

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشته عمران گرایش سازه

عنوان پایان نامه

تاثیر خوردگی حفره‌ای بر ظرفیت باربری ورق‌های فلزی تحت تنش فشاری

تک محوره با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

استاد راهنما

دکتر یاسر شریفی

نگارنده

بهنام عاقبتی

اسفند ۱۳۹۲



دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

دانشکده فنی و مهندسی



گروه عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته عمران گرایش سازه

بهنام عالیانی

تأثیر خوردگی حفره‌ای بر ظرفیت باربری ورق‌های فلزی تحت تنش فشاری تک
محوره با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

در تاریخ ۹۲/۱۲/۱۲ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه خوب به تصویب نهایی رسید.

- ۱- استاد راهنمای پایان‌نامه دکتر یاسر شریفی با مرتبه علمی استادیار 
- ۲- استاد داور داخلی گروه دکتر صید صادق ناصرعلوی با مرتبه علمی استادیار 
- ۳- استاد داور داخلی گروه دکتر عباس درب هندی با مرتبه علمی استادیار 
- ۴- نماینده تحصیلات تکمیلی دکتر علی هلیزاده با مرتبه علمی استادیار 

تمامی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های
حاصل از پژوهش موضوع این پایان‌نامه، متعلق به دانشگاه
ولی‌عصر (عج) رفسنجان است.

پاسکزاری

خدای رابی ساگرم که از روی کرم پرومادی فداکار نصیم ساخته تا دسیه
درخت پر بار وجودشان ریشه گرفته و در زیر شاخ و برگ پر مهرشان بیاسیم و به پشتوانه وجودشان
در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم.

والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نشان دلیلی است بر بودنم چرا

که این دو وجود پس از پروردگاریه؛ هستی ام بوده اند و تم را گرفتند و راه رفتن

را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب به من آموختند.

آموذگاری که برایم زندگی؛ بودن و انسان بودن را معنا کردند

به پاس تعبیر عظیم انسانیت ایشا و از خودگذشتگی و محبت های بی دینشان که هرگز فروکش نمی کند.

به پاس عاقله سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگار ان بهترین پشتیبان است

به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهبان به شجاعت می گراید

و با پاس فراوان از: استاد بزرگوار جناب آقای دکتر یاسر شیرینی.

و به امید آنکه آنچه از خرمن وجودشان خوشه چینی نمودم به حکم نشر، زکاتش را به جامعه علمی باز پرداخت نمایم.

تقدیم به

مقدس ترین واژه مادر لغت نامه دلم
خدای مهربانم که دستان پر مهرش بر زندگیم سایه گسترده
پدر و مادر عزیزم که زندگیم را دیون مهر و عطفیت آنان میدانم
و همه آنان که آفتاب مهرشان در آستان قلمم همچنان پابرجاست و هرگز غروب نخواهد کرد.

چکیده

پدیده خوردگی، واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی بین یک ماده (معمولاً یک فلز) و محیط اطراف آن می‌باشد که به تغییر خواص ماده منجر خواهد شد. پدیده خوردگی در تمامی دسته‌های اصلی مواد شامل: فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها و کامپوزیت‌ها اتفاق می‌افتد، اما وقوع آن در فلزات آن قدر شایع و فراگیر بوده و اثرات مخربی به جای می‌گذارد که هرگاه صحبت از خوردگی به میان می‌آید، ناخودآگاه، خوردگی یک فلز به ذهن می‌رسد. خوردگی سبب به وجود آمدن زیان‌های فراوانی در کارایی سیستم‌های مختلف می‌گردد. پدیده خوردگی علاوه بر خسارت‌های جانی از نظر اقتصادی نیز خسارت‌های فراوانی ایجاد می‌نماید. خوردگی حفره‌ای مهم‌ترین و شدیدترین انواع خوردگی موضعی می‌باشد که سبب سوراخ شدن و در نتیجه زوال قطعه می‌گردد. در این نوع خوردگی قطر حفرات می‌تواند اندازه‌های مختلفی داشته باشد. این خوردگی یکی از انواع خطرناک خوردگی موضعی می‌باشد، زیرا ممکن است بدون این که هیچ‌گونه کاهش وزنی در فلز خورده شده، مشاهده گردد، ضخامت قطعه به تدریج کاهش یابد و این مسئله می‌تواند تبعات بسیار خطرناکی را در ورق‌های فولادی باربر به همراه داشته باشد. در این تحقیق سعی بر آن شده که به بررسی ظرفیت باربری ورق‌های با خوردگی حفره‌ای که تحت تنش فشاری تک محوره قرار دارند، پرداخته شود. تعیین مقاومت نهایی مدل‌ها که در حالات گوناگونی از فقدان حجم خوردگی قرار دارند، با به کارگیری تحلیل غیرخطی المان محدود که با نرم افزار Abaqus انجام شده، بررسی می‌شود. در این تحقیق، اثر شکل و عمق و قطر حفرات خوردگی، مورد ارزیابی قرار گرفته است و همچنین اثرات تغییر ابعاد ورق‌ها، تغییر در عمق و نیز قطر حفرات خوردگی و همچنین تاثیر حجم خوردگی برای دو نوع ورق فولادی نرم و با مقاومت بالا با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی بررسی شده است.

واژگان کلیدی: خوردگی حفره‌ای، ظرفیت باربری ورق‌ها، تنش فشاری تک محوره، تحلیل غیرخطی المان محدود، شبکه عصبی مصنوعی.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول
۱	مقدمه
۱	۱-۱- ورق‌ها
۳	۲-۱- کمانش ورق‌ها
۷	۳-۱- خوردگی
۸	۴-۱- اهمیت پژوهش
۸	۵-۱- اهداف پژوهش
۹	۶-۱- روش انجام پژوهش
۱۱	فصل دوم
۱۱	پیشینه پژوهش
۱۱	۱-۲- سیری در پژوهش‌های انجام شده
۲۱	فصل سوم
۲۱	مواد و روش‌ها
۲۱	۱-۳- کمانش ورق‌ها
۲۱	۱-۱-۳- ورق‌ها
۲۲	۳-۱-۱-۱- تئوری تغییر شکل جزئی ورق‌های نازک
۲۵	۳-۱-۲-۱- تعادل نیروهای واقع در صفحه
۲۹	۳-۲-۱-۳- رابطه لنگر- تغییر شکل
۴۲	۳-۱-۳- کمانش غیر ارتجاعی ورق‌ها
۴۳	۳-۱-۴- تئوری ورق‌ها با افت زیاد
۴۴	۳-۱-۴-۱- نحوه یافتن معادلات
۴۴	۳-۱-۴-۲- تعادل
۴۷	۳-۴-۱-۳- سازگاری
۵۳	۳-۱-۵- رفتار بعد از کمانش صفحه با بار فشاری محوری
۵۴	۳-۱-۵-۱- محاسبه

۶۱.....	۳-۱-۶- مقاومت نهایی ورق تحت بار فشاری محوری
۶۴.....	۳-۱-۷- نکات احتیاطی طراحی برای کمانش موضعی
۶۶.....	۳-۲- خوردگی
۶۷.....	۳-۲-۱- تاریخچه خوردگی
۷۰.....	۳-۲-۲- تعریف خوردگی
۷۲.....	۳-۲-۳- اهمیت و ارزیابی خسارت خوردگی
۷۲.....	۳-۲-۳-۱- بعد اقتصادی خوردگی
۷۲.....	۳-۲-۳-۲- بعد ایمنی خوردگی
۷۲.....	۳-۲-۳-۳- بعد کاهش ضایعات خوردگی
۷۳.....	۳-۲-۴- تقسیم‌بندی انواع خوردگی در فلزات یا آلیاژها
۷۳.....	۳-۲-۵- عوامل موثر در خوردگی فلزات
۷۳.....	۳-۲-۶- حفاظت در برابر خوردگی
۷۴.....	۳-۲-۷- هزینه‌های خوردگی
۷۷.....	۳-۲-۸- طراحی مناسب
۷۸.....	۳-۲-۹- انواع خوردگی
۷۸.....	۳-۲-۹-۱- خوردگی یکنواخت
۷۹.....	۳-۲-۹-۱-۱- راهکارهای جلوگیری از خوردگی یکنواخت
۷۹.....	۳-۲-۹-۲- خوردگی گالوانیکی
۸۰.....	۳-۲-۹-۲-۱- راهکارهای جلوگیری از خوردگی گالوانیکی
۸۱.....	۳-۲-۹-۳- خوردگی شکافی یا درزی
۸۳.....	۳-۲-۹-۳-۱- راهکارهای جلوگیری از خوردگی شکافی
۸۴.....	۳-۲-۹-۴- خوردگی رشته‌ای
۸۵.....	۳-۲-۹-۵- خوردگی حفره‌ای
۸۷.....	۳-۲-۹-۵-۱- راهکارهای جلوگیری از خوردگی حفره‌ای
۸۷.....	۳-۲-۹-۶- خوردگی مرزدانه‌ای
۸۸.....	۳-۲-۹-۶-۱- راهکارهای جلوگیری از خوردگی مرزدانه‌ای:
۸۸.....	۳-۲-۹-۷- خوردگی جدایشی
۸۹.....	۳-۲-۹-۷-۱- راهکاری جلوگیری از خوردگی جدایشی:

صفحه	عنوان
۸۹	خوردگی سائیدگی ۸-۹-۲-۳
۹۰	راهکارهای جلوگیری از خوردگی سائیدگی ۱-۸-۹-۲-۳
۹۲	خوردگی تنشی ۹-۹-۲-۳
۹۴	روش‌های جلوگیری از ترک خوردگی تنشی ۱-۹-۹-۲-۳
۹۴	خوردگی خستگی ۱۰-۹-۲-۳
۹۶	راهکارهای جلوگیری از خوردگی خستگی ۱-۱۰-۹-۲-۳
۹۷	آشنایی با نرم افزار ABAQUS ۳-۳-۳
۹۸	آشنایی با روش اجزاء محدود ۱-۳-۳
۹۸	روش‌های عددی حل معادلات دیفرانسیل ۲-۳-۳
۹۸	روش تفاضل محدود ۱-۲-۳-۳
۹۹	روش تغییر ۲-۲-۳-۳
۹۹	روش‌های باقی‌مانده وزنی ۳-۲-۳-۳
۹۹	روش اجزاء محدود ۳-۳-۳
۱۰۰	آشنایی مقدماتی با نرم‌افزار ABAQUS ۴-۳-۳
۱۰۰	قسمت‌های مختلف ABAQUS ۵-۳-۳
۱۰۱	ABAQUS/STANDARD ۱-۵-۳-۳
۱۰۱	ABAQUS/Explicit ۲-۵-۳-۳
۱۰۱	ABAQUS/CAE ۳-۵-۳-۳
۱۰۲	Abaqus/Viewer ۴-۵-۳-۳
۱۰۲	Abaqus/Aqua ۵-۵-۳-۳
۱۰۲	Abaqus/Design ۶-۵-۳-۳
۱۰۲	Abaqus/Design در المان‌ها ۱-۶-۵-۳-۳
۱۰۳	Abaqus Interface for Moldflow ۷-۵-۳-۳
۱۰۳	Abaqus Interface for MSC.Adams ۸-۵-۳-۳
۱۰۳	اصول نرم افزار Abaqus ۶-۳-۳
۱۰۴	روش‌های حل معادلات غیر خطی ۷-۳-۳
۱۰۵	روش دو بخشی ۱-۷-۳-۳
۱۰۷	الگوریتم روش دوبخشی ۱-۱-۷-۳-۳

