بهینه‌سازی لایه‌چینی ورق‌های کامپوزیتی تحت بار ضربه‌ای کوبش با بهره‌گیری از روش الگوریتم ژنتیک

محمد رضائی‌سنگتابی[۱*]، محمدرضا خدمتی[۲]، مهدی فکوری[۳]

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی کشتی‌سازی و صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی کشتی‌سازی و صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی کشتی‌سازی و صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در این مقاله، بهینه‌سازی لایه چینی در ورق‌های کامپوزیتی تحت بارهای ضربه‌ای کوبش با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک مطالعه می‌شود. به این منظور، توزیع بار کوبش به صورت گسترده یکنواخت فرض شده که شدت آن، تابع تغییراتی از نوع پالس مثلثی دارد. برای انجام فرآیند بهینه‌سازی بر اساس روش الگوریتم ژنتیک، در محیط MATLAB کدی خاص نوشته شده است. کد تهیه شده با نرم‌افزار تجاری ANSYS کوپل شده تا بتواند در هر مرحله از بهینه‌سازی، ورق کامپوزیتی مورد مطالعه را تحلیل نموده و جابجایی مرکز آن را محاسبه کند. پس از صحه‌گذاری، با استفاده از کد تهیه شده، حالات گوناگونی از بهینه‌سازی لایه چینی برای ورق‌های کامپوزیتی با ابعاد مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. بررسی‌ها در برگیرنده وضعیت‌های متقارن یا نامتقارن از لایه‌چینی می‌باشد. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها، مبین این واقعیت می‌باشند که روش انتخاب شده بر مبنای الگوریتم ژنتیک، برای انجام این نوع از بهینه‌سازی‌ها بسیار کارا است.

کلمات کلیدی: ورق کامپوزیتی، لایه‌چینی، بار ضربه‌ای کوبش، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک

OPTIMIZATION OF STACKING SEQUENCE FOR COMPOSITE PLATES SUBJECTED TO SLAMMING IMPACT LOAD USING GENETIC ALGORITHM METHOD

M. Rezai Sangtabi[1], M. R. Khedmati[2], M. Fakoori[3]

1-PhD Student, Faculty of Marine Technology, Amirkabir University of Technology
2-Associate Professor, Faculty of Marine Technology, Amirkabir University of Technology
3- MSc Graduate, Faculty of Marine Technology, Amirkabir University of Technology

Abstract

Optimisation of stacking sequence for composite plates under slamming impact loads using genetic algorithm method is studied in this paper. For this purpose, slamming load is assumed to have a uniform distribution with a triangular-pulse type of intensity function. In order to perform optimisation based on the genetic algorithm method, a special code is written in MATLAB software environment. The prepared code is so coupled with the commercial software ANSYS that in each step of optimisation, it could analyse the composite plate under study and calculate the central deflection. After validation, different cases of stacking sequence optimisation are investigated for a variety of composite plates. The investigations include symmetric as well as anti-symmetric conditions of stacking sequence. Results obtained from

* نویسنده مسوول مقاله rezai_sangtabi@aut.ac.ir

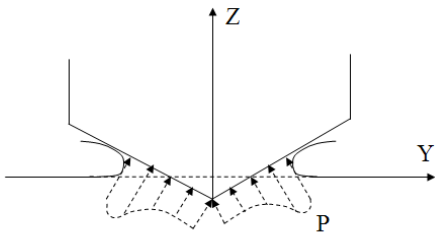
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.3.3]

these analyses reveal the fact that the adopted approach based on genetic algorithm is highly capable for performing such optimisations.
Keywords: composite plate, stacking sequence, slamming impact load, optimisation, Genetic Algorithm (GA)

۱- مقدمه

به طور کلی مواد کامپوزیتی به خاطر پایین بودن وزن مخصوص آن ها و دارا بودن نسبت استحکام به وزن مناسب در مقایسه با مواد فلزی برتری های ویژه ای دارند. همچنین سازه‌های کامپوزیتی در برابر بارهای متناوب، اثرات جوی و خوردگی مقاومت خوبی از خود نشان داده و نیز خاصیت ضد مغناطیسی دارند. این دلایل کافی است تا بتوان در صنایع دریایی کاربردهایی بسیار وسیع برای این مواد متصور شد. از سویی دیگر، برخی از ویژگی‌های این مواد نیز موجب ایجاد محدودیت‌هایی برای استفاده از آن ها می شوند که از آن جمله می توان به پایین بودن مدول الاستیسیته و مقاومت کم آنها در برابر حرارت اشاره کرد. پایین بودن مدول الاستیسیته باعث می شود که در شناورهای با طول زیاد نتوان از این مواد استفاده کرد. با این وجود در ساخت شناورهای تندرو که معمولا طول‌های کوچک تری دارند، مواد کامپوزیتی در سطح وسیعی مورد استفاده قرار می گیرد. استفاده وسیع این مواد در ساخت شناورهای تندرو موجب شده تا علاقه متخصصان به تحلیل غیرخطی و دینامیکی این مواد افزایش یابد تا بتوان از بیشترین حد مجاز در کاهش وزن سازه و کاهش میزان مصرف مصالح در ساخت شناورهای تندرو استفاده نمود. یکی از مهمترین نیروهای اعمال شونده بر شناورهای تندرو، بار ضربه‌ای ناشی از پدیده کوبش می باشد. در همین راستا در این مقاله سعی بر آنست تا موضوع بهینه سازی لایه چینی ورق‌های کامپوزیتی در مواجهه با بار کوبش مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور از ابزار قدرتمند الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

