## بهینه سازی مشخصات ابعادی در اتصال مواد مرکب چند لایه به کمک شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک

عباس فدائى*	استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
سعيد آشنا	کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

#### چکیدہ

در این مقاله حالات و بارهای گسیختگی برای اتصالات چندپینی در ورق مواد مرکب الیاف شیشهای اپوکسی تک جهته، با استفاده از روش اجزای محدود و آزمونهای تجربی تحلیل میشوند. به علاوه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک، الگویی معرفی میشود که در آن پینها در موقعیت بهینه شده ای قرار گیرند. در اتصالات چند پینی، تغییرات گام نسبت به قطر پین، عرض ورق نسبت به قطر پین و نسبت فاصله از لبه ورق به قطر پین بر نحوه گسیختگی اتصال تأثیر بسزایی دارند. با توجه به این که برای این گونه ورقها حل دقیقی از گسیختگی وجود ندارد، برای بهینه سازی در هر مورد شبیه سازی های متعدد اجزای محدود انجام و نتایج آن با استفاده از شبکه عصبی برازش می گردد. الگوی برازش شده این شبکه به عنوان ورودی الگوریتم ژنتیک استفاده میشود. با در نظر گرفتن قیود مسأله و مشخصههای ابعادی، الگویی بهینه با این شرط که گسیختگی در آنها نسبت به بقیه نمونهها دیرتر اتفاق بیفتد، ارائه می گردد. نتایج آزمایشگاهی و اجزای محدود باهم مقایسه گردیده و میزان تفاوت بین آنها تحلیل خواهد شد.

**واژههای کلیدی:** اتصال چند پینی، ورق مواد مرکب، شبیه سازی اجزای محدود، شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک.

#### The Optimization of Dimensional Specifications for the Multi-layer Composite Material Joint Using Artificial Neural Network and Genetic Algorithm

A. Fadaei	Mechanical Engineering Department , Bu-Ali SinaUniversity, Hamedan, IRAN
S. Ashena	Mechanical Engineering Department , Bu-Ali SinaUniversity, Hamedan, IRAN

#### Abstract

In this study the failure modes and loads for multi-pin joints of the unidirectional fiberglass epoxy composite laminates, using the finite element method and experimental tests have been analyzed. In addition, a pattern was introduced in which the pins were placed in the optimized positions by using artificial neural networks and genetic algorithm method. In the multi-pin joints, the variations of pitch to diameter ratio, width to diameter ratio and distance from the edge of the laminate to diameter ratio of pin have a significant impact on the connection failure. Due to the fact that there is not the exact solution for the failure of these kinds of laminates, for optimization in each case, the FE simulation was performed and for the optimization the results were fitted using the neural network method. The fitted model was used as input to the genetic algorithm. Considering the constraints of the problem and dimensional characteristics, the optimal pattern was presented when the failure occur later than the others. The difference between the experimental data and the finite element results was analyzed.

Keywords: Maximum Multi-pin joints, Composite laminate, Finite element simulation, Neural network, Genetic algorithm

خواهد بود.

#### ۱– مقدمه

در مورد اتصالات مواد مرکب، تحقیقات گستردهای در سرتاسر دنیا انجام گرفته است و در هر کدام روشی برای پیش بینی بار و حالات گسیختگی در اتصالات ارائه شده است. در ادامه به چند مورد از آنها به اختصار اشاره خواهد شد. گودوین و ماتئوس [۱]، اتصالات چند پیچی در مواد مرکب تقویت شده به وسیله الیاف شیشه و کربن را مورد بررسی قراردادند. گودوین و همکارانش [۲]، دو نوع اتصال چند پیچی در مواد مرکب با الیاف کربن و با مشخصات ابعادی مختلف را مطالعه کردند. چانگ و همکارانش[۳]، روشی جهت پیش بینی استحکام و حالات شکست یک اتصال یک و دو پینی مواد مرکب با الیاف شیشه ارائه نمودند. کامان هو و ماتئوس [۴]، تحقیقی جهت پیش بینی استحکام و توزیع تنش در اتصالات در مواد الیاف شیشهای انجام دادند. کامان هو و ماتئوس [۵]، کار خود را ادامه داده و این بار یک نمونه سه بعدی اجزای