۱۰۸.....	۳-۳-۷-۲- روش نابجایی.....	۱۰۸
۱۰۸.....	۳-۳-۷-۱- رابطه بازگشتی در روش نابجایی.....	۱۰۸
۱۰۹.....	۳-۳-۷-۳- روش نیوتن.....	۱۰۹
۱۰۹.....	۳-۳-۷-۱- رابطه بازگشتی در روش نیوتن.....	۱۰۹
۱۱۰.....	۳-۳-۷-۴- روش وتری.....	۱۱۰
۱۱۱.....	۳-۳-۷-۵- روش طول قوس.....	۱۱۱
۱۱۲.....	۳-۳-۸- محیط‌های Abaqus/CAE.....	۱۱۲
۱۱۴.....	۳-۴-۴- آشنایی با شبکه عصبی مصنوعی.....	۱۱۴
۱۱۶.....	۳-۴-۱- الهام از طبیعت.....	۱۱۶
۱۱۸.....	۳-۴-۲- تاریخچه شبکه‌های عصبی مصنوعی.....	۱۱۸
۱۱۹.....	۳-۴-۳- کاربرد شبکه‌های عصبی.....	۱۱۹
۱۲۰.....	۳-۴-۴- آشنایی با مدول نورون.....	۱۲۰
۱۲۵.....	۳-۴-۵- چگونگی پردازش داده‌ها در یک نورون.....	۱۲۵
۱۲۶.....	۳-۴-۶- معماری شبکه‌های عصبی.....	۱۲۶
۱۲۹.....	۳-۴-۷- آموزش شبکه‌های عصبی.....	۱۲۹
۱۳۵.....	۳-۵-۵- آنالیز حساسیت.....	۱۳۵
۱۳۵.....	۳-۵-۱- روش هیل.....	۱۳۵
۱۳۶.....	۳-۵-۲- روش Statsoft.....	۱۳۶
۱۳۸.....	فصل چهارم.....	۱۳۸
۱۳۸.....	نتایج و بحث.....	۱۳۸
۱۳۸.....	مقدمه.....	۱۳۸
۱۳۸.....	۴-۱- خوردگی.....	۱۳۸
۱۳۹.....	۴-۲- ورق‌ها.....	۱۳۹
۱۴۰.....	۴-۲-۱- تئوری ورق‌ها با افت زیاد.....	۱۴۰
۱۴۱.....	۴-۲-۲- مقاومت پس از کمانش ورق.....	۱۴۱
۱۴۲.....	۴-۳- تاثیر خوردگی بر روی ورق‌ها.....	۱۴۲
۱۴۴.....	۴-۴- مدل‌سازی اجزاء محدود.....	۱۴۴
۱۴۴.....	۴-۴-۱- تحلیل غیرخطی.....	۱۴۴

صفحه	عنوان
۱۴۵	۴-۴-۲- عیب هندسی اولیه
۱۴۵	۴-۵- خصوصیات مصالح
۱۴۵	۴-۶- شرایط مرزی و چگونگی بارگذاری و نوع المان به کار رفته در مش بندی
۱۴۶	۴-۷- بررسی صحت مدل سازی اجزاء محدود
۱۷۰	۴-۹- تاثیر عمق حفرات خوردگی در ظرفیت باربری نهایی
۱۷۰-۴	تعیین مقاومت نهایی ورق های خورده شده تحت تنش فشاری تک محوره با استفاده از شبکه
۱۷۶	عصبی مصنوعی
۱۸۷	۴-۱۱- آنالیز حساسیت
۱۸۸	فصل پنجم
۱۸۸	نتیجه گیری و پیشنهادها
۱۸۸	۵-۱- بحث
۱۹۰	۵-۲- پیشنهادهایی برای مطالعات آینده
۱۹۱	پیوست ها
۲۰۰	منابع

