



طراحی بهینه پنل تقویت شده فشاری تحت قید کمانش با استفاده از مدل جایگزین گوسی

مرتضی دزیانی^۱, حسین دلایلی^{۲*}, شهرام یوسفی^۳, حمید فرخ فال^۴

- ۱- دانشجوی دکتری، سازه‌های هوایی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر
 - ۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر
 - ۳- دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر
 - ۴- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر
- *شاهین شهر، صندوق پستی 83145/115

چکیده

در این مقاله با استفاده از نتایج روش طراحی تقریبی شناسه سازه به عنوان گام اولیه، فرایند طراحی بهینه پنل تقویت شده فشاری با استفاده از مدل جایگزین گوسی ایجاد شده است. مدل سازی با استفاده از پاسخ‌های حاصل از تحلیل‌های غیرخطی کمانش اجزاء محدود صورت گرفته است. از مدل جایگزین برای کاهش تعداد تحلیل‌های اجزاء محدود و کاهش زمان طراحی استفاده شده است. با به کارگیری نقاط پرکننده در طول فرایند بهینه‌سازی، همگرایی به بهینه محلی تضمین شده است. از دو مسئله آزمایشی برای به تصویر کشیدن راهبرد روش مدل جایگزین، بررسی حساسیت طرح نمونه‌برداری اولیه و انتخاب گام نهایی مناسب استفاده شده است. همچنین شرط همگرایی مرسمون در روش مدل جایگزین اصلاح گردید تا ضمن تسریع در همگرایی کیفیت پاسخ نیز کاهش نیابد. با معرفی یک تکنیک کارآمد، یافتن بهینه فرآیند مدل جایگزین در هر بار تکرار تضمین گردیده است. فرایند طراحی بهینه برای دو نوع پنل تقویت شده طراحی ارائه گردیده است. در پنل تقویت شده نوع الف با تعداد چهار متغیر طراحی، فرایند پس از اضافه شدن 5 نقطه پرکننده به طرح نمونه برداری اولیه با 55 نقطه همگرا شده است. همچنین در پنل تقویت شده نوع ب با شش متغیر طراحی طرح نمونه برداری اولیه با 57 نقطه ایجاد گردیده و فرایند بهینه‌سازی پس از اضافه کردن 173 نقطه پرکننده متوقف شده است. نتایج حاصل با یافته‌های روش تحلیلی شناسه سازه مقایسه شده‌اند. در پایان با نتیجه‌گیری در مورد نسبت‌های هندسی سازه بهینه، راهبردی برای میل به سمت بهینه فرآیند تابع اصلی معرفی شده است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل	1395 فروردین 03
پذیرش: 12 اردیبهشت 1395	ارائه در سایت: 31 خرداد 1395
کلید واژگان:	

پنل تقویت شده فشاری
بهینه‌سازی
مدل جایگزین
کمانش غیرخطی
مدل گوسی

Optimum design of compression stiffened panel under buckling constraint using Gaussian surrogate model

Morteza Dezyani, Hossein Dalayeli*, Shahram Yousefi, Hamid Farrokhfal

Faculty of Mechanic Aerospace, MalekAshtar University of Technology, Shahinshahr, Iran
*P.O.B. 83145/115, Shahinshahr, Iran, hdalayeli@mut-es.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 22 March 2016
Accepted 01 May 2016
Available Online 20 June 2016

Keywords:
Compression stiffened panel
Optimization
Surrogate model
Nonlinear buckling
Gaussian model

ABSTRACT

In the present paper, from the results of an approximation method named structural index that was used as the first step, the process of design and optimization of stiffened panel with Gaussian type surrogate model are carried out. Modeling phase is based on the finite element analyses of the structure. Nonlinear buckling load is set as the design constraint. The surrogate model is employed to reduce the number of finite element analyses in the optimization process. Therefore time of design process is reduced. Using infill points in the modeling and optimization process, convergence to local optima is ensured. Introducing a novel technique, finding the global optimum of the surrogate model is guaranteed. The approach of surrogate based optimization is illustrated using two test problems. Also, the sensitivity of the response to the initial sampling plan is investigated. Convergence criteria usually used in surrogate based optimization is modified to speed the convergence but does not affect the quality of the response. Design optimization process is presented for two types of stiffened panels. In type 1 stiffened panel with 4 design variables, the initial training set is constructed using 55 points. The response is obtained after addition of 5 infill points. For type 2, the initial sampling plan is selected to be 58 points. The optimization process is stopped after adding 173 infill points. Finally, obtained results are compared with the results of structural index method and an approach toward global optimum of the compression stiffened panel is introduced with the characteristics of optimum structure.

۱- مقدمه

پنل تقویت شده فشاری عبارت است از یک پوسته که توسط یک تقویت فشاری است. این پیکربندی کلی سازه‌ای را می‌توان در بسیاری از سازه‌های مهندسی مانند سازه‌های هوافضایی در بال و بدن هواپیما و در بدنه کشتی در

Please cite this article using:

M. Dezyani, H. Dalayeli, Sh. Yousefi, H. Farrokhfal, Optimum design of compression stiffened panel under buckling constraint using Gaussian surrogate model , *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 205-216, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

چندجمله‌ای درجه دوم با 21 ضریب به عنوان مدل جایگزین برای مدل سازی نیروی کمانش استفاده شده است. نیمی از نقاط طرح نمونه‌برداری برای ساختن مدل جایگزین و نیمی دیگر برای اعتبارسنجی و اصلاح مدل جایگزین استفاده شده است. خطای بین مدل جایگزین وتابع دقیق در نقاط مهم طراحی 4.7% گزارش شده است [9].

طراحی اولیه پنل‌های تقویت شده برای مخزن پیشران یک وسیله حمل و نقل فضایی بازگشت‌پذیر³ با استفاده از مدل جایگزین و نرم‌افزار تحلیل پاندا⁴ در مرجع [10] گزارش شده است. تخمینی از تعداد تحلیل‌های لازم برای مطالعه روند طراحی بهمنه پنل تقویت شده مخزن سوخت 84700 تحلیل می‌باشد که لزوم استفاده از مدل جایگزین را نشان می‌دهد. در این تحقیق بررسی دقت پاسخ از طریق مقایسه با مدل اجزاء محدود صورت پذیرفته است. راهبرد بهینه‌سازی فرآگیر در نرم‌افزار پاندا² شروع چند باره و تصادفی جستجوی خطی برای یافتن بهینه فرآگیر می‌باشد که می‌تواند لزوماً به بهینه فرآگیر همگرا نشود.

مقایسه روش‌های مختلف بهینه‌سازی شامل برنامه‌بریزی محاسباتی⁵، بهینه‌سازی فاقد مشتق، مدل جایگزین، مدل جایگزین پایه⁶ و الگوریتم ژنتیک برای طراحی پنل تقویت شده هوپیما در مرجع [11] مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق نیز از روش اجزاء محدود به عنوان ابزار تحلیل استفاده شده است. بار کمانش حاصل از مقادیر ویژه و استحکام نهایی به عنوان قید در فرایند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مدل سازی با استفاده از روش شبکه‌های عصبی صورت گرفته است و از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده شده است. در این حالت از روش ابر مکعب لاتینی برای ایجاد نقاط داده اولیه استفاده شده است. تعداد تحلیل‌های سازه‌ای صورت گرفته 255 تحلیل اجزاء محدود گزارش شده است. تعداد تحلیل‌های سازه‌ای روش الگوریتم ژنتیک 1955 تحلیل اجزاء محدود است. مهم‌ترین نتایج نهایی این تحقیق به این صورت گزارش شده است: الف- از لحاظ هزینه محاسباتی روش مدل جایگزین به مترین تعداد تحلیل سازه‌ای نیاز دارد و روش الگوریتم ژنتیک نیازمند بیشترین تعداد تحلیل سازه‌ای می‌باشد ب- اولین گام برای بهبود روش مدل جایگزین استفاده همزمان از مدل جایگزین به عنوان یک تابع تقریبی و عبارات تحلیلی ساده مانند نسبت منظری مجاز اجزاء می‌باشد. در این تحقیق نتایج کمی محترمانه تلقی شده و نحوه انتخاب حدود فضای طراحی نیز گزارش نشده است.

1-1- چارچوب و اهداف تحقیق

در این مقاله ابتدا چارچوب اصلی بهینه‌سازی به روش مدل جایگزین به صورت خلاصه و با ذکر نکات کلیدی خواهد آمد. سپس برای نشان دادن روش اجرا، نمونه‌ای برای یافتن بهینه فرآگیر یک تابع تحلیلی به صورت تصویری ارائه می‌گردد. نقصی که در اغلب تحقیقات مورد بررسی وجود دارد ارائه یک روش مدون و مطمئن برای یافتن بهینه فرآگیر مدل جایگزین است. در این بخش یک تکنیک نوآورانه برای یافتن بهینه فرآگیر مدل جایگزین ارائه می‌گردد. دو مین گام ارزیابی روش مدل جایگزین قبل از اعمال آن به مسئله اصلی، نشان دادن کارایی این روش برای یافتن طراحی بهینه پنل تقویت شده با روش شناسه سازه است. در این بخش نیز پاسخ بهینه مسئله سازه‌ای مشخص است.

حالی که تحت بارگذاری غالب محوری فشاری قرار دارند یافت. رفتار پنل تقویت شده تحت بار فشاری را می‌توان با استفاده از یک معادله دیفرانسیل مرتبه چهار مورد بررسی قرار داد [1] که البته این روش کاربردی در فرایندهای طراحی عملی ندارد. روش مرسوم برای طراحی ابعادی و تحلیل اولیه این نوع سازه استفاده از روابط تقریبی برای پیش‌بینی بار بحرانی کمانش آن می‌باشد. این روش که در طراحی سازه‌های هوایی مرسوم است، با استفاده از نمودارها و روابط تحلیلی- تجربی و در یک فرایند چرخه‌ای، بار بحرانی سازه را به بار طراحی نزدیک کرده و با تقریبی قابل قبول طراحی اولیه پنل تقویت شده فشاری را در اختیار می‌گذارد [4-2]. با توجه به اهمیت موضوع پایداری در این نوع سازه‌ها، قیدهای طراحی شامل کمانش کلی، محلی و کریپلینگ مقطع تقویت کننده می‌باشد. یکی دیگر از روش‌های تقریبی برای طراحی اولیه پنل تقویت شده فشاری استفاده از مفهوم شناسه سازه در فرایند طراحی است. در این روش با ترکیب هوشمندانه قیود طراحی و به کارگیری تقریب‌هایی قابل قبول، طراحی ابعادی پنل تقویت شده در یک گام با توجه به مقدار شناسه سازه و خصوصیات مواد به دست می‌آید [5]. در روش‌های عددی بهینه‌سازی نیاز به یک نقطه آغازین برای شروع فرایند بهینه‌سازی را می‌توان از طریق پاسخ این روش‌های طراحی اولیه مرتفع کرد.

اعتبارسنجی و ارزیابی طراحی اولیه با استفاده از آزمون‌های تجربی و یا روش اجزاء محدود اجتناب ناپذیر است. به این منظور اگر بتوان طراحی اولیه را با به کارگیری تحلیل‌های اجزاء محدود به انجام رساند، نتیجه طراحی یک گام به فاز طراحی نهایی نزدیکتر خواهد بود. یکی از دلایل محدودیت به کارگیری مستقیم تحلیل‌های اجزاء محدود در فرایند طراحی بهینه، مشکل بودن انتخاب شبکه مناسب و هزینه محاسباتی بالای آن است. حتی با کوچک در نظر گرفتن هزینه محاسباتی یک تحلیل منفرد، دستیابی به یک طرح بهینه با استفاده از تحلیل‌های اجزاء محدود و روش‌های بهینه‌سازی مرسوم نیاز به هزاران بار تحلیل و ارزیابی پاسخ دارد که فرایندی طاقت فرسا و در برخی مواقع ناممکن است. در این موقع استفاده از روش‌های تقریبی و مدل جایگزین¹ کارآمد خواهد بود.

به طور کلی بهینه‌سازی بر اساس مدل جایگزین راهبردی برای سرعت بخشیدن به فرایند بهینه‌سازی با استفاده از جایگزین‌هایی برای توابع هدف و قیود می‌باشد [6]. این روش علاوه بر دستیابی به پاسخ ممکن بهینه با حداقل تعداد ارزیابی‌ها از تابع اصلی (دقت بالا)، باعث ایجاد یک برآورد کلی در فضای طراحی نیز می‌گردد. این روش تقریب و بهینه‌سازی در تمام شاخه‌های مهندسی هواپضا مانند سازه، آبرودینامیک [7] و حتی طراحی مفهومی فضایی [8] نیز به کارگرفته شده است.

در مرجع شماره [6] یک تابع جایگزین برای پیش‌بینی بار کمانش نهایی ترکیب ورق و تقویت کننده ۷شکل با استفاده از تحلیل اجزاء محدود غیرخطی (با استفاده از نرم‌افزار انسیس²) ارائه شده است. برای ایجاد مدل جایگزین در این تحقیق³ ترکیب مختلف از متغیرهای طراحی در فضای طراحی نمونه‌برداری شده است و از روش مدونی برای نمونه‌برداری از فضای طراحی استفاده نشده است. بهینه‌سازی چند موضوعی با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک صورت گرفته است. از سیزده متغیر تقویت کننده ۷شکل، پنج بعد آن به عنوان متغیرهای مستقل انتخاب شده‌اند که این عامل به شدت حجم محاسبات را کاهش داده است. در این تحقیق از یک

³ Reusable Launch Vehicle: RLV

⁴ PANDA2

⁵ Sequential convex programming

⁶ Basic Surrogate Based Optimization: Basic SBO

¹ Surrogate model

² ANSYS

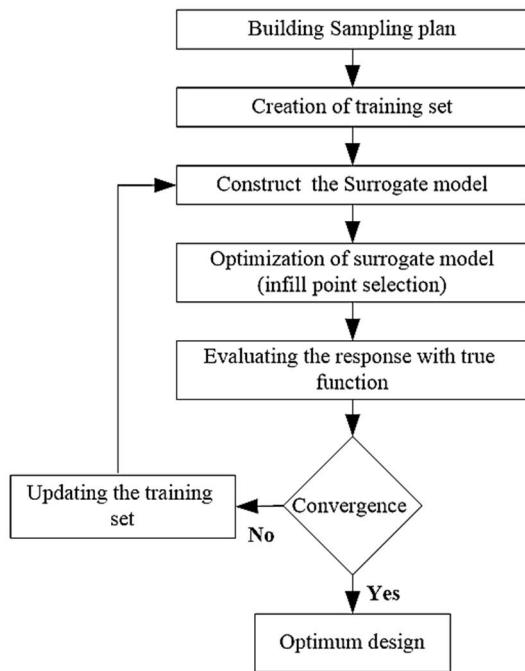


Fig. 1 Surrogate based optimization flowchart

شکل ۱ طرحواره روش بهینهسازی مدل جایگزین

نمونهبرداری شده وجود دارد. در بیشتر این روش‌ها، مدل جایگزین پاسخ را در نقاط نمونهبرداری شده به طور دقیق تکرار می‌کند. بدیهی است که بهترین مدل جایگزین، مدلی است که بتواند تابع دقیق را در نقاط نمونهبرداری نشده با کمترین خطای پیش‌بینی کند. خطای پیش‌بینی عبارت است از اختلاف بین مقدار تقریبی حاصل از مدل جایگزین (f) و مقدار دقیق تابع (f).

یکی از متدالوگریتین توابعی که به عنوان مدل جایگزین استفاده می‌شود، تابع با پایه شعاعی^۶ می‌باشد. اگر f به عنوان یک تابع عددی فرض شود، به این مفهوم که به ازاء پارامتر ورودی (x_1, x_2, \dots, x_k) مقدار خروجی S عددی U را بدهد و بر اساس طرح نمونهبرداری با n نقطه $\{X^1, X^2, \dots, X^n\}$ پاسخ‌های $\{y^1, y^2, \dots, y^n\}$ موجود باشند، تقریب تابع با پایه شعاعی به شکل عمومی مطابق با رابطه (1) تعریف می‌شود.

$$(1) \quad \hat{f}(x) = W^T \Psi = \sum_{i=1}^n w_i \psi(\|X - c^i\|)$$

در رابطه (1) c^i دلالت دارند بر مراکز تابع پایه یعنی همان نقاط نمونهبرداری شده که مقدار دقیق تابع در آن نقاط موجود است و X محل پیش‌بینی است، یعنی مکانی که مقدار تقریبی تابع در آن نقطه جستجو می‌شود. همچنین Ψ برداری است شامل مقادیر فاصله (نرم اقلیدسی) مراکز تابع پایه و محل پیش‌بینی که تحت تاثیر تابع ψ قرار گرفته است. اگر این فاصله r نامیده شود، ψ تابعی است که نحوه به کارگیری این فاصله را با توجه به نوع تابع پایه تعیین می‌نماید. انواع تابع پایه از نوع ثابت در بخش ۲-۳ با ارائه یک مثال کاربردی مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از توابع پایه که دارای پارامتر متغیر می‌باشند، می‌توان انعطاف‌پذیری بیشتری برای مدل جایگزین ایجاد کرد. در تابع پایه نوع گوسی، از یک پارامتر تنظیم θ مطابق با رابطه (2) استفاده می‌شود [12]. در رابطه (1) ضرایب وزن W را می‌توان با درون‌یابی داده‌های نمونهبرداری شده به دست آورد. بدین ترتیب به ازاء هر نقطه نمونهبرداری شده یک پارامتر وزن w_i وجود دارد.

⁶ Radial Basis Functions: RBF

در گام بعدی و با استفاده از نتایج حل مسائل آزمایشی، یک چارچوب مناسب برای طراحی بهینه پنل تقویت شده با استفاده از مدل جایگزین گوسی^۱ و به کارگیری تحلیل‌های غیرخطی کمانش حاصل از نرم‌افزار اجزاء محدود انتخاب و اجرا می‌گردد. شروع فرایند بهینهسازی با استفاده از مدل جایگزین نیاز به یک حدس اولیه مناسب از فضای طراحی دارد. در این مقاله با به کارگیری نتایج حاصل از روش تقریبی شناسه سازه حدود فضای طراحی معین می‌گرددند. در پایان نتایج حاصل از این تحقیق به صورت توصیه‌های کلی و نتایج کاربردی ارائه می‌گردد و مسیر برای بهینهسازی فرآگیر مشخص می‌شود.

2- چارچوب بهینهسازی به روش مدل جایگزین

راهبرد اصلی بهینهسازی به روش مدل جایگزین، ایجاد یک مدل جایگزین (ما فوق مدل² یا تابع تقریبی) از تابع اصلی مورد نظر و سپس بهینهسازی آن به جای تابع اصلی است. چارچوب بهینهسازی با استفاده از مدل جایگزین در شکل ۱ آورده شده است. هر فرایند بهینهسازی بر اساس مدل جایگزین شامل سه مرحله اصلی ایجاد مجموعه یادگیری³، ساختن مدل جایگزین و بهینهسازی مدل جایگزین می‌باشد (شکل ۱).

2-1- ایجاد مجموعه یادگیری

مجموعه یادگیری، مجموعه‌ای از نقاط طراحی است که مقدار تابع اصلی در آن نقاط به دست آمده است. انتخاب نقاط مجموعه یادگیری بر اساس یک طرح نمونهبرداری صورت می‌پذیرد. مهمترین شاخصه طرح نمونهبرداری که بر روی کیفیت مدل جایگزین موثر است، چگونگی پراکندگی نقاط نمونهبرداری شده در فضای طراحی است. مطلوب است تا حد امکان از تعداد نقاط نمونهبرداری کاسته شود تا بدین وسیله هزینه محاسباتی لازم برای ارزیابی‌های دقت بالا از تابع اصلی نیز کاهش یابد.

در این مقاله از روش نمونهبرداری ابرمکعب لاتینی⁴ برای انتخاب نقاطی که می‌بایست مقدار تابع اصلی در آن نقاط ارزیابی گردد استفاده می‌شود. در روش نمونهبرداری ابرمکعب لاتینی، تصویر نقاط نمونهبرداری شده بر روی محورهای مختصات (ابعاد فضای طراحی)، همبوشانی ندارند [12]. این خاصیت باعث می‌شود که هر نقطه نمونهبرداری منحصراً مکانی خاص از فضای طراحی را بدون همبشوشانی با دیگر نقاط طراحی پوشش دهد.

بسته به تعداد نقاط طراحی و ابعاد فضای طراحی (تعداد متغیرهای طراحی)، طرح‌های نمونهبرداری متنوعی را می‌توان با این ویژگی ایجاد کرد (شکل 2). با این وجود بهترین طرح نمونهبرداری ابر مکعب لاتینی، طرحی است که اصطلاحاً خصوصیات بهتری از لحظه فضا پرکن بودن⁵ داشته باشد. به طور کیفی این معیار مربوط به گستردگی هر چه بیشتر نقاط نمونهبرداری در تمام فضای طراحی است. یکی از روش‌های ایجاد یکنواختی در نقاط نمونهبرداری بیشینه کردن کمینه فاصله بین نقاط نمونهبرداری است که اصطلاحاً به معیار بیشینه-کمینه مشهور است [6].

2-2- ساختن مدل جایگزین

روش‌های مختلف برای ساختن مدل جایگزین با استفاده از داده‌های

¹ Gaussian surrogate model² Meta model³ Training set⁴ Latin Hypercube Sampling: LHS⁵ Space filling

جایگزین خواهد بود. علی‌رغم پاسخ قطعی حاصل از این روش در یافتن بهینه فرآگیر، زمان اجرای آن با توجه به سرعت بالای اجرای الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم ترتیبی چشمگیر نمی‌باشد.