با توجه به رشد فزاینده استفاده از ورقهای مواد مرکب در صنایع تولیدی، مطالعه روشهای اتصال برای این مواد، یک میدان پژوهشی مهم محسوب میشود. استفاده از اتصالات چندپینی در مجموعههای ساخته شده از ورقهای مواد مرکب بسیار معمول است. توزیع بار در ورق و اتصالات به تعداد، ابعاد مختلف مرتبط با اتصال و ورق، و نیز جنس پین و ورق وابسته است. یکی از مشخصات مهم در اتصالات چند پینی ضریب تمرکز تنش است که تحت تأثیر ابعاد مرتبط با اتصال و تعداد پینها است. سازههای ناپیوسته نظیر اتصالات چندپینی، به علت تمرکز تنش زیاد ایجادشده در اطراف محل پینها، اثربخشی کمتری نسبت به سازههای پیوسته دارند و در نتیجه نیروی کمتری را میتوانند تحمل نمایند. بنابراین استحکام سازه وابسته به استحکام اتصال آن

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: fadaei@basu.ac.ir تاریخ دریافت: ۱/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱/۱۹۹

محدود، جهت پیشبینی گسیختگی در اتصالات مواد مرکب با الیاف کربن ایجاد نمودند. اکتان [۶]، اثر مشخصههای ابعادی بر استحکام گسیختگی یک اتصال مواد مرکب الیاف شیشهای اپوکسی را بررسی نمود. دانو و همکارانش [۷]، یک اتصال مواد مرکب چندپینی ایجاد و نحوه گسیختگی و توزیع تنش در آن را بر اساس معیار هاشین و بیشینه تنش عمودی بررسی کردند. اکتان و همکارانش [۸]، با مطالعه اثر مشخصههای ابعادی مختلف بر استحکام گسیختگی ورقهای الیاف شیشهای اپوکسی، اثر مشخصههای فاصله گامی، عرض ورق و دیگر مشخصهها بر نحوه گسیختگی یک اتصال یک پینی را بررسی نمودند. چوی و چان [۹]، تحقیقی جهت پیش بینی بار گسیختگی در اتصالات مواد مرکب انجام دادند. کئون و همکارانش [۱۰]، یک نمونه دو بعدی مواد مرکب با الیاف تکجهته را برای پیشبینی بار و حالات گسیختگی در آن ساختند. ری و همکارانش [۱۱]، جهت پیشبینی بار گسیختگی در اتصالات مواد مركب با استفاده از تحليل خطى تحقيقى انجام دادند. کاراکوزا و همکارانش [۱۲]، دو نوع اتصال پینی مواد مرکب را مورد بررسی قرار دادند. در یکی از اتصالها، پینها به صورت سری افقی و در دیگری به صورت سری عمودی قرار گرفته بودند. آیس و همکارانش [۱۳]، بار گسیختگی در یک اتصال چند پینی مواد مرکب الیاف شیشهای اپوکسی را بررسی کردند. طاهری بهروز و همکارانش [۱۴]، با بررسی تأثیر رفتار غیرخطی ماده بر توزیع بار در اتصالات مواد مرکب تک لبه چندردیفه، نیروی اعمالی بر هر پیچ و جابجایی آن را محاسبه ک دند.

در این مقاله دو نوع اتصال سه و پنج پینی مطالعه شده است. در این اتصالات اثر تغییر در مشخصات ابعادی بر استحکام کششی، شامل نسبت گام (فاصله بین پینها)، نسبت عرض ورق و نسبت فاصله بین پین تا لبه اتصال به قطر پین، بررسی شده است. در ادامه با استفاده از روشهای پیشبینی شبکه عصبی و بهینهسازی الگوریتم ژنتیک تلاش شده است تا اتصالی طراحی گردد که بیش ترین کارایی را در مقابل شده است تا اتصالی طراحی گردد که بیش ترین کارایی را در مقابل آزمایشات تجربی نیز انجام گرفت. ساختار ورق ماده مرکب چندلایی، آزمایشات تجربی نیز انجام گرفت. ساختار ورق ماده مرکب چندلایی، عصبی مصنوعی و بهینهسازی نسبتهای ابعادی با الگوریتم ژنتیک از تمایزات و نوآوریهای پژوهش حاضر نسبت به پژوهشهای منتشر شده هستند.

