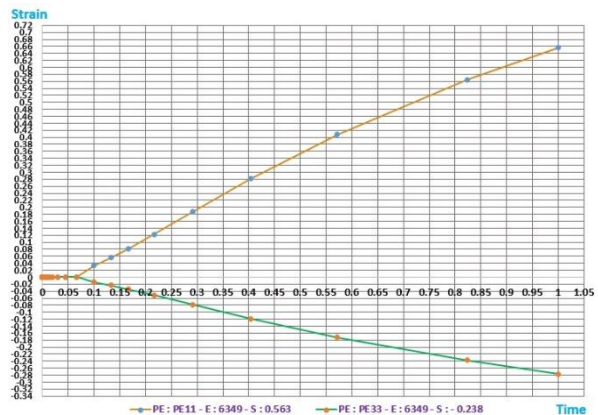


شکل ۱۰- کرنش - زمان نقطه پنجم در حالت $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0.6$

ero21-01720145



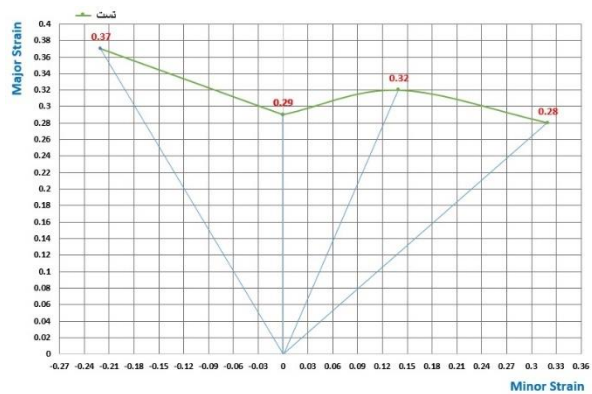
شکل ۱۷- نمودار شبیه سازی حد نهایی فرم دهی فولاد آستینیتی ۳۰۴



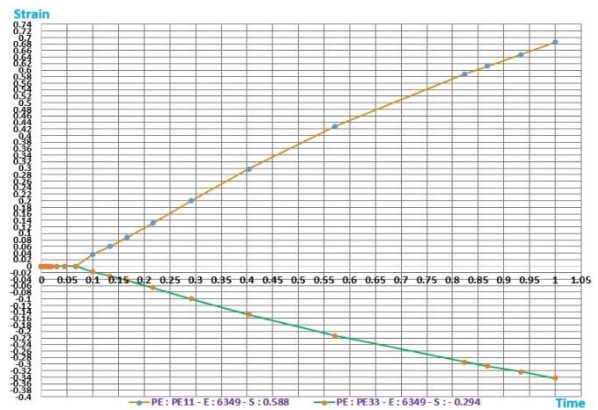
شکل ۱۵- کرنش - زمان نقطه دهم در حالت $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0/1$

۵ - تست آزمایشگاهی

در مرجع [۶] تست کشش محدوده ارتفاع گنبد (LDH) برای ورق فولادی آستینیتی SS 304 به ضخامت ۲۰۰ میکرومتر انجام شده است . نتایج تست آزمایشگاهی مطابق شکل ۱۸ به تصویر کشیده شده است .



شکل ۱۸- نمودار تجربی حد نهایی فرم دهی



شکل ۱۶- کرنش - زمان نقطه یازدهم در حالت $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0$

۶ - مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی

درجه فرم پذیری ورق های فلزی وابسته به حالت های بارگذاری مختلف که به وسیله معیار تسلیم و قانون استحکام مشخص می شود ، به عبارت دیگر معیار ناپایداری مشخص کننده این است که چه موقعی تنش و کرنش باعث ناپایداری می شود ، که این کرنش را کرنش نهایی در آن حالت در نظر گرفته شده و همچنین این تئوری به عنوان مشخص کننده حالت حدی فرم پذیری ورق ها می باشد . برای صحت سنجی مدل ارائه شده ، نتایج حاصل از شبیه سازی این روش را با نتایج آزمایشگاهی که در شکل ۱۹ ملاحظه می شود برای فولاد آستینیتی SS ۳۰۴ مقایسه می کنیم . همانطور که در شکل ۲۰ مشاهده می شود هم خوانی خوبی بین این نتایج در سمت راست نمودار وجود دارد . با توجه به نمودار حد فرم دهی در نرخ کرنش های مختلف می توان اثر نرخ کرنش بر سطح نمودار های حد فرم دهی را نیز بررسی نمود . با توجه به شکل ۲۰ می توان گفت که با افزایش نرخ کرنش نمودار های حد فرم دهی سطح بالاتری دارند بدین صورت که اثر نرخ کرنش در نمودار های حد فرم دهی در نرخ کرنش های بالا قابل ملاحظه تر می باشد ، ولی این اختلاف در نرخ کرنش های پایین قابل ملاحظه نمی باشد .