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل‌های ۱-۱- نشان دهنده محورهای مختصات و تنش‌های صفحه، می‌باشد.	۴
شکل‌های ۲-۱- نشان دهنده تنش‌های یک عنصر کوچک از صفحه، می‌باشد.	۴
شکل ۳-۱- نیروهای وارده بر صفحه میانی، جهات موجود در شکل، مثبت هستند.	۶
شکل ۴-۱- خوردگی موضعی حفره‌ای	۷
شکل ۵-۱- ورق فولادی مستطیلی با تکیه‌گاه‌های ساده تحت تنش فشاری تک محوره	۸
شکل ۱-۲- خوردگی حفره‌ای در سطح ورق	۱۲
شکل ۲-۲- خوردگی یکنواخت	۱۳
شکل ۳-۲- نمایش کمترین سطح مقطع	۱۷
شکل‌های ۱-۱-۳- نشان دهنده محورهای مختصات و تنش‌های صفحه، می‌باشد.	۲۳
شکل‌های ۲-۱-۳- نشان دهنده تنش‌های یک عنصر کوچک از صفحه، می‌باشد.	۲۳
شکل ۳-۱-۳- نیروهای وارده بر صفحه میانی (جهت موجود در شکل، مثبت هستند).	۲۵
شکل ۴-۱-۳- نیروهای صفحه‌ای وارد بر عنصر ورق - تغییر مکان کم	۲۶
شکل ۵-۱-۳- لنگرهای خمشی، پیچشی و نیروهای برشی وارد بر عنصر ورق	۲۸
شکل ۶-۱-۳- تنش‌های عمودی و برشی مربوط به لنگرهای خمشی و پیچشی	۳۰
شکل ۷-۱-۳- تغییر مکان‌های خمشی در صفحه	۳۲
شکل ۸-۳- تغییر مکان‌های خمشی در صفحه	۳۳
شکل ۹-۱-۳- صفحه با تکیه‌گاه‌های ساده با نیروی فشاری در جهت X	۳۵
شکل ۱۰-۱-۳- ضریب کمانش برای صفحات تحت اثر فشار یک‌محوری	۳۹
شکل ۱۱-۳- ضریب تنش کمانش K برای حالات مختلف صفحه	۴۱
شکل ۱۲-۱-۳- نیروهای صفحه‌ای وارد بر عنصر صفحه - تغییر شکل بزرگ	۴۵
شکل ۱۳-۱-۳- کرنش طولی در صفحه با تغییر شکل بزرگ	۴۸
شکل ۱۳-۱-۳- کرنش برشی در صفحه که ناشی از U_0 و N_0 می‌باشد - تغییر شکل بزرگ	۴۹
شکل ۱۴-۱-۳- کرنش برشی در ورق ناشی از W - تغییر شکل بزرگ	۴۹
شکل ۱۵-۱-۳- صفحه با تکیه‌گاه‌های ساده با بار فشاری در جهت	۵۴
شکل ۱۶-۱-۳- منحنی بار - تغییر مکان برای ناحیه بعد از کمانش	۵۹
شکل ۱۶-۱-۳- توزیع تنش در مرحله پس از کمانش	۶۰
شکل ۱۷-۱-۳- تغییرات مقاومت پس از کمانش با نسبت های Σ_{CR} تا Σ_Y	۶۲