# ۲ معرفی مسأله و مبانی نظری پژوهش ۲ –۱ معرفی مسأله

در مطالعه حاضر، نحوه گسیختگی در دو اتصال در صفحات مواد مرکب بررسی شدهاند. دو اتصال پر کاربرد در صنایع هوا- فضا، یعنی اتصال سه پینی و پنج پینی با آرایش نشان داده شده به ترتیب در شکلهای ۱ و ۲، انتخاب گردیدند. همان طور که ملاحظه میشود، محل قرارگیری پینها با پارامترهای هندسی E، P و Z تعریف شدهاند. برای سادگی قطر همه سوراخها یکسان و برابر با ۶ میلیمتر فرض گردید.

در پژوهشهای انجام گرفته در نمونههایی شبیه با این اتصالات، نشان داده شده است که نحوه گسیختگی این نوع اتصالات به شدت به

نسبتهای P/D ،E/D و S/D و استه است [۶]. آنچه نقطه قوت این پژوهش محسوب میشود، بهینهسازی محل قرارگیری پینها با استفاده از الگوریتم ژنتیک است. از آنجا که این نوع ورقها با این تعداد سوراخ دارای حل تحلیلی نمیباشند، برای استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینهسازی باید از شبکه عصبی مصنوعی برای شناسایی نقطه به نقطه ورق استفاده کرده و نتایج آن را به عنوان ورودی در الگوریتم ژنتیک استفاده کرد. نمونه یک ماده مرکب هفت لایی با لایهچینی مطابق استفاده کرد. نمونه یک ماده مرکب هفت لایی با لایهچینی مطابق مدول ۱ انتخاب شد، که در صنایع هوافضا کاربرد زیادی دارد. در ساخت نمونهها از الیاف شیشهای با جرم بر واحد سطح <sup>2</sup> ۶۰۰ g/m<sup>2</sup> استفاده شده است. همچنین زمینه نمونههای آزمایشی رزین اپوکسی با سخت کننده به نسبت ۶ به ۱ است که با استفاده از روش لایهچینی دستی، با الیاف ترکیبشده و چند لایی مورد نظر را تشکیل میدهند.







شكل ۲- نمونه اتصال با پنج پين

زاویه نسبت به راستای بارگذاری، درجه	موقعيت لايه		
٩٠	لايه سوم (بالا)		
-۴۵	لايه دوم (بالا)		
۴۵	لايه اول (بالا)		
صفر	لایه میانی		
۴۵	لايه اول (پايين)		
-۴۵	لايه دوم (پايين)		
٩٠	لايه سوم (پايين)		

ها	نمونه	چىنى	لابه	– نحوه	۱,۱	جدوا

#### ۲-۲- استخراج مشخصات مکانیکی

با استفاده از مدارک فنی ارائه شده همراه با الیاف و زمینه<sup>۱</sup> خریداری شده، خصوصیات مکانیکی از روابط مربوطه [۱۵]، استخراج گردید. با استفاده از نتایج به دست آمده، مشخصههای مکانیکی برای ورق مواد مرکب هفت لایه مورد نظر، از روابط [۱۵]، استخراج گردید. این مشخصات در جدول 2 نشان داده شدهاند.

مقدار	واحد	خصوصيت
14749	GPa	ضریب الاستیسیته در راستای بارگذاری
18489	GPa	ضریب الاستیسیته در راستای عمود بر بارگذاری
٢٢٩٩	GPa	ضریب صلبیت (ضریب برشی یانگ)
٠/٣١	-	نسبت پواسون در صفحه بارگذاری
۰/۳۹	-	نسبت پواسون عمود بر صفحه بارگذاری

جدول ۲- مشخصه های استحکام برای ورق هفت لایه

### ۲-۳- تحلیل گسیختگی در ورق چند لایه بر اساس معیار هاشین

یک ورق چندلایی تحت تأثیر بارهای مکانیکی میتواند گسیخته شود، اما ممکن است همهٔ لایهها به طور همزمان گسیخته نشده یا لایههای گسیخته هنوز هم در استحکام ماده نقش داشته باشند. درجه تنزل خواص استحکامی لایه گسیخته شده، به کاربرد مورد انتظار از لایه مذکور بستگی داشته و میتواند به یکی از دو صورت زیر باشد:

 هنگامی که لایه گسیخته می شود، لایه ترک خورده را می توان با یک لایه سالم فرضی که فاقد سفتی عرضی، استحکام عرضی و استحکام برشی است، معادل کرد. در این حالت استحکام طولی بدون تغییر باقی می ماند [10].