۴-۲- به هنگام‌سازی مدل جایگزین با استفاده از نقاط پرکننده^۵

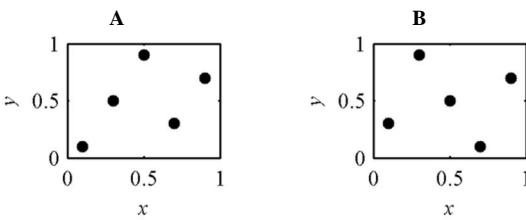
اضافه کردن نقاط پرکننده به طرح نمونه‌برداری اولیه و پس از ارزیابی مدل جایگزین در مقایسه باتابع اصلی صورت می‌پذیرد. به این منظور پس از بدست آوردن نقاط داده و ایجاد مجموعه یادگیری، مدل جایگزین ساخته می‌شود. با داشتن مدل جایگزین به صورت یکتابع تحلیلی، بهینه فرآگیر آن با روش بخش ۳-۲ بدست می‌آید. سپس این بهینه با استفاده ازتابع اصلی مورد ارزیابی قرار گرفته و پاسخ دقیق آن نیز حاصل می‌شود. با اضافه کردن این نقطه به طرح نمونه‌برداری اولیه مجدداً مدل جایگزین ایجاد شده و فرایند تا برآورده شدن شرایط همگرایی ادامه می‌یابد (نمودار شکل ۱). به عبارت دیگر در این روش کمینه مدل جایگزین ساخته شده در تکرار i به عنوان نقطه پرکننده در تکرار $i+1$ منظور می‌گردد.

اضافه کردن نقاط پرکنندهای که بر اساس بهینه مدل جایگزین در گام قبلی به دست آمد است می‌تواند در نهایت به بهینه محلی تابع همگرا شود. این نقطه می‌تواند بهینه فرآگیر نیز باشد. در صورتیکه این روش اضافه کردن نقاط پرکننده با یک مدل جایگزین با انعطاف‌پذیری بالاتر کیفی شود، احتمال اینکه نقطه بهینه نهایی، بهینه فرآگیر تابع باشد افزایش می‌یابد. کارایی این روش در دو مثال بعدی نشان داده خواهد شد.

بسته به هزینه محاسباتی موجود و هدف از فرایند بهینه‌سازی می‌توان از نقاط پرکننده به روش‌های دیگر نیز استفاده کرد [12].

۵-۲- معیار همگرایی

عدم بهبود مقدار تابع هدف در گام‌های متوالی (معمولًا دو گام آخر) و قابل قبول بودن خطای پیش‌بینی در نقطه بهینه به عنوان شرایط همگرایی در فرایندهای بهینه‌سازی به روش مدل جایگزین در نظر گرفته می‌شوند [12,11]. شرط اول قرار گرفتن نقطه طراحی در یک حالت بهینه را نشان می‌دهد (در مقایسه با نقاط طراحی مجاور) و شرط دوم تضمین می‌کند که تقریب مدل جایگزین در تابع اصلی به اندازه قابل قبول دقیق بوده و طرح حاصل از لحاظ بهینه‌سازی ممکن^۶ است. معمولاً گام‌های همگرایی می‌بایست متوالی و اصطلاحاً پشت سرهم باشند تا شرایط همگرایی حاصل شود. اشاره به این نکته حائز اهمیت است که در مدل جایگزین گوسی با توجه به رفتار نوسانی این تابع، معمولاً حصول شرایط همگرایی در گام‌های دقیقاً متوالی دشوار بوده و باعث طولانی تر شدن فرایند بهینه‌سازی بدون بهبود چشمگیر در تابع هدف می‌گردد. برای اجتناب از این موضوع، در تعریف شرط همگرایی فرایند بهینه‌سازی مدل جایگزین با استفاده از تابع گوسی، شرط دقیقاً متوالی بودن با حالت صرفاً متوالی بودن جایگزین می‌گردد. یعنی اگر نقطه مفروض X_{opt} با مقدار تابع هدف f_{opt} در گام i به عنوان نقطه بهینه به دست آمد و مجدداً این مقدار تابع هدف با بهبود اندک یا بدون بهبود در چند گام بعد به عنوان نقطه بهینه به دست آمد (در گام $i+1$ و $i+2$) عملای فرایند بهینه‌سازی به مقدار f_{opt} همگرا شده است. البته در هر صورت شرط قابل قبول بودن خطای پیش‌بینی می‌بایست برآورده گردد.



شکل ۲ طرح نمونه‌برداری ابر مکعب لاتینی A: طرح تصادفی، B: طرح بهینه

$$(2) \psi(r) = e^{-r^2/2\theta^2}$$

پارامتر تنظیم (θ) را نیز می‌توان با استفاده از یک معیار بهینه‌سازی مناسب یافت. روشنی که در این تحقیق برای یافتن مقدار پارامتر تنظیم استفاده می‌شود، روش اعتبارسنجی متقاطع^۱ نام دارد. در این روش داده‌های نمونه‌برداری شده به q زیر مجموعه تقسیم می‌شوند. سپس یک مدل جایگزین با مقدار مشخص پارامتر تنظیم، q بار ایجاد می‌شود و در هر بار یکی از زیر مجموعه‌ها برای ارزیابی مدل جایگزین و محاسبه خطا جدا شده و از $q-1$ زیر مجموعه دیگر برای ایجاد مجموعه یادگیری استفاده می‌شود. خطا برای هر مقدار پارامتر تنظیم، متوسط اندازه \bar{x} خطای به دست آمده است [6]. در نهایت مقداری که کمترین خطا را ایجاد نماید به عنوان پارامتر تنظیم مدل جایگزین انتخاب می‌شود.

۳- بهینه‌سازی مدل جایگزین

به طور عمومی و با در دست داشتن یک مدل جایگزین با هزینه ارزیابی اندک که یک تابع ریاضی پیوسته است [12,6]، می‌توان از هر الگوریتم بهینه‌سازی برای یافتن بهینه آن استفاده کرد. الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات^۲ با توجه به احتمال دستیابی به بهینه، از پرطفرادرترین روش‌های بهینه‌سازی برای یافتن بهینه مدل جایگزین هستند [12,11,9,6]. در اینجا روشی ارائه می‌شود که با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی بر پایه مشتق بتوان بهینه فرآگیر مدل جایگزین را به طور قطعی یافت. لازم به ذکر است که مدل جایگزین، تابعی تقریبی از تابع اصلی مورد نظر است که رفتار آن صرفاً با نمونه برداری از فضای طراحی تقریب زده می‌شود و روش ارائه شده نیز در مورد یافتن بهینه فرآگیر مدل جایگزین است که تابع تحلیلی آن در بخش مدل‌سازی به دست می‌آید.

در این تحقیق، الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم ترتیبی^۳ از جمعه ابزار بهینه‌سازی متلب^۴ برای این منظور انتخاب شده است. الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم ترتیب یک الگوریتم بهینه‌سازی محلی بر پایه مشتق است که احتمال قرار گرفتن آن در یک بهینه محلی نیز وجود دارد. نقطه بهینه‌ای که توسط روش برنامه‌ریزی درجه دوم ترتیبی معرفی می‌گردد، به طور قاطع وابسته به نقطه شروع الگوریتم بهینه‌سازی است.

مدل جایگزین از طریق درون‌یابی داده‌های نمونه‌برداری شده ساخته می‌شود. از آنجایی که امکان وجود فقط یک نقطه بهینه بین دو نقطه نمونه‌برداری مجاور وجود دارد (شکل ۳)، بنابراین در صورتی که الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم ترتیبی از هر نقطه نمونه‌برداری شده یک بار آغاز گردد، در هر بار یک نقطه بهینه محلی به دست خواهد آمد. در نهایت بهترین نقطه بهینه از این مجموعه بهینه‌های محلی، نقطه بهینه فرآگیر مدل

¹ Cross-validation

² Particle swarm optimization

³ Sequential Quadratic Programming

⁴ MATLAB (Version 7)

⁵ Infill points

⁶ Feasible

جدول 1 بررسی تأثیر طرح نمونه برداری اولیه در کیفیت پاسخ بهینه

Table 1 Effect of initial sampling plan on the response quality

x_{opt}	گام‌های همگرایی	طرح نمونه برداری اولیه	ردیف
0.76	8	0.4981, 0.9009, 0.5747	1
0.76	8	0.0427, 0.6352, 0.2819	2
<u>0.14</u>	<u>6</u>	<u>0.1776, 0.3986, 0.1339</u>	3
0.76	7	0.9052, 0.6754, 0.4685	4
0.76	8	0.0103, 0.0484, 0.6679	5
0.76	6	0.2060, 0.0867, 0.7719	6
0.76	11	0.1098, 0.9338, 0.1875	7
0.76	6	0.7655, 0.7952, 0.1869	8
0.76	10	0.3500, 0.1966, 0.2511	9
0.76	11	0.4314, 0.9106, 0.1818	10

مطابق با جدول 1 فقط در ردیف سوم که تمام نقاط نمونه برداری شده اولیه در یک‌سوم ابتدایی فضای طراحی متوجه شده‌اند، مدل جایگزین به پاسخ بهینه محلی همگرا می‌شود. همچنین در ردیف هشتم، اگرچه نقطه نمونه برداری شده بسیار نزدیک به بهینه فرآگیر تابع است با این وجود سه نقطه پرکننده دیگر نیاز است تا مدل جایگزین همگرا شود (خاصیت نوسانی مدل جایگزین گوسی). نتایج جدول 1 آشکار کننده این موضوع است که با استفاده از یک طرح نمونه برداری اولیه مناسب و مدل جایگزین گوسی احتمال دستیابی به پاسخ بهینه فرآگیر بسیار بالاست. به همین منظور در این مطالعه برای غنی‌سازی طرح نمونه برداری از برخی نقاط مانند حدود بالایی و پایینی متغیرهای طراحی استفاده شده است.

3-2- طراحی ابعادی پنل تقویت شده با تقویت کننده تیغه‌ای

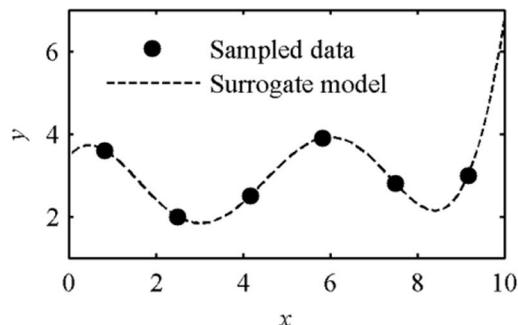
روش طراحی پنل تقویت شده با استفاده از مفهوم شناسه سازه، یک روش طراحی تقریبی است که با دریافت پارامترهای شناسه سازه (رابطه 4) و مشخصات مواد، طراحی ابعادی کاملی از مقطع پنل تقویت شده در اختیار می‌گذارد [5].

$$K = \frac{N}{L} \quad (4)$$

در رابطه (4)، N شدت بار محوری و L طول پنل تقویت شده است. در این بخش توانایی روش مدل جایگزین برای یافتن بهینه پنل تقویت شده با تقویت کننده تیغه‌ای (شکل 5) تحت قیود کمانش و تابع هدف بیشینه کردن تنش بررسی می‌شود. در شکل 5 پنل تقویت شده با تقویت کننده تیغه‌ای با بال بیرون زده نشان داده است که با حذف بال آن تبدیل به پنل تقویت شده با تقویت کننده تیغه‌ای می‌گردد. قیود کمانش همان روابط تحلیلی -

تجربی هستند که عیناً در روش شناسه سازه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

ثابت شده است که پاسخ روش شناسه سازه با توجه به استفاده از اصل طراحی سازه تمام تبیه¹ و ارضاء همزمان قیود طراحی، یک پاسخ بهینه فرآگیر است [13]. نتایج بهینه روش شناسه سازه برای پنل تقویت شده با تقویت کننده تیغه‌ای در روابط (5) تا (8) به ترتیب برای عرض و ضخامت پوسته و نسبت‌های بی بعد طراحی آمده است [5].