باید اشاره کرد که علاقه دانشمندان به تحلیل ورق‌های کامپوزیتی در برابر بارهای ضربه ای به دهه ۷۰ باز می‌گردد. تحقیقات مذکور عمدتا بر روی ضربه‌های وارده از سوی یک گوی بر روی یک ورق، متمرکز بوده اند. در مورد توزیع فشار کوبش پیشینه تحقیقات کمی قدیمی‌تر می‌باشد و به سال ۱۹۲۹ باز می‌گردد، زمانی که اولین بار ون کارمن[1] به محاسبه توزیع فشار کوبش پرداخت و بعد از ون کارمن، واگنر[2] در سال ۱۹۳۲ نیز به کمک روابط جریان پتانسیل حول یک گوه توزیع فشار کوبش را تخمین زد [۱]. همچنین باید اشاره کرد که در همه این موارد، جریان از نوع غیر لزج فرض شده و از تاثیرات هیدروالاستیسیته ناشی از اندرکنش سیال و سازه صرف نظر شده است. با این وجود، واگنر به نتایج بسیار قابل قبولی رسید به گونه‌ای که امروزه برای تعیین توزیع تئوری فشار منتجه از کوبش، از رابطه ارائه شده توسط وی استفاده می‌شود. برای تشریح بهتر چگونگی تعیین فشار کوبش، به شکل ۱ که شماتیکی از این توزیع فشار را نشان می‌دهد، رجوع نمایید.



شکل ۱- شماتیکی از توزیع فشار در پدیده کوبش

اما همچنین می‌توان گفت در واقعیت پدیده کوبش یک پدیده ضربه‌ای وابسته به زمان است که با گذشت زمان میزان فرورفتگی ورق در آب افزایش می‌یابد و نیز توزیع فشار در زمان‌های مختلف مقادیر متفاوتی دارد. یکی از کامل‌ترین مدل‌ها جهت بررسی پدیده کوبش توسط کین و باترا[3] [۲] در سال ۲۰۰۸ ارائه شده که در آن، اثرات هیدروالاستیسیته نیز منظور گردید. به طور کلی مدل‌های متفاوتی برای توزیع فشار کوبش ارائه شده است که هر یک با توجه به فرضیاتی که در تخمین توزیع فشار بکار برده‌اند به واقعیت نزدیک‌تر یا از واقعیت دورتر می‌باشند. با این توصیفات نمی‌توان گفت که یک توزیع فشار ارائه شده برای این پدیده

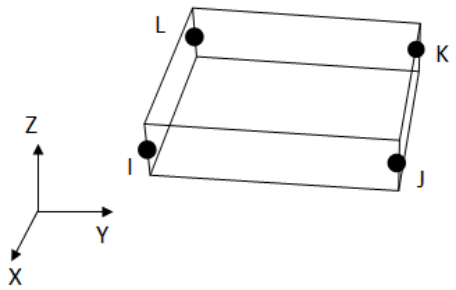
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.3.3]

درست یا اشتباه می‌باشد بلکه می‌توان نزدیکی آن را به واقعیت مورد بررسی قرار داد. با توجه به لزوم اعمال محدودیت بر زمان اجرای کد هدف در این تحقیق، در اینجا از یک مدل ساده برای شبیه‌سازی پدیده کوبش استفاده شده است.

روش الگوریتم ژنتیک نیز نخستین بار توسط جان هالند[۴] در سال ۱۹۷۵ ارائه شد، اما استفاده از این روش برای بهینه‌سازی مواد کامپوزیتی توسط کالان[۵] در سال ۱۹۹۲ صورت گرفت [۳]. امروزه الگوریتم ژنتیک یکی از ابزارهای توانمند و پرکاربرد در بهینه‌سازی ورق‌های کامپوزیتی می‌باشد و معمولا برای بهینه‌سازی به کمک این روش از متغیرهایی همچون نوع لایه چینی و تعداد لایه‌ها استفاده می‌شود. برای مثال راهول و همکارانش[۶] [۴] در سال ۲۰۰۵ برای بهینه‌سازی وزن و هزینه ورق‌های کامپوزیتی در برابر بار ضربه‌ای از این روش استفاده کرده‌اند و نیز یانگ و همکارانش[۷] [۵] در سال ۲۰۰۷ برای کمینه کردن میزان جابجایی ورق کامپوزیتی در برابر بارهای ضربه‌ای از الگوریتم ژنتیک بهره‌گیری نمودند. آن‌ها برای مدل‌سازی بار ضربه‌ای از ضربه‌گوی بر روی ورق استفاده کرده و این عمل را در دو محدوده مختلف سرعت[۸] انجام دادند.

۲- تحلیل اجزای محدود

برای تعیین نوع تحلیل اجزای محدود باید در نظر داشت که بارگذاری ماهیتی دینامیکی و وابسته به زمان دارد. بنابراین تحلیل ها از نوع گذرا می‌باشند. اما از سویی با توجه به ماهیت ضربه‌ای این نوع بارها و زیاد بودن مقدار جابجایی‌های ورق، باید تحلیل غیرخطی هندسی انجام داد. به عبارتی دیگر، باید رابطه بین کرنش ها و توابع جابجایی را غیرخطی در نظر گرفت. در این تحقیق، تحلیل اجزای محدود به کمک نرم افزار تجاری ANSYS انجام پذیرفته که بدین منظور از المان صفحه‌ای Shell181 استفاده شده است. این نوع المان، چهار گره ای بوده و در هر گره شش درجه آزادی دارد. مشخصات این المان در شکل ۲ ارائه شده است. این المان برای تحلیل ورق‌های کامپوزیتی، از تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول[۹] استفاده می‌نماید. علت اصلی انتخاب المان Shell181 برای انجام این نوع تحلیل‌ها، دقت بالای جواب‌های خروجی در کنار زمان اندک تحلیل‌ها بوده است.



شکل ۲- المان Shell181

با توجه به مطالب بیان شده، تحلیل‌ها از نوع گذرای غیرخطی هندسی[۱۰] می‌باشند. نرم‌افزار ANSYS جهت انجام تحلیل غیرخطی از روش نیوتن- رافسون[۱۱] استفاده می‌نماید که روابط حاکم بر این روش به صورت زیر بیان می‌شوند [۶]:

$$\begin{aligned} &\Delta R^{(i-1)} = {}^{t+\Delta t}R - {}^{t+\Delta t}F^{(i-1)} \\ &{}^{t+\Delta t}K^{(i-1)}\ \Delta U^{(i)} = \Delta R^{(i-1)} \\ &{}^{t+\Delta t}U^{(i)} = {}^{t+\Delta t}U^{(i-1)} + \Delta U^{(i)} \end{aligned} \qquad (۱)$$

بردار $\Delta R^{(i-1)}$ ، بردار نامتوازن باری[۱۲] نام دارد که اختلاف بین دو بردار ${}^{t+\Delta t}R$ و ${}^{t+\Delta t}F$ را نشان می دهد و $\Delta U^{(i)}$ تغییرات بوجود آمده در جابجایی است که به خاطر بردار نامتوازن باری القا می‌شود.

همچنین، این نرم افزار جهت انجام تحلیل‌های گذرا از روش نیومارک[۱۳] استفاده می‌نماید که رابطه حاکم در این روش نیز به صورت زیر می باشد:

$$\begin{aligned} &{}^{t+\Delta t}\dot{U} = {}^{t}\dot{U} + \left[(1-\delta)\ {}^{t}\ddot{U} + \delta\ {}^{t+\Delta t}\ddot{U}\right]\Delta t \\ &{}^{t+\Delta t}U = {}^{t}U + {}^{t}\dot{U}\Delta t \\ &\qquad + \left[(\frac{1}{2}-\alpha)\ {}^{t}\ddot{U} + \alpha\ {}^{t+\Delta t}\ddot{U}\right]\Delta t^2 \end{aligned} \qquad (۲)$$

که در آن α و δ پارامترهایی هستند که تعیین آن‌ها بر اساس میزان دقت و پایداری روش حل صورت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.3.3]

می‌پذیرد. نیومارک برای پایداری این روش مقادیر α و δ را به صورت زیر پیشنهاد نمود:

$$\alpha=\frac{1}{4}(1+\gamma)^2 \quad ; \quad \delta=\frac{1}{2}+\gamma \qquad (۳)$$

نرم‌افزار ANSYS.10 برای استفاده از روش نیومارک مقدار این پارامتر را برابر مقدار کوچک $\gamma=۰.۰۰۵$ قرار می‌دهد که با این حساب مقادیر α و δ برابر خواهند بود با:

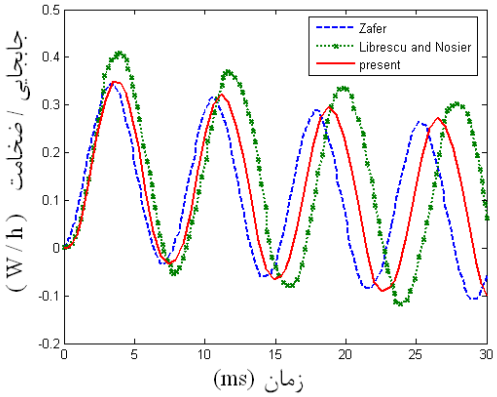
$$\alpha=۰.۲۵۲۵۰۶۲۶ \quad ، \quad \delta=۰.۵۰۵ \qquad (۴)$$

۲-۱- صحه گذاری بر روش انجام تحلیل اجزای محدود گذرای غیرخطی هندسی

به منظور صحه گذاری نوع تحلیل مورد نظر در این تحقیق از نتایج زفر[۱۴] [۷] استفاده شده است. زفر در پژوهش خود به تحلیل اجزای محدود ورق‌های کامپوزیتی تحت بار ضربه‌ای بلست[۱۵] پرداخت. وی با استفاده از اصل کار مجازی معادلات دینامیکی ورق را بدست آورده و از تئوری تغییر شکل‌های بزرگ ون کارمن جهت اعمال اثر غیرخطی هندسی استفاده نمود. از سویی دیگر، به منظوراعمال بار بلست در آن تحقیق، از معادله نمایی فریدلاندر[۱۶] به صورت زیر استفاده شده است:

$$P(t)=P_m\,(1-\frac{t}{t_p})\,e^{-\alpha\frac{t}{t_p}} \qquad (۵)$$

P_m بار ماکزیمم و برابر KN ۳۴۴۷ بوده، t_p برابر $0.1S$ و $\alpha=2$ می‌باشد. ورق دارای ابعاد m۲.۵۴×۲.۵۴ با ضخامت $0.17m$ بوده و از لایه چینی [۰/۹۰/۰] برخوردار می‌باشد. همچنین خواص مکانیکی مواد ورق به صورت زیر بوده است:
$E_1 = ۱۳۲.۴\ GPa$ ، $E_2 = ۱۰.۸\ GPa$ ،
$G_{12} = ۵.۶\ GPa$ ، $\upsilon_{12}=۰.۲۴$ ، $\rho=۱۴۴۳\ Kg/m^3$.
نتایج حاصل از صحه‌گذاری در شکل ۳ مشاهده می‌گردد. زفر در مقاله خود برای صحه‌گذاری، از تحقیق لیبرسکیو و نوثیر[۱۷] [۸] استفاده کرده است. قرار گرفتن دیاگرم جابجایی استخراج شده از نرم افزار ANSYS.10 در محدوده ای که در شکل ۳ مشاهده می‌نمایید، می‌تواند تایید خوبی برای صحه‌گذاری روش استفاده شده برای تحلیل ورق کامپوزیتی بوده و اختلاف دیاگرام‌ها را می‌توان با تفاوت روش‌های حل استفاده شده توسط افراد مختلف توجیه نمود.



شکل ۳- مقایسه نتایج تحلیل حاضر با نتایج زفر

۲-۲- پاسخ یک ورق کامپوزیتی تحت بار کوبش

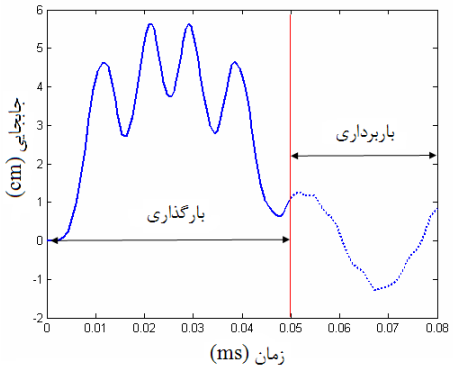
در این بخش، پاسخ یک ورق کامپوزیتی تحت بار کوبش، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. مواد مورد استفاده در ساخت ورق کامپوزیتی مورد مطالعه، با توجه به مصارف دریایی آن، از جنس E-glass/Epoxy در نظر گرفته شده است. جدول ۱، مشخصات مکانیکی این نوع مواد کامپوزیتی را که از مرجع [۹] استخراج شده‌اند، ارائه می‌دهد.

جدول ۱- خواص مواد کامپوزیتی E-glass/Epoxy

مشخصات هندسی ورق	
لایه چینی	[۰/۹۰/۰/۹۰]
طول $[m]$	۱
عرض $[m]$	۱
ضخامت $[mm]$	۸
خواص مکانیکی ورق	
مدول الاستیسیته طولی $[GPa]$	۴۴
مدول الاستیسیته عرضی $[GPa]$	۱۰.۵
مدول الاستیسیته برشی $[GPa]$	۵.۶
ضریب پوآسون	۰.۲۴
دانسیته [Kg/m3]	۱۴۴۳

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.3.3]

فشار کوبش از دیدگاه مکانی به صورت گسترده یکنواخت و از دیدگاه زمانی به صورت یک پالس مثلثی مدل شده است. برای تعیین دقیق میزان بار، باید دو پارامتر مقدار ماکزیمم بار وارده و مدت زمانی اعمال بار را تعیین کرد که مقادیر این دو پارامتر به صورت KPa P_{max} = ۱۰۰ ، ms ۵۰ =T در نظر گرفته شده است. در ضمن باید اشاره کرد که ورق در امتداد چهار لبه خود دارای تکیه گاه های ساده[۱۸] می‌باشد. پاسخ جابجایی ورق کامپوزیتی با ویژگی ها و نحوه بارگذاری بیان شده، در شکل ۴ آورده شده است.



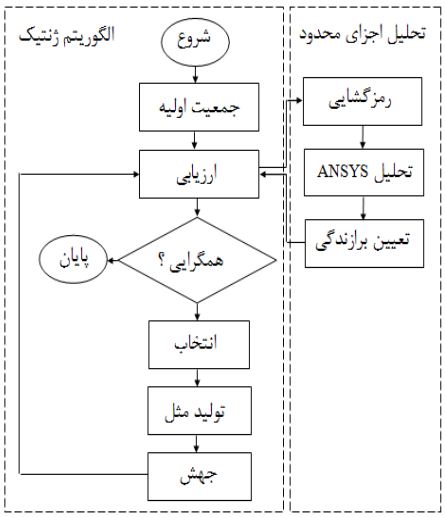
شکل ٤- پاسخ ورق کامپوزیتی تحت بار کوبش

همان طور که مشاهده می‌شود جابجایی بیشینه ورق که در وسط آن اتفاق می‌افتد برابر cm ۵.۶ می باشد که این جابجایی در زمانی معادل نصف زمان بارگذاری رخ می‌دهد. برای آشنایی با رفتار ورق بعد از حذف بار کوبش دیاگرام جابجایی تا زمان ms ۸۰ رسم شده است.

۳- روند بهینه سازی

در این تحقیق، از روش الگوریتم ژنتیک ساده[۱۹] جهت انجام فرآیند بهینه‌سازی ترتیب لایه چینی ورق‌های کامپوزیتی استفاده شده است. به این منظور، جمعیتی تصادفی از متغیرهای لایه چینی به صورت رشته های دودویی کد شده به الگوریتم وارد شده و با اعمال یک سری عملیات که توسط عملگرهای این الگوریتم انجام می‌پذیرند، جواب بهینه مسئله به عنوان خروجی ارائه می‌گردد. اما یکی از اعمالی که در فرآیند بهینه سازی مورد نیاز می‌باشد، تعیین شایستگی هر پاسخ نسبت به معیار بهینه‌سازی است. به عبارتی دیگر باید تعیین کرد که هر یک از پاسخ‌ها به چه میزان به جواب بهینه نزدیک‌تر است. در بهینه سازی‌هایی که هدف کمینه کردن وزن و هزینه باشد، می‌توان یک رابطه تحلیلی جهت تعیین شایستگی پاسخ‌ها ارائه نمود. همچنین در برخی از موارد نمی‌توان از روابط تحلیلی برای تعیین شایستگی پاسخ‌ها استفاده کرد. در اینگونه موارد از روش‌های عددی برای این کار بهره‌گیری به عمل می‌آید. بطور مثال، در مراجع [۱۰] و [۱۱] از تلفیق الگوریتم ژنتیک و روش اجزای محدود در بهینه‌سازی ورق‌های کامپوزیتی استفاده شده است.

هدف از انجام بهینه سازی لایه چینی در این مقاله، کمینه کردن جابجایی وسط ورق کامپوزیتی تحت بار ضربه ای کوبش می‌باشد. بدین منظور واضح و مبرهن است که نمی‌توان برای ارزیابی شایستگی پاسخ‌ها از روابطی تحلیلی استفاده نمود و به ناچار می‌بایست از روش‌های عددی پیشرفته بهره جست. به همین منظور در محیط نرم‌افزار MATLAB، یک برنامه یا کد الگوریتم ژنتیک نوشته شد. شکل ۵، فلوچارت فرآیند بهینه‌سازی بکار گرفته شده در این تحقیق را نمایش می‌دهد.



شکل ۵ - روند الگوریتم ژنتیک بکار رفته در این تحقیق

دو بخش اصلی در فرآیند بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. بخش اول مرتبط با الگوریتم ژنتیک می‌باشد که در آن، جمعیت اولیه به صورت رشته‌های تصادفی دودویی وارد می‌شوند. کد تهیه شده با قابلیت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.3.3]

تغییر در تعداد کروموزوم‌های جمعیت اولیه می‌تواند با توجه به گستردگی فضای جستجو، تعداد کروموزوم های جمعیت اولیه را در حالات مختلف تغییر دهد. معیار همگرایی اعمال شده در این الگوریتم که همان شرط پایان الگوریتم نیز می‌باشد، رسیدن تعداد نسل های الگوریتم به یک مقدار خاص می باشد که این شرط نیز با توجه به گستردگی فضای جستجو قابل تغییر بوده است. در اعمال عملگر انتخاب از روش چرخ گردان[20] استفاده شده است. برای کد نوشته شده این قابلیت در نظر گرفته شده تا بتواند از دو روش مختلف تولید مثل استفاده نماید. در حالاتی که طول کروموزوم ها نسبتا کوتاه باشد از روش تقاطع تک نقطه ای[21] جهت اعمال عملگر تولید مثل استفاده می‌شود و برای حالاتی که در آنها طول کروموزموم‌ها بلندتر است، روش تقاطع سه نقطه ای[22] اعمال خواهد شد. امّا بخش دوم الگوریتم، بخش مربوط به استفاده از روش اجزای محدود جهت تعیین برازندگی کروموزوم‌های جمعیت هر یک از نسل‌های الگوریتم می‌باشد. در این قسمت جهت انجام تحلیل به روش اجزای محدود از نرم‌افزار ANSYS.10 استفاده شده است. به این منظور، عمل تعیین برازندگی به سه بخش اساسی تقسیم شده است. در ابتدای امر باید کروموزوم‌های کد شده رمز گشایی[23] شده تا اینکه تعیین شود هر یک از کروموزوم ها چه ترتیب لایه چینی را نشان می دهد. سپس باید تحلیل اجزای محدود برای آن لایه چینی خاص انجام پذیرد که بدین منظور از کوپل یا ترکیب دو نرم‌افزار با یکدیگر استفاده می‌گردد. نهایتا باید میزان برازندگی هر یک از کروموزوم ها را تعیین نمود. هدف این تحقیق کمینه کردن مقدار جابجایی مرکز ورق است. از اینرو هر زاویه لایه چینی که مقدار جابجایی کمتری داشته، باید مقدار برازندگی بیشتری داشته باشد. برای تعیین برازندگی هر یک از کروموزوم ها از رابطه زیر استفاده شده است:

$$Fitness\ value^{(ch)} = C - Disp.^{(ch)} \qquad (۶)$$

در این رابطه $Disp.$ مقدار جابجایی مرکز ورق می‌باشد که از خروجی نرم‌افزار ANSYS.10 بدست می‌آید و بالانویس (ch) نشان می‌دهد که این مقدار برای هر کروموزوم متفاوت است و C بیانگر یک عدد ثابت است که برای هر بار استفاده از الگوریتم جهت بهینه‌سازی ثابت خواهد ماند. به عبارتی دیگر، به ازای تمامی کروموزوم‌ها در همه نسل‌ها مقدار C ثابت می‌ماند. با توجه به مطالب بیان شده، جهت اعمال عملگر انتخاب و برای استفاده از میزان تابع برازندگی برای کروموزوم‌ها از مقادیر بدست آمده از رابطه بالا استفاده شده است. اما برای نمایش چگونگی بهبود برازندگی ها طی نسل‌های مختلف، از مقادیر جابجایی‌های مرکز پانل به عنوان برازندگی استفاده شده تا روند کمینه شدن جابجایی مرکز پانل بهتر به نمایش گذارده شود.

۴- نتایج

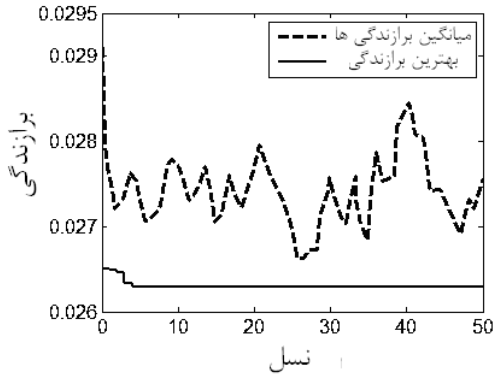
جهت قضاوت در خصوص نتایج خروجی و چگونگی دست‌یابی به یک الگوی بهینه ترتیب لایه چینی برای مقابله با فشارهای ضربه ای، برخی حالات مورد بررسی قرار گرفت. حالات بررسی شده مشتمل بر ترتیب‌های متقارن یا نامتقارن لایه چینی بوده و تعداد لایه‌ها نیز در آنها متفاوت می‌باشد. در هر یک از حالات نیز، تاثیر ابعاد ورق مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا بهینه‌سازی ورق‌های با لایه چینی متقارن و سپس ورق‌های با لایه چینی نامتقارن مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۴-۱- بهینه‌سازی ورق چهار لایه

در بهینه‌سازی ورق چهار لایه متقارن، ترتیب لایه چینیبه صورت $[\alpha/\beta/\beta/\alpha]$ فرض شده و فرآیند بهینه‌سازی برای سه حالت مختلف ورق با ابعاد m ۱×۰.۵ ،m ۱×۱ و m ۱×۱.۵ صورت پذیرفته است. مسئله مهم در اینجا چگونگی تعیین پارامترهای الگوریتم ژنتیک می‌باشد. به جهت اطمینان از عدم مواجهه با نقطه‌های بهینه محلی، در ابتدای کار جمعیت‌های اولیه ای با تعداد ۱۲ کروموزوم در نظر گرفته شده و همچنین طی فرایند الگوریتم ژنتیک، ۵۰ نسل از جمعیت تولید می‌شود. بدین منظور از روش

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.3.3]

تقاطع تک نقطه ای جهت اعمال عملگر تولید مثل استفاده شده، نرخ جهش برابر ۰/۱ و نرخ تولید مثل برابر ۰/۸ در نظر گرفته می شوند. روند چگونگی پیشرفت برازندگی کروموزوم ها در طی نسل‌های مختلف برای یک ورق با ابعاد m ۱×۰.۵ در شکل ۶ نشان داده شده است. بر اساس این شکل به وضوح مشخص می‌شود که با تعیین دامنه نسبتا بزرگی از نسل‌های الگوریتم، اطمینان حاصل خواهد شد که دسترسی به نقطه‌های بهینه کلی از فضاهای جستجو مهیا خواهد گردید، گرچه این امر زمان انجام فرآیند بهینه سازی را تا حد زیادی افزایش می‌دهد.



شکل ٦- روند پیشرفت برازندگی کروموزوم‌ها در یک ورق چهار لایه متقارن با ابعاد m ۱×۰.۵

جدول ۲- مقایسه ترتیب بهینه لایه چینی برای ورق چهار لایه متقارن با ابعاد مختلف

جابجایی مرکز ورق [m]	لایه چینی بهینه	ابعاد ورق
۰.۰۲۵۵۶	[−۴۵/۲۰/۲۰/−۴۵] [۴۵/−۲۰/−۲۰/۴۵]	۱×۰.۵ m
۰.۰۴۳۷۰	[۴۵/−۴۵/−۴۵/۴۵] [−۴۵/۴۵/۴۵/−۴۵]	1×1 m
۰.۰۶۲۳۵۶	[−۴۵/۶۰/۶۰/−۴۵] [۴۵/−۶۰/−۶۰/۴۵]	۱×۱.۵ m

جدول ۳- مقایسه ترتیب بهینه لایه چینی برای ورق چهار لایه نامتقارن

جابجایی مرکز ورق [m]	لایه چینی بهینه	ابعاد ورق
۰.۰۲۵۲۶	[−۸۰/۴۵/−۱۰/۹۰] [۸۰/−۴۵/۱۰/−۹۰]	۱×۰.۵ m
۰.۰۴۳۳۷۳	[−۴۵/۴۵/−۴۵/۴۵] [۴۵/−۴۵/۴۵/−۴۵]	۱×۱ m
۰.۰۶۱۴۵۵	[−۴۵/۴۵/۶۰/−۶۰] [۴۵/−۴۵/−۶۰/۶۰]	۱×۱.۵ m

در جدول ۲ نتایج حاصل از اجرای فرایند تشریح شده بهینه‌سازی در خصوص ترتیب لایه چینی برای ورق چهار لایه متقارن با ابعاد مختلف ارائه شده است. با توجه به این نتایج مشاهده می‌شود که برای هر سه اندازه مختلف ورق، دو زاویه لایه چینی بهینه یافت شده که مقدار جابجایی مرکز ورق در آن ها دقیقا مشابه یکدیگر است. از سویی دیگر مشاهده می‌شود که در هر دو ترتیب بهینه برای هر یک از اندازه‌های ورق، زوایا دارای مقادیری برابر اما قرینه یکدیگر در هر لایه می‌باشند. اما مسئله مهم دیگری که می‌توان به آن اشاره کرد، زوایای لایه چینی در دو ترتیب [۴۵/−۴۵/−۴۵/۴۵] و [−۴۵/۴۵/۴۵/−۴۵] برای ورق با نسبت ابعادی یک می‌باشد. در این حالت به دلیل آنکه تمامی شرایط حاکم بر مسئله از جمله نوع بارگذاری، هندسه و شرایط مرزی متقارن می‌باشند، یک زاویه لایه چینی متوازن[۲۴] حاصل آمده و این خود حاکی از آنست که الگوریتم به کار رفته در این تحقیق به درستی کار بهینه‌سازی را انجام داده و می‌تواند بر کل فرآیند بهینه‌سازی اتخاذ شده در این تحقیق صحه گذارد.

پس از انجام بهینه‌سازی ورق چهار لایه متقارن، برای پی بردن به میزان تاثیر تقارن در لایه چینی بر روی زوایای بهینه، بهینه‌سازی ورق چهار لایه نامتقارن با زوایای لایه چینی $[\alpha/\beta/\gamma/\lambda]$ مورد مطالعه قرار گرفت. در این حالت پر واضح است که فضای جستجو بزرگتر خواهد شد. به همین منظور از تقاطع سه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.3.3]

نقطه‌ای جهت اعمال عملگر تولید مثل استفاده نموده، تعداد نسل‌های تولید شده در الگوریتم به ۴۰ عدد ارتقاء داده شده و همچنین تعداد کروموزوم‌ها در جمعیت اولیه از ۱۲ به ۲۰ افزایش داده می‌شوند. در جدول ۳ زوایای بهینه بدست آمده و همچنین مقادیر متناظر جابجایی مرکز ورق، برای یک ورق چهار لایه نامتقارن ارائه شده است.

در این حالت نیز همچون حالت قبل، برای هر اندازه از ورق مورد مطالعه، دو ترتیب بهینه بدست می آید. در هر دو ترتیب برای هر لایه، مقادیر جابجایی مرکز ورق با یکدیگر برابر و همچنین زوایای لایه چینی با یکدیگر مساوی اما قرینه می باشند. با مقایسه نتایج مندرج در جداول ۲ و ۳ مشاهده می شود که در یک ورق با لایه چینی نامتقارن، مقدار جابجایی چیزی حدود یک میلی متر نسبت به همان ورق منتها با لایه چینی متقارن کاهش می یابد. در واقع به ازای طراحی نامتقارن لایه چینی ورق می توان مقدار جابجایی مرکز ورق را به اندازه یک میلی متر کاهش داد.

جدول ٤- مقایسه ترتیب بهینه لایه چینی برای ورق شش لایه متقارن

جابجایی مرکز ورق [m]	لایه چینی بهینه	ابعاد ورق
۰.۰۲۵۳۲	[−۸۰/۴۵/−۱۰/−۱۰/۴۵/−۸۰] [۸۰/−۴۵/۱۰/۱۰/−۴۵/۸۰]	۱×۰.۵ m
۰.۰۴۳۴۲	[۴۵/−۴۵/−۴۵/−۴۵/−۴۵/۴۵] [−۴۵/۴۵/۴۵/۴۵/۴۵/−۴۵]	۱×۱ m
۰.۰۶۲۰	[−۴۵/۶۰/۶۰/۶۰/۶۰/−۴۵] [۴۵/−۶۰/−۶۰/−۶۰/−۶۰/۴۵]	۱×۱.۵ m

۴-۲- بهینه سازی ورق شش لایه

در این بخش ابتدا ورق‌های متقارن مورد بررسی قرار می‌گیرد. بهینه سازی ورق کامپوزیتی شش لایه با ترتیب لایه چینی $[\alpha/\beta/\gamma/\gamma/\beta/\alpha]$ در سه اندازه مختلف ورق با ابعاد m ۱×۰.۵، m ۱×۱ و m ۱×۱.۵ انجام شده است. از تعداد ۳۰ نسل ۱۶ کروموزومی بدین منظور بهره‌گیری به عمل آمد. برای این حالت از روش تقاطع سه نقطه‌ای جهت اعمال عملگر تولید مثل استفاده شده، نرخ جهش برابر ۰/۱ و نرخ تولید مثل نیز برابر ۰/۸ در نظر گرفته شدند. لایه چینی‌های بهینه برای ورق شش لایه متقارن با اندازه‌های گوناگون در جدول ۴ آورده شده است.

مقایسه نتایج مندرج در جدول ۴ برای ورق شش لایه متقارن و نتایج ارائه شده در جدول ۲ برای ورق چهار لایه متقارن نشان می‌دهد که ترتیب‌های بهینه لایه چینی برای ورق با ابعاد m ۱×۱ و m ۱×۱.۵ شباهت زیادی با یکدیگر دارند. برای ابعاد مذکور در حالت ورق شش لایه متقارن، دو لایه پنجم و ششم از زاویه هایی مشابه با دو لایه سوم و چهارم در حالت ورق چهار لایه متقارن با همان ابعاد برخوردارند. از سویی دیگر با تغییرات بوجود آمده در لایه چینی و یا به عبارتی دیگر با افزایش تعداد لایه ها از ۴ به ۶، از میزان جابجایی ورق به اندازه ۰/۳ میلیمتر کاسته شده است.

جدول ٥- مقایسه ترتیب بهینه لایه چینی برای ورق شش لایه نامتقارن

جابجایی مرکز ورق [m]	لایه چینی بهینه	ابعاد ورق
0.02493	[−۸۰/۴۵/−۳۰/۱۰/۰/−۸۰] [۷۰/−۴۵/۳۰/−۱۰/۰/۸۰]	۱×۰.۵ m
0.04322	[−۴۵/۴۵/۴۵/−۴۵/−۴۵/۴۵] [۴۵/−۴۵/−۴۵/۴۵/۴۵/−۴۵]	۱×۱ m
0.06082	[−۴۵/۴۵/۶۰/−۶۰/−۶۰/۶۰] [۴۵/−۴۵/−۶۰/۶۰/۶۰/−۶۰]	۱×۱.۵ m

اینک بهینه سازی ورق با لایه چینی نامتقارن مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، لایه چینی ورق به صورت $[\alpha/\beta/\gamma/\lambda/\eta/\zeta]$ در نظر شده است. در این حالت فضای جستجو بزرگترین وسعت ممکنه را دارا بوده و از وسعتی حدودا دو برابر فضای جستجو در حالت قبل برخوردار می‌باشد. به همین منظور از روش تقاطع سه نقطه ای برای اعمال عملگر تولید مثل

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.3.3]

استفاده شده است. جمعیت اولیه دارای ۳۰ کروموزوم بوده و عملیات بهینه‌سازی به ازای ۵۰ نسل تکرار شده است. نرخ جهش برابر ۰/۱۵ و نرخ تولید مثل برابر ۰/۹ در نظر گرفته شده است. در جدول ۵ نتایج حاصله در خصوص ترتیب بهینه لایه چینی برای ابعاد مختلف ورق مشاهده می‌شود.

با توجه به جداول ۳ و ۵ مشاهده می‌شود که در حالت شش لایه نامتقارن نیز همانند حالت چهار لایه نامتقارن ، ورق از لایه چینی بهینه $[\alpha/-\alpha/-\beta/\beta/\gamma/-\gamma]$ پیروی می‌کند. بنابراین می‌توان یک پیشنهاد کلی در طراحی ورق های کامپوزیتی ارائه داد. اگر در طراحی ورق‌های کامپوزیتی هدف تنها مقابله با بارهای ضربه ای باشد، می‌توان از لایه چینی $[\alpha/-\alpha/-\beta/\beta/\gamma/-\gamma]$ استفاده نمود. اما از آن جایی که در طراحی ورق‌های کامپوزیتی دریایی فاکتورهای بسیار متنوعی دخیل می‌باشند، نمی توان تنها تاثیر بارهای ضربه‌ای را در طراحی مدنظر قرار داد و بایستی کلیه پارامترهای طراحی مورد بررسی قرار گیرند. اما واضح است که لایه چینی نامتقارن در ورق‌های کامپوزیتی باعث می شود که آن ها در اثر بارهای محوری، تغییرشکل خمشی و یا پیچشی از خود نشان دهند و این امر به خاطر صفر نبودن ماتریس کوپلینگ آن ها می‌باشد. در واقع این پدیده سبب می‌شود که لایه چینی نامتقارن چندان برای طراحان مطلوب نباشد. همچنین با مقایسه نتایج مندرج در جداول ۴ و ۵ مشاهده می‌شود که میزان جابجایی مرکز ورق در حالت لایه چینی نامتقارن نسبت به حالت لایه چینی متقارن حدود ۰/۲ الی ۰/۵ میلی متر کاهش یافته که این مقدار کاهش چندان قابل توجه نبوده و نمی‌تواند طراحان را مجاب نماید تا از لایه چینی نامتقارن استفاده کنند. اما مسئله دیگر پیروی نکردن ورق با ابعاد $1\times0.5m$ از الگوی $[\alpha/-\alpha/-\beta/\beta/\gamma/-\gamma]$ می‌باشد. برای این حالت می‌توان گفت که با کاهش ابعاد ورق و نیز ثابت ماندن ضخامت، ورق به سمت ضخیم شدن پیش می‌رود. از سویی دیگر، به دلیل استفاده از تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول در تحلیل‌ها، اینگونه نتایج ممکن است حاصل آمده باشند. بنابراین می‌توان گفت که با کاهش ابعاد ورق به یک میزان خاص، دیگر ورق از الگوی لایه چینی بهینه پیروی نمی‌کند. این امر نشان می دهد که استفاده از الگوی لایه چینی بهینه ارائه شده دارای محدودیت ابعادی می باشد. در واقع باید بیان نمود که این الگو برای ورق‌های با نسبت ابعادی مشخص می‌تواند توصیه شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تحقیقی جهت بهینه‌سازی لایه چینی ورق‌های کامپوزیتی جهت مقابله با بارهای ضربه‌ای صورت گرفت که در آن فشار کوبش از دیدگاه مکانی به صورت گسترده یکنواخت و از دیدگاه زمانی به صورت یک پالس مثلثی مدل گردید. جهت انجام تحلیل ضربه ای ورق‌های کامپوزیتی از روش اجزای محدود و جهت انجام فرآیند بهینه سازی نیز از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شد. بهینه سازی ورق چهار لایه متقارن برای سه ابعاد مختلف پذیرفت. برای ورق با ابعاد $1\times1m$ لایه چینی متقارن $[45/-45/-45/-45]$ حاصل شد. این امر نشان دهنده صحت فرآیند بهینه سازی می باشد. به طور کلی می‌توان گفت در حالات نامتقارن که هیچ گونه محدودیتی بر روی گزینش لایه چینی بهینه اعمال نشده است، لایه چینی بهینه از الگوی $[\alpha/-\alpha/-\beta/\beta/\gamma/-\gamma]$ پیروی می‌نماید. البته عدم پیروی ورق $1\times0.5m$ از این الگو نشان دهنده وجود محدودیت ابعادی در استفاده از این الگو می‌باشد. با توجه به بهینه‌سازی‌های انجام شده، نشان داده شده که استفاده از حالت لایه چینی متقارن چیزی حدود ۰/۲ الی ۰/۵ میلی متر میزان جابجایی ورق را کاهش می‌دهد. اما استفاده از لایه چینی نامتقارن با توجه به محدودیت هایی که ایجاد می‌کند چندان مورد توجه طراحان نبوده و این میزان اختلاف اندک جابجایی بین حالت متقارن و نامتقارن نمی‌تواند طراحان را به استفاده از لایه چینی نامتقارن مجاب نماید.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.3.3]

کلید واژگان

1-Von Karman
2-Wagner
3-Qin & Batra
4-Holland .J
5-Callahan
6-Rahul et al
7-Yong et al
8-Low Velocity Impact & High Velocity Impact
9-First-order Shear Deformation Theory (FSDT)
10-Geometrically non-linear Transient Analysis
11-Newton-raphson method
12-Out-Of-Balance load vector
13-Newmark method
14-Zafer
15-Blast
16-Friedlander Exponential Decay Equation
17-Librescu & Nosier
18-Simply Support
19-Simple Genetic Algorithm
20-Roulette Wheel Method
21-Single point Crossover
22-Three point Crossover
23-Decoding
24-Balanced Lay-up

۶- مراجع

1-Stenius, I., Rosen, A.,(2007), FE-Modeling of Hydrodynamic Hull-Water impact Loads, 6th European LS-DYNA user's conference, Gothenburg, Sweden.
2-Qin, Z., Batra, R. C.,(2009), Local slamming impact of sandwich composite hulls, International Journal of Solids and Structures, Vol. 46, P. 2011-2035.
3-Haftka, R.T.,(1998) Mechanics of Composite Materials and Structures, Edition By Carlos A.Mota.
4-Rahul, Chakraborty, D., Dutta, A.,(2005), Optimization of FRP composites against impact induced failure using island model parallel genetic algorithm, Composites Science and Technology, Vol. 65, pp. 2003-2013.
5-Yong, M., Falzon, B. G., Iannucci, M., (2008), on the application of genetic algorithms for optimising composites against impact loading, International Journal of Impact Engineering, , Vol. 35, pp. 1293-1302.
6-Bathe, K. j.,(2002). Finite Element Procedures . Prentice-Hall Inc. Sixth Printed, (ISBN-81-203-1075-6)
7-Zafer Kazanc, Zahit Mecitoglu.(2008), Nonlinear dynamic behavior of simply supported laminated composite plates subjected to blast load , J. of Sound and vibration, vol.317, pages 883-897.
8-Librescu, L., Nosier, A.,(1990), Response of laminated composite flat panels to sonic boom and explosive blast loadings, AIAA Journal 28, pages 345-352.
9-Aslan, Z., Karakuzu, R., Okutan, B.,(2003), the response of laminated composite plates under low-velocity impact loading, Composite Structures, Vol. 59, pp. 119-127.
10-Muc, A., Gurba, W.,(2001), Genetic algorithms and finite element analysis in optimization of composite structures, Composite Structures, Vol. 54, pp. 275-281.
11-Almeida, F. S., Awruch, A. M., (2009), Design optimization of composite laminated structures using genetic algorithms and finite element analysis, Composite Structures, , Vol. 88, pp. 443-454.
12-Parga-Land, B., Vlegels, S., Hernandez-Olivares, F., and Clark, S. D.,(1999), an analytical study of the effect of slamming pressures on the interlaminar behavior of composite panels, Composite Structures, Vol.46, pp.357-365.
13-Altenbach, H., Altenbach, J., and Kissing, W.,(2004), Mechanics of Composite Structural Elements, Springer.
14-Randy L. Haupt, Sue Ellen Haupt, (2004), Practical Genetic Algorithms, second edition , A John Wiley & Sons, INC. Publication
15-Reddy, JN.,(2004), Mechanics of laminated composite plates and shells-Theory and analysis, CRC Press.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.3.3]