هنگامی که لایه گسسته می شود، می توان به طور کامل
 خواص لایه را حذف کرده و مقادیری نزدیک به صفر برای استحکام آن
 در نظر گرفت [10].

هاشین از معادله (۱) برای نمایش گسیختگی الیاف کششی استفاده کرد، که در آن تنش الیاف متقاطع صفر در نظر گرفته می شود. این معیار همچنین به عنوان معیار گسیختگی یامادا- سان شناخته می شود [۱۵]:

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_{\rm T}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 \ge 1$$
 (1)

هاشین، معیارگسیختگی الیاف فشاری را به شکل ساده بر حسب تنش بیشینه ارائه کرد. لذا معیار برای گسیختگی فشاری به شکل معادله (۲) می باشد [1۵]:

$$\sigma_{11} \le 0 \tag{7}$$
$$\sigma_{11} \ge X_C$$

معیار گسیختگی کششی هاشین برای زمینه، در واقع فرم ساده شدهی معیار تسای- هیل است که در معادله (۳) بیان میشود [۱۵]:

$$\sigma_{11} = 0$$

$$\sigma_{22} \ge 0$$

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_{\rm T}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 \ge 1$$

$$(\ref{eq:starter})$$

$$(\ref{eq:starter})$$

گسیختگی فشاری زمینه در جهت الیاف متقاطع به استحکام فشاری در جهت الیاف متقاطع، استحکام برش صفحهای و برش عرضی آنها وابسته است، به طوری که معیار گسیختگی در معادله (۴) نشان داده شده است [10]:

$$\frac{\sigma_{22} \le 0}{\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_{\rm T}}\right)^2} + \left[\left(\frac{Y_{\rm C}}{2S}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{Y_{\rm C}} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 \ge 1$$
 (f)

#### ۳- مطالعه عددی

نحوه گسیختگی در این نوع اتصال به تغییرات گام نسبت به قطر پین، P/D عرض ورق نسبت به قطر پین، S/D، و نسبت فاصله از لبه ورق به قطر پین، E/D، وابسته است. بنابراین باید این مقادیر را به گونهای بهینه کرد که در اثر یک بارگذاری یکسان امکان گسیختگی کمتر از بقیه حالتها باشد. به این منظور از الگوریتم ژنتیک بهره گرفته شد. از آنجایی که برای این نوع ورقها هیچ حل تحلیلی دقیقی وجود ندارد. برای رفع این مشکل باید تعداد زیادی شبیهسازی انجام شده و با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی استخراج گردیده و به عنوان ورودی به الگوریتم ژنتیک داده شد. الگوریتم ژنتیک از این الگو استفاده نموده و با درونیابی میان حالات موجود، حالت بهینه را مشخص می کند. مقادیر مختلف نسبتهای S/D، P/D و K/D، مطابق با جدول ۳ فرض شدند [1-1].

جدول ۳ - مقادیر مختلف نسبت های هندسی

مقادير	نسبت
7. ۵/۳. ۴. ۵/۴. ۵. ۵/۵. ۶	P/D
۲، ۲/۲۵، ۵/۲، ۲۷/۲۵، ۳، ۲۵/۳، ۵/۳	S/D
۲، ۲/۲۵، ۵/۲، ۵۷/۲، ۳، ۲۵/۳، ۵/۳	E/D

#### ۳-۱- شبیه سازی اجزای محدود

از آنجا که ضخامت ورق در مقایسه با ابعاد آن کوچک بود، از مدل تنش صفحهای استفاده شد. برای سادگی و کاهش حجم محاسبات و به دلیل تقارن، نیمی از صفحه شبیه سازی گردید. در تحلیلهای اجزای محدود با نرمافزار ABAQUS، از حالت المانهای چهارضلعی که در نواحی انتقالی، المانهای مثلثی نیز فرصت حضور دارند، استفاده شد. شرایط مرزی در محل اتصال پینها به گونهای اعمال شد که عدم استفاده گردید. با استفاده از مشخصات مکانیکی استخراج شده برای ورقهای مواد مرکب و نظریه هاشین، تحلیل گسختگی برای ورق هفت لایه انجام گرفت. در تمام تحلیلهای اجزای محدود، میزان تنش موثر در اطراف سوراخها تعیین شدند تا بر اساس معیار هاشین، وقوع گسیختگی در هر لایه مشخص گردد.