شکل 3 رفتار مدل جایگزین بین نقاط نمونه برداری شده

3- بررسی کارایی روش مدل جایگزین

در این تحقیق از دو مثال نمونه برای نشان دادن کارایی روش بهینه‌سازی بر اساس مدل جایگزین استفاده می‌شود. مثال اول صرفاً به منظور به تصویر کشیدن راهبرد مدل جایگزین برای یافتن بهینه فرآگیر تابع یک متغیره آزمون ارائه می‌گردد. این تابع آزمون در مرجع [12] ارائه شده و یک مسئله بهینه‌سازی نامقید است. مثال دوم یک مسئله طراحی بهینه سازه‌ای با قید کمانش است. پاسخ این مسئله سازه‌ای بر اساس روش شناسه سازه به دست آمده است [5]. هر دو مسئله آزمون مورد بررسی دارای بهینه‌های محلی و فرآگیر می‌باشند.

1-3- تابع یک متغیره آزمون رابطه تحلیلی تابع یک متغیره آزمون عبارت است از:

$$f(x) = (6x - 2)^2 \sin(12x - 4) \quad (3)$$

در این مثال، برای ایجاد مدل جایگزین از یک طرح نمونه برداری سه نقطه‌ای استفاده شده و اولین مدل جایگزین با استفاده از تابع گوسی مطابق با گام اول شکل 4 ساخته می‌شود. در فضای طراحی یک بعدی، نقاط نمونه برداری با فاصله برابر از یکدیگر انتخاب می‌شوند. نقاط پرکننده بر اساس معیار کمینه مدل جایگزین انتخاب شده‌اند. مطابق با گام دوم در شکل 4 ملاحظه می‌گردد اگرچه نقاط پرکننده متواالی اول و دوم بسیار نزدیک به یکدیگر هستند اما باعث تغییر در رفتار مدل جایگزین شده و در نهایت در گام چهارم (شکل 4) با دقت مناسبی، بهینه فرآگیر تابع را پیش‌بینی می‌کند. رابطه مدل جایگزین برای این مثال با به کارگیری تابع پایه گوسی در گام چهارم با شش نقطه نمونه برداری عبارت است از:

$$\hat{f}(x) = \sum_{i=1}^6 w_i \exp(\|X - c^i\| / 2\theta^2),$$

$$c = [0.8333, 0.5000, 0.1667, 0.8400, 0.7400, 0.7600],$$

$$W = [-710.91, 2.09, -0.93, 645.49, -109.37, 175.31],$$

$$\theta = 0.1100$$

اضافه کردن به نقاط پرکننده فقط دقت پیش‌بینی را افزایش خواهد داد. در این مثال اگر چه مدل جایگزین بهینه فرآگیر تابع را یافته، اما در پیش‌بینی رفتار تابع در نقاط ابتدایی و انتهایی فضای طراحی موفق نبوده است. این ویژگی اهمیت طرح نمونه برداری اولیه را در توانایی مدل جایگزین برای یافتن بهینه تابع اصلی نشان می‌دهد. به همین منظور با ایجاد 10 طرح نمونه برداری اولیه تصادفی به نوعی حساسیت پاسخ نسبت به طرح نمونه برداری اولیه بررسی می‌گردد (جدول 1).

¹ Fully stressed design

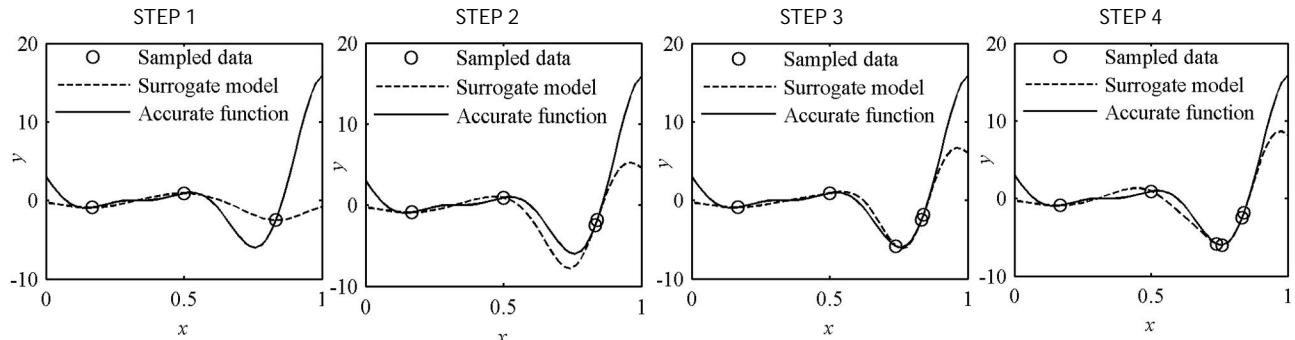


Fig. 4 Example of Surrogate modeling and optimization : one variable test function

شکل 4 مثالی از فرایند مدلسازی و بهینه‌سازی به روش مدل جایگزین: تابع آزمون یک متغیره

جدول 2 نتایج بهینه‌سازی پل تقویت شده با تقویت کننده تیغه‌ای (تمام ابعاد به mm و تابع هدف (تش) واحد MPa می‌باشد)

Table 2 Optimization results of blade stiffened panel (all dimensions are in mm and the objective function (stress) in MPa)

f_{opt}	x_{opt}				NC ^(*)	$\psi(r)$
	t_w	b_w	t	b		
312	4.40	51.35	2.42	70.54	8	خطی (r)
318	4.34	49.77	2.65	76.76	23	مکعبی (r^3)
313	4.37	51.21	2.42	70.60	15	منحنی ($r^2 \ln r$)
323	4.22	48.39	2.22	62.25	147	گوسی ($e^{-r^2/20^2}$)
323	4.20	48.8	2.4	68.3	-	شناسه سازه

(*) تعداد گام‌های همگرایی

انتظار می‌رود. در کلیه تحلیل‌های صورت گرفته در این مقاله به منظور قابل مقایسه بودن نتایج، طول پل تقویت شده $L = 762$ mm، مدول الاستیک $E = 73774$ MPa و ضریب پوآسون $\nu = 0.33$ در نظر گرفته شده است.

4- طراحی بهینه پل تقویت شده فشاری با استفاده از مدل جایگزین

بهینه‌سازی فرآگیر نیازمند یک یا دو مرتبه تلاش محاسباتی بیشتر نسبت به بهینه‌سازی محلی می‌باشد [10]، از این رو هدف اولیه از این تحقیق ارائه یک طرح بهینه محلی و نه لزوماً فرآگیر است. امکان دستیابی به بهینه محلی و یا فرآگیر تابع اصلی، وابسته به طرح نمونه‌برداری اولیه، نوع مدل جایگزین، تکنیک اضافه کردن نقاط پرکننده و روش یافتن بهینه فرآگیر مدل جایگزین است. امکان قضایت قطعی در مورد دستیابی به بهینه فرآگیر یک تابع اصلی که رفتار آن مجھول بوده و صرفاً با نمونه‌برداری از فضای طراحی رفتار آن تقریب زده می‌شود وجود ندارد. البته با توجه به نتایج بخش 3 و موفقیت روش پیشنهادی در یافتن بهینه فرآگیر مسائل آزمون، استفاده از مدل جایگزین گوسی به همراه طرح نمونه‌برداری ابرمکعب لاتینی و روش پیشنهاد شده برای یافتن بهینه فرآگیر مدل جایگزین، احتمال همگرایی به بهینه فرآگیر تابع اصلی را افزایش می‌دهد. در هر صورت این بهینه‌سازی اولیه ضروری بوده و مسیر دستیابی به بهینه فرآگیر را مشخص می‌کند. موضوعی که در بخش پایانی مقاله به آن اشاره خواهد شد.

در این قسمت از تحقیق با استفاده از چارچوب بیان شده برای روش مدل جایگزین، طراحی بهینه پل تقویت شده فشاری در دو بیکربنده پل تقویت شده با تقویت کننده تیغه‌ای (نوع الف) و پل تقویت شده با تقویت کننده تیغه‌ای با بال بیرون زده (نوع ب) مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل 5).

$$b = 1.2 \left(\frac{L^3 N}{E} \right)^{1/4} \quad (5)$$

$$t = 0.56 \left(\frac{LN}{E} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$\frac{t_w}{t} = 1.7847 \quad (7)$$

$$\frac{b_w}{b} = 0.714 \quad (8)$$

طراحی بهینه باید تحت بار بحرانی مشخص ($P_{cr} = N$) به عنوان قید تساوی به بیشینه تنش بحرانی ممکن دست یابد. همچنین بیشینه تنش برابر با کمترین مقدار از میان سه مقدار تنش کمانش کلی (9)، تنش کمانش محلی پوسته (10) و تنش کمانش محلی تقویت کننده (11) می‌باشد. لازم به ذکر است که کمانش کلی یا کمانش ستون به حالتی از ناپایداری سازه تحت بار محوری فشاری گویند که کل سازه دچاره اعوجاج و تغییر شکل می‌گردد. در مقابل این نوع ناپایداری، در حالت کمانش محلی فقط بخش‌هایی از پوسته و یا تقویت کننده دچار اعوجاج و تغییر شکل می‌شوند، به عبارت دیگر در این حالت فقط تغییر شکل اجزاء ورقی سازه به طور جداگانه رخ می‌دهد.

$$\sigma_{CB} = \frac{\pi^2 EI}{L^2 A} \quad (9)$$

$$\sigma_{SKB} = 3.62 E \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (10)$$

$$\sigma_{StB} = 0.582 E \left(\frac{t_w}{b_w} \right)^2 \quad (11)$$

در این مثال، مدل جایگزین با استفاده از یک طرح نمونه‌برداری ابرمکعب لاتینی بهینه با 50 نقطه ساخته شده و به ازاء هر نقطه طراحی معلوم با چهار متغیر (b, t, b_w, t_w) پاسخی را به عنوان تنش مجاز در اختیار می‌گذارد. پاسخ حاصل با کمترین مقدار تنش به دست آمده از روابط (9) تا (11) مقایسه و اعتبار سنجی می‌گردد. سپس به عنوان یک نقطه پرکننده در گام بعدی فرایند منظور می‌گردد. با توجه به توضیحات فوق نتایج بهینه‌سازی به روش مدل جایگزین و با استفاده از چهار نوع تابع پایه مختلف در جدول 2 گزارش شده است.

همان طور که از نتایج جدول 2 مشخص است، مدل‌های جایگزین ساده از لحاظ سرعت همگرایی بسیار مطلوب هستند (تعداد کم گام‌های همگرایی). از طرف دیگر مدل جایگزین گوسی با توجه به انعطاف‌پذیری زیاد، رفتاری نوسانی داشته و سرعت همگرایی آن اندک است، اما از لحاظ پاسخ دارای بهترین کیفیت است. البته باید توجه داشت که در این مسئله آزمون، قیود و تابع هدف به گونه‌ای تعریف شده‌اند که مسئله دارای پاسخ‌های ممکن فراوان در نزدیکی حدود بهینه می‌باشد، موضوعی که در مسائل اجزاء محدود کمتر

شده یک ضریب وزنی w_i به دست می‌آید. مقدار بهینه‌ای نیز برای تنها پارامتر تنظیم θ , با استفاده از روش اعتبارسنجی متقاطع محاسبه می‌گردد. طراحی پل تقویت شده به صورت یک مسئله بهینه‌سازی با قرار دادن مقدار بار بحرانی کمانش به صورت یک قید تساوی تعریف می‌شود.تابع هدف نیز بیشینه کردن تنش متوسط در سازه است. متغیرهای طراحی نیز ابعاد مقطع پل تقویت شده می‌باشند (رابطه ۱۲). جنس پوسته و تقویت کننده یکسان بوده و پل از نوع یکپارچه^۱ در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} P_{cr} &= N && \text{قید تساوی:} \\ \sigma_{ave} &= \text{بیشینه کردن} && \text{تابع هدف:} \\ b, t, b_w, t_w, b_f, t_f & \quad \text{متغیرهای طراحی:} && (12) \end{aligned}$$

مشابه روش شناسه سازه در اینجا نیز تحلیل‌های اجزاء محدود فقط با در نظر گرفتن یک تقویت کننده و پوسته متناظر آن (شکل ۵) انجام می‌شود. با این شرایط، طراحی بهینه، طرح خواهد بود با بار بحرانی برابر با N و بالاترین تنش در میان طرح‌های ممکن.^۲

با توجه به مرتبه بودن بار بحرانی کمانش و تنش متوسط متناظر با آن، ایجاد یک مدل جایگزین برای پیش‌بینی تنش بحرانی (تابع هدف) و بار بحرانی کمانش (قید تساوی) در سازه کافی است. در صورتیکه طرح بهینه روش شناسه سازه (جدول ۳) با روش اجزاء محدود تحلیل کمانش غیرخطی شود، بار بحرانی کمانش برای پل تقویت شده نوع الف و ب به ترتیب برابر با مقادیر $N_b = 1782 \text{ N/mm}$ و $N_a = 1731 \text{ N/mm}$ خواهد بود. این مقادیر به عنوان بار بحرانی طراحی در بهینه‌سازی به روش مدل جایگزین مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

4- نتایج بهینه‌سازی پل تقویت شده

تلاش برای یافتن طرح بهینه پل تقویت شده نوع الف با پنچ گام به نتیجه می‌رسد (جدول ۴). در این فرایند از نقاط پرکننده‌ای که بر اساس بهینه مدل جایگزین در تکرار قبل به دست آمده استفاده شده است. فرایند بهینه‌سازی هنگامی متوقف می‌شود که نقطه بهینه معرفی شده توسط مدل جایگزین اولاً کمتر از دو درصد خطأ در مقایسه با تحلیل اجزاء محدود داشته باشد و ثانیاً در دو گام متوالی نیز بهبود آن کمتر از دو درصد باشد.

با توجه به وجود شش متغیر طراحی در پل تقویت شده نوع ب، فرایند بهینه‌سازی پس از اضافه شدن ۱۷۳ نقطه پرکننده متوقف شده است. با در نظر گرفتن تعریف همگرایی ارائه شده در بخش ۵-۲، فرایند بهینه‌سازی عملاً با اضافه شدن ۶۴ نقطه پرکننده همگرا شده است، اما به منظور نشان دادن صحت این همگرایی و عدم بهبود تابع هدف، فرایند ایجاد مدل جایگزین و بهینه‌سازی آن تا گام ۱۷۳ ادامه پیدا کرده است. تعداد زیاد نقاط پرکننده بهینه‌سازی در این مرحله در مقایسه با تعداد ارزیابی‌های تابع هدف و قیود در هر گام بهینه‌سازی کاملاً به صرفه است (جدول ۵). همانطور که از نتایج جدول ۵ مشخص است، بهینه مدل جایگزین شش بار به یک نقطه (یا تقریب قابل قبول) همگرا می‌شود (ردیف‌های مشخص شده با خط)، اگرچه رجوع به این نقطه دقیقاً پشت سرهم نبوده و با فاصله صورت می‌پذیرد.

4- تحلیل کمانش غیرخطی پل تقویت شده تحت بار فشاری محوری

در این تحقیق ابزار تحلیل در فرایند طراحی بهینه، تحلیل‌های اجزاء محدود

ابزار تحلیل در این فرایند طراحی بهینه، تحلیل‌های اجزاء محدود حاصل از بسته تجاری انسیس ویرایش ۱۱ می‌باشد.

در این تحقیق از نتایج روش تحلیلی شناسه سازه برای تعیین حدود متغیرهای طراحی در فرایند بهینه‌سازی مدل جایگزین استفاده می‌شود (جدول ۳). با توجه به اینکه یکی از اهداف این مقاله مقایسه نسبت‌های بهینه حاصل از روش شناسه سازه و مدل جایگزین می‌باشد، حدود متغیرهای طراحی به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که وقتی متغیرهای متناظر با ابعاد پوسته بی بعد شوند در گستره $\pm 30\%$ حدود بهینه روش شناسه سازه قرار داشته باشند. به عنوان مثال:

$$\left(\frac{b_w}{b}\right)_{lb} = 0.7 \cdot \left(\frac{b_w}{b}\right)_{opt}, \quad \left(\frac{b_w}{b}\right)_{ub} = 1.3 \cdot \left(\frac{b_w}{b}\right)_{opt}$$

تمام ابعاد مقطع به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین در پل تقویت شده نوع الف، تعداد متغیرهای طراحی $k = 4$ و در حالت پل تقویت شده نوع ب، $k = 6$ می‌باشد (شکل ۵).

پارامترهای بی بعد نشان داده شده در جدول ۳، همان مقادیر بهینه‌ای هستند که توسط روش شناسه سازه و به صورت عمومی به دست آمده‌اند [۵]. مجموعه یادگیری برای پل تقویت شده نوع الف با ۵۵ نقطه و برای نوع ب با ۵۷ نقطه نمونه‌برداری شده ایجاد می‌شود. طرح نمونه‌برداری اولیه بر اساس روش نمونه‌برداری ابر مکعب لاتینی بهینه ایجاد گردیده و با اضافه کردن نقاطی مانند حدود بالایی و پایینی فضای طراحی و نقطه بهینه شناسه سازه غنی شده است.

تحلیل‌های کمانش خطی و غیرخطی برای هر نقطه نمونه‌برداری متناظر با یک طرح ابعادی منحصر به فرد پل تقویت شده انجام می‌گردد. با در اختیار داشتن مجموعه یادگیری، گام بعدی ایجاد مدل جایگزین است. در این مطالعه از مدل جایگزین تابع با پایه شعاعی از نوع گوسی استفاده شده است. پارامترهای وزنی (W) در رابطه (۱) از طریق درونیابی مدل جایگزین در نقاط نمونه‌برداری شده به دست می‌آید. به این طریق به ازاء هر نقطه نمونه‌برداری

جدول ۳ حدود متغیرهای طراحی برای دو نوع پل تقویت شده (تمام ابعاد به میلی‌متر هستند)

Table 3 Bounds of the design variables for two types of the stiffened panel (all dimensions are in mm)

پل تقویت شده با تقویت کننده تیغه‌ای (نوع الف)		
متغیر طراحی	حد پایینی	حد بالایی
b	59.9154	68.3140
t	2.0863	2.3787
b_w	40.8091	48.7762
t_w	3.5519	4.2453
نسبت‌های بی بعد طراحی		
$r_t = t_w/t$	1.2493	1.7847
$r_p = b_w/b$	0.4998	0.9282
پل تقویت شده با تقویت کننده تیغه‌ای با بال بیرون زده (نوع ب)		
متغیر طراحی	حد پایینی	حد بالایی
b	44.6933	50.9582
t	1.8995	2.1658
b_w	42.6347	50.9582
t_w	1.8120	2.1658
b_f	13.1988	15.7756
t_f	1.4633	1.749
نسبت‌های بی بعد طراحی		
$SR = A_{st}/A_{sk}$	0.6125	1.25
$T = t_w/t$	0.7	1

^(۱) مقدار بهینه حاصل از روش شناسه سازه [۵]

^۱ Integral stiffened panel

^۲ Feasible designs

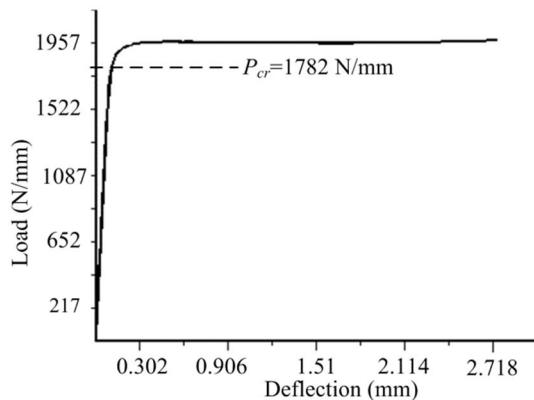


Fig. 6 Load-deflection curve for determining nonlinear buckling load

شکل 6 نمودار نیرو- جابجایی برای تعیین بار کمانش غیرخطی

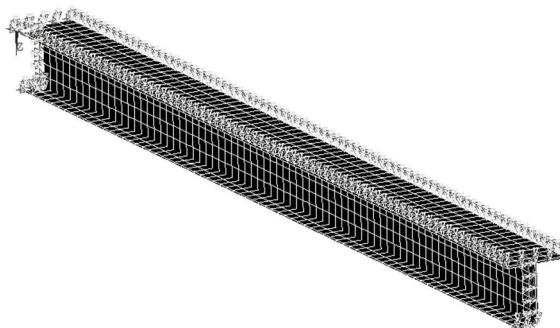


Fig. 7 FEM model and the corresponding boundary condition

شکل 7 مدل اجزاء محدود و شرایط مرزی اعمال شده بر آن

5- بررسی نتایج

اگرچه روش شناسه سازه یک روش تحلیلی بر پایه روابط تحلیلی - تجربی سازه‌ها می‌باشد و فرایند بهینه‌سازی با استفاده از مدل جایگزین و تحلیل‌های اجزاء محدود یک روش کاملاً عددی است، با این وجود مقایسه نتایج حاصل از دو روش تحلیلی و عددی می‌تواند آشکار کننده نکات قابل توجهی باشد. با توجه به اینکه طرح بهینه شناسه سازه و روش مدل جایگزین هر دو برای یک مقدار بار بحرانی اندازه شده‌اند، می‌توان نسبت‌های بی‌بعد بهینه حاصل از دو روش را مقایسه کرد. با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول 6 ملاحظه می‌شود اختلاف مقادیر حاصل برای نسبت‌های ϵ , r , T و β حاصل از دو روش کمتر از بیست درصد می‌باشد. از آنجایی که این نسبت‌ها مربوط به پیش‌بینی کمانش محلی اجزاء پنل تقویت شده می‌باشند، می‌توان نتیجه گرفت که روابط تجربی به کار گرفته شده در روش شناسه سازه تقریباً با نتایج حاصل از تحلیل‌های اجزاء محدود در این حوزه همخوانی دارند. از طرفی اختلاف بین نسبت‌های ϵ , r , T و β حاصل از دو روش تفاوت چشمگیری دارند. این نسبت‌ها به نوعی مربوط به رفتار کمانشی پوسته است و نشان می‌دهد فرض تکیه‌گاه ساده برای پوسته در روش شناسه سازه فرضی محافظه کارانه است. این فرض به معنی صرف‌نظر کردن از حمایت الاستیکی است که توسط تقویت کننده صورت می‌پذیرد. مقدار تأثیر حمایت تقویت کننده بر شرایط تکیه‌گاهی پوسته، بستگی به ابعاد تقویت کننده و ضخامت پوسته دارد [4]. نقطه ضعف دیگر روش شناسه سازه این است که مدهای خرایی سازه شامل کمانش کلی، کمانش محلی پوسته و کریپلینگ مقطع تقویت کننده به صورت جداگانه در نظر گرفته شده و اثر متقابل آنها بر روی یکدیگر منظور نمی‌گردد. این

Fig. 5 Geometry design variables of the stiffened panel

شکل 5 هندسه و متغیرهای طراحی پنل تقویت شده

با استفاده از نرم‌افزار انسیس ویرایش 11 می‌باشد. این نرم‌افزار توانایی انجام تحلیل‌های خطی و غیرخطی کمانش، ابتدا یک تحلیل خطی کمانش از پنل تقویت شده صورت پذیرفته و مقدار بار بحرانی کمانش خطی ($P_{cr,LI}$) ثبت می‌شود. سپس بار به صورت غیرخطی و در بازه‌های معین تا حد بار کمانش خطی به سازه اعمال می‌شود. با اعمال تدریجی بار جابجایی سازه نیز در هر مرحله منظور می‌گردد. با بررسی نمودار نیرو- جابجایی در نقاط بحرانی سازه (شکل 6)، مقدار بار کمانش غیرخطی ($P_{cr,NL}$) به دست می‌آید. یکی از فاکتورهای مؤثر در تحلیل غیرخطی کمانش با استفاده از نمودار نیرو- جابجایی، نحوه در نظر گرفتن تغییر شکل اولیه سازه در اثر نقص‌های اولیه¹ می‌باشد [10]. بدیهی است در صورتیکه که یک ستون کاملاً صاف و بدون نقص اولیه تحت بار قرار گرفته و به صورت غیرخطی تحلیل شود، نیرو و جابجایی رفتاری تقریباً خطی داشته و یا مقدار بسیار بزرگی برای بار بحرانی غیرخطی به دست خواهد آمد. مقدار و روش در نظر گرفتن نقص اولیه سازه تأثیر به سزایی در مقدار بار بحرانی کمانش غیرخطی دارد [10]. یکی از روش‌های مرسوم برای اعمال نقص اولیه در تحلیل کمانش غیرخطی، استفاده از شکل مد بحرانی حاصل از تحلیل خطی به عنوان نقص اولیه می‌باشد [10]. استفاده از این روش در کتابخانه نرم‌افزار انسیس نیز برای تحلیل کمانش غیرخطی توصیه شده است. به این منظور پس از انجام تحلیل کمانش خطی، نقص اولیه سازه مطابق با شکل مد اول کمانش خطی و مقدار جابجایی نقاط بر اساس درصدی از آن تعیین می‌شود. درصد اعمال جابجایی با توجه به حداقل ضخامت پوسته تعیین می‌گردد. سپس بارگذاری مجدد از ابتدا آغاز شده و تحلیل غیرخطی انجام می‌شود. در نهایت با بررسی نمودار نیرو- جابجایی (شکل 6) مقداری برای بار کمانش غیرخطی سازه منظور می‌گردد [14].

انتخاب المان مناسب (شل² 181) و اندازه شبکه اجزاء محدود بر اساس مطالعات همگرایی صورت گرفته است. همچنین بررسی تحقیقات انجام شده توسط دیگر محققان بر روی تحلیل غیرخطی کمانش پنل تقویت شده با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود انسیس نیز در این انتخاب مؤثر بوده است [15,14,9]. شرایط مرزی لبه‌ها به صورت شرایط مرزی ساده مدل شده‌اند، به این منظور جابجایی و چرخش خارج از صفحه تمام لبه‌ها بسته شده است (شکل 7).

¹ Initial imperfections
² SHELL181

جدول ۴ گام‌های بهینه‌سازی پل تقویت شده نوع الف (بار بحرانی مدل جایگزین در تمام گام‌ها $P_{cr} = 1731 \text{ N/mm}$)Table 4 Optimization steps for type 1 stiffened panel ($P_{cr} = 1731 \text{ N/mm}$ for surrogate model in all steps)

^(+) PR	^(*) TNFE	P_{cr} (FEM) (N/mm)	σ_{ave} (FEM) (MPa)	نقطه بهینه (مدل جایگزین) (mm)				گام
				t_w	b_w	t	b	
16.5	3656	1455	355	4.02096	40.8091	2.0863	81.6138	1
3.1	3716	1677	393	4.34181	40.8091	2.0863	81.2214	2
2.6	3482	1686	395	4.36585	40.8360	2.0863	81.6509	3
0.3	3347	1725	402	4.4173	40.8091	2.0863	81.6509	4
0.1	3165	1730	403	4.42489	40.8091	2.0863	81.6509	5

جدول ۵ گام‌های بهینه‌سازی پل تقویت شده نوع ب (بار بحرانی مدل جایگزین در تمام گام‌ها $P_{cr} = 1782 \text{ N/mm}$)Table 5 Optimization steps for type 2 stiffened panel ($P_{cr} = 1782 \text{ N/mm}$ for surrogate model in all steps)

% PR ⁽⁺⁾	TNFE ^(*)	P_{cr} (FEM) (N/mm)	σ_{ave} (FEM) (MPa)	نقطه بهینه (مدل جایگزین) (mm)				گام		
				t_f	b_f	t_w	b_w			
26.8	7282	1305	359	1.46332	14.2904	1.81204	42.6347	1.89953	56.633	1
<u>1.3</u>	<u>9810</u>	<u>1759</u>	<u>471</u>	<u>1.46811</u>	<u>15.2583</u>	<u>1.81868</u>	<u>42.6649</u>	<u>1.99528</u>	<u>57.4497</u>	<u>20</u>
22.7	29685	1377	369	1.62576	14.4083	1.87008	42.6654	1.97145	58.4969	40
26.4	24036	1311	351	1.70851	14.1229	1.9014	42.8064	1.92987	58.429	60
<u>0.8</u>	<u>28524</u>	<u>1768</u>	<u>473</u>	<u>1.4634</u>	<u>15.3032</u>	<u>1.9033</u>	<u>42.6362</u>	<u>1.9401</u>	<u>57.6579</u>	<u>64</u>
27.9	46903	1284	344	1.65879	13.9001	1.83294	43.2961	1.92891	56.6794	80
<u>1.2</u>	<u>44621</u>	<u>1760</u>	<u>471</u>	<u>1.4815</u>	<u>15.2570</u>	<u>1.8163</u>	<u>42.6555</u>	<u>1.9939</u>	<u>57.4532</u>	<u>92</u>
6.2	43812	1671	477	1.62675	15.3071	1.81204	42.7438	1.97863	58.2477	100
0.7	<u>58093</u>	<u>1770</u>	<u>474</u>	<u>1.4633</u>	<u>15.3231</u>	<u>1.8737</u>	<u>42.6347</u>	<u>1.9617</u>	<u>57.6656</u>	<u>102</u>
8.2	72576	1635	438	1.8118	15.4264	1.8227	42.6402	1.911	57.9063	120
1.5	<u>67135</u>	<u>1756</u>	<u>470</u>	<u>1.4818</u>	<u>15.5108</u>	<u>1.8121</u>	<u>43.2138</u>	<u>1.9312</u>	<u>56.1282</u>	<u>121</u>
3.5	112213	1719	460	1.49898	15.2844	1.81625	42.664	1.98777	57.4342	140
5.9	200345	1677	449	1.47731	15.122	1.87928	42.6615	1.95159	57.454	160
15.2	63903	1512	405	1.58777	15.8518	1.84028	42.8079	1.9154	57.0996	171
5.7	42469	1681	450	1.46808	15.2581	1.81918	42.6652	1.99492	57.4497	172
<u>1.1</u>	<u>57201</u>	<u>1762</u>	<u>472</u>	<u>1.47782</u>	<u>15.2624</u>	<u>1.81496</u>	<u>42.6465</u>	<u>1.99585</u>	<u>57.4465</u>	<u>173</u>

(+) تعداد کل ارزیابی‌های تابع در فرایند بهینه‌سازی

(+) خطای پیش‌بینی

فرآیند نیز بیشتر است. همانطور که در تابع آزمون یک متغیره نشان داده شد طرح نمونه‌برداری اولیه از لحاظ نزدیکی نقاط نمونه‌برداری شده به بهینه حقیقی تابع حائز اهمیت است. همچنین با افزایش ابعاد طراحی، تعداد نقاط پرکننده لازم برای یافتن پاسخ بهینه افزایش می‌یابد.

بنابراین تعیین تعداد نقاط نمونه‌برداری و نقاط پرکننده لازم برای همگرایی فرایند از قبل ممکن نیست. به عنوان یک توصیه کلی، می‌توان حداقل نیمی از توان محاسباتی موجود را صرف ایجاد طرح نمونه‌برداری و نیمی دیگر را صرف به هنگام‌سازی مدل جایگزین با استفاده از نقاط پرکننده کرد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که در بهینه‌سازی به روشن مدل

جدول ۶ مقایسه نسبت‌های بی بعد بهینه حاصل از روش شناسه سازه و مدل جایگزین

Table 6 Comparison of the optimum dimensionless ratios obtained from SBO and structural index methods

اختلاف	نسبت بی بعد	مدل جایگزین	شناسه سازه
18.8%	$r_t = t_w/t$	2.121	1.7847
30.0%	$r_b = b_w/b$	0.500	0.714
30.2%	$SR = A_{st}/A_{sk}$	0.872	1.25
9.1%	$T = t_w/t$	0.909	1
16.4%	$\beta = A_4/A_3$	0.291	0.25

موضوع یکی دیگر از دلایل اختلاف نتایج با تحلیل‌های اجزاء محدود در روش مدل جایگزین می‌باشد.