جدول ۴- نتایج کرنش شبیه سازی به دست آمده دو راستا در هر حالت

σ_2/σ_1	ϵ_1	ϵ_2
۱	۰/۳۲۷	۰/۳۱۵
۰/۹	۰/۳۵۵	۰/۳۴۹
۰/۸	۰/۳۳۶	۰/۱۶۱
۰/۷	۰/۳۴۴	۰/۱
۰/۶	۰/۲۶۴	۰/۰۳۴
۰/۵	۰/۲۸۳	-۰/۰۰۲
۰/۴	۰/۳۲۲	-۰/۰۴۳
۰/۳	۰/۳۵۲	-۰/۰۸۴
۰/۲	۰/۵۰۱	-۰/۱۶۸
۰/۱	۰/۵۶۳	-۰/۲۳۸
۰	۰/۵۸۸	-۰/۲۹۴

۴- نتایج شبیه سازی

با استفاده از یازده نقطه به دست آمده در جدول ۴ از حل شبیه سازی مدل در نرم افزار ABAQUS ، نمودار حد نهایی فرم دهی فولاد آستینیتی ۳۰۴ SS مطابق شکل ۱۷ ترسیم گردید .

ero21-01720145

های مؤثر نشان داد که کشیدگی ورق در ناحیه ناهمگون مدل که دارای ضخامت کمتری است صورت گرفته و کمترین کشیدگی در ناحیه همگون اتفاق می افتد. مشاهده گردید که به جای آزمایش های عملی می توان تا حد زیادی زمان و هزینه را با مدل کردن قطعه جهت مشخص شدن معیوب و یا سالم بودن پس از تولید در نرم افزار آباکوس کاهش داد. با در اختیار داشتن اطلاعات بیشتر از شرایط و خواص مواد می توان به تحلیل و نتیجه دقیق تر ناحیه تغییر شکل یافته پرداخت و باز هم در زمان حل صرفه جویی نمود. در شبیه سازی حد نهایی فرم پذیری و پارامترهای مؤثر بر آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل موید این امر می باشند که:

۱- نتایج مدل شبیه سازی شده تئوری جدید توسط المان محدود با نتایج آزمون تجربی مطابقت بالایی داشته است.

۲- این نتایج نشان می دهند که مقدار حد فرم پذیری مستقیماً به جنس ماده، ضریب سختی کرنش، ضریب استحکام، تنش کشش نهایی و تنش تسلیم بستگی دارد تغییرات حد نهایی فرم پذیری به طور مستقیم وابسته به نوع ماده می باشد.

۳- در مدل تئوری جدید برای تشخیص زمان ایجاد تمرکز تنش به معیاری نیاز است که در این مقاله از معیار مارچنیاک - کوزینسکی در مدل المان محدود برای تعیین زمان دوشاخ شدن استفاده شده است که باعث حاصل نتیجه درست گردید.

۴- با ایجاد نقطه تمرکز تنش ناحیه تغییر شکل پلاستیک، ظاهری شود. ۵- با کاهش ضخامت در ناحیه ناهمگون تمرکز تنش زودتر ایجاد می شود و مقدار تنش بالاتری در آن قسمت اتفاق می افتد و به تبع از مقدار تنش در ناحیه همگون کاسته می شود.

۶- نتایج حاصل از شبیه سازی تئوری مدل جدید در نرم افزار آباکوس نشان داد برای تعیین منحنی حد فرم پذیری مناسب است.

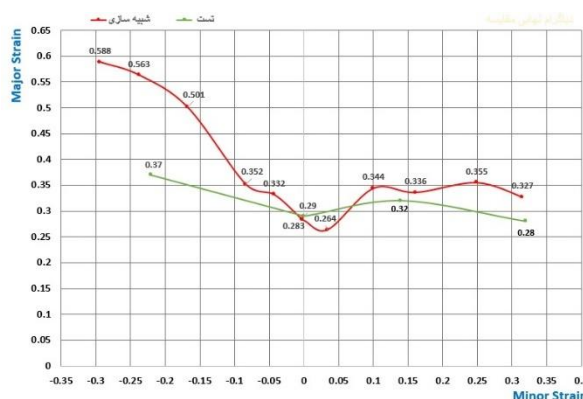
۷- با به دست آوردن نمودار حد نهایی فرم پذیری هر ورق فلزی و شبیه سازی قطعه مورد نظر در نرم افزار آباکوس می توان در مدت زمان کم نسبت به روش آزمایشگاهی به نتیجه مطلوب جهت تشخیص قطعه معیوب یا سالم دست یافت.

۱- مراجع

- [1] Sachs G., Lubahn I.D. "Failure of ductile metals in tension,". TRANS. ASME, vol. 68, № 4, May, 1946, p. 271-276.
- [2] Hill R. On discontinuous plastic states with special reference to localized necking in thin sheet. "Journal of the Mech. and Phys. Solid," vol. 1, 1952, p. 19-30.
- [3] Marciniak Z., Kuczynski K. Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal. "International Journal of Mechanical Science," vol. 9, 1967, p. 609-620.

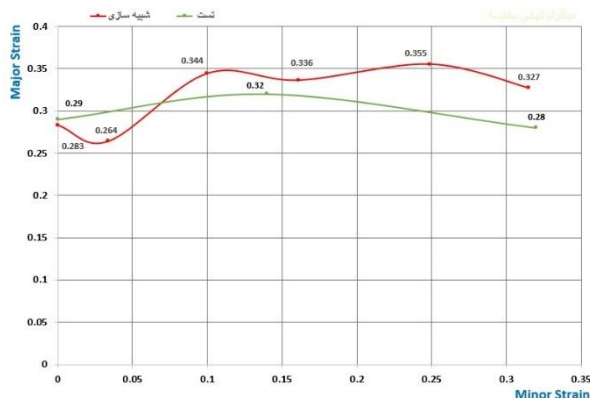
[۴] مسعود قرمزی، «ارائه مدل جدید محاسبه حد نهایی کرنش در فرم دهی فلزات ورقه ای»، هشتمین کنفرانس سالانه (بین المللی) انجمن هوافضای ایران IAS20 09-ST372 : اصفهان / شاهین شهر / دانشگاه صنعتی مالک اشتر ۲۹ بهمن / ۱ اسفند ماه ۱۳۸۷.

[۵] مسعود نصر اصفهانی، مهرا مرادی، فرهاد حاجی ابوطالبی، « استخراج عددی نمودار حد شکل دهی فولاد ۳۰۴ بر اساس تغییر فاز در فرآیند کشش عمیق » فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی



شکل ۱۹- نمودار مقایسه حد فرم دهی شبیه سازی و آزمایشگاهی

از آنجایی که تعیین نمودار حد شکل دهی با استفاده از روش تجربی مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی است، تحقیقات زیادی برای پیش بینی نمودار حد شکل دهی با استفاده از روش های تئوری انجام شده است. پیش بینی نمودار حد شکل دهی با استفاده از روش های تئوری اولین بار توسط سوئیفت [۱۰] ارائه شد که سمت راست این نمودار را به دست آورد. برای پیش بینی حد نهایی فرم پذیری یک فلز، سمت راست نمودار FLD از اهمیت خاصی برخوردار می باشد و مارا برای گرفتن تصمیم درست جهت تولید یک محصول آگاه می سازد. با توجه به شکل ۱۹ هم خوانی خوبی در ناحیه راست وجود دارد.



شکل ۱۹- مقایسه حد فرم دهی شبیه سازی و آزمایشگاهی راست نمودار

۵- نتیجه گیری

پارگی و گسیختگی ورق فرم داده شده همواره در حین فرآیند تولید و یا در حین استفاده وجود دارد، موضوع چگونگی برخورد با آن مشکل است که حائز اهمیت می باشد. چه با استفاده از تست یا تحلیل چه با استفاده از تکنولوژی و شبیه سازی، می توان به حد نهایی فرم دهی ورق دست یافت، این موضوع زمانی امکان پذیر است که قوانین را بدانیم و نسبت به رفتار مواد آگاه باشیم. در این مقاله با استفاده از داده های تجربی، اقدام به شبیه سازی و حل تئوری مدل جدید محاسبه حد نهایی کرنش برای ورق فولاد آستنیتی SS 304 پرداختیم و نمودار FLD آن ترسیم گردید. اعتبارسنجی شبیه سازی انجام شده با تعریف نمودارهای حد نهایی فرم پذیری تجربی فولاد آستنیتی SS 304 برای نرم افزار و مقایسه ی نتایج شبیه سازی و تجربی حدود بیشترین کرنش عمق فرم دهی ارزیابی گردید. توزیع کرنش

ero21-01720145

(1975).

- [9] Brun, R., Chambard, A., Lai, M. and de Luca, P., 1999. "Actual and virtual testing techniques for a numerical definition of materials," Proc NUMISHEET'99, Besançon France, pp. 393- 398.

[۱۰] مصطفی حبیبی، احمد غضنفری، احمد عاصم پور، رضا نقد آبادی، رامین هاشمی. « به دست آوردن منحنی حد شکل دهی با استفاده از دو مدل المان محدود بهبود یافته » نشریه علمی پژوهشی امیر کبیر / مهندسی مکانیک / دوره ۴۸ / شماره ۴ / زمستان ۱۳۹۵ .

مکانیک جامدات / تابستان ۱۳۸۸ / سال دوم / شماره اول.

- [6] C. Sudarsan, K. H. Banker, S. Hazra, R. Bhagat & S. K. Panda", "Experimental investigations on forming limit diagram of ultra thin SS 304 steel: effect of circular grid size, sheet orientation, punch size and deformation speed,". Accepted 8 August 2018
- [7] Djamanroodi, F., and Derogar, A., "Experimental and numerical evaluation of forming limit diagram for Ti6Al4V titanium and Al6061-T6 aluminum alloys sheets," Materials & Design, Vol. 31
- [8] Storen, S., and Rice, J.R., "Localized Necking in Thin Sheets," J. Mech. Phys. Solids, Vol. 23, pp. 421– 441,