اثر تغییر نسبتهای ابعادی گام به قطر پین، P/D، عرض ورق به

قطر پین، S/D، و فاصله از لبه ورق به قطر پین، E/D، بر گسیختگی در اتصال سه و پنج پینی، با استفاده از شبیه سازی اجزای محدود، مدل سازی گردید. همان گونه که در قبل اشاره شد، هنگامی که لایه گسسته میشود، میتوان به طور کامل خواص لایه را حذف کرده و مقادیری نزدیک به صفر برای استحکام آن در نظر گرفت [۱۶]. لذا بر این اساس، گسیختگی در ورق چندلایه در شبیه سازی ها اعمال گردید. مونه ای از نتایج حاصل از تحلیل اثر نسبت های هندسی بر بار کسیختگی در شکل ۳ نشان داده شده است. این شکل، اثر تغییرات نسبت D/D برای مقادیر مختلف نسبت J/C، در نسبت E/D معادل شده در شکل ۳ خروجی های ۴۹ نمونهٔ شبیه سازی شده می باشد. شده در شکل ۳ خروجی های ۴۹ نمونهٔ شبیه سازی شده می باشد. شده در شکل ۳ خروجی های ۱۹۹ نمونهٔ شبیه سازی شده می باش شده در یک شده در یک از از یا نی داده شده است. این شکل، اثر تغییرات شده در شکل ۳ خروجی های ۹۹ نمونهٔ شبیه سازی شده می باش شده در یک قرید. در این شکل نشان داده شده است که در یک نسبت E/D مشخص، برای نسبت های مختلف S/D انتخاب شده، با افزایش نسبت B/D مقدار بار گسیختگی افزایش می یابد.



E/D=2

#### **۲-۳** تحلیل نتایج با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

از شبکههای عصبی مصنوعی برای پیادهسازی توابع پیچیده در زمینههای مختلف از جمله تشخیص الگو، تشخیص هویت، طبقهبندی، برازش توابع، پردازش تصویر و سیستمهای کنترلی استفاده میشود. در مطالعه حاضر، مسأله از نوع برازش تابع است. در مسائل برازش تابع، اطلاعات ورودی شامل بار گسختگی در گرههای شبکهی اجزای محدود در اطراف سوراخهای ورق به عنوان بردار ورودی در نظر گرفته میشوند. با استفاده از نرمافزار MATLAB با بررسی الگوریتمهای مختلف آموزش شبکه و برازش توابع و نیز تعداد لایههای درونی متفاوت، به عنوان خروجی، الگوریتم لونبرگ– مارکوارت با هشت لایه درونی برای نمونه با اتصال سه پینی، و دوازده لایه درونی برای نمونه با اتصال پنج پینی، بهترین برازش را برای اطلاعات مسأله ارائه کردند. این شبکه آموزش داده شده به عنوان ورودی در الگوریتم ژنتیک استفاده شد تا نسبتهای ابعادی برای حالت بیشترین میزان بار گسیختگی تعیین شود.

#### ۳-۳- بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک

با استفاده از جعبهابزار الگوریتم ژنتیک نرمافزار MATLAB، با

تابع هدف بیشینه شدن بار گسیختگی و پس از چندین مرتبه تکرار الگوریتم، با جمعیت اولیه پنجاه، نسبتهای ابعادی بهینه E/D = 3. P/D = 2.385 = 5/D و D/D = 2.385 و D/D = 2. E/D = 2.072 و S/D = 2.072، برای نمونه با اتصال پنج E/D = 4.288 و S/D = 2.072، برای نمونه با اتصال پنج پینی، استخراج شد. هندسه نمونهها پس از گسیختگی با اتصال سه و پنج پینی و با نسبت های ابعادی بهینه، به ترتیب در شکل های ۴ و ۵، نشان داده شدهاند.



