دانشگاه گیلان
دانشکده فنی

رساله دکتری

مدلسازی تحلیلی جامع تغییر شکل پلاستیک نرخ بالای صفحات دایره ای تحت بارگذاری انفجاری

از:

اصغرزاجکانی

استادان راهنما:

دکترابوالفضل درویزه

دکتر منصوردرویزه

مهر ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی

گروه مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

مدلسازی تحلیلی جامع تغییر شکل پلاستیک نرخ بالای صفحات دایره ای تحت بارگذاری انفجاری

از:

اصغرزاجکانی

استادان راهنما:

دکترابوالفضل درویزه

دکتر منصوردرویزه

استادان مشاور:

دکتر رضا انصاری

مهندس حمید رضا سفیدی شیرکوهی

مهر ۱۳۹۲

تشکر و قدردانی

اکنون که در سایه الطاف بخشاینده مهربان سرانجام این رساله به پایان رسیده است، بر خود لازم می دانم از راهنمایی‌های ارزشمند و بی بدیل استادان گرانقدر این مرز و بوم، جناب آقایان پروفسور ابوالفضل درویزه و پروفسور منصور درویزه خالصانه سپاسگذاری نمایم که در محضر این بزرگان درسهایی بسیار گرانبها از علم و اخلاق و زندگی آموخته‌ام.

همچنین از همفکری آقایان دکتر رضا انصاری و مهندس حمیدرضا سفیدی شیرکوهی تشکر و قدردانی می نمایم.

بر خود لازم می دانم از پدر و مادر نازنینم، که وجودشان همواره آرامش جانم و دعایشان بدرقه راهم بوده است، نیز سپاسگذار باشم. در برابر عشق و ایثارشان سر تعظیم فرود می آورم و دستانشان را دوباره می بوسم.

در پایان از صبر و بردباری همسر مهربانم که همواره در این مسیر یار و همراه من بود صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایم.

سلامتی و توفیقات همه عزیزان را از خداوند متعال مسالت دارم.

تقدیم به همسر عزیز و مهربانم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده فارسی ..... ک
چکیده انگلیسی ..... ل

فصل اول
مقدمه

۱-۱. مقدمه ۲
۱-۲. نگاهی بر پژوهش های پیشین ۴
۱-۳. نوآوری های رساله حاضر ۲۰
۱-۳-۱. مدلسازی تحلیلی جامع جهت تغییر شکل ورق های دایره ای ویسکوپلاستیک ۲۱
۱-۳-۲. مدلسازی تحلیلی تغییر شکل ورق های قطاعی حلقوی ویسکوپلاستیک..... ۲۲
۱-۳-۳. آزمایش های تجربی ورق های دایره ای ۲۳
۱-۳-۴. تحلیل های حدی تغییر شکل با استفاده از رهیافت انرژی ۲۳
۱-۳-۵. ساختار کلی رساله ۲۶

فصل دوم
مقدمه ای بر روابط ساختاری در پلاستیسیته

۲-۱. معیار تسلیم ۲۹
۲-۲. تابع پتانسیل پلاستیک ۳۰
۲-۳. معیارهای سخت شوندگی ۳۱
۲-۴. رفتار مکانیکی فلزات در نرخ های کرنش بالا ۳۵
۲-۴-۱. تکنیک‌های تست در نرخ های کرنش متوسط ۳۶
۲-۴-۲. تکنیک‌های تست در نرخ های کرنش ضربه‌ای ۳۶
۲-۵. مدل های غیر فیزیکی (تجربی) ویسکوپلاستیسیته جهت اثرات نرخ کرنش ماده.. ..... ۳۷
۲-۵-۱. معادله جانسون- کوک..... ۳۷
۲-۵-۲. کوپر- سیموندز ۳۸
۲-۵-۳. واگونر ۳۹
۲-۶. مدل های فیزیکی ویسکوپلاستیسیته توصیف کننده اثرات نرخ کرنش ماده ۳۹
۲-۶-۱. مدل زریلی – آرمسترانگ ۳۹
۲-۶-۲. مدل نعمت – ناصر ۴۰

فصل سوم
استخراج روابط سینماتیکی و ساختاری

۳-۱. فرمولبندی سینماتیک با رهیافت نموی ۴۳

۳-۲. معادلات تعادل نموی ۴۶
۳-۳. تبدیل دیفرانسیل حرکت از حالت فضای تنش به حالت فضای جابجایی و کرنش ۴۷
۳-۴. تابع تسلیم ایلوشین و قاعده سخت شوندگی کرنشی مرکب ۵۱
۳-۴-۱. پیشروی لولا های پلاستیک ۵۲
۳-۴-۲. اثر بوشینگر و قاعده سخت شوندگی سینماتیک ۵۳
۳-۴-۳. اثر عیوب متالورژیکی بر رفتار شکست مواد نرم ۵۳
۳-۴-۴. شکل اصلاح شده تابع تسلیم ایلوشین ۵۴
۳-۵. قاعده نرمالیته (قاعده جریان) ۵۵
۳-۶. مدل ویسکو پلاستیسیته ۵۸
۳-۷. انتگرالگیری زمانی از معادلات ساختاری ۵۹
۳-۷-۱. سازگاری (پایداری) تابع تسلیم- الگوریتم نگاشت برگشتی ۵۹
۳-۷-۲. الگوریتم صفحات متقاطع ۶۲
۳-۷-۳. کوپل کردن مدل ویسکو پلاستیک با سخت شوندگی کرنشی مرکب ۶۳
۳-۷-۴. بکارگیری مدل نعمت – ناصر ۶۳
۳-۷-۵. بکارگیری مدل کوپر- سیموندز ۶۴