عنوان	صفحه
شکل ۱-۳-۱۸- مفهوم عرض مؤثر برای تعیین مقاومت پس از کمانش.....	۶۳
شکل ۱-۲-۳- اثرات خوردگی یکنواخت بر روی فولاد.....	۷۹
شکل ۲-۲-۳- تاثیر خوردگی گالوانیکی یا دو فلزی بر روی قطعات مختلف فولادی.....	۸۰
شکل ۳-۲-۳- اثرات خوردگی شکافی بر روی قطعات مختلف فولادی.....	۸۲
شکل ۴-۲-۳- خوردگی شکافی در سطح فلنج لوله (از جنس فولاد زنگ‌نزن).....	۸۳
شکل ۵-۲-۳- شمائی از رشد و برخورد رشته‌ها در خوردگی رشته‌ای.....	۸۴
شکل ۶-۲-۳- خوردگی رشته‌ای.....	۸۵
شکل ۷-۲-۳- شمائی از انواع صورت خوردگی.....	۸۶
شکل ۸-۲-۳- شمائی از خوردگی مرزذانه‌ای.....	۸۷
شکل ۹-۲-۳- تأثیر خوردگی جدایشی بر روی لثله‌های فولادی.....	۸۹
شکل ۱۰-۲-۳- اثرات خوردگی سائیدگی.....	۹۰
شکل ۱۱-۲-۳- اثرات خوردگی تنشی بر روی قطعات فولادی.....	۹۳
شکل ۱۲-۲-۳- اثرات خوردگی خستگی در فولاد و آلومینیم.....	۹۶
شکل ۱-۳-۳- رابطه بین قسمت‌های مختلف ABAQUS.....	۱۰۱
شکل ۲-۳-۳- فرآیند تحلیل یک مدل.....	۱۰۴
شکل ۳-۳-۳- روش دوبخشی برای یافتن ریشه معادله غیرخطی.....	۱۰۷
شکل ۴-۳-۳- روش نابجایی برای یافتن ریشه معادله غیرخطی.....	۱۰۸
شکل ۵-۳-۳- روش نیوتن برای یافتن ریشه معادله غیرخطی.....	۱۱۰
شکل ۶-۳-۳- اجزا و منوهای مختلف موجود در پنجره اصلی CAE.....	۱۱۳
شکل ۷-۳-۳- کانتور رنگی تنش فون میسز برای ارزیابی نورد سرد یک ورق ساندویچی.....	۱۱۴
شکل ۱-۴-۳- نحوه عملکرد شبکه عصبی.....	۱۱۵
شکل ۲-۴-۳- ساختار نورون و چگونگی ارتباط بین نورون‌ها.....	۱۱۸
شکل ۳-۴-۳- تابع انتقال HARDLIMIT.....	۱۲۱
شکل ۴-۴-۳- تابع انتقال خطی.....	۱۲۲
شکل ۵-۴-۳- تابع انتقال لگاریتمی.....	۱۲۲
شکل ۶-۴-۳- تابع انتقال رقابتی.....	۱۲۳
شکل ۷-۴-۳- تابع انتقال HARDLIMIT متقارن.....	۱۲۳
شکل ۸-۴-۳- تابع انتقال خطی مثبت.....	۱۲۳

عنوان	صفحه
شکل ۳-۴-۹- تابع انتقال RADIAL BASIS	۱۲۴
شکل ۳-۴-۱۰- تابع انتقال SATLIN	۱۲۴
شکل ۳-۴-۱۱- تابع انتقال SATLINS	۱۲۴
شکل ۳-۴-۱۲- تابع انتقال SOFTMAX	۱۲۵
شکل ۳-۴-۱۳- تابع انتقال TAN SIGMOID	۱۲۵
شکل ۳-۴-۱۴- تابع انتقال مثلثی	۱۲۵
شکل ۳-۴-۱۵- ساختمان یک نورون در ANN	۱۲۶
شکل ۳-۴-۱۶- شبکه تک لایه با R ورودی و S	۱۲۷
شکل ۳-۴-۱۷- شبکه سه لایه همراه با همراه با اطلاعات تفکیک شده	۱۲۸
شکل ۳-۴-۱۸- شبکه پرسپترون از یک لایه با S نورون و R ورودی	۱۳۰
شکل ۳-۴-۱۹- شبکه خطی از یک لایه با S نورون و R ورودی	۱۳۱
شکل ۳-۴-۲۰- شبکه شعاع مبنا، لایه مخفی دارای S ^۱ نورون و لایه خروجی دارای S ^۲ نورون	۱۳۲
شکل ۴-۱- توزیع تنش در مرحله پس از کمانش	۱۴۱
شکل ۴-۲- خوردگی موضعی حفره‌ای	۱۴۲
شکل ۴-۳- ورق فولادی مستطیلی با تکیه‌گاه‌های ساده تحت تنش فشاری تک محوره	۱۴۶
شکل ۴-۴- مدل‌های المان محدود به همراه درصد‌های DOP ورق‌ها	۱۴۹
ادامه شکل ۴-۴- مدل‌های المان محدود به همراه درصد‌های DOP ورق‌ها	۱۵۰
شکل ۴-۵- مدل‌های ساخته شده به همراه درصد‌های DOP ورق‌ها، تحت بارگذاری	۱۵۱
ادامه شکل ۴-۵- مدل‌های ساخته شده به همراه درصد‌های DOP ورق‌ها، تحت بارگذاری	۱۵۲
شکل ۴-۶- مدل‌های تغییر شکل یافته ورق‌ها به همراه درصد‌های DOP ورق‌ها	۱۵۳
ادامه شکل ۴-۶- مدل‌های تغییر شکل یافته ورق‌ها به همراه درصد‌های DOP ورق‌ها	۱۵۴
شکل ۴-۷- نمودار تنش - کرنش برای فشار محوری میانگین در ورق‌های	۱۵۵
شکل ۴-۸- توزیع تنش‌های غشایی در ورق‌ها در حالت نهایی برای میزان DOP و ۳۳/۲ درصد (نتایج پایک و همکاران)	۱۵۵
شکل ۴-۹- توزیع تنش‌های غشایی در طول و عرض ورق‌ها	۱۵۶
ادامه شکل ۴-۹- توزیع تنش‌های غشایی در طول و عرض ورق‌ها	۱۵۷
شکل ۴-۱۰- مدل المان محدود ورق‌ها با نسبت‌های طول به عرض $A/B=1$ ، $A/B=2$ و $A/B=3$	۱۵۸