شکل ۴- هندسه نمونه سه پینی پس از گسیختگی در نسبتهای ابعادی بهینه



شکل ۵- هندسه نمونه پنج پینی پس از گسیختگی در نسبتهای ابعادی بهینه

#### ۴– مطالعه تجربی

جهت صحهگذاری بر نتایج شبیه سازیهای اجزای محدود، سه نمونه با نسبتهای ابعادی مشخص انتخاب گردید. برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج تجربی برای هر دسته از نسبتهای ابعادی، دو نمونه ساخته شد. در ساخت نمونه ها از الیاف تک جهته ۶/۳ ۶۰۰ و رزین اپوکسی با سخت کننده HY951 به نسبت ۶۱۰ استفاده شد. با توجه برش از این ورق، نمونه های آزمایشی تهیه شد. پس از این که فرآیند پخت ورق اولیه کامل شد، با استفاده از دستگاه برش با کنترل عددی کامپیوتری، نمونه های آزمایشی برش داده شده، سوراخکاری و برقوکاری گردیدند. برای آزمایش نمونهها از دستگاه کشش اینسترون مدل ۴۲۰۸ با ظرفیت ۳۰۰ کیلونیوتن در دمای ۲۳ درجه سلسیوس با سرعت۵/۰ میلیمتر بر دقیقه موجود در مرکز آزمایشگاهی متالورژی رازی استفاده شد.

آزمون کشش نمونه با اتصال سه و پنج پینی و نسبتهای بهینه حاصل از الگوریتم ژنتیک نیز انجام گرفت. در آزمایش، نمونه سهپینی در نیروی ۲۱/۹۵ کیلونیوتن و جابجایی ۱۱/۸۶ میلیمتر در محل یکی از سوراخها، دچار گسیختگی شد، اما استحکام خود را به طور کامل از دست نداد، به طوری که مقدار نیروی کششی کاهشیافت، در حالی که آزمایش ادامه پیدا کرد. در نهایت در جابجایی حدود ۱۶ میلیمتر نمونه

σ تنش (MPa)

#### ۷- مراجع

- Godwin E. W. and Matthews F. L., A review of the strength of joints in fibre-reinforced plastics, Part 1: Mechanically fastened joints. *Composites*, Vol. 11, No. 3, pp. 155–160. 1980.
- [2] Godwin E. W., Matthews F. L. and Kilty P. F., Strength of multi-bolt joints in GRP. *Composites*, Vol. 13, No. 3, pp. 268–72, 1982.
- [3] Chang F. K., Scott R. A., G. S. and Springer G. S., Failure of composite laminates containing pin loaded holes-method of solution. *J. Composite Materails*, Vol. 18, pp. 255–278. 1984.
- [4] Camanh P. P. and Matthews F. L., Stress analysis and strength prediction of mechanically fastened joints in FRP: A review. *Composites*, Part A, Vol. 28, No. 6, pp. 529–547, 1997.
- [5] Camanh P. P. and Matthews F. L., A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates. J. Composite Materails, Vol. 33, No. 24, pp. 2248–2280, 1999.
- [6] Okutan V, The effects of geometric parameters on the failure strength for pinloaded multi-directional fibre–glass reinforced epoxy laminate. *Composites*, Part B, Vol. 33, pp. 567–78, 2002.
- [7] Dano M. L., Gendron G. and Picard A., Stress and failure analysis of mechanically fastened joints in composite laminates. *Composite Structures*, Vol. 50, pp. 287–296, 2000.
- [8] Oktan B., Aslan Z. and Karakuzu R., A study of the effects of various geometric parameters on the failure strength of pinloaded woven-glass-fiber reinforced epoxy laminate. *Composites Science and Technology*, Vol. 61, pp. 1491-1497, 2001.
- [9] Choi J. H. and Chun Y. J., Failure load prediction of mechanically fastened composite joints. J. Composite Materails, Vol. 37, No. 24, pp. 2163–2177, 2002.
- [10] Kweon J. H., Shin S. Y. and Choi J. H., A two-dimensional progressive failure analysis of pinned joints in unidirectionalfabric laminated composites. *J. Composite Materails*, Vol. 41, pp. 2083–20104, 2007.
- [11] Ryu C. O., Choi J. H. and Kweon J. H., Failure load prediction of composite joints using linear analysis. J. Composite Materails, Vol. 41, no. 7, pp. 865–878, 2007.
- [12] Karakuzu R., Caliskan C. R., Aktas M. and Icten B. M., Failure behavior of laminated composite plates with two serial pin-loaded holes. *Composite Structures*, Vol. 82, pp. 225–234, 2008.
- [13] Ayşe Ö, Ümran E. and Recai F., Progressive failure analysis of glass–epoxy laminated composite pinned-joints. *Materials* & Design, Vol. 36, pp. 617-625, 2002.
- [14] Taheri-Behrooz F., Nouhi Hefzabad R. and Shamaei Kashani A., Determining nonlinear behavior effects of material on load distribution in single-column multi-bolt composite joints. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 67-74, 2015.
- [15] Autar K. K., *Mechanics of Composites Materials*, Second Edition, Taylor & Francis Pub., 2006.