فصل چهارم

روش شبه – طیفی کالوکیشن

۴-۱. مقدمه ۶۶
۴-۲. پیاده سازی روش شبه – طیفی کالوکیشن ۶۸
۴-۲-۱. تولید معادلات جبری ۷۷
۴-۲-۲. حذف معادلات اضافی توسط تحلیل رگرسیون چندگانه ۷۷

فصل پنجم

نتایج مدلسازی روش شبه – طیفی کالوکیشن برای ورق های دایره ای و قطاعی حلقوی

۵-۱. آماده سازی برای محاسبه ۸۱
۵-۱-۱. محاسبه زمان نهایی ۸۳
۵-۱-۲. حساسیت به دما ۸۵
۵-۱-۳. مشخصات مکانیکی و فیزیکی ورق های مورد تحلیل ۸۵
۵-۲. نتایج مدلسازی متقارن محوری برای ورق های دایره ای ۸۶
۵-۲-۱. مطالعه موردی اول ۸۷
۵-۲-۲. مطالعه موردی دوم ۹۰
۵-۲-۳. بررسی نتایج حاصل از سیستم های مختلف معادلات تغییر شکل بزرگ فون –کارمن ۱۰۵
۵-۳. نتایج مدلسازی نا متقارن محوری برای ورق های قطاعی حلقوی ۱۱۲

فصل ششم

نتایج آزمایشگاهی و مقایسه آنها با مدلسازی شبه - طیفی کالوکیشن

۶-۱. استقرار آزمایشگاه ۱۲۲

۶-۲. اصول کلی لوله انفجار ۱۲۳
۶-۳. روش بارگذاری بر روی ورق های آلومینیومی ۱۲۶

فصل هفتم

پیش بینی رفتار پیش و پسا-گسیختگی ورق های دایره‌ای با استفاده از تحلیل های حدی تغییر شکل

۷-۱. مقدمه ۱۳۵
۷-۲. مفاهیم اولیه ۱۳۷
۷-۲-۱. مودهای شکست ۱۳۷
۷-۲-۲. معیار گسیختگی ۱۳۷
۷-۲-۳. اثرات نرخ کرنش در بارگذاری دفعی با نرخ بالا ۱۳۹
۷-۲-۴. کار پلاستیک ۱۴۰
۷-۲-۵. کار برش در تکیه گاه ۱۴۰
۷-۳. ساز و کار تغییر شکل مخروطی ۱۴۰
۷-۴. کار تغییر شکل پلاستیک ۱۴۲
۷-۵. ساز و کار تغییر شکل چند مفصلی ۱۴۸
۷-۵-۱. محاسبه کار تغییر شکل پلاستیک ۱۵۰
۷-۵-۲. کار مفصل های پلاستیک ۱۵۰
۷-۵-۳. کار نیرو های غشایی ۱۵۱
۷-۵-۴. کار گشتاورهای خمشی ۱۵۱
۷-۵-۵. سرعت باقیمانده در مود دوم شکست ۱۵۲
۷-۵-۶. تاثیر تعداد مفصل ۱۵۳
۷-۵-۷. تاثیر توزیع غیر یکنواخت مفصل ها ۱۵۷

فصل هشتم

نتیجه گیری

۸-۱. نتیجه گیری مدلسازی شبه طیفی کالوکیشن برای ورق های دایره ای ۱۶۴
۸-۲. نتیجه گیری مدلسازی شبه طیفی کالوکیشن برای ورق های قطاعی حلقوی ۱۶۶
۸-۳. نتیجه گیری مدلسازی شبه – استاتیکی بر پایه تحلیل حدی تغییر شکل ۱۶۷
۸-۴. مقایسه مدلسازی شبه – طیفی کالوکیشن با تحلیل حدی برپایه انرژی ۱۶۸
۸-۵. پیشنهادات جهت ادامه تحقیقات ۱۶۹

مراجع ۱۷۱

پیوست ها

پیوست (الف) ۱۸۰
پیوست (ب) ۱۸۲
پیوست (ت) ۱۸۷
ت-۱. روش شبه – طیفی کالوکیشن برای تحلیل متقارن محوری ورق دایره ای ۱۸۷

پیوست (ث) ۱۹۴
پیوست (ج) ۱۹۶
ج-۱. تست های تجربی شوک انفجار بر روی پانل های چند لایه ای فلز- الیاف FML ۱۹۶
ج-۲. آماده سازی پانل های FML ۱۹۶
ج-۳. مروری اجمالی بر انواع FML ها ۱۹۷
ج-۴. نتایج تست های تجربی GLARE ها در لوله شوک انفجار ۱۹۹

