

ساخت ماکرو با هدف رهگیری دو پدیده چروکیدگی و ترکیدگی در فرآیند هیدروفرمینگ لوله

کیوان حسینی صفری^۱ و محمود موسوی مشهدی^{۲*}

^۱ دانش آموزخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- پردیس دانشکده‌های فنی- دانشگاه تهران

^۲ استاد دانشکده مهندسی مکانیک- پردیس دانشکده‌های فنی- دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۶/۶/۲۸، تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده ۸۸/۱/۲۵، تاریخ تصویب ۸۸/۵/۲۱)

چکیده

برای جلوگیری از وقوع ایردهای محتمل در فرآیند هیدروفرمینگ لوله (کمانش، چروکیدگی و ترکیدگی)، تعیین مسیر بارگذاری مناسب (فشار داخلی- جابه‌جایی محوری) ضروری به نظر می‌رسد. در فعالیت حاضر با استفاده از روابط تئوریک موجود در زمینه پایداری و شکست، امکان محاسبه شاخص‌های نازک‌شدگی (ترکیدگی) و چروکیدگی در تحلیل عددی اجزای محدود فرآیند مهیا شده است. با به کارگیری زبان طراحی پارامتری نرم‌افزار Ansys یا APDL^۱، دو ماکروی پیش‌بینی‌کننده چروکیدگی و شکست ایجاد شده است. هنگام حل گام به گام توسط نرم‌افزار، مقادیر عددی شاخص‌های ترکیدگی و چروکیدگی در همه المان‌ها محاسبه می‌شوند که مقایسه این مقادیر با مقادیر بحرانی این شاخص‌ها در آستانه چروکیدگی و ترکیدگی، قضاوت درباره درستی مسیر بارگذاری انتخاب‌شده را برای طراح ممکن مند.

واژه‌های کلیدی: هیدروفرمینگ لوله، چروکیدگی، ترکیدگی، روش اجزای محدود، APDL

مقدمه

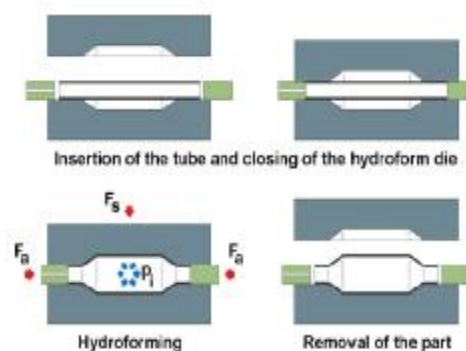
به طور کلی معایب محتمل را می‌توان به سه گروه تقسیم کرد:

- کمانش
- چروک خوردگی
- ترکیدگی

در شکل (۲) این معایب نشان داده شده‌اند. ناپایداری ممکن است در کلیه مراحل اتفاق افتد. حتی در آغاز فرآیند که لوله در ناحیه الاستیک قرار دارد، ممکن است حالت‌های ناپایداری نظیر چروک‌خوردگی و کمانش رخ دهد. بنابراین هنگام تعیین عوامل فرآیند باید دقت شود که این مقادیر در زمان‌های مختلف کمتر از حد بحرانی خود قرار داشته باشند تا در انتهای فرآیند بتوان به قطعه‌ای سالم دست یافت. اساساً، کمانش در مراحل اولیه تغییر شکل و زمانی که سطح کرنش پایین است، اتفاق می‌افتد.

چروک‌خوردگی را می‌توان به صورت یک کمانش موضعی تعریف کرد. این حالت ناپایداری در مراحل اولیه و میانی فرم‌دهی و زمانی که بارگذاری محوری به حد بحرانی برسد اتفاق می‌افتد. هر چند علت هر دو حالت چروک‌خوردگی و کمانش افزایش بار محوری است، ولی بسته به هندسه قطعه، یکی از این دو اتفاق می‌افتد.

هیدروفرمینگ، نوعی از روش فرم‌دهی با ابزار نرم است. کاربرد تکنولوژی فرم‌دهی با ابزار نرم، به طور گسترده‌ای در صنعت افزایش یافته است. این تکنولوژی، تجهیزات ساده و معمولی‌ای است که به راحتی در دسترس است [۱]. تولید با این تکنولوژی منجر به تهیه قطعه‌ای اقتصادی و با کیفیت مناسب است. روشی که در این تحقیق به آن اشاره می‌کنیم، روش هیدروفرمینگ لوله است. این روش که اساس آن در شکل (۱) نشان داده شده است، بیشتر برای شکل دادن قطعات توخالی به کار می‌رود. در طراحی فرآیند هیدروفرمینگ لوله (THF) پیش‌بینی وقوع ناپایداری و شکست در لوله مهم است.



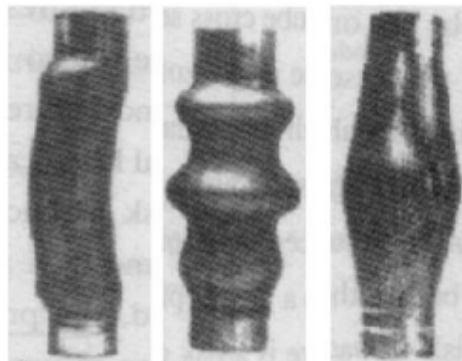
شکل ۱: اساس فرآیند هیدروفرمینگ لوله [۲].