عنوان	صفحه
ادامه شکل ۴-۱۰- مدل المان محدود ورق‌ها با نسبت‌های طول به عرض $A/B=1$ ، $A/B=2$ و $A/B=3$	۱۵۹
شکل ۴-۱۱- مدل‌های ساخته شده به همراه نسبت A/B ورق‌ها، تحت بارگذاری.....	۱۵۹
ادامه شکل ۴-۱۱- مدل‌های ساخته شده به همراه نسبت A/B ورق‌ها، تحت بارگذاری.....	۱۶۰
شکل ۴-۱۲- مدل‌های تغییر شکل یافته ورق‌ها به همراه نسبت A/B ورق‌ها.....	۱۶۱
ادامه شکل ۴-۱۲- مدل‌های تغییر شکل یافته ورق‌ها به همراه نسبت A/B ورق‌ها.....	۱۶۲
شکل ۴-۱۳- نمودار تنش - کرنش برای فشار محوری میانگین در ورق‌های.....	۱۶۲
شکل ۴-۱۴- ورق با حفرات خوردگی سیلندری.....	۱۶۶
شکل ۴-۱۵- ورق با حفرات خوردگی مخروطی.....	۱۶۶
شکل ۴-۱۶- ورق با حفرات خوردگی کروی.....	۱۶۷
شکل ۴-۱۷- نمودار تنش - کرنش برای فشار محوری میانگین و برای ورق‌های با $DOP 4.91\%$	۱۶۷
شکل ۴-۱۸- نمودار تنش - کرنش برای ورق‌های با $DOP 9.62\%$	۱۶۸
شکل ۴-۱۹- نمودار تنش - کرنش برای فشار محوری میانگین و برای ورق‌های با $DOP 15.90\%$	۱۶۸
شکل ۴-۲۰- نمودار تنش - کرنش برای فشار محوری میانگین و برای ورق‌های با $DOP 23.75\%$	۱۶۹
شکل ۴-۲۱- نمودار تنش - کرنش برای فشار محوری میانگین و برای ورق‌های با $DOP 33.20\%$	۱۶۹
شکل ۴-۲۱- مدل المان محدود ورق با عمق حفرات 0.075 متر و $DOP 4.91\%$	۱۷۳
شکل ۴-۲۲- مدل المان محدود ورق با عمق حفرات 0.12 متر و $DOP 4.91\%$	۱۷۳
شکل ۴-۲۳- مدل المان محدود ورق با عمق حفرات 0.062 متر و $DOP 9.62\%$	۱۷۴
شکل ۴-۲۴- نمودار تنش - کرنش برای فشار محوری میانگین برای ورق‌های گروه A با درصد DOP مختلف.....	۱۷۴
شکل ۴-۲۵- نمودار تنش - کرنش برای فشار محوری میانگین برای ورق‌های گروه B با درصد DOP مختلف.....	۱۷۵
شکل ۴-۲۶- نمودار تنش - کرنش برای فشار محوری میانگین برای ورق‌های گروه C.....	۱۷۵
شکل ۴-۲۷- نمایش فاکتور کمترین سطح مقطع در مطالعه پایک و همکاران.....	۱۷۷