استحکام خود را به طور کامل از دست داده و گسیخته شد. این در حالی است که این نمونه در تحلیل اجزای محدود در نیروی ۲۰/۸۵ کیلو نیوتن و جابجایی ۴/۲۴ میلیمتر گسیخته گردید. به هنگام آزمایش نمونه در فک دستگاه، دچار مقداری لغزش شد، به همین دلیل بین مقدار جابجایی در آزمایش و تحلیل اجزای محدود اختلاف قابل ملاحظهای وجود دارد. در این نمونه میزان خطای نسبی آزمایش و تحلیل اجزای محدود برای نیروی گسیختگی ۵٪، و برای نمونه با اتصال پنج پینی و نسبتهای بهینه حاصل از الگوریتم ژنتیک، مقدار این خطا

#### ۵- نتیجهگیری

در مطالعه حاضر، اثر تغییر نسبتهای ابعادی گام نسبت به قطر پین، عرض ورق نسبت به قطر پین و نسبت فاصله از لبه ورق به قطر پین، بر نحوه گسیختگی در اتصال سه و پنج پینی ورقهای مواد مرکب هفتلایه، با استفاده از شبیهسازی اجزای محدود تحلیل گردید. با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برازش تابع و توسط الگوریتم ژنتیک بهینهسازی مسأله انجام گرفت. برای صحهگذاری بر نتایج تحلیل اجزای محدود برای چند نمونه، آزمایشات تجربی نیز انجام گرفت. نتایج این تحقیق عبارتند از:

در ورق های شبیه سازی شده، نحوه گسیختگی در لایه ۹۰
 درجه بحرانی تر از دیگر لایه ها است. بعد از لایه ۹۰ درجه، لایه صفر
 درجه بحرانی تر از دو لایه دیگر است. در انتها دو لایه ۴۵ و
 ۴۵ گسیختگی شبیه به هم دارند.

- در یک نسبت E/D مشخص، برای نسبت های مختلف S/D انتخاب شده، با افزایش نسبت P/D مقدار بار گسیختگی افزایش می یابد.

در یک نسبت E/D مشخص، با افزایش همزمان نسبتهای
 S/D و P/D بار گسیختگی با شیب کمی افزایش می ابد.

- برای نمونههای ورق مواد مرکب مطالعه شده، نسبت های ابعادی بهینه E/D = 2.385 و S/D = 2، P/D برای نمونه با اتصال سه پینی، و B/D = 2.072 و S/D = 2.078 و E/D = 2.288برای نمونه با اتصال پنج پینی، استخراج شد.

 بعضی از نتایج آزمایشات تجربی با نتایج تحلیلهای اجزای محدود دارای اختلاف های معناداری بودند. این اختلافات ناشی از عوامل متعددی همچون: اعمال مقدار رزین استفاده شده در ماده مرکب به صورت یک مشخصه به نرمافزار، عدم دقت در زاویه الیاف در حین لایه چینی آنها، و خطاهای آزمایشگاهی مثل لغزش نمونه در فک دستگاه به هنگام اعمال نیرو هستند.

#### 8- نمادها

- S تنش (MPa)
- (MPa) استحکام کششی الیاف در راستای آنها  $X_T$
- (MPa) استحکام فشاری الیاف در راستای آنها ( $X_{\rm C}$