اعمالی (محور عرضی در ترسیم نمودار) و جابه‌جایی تغذیه انتهایی (محور طولی) نشان داده شده است که یک روند جالب برای کاربردهای عملی ارائه می‌دهد. با استفاده از کدهای FE نیز یک سری از شبیه‌سازهای فرآیند امکان‌پذیر است، ولی در حالت‌های کلی، محاسبات نازک‌شدگی و کماتش در قالب روابط تئوری مطرح می‌شود.

از طرف دیگر در بسیاری از آلیاژهای آلومینیم، ترکیدن بدون مشاهده نازک‌شدگی موضعی واضح رخ می‌دهد [۸]. در این گونه موارد، شکست قبل از شروع نازک‌شدگی محلی رخ می‌دهد و تحت تأثیر ویژگی‌های کار سختی و ناهمسانگردی قرار می‌گیرد. تحلیل این مواد با روند مرسوم (بر اساس ناپایداری‌های کششی) و مطابق روندی مشابه فعالیت Swift، برای پیش‌بینی حد شکل‌پذیری کافی نیست؛ زیرا شروع نازک‌شدگی موضعی معادل با شروع شکست نیست. این موضوع باعث گرایش محققان به استفاده از معیارهای شکست نرم به جای معیارهای ناپایداری پلاستیک برای تحلیل ترکیدگی در فرآیند هیدروفرمینگ شده است. بنابراین در مطالعه حاضر پس از اشاره به چگونگی تحلیل چروکیدگی، معیار شکست نرم اوپان مطرح شده است. همان‌طور که اشاره شد، وارد کردن این روابط تئوریک در حل‌های عددی با استفاده از نرم‌افزارهای رایج، با توجه به ارائه دید مناسب به طراح برای تعیین مسیر بهینه بارگذاری در حل گام به گام، مقوله‌ای بسیار ارزشمند است. بنابراین با در اختیار داشتن این روابط، کدهایی با استفاده از زبان APDL (زبان خاص برنامه Ansys) ارائه شده است. به این منظور پس از مدل‌سازی یک قطعه با تقارن محوری، دو مسیر بارگذاری متفاوت به ترتیب برای مشاهده چروکیدگی و ترکیدگی در نظر گرفته شده است و سپس ماکروهای چروکیدگی و شکست اوپان در هر دو حالت بارگذاری، پس از حل اولیه توسط نرم‌افزار به اجرا گذاشته شده‌اند. پس از اجرای ماکروها، با توجه به دستورات به کار گرفته شده در متن کدها، خروجی‌های در نظر گرفته شده (شاخص‌های چروکیدگی و شکست) به صورت جداول و نمودار توسط نرم‌افزار ارائه می‌شوند.

تحلیل چروکیدگی

چروکیدگی به شکل یک سری موج‌های کوچک، هم

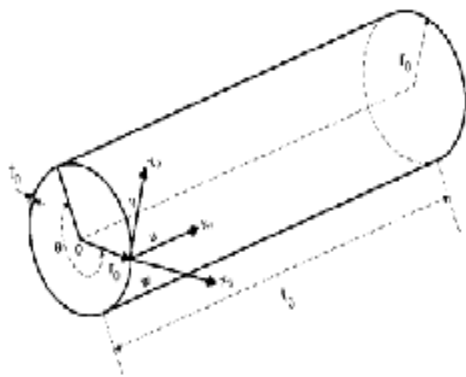


شکل ۲: حالت‌های ناپایداری در فرآیند THF، به ترتیب از راست به چپ: ترکیدگی، چروک‌خوردگی، کماتش.

کوماتش در فرآیند THF روی لوله با طول بلند و زمانی که نسبت قطر به ضخامت کم باشد، اتفاق می‌افتد. در حالی که چروک‌خوردگی روی لوله با طول‌های بلند و زمانی که نسبت قطر به ضخامت بالا باشد، دیده شده است. ترکیدگی، یک ناپایداری موضعی است که تحت تأثیر نیروهای کششی بزرگ به وجود می‌آید. در یک فرآیند هیدروفرمینگ بهینه، بار محوری نیز علاوه بر فشار داخلی در قسمت‌های انتهایی لوله اعمال می‌شود. این کار برای جلوگیری از نازک‌شدگی ناشی از کاهش ضخامت دیواره انجام می‌گیرد. با این وجود مقدار زیاد نیروی محوری می‌تواند منجر به کوماتش یا چروکیدگی شود. تحلیل ریاضی برای یک ماده صلب - پلاستیک در شرایط تنش صفحه‌ای برای حد فرم‌پذیری حین هیدروفرمینگ لوله موجود است. معروف‌ترین معیار، نازک‌شدگی همه سویه^۲ است که توسط Swift [۳] ارائه شده است که خود حاصل استنتاج از اصل یکتایی هیل [۴] است. این روند به نازگی توسط افراد زیادی [۵،۶] در فرآیند هیدروفرمینگ لوله مورد توجه قرار گرفته است.