فهرست شکل ها

عنوان **صفحه**

شکل (۳-۱). نمای یک ورق عمومی دایروی، حلقوی یا قطاعی در مختصات قطبی با چهار شرط مرزی مرتب شده در جهت چرخش خلاف عقربه های سرعت؛ $\Omega_r^0\Omega_\theta^1\Omega_r^1\Omega_\theta^0$ ۴۳

شکل (۵-۱). فرآیند کلی مدلسازی ۸۴

شکل (۵-۲). تاریخچه زمانی جابجایی نقطه میانی به همراه پروفیلهای فشار در آزمایش شوک انفجاری در ورق های آلومینیومی ۸۸

شکل (۵-۳). خیز مرکز ورق آلومینیومی با ضخامت 2mm و شعاع 69 mm به ازای ماکزیمم فشارهای پالسی مختلف ۸۸

شکل (۵-۴). نتایج خیز مرکز ورق های ساخته شده از آلومینیوم و پانل GLARE 3-4/3-0.4 ..... ۸۹

شکل (۵-۵). تاریخچه زمانی تغییر شکل نقطه میانی مرکز ورق به ازای مقادیر مختلف نسبت رعنایی S. R، ورق فولاد DH-36 $(h = 1.02\ \text{mm})$..... ۹۲

شکل (۵-۶). تاریخچه زمانی مقادیر متوسط کرنش های پلاستیک موثر $\bar{\varepsilon}^p$ به ازای مقادیر مختلف نسبت رعنایی S. R، ورق فولاد DH-36 $(h = 1.02\ \text{mm})$ ۹۴

شکل (۵-۷). تاریخچه زمانی مقادیر متوسط تنش های موثر دینامیکی به ازای مقادیر مختلف نسبت رعنایی S. R، ورق فولاد DH-36 $(h = 1.02\ \text{mm})$ ۹۵

شکل (۵-۸). مقادیر متوسط تنش های موثر دینامیکی $\bar{\sigma}_d$ بر حسب کرنش های پلاستیک موثر $\bar{\varepsilon}^p$ به ازای مقادیر مختلف نسبت رعنایی S. R ورق فولاد ۹۶

شکل (۵-۹). تاریخچه زمانی مقادیر درجه حرارت های اضافه شده به ازای مقادیر مختلف نسبت رعنایی S. R، ورق فولاد ۹۶

شکل (۵-۱۰). نمودار زمانی و مکانی نیروی غشایی شعاعی بی بعد ۹۹

شکل (۵-۱۱). نمودار زمانی و مکانی نیروی غشایی محیطی بی بعد ۱۰۰

شکل (۵-۱۲). نمودار زمانی و مکانی ممان خمشی شعاعی بی بعد ۱۰۱

شکل (۵-۱۳). نمودار زمانی و مکانی ممان خمشی محیطی بی بعد ۱۰۲

شکل (۵-۱۴). نمودار زمانی و مکانی نیروی برشی شعاعی بی بعد ۱۰۳

شکل (۵-۱۵). نمودار زمانی و مکانی نیروی برشی محیطی بی بعد ۱۰۴

شکل (۵-۱۶). تاریخچه زمانی نسبت مقادیر ممان های خمشی شعاعی؛ حالت سخت شوندگی ۱ به ۲..... ۱۰۵

عنوان **صفحه**

شکل (۵-۱۷). تاریخچه زمانی متوسط کرنش های پلاستیک موثر $\bar{\varepsilon}^p$ به ازای سیستم های مختلف معادلات فون – کارمن در تحلیل هم دما ۱۰۶

شکل (۵-۱۸). تاریخچه زمانی متوسط تنش های موثر دینامیکی $\bar{\sigma}_d$ به ازای سیستم های مختلف معادلات فون – کارمن در تحلیل هم دما ۱۰۶

شکل (۵-۱۹). مقادیر متوسط تنش های موثر دینامیکی $\bar{\sigma}_d$ برحسب متوسط کرنش های پلاستیک موثر $\bar{\varepsilon}^p$ به ازای سیستم های مختلف معادلات فون –کارمن در تحلیل هم دما ۱۰۷

شکل (۵-۲۰). تاریخچه زمانی مقادیر متوسط کرنش های پلاستیک موثر $\bar{\varepsilon}^p$ به ازای سیستم های مختلف معادلات فون –کارمن در تحلیل بی دررو ۱۰۸

شکل (۵-۲۱). تاریخچه زمانی مقادیر متوسط تنش های موثر دینامیکی $\bar{\sigma}_d$ به ازای سیستم های مختلف معادلات فون –کارمن در تحلیل بی دررو ۱۰۹

شکل (۵-۲۲). مقادیر متوسط تنش های موثر دینامیکی $\bar{\sigma}_d$ برحسب متوسط کرنش های پلاستیک موثر $\bar{\varepsilon}^p$ به ازای سیستم های مختلف معادلات فون –کارمن در تحلیل بی دررو..... ۱۰۹

شکل (۵-۲۳). تاریخچه زمانی درجه حرارت اضافه شده به ازای سیستم های مختلف معادلات فون –کارمن ۱۱۰

شکل (۵-۲۴). تاریخچه زمانی نسبت نیروهای غشایی شعاعی در معادلات فون –کارمن؛ سیستم کامل به سیستم خیلی ساده شده یا سیستم بدون میرایی و اینرسی دورانی ۱۱۱

شکل (۵-۲۵). مقادیر بیشینه خیزها در ورق های گیردار قطاعی (CCCC) و حلقوی (CC)؛ فشار اوج: $p_m =$ 620 MPa، ضخامت: $h = 1.02$ mm، جنس: فولاد DH-36 ..... ۱۱۶

شکل (۵-۲۶). مقادیر متوسط کرنش های پلاستیک موثر در ورق های گیردار قطاعی (CCCC) و حلقوی (CC)؛ فشار اوج: $p_m = 620$ MPa، ضخامت: $h = 1.02$ mm، جنس: فولاد DH-36 ..... ۱۱۶

شکل (۵-۲۷). مقادیر متوسط نرخ کرنش های پلاستیک موثر در ورق های گیردار قطاعی (CCCC) و حلقوی (CC)؛ فشار اوج: $p_m = 620$ MPa، ضخامت: $h = 1.02$ mm، جنس: فولاد DH-36 ..... ۱۱۷

شکل (۵-۲۸). مقادیر متوسط تنش های تسلیم دینامیک در ورق های گیردار قطاعی (CCCC) و حلقوی (CC)؛ فشار اوج: $p_m = 620$ MPa، ضخامت: $h = 1.02$ mm، جنس: فولاد DH-36 ..... ۱۱۷

عنوان **صفحه**

شکل (۵-۲۹). مقادیر متوسط تنش های تسلیم دینامیک با استفاده از مدل جانسون – کوک در ورق های گیردار قطاعی (CCCC) و حلقوی (CC)؛ فشار اوج: $p_m = 620$ MPa، ضخامت: $h = 1.02$ mm، فولاد DH-36 ..... ۱۱۸

شکل (۵-۳۰). مقادیر متوسط کارهای پلاستیک به همراه متوسط دمای اضافه شده در ورق های گیردار قطاعی (CCCC) و حلقوی (CC)؛ فشار اوج: $p_m = 620$ MPa، ضخامت: $h = 1.02$ mm، جنس: فولاد DH-36 ..... ۱۱۹

شکل (۶-۱). تصاویری از آزمایشگاه انفجار (لوله انفجار بزرگ) ۱۲۲

شکل (۶-۲). تصویری از آزمایشگاه انفجار (لوله انفجارکوچک) ۱۲۳

شکل (۶-۳). تصویر شماتیک مربوط به لوله انفجار بزرگ در دستگاه آزمایشگاهی ۱۲۴

شکل (۶-۴). تصویر شماتیک مربوط به لوله انفجار کوچک در دستگاه آزمایشگاهی ۱۲۴

شکل (۶-۵). نتایج تجربی خیز مرکز ورق آلومینیومی با ضخامت لایه غشایی ۷۰۰ میکرو متر؛ و مقایسه با روش شبه – طیفی کالوکیشن ۱۲۸

شکل (۶-۶). نتایج تجربی خیز مرکز ورق آلومینیومی با استفاده از آزمایش لوله انفجار با ضخامت لایه غشایی ۴۰۰ میکرو متر و مقایسه با روش شبه – طیفی کالوکیشن ۱۲۹

شکل (۶-۷). نتایج تجربی خیز مرکز ورق آلومینیومی با استفاده از آزمایش لوله انفجار با ضخامت لایه غشایی ۳۵۰ میکرو متر و مقایسه با روش شبه – طیفی کالوکیشن ۱۳۰

شکل (۶-۸). نتایج تجربی خیز مرکز ورق آلومینیومی با استفاده از آزمایش لوله انفجار با ضخامت لایه غشایی ۲۰۰ میکرو متر و مقایسه با روش شبه – طیفی کالوکیشن ۱۳۱

شکل (۶-۹). نتایج تجربی خیز مرکز ورق آلومینیومی با استفاده از آزمایش لوله انفجار با ضخامت لایه غشایی ۱۰۰ میکرو متر و مقایسه با روش شبه – طیفی کالوکیشن ۱۳۲

شکل (۶-۱۰). نتایج تجربی خیز مرکز ورق آلومینیومی با استفاده از آزمایش لوله انفجار با ضخامت لایه غشایی ۵۰ میکرو متر و مقایسه با روش شبه – طیفی کالوکیشن ۱۳۳

شکل (۷-۱). مفصل پلاستیک تحت نیروی برشی (راست)، مفصل پلاستیک تحت گشتاور خمشی (چپ)..... ۱۳۸

شکل(۷-۲). ساز و کار تغییر شکل مخروطی ورق دایره ای گیردار ۱۴۱

شکل (۷-۳). نسبت جابجایی مرکز ورق به ضخامت آن بر حسب ایمپالس ۱۴۶

شکل (۷-۴). ساز و کار تغییر شکل چند مفصلی..... ۱۴۹

عنوان **صفحه**

شکل (۷-۵). نسبت سرعت باقیمانده به سرعت اولیه ۱۵۵

شکل (۷-۶). نسبت جابجایی مرکز ورق به ضخامت آن بر حسب ایمپالس ۱۵۶

شکل (۷-۷). کار تغییر شکل پلاستیک برحسب ایمپالس ورق فولادی (ضخامت ۱/۶mm) با توزیع‌های مختلف مفصل ۱۵۸

شکل (۷-۸). نسبت سرعت های باقیمانده به سرعت اولیه؛ مقایسه توزیع C1 و رابطه جونز و آلوز [۱۰۴]، ورق فولادی (ضخامت ۲mm) ۱۵۹

شکل (۷-۹). نسبت سرعت باقیمانده به سرعت اولیه برحسب ایمپالس با توزیع‌های مختلف مفصل برای ورق فولادی (ضخامت ۲mm) ۱۶۰

شکل (۷-۱۰). مقایسه خیزهای بدست آمده مرکز ورق برای توزیع های مختلف مفصل ها ۱۶۱

شکل (۸-۱). نتایج بدست آمده خیز مرکز ورق دایره ای برحسب پارامتر ایمپالس بی بعد؛ مقایسه مدلسازی شبه طیفی و تحلیل حدی تغییر شکل با سایر مدلهای تحلیلی و داده های تجربی ۱۶۹

شکل (ج-۱). شکل شماتیک از یک پانل مورد نظر؛ یک صفحه آلومینیومی به همراه لایه چسبنده و بلوک بافته شده GFPP ۱۹۷

شکل (ج-۲). تقسیم بندی FML ها بر اساس لایه های فلزها [۱۵۹] ۱۹۸

شکل (ج-۳). مثال هایی از چند GLARE معروف و تجاری ۱۹۹

شکل (ج-۴). نتایج خیز مرکز پانل GLARE 2-2/1-0.6 به ازای زمان های مختلف ۲۰۰

شکل (ج-۵). نتایج خیز مرکز پانل GLARE 2-2/1-0.4 به ازای زمان های مختلف ۲۰۰

شکل (ج-۶). نتایج خیز مرکز پانل GLARE 3-9/8-0.4 به ازای زمان های مختلف ۲۰۱

شکل (ج-۷). نتایج خیز مرکز پانل GLARE 4B-4/3-0.4 به ازای زمان های مختلف ۲۰۱

شکل (ج-۸). نتایج خیز مرکز پانل GLARE 4A-4/3-0.4 به ازای زمان های مختلف ۲۰۲

فهرست جدول ها

عنوان **صفحه**

جدول (۲-۱). پارامترهای فیزیکی مدل ویسکو پلاستیک جانسون – کوک ۳۸

جدول (۲-۲). ثابت های رابطه کوپر- سیموندز برای فلزات متداول [۱۰۶] ۳۹

جدول (۲-۳). پارامترهای فیزیکی مدل ویسکو پلاستیک نعمت – ناصر [۱۱۷] و [۱۲۰]..... ۴۱

جدول (۴-۱). ضرایب برون یابی مربعی به همراه ضرایب هوبالت به همراه متغیرهای پیمایش در هر گام تکرار ۷۴

جدول (۴-۲). سه نوع شرط مرزی در لبه های خارجی $\Omega_j^i\ (i = 0,1;\ j = r,\theta)$ ۷۶

جدول (۵-۱). خواص مکانیکی فولاد DH-36 و تیتانیوم ۸۶

جدول (۵-۱). پارامترهای فیزیکی مدل ویسکو پلاستیک نعمت – ناصر ۸۶

جدول (۵-۳). پارامترهای فیزیکی مدل ویسکو پلاستیک جانسون – کوک ۸۶

جدول (۵-۴). مشخصات هندسی و بارگذاری ورق مورد بررسی ۹۱

جدول (۵-۵). مقادیر بیشینه خیز نقطه میانی مرکز ورق فولاد DH-36 به ازای مقادیر نسبت رعنایی $S.R$ مختلف ۹۳

جدول (۵-۶). کرنش های نهایی اصلی در پنج نقطه شعاعی برروی سطح میانی ورق برای $S.R = 1.32$ ۹۳

جدول (۵-۷). مقایسه بین تحلیل های هم دما و بی دررو برای مقادیر متوسط (.Ave) و بیشینه (.Max) در ۳۰۰ میکرو ثانیه اول حرکت به همراه تفاوت های دو تحلیل در نتایج تنش های تسلیم دینامیکی و درجه حرارت ۹۷

جدول (۵-۸). مقادیر بیشینه خیز نقطه میانی مرکز ورق به ازای حالت های مختلف سیستم معادلات فون –کارمن، ورق فولاد DH-36 ..... ۱۰۸

جدول (۵-۹). مقایسه تحلیل های مختلف سیستم معادلات فون –کارمن در حالت های هم دما و بی دررو؛ مقادیر متوسط (.Ave) و بیشینه (.Max) متغیرها به همراه تفاوت های نتایج در تنش های تسلیم دینامیکی و درجه حرارت در دو حالت دمایی ۱۱۱

جدول (۵-۱۰). مقادیر بیشینه خیزهای عمودی در ورق های قطاعی از جنس فولاد DH- 36 با فشار اوج 620 MPa ۱۱۳

جدول (۵-۱۱). مقادیر بیشینه خیزهای عمودی در ورق های قطاعی تیتانیومی با فشار اوج $p_m = 620$ MPa ۱۱۳

جدول (۵-۱۲). مقایسه بین مقادیر بیشینه خیزهای عمودی در ورق های حلقوی و دایره ای ۱۱۴

جدول (۵-۱۳). مقایسه بین نسبت مقادیر بیشینه خیزهای عمودی در ورق های حلقوی به ورق های دایره ای گیردار .. ۱۱۵

عنوان **صفحه**

جدول (۵-۱۴). مقادیر بیشینه خیزهای عمودی در ورق های قطاعی از جنس فولاد DH-36 بر حسب مقادیر مختلف ضخامت، نسبت شعاعها و زاویه قطاع با فشار اوج $p_m = 620$ MPa ۱۱۹

جدول (۵-۱۵). مقادیر متوسط کرنش های پلاستیک موثر و نرخ آنها، تنش های تسلیم دینامیکی، کار پلاستیک و دمای اضافه شده در ورق های دایره ای (C) و قطاعی (CCCC) از جنس تیتانیوم با فشار اوج $p_m = 620$ MPa ۱۲۰

جدول (۶-۱). اطلاعات کلی نمونه های تست شده ۱۲۶

جدول (۶-۲). مقادیر فشارهای پالسی و جابجایی در نمونه های آزمایشی با استراتژی بارگذاری پایین به بالا (DTU) .. ۱۲۶

جدول (۶-۳). مقادیر فشارهای پالسی و جابجایی ها در نمونه های عملی با استراتژی بارگذاری پایین به بالا (DTU) ۱۲۶

جدول (۶-۴). مقادیر فشارهای پالسی و جابجایی ها در نمونه های عملی با استراتژی بارگذاری از بالا به پایین (UTD) ۱۲۷

جدول (۶-۵). مقادیر فشارهای پالسی و جابجایی ها در نمونه های عملی با استراتژی بارگذاری مشابه متوسط(AVE) ۱۲۷

جدول (۷-۱). مقایسه نتایج ایمپالس بحرانی ۱۳۶

جدول (۷-۲). خواص ورق های به کار رفته در تحلیل (شعاع ۵۰mm) به همراه ضرایب محاسبه شده λ (خواص از مرجع [۲۷] برگرفته شده اند.) ۱۴۴

جدول (۷-۳). ثابت های مربوط به معادله کوپر – سیموندز به همراه ضرایب محاسبه شده λ ۱۴۶

جدول (۷-۴). گزارش مدل های نظری پیشنهاد شده برای نسبت جابجایی مرکز ورق به ضخامت در مود اول شکست برای ورق دایره‌ای تحت بارگذاری‌های دفعی، انتخاب شده از منبع [۱۲] به همراه نتیجه محاسبات خطای RMSE این مدل ها..... ۱۵۴

جدول (۷-۵). مقادیر خطای RMSE برای ورق ها با فلزات و تعداد مفاصل مختلف ۱۵۴

جدول (ج-۱). درجه بندی GLARE ها بر اساس لایه های الیاف شیشه [۱۵۹] ۱۹۸

جدول (ج-۲). مقادیر فشارهای پالسی و جابجایی های باقیمانده در نمونه های GLARE مورد استفاده برای آزمایش با استفاده از لایه غشایی ۷۰۰ میکرومتر ۱۹۹

نماد	تعریف	واحد
$\mathbf{A}$	بردار ضرایب مجهول چبیشف	
A	ثابت ماده در رابطه جانسون- کوک	$\mathrm{N/m^2}$
a	پارامتر بی بعد شکل پالس	
a_0	پارامترهای فیزیکی مدل ویسکو پلاستیک نعمت – ناصر	
$\mathbf{B}^*$	ماتریس مربوط به رابطه تنش منتجه زمینه	
$\mathbf{B}_q^*, \mathbf{B}_n^*, \mathbf{B}_m^*$	مولفه های مربوط به رابطه مولفه های تنش های منتجه زمینه	
B	ثابت ماده در رابطه جانسون- کوک	$\mathrm{N/m^2}$
b	ثابت مادی	
b_0	ثابت مادی مربوط به سخت شوندگی همسانگرد	
$\mathbf{C}$	بردار مربوط به رابطه تنش پلاستیک تصحیح کننده	
$\mathbf{C}_n, \mathbf{C}_q, \mathbf{C}_m$	مولفه های مربوط به رابطه تنش پلاستیک تصحیح کننده	
C	ثابت ماده در رابطه جانسون- کوک	$\mathrm{N/m^2}$
C_V	ظرفیت گرمایی ویژه ماده	J/KgK
C_1، C_2، C_3 و C_4	ثابت‌های آزمایشگاهی مدل زریلی - آرمسترانگ	
c	ضریب خواص ماده	
c_d	ضریب میرایی	$\mathrm{kg/m^3\ s}$
c_1	پارامتر ماده (ضرایب سخت شوندگی سینماتیک)	$\mathrm{N/m^2}$
c_2	پارامتر ماده (ضرایب سخت شوندگی سینماتیک)	
$\mathbf{D}$	ماتریس سفتی در صفحه	
$\overline{\mathbf{D}}$	ماتریس سفتی خارج از صفحه	
$\mathbf{D}^p$	ماتریس گرادیان تغییر شکل پلاستیک	
$\mathbf{D}_{eq}^p$	نرخ کرنش پلاستیک معادل	