نتایج روش مدل جایگزین فقط برای یک نوع ماده مشخص معتبر است. همچنین رابطه تقریبی به دست آمده برای تنفس فقط در فضای طراحی که توسط حدود بالایی و پایینی متغیرهای طراحی تعريف شده اعتبار دارد. از آنجایی که نتایج روش مدل جایگزین بر پایه تحلیل‌های اجزاء محدود است، کاربرد بیشتری در مراحل طراحی نهایی دارد و نتایج آن نسبت به روش‌های تحلیلی - تجربی مرسوم برای اندازه‌دهی پل تقویت شده فشاری کاربردی‌تر است. برخلاف روش‌های بهینه‌سازی معمول، مدل جایگزین به شدت از تعداد تحلیل‌های تابع اصلی می‌کاهد. برای مثال در این مطالعه، تعداد تحلیل‌های کمانش غیرخطی کمتر از 300 تحلیل می‌باشد در حالی که تعداد ارزیابی‌های تابع در هر گام فرایند بهینه‌سازی بیشتر از 10000 بار است. بدینه است که در این تحقیق منظور از ارزیابی تابع همان تحلیل غیرخطی کمانش و به دست آوردن بار بحرانی پل تقویت شده می‌باشد.

همگرایی فرایند مدل جایگزین وابسته به نوع مدل جایگزین می‌باشد. استفاده از مدل‌های جایگزین ساده‌تر باعث همگرایی سریع‌تر فرایند می‌شود اما کیفیت پاسخ نیز پایین‌تر است. با توجه به خاصیت نوسانی مدل جایگزین گوسی، همگرایی این فرایند کندتر بوده اما احتمال دستیابی آن به بهینه

نمودارهای نسبت بی بعد اجزاء پنل تقویت شده به تنش بحرانی کمانش غیرخطی، حدود نسبت های بهینه طراحی و نسبت منظری اجزاء را برای پنل تقویت شده نوع ب استخراج کرد. این حدود برای محدود کردن فضای طراحی در فرایند بهینه سازی فرآگیر و در یک فضای طراحی گسترده می تواند مؤثر باشد. نتایج این بررسی در شکل های 9 تا 14 نشان داده است.

با توجه به اینکه تنش تسلیم ماده 530 MPa تعريف شده است و حداقل تنش متوسط مجاز اعمالی بر سازه $478 \text{ MPa} = 531 \times 0.9$ در نظر گرفته می شود [3,2]. حدودی که در آنها امکان قرار گرفتن نقطه بهینه وجود دارد، در طرح هایی منظور می گردد که تنش بحرانی آنها بیشتر از 400 MPa باشد. به این ترتیب امکان تأثیر متقابل اجزاء پوسته و تقویت کننده نیز به طور محافظه کارانهای منظور گردیده است. با این توضیحات و با توجه به شکل های 9 تا 14 می توان حدود نسبت های بی بعد و نسبت های منظری بهینه را برای پنل تقویت شده نوع ب مطابق با روابط (13) تا (18) استخراج کرد. روابط (13)، (14) و (15) به ترتیب مربوط به نسبت سفتی، نسبت مساحت بال به جان تقویت کننده و نسبت ضخامت جان تقویت کننده به ضخامت پوسته می باشد. این نسبت ها متناظر با نسبت های طراحی بهینه ای هستند که در روش شناسه سازه به دست آمده اند. حدود بهینه نسبت های منظری به دست آمده برای اجزاء سطح مقطع نیز به ترتیب در روابط (16) تا (18) برای پوسته، جان تقویت کننده و بال تقویت کننده ارائه شده اند.

$$1.2 > SR > 0.6 \quad (13)$$

$$0.4 > \beta > 0.2 \quad (14)$$

$$1.5 > \frac{t_w}{t} > 0.8 \quad (15)$$

$$32 > \frac{b}{t} > 21 \quad (16)$$

$$28 > \frac{b_w}{t_w} > 18 \quad (17)$$

$$11 > \frac{b_f}{t_f} > 7.5 \quad (18)$$

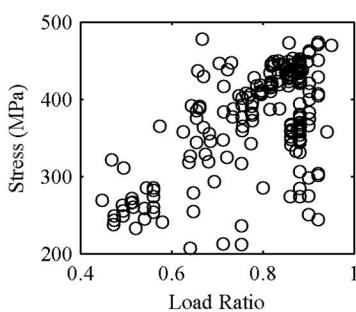


Fig. 8 Load ratio vs. critical stress (average)

شکل 8 بررسی نسبت بار با توجه به مقدار تنش بحرانی متوسط

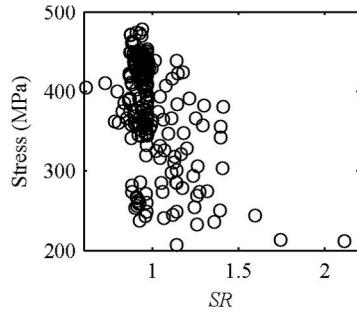


Fig. 9 Stiffening ratio vs. critical stress (average)

شکل 9 نسبت سفتی به مقدار تنش بحرانی متوسط

جایگزین به عنوان یک روش عددی، ابزار مدل سازی، نوع پیکربندی و بارگذاری منحصر به مسئله مورد بررسی می باشد، در نتیجه اعتبار پاسخ بهینه نیز معمولاً از طریق مقایسه آن با ابزار مدل سازی (تابع اصلی) [9, 17, 16, 11-9]، (تحلیل اجزاء محدود در این مطالعه) و یا تحلیل دقت پایین [18] (روش شناسه سازه در این مطالعه) مورد بررسی قرار می گیرد. به عبارت دیگر مقایسه پاسخ بهینه به دست آمده از مدل جایگزین با تابع اصلی (خطای پیش بینی) و قابل قبول بودن آن نشان دهنده صحت پاسخ می باشد.

5-1- بررسی تحلیل های کمانش پنل تقویت شده؛ تعیین حدود طراحی بهینه

یکی از روش های کاستن هزینه محاسباتی لازم برای جستجوی بهینه فرآگیر، تعیین روابط بین متغیرهای طراحی است. این روابط انتخاب ها را محدود کرده و همگرایی را در یک فضای طراحی گسترده تسهیل می کند. در موضوع طراحی پنل تقویت شده فشاری استفاده از این روابط به صورت تعیین حدودی برای نسبت منظری اجزاء مختلف (عرض به ضخامت جزء مورد نظر) و نسبت های بی بعد طراحی (مانند نسبت سفتی که عبارت است از مساحت تقویت کننده به مساحت پوسته) در روش های نیمه تحلیلی [4-2] مرسوم است. این نسبت ها معمولاً از نمودارها و آزمون های تجربی استخراج می شوند. در روش های عددی نیز استفاده از حدودی برای نسبت منظری اجزاء گزارش شده است [11]. اگرچه نحوه استخراج این حدود مشخص نیست.

در این مقاله با در اختیار داشتن 230 تحلیل غیرخطی کمانش از پنل تقویت شده نوع ب می توان حدودی را برای تعیین نسبت منظری بهینه و نسبت های بی بعد طراحی استخراج کرد. پراکندگی نقاط طراحی در حد امکان در طرح نمونه برداری اولیه (57 نقطه اول) لحظه گردیده است و در مابقی نقاط (173 نقطه پر کننده بعدی) با هدف رسیدن به بهینه و تحمل بار بحرانی یکسان نقاط پر کننده انتخاب شده اند. تمام پنل های تقویت شده مورد بررسی طول و مشخصات ماده یکسانی داشته و فقط در خصوصیات هندسی مقطع متفاوت هستند. با بررسی رفتار کمانشی نقاط شامل نقاط نمونه برداری شده و نقاط پر کننده می توان به نتایج جالب توجهی در خصوص تعیین حدود نسبت های بهینه دست یافت. ذکر این نکته ضروری است که مقایسه طرح های مختلف پنل تقویت شده یا ستون های عریض¹ که تحت بار محوری فشاری قرار دارند از لحظه بهینه بودن با مقایسه مقدار تنش بحرانی کمانش متناظر آنها میسر است. این مقایسه زمانی صحیح است که سازه های مورد بررسی توانایی تحمل بار بحرانی کمانش یکسانی را داشته و طول آنها نیز برابر باشد. از آنجایی که در تحلیل های اجزاء محدود روش مدل جایگزین، طول تمام پنل ها یکسان در نظر گرفته شده است، لذا نزدیک بودن مقدار بار بحرانی کمانش امکان مقایسه صحیح دو طرح مختلف را فراهم می آورد.

یکی از عوامل مهمی که در طراحی بهینه پنل تقویت شده فشاری تحت قید کمانش نقش دارد نسبت بار بحرانی کمانش غیرخطی به بار بحرانی کمانش خطی $(\frac{P_{cr,NL}}{P_{cr,L1}})$ است که در این مقاله به اختصار نسبت بار خوانده می شود. برای بررسی این عامل می توان نموداری را بر حسب نسبت بار و مقدار تنش بحرانی کمانش غیرخطی ترسیم کرد (شکل 8). با انجام این مقایسه مشاهده می گردد طرح هایی که مقدار نسبت بار آنها به واحد نزدیکتر است (یعنی مقدار بار بحرانی کمانش خطی و غیرخطی به هم نزدیک هستند)، به سطح بالاتری از تنش دست یافته و بهینه ترند. همچنین می توان با رسم

¹ Wide columns

جدول 7 مقایسه نسبت‌های بهینه طراحی حاصل با مرجع [4] و [11]

Table 7 Comparison of the optimum dimensionless ratios obtained from SBO and structural index methods

مطالعه حاضر	مرجع [4]	مرجع [11]	نسبت طراحی
18-28	18-22	3-20	$\frac{b_w}{t_w}$
7.5-11	6-8	3-10	$\frac{b_f}{t_f}$
0.34-0.4	0.4-0.5	-	$\frac{b_f}{b_w}$

برخی از نسبت‌های بهینه به دست آمده در روابط 13 تا 18 که در مرجع [4] به عنوان نسبت‌های کاربردی طراحی و در مرجع [11] به عنوان قیود طراحی پل تقویت شده فشاری گزارش شده‌اند، در جدول 7 مقایسه شده‌اند. راهبرد استخراج نتایج در مرجع [4] تجربی و کاربردی بوده، در مرجع [11] مبنایی برای آن ذکر نشده است و در تحقیق فعلی بر مبنای تحلیل عددی اجزاء محدود است، که می‌تواند دلیلی برای اختلاف در حدود گزارش شده باشد.