صفحه	عنوان
۱۷۷	شکل ۴-۲۸- نمایش دو ورق با میزان کمترین سطح مقطع یکسان.....
۱۸۳	شکل ۴-۲۹- نمایش چگونگی عملکرد شبکه عصبی مصنوعی.....
۱۸۳	شکل ۴-۳۰- ضرایب همبستگی مراحل آموزش، ارزیابی، آزمایش و در حالت کلی.....
۱۸۴	شکل ۴-۳۱- ضریب همبستگی در حالت آموزش به شکل سه بعدی.....
۱۸۴	شکل ۴-۳۲- میانگین ضریب خطاها و تعداد چرخه‌های یادگیری.....
۱۸۶	شکل ۴-۳۳- مقایسه رابطه پیشنهادی با رابطه پایک و همکاران و ژیانگ و گودس.....
۱۸۷	شکل ۴-۳۴- نتایج آنالیز حساسیت.....

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۳-۲-۱- خسارات خوردگی در کشورهای مختلف	۷۶
جدول ۴-۱- مشخصات مکانیکی مصالح	۱۴۵
جدول ۴-۲- خواص مصالح برای مدل‌های پایک و همکاران	۱۴۷
جدول ۴-۳- خصوصیات هندسی ورق‌ها برای مدل‌ها	۱۴۷
جدول ۴-۴- میزان DOP (%) مشخص شده برای مدل‌ها	۱۴۸
جدول ۴-۵- خصوصیات هندسی ورق‌ها	۱۵۸
جدول ۴-۶- خواص مصالح ورق‌ها برای مدل‌سازی	۱۶۳
جدول ۴-۷- مشخصات هندسی حفرات خوردگی برای مدل‌ها	۱۶۴
جدول ۴-۸- خصوصیات هندسی ورق‌ها بر حسب متر (M)	۱۶۵
جدول ۴-۹- میزان درصد DOP برای ورق‌ها	۱۶۵
جدول ۴-۱۰- خصوصیات مصالح ورق‌ها	۱۷۰
جدول ۴-۱۱- خصوصیات هندسی ورق‌ها بر حسب متر (M)	۱۷۰
جدول ۴-۱۲- مشخصات هندسی حفرات خوردگی بر حسب متر (M)	۱۷۱
جدول ۴-۱۳- میزان درصد DOP برای ورق‌ها	۱۷۲
جدول ۴-۱۴- خواص مصالح ورق‌ها برای مدل‌سازی	۱۷۹
جدول ۴-۱۵- مشخصات هندسی ورق‌ها و حفرات خوردگی آنها به همراه حجم خوردگی آنها	
(مقادیر ارائه شده در جدول ذیل، بر حسب متر می‌باشد)	۱۷۹
جدول ۴-۱۶- مشخصات هندسی و حجم خوردگی ورق‌ها به همراه مقاومت نهایی آنها برای فولاد با	
مقاومت بالا	۱۸۱

فهرست علائم

h	ضخامت ورق
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	تنش عمودی
$\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{xz}$	تنش برشی
M_x, M_y, M_{xy}	لنگر
a	طول ورق
b	عرض ورق
t	ضخامت ورق
b_e	عرض موثر
σ_x	تنش طولی
σ_y	تنش عرضی
P_u	بار نهایی
F_{cr}	تنش بحرانی کمانش ورق
E_s	مدول وتری مواد
E_t	مدول مماسی مواد
m, n	تعداد نیم موجها
η	فاکتور کاهش پلاستیسیته اتا
E	مدول یانگ
F_y	تنش تسلیم ورق
Q_x, Q_y	مولفه های نیروهای برشی
σ_{fa}	تنش طولی متوسط در لحظه تخریب
P_u	بار فشاری
$\sigma_{x(max)}$	تنش طولی ماکزیمم لبه ورق
k	ضریب عددی کا
ε	کرنش
Υ	کرنش برشی
V_{loss}	حجم خوردگی
v	ضریب پواسون
DOP	درصد خوردگی سطحی

ش

فهرست علائم

t_r	عمق خوردگی
d	قطر حفرات خوردگی
F_c	جواب عمومی معادله
F_c	جواب خصوصی معادله
W	انحنا