مشخص شده است که فرم‌پذیری لوله در فرآیند، به شدت به مسیر بارگذاری وابسته است؛ به طوری که شرایط تغذیه انتهایی (بار محوری) اثرات بارزی در شروع ترکیدن^۳ دارد.

تعداد اندکی از مطالعات انجام گرفته در این فرآیند، ناپایداری‌های چروکیدگی و نازک‌شدگی را با هم در تحلیل در نظر گرفته‌اند. فعالیت Xia [۷] یک تحلیل ساده از ناپایداری نازک‌شدگی و چروکیدگی را ارائه می‌دهد. در این مقاله، نمودارهای پایداری بر اساس ترم‌های فشار



شکل ۳: چهارچوب محورهای مختصات متصل به دیواره نازک لوله.

با استفاده از رابطه (۱)، می‌توان شاخصی برای تعیین میزان احتمال وقوع چروکیدگی ارائه کرد. برای این هدف باید رابطه (۱) را مستقل از طول کرد. با توجه به این موضوع که چروکیدگی به طور موضعی در راستای طولی لوله رخ می‌دهد، طولی را که در آن چروکیدگی با کمترین مقدار تنش فشاری رخ می‌دهد، می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$\frac{\partial \sigma_{cr}^*}{\partial l} = 0 \Rightarrow l = \pi \times \sqrt[4]{\left(\frac{L_{1111}}{12L_{2222}} r^2 t^2\right)} \quad (۳)$$

که برای دستیابی به طول در رابطه بالا از مقدار $m = 1$ در رابطه (۱) استفاده شده است. با جایگذاری طول (۱) از رابطه (۳) در عبارت (۱)، می‌توان مقدار تنش بحرانی محوری برای شروع چروکیدگی را به این شکل ارائه کرد:

$$6^*_{cr} = -\frac{t}{\sqrt{3}} \sqrt{L_{1111} L_{2222}} \quad (۴)$$

این رابطه دو ثابت، L_{1111} ، L_{2222} دارد که این ثابت‌ها را می‌توان از روابط (۲) در رابطه بالا جایگزین کرد و با در نظر گرفتن $\bar{r} = 1$ ، مقدار تنش محوری بحرانی را به این ترتیب بازنویسی کرد:

$$6^*_{cr} = -\frac{t}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{4}{3} \bar{E} - (\bar{E} - E_t) \left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma}\right)^2\right) \times \sqrt{\frac{4}{3} \bar{E} - (\bar{E} - E_t) \left(\frac{\sigma_{22}}{\sigma}\right)^2}} \quad (۵)$$

حال با در اختیار داشتن مقادیر تنش محوری بحرانی می‌توان رابطه زیر را به عنوان شاخص چروکیدگی معرفی کرد:

در جهت محیطی و هم در جهت محوری مشاهده می‌شوند. در کمانش، محور تیوب تاب می‌خورد، ولی در چروکیدگی محور تیوب راست باقی می‌ماند. دو نوع مد چروکیدگی وجود دارد. در چروکیدگی متقارن، موج‌ها در جهت محوری لوله پدید می‌آیند، ولی در چروکیدگی نامتقارن، موج‌ها هم در جهت محوری و هم در جهت محیطی به وجود می‌آیند. ثابت می‌شود که در اکثر موارد وقوع چروکیدگی نامتقارن نسبت به چروکیدگی متقارن به اعمال نیروی فشاری محوری بزرگ‌تری نیاز دارد [۹]. بنابراین می‌توان این نحوه واماندگی را از تحلیل فرایند هیدروفورمینگ قطعه با تقارن محوری (مشابه آنچه در اینجا مورد بحث قرار می‌گیرد) خارج کرد.

تحلیل‌های ارائه‌شده در زمینه پیش‌بینی مقدار تنش محوری بحرانی در آستانه وقوع چروکیدگی متنوع است و فقط شباهت مشاهده‌شده در این گونه تحلیل‌ها در فرض هندسه تغییر فرم به شکل سینوسی است.

در اینجا به رابطه تنش فشاری محوری بحرانی در آستانه وقوع چروکیدگی با استفاده از نتایج مطالعات چو [۹] اشاره شده است، به طوری که از چگونگی روند استخراج روابط و جزئیات مربوط به آن خودداری شده و عبارت نهایی مقدار تنش محوری بحرانی به شکل رابطه (۱) ارائه می‌شود. با در نظر گرفتن چهارچوب محورهای مختصات متصل به دیواره نازک لوله مطابق شکل (۳)، تنش فشاری محوری بحرانی در آستانه وقوع چروکیدگی به این ترتیب ارائه شده است:

$$\sigma_{cr}^* = L_{111} \frac{(m\pi)}{12} \left(\frac{t}{L}\right)^2 + L_{222} \left(\frac{1}{m\pi}\right)^2 \left(\frac{L}{r}\right)^2 \quad (۱)$$

در این رابطه:

$$L_{1111} = \frac{(1 + \bar{r})^2}{1 + 2\bar{r}} \bar{E} (\bar{E} - E_t) \left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma}\right)^2$$

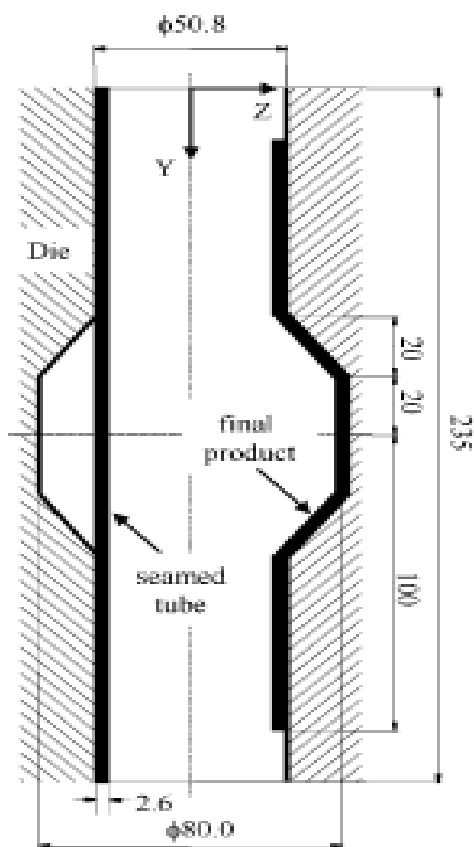
$$L_{2222} = \frac{(1 + \bar{r})^2}{1 + 2\bar{r}} \bar{E} (\bar{E} - E_t) \left(\frac{\sigma_{22}}{\sigma}\right)^2 \quad (۲)$$

در این روابط نیز t و L به ترتیب ضخامت، شعاع و طول لوله هستند. σ_{11} ، σ_{22} مطابق شکل (۳) تنش‌ها در جهت محوری و محیطی تعریف شده‌اند. همین طور در رابطه ۲، در صورت به کارگیری تئوری جریان پلاستیک، مدول معادل یا \bar{E} با مدول یانگ (E) جایگزین می‌شود. \bar{r} نیز ضریب ناهمسانگردی پلاستیک است.

مدلسازی اجزای محدود

در این قسمت نحوه مدل‌سازی و تحلیل یک نمونه برای شبیه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ با استفاده از نرم‌افزار ANSYS ارائه می‌شود. نمونه انتخابی، تقارن محوری داشته و از یک منظر، تحلیل این نمونه در دسته دوم فرآیندهای هیدروفرمینگ قرار می‌گیرد (دسته اول فرآیندهای هیدروفرمینگ Free bulging). هندسه لوله و قالب در شکل (۴) مشخص شده است. خواص مکانیکی ماده لوله و عوامل هندسی آن نیز در جدول (۱) ارائه شده است.

المان‌بندی به صورت کنترل شده و دستی انجام گرفته است، به طوری که با توجه به حالت متقارن لوله، قطاع ۱۵ درجه از آن برای تحلیل در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن ۴۷ تقسیم در راستای محور لوله و ۵ تقسیم در راستای محیطی، در مجموع ۲۳۵ المان در تحلیل مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به ملاحظات انجام گرفته، زمان تحلیل به طرز قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.



شکل ۴: ابعاد و پیکربندی قالب و نمونه.

$$W \text{ indicator} = \frac{\sigma_{11}}{\sigma_{cr}^*} \quad (6)$$

از این رابطه در ساخت ماکروی چروکیدگی در بخش‌های بعدی استفاده شده است، به طوری که پس از اجرای ماکروی ذکر شده، مقادیر شاخص چروکیدگی در رابطه (۶) در المان‌های آدرس‌دهی شده در راستای طولی، قابل مشاهده است.

معیار شکست اوپان^۴

مشاهده شده است که در فرآیند هیدروفرمینگ حد فرم‌پذیری به تاریخچه تغییر شکل بستگی دارد. بنابراین نحوه تغییرات تنش و کرنش باید در معیار پیشنهادی در نظر گرفته شوند. با توجه به این مطالب، معیار شکست نرم اوپان [۱۰] در این قسمت مورد توجه قرار گرفته است. معیار شکست اوپان بر این اساس بنا نهاده شده است که تاریخچه تنش هیدرواستاتیک بر وقوع شکست نرم تأثیر می‌گذارد، به طوری که در صورت برقراری رابطه زیر شکست رخ خواهد داد:

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma} + C_1 \right) d\bar{\epsilon} = C_2 \quad (7)$$

در این رابطه $\bar{\epsilon}_f$ کرنش معادل شکست، σ_m تنش متوسط^۵، $\bar{\sigma}$ تنش مؤثر، $\bar{\epsilon}$ کرنش مؤثر و C_1, C_2 ثابت‌های ماده هستند. همان‌طور که مشخص است معیار شکست اوپان دو ثابت ماده (C_1, C_2) دارد.

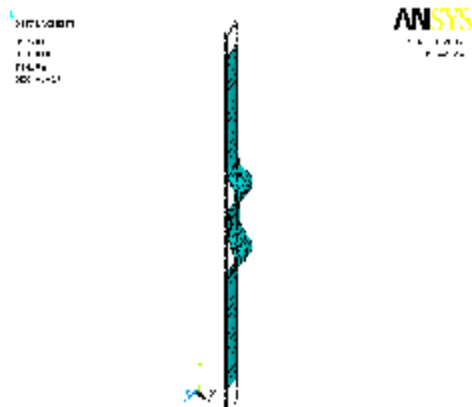
آگاهی از نحوه استخراج مقادیر این دو ثابت با استفاده از آزمایش‌های ساده تجربی با مراجعه به مرجع [۱۰] ممکن می‌شود. برای ماده STKM-11A مورد استفاده در تحقیق حاضر $C_1 = -0.063$ ، $C_2 = 0.039$ گزارش شده‌اند [۱۱]. از این رابطه می‌توان برای معرفی شاخص شکست سود جست؛ به طوری که هر گاه مقدار (I) در رابطه ارائه شده در زیر به یک برسد، شکست رخ خواهد داد:

$$I = \frac{1}{C_2} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma} + C_1 \right) d\bar{\epsilon} \quad (8)$$

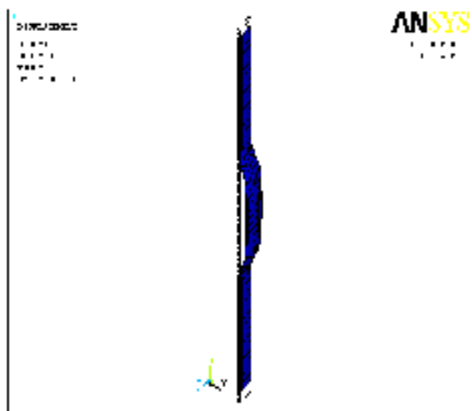
برای استفاده از رابطه بالا در روش اجزای محدود، تاریخچه تنش و کرنش در المان‌ها در هر بازه زمانی فرم‌دهی به دست می‌آید، سپس مقدار انتگرال شکست نرم (I) در هر المان محاسبه می‌شود. هنگامی که مقدار انتگرال بالا به یک رسید، انتظار وقوع شکست می‌رود.

جدول ۱: خواص مکانیکی و عوامل هندسی نمونه.

ماده لوله	STKM 11A
تنش تسلیم $\sigma_y (MPa)$	۴۸۶
مدول الاستیک $E (GPa)$	۲۴۳
مدول مماسی $E_t (GPa)$	۵
شعاع داخلی $R (mm)$	۲۴
ضخامت $t (mm)$	۱.۴
طول $L (mm)$	۲۳۵



شکل ۶: فرم نهایی لوله پس از اعمال بارگذاری نوع اول.



شکل ۷: فرم نهایی لوله پس از اعمال بارگذاری نوع دوم.

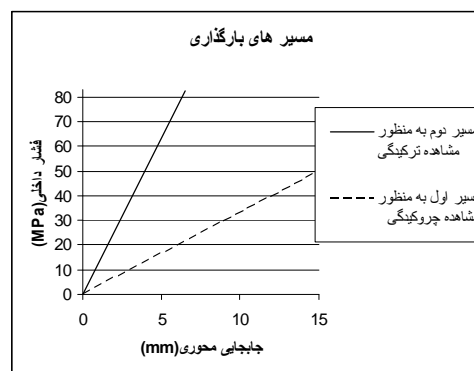
اجرای ماکروی چروکیدگی و مشاهده نتایج

در قسمت‌های قبلی اشاره شد که هر گاه مقدار شاخص (نماینگر) چروکیدگی در قسمتی از لوله به عدد یک نزدیک شود، باید انتظار وقوع چروکیدگی را در آن ناحیه داشت. با توجه به دستورات به کار گرفته شده در ماکروی چروکیدگی، مقدار شاخص (نماینگر) چروکیدگی در المان‌های در نظر گرفته شده راستای طولی لوله، محاسبه می‌شود. همین‌طور مقادیر حداکثر این شاخص‌ها در بازه‌های زمانی تغییر فرم لوله مشخص می‌شود.

در شکل (۸) مقادیر شاخص‌های چروکیدگی در المان مشاهده می‌شود که با انتخاب مسیر اول بارگذاری پس از اجرای ماکروی ذکر شده گزارش شده‌اند. ملاحظه می‌شود که مقادیر شاخص‌های چروکیدگی در برخی از زمان‌ها از مقدار یک تجاوز کرده است. این موضوع به معنای پیش‌بینی وقوع چروکیدگی و در تطابق با نحوه تغییر شکل مشاهده شده در لوله (شکل ۶) است که با انتخاب

در شکل (۵) دو مسیر بارگذاری یا نحوه اعمال فشار داخلی در مقابل تغذیه جانبی (جابه‌جایی محوری)، نمایش داده شده‌اند. مطابق یک اصل کلی، اگر مسیر اول بارگذاری در نظر گرفته شود، با توجه به رشد بیشتر فشار داخلی نسبت به جابه‌جایی محوری، باید انتظار مشاهده ترکیدگی را در قسمت‌های میانی لوله داشت. زیرا تغذیه اندک محوری در این حالت، امکان رساندن ماده را به قسمت‌های میانی در معرض نازک‌شدگی فراهم نمی‌کند. به طور مشابه با در نظر گرفتن مسیر دوم بارگذاری و با توجه به رشد بیشتر جابه‌جایی محوری نسبت به فشار داخلی، انتظار وقوع چروکیدگی در برخی قسمت‌های لوله می‌رود. زیرا فشار داخلی اندک در حالت، نمی‌تواند مانع ایجاد برآمدگی به هنگام وقوع چروکیدگی شود.

در اشکال (۶ و ۷)، فرم نهایی لوله به ترتیب پس از اعمال بارگذاری مسیر اول و دوم مشاهده می‌شود.



شکل ۵: مسیرهای بارگذاری.

می‌دهد. دریافت مقادیر تنش هیدرواستاتیک و تنش مؤثر در المان‌های تعیین‌شده، بخش دیگری از عملکرد این ماکرو است. با انجام عملیات‌های جبری لازم، مقادیر شاخص‌های شکست اویان در هر المان تعیین شده و ذخیره می‌شود.

پس از حل اولیه فرآیند در نظر گرفته‌شده، متن ماکروی شکست اویان نوشته‌شده را در نوار ورودی نرم‌افزار ANSYS یا در بخش Session Editor می‌توان کپی کرده و اجرا کرد. با اتمام خواندن متن ماکرو توسط نرم‌افزار، جدول تغییرات مقدار انتگرال اویان (I) در المان بحرانی نمایش داده می‌شود و تغییرات این مقدار با زمان حل فرآیند مشخص می‌شود. همچنین گراف تغییرات مقدار انتگرال I در طول زمان نیز نمایش داده می‌شود.

مسیر اول برای بارگذاری حاصل شده است. برای بررسی درستی عملکرد ماکروی بالا در پیش‌بینی چروکیدگی، مسیر دوم بارگذاری نیز در تحلیل، ارزیابی شده است. همان‌طور که در شکل (۹) ملاحظه می‌شود در این حالت، مقادیر شاخص‌های چروکیدگی کمتر از مقدار یک هستند (حداکثر ۰.۸۶). این موضوع نیز مشخص می‌کند که در مطابقت با نحوه تغییر فرم لوله در شکل (۷)، نباید انتظار وقوع چروکیدگی در بارگذاری نوع دوم را داشت.

اجرای ماکروی شکست اویان و مشاهده نتایج

ماکروی شکست ارائه‌شده در این قسمت، دو متغیر اختیار می‌کند و در بازه‌های زمانی حل فرآیند، مقادیر ثابت C_1, C_2 را به ترتیب به این متغیرها اختصاص

Name	Element	Node	Result Item	Minimum	Maximum	X-Axis
TIME			Time	0.7	4	<input checked="" type="radio"/>
windicator			Calculated	0.0779928	0.0995666	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.0780795	0.099958	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.0781103	0.105867	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.0773528	0.11792	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.0602634	0.108257	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.0679997	2.44463	<input checked="" type="radio"/>
windicator			Calculated	0.100942	0.209715	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.123173	0.548938	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.120011	0.40923	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.118355	0.586304	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.117329	0.344557	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.107268	0.416523	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.11984	5.81022	<input checked="" type="radio"/>
windicator			Calculated	0.144625	0.271568	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.144624	0.271568	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.11984	5.81022	<input checked="" type="radio"/>
windicator			Calculated	0.107268	0.416523	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.117329	0.344558	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.118355	0.586301	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.120011	0.409231	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.123173	0.548941	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.100942	0.209715	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.0679997	2.44465	<input checked="" type="radio"/>
windicator			Calculated	0.0602634	0.108257	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.0773528	0.11792	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.0781103	0.105867	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.0780795	0.099958	<input type="radio"/>
windicator			Calculated	0.0779928	0.0995666	<input type="radio"/>

شکل ۸: مقادیر نماینگر چروکیدگی در بارگذاری نوع اول.

Name	Element	Node	Result Item	Minimum	Maximum	X-Axis
TIME			Time	0.1	4	☉
windicator			Calculated	-0.0335527	0.514154	☉
windicator			Calculated	-0.0310894	0.663813	☉
windicator			Calculated	-0.0256917	0.675453	☉
windicator			Calculated	-0.0303893	0.488275	☉
windicator			Calculated	-0.0216069	0.197854	☉
windicator			Calculated	-0.0290977	0.2021	☉
windicator			Calculated	-0.040612	0.215327	☉
windicator			Calculated	-0.0388825	0.867124	☉
windicator			Calculated	-0.0625793	0.29738	☉
windicator			Calculated	-0.0704033	0.359362	☉
windicator			Calculated	-0.0753143	0.530672	☉
windicator			Calculated	-0.074407	0.479925	☉
windicator			Calculated	-0.0746608	0.504893	☉
windicator			Calculated	-0.0745845	0.510021	☉
windicator			Calculated	-0.0745845	0.510021	☉
windicator			Calculated	-0.0746608	0.504893	☉
windicator			Calculated	-0.074407	0.479925	☉
windicator			Calculated	-0.0753143	0.530663	☉
windicator			Calculated	-0.0704033	0.359362	☉
windicator			Calculated	-0.0625794	0.29738	☉
windicator			Calculated	-0.0388825	0.867124	☉
windicator			Calculated	-0.040612	0.215327	☉
windicator			Calculated	-0.0290978	0.2021	☉
windicator			Calculated	-0.0216068	0.197854	☉
windicator			Calculated	-0.0303891	0.488134	☉
windicator			Calculated	-0.0256917	0.675454	☉
windicator			Calculated	-0.0310893	0.663813	☉
windicator			Calculated	-0.0335527	0.514154	☉

شکل ۹: مقادیر نماینگر چروکیدگی در بارگذاری نوع دوم.

