



طراحی بهینه پل تقویت شده فشاری تحت قید کماتش با استفاده از مدل جایگزین گوسی

مرتضی دزیانی¹، حسین دلایلی^{2*}، شهرام یوسفی³، حمید فرخ‌فال⁴

- 1- دانشجوی دکتری، سازه‌های هوایی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر
 2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر
 3- دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر
 4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر
 *شاهین شهر، صندوق پستی 83145/115، hdalayeli@mut-es.ac.ir

اطلاعات مقاله

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

کلید واژگان:

پل تقویت شده فشاری
 بهینه‌سازی
 مدل جایگزین
 کماتش غیرخطی
 مدل گوسی

چکیده

در این مقاله با استفاده از نتایج روش طراحی تقریبی شناسه سازه به عنوان گام اولیه، فرایند طراحی بهینه پل تقویت شده فشاری با استفاده از مدل جایگزین گوسی ایجاد شده است. مدل‌سازی با استفاده از پاسخ‌های حاصل از تحلیل‌های غیرخطی کماتش 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 مرسوم در روش مدل جایگزین اصلاح گردید تا ضمن تسریع در همگرایی کیفیت پاسخ نیز کاهش نیابد. با معرفی یک تکنیک کارآمد، یافتن بهینه فراگیر مدل جایگزین بار تکرار تضمین گردیده است. فرایند طراحی بهینه برای دو نوع پل تقویت شده طراحی ارائه گردیده است. در پل 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 پل 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 فراگیر تابع اصلی معرفی شده است.

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.

1- مقدمه

کننده با مقطع مشخص تقویت شده و بارگذاری غالب بر روی آن محوری فشاری است. این پیکربندی کلی سازه‌ای را می‌توان در بسیاری از سازه‌های مهندسی مانند سازه‌های هوافضایی در بال و بدنه هواپیما و در بدنه کشتی در

پل تقویت شده فشاری عبارت است از یک پوسته که توسط یک تقویت

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:

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)

چندجمله‌ای درجه دوم با 21 ضریب به عنوان مدل جایگزین برای مدل‌سازی نیروی کماتش 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 و تابع دقیق در نقاط مهم طراحی 4.7% گزارش شده است [9].

طراحی اولیه پلن‌های 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 بهینه پلن 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 فراگیر در نرم‌افزار پاندا2 شروع چند باره و تصادفی جستجوی خطی برای یافتن بهینه فراگیر می‌باشد که می‌تواند لزوماً به بهینه فراگیر همگرا نشود.

مقایسه روش‌های مختلف بهینه‌سازی شامل برنامه‌ریزی محذب ترتیبی⁵، بهینه‌سازی فاقد مشتق، مدل جایگزین، مدل جایگزین پایه⁶ و الگوریتم ژنتیک برای طراحی پلن تقویت شده هواپیما در مرجع [11] مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق نیز از روش اجزاء محدود به عنوان ابزار تحلیل استفاده شده است. بار کماتش حاصل از مقادیر ویژه و استحکام نهایی به عنوان قید در فرایند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مدل‌سازی 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 کمترین 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 منطقی مجاز اجزاء می‌باشد. در این تحقیق نتایج کمی محرمانه 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 فراگیر یک تابع تحلیلی به صورت تصویری ارائه می‌گردد. نقضی که در اغلب تحقیقات مورد بررسی وجود دارد ارائه یک روش مدون و مطمئن برای یافتن بهینه فراگیر مدل جایگزین است. در این بخش یک تکنیک نوآورانه برای یافتن بهینه فراگیر مدل جایگزین ارائه می‌گردد. دومین گام ارزیابی روش مدل جایگزین قبل از اعمال آن به مسئله اصلی، نشان دادن کارایی این روش برای یافتن طراحی بهینه پلن 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 پلن 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 کماتش 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 پلن تقویت شده فشاری را در اختیار می‌گذارد [2-4]. با توجه به اهمیت موضوع پایداری در این نوع سازه‌ها، قیدهای طراحی شامل کماتش کلی، محلی و کریپلینگ مقطع تقویت کننده می‌باشد. یکی دیگر از روش‌های تقریبی برای طراحی اولیه پلن 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 پلن 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 اجتناب‌ناپذیر 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 مواقع 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 هوافضا مانند سازه، آیرودینامیک [7] و حتی طراحی مفهومی فضاپیما [8] نیز به کار گرفته شده است.

در مرجع شماره [9] یک تابع جایگزین برای پیش‌بینی بار کماتش نهایی ترکیب ورق و تقویت کننده لاشکل 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 لاشکل، 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

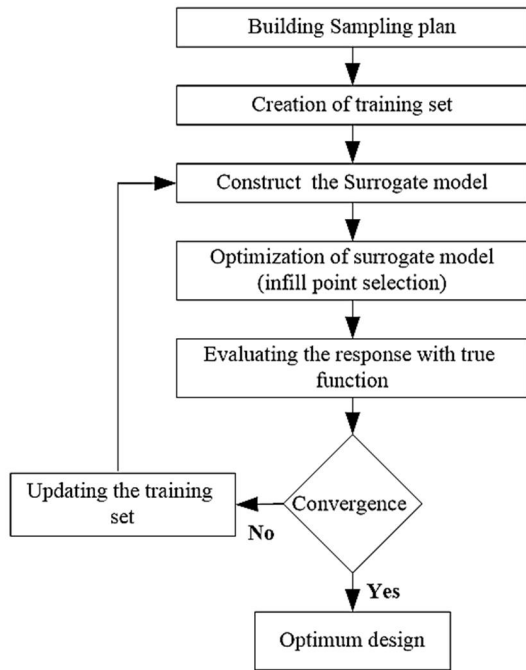


Fig. 1 Surrogate based optimization flowchart

شکل 1 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 خطا پیش‌بینی کند. خطای پیش‌بینی عبارت است از اختلاف بین مقدار تقریبی حاصل از مدل جایگزین (\hat{f}) و مقدار دقیق تابع (f) .

یکی از متداول‌ترین توابعی که به عنوان مدل جایگزین استفاده می‌شود، توابع با پایه شعاعی⁶ می‌باشند. اگر f به عنوان یک تابع عددی فرض شود، به این مفهوم که به ازاء پارامتر ورودی $X(x_1, x_2, \dots, x_k)$ مقدار خروجی عددی γ را بدهد و بر اساس طرح نمونه‌برداری با n نقطه $S = \{X^1, X^2, \dots, X^n\}$ پاسخ‌های $Y = \{\gamma^1, \gamma^2, \dots, \gamma^n\}$ موجود باشند، تقریب تابع با پایه شعاعی به شکل عمومی مطابق با رابطه (1) تعریف می‌شود.

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

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 3-2 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.

در گام بعدی و با استفاده از نتایج حل مسائل آزمایشی، یک چارچوب مناسب برای طراحی بهینه پل تقویت شده با استفاده از مدل جایگزین گوسی¹ 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 می‌گردند. در پایان نیز نتایج حاصل از این تحقیق به صورت توصیه‌های کلی و نتایج کاربردی ارائه می‌گردد و مسیر برای بهینه‌سازی فراگیر مشخص می‌شود.

2- چارچوب بهینه‌سازی به روش مدل جایگزین

راهبرد اصلی بهینه‌سازی به روش مدل جایگزین، ایجاد یک مدل جایگزین (مافوق 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 1 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 1).

1-2- 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) همپوشانی ندارند [12]. این خاصیت باعث می‌شود که هر نقطه نمونه‌برداری منحصرأ مکانی خاص از فضای طراحی را بدون همپوشانی 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 لحاظ 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 متنوعی برای ساختن مدل جایگزین با استفاده از داده‌های

¹ Gaussian surrogate model

² Meta model

³ Training set

⁴ Latin Hypercube Sampling: LHS

⁵ Space filling

⁶ Radial Basis Functions: RBF

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

2-4- به هنگام‌سازی مدل جایگزین با استفاده از نقاط پرکننده⁵

اضافه کردن نقاط پرکننده به طرح نمونه‌برداری اولیه و پس از ارزیابی مدل جایگزین در مقایسه با تابع اصلی صورت می‌پذیرد. به این منظور پس از به دست آوردن نقاط داده و ایجاد مجموعه یادگیری، مدل جایگزین ساخته می‌شود. با داشتن مدل جایگزین به صورت یک تابع تحلیلی، بهینه فراگیر آن با روش بخش 2-3 به دست می‌آید. سپس این بهینه با استفاده از تابع 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 1). 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 آمده‌است می‌تواند در نهایت به بهینه محلی تابع همگرا شود. این نقطه می‌تواند بهینه فراگیر نیز باشد. در صورتیکه این روش اضافه کردن نقاط پرکننده با یک مدل جایگزین با انعطاف‌پذیری بالا ترکیب شود، احتمال اینکه نقطه بهینه نهایی، بهینه فراگیر 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 دیگری نیز استفاده کرد [12].

2-5- معیار همگرایی

عدم بهبود مقدار تابع هدف در گام‌های متوالی (معمولاً 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 ممکن⁶ 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 طولانی‌تر 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 $i+t$ و $t>1$) عملاً فرایند بهینه‌سازی به مقدار f_{opt} همگرا شده است. البته در هر صورت شرط قابل قبول بودن خطای پیش‌بینی می‌بایست برآورده گردد.

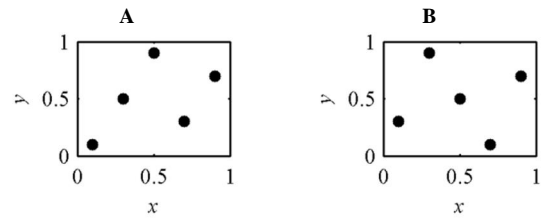


Fig. 2 Latin hyper cube sampling plan : A: random, B: optimum

شکل 2 طرح نمونه‌برداری ابر مکعب لاتینی A: طرح تصادفی، B: طرح بهینه

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

پارامتر تنظیم (θ) را نیز می‌توان با استفاده از یک معیار بهینه‌سازی مناسب یافت. روشی که در این تحقیق برای یافتن مقدار پارامتر تنظیم استفاده می‌شود، روش اعتبارسنجی متقاطع¹ نام دارد. در این روش داده‌های نمونه‌برداری شده به q زیر مجموعه تقریباً مساوی 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 q خطای به دست آمده است [6]. در نهایت مقداری که کمترین خطا را ایجاد نماید به عنوان پارامتر تنظیم مدل جایگزین انتخاب می‌شود.

2-3- 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 ذرات² با توجه به احتمال دستیابی به بهینه، از پرفرودارترین 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 فراگیر 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 فراگیر مدل جایگزین است که تابع تحلیلی آن در بخش مدل‌سازی به دست می‌آید.

در این تحقیق، الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم ترتیبی³ از جعبه ابزار بهینه‌سازی متلب⁴ 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 3)، 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 فراگیر 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

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

مطابق با جدول 1 فقط در ردیف سوم که تمام نقاط نمونه برداری شده اولیه در یک سوم ابتدایی فضای طراحی متمرکز شده‌اند، مدل جایگزین به پاسخ بهینه محلی همگرا می‌شود. همچنین در ردیف هشتم، اگرچه نقطه نمونه برداری شده بسیار نزدیک به بهینه فراگیر 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 فراگیر 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.

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

روش طراحی پل 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 پل تقویت شده در اختیار می‌گذارد [5].

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

در رابطه (4)، N شدت بار محوری و L طول پل تقویت شده است. در این بخش توانایی روش مدل جایگزین برای یافتن بهینه پل تقویت شده با تقویت کننده تیغه‌ای (شکل 5) تحت قیود کمانش و تابع هدف بیشینه کردن تنش بررسی می‌شود. در شکل 5 پل تقویت شده با تقویت کننده تیغه‌ای با بال بیرون زده نشان داده شده است که با حذف بال آن تبدیل به پل 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 تنیده¹ و ارضاء همزمان قیود طراحی، یک پاسخ بهینه فراگیر است [13]. نتایج بهینه روش شناسه سازه برای پل تقویت شده با تقویت کننده تیغه‌ای در روابط (5) تا (8) به ترتیب برای عرض و ضخامت پوسته و نسبت‌های بی‌بعد طراحی آمده است [5].

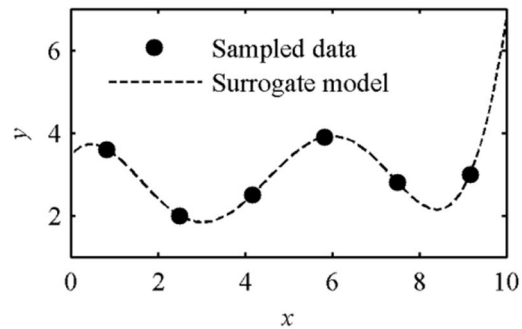


Fig. 3 Behavior of the surrogate model between the sampled points
شکل 3 رفتار مدل جایگزین بین نقاط نمونه برداری شده

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 فراگیر 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 فراگیر می‌باشند.

3-1- 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 متوالی 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 فراگیر 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:

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

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

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

$$\theta = 0.1100$$

اضافه کردن به نقاط پرکننده فقط دقت پیش‌بینی را افزایش خواهد داد. در این مثال اگر چه مدل جایگزین بهینه فراگیر 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

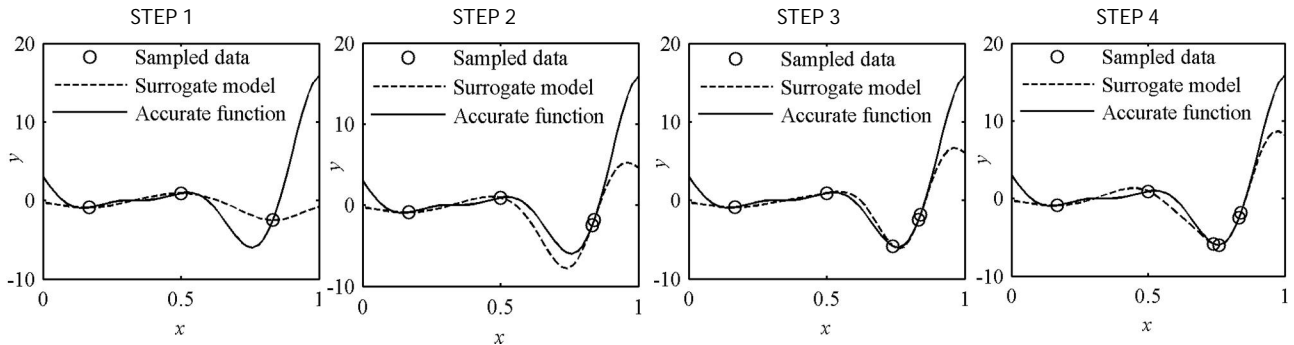


Fig. 4 Example of Surrogate modeling and optimization : one variable test function

شکل 4 مثالی از فرایند مدل سازی و بهینه سازی به روش مدل جایگزین: تابع آزمون یک متغیره

جدول 2 نتایج بهینه سازی پنل تقویت شده با تقویت کننده تیغه ای (تمام ابعاد به mm و تابع هدف (تنش) با واحد MPa می باشد)

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 ⁽⁴⁾	$\psi(r)$
	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

⁽⁴⁾ تعداد گام های همگرایی

انتظار می رود. در کلیه تحلیل های صورت گرفته در این مقاله به منظور قابل مقایسه بودن نتایج، طول پنل تقویت شده $L = 762$ mm، مدول الاستیک $E = 73774$ MPa و ضریب پواسون $\nu = 0.33$ در نظر گرفته شده است.

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

بهینه سازی فراگیر نیازمند یک یا دو مرتبه تلاش محاسباتی بیشتر نسبت به بهینه سازی محلی می باشد [10]. از این رو هدف اولیه از این تحقیق ارائه یک طرح بهینه محلی و نه لزوماً فراگیر است. امکان دستیابی به بهینه محلی و یا فراگیر تابع اصلی، وابسته به طرح نمونه برداری اولیه، نوع مدل جایگزین، تکنیک اضافه کردن نقاط پرکننده و روش یافتن بهینه فراگیر مدل جایگزین است. امکان قضاوت قطعی در مورد دستیابی به بهینه فراگیر یک تابع اصلی که رفتار آن مجهول بوده و صرفاً با نمونه برداری از فضای طراحی رفتار آن تقریب زده می شود وجود ندارد. البته با توجه به نتایج بخش 3 و موفقیت روش پیشنهادی در یافتن بهینه فراگیر مسائل آزمون، استