دانشگاه فردوسی مشهد

دانشکده مهندسی _ گروه مکانیک

پایان نامه دوره دکتری

عنوان:

اصلاح معادله STOREN-RICE و منحنی های حد شکل دهی و کاربرد آنها در فرآیند هیدروفرمینگ لوله

استاد راهنما: جناب آقای دکتر گدخدایان

عبدالرحمن جامی الاحمدی

شهریور- ۸۹

بسم الله الرحمن الرحیم
اوست اول بی بدایت، آخر بی نهایت، پیدا به هستی،
نهان از چگونگی و او به همه چیز داناست. (حدید-۳)

پایان نامه حاضر تحت عنوان:

اصلاح معادله Storen-Rice و منحنی های حد شکل دهی و کاربرد آنها در فرآیند هیدروفرمینگ لوله

که توسط عبدالرحمن جامی الاحمدی تهیه و به هیأت داوران ارایه گردیده است، مورد تایید کمیته تحصیلات تکمیلی گروه می باشد.

تاریخ دفاع: **۸۹/۷/۸** درجه ارزشیابی: **عالی**

اعضاء هیأت داوران:

نام و نام خانوادگی	سمت	مرتبه علمی	دانشگاه
۱- دکتر مهران کدخدایان	استاد راهنما	دانشیار	فردوسی مشهد
۲- دکتر محمود موسوی مشهدی	عضو مدعو	استاد	تهران
۳- دکتر ابوالفضل معصومی	عضو مدعو	دانشیار	تهران
۴- دکتر خلیل فرهنگ دوست	عضو ممتحن	دانشیار	فردوسی مشهد
۵- دکتر حمید اختراعی طوسی	عضو ممتحن	استادیار	فردوسی مشهد
۶- دکتر مجید معاونیان	نماینده تحصیلات تکمیلی	استادیار	فردوسی مشهد

قدردانی

حمد و ثنا یکتای بی همتا را با الطاف بی پایانش که توفیق از جانب اوست،
عرض ادب و قدر دانی از کلیه معلمین واساتید محترمی که افتخار کسب علم از محضرشان را داشته ام،
سپاس و امتنان از استاد گرامی جناب آقای دکتر کدخدایان که از تجارب علمی و راهنمایی های ارزنده و بیدریغ ایشان در طی این مسیر بهره های وافری گرفته ام،
وتشکر از خانواده ام که با بردباری و تحمل مشکلات، همواره مشوق ام بوده اند.

فهـــــرست

موضـــوع	صفحـه
چکیده	xi
فهرست علایم	xiii
فهرست شکل ها و جدول ها	xvi
فصل اول- مقـــدمـــه	۱
۱- ۱- شکل‌دهی	۱
۱- ۱- ۱- طبقه بندی فرآیندهای شکل دهی	۱
۱- ۱- ۲- شکل‌دهی ورق فلزی	۴
۱- ۲- هیدروفرمینگ	۴
۱- ۲- ۱- فرآیند هیدروفرمینگ کشش عمیق	۵
۱- ۲- ۲- شکل‌دهی هیدرو دینامیکی	۷
۱- ۲- ۳- کشش عمیق هیدرودینامیک (کشش آبی)	۸
۱- ۲- ۴- کشش عمیق Hydro-rim (طوقه سیال)	۸
۱- ۲- ۵- مزایا و معایب فرآیند هیدروفرمینگ	۱۰
۱-۳- هیدروفرمینگ لوله	۱۲
فصل دوم- مـــرور مقـــالات	۱۵
۱- ۲- مقدمه	۱۵
۲- ۲- خلاصه مقالات مرور شده	۱۵
فصل سوم- وامـــاندگـــی	۵۲
۳- ۱- مقدمه	۵۲
۳- ۲- چکش خواری	۵۳
۳- ۲- ۱- انباشت صدمات	۵۳
۳- ۳- واماندگی ورق فلزی	۵۵

موضوع	صفحه
۳- ۴- حدود فرآیند هیدروفرمینگ لوله (THF)	۵۷
۳- ۴- ۱- کمانش	۵۸
۳- ۴- ۲- چروکیدگی	۵۹
۳ - ۴- ۳- ترکیدگی	۶۰
۳- ۵- پیشگویی پارامترهای فرآیند THF	۶۱
۳- ۶- معیار شکست نرم	۶۲
۳- ۷- حد شکل‌دهی ورق فلزی (FLD)	۶۶
۳- ۸- معیار گلویی پخشی سویفت Swift	۷۱
۳- ۹- معیار گلویی موضعی Hill	۷۴
۳- ۱۰- الگوی نقص Marciniak-Kuczynski	۷۷
۳- ۱۰- ۱- محاسبه حالت تنش و کرنش در ناحیه دارای نقص	۸۰
۳- ۱۱- الگوی دو شاخه‌ای شدن Storen-Rice	۸۲
۳- ۱۲- معیارهای دیگر	۸۲
۳- ۱۲- ۱- معیار نیروی حداکثر اصلاح شده (MMFC)	۸۲
۳- ۱۲- ۲- روش نیروی حداکثر گسترش یافته (EMFC)	۸۲
فصل چهارم- الگوی دو شاخه‌ای شدن Storen and Rice	۸۴
۴- ۱- مقدمه	۸۴
۴- ۲- شرط هجوم گلویی موضعی در تنش صفحه ای	۸۵
۴- ۳- روابط ساختاری	۸۸
۴- ۳- ۱ معادلات تئوری تغییر شکل پلاستیک	۸۸
۴- ۳- ۲- معادلات تئوری تغییر شکل به عنوان الگویی برای راس روی مکان هندسی سطح تسلیم	۹۱
۴- ۴- تحلیل ها و نتایج عددی	۹۴
۴- ۴- ۱- ازدیاد طول صفر در امتداد گلویی	۹۸
۴- ۴- ۲- حداقل ازدیاد طول در امتداد گلویی	۹۹

موضوع	صفحه
۴- ۴- ۳- حل کلی	۹۹
فصل پنجم- بهبود معادله Storen-Rice	۱۰۲
۵- ۱- مقدمه	۱۰۲
۵- ۲- مرور کار Zhu et al.	۱۰۳
۵- ۲- ۱- تعادل لنگرها در گلویی	۱۰۳
۵- ۲- ۲- کرنش بحرانی برای نسبت کرنش منفی	۱۰۵
۵- ۳- بهبود نتایج تحلیل دو شاخه ای شدن	۱۰۷
۵- ۴- روابط ساختاری (Constitutive relations)	۱۰۸
۵- ۵- نتایج	۱۱۱
۵- ۵- ۱- سوی گلویی با شرط ازدیاد طول صفر	۱۱۱
۵- ۵- ۲- سوی گلویی با شرط ازدیاد طول حداقل	۱۱۲
۵- ۵- ۳- حل کلی یا سوی بهینه گلویی	۱۱۲
۵- ۵- ۴- مقایسه با نتایج تجربی	۱۱۸
۵- ۵- ۵- مرور و مقایسه با کارهای مشابه	۱۲۱
۵- ۶- نتیجه گیری	۱۲۶
فصل ششم- تحقیق در پیشگویی نمودارهای حد شکل دهی برای مواد با ناهمسان گردی نرمال (قائم) مبتنی بر تحلیل دو شاخه ای شدن	۱۲۸
۶- ۱- مقدمه	۱۲۸
۶- ۲- معیار تسلیم Hill 48	۱۲۸
۶- ۳- روابط ساختاری	۱۳۰
۶- ۴- نتایج	۱۳۶
۶- ۴- ۱- سوی گلویی با شرط ازدیاد طول صفر	۱۳۶
۶- ۴- ۲- سوی گلویی با شرط ازدیاد طول حداقل	۱۳۷
۶- ۴- ۳- حل کلی یا سوی بهینه گلویی	۱۳۷

موضوع	صفحه
۶- ۵- بحث و مقایسه نتایج	۱۴۳
۶- ۵- ۱- مقایسه با نتایج تجربی	۱۴۳
۶- ۵- ۱- مقایسه با کار های تحلیلی مشابه	۱۴۴
۶- ۶- نتیجه گیری	۱۴۹
فصل هفتم- اثر ناهمسان گردی بر نمودارهای حد شکل دهی مبتنی بر تحلیل دو شاخه ای شدن	۱۵۰
۷- ۱- مقدمه	۱۵۰
۷- ۲- معیار تسلیم Hill 48	۱۵۰
۷- ۳- تحلیل دو شاخه ای شدن	۱۵۱
۷- ۴- گلویی پخشی Swift	۱۵۲
۷- ۵- معیار شکست نرم و روش M-K	۱۵۲
۷- ۶- مقایسه نتایج	۱۵۳
۷- ۷- نتیجه گیری	۱۵۷
فصل هشتم-پیشگویی گلویی در هیدروفرمینگ لوله به کمک نمودارهای حد شکل دهی مبتنی بر تنش	۱۵۹
۸- ۱- مقدمه	۱۵۹
۸- ۲- نمودارهای حد شکل دهی مبتنی بر تنش	۱۶۰
۸- ۳- آشکار سازی جوانه زنی ترک در هیدروفرمینگ لوله	۱۶۲
۸- ۴- نتیجه گیری	۱۶۷
فصل نهم- نتـــــایـــج	۱۶۸
ضـــمیمـــه A	۱۷۱
۱- الگوهای متفاوت تئوری تغییر شکل	۱۷۱
۲- توصیف مادی (Lagrangian)	۱۷۲
۳- توصیف فضایی (Eulerian)	۱۷۲
۴- تجزیه قطبی (Polar decomposition)	۱۷۴

موضوع	صفحه
۵- گرادیان سرعت، نرخ تغییر شکل و چرخش محیط پیوسته	۱۷۹
مراجع	۱۸۶
فهرست مقالات مستخرج از این پایان نامه	I
چکیده (انگلیسی)	II

چکیده

تولید قطعه ای با شکل مطلوب و عاری از هر نوع واماندگی، هدف نهایی در فرآیند های شکل دهی ورق است. نمودارهای حد شکل دهی FLD سنجش متعارفی برای برآورد قابلیت فرآیند در نیل به این هدف می باشد. روش های تجربی یا پیدا کردن مستقیم FLD، مشتمل بر مطالعات انجام شده توسط Nakazima، Hasek و Marciniak است. چند رویکرد تئوری تعیین FLD، نظیرگلویی پخشی Swift، گلویی موضعی Hill که واماندگی را صرفا در سمت چپ پیشگویی می کند و روش Marciniak– Kuczynski (یا M-K) قابل ذکر می باشند. روش M-K، الگوی ریاضی با فرض نقصی از قبل موجود را در ورق با ابعاد نامحدود در نظر می گیرد. Hutchinson- Neale با ارایه جزئیات تحلیل فرض عدم یکنواختی اولیه تمام FLD را پیشگویی کردند. علاوه بر این، Storen-Rice تحلیل دو شاخه ای ناشی از راس تیز ایجاد شده بر مکان های تسلیم متوالی مبتنی بر الگوی ساختاری تئوری J_2 را برای پیشگویی هر دو طرف FLD بکار بردند. بنا بر نظر ایشان، در ورق های تحت کشش دو محوری توسعه یک راس بر مکان تسلیم، سبب هجوم گلویی موضعی می شود. سمت چپ FLD پیشگویی شده توسط S-R مغایرت قابل توجه ای با نتایج تجربی دارد.

علاوه بر این روش های صرف تئوری، با بکار گیری تلفیقی از روش های تئوری و تجربی با روش های عددی برای پیشگویی FLD بکار برده شده اند.

در این پایان نامه، با بررسی مجدد تحلیل دو شاخه ای شدن مبتنی بر رویه S-R و با معادلات ساختاری مواد مشابه با آن، معادلات پیشگویی FLD بطور قابل ملاحظه ای بهبود داده شده است. با حفظ کلیت رویه، منحنی کرنش های حدی بدست آمده نه تنها مغایرت نتایج S-R را برطرف می کند بلکه نتایج ساده شده Zhu و همکاران را هم بهبود می بخشد. نتایج بدست آمده نشان می دهند که در سمت چپ FLDs سوی گلویی موضعی لزوما منطبق بر امتداد ازدیاد طول صفر Hill نمی باشد. به علاوه برای ورق فلزی با اتخاذ شرایط ساختاری: ناهمسان گردی قائم - تابع تسلیم 48 Hill - رابطه تنش کرنش با تابع نمایی - سخت شوندگی همسان گرد و تئوری تغییر شکل پلاستیک، معادله صریح کرنش های حدی مبتنی بر تحلیل دو شاخه ای شدن، استنتاج گردیده است. مکان FLCs در مقایسه با مواد همسان گرد وقتی که ضریب نا همسان گردی

کاهش می یابد به سمت بالا جابجا می شوند و بالعکس. بین این نتایج و کار Chow و همکاران مقایسه ای انجام و جزئیات مورد بحث قرار گرفته است. همچنین با در نظر گرفتن ناهمسان گردی (در بـر دارنـده تمـام ضـرایب Lankford) به همراه دیگر شرایط ساختاری قبلی، معادلات تعادل راس تیز شده بر مکان هـای تـسلیم متـوالی حل شده اند. روابط منتجه در نرم افزاری برای پیـشگویی FLD توسـعه داده شـده اسـت. بـرای همـین روابـط ساختاری، معادلات کرنش های حدی گلویی پخشی Swift هم بدست آمده اند. افـزون بـر ایـن، اثـرات ضـرایب ناهمسان گردی هم بر FLD بررسی شده اند. نتایج حاصل با داده های مربـوط بـه M-K و معیـار شکـست نـرم منتشر شده در نوشتارها مقایسه شده اند. همچنین، نمودارهای حد شکل دهی مبتنی بر تنش FLSD مستقل از مسیر هم بدست آورده شدند. FLSDs ارایه شده تطابق خوبی با نتایج تجربی در مقایسه با دیگر روش ها از خود نشان می دهند. یک نمونه زیربرنامه مجزا Macro در برنامه APDL شبیه سازی اجزاء محدود به منظور آشـکار سازی گلویی نوشته شده است. این برنامه در مورد باد گردگی آزاد لوله در شکل دهی بـه روش هیـدروفرمینگ بکار گرفته شده است تا تاییدی بر اهمیت سهولت و سادگی کار برد این FLSDs.حاصل از این پایان نامه باشد.

فهرست علایم

H	ضخامت ورق
N	نمای رابطه کار سختی
$\mathbf{P}$	ماتریس پلاستیسیته ناهمسان گرد
Y	تابع کرنش سختی
C_j	ثابت ماده
D_{ij}	مولفه تنسور نرخ تغیر شکل لحظه ای
$F^a_{nn}, F^a_{tt}, F^a_{nt}$	مولفه های نیروی قائم، مماسی و برشی متناظر با راستای بردار یکه در قسمت همگن
$F^b_{nn}, F^b_{tt}, F^b_{nt}$	مولفه های نیروی قائم، مماسی و برشی متناظر با راستای بردار یکه در داخل شیار
$M_{\gamma\delta}, L_{\alpha\beta\gamma\delta}$	متغیر ساختاری
W_{ij}	مولفه های تنسور دوران
Z_H	ضریب تحت مماس
$\overline{\sigma}_p$	پتانسیل پلاستیک
r	ضریب ناهمسان گردی قائم
c_1, c_2	ضرایب ثابت
f_α	تابع وضعیت در عرض نوار غیر یکنواخت
f_0, f	مقدار ضریب نقص اولیه و لحظه ای
g_α	تابع غیر صفر در داخل نوار
n_i	مولفه های بردار یکه عمود بر نوار گلویی موضعی
h_1, h	مدول مماسی و خط تقاطع
h_{cr}	مدول مماسی بحرانی

v_α	مولفه های سرعت
$(\dot{\overline{\dots}})$	مشتق مادی لحظه ای
Δ	تفاوت بین حوزه موضعی و حوزه یکنواخت خارج گلویی
ΔD_{33}	تفاوت نرخ کرنش ضخامت در داخل و خارج گلوی
$\Delta\dot{\sigma}_{\alpha\beta}$	اختلاف نرخ مولفه های تنش
Ω_{ij}	مولفه تنسور چرخش
α	نسبت تنش خرد به کلان
ε_{ij}	سنجش تغیر شکل کلی/ مولفه کرنش طبیعی یا لگاریتمی
$\overline{\varepsilon}_f$	کرنش موثر در شکست
$\varepsilon^a_{nn}, \varepsilon^a_{tt}, \varepsilon^a_{nt}$	مولفه کرنش قائم، مماسی و برشی متناظر با راستای بردار یکه در قسمت همگن
$\varepsilon^b_{nn}, \varepsilon^b_{tt}, \varepsilon^b_{nt}$	مولفه کرنش قائم، مماسی و برشی متناظر با راستای بردار یکه در داخل شیار
$\dot{\varepsilon}_{ij}$	مولفه تنسور نرخ کرنش طبیعی
$\varepsilon^*_1, \varepsilon^*_2$	کرنش کلان و خرد بحرانی
φ	زاویه سوی بردار عمود بر گلویی نسبت به جهت تنش خرد
$\overline{\gamma}$	کرنش معادل
ρ	نسبت کرنش خرد به کلان
$\overset{\nabla}{\sigma}_{ij}$	مولفه تنسور نرخ تنش Jaumann
$\overset{\nabla}{\sigma'}_{ij}$	مولفه تنسور نرخ تنش انحرافی Jaumann
σ_h	تنش هیدرواستاتیک
σ_{max}	بزرگترین تنش کششی
$\sigma^a_{nn}, \sigma^a_{tt}, \sigma^a_{nt}$	مولفه های تنش قائم، مماسی و برشی متناظر با راستای بردار یکه در قسمت همگن
$\sigma^b_{nn}, \sigma^b_{tt}, \sigma^b_{nt}$	مولفه های تنش قائم، مماسی و برشی متناظر با راستای بردار یکه در داخل شیار

$\sigma_{\alpha\beta}$	مولفه تنسور تنشCauchy
$\overline{\sigma}$	تنش مؤثر (معادل)
σ'_{tt}	مولفه تنش انحرافی مماسی در گلویی موضعی
τ_{ij}	مولفه تنسور سنجش ناوردای دوران تنش
τ'_{ij}	مولفه تنسور تنش انحرافی
$\dot{\tau}_{ij}$	مولفه نرخ تنسور سنجش ناوردای دوران تنش
$\dot{\tau}'_{ij}$	مولفه نرخ تنسور سنجش ناوردای دوران تنش انحرافی
$\overline{\tau}$	تنش معادل
ψ, θ	زاویه سوی بردار عمود بر گلویی نسبت به جهت تنش کلان

فهرست شکل ها و جدول ها

شکل (۱-۱)- طبقه بندی فرآیند هیدروفرمینگ با استفاده از سیال واسط [10].

شکل (۱-۲)- فرآیند های مختلف هیدروفرمینگ [11].

شکل (۱-۳)- فرآیند هیدروفرمینگ [12].

شکل (۱-۴)- (الف)کشش عمیق متعارف، (ب) فرآیند هیدروفرمینگ، لقمه در داخل محفظه سیال پر فشار غوطه ور و با غشاء نازک لاستیکی از محفظه سیال جدا شده است. (ج) فرآیند کشش عمیق هیدرومکانیک با بکار گیری نگهدار لقمه "نرم" (فشار سیال هیدرواستاتیک)- یا کشش عمیق با نگهداری لقمه توسط فشار سیال [13].

شکل (۱-۵)- شکل‌دهی هیدرومکانیکی [12].

شکل (۱-۶)– کشش عمیق هیدرودینامیک (HDD) متعارف و کشش عمیق هیدرودینامیک به کمک فشار شعاعی (الف)- کشش عمیق هیدرودینامیک متعارف و (ب) کشش عمیق هیدرودینامیک به کمک فشار شعاعی [14].

شکل (۱-۷)- کشش عمیق Hydro-rim، فشار سیال به طوقه لبه اعمال می‌شود [13].

شکل (۱-۸)- هیدروفرمینگ ورق های با ضخامت متغیر نورد شده [15].

شکل (۱-۹)- مثال هایی از محصولات نیمه تمام دوخته شده توسط جوشکاری لیزری [15].

شکل (۱-۱۰)- شمایی از قطعات خودرو که توسط روش هیدروفرمینگ تولید می‌شوند (Ford).

شکل (۱-۱۱)- قطعات بدنه خودرو (۱-۹) که با فرآیند هیدروفرمینگ تولید شده اند[12] Audi.

شکل (۱-۱۲)- توالی فرآیند هیدروفرمینگ لوله (الف)- قرار دادن لقمه، (ب)- بسته شدن قالب(ج)- پر شدن با سیال، (د)- آب بندی، (ه)-افزایش فشار و تغذیه محوری، (و)- خارج کردن قطعه شکل یافته [Siempelkamp press system GmbH & Co.]

شکل (۱-۱۳)- تغییرات فشار داخلی، نیرو و یا کورس جانبی و فشار عمودی قالبها برحسب زمان [17].

شکل (۳-۱)- مراحل تشکیل هسته حفره ها و رشد و بهم آمیختگی آنها [85].

شکل (۳-۲)- نقص های کشش عمیق: ۱ چروکیدگی لبه؛ چروکیدگی دیواره؛ ۳ چروکیدگی قطعه؛ ۴ نقش های حلقوی؛ ۵ ردهای سنبه؛ ۶ پوست پرتقالی؛ ۷ نوارهای Luder ؛ ۸ شکست در پایین؛ ۹ شکست در گوشه؛ ۱۰، ۱۱ و ۱۲تاخوردگی (گوش دار شدن)؛ ۱۳ و ۱۴ تاخوردگی در گوشه [82].

شکل (۳-۳) - مثال هایی از فرآیند هایی که تغییر شکل با گلویی محدود می شود [82].

شکل (۳-۴)- (الف)کمانش (کمانش اصلی) وضعیت ناپایداری کلی(یکجای) لوله است (ب) چروکیدگی (کمانش موضعی) تشکیل تا خوردگی متقارن دیواره های لوله تحت نیروهای فشاری محوری است [46].

شکل (۳-۵)- چروک‌های مرده و شکست (ترکیدگی) [88].

شکل (۳-۶)- سبک های معمول واماندگی که فرآیند THF را محدود می سازند.از چپ به راست به ترتیب: کمانش، چروکیدگی ترکیدگی و تاخوردگی (چروک مرده) [89].

شکل (۳-۷)- پارامترهای فرآیند THF در حین شکل‌دهی قطعه لوله ای شبیه میله لنگ، در این شکل P_i فشار داخلی، F_a نیروی محوری، F_q نیروی تقابل و F_t نیروی جانبی می باشند [46].

شکل (۳-۸)- شرایط بار و نتایج شکل‌دهی (پنجره فرآیند) [22].

شکل (۳-۹)- نمونه ای از منحنی های حد شکل‌دهی فلزات مختلف.

شکل (۳-۱۰)- دایره‌های چاپ شده نزدیک گلویی موضعی شده و ترسیمه‌ای از کرنش‌های موجود در دایره ها. نقاط توپر دوایری از شبکه اند که در آنها واماندگی اتفاق افتاده است. نقاط توخالی دوایری از شبکه اند که از واماندگی حذف شده اند و نقاط نیمه پر دوایری از شبکه اند که خیلی نزدیک به واماندگی می باشند. برگرفته از: S. S. Hacker,Sheet Metal Ind., 52 (1975), pp. 671-75

شکل (۳-۱۱)- نمودار حد شکل‌دهی برای فولاد کم کربن که از داده هایی نظیر شکل (۳-۱۰) تعیین شده‌اند. کرنش‌های زیر منحنی قابل قبول می باشند در صورتیکه آنهایی که در بالای منحنی واقع هستند متناظر با نواحی تاثیر پذیرفته از گلویی موضعی می باشند. برگرفته از منبع مشابه قبلی.S. S. Hecker, ibid

شکل (۳-۱۲)- توضیح علت این که چرا در ورق پیوسته، گلویی پخشی به توزیع کرنش نا شدنی منتهی می گردد [117].

شکل (۳-۱۳)- الگوی گلویی موضعی Hill [118].

شکل (۳-۱۴)- نقص B در ناحیه یکنواخت A در یک ورق تحت تغییر شکل با کرنش دو محوری [117].

شکل (۳-۱۵)- الگوی نقص در تحلیل M-K، اقتباس از [120].

شکل (۴-۱)- سامانه مختصات، امتداد گلویی آغازین و مقطع برش خورده که مولفه های تنش قائم و موازی با گلویی را نشان می دهد [107].

شکل (۴-۲)- ورق قبل و بعد از تغییر شکل پلاستیک یکنواخت و بدون دوران [107].

شکل (۴-۳)- نمودار تنش-کرنش، رابطه بین مدول مماسی h، مدول خط تقاطع (Secant) h_1 و نمای کرنش سختی N [107].

شکل (۴-۴)- نمایش های شماتیکی از سطوح تسلیم در فضای تنش های انحرافی (Deviatoric)، جهات عمود خارجی m بر سطح (سطوح) تسلیم را نشان می دهد، نرخ تنش انحرافی $\overset{\nabla}{\sigma}'$، و نرخ کرنش پلاستیک متناظر D^p در موارد (الف) تئوری پلاستیسیته جریان با مکان های تسلیم هموار، (ب) تئوری تغییر شکل پلاستیک ، و (ج) تئوری جریان با راس نوک تیز در وضعیت تنش فعلی [107].

شکل (۴-۵)- منحنی‌های حد شکل‌دهی تجربی و پیشگویی شده، منحنی هایی که کامل ترسیم شده‌اند در بازه $0 \le \rho \le 1$ از محاسبات عددی منتج شده و با معادله (۴-۶۰) مطابقت خوبی دارند. برای بازه $-1 \le \rho \le 0$ نتایج با پیشگویی Hill معادله (۴-۵۵) و (۴-۵۹) مقایسه شده‌اند. نتایج تجربی کرنش های حدی اقتباس شده از منابع مختلف هم نشان داده شده اند. برای موادی که بطور دقیق از قانون سخت شوندگی نمایی تبعیت نمی‌کنند، n' در نقطه ناپایداری (گلویی) کشش تک محوری با N متناظر است [107].

شکل (۴-۶)- زاویه بین امتداد کرنش اصلی حداکثر (کلان) و عمود بر امتداد گلویی آغازین، ψ. نتایج عددی برای مقادیر مختلف N با نتایج در امتداد گلویی با ازدیاد طول صفر و در بازه $\rho < 0$ مقایسه شده اند. در بازه $\rho > 0$ برای تمام مقادیر N گلویی پیشگویی شده در $\psi = 0$ شکل می گیرد[107].

شکل (۵-۱)- کرنش های حدی پیشگویی شده برای سوهای گلویی موضعی در امتدادهای با شرط ازدیاد طول صفر و موازی با شرط ازدیاد طول حداقل در سمت راست FLD و برای مقادیر مختلف N .

شکل (۵-۲)- مقایسه ای بین پیشگویی FLD تحلیلی و تجربی برای چند نمونه مواد، (الف) – داده های تجربی Hecker [130] برای آلومینیم با N=0.245، (ب)- آلومینیم AA6111 با N=0.26 از مرجع [19]، (ج)- آلومینیم A1100 با N=0.27 از مرجع [23]، (د)- آلومینیم AA6111-T4 با N=0.23 از مرجع [131].

شکل (۵-۳)- تغییرات کرنش حدی برای مقادیر متفاوت N در سمت چپ FLD، مقایسه ای بین نتایج کار فعلی و نتایج کار Zhu (ازدیاد طول حداقل و صفر بستگی به این دارد که N بزرگتر و یا کوچک تر از 0.33 باشد)، شکل ها به ترتیب عبارتند از: (الف) N = 0.2، (ب) N = 0.3، (ج) N = 0.33،(د) N = 0.4

.

شکل (۶-۱)- وابستگی سوی گلویی موضعی بر ضرایب ناهمسان گردی در سمت چپ FLD برای مقادیر N خاص.

شکل (۶-۲)- مقایسه ای بین کرنش های حدی پیشگویی شده گلویی موضعی برای شرط ازدیاد طول صفر Hill در سمت چپ، شرط ازدیاد طول حداقل در سمت راست و سوی های بهینه یابی شده برای مقادیر نمونه N و r.

شکل (۶-۳)- تغییرات کرنش های حدی بر حسب ضریب ناهمسان گردی برای دو نمونه مقادیر نمای کار سختی.

شکل (۶-۴)- مقایسه ای بین پیشگویی تحلیلی و تجربی FLD برای دو نوع آلومینیم و یک نوع فولاد؛ (الف)- Al 1100 با N = 0.26 و r = 0.78 مرجع [23]، (ب)- Al 5182 با N = 0.21 و r = 0.93 مرجع [23]، (ج)- AISI 304 با N = 0.47 و r = 1.075 مرجع [133].

شکل (۶-۵)- (الف) مقایسه FLD مجدد ترسیم شده Al 2028، برای رسته های متفاوت تابع تسلیم Hosford بر اساس نتایج Chow [132]، با نتایج این پایان نامه، (ب). بزرگنمایی بخشی از شکل (الف).

شکل (۷-۱)- اثر ضرایب ناهمسان گردی بر FLDs.

شکل (۷-۲)- مقایسه بین FLDs پیشگویی شده با لحاظ کردن ناهمسان گردی در تحلیل دو شاخه ای شدن، گلویی پخشی، روش M-K و معیار شکست نرم با داده های تجربی.

شکل (۸-۱)- مقایسه ای بین منحنی های حد شکل دهی مبتنی بر تنش (FLSDs)، برای داده های تجربی و نتایج بدست آمده بر اساس روش های متنوع تئوری، برای چند نوع ماده ناهمسان گرد.

شکل (۸-۲)- باد کردگی آزاد لوله در فرآیند هیدروفرمینگ برای نواری از المان ها و مرحله بار گذاری نمونه.
شکل (A-1) - یک جزء ماده در هیات مرجع یا تغییر شکل نیافته که به هیات فعلی تغییر شکل داده است [125].
شکل (A-2) - تغییر شکل محدود در مختصات مادی X_i و فضایی x_i [127].

جدول (۸-۱)- نمونه ای از پوشه خروجی نرم افزار FEA و شرایط تنش المان و زمان وقوع گلویی.