نماد	تعریف	واحد
$\widehat{\mathbf{D}}_{\beta}$	ماتریس مربوط به رابطه دو جمله ای نیوتن	
d_1	پارامترهای فیزیکی مدل ویسکو پلاستیک نعمت – ناصر	$\mathrm{N/m^2}$
d_0	پارامترهای فیزیکی مدل ویسکو پلاستیک نعمت – ناصر	$\mathrm{N/m^2}$
E	مدول الاستیسیته	$\mathrm{N/m^2}$
E. C	حالت الاستیک	
E_{def}	کار ناشی از تغییر شکل پلاستیک	N. m
E_h	انرژی پلاستیک در لولای پلاستیک	N. m
E_{in}	انرژی ورودی وارده بر سطح ورق	N. m
E_{M_h}	کار مفصل پلاستیک متحرک داخلی	N. m
E_{M_r}	کار پلاستیک ناشی از ممان خمشی شعاعی	N. m
E_{M_s}	کار مفصل پلاستیک در تکیه‌گاه	N. m
E_{M_θ}	کار پلاستیک ناشی از ممان خمشی محیطی	N. m
E_{N_r}	کار پلاستیک ناشی از نیروی غشایی شعاعی	N. m
E_{N_θ}	کار پلاستیک ناشی از نیروی غشایی محیطی	N. m
E_p	کل کار پلاستیک	N. m
E_r	انرژی باقیمانده	N. m
E_s	انرژی برشی	N. m
e	نصف طول مفصل پلاستیک در تکیه‌گاه	m
$\mathcal{F}$	تابع سطح تسلیم	
$\bar{\mathcal{F}}$	مربوط به رابطه تابع تسلیم	
$\boldsymbol{f}^q$ و $\boldsymbol{f}^n$	بردار مشتق های تابع تسلیم $\mathcal{F}$ نسبت به تنش های غشایی و برشی	m/N
$\boldsymbol{f}^m$	بردار مشتق های تابع تسلیم $\mathcal{F}$ نسبت به تنش های خمشی	m/N
$\boldsymbol{f}_{nq}$	ماتریس های مولفه های مشتق $\mathcal{F}$ نسبت به تنش های غشایی- برشی	m/N

نماد	تعریف	واحد
$\boldsymbol{f}_m$	ماتریس های مولفه های مشتق $\mathcal{F}$ نسبت به تنش های خمشی	$\mathrm{m}/(\mathrm{N}.\mathrm{m})$
$f_{rr}^n, f_{\theta\theta}^n, f_{r\theta}^n$	مشتق های تابع تسلیم $\mathcal{F}$ نسبت به تنش های غشایی	$\mathrm{m}/\mathrm{N}.$
$f_{rr}^q, f_{\theta\theta}^q$	مشتق های تابع تسلیم $\mathcal{F}$ نسبت به تنش های برشی	m/N
$f_{rr}^m, f_{\theta\theta}^m, f_{r\theta}^m$	مشتق های تابع تسلیم $\mathcal{F}$ نسبت به تنش های خمشی	$\mathrm{m}/(\mathrm{N}.\mathrm{m})$
G_0	انرژی کل برای مانع کوتاه - دامنه حرکت نابجایی ها	$\mathrm{KJ}/\mathrm{Mole}$
h	ضخامت ورق	m
h_α	متغیر وابسته به کرنش پلاستیک در رابطه پراگر	
I	ایمپالس	$\mathrm{N}.\mathrm{s}$
I_1، I_2 و I_3	انتگرال های مربوط به اینرسی ها در معادلات حرکت	$\mathrm{kg}/\mathrm{m}^4 \times (\mathrm{m}^2, \mathrm{m}, 1)$
I_4، I_5 و I_6	انتگرال های مربوط به میرایی در معادلات حرکت	$\mathrm{kg}/\mathrm{m}^4\,\mathrm{s} \times (\mathrm{m}^2, \mathrm{m}, 1)$
J	متغیر پیمایش مکانی در برون یابی مربعی	
$\mathbf{K}^l$	ماتریس عبارت های خطی ضرب شده در روش شبه طیفی	
k	شماره تکرارهای صفحات متقاطع	
k_1 ، k_2 و k_3	ثوابت مربوط به ماده در رابطه تحول پارامتر تخلخل	
$\bar{k}$	فاکتور اصلاح برشی	
k_b	ثابت بولتزمن	JK^{-1}
k_F	نسبت جابجایی به ضخامت در لغزش تکیه گاه	
$\mathcal{K}$	تابع سخت شوندگی همسانگرد	N/m^2
$\mathcal{K}_0$	مقدار اشباع شدگی تابع سخت شوندگی همسانگرد	N/m^2
κ_0	ثابت ماده	
L_h	طول مفصل پلاستیک در تکیه‌گاه	m
$\mathbf{M}$	ماتریس مولفه های تنش های منتجه شامل گشتاورهای خمشی	$\mathrm{N}.\mathrm{m}/\mathrm{m}$
$\widehat{\mathbf{M}}_N$	ماتریس ضرایب مربوط به مشتقات تابع چبیشف	

نماد	تعریف	واحد
M_0	ظرفیت خمشی سازه	$\mathrm{N.m/m}$
M_{rr}	تنش منتجه خمشی شعاعی	$\mathrm{N.m/m}$
$M_{\theta\theta}$	تنش منتجه خمشی محیطی	$\mathrm{N.m/m}$
$M_{r\theta}$	تنش منتجه خمشی برشی	$\mathrm{N.m/m}$
M_d	تنش خمشی تسلیم دینامیکی	$\mathrm{N.m/m}$
M	درجه آزادی سری های چبیشف	
m_s	جرم ورق	Kg
m_0	پارامترهای فیزیکی مدل ویسکو پلاستیک نعمت – ناصر	
m_1	ثابت ماده در رابطه جانسون- کوک	
$\mathbf{N}$	ماتریس مولفه های تنش های منتجه شامل نیروهای غشایی	$\mathrm{N/m}$
$\widehat{\mathbf{N}}_N^{(b)}$	مربوط به ماتریس ضرایب عبارت های توانی بر حسب چند جمله ای چبیشف	
N	درجه آزادی سری های چبیشف	
$\boldsymbol{n}$	بردار یکه عمود بر سطوح تسلیم متوالی	$\mathrm{m/N}$
n	تعداد مفصل ها	
n_0	ثابت فیزیکی مدل ویسکو پلاستیک نعمت – ناصر	
n_1	ثابت ماده در رابطه جانسون- کوک	
$\bar{n}$	تابت ماده مربوط به عیوب متالورژیکی	
N_d	تنش غشایی تسلیم دینامیکی	$\mathrm{N.m/m}$
N_{rr}	تنش منتجه غشایی شعاعی	$\mathrm{N.m/m}$
$N_{\theta\theta}$	تنش منتجه غشایی محیطی	$\mathrm{N.m/m}$
$N_{r\theta}$	تنش منتجه غشایی برشی	$\mathrm{N.m/m}$
$\boldsymbol{P}^{nl}$	ماتریس انباشته شده غیر خطی مربوط به بار، اینرسی و کرنش ها	N
$\mathrm{P.S}$	حالت پلاستیک	
p_m	فشار اوج پالسی	$\mathrm{N/m^2}$

نماد	تعریف	واحد
p_z	پروفیل فشاردر جهت z	$\mathrm{N/m^2}$
p_0	ثابت فیزیکی مدل ویسکو پلاستیک نعمت – ناصر	
$\mathbf{Q}$	ماتریس مولفه های تنش های منتجه شامل نیروهای برشی	$\mathrm{N.m/m}$
Q_{rr}	تنش برشی منتجه شعاعی	$\mathrm{N.m/m}$
$Q_{\theta\theta}$	تنش برشی منتجه محیطی	$\mathrm{N.m/m}$
q	ثابت ماده کوپر- سیموندز	
q_0	ثابت فیزیکی مدل ویسکو پلاستیک نعمت – ناصر	
$\widehat{\mathbf{R}}_\beta$	ماتریس مربوط به ضرایب بسط دو جمله ای نیوتن در فصل چهارم	
R	شعاع ورق دایره ای	m
R_0	شعاع داخلی ورق قطاعی حلقوی	m
R_1	شعاع خارجی ورق قطاعی حلقوی	m
RMSE	خطای ریشه میانگین مربعی	
r	مولفه مکانی شعاعی در مختصات قطبی	m
r_i	مربوط به موقعیت مفصل پلاستیک در مدل تک مفصلی	m
r_h	فاصله شعاعی محل تشکیل مفصل پلاستیک در مدل تک مفصلی	m
r_{h_i}	فاصله شعاعی مفصل پلاستیک i ام در مدل چند مفصلی	m
s	متغیر گام زمانی	
S. C	همگرایی مکانی	
S. R	ضریب رعنایی	
T	دما	K
T_c	دمای بحرانی	K
T_m	دمای ذوب	K
T_r	دمای مرجع	K
T^*	دمای همولوگز برای فلز	K