جدول ۲: مقدار انتگرال اویان در المان بحرانی.

```

***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****
TIME          15 INT1HPRE
              oyane
0.10000      0.00000
0.20000     -0.713584E-02
0.30000     -0.277413E-01
0.40000     -0.641198E-01
0.50000     -0.947566E-01
0.60000     -0.120704
0.70000     -0.142630
0.80000     -0.161131
0.90000     -0.176973
1.0000      -0.190102
1.1000      -0.199514
1.2000      -0.203514
1.3000      -0.207731
1.4000      -0.210047
1.5000      -0.210311
1.6000      -0.208400
1.7000      -0.204185
1.8000      -0.197518
1.9000      -0.188224
2.0000      -0.176098

TIME          15 INT1HPRE
              oyane
2.1000      -0.160909
2.2000      -0.142384
2.3000      -0.120261
2.4000      -0.960013E-01
2.5000      -0.826697E-01
2.6000      -0.520937E-01
2.7000      -0.145413E-01
2.8000      0.298566E-01
2.9000      0.808350E-01
3.0000      0.138130
3.1000      0.201513
3.2000      0.270684
3.3000      0.345601
3.4000      0.425286
3.5000      0.509974
3.6000      0.599439
3.7000      0.692527
3.8000      0.790454
3.9000      0.892006
4.0000      0.998142
    
```

حال اگر مسیر دوم بارگذاری در نظر گرفته شود، نتایج حاصل از اجرای ماکروی بالا، وقوع ترکیدگی را پیش بینی می کند.

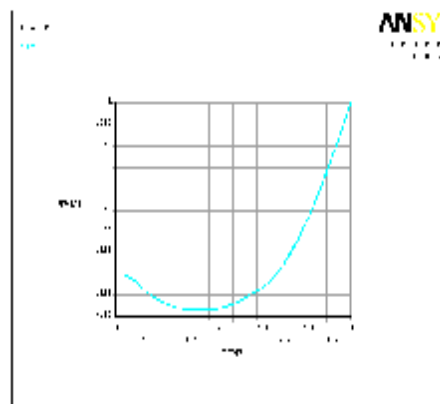
در جدول (۲) تغییرات مقدار انتگرال اویان با زمان برای المان بحرانی 118 (المان میانی در راستای طولی)، پس از اجرای این ماکرو مشاهده می شود. همین طور در شکل (۱۰) این داده ها به شکل گراف به نمایش در آمده اند. علاوه بر این، پس از اجرای این ماکرو، کاربر می تواند با مراجعه به منوی TimeHistory، مقادیر حداکثر و حداقل انتگرال (I) را در المان های دیگر نیز ملاحظه و در صورت نیاز گراف آن را رسم کند (شکل ۱۱).

همان طور که در جدول (۲) مشخص شده است، در انتهای زمان حل مسئله مقدار انتگرال اویان در المان میانی برابر 0.99 است. این موضوع بدین معنی است که در صورت ادامه بارگذاری، این مقدار از ۱ تخطی کرده و شکست رخ خواهد داد. به عبارت دیگر امکان هیچ گونه بارگذاری بیشتری برای شکل دهی بیشتر لوله با توجه به مسیر بارگذاری انتخاب شده (مسیر دوم) وجود ندارد. این قضاوت تنها پس از مشاهده نتایج حاصل از اجرای

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، عملکرد ماکروهای چروکیدگی و شکست ارائه شده مورد بررسی قرار گرفته است. در قسمت ابتدایی، پس از مطرح شدن رابطه‌ای برای مقدار تنش فشاری بحرانی و استخراج شاخصی برای چروکیدگی، معیار شکست نرم اویان و شاخص شکست معرفی شد. با در اختیار داشتن این روابط و ساخت ماکروهای چروکیدگی و شکست اویان، ابتدا ماکروی چروکیدگی ساخته شده در دو مسیر بارگذاری مشخص شده به کار گرفته شده‌اند. ارائه شاخص‌های چروکیدگی در هر دو حالت، حاکی از عملکرد و توانایی بالای ماکروی ذکر شده در تشخیص و پیش‌بینی چروکیدگی است؛ به طوری که در مسیر اول بارگذاری، شاخص‌های چروکیدگی با مقادیر بزرگ از ۱ گزارش شده‌اند، در حالی که در مسیر دوم بارگذاری دوم، همان گونه که انتظار می‌رفت، این شاخص‌ها مقادیر کمتر از ۱ را به خود اختصاص می‌دهند.

ماکروی اویان حاصل می‌شود؛ به طوری که در حل عددی به وسیله نرم‌افزار، با افزایش مقدار فشار و جابه‌جایی محوری، حل مسئله توسط نرم‌افزار ادامه پیدا می‌کند و فرم‌دهی بیشتری حاصل می‌شود، اما کاربر از این نکته غافل است که در فشار ۸۲.۵(Mpa) شکست رخ داده و مقادیر تنش و کرنش و فرم‌پذیری لوله در زمان‌های بالاتر غیر واقعی است.



شکل ۱۰: گراف تغییرات انتگرال اویان در المان بحرانی.

Name	Element	Node	Result Item	Minimum	Maximum	X-Axis
TIME			Time	0.1	4	
2			Calculated	-0.0063	-0.0063	
3			Calculated	0.009	0.009	
oyane			Calculated	-0.0177489	0	
oyane			Calculated	-0.0760597	0	
oyane			Calculated	-0.438802	0	
oyane			Calculated	-0.325877	0	
oyane			Calculated	-0.164714	0.320058	
oyane			Calculated	-0.203122	0.562012	
oyane			Calculated	-0.214021	0.700675	
oyane			Calculated	-0.218162	0.798503	
oyane			Calculated	-0.218214	0.868354	
oyane			Calculated	-0.213326	0.931465	
oyane			Calculated	-0.210861	0.978296	
oyane			Calculated	-0.210311	0.990142	
oyane			Calculated	-0.210861	0.978296	
oyane			Calculated	-0.213326	0.931465	
oyane			Calculated	-0.215214	0.868354	
oyane			Calculated	-0.218162	0.798503	
oyane			Calculated	-0.214021	0.700675	
oyane			Calculated	-0.203122	0.562012	
oyane			Calculated	-0.164714	0.320058	
oyane			Calculated	-0.325877	0	
oyane			Calculated	-0.438802	0	
oyane			Calculated	-0.0760592	0	
oyane			Calculated	-0.0177489	0	

شکل ۱۱: تغییر مقادیر انتگرال اویان با توجه موقعیت المان‌ها در راستای محور طولی.

بدیهی است که از شاخص‌های چروکیدگی و ترکیدگی ارائه‌شده در اینجا (خروجی‌های کدهای ارائه شده)، می‌توان برای تعیین مسیر بهینه بارگذاری سود جست. به طوری که از مقادیر این شاخص‌ها برای تعیین میزان افزایش مرحله به مرحله فشار و تغذیه جانبی در تحلیل به روش اجزای محدود استفاده کرد. این موضوع مستلزم کدنویسی در محیط نرم‌افزار است که در نهایت منجر به ارائه مسیر بهینه بارگذاری توسط نرم‌افزار خواهد شد. این موضوع می‌تواند در فعالیت‌های آینده مورد توجه قرار گیرد.

پس از اجرای ماکروی پیش‌بینی‌کننده شکست اویان در بخش دیگر این تحقیق نیز، نتایج قابل توجهی حاصل شد. به طوری که در انتهای زمان حل مسئله (در مسیر بارگذاری دوم) مقدار انتگرال اویان در المان میانی برابر ۰.۹۹ است و این موضوع بدین معنی است که در صورت ادامه بارگذاری، این مقدار از ۱ تخطی کرده و باید انتظار شکست داشته باشیم. این موضوع هشدار برای توقف اعمال بارگذاری برای جلوگیری از ترکیدگی و تولید قطعه معیوب است. این قضاوت فقط پس از مشاهده نتایج حاصل از اجرای ماکروی اویان حاصل می‌شود.

مراجع

- 1 - Zhang, S. H. (1999). "Developments in hydroforming." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 91, PP. 236-244.
- 2 - Dohmann, F. and Hartl, Ch. (2004). "Hydroforming-applications of coherent FE-simulations to the development of products and processes." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 150, PP. 18-24.
- 3 - Swift, H. W. (1952). "Plastic instability under plane stress." *J. Mech. Phys.*, Vol. 1, PP. 1-18.
- 4 - Hill, R. (1958). "A general theory of uniqueness and stability in elastic-plastic solids." *J. Mech. Phys.*, Vol. 6, PP. 236-249.
- 5 - Xing, H. L. and Makinouchi, A. (2001). "Numerical analysis and design for tubular hydroforming." *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 43, PP. 1009-1026.
- 6 - Chow, C.L. and Yang, X. J. (2002). "Bursting for fixed tubular and restrained hydroforming." *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 130-131, PP. 107-114.
- 7 - Xia, Z. C. (2001). "Failure analysis of tubular hydroforming." *J. Eng. Mater. Technol.* Vol. 123, PP. 423-429.
- 8 - Lei, L.P., Kang, B. S. and Kang, S. J. (2001). "Prediction of the forming limit in hydroforming processes using the finite element method and a ductile fracture criterion." *J Mater Process Technol*, Vol. 113, PP. 673-679.
- 9 - Chu, E. and Xu, Y. (2004). "Hydroforming of aluminum extrusion tubes for automotive applications. Part I: buckling, wrinkling and bursting analyses of aluminum tubes." *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46, PP. 263-283.
- 10 - Oyane, M., Sota, T., Okintoto, K. and Shima, S. (1980). "Criteria for ductile fractures and their applications." *J. Mech. Work Tech.*, Vol. 4, PP. 65-81.
- 11 - Kim, J., Kang, S. J. and Kang, B. S. (2003). "A prediction of bursting failure in tube hydroforming processes based on ductile fracture criterion." *Int. J. Adv., Manuf Technology*, Vol. 22, PP. 357-362.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Ansys Parametric Design Language (APDL)
- 3 - Bursting
- 5 - Mean Stress

- 2 - Diffuse necking criterion
- 4 - Oyane
- 6 - Calibration Process