6- نتیجه‌گیری

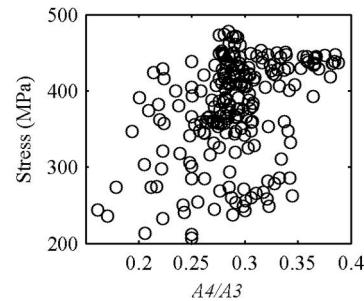
در این مقاله روش طراحی بهینه پل تقویت شده فشاری با استفاده از مدل جایگزین ارائه شد. در ابتدا چارچوب کلی بهینه‌سازی به روش مدل جایگزین مورد بررسی قرار گرفت. سپس با استفاده از دو مسئله، آزمون فرایند بهینه‌سازی به روش مدل جایگزین تشریح گردید. بهینه‌سازی دو نوع پل تقویت شده با استفاده از مدل جایگزین صورت پذیرفت. ابزار مدل‌سازی دقت بالا تحلیل‌های اجزاء محدود بوده است. یافته‌های تحقیق را می‌توان به صورت ذیل خلاصه کرد:

- ارائه یک روش ساده و کارآمد برای یافتن بهینه فرآگیر مدل جایگزین.
- بررسی تاثیر طرح نمونه‌برداری اولیه بر روی پاسخ بهینه با استفاده از تابع آزمون یک متغیره.
- معرفی ترکیب طرح نمونه‌برداری با پراکندگی مناسب (ابر مکعب لاتینی)، مدل جایگزین گوسی و روش ارائه شده برای یافتن بهینه فرآگیر مدل جایگزین که احتمال دستیابی به بهینه فرآگیر تابع اصلی را افزایش می‌دهد.
- طراحی بهینه پل تقویت شده با تقویت کننده تیغه‌ای (نوع الف) با 4 متغیر طراحی. پس از اضافه شدن 5 نقطه پرکننده به طرح نمونه‌برداری اولیه (با نقطه) فرایند به پاسخ بهینه همگرا گردید.
- طراحی بهینه پل تقویت شده با تقویت کننده تیغه‌ای با بال بیرون زده با 6 متغیر طراحی (نوع ب) که با اضافه کردن 173 نقطه پرکننده به طرح نمونه‌برداری اولیه (با 57 نقطه) صورت پذیرفت. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که شرط همگرایی پیشنهاد شده پاسخ بهینه را بدون تاثیر در کیفیت آن در اختیار می‌گذارد.
- مقایسه نتایج حاصل با نتایج روش شناسه سازه.

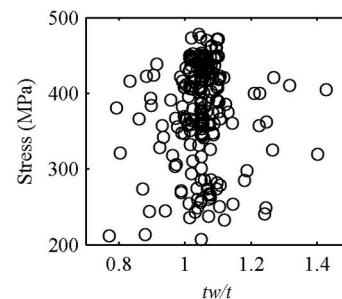
- استخراج نسبت‌های بهینه طراحی و مقایسه آن با گزارش دیگر محققان. در پایان نیز نتایج کلی تحلیل ارائه شد که می‌تواند راهگشای فرایندهای بهینه‌سازی فرآگیر باشد.

7- فهرست عالیم

$$\begin{aligned} A & \text{مساحت (mm}^2\text{)} \\ c^i & \text{مرکز تابع پایه؛ نقطه نمونه‌برداری شده} \\ E & \text{مدول الاستیک (Nmm}^{-2}\text{)} \end{aligned}$$

Fig. 10 $\beta = A_4/A_3$ ratio vs. critical stress (average)

شکل 10 نسبت $\beta = A_4/A_3$ به مقدار تنش بحرانی متوسط

Fig. 11 $T = t_w/t$ ratio vs. critical stress (average)

شکل 11 نسبت $T = t_w/t$ به مقدار تنش بحرانی متوسط

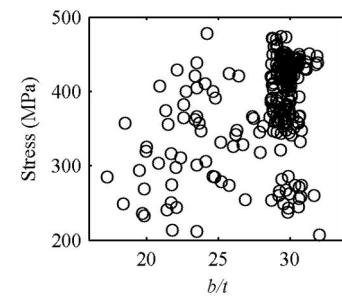


Fig. 12 Skin aspect ratio vs. critical stress (average)

شکل 12 نسبت منظری پوسته به مقدار تنش بحرانی متوسط

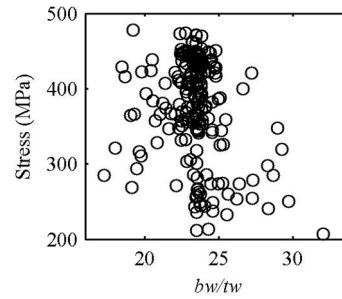


Fig. 13 Stiffener web aspect ratio vs. critical stress (average)

شکل 13 نسبت منظری جان تقویت کننده به مقدار تنش بحرانی متوسط

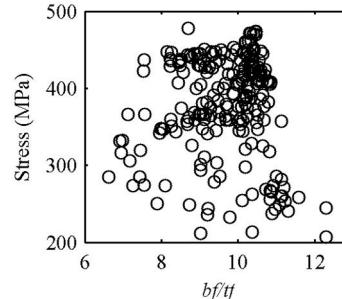


Fig. 14 stiffener Outstanding flange aspect ratio vs. critical stress (average)

شکل 14 نسبت منظری بال بیرون زده تقویت کننده به مقدار تنش بحرانی متوسط

8- مراجع

- [1] S. Timoshenko, S. Woinowski-Krieger, *Theory of plates and shells*, Second Edition, pp. 79-83, New York: McGraw-Hill Book Company, 1987.
- [2] M. Abdo, P. Piperni, F. Kafyeke, Conceptual design of stringer stiffened compression panels, *Proceedings of The Canadian aeronautics and space institute 50 AGM and conference*, Montreal, Canada, April 28-30, 2003.
- [3] S. Chintapalli, M. S. A. Elsayed, R. Sedaghati, M. Abdo, The development of a preliminary structural design optimization method of an aircraft wing-box skin-stringer panels, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 14, No. 3, pp. 188–198, 2010.
- [4] M. c. y. Niu, *Airframe stress analysis and sizing*, Third Edition, pp. 607-646, Hong Kong: Honk Kong Commilit Press, 2011.
- [5] M. Dezyani, S. Yousefi, H. Nakhforoosh, H. Dalayeli, Preliminary design of compression stiffened panel using structural index concept, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 67-76, 2015. (in Persian)
- [6] N. V. Queipo, R. T. Haftkaa, W. Shyya, T. Goela, R. Vaidyanathana, K. Tuckerb, Surrogate-based analysis and optimization, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 41, No. 1, pp. 1–28, 2005.
- [7] L. Leifsson, S. Koziel, *Variable-Fidelity Aerodynamic Shape Optimization*, S. Koziel, X.-S. Yang (Eds.), *Computational Optimization, Methods and Algorithms*, pp. 9.179-9.210: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [8] M. Mirshams, A. Jafarsalehi, Spacecraft conceptual design optimization using moving least square surrogate model for communication subsystem, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 209-216, 2015. (in Persian)
- [9] S. F. Badran, A. O. Nassef, S. M. Metwalli, Y-stiffened panel multi-objective optimization using genetic algorithm, *Thin-Walled Structures*, Vol. 47, No. 11, pp. 1331-1342, 2009.
- [10] L. Lamberti, S. Venkataraman, R. T. Haftka, T. F. Johnson, Preliminary design optimization of stiffened panels using approximate analysis models, *International journal for numerical methods in engineering*, Vol. 57, No. 10, pp. 1351-1380, 2003.
- [11] B. Colson, M. Bruneel, S. Grihon, C. Raick, A. Remouchamps, Optimization methods for advanced design of aircraft panels: A comparison, *Optimization and Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 583–596, 2010.
- [12] A. I. J. Forrester, A. Sóbester, A. J. Keane, *Engineering design via surrogate modelling a practical Guide*, pp. 43-84, Wiltshire: John Wiley & Sons, 2008.
- [13] S. N. Patnaik, D. A. Hopkins, Optimality of a fully stressed design, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol. 165, No. 1-4, pp. 215-221, 1998.
- [14] M. R. Khedmati, M. R. Zareei, P. Rigo, Sensitivity analysis on the elastic buckling and ultimate strength of continuous stiffened aluminium plates under combined in-plane compression and lateral pressure, *Thin-Walled Structures*, Vol. 47, No. 11, pp. 1232–1245, 2009.
- [15] K. Ghavami, M. R. Khedmati, *Nonlinear large deflection analysis of stiffened plates*, F. Ebrahimi (Eds.), *finite element analysis-applications in mechanical engineering*, pp. 4.87-4.113, Intech Open Access Publisher, 2012.
- [16] A. T. Neto, F. L. d. S. Bussamra, H. Araújo de Castro e Silva, A new metamodel for reinforced panels under compressive loads and its application to the fuselage conception, *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. 11, No. 2, pp. 223 – 244, 2014.
- [17] M. Olivero, D. Pasquale, A. Ghidoni, S. Rebay, Three-dimensional turbulent optimization of vaned diffusers for centrifugal compressors based on metamodel-assisted genetic algorithms, *Optimization and engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 973-992, 2014.
- [18] N. V. Nguyen, M. Tyan, J.-W. Lee, A modified variable complexity modeling for efficient multidisciplinary aircraft conceptual design, *Optimization and engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 483-505, 2015.

تابع اصلی (دقیق)	f
تابع تقریبی	\hat{f}
ممان اینرسی دوم سطح (mm^4)	I
طول پل تقویت شده (mm)	L
خطی	L_1
شدت بار محوری (Nmm^{-1})	N
غیرخطی	NL
بار کمانش (Nmm^{-1})	P
خطای پیش‌بینی	PR
تعداد زیر مجموعه‌های نقاط نمونه‌برداری شده	q
فاصله (نرم اقلیدسی)	r
نسبت بی بعد طراحی، نسبت عرض‌ها	r_b
نسبت بی بعد طراحی، نسبت ضخامت‌ها	r_t
طرح نمونه‌برداری شامل چندین نقطه طراحی	S
نسبت سفتی	SR
نسبت بی بعد طراحی	T
تعداد ارزیابی‌های تابع	$TNFE$
پارامتر وزنی	w
بردار ضرایب وزنی	W
متغیر طراحی	x
نقطه طراحی	X
پاسخ تابع اصلی	y
بردار پاسخ‌های تابع اصلی	Y
علایم یونانی	
نسبت بی بعد طراحی	β
پارامتر تنظیم	θ
ضریب پواسون	ν
تنش (Nmm^{-2})	σ
تابع تأثیر	ψ
بردار فواصل که تحت تابع تأثیر قرار گرفته	Ψ
زیرنویس‌ها	
متوسط	ave
کمانش کلی (کمانش ستون)	CB
بحرانی	cr
حد پایینی	lb
حالت بهینه	opt
پوسته	sk
کمانش محلی پوسته	SKB
تقویت کننده	st
کمانش محلی تقویت کننده	StB
حد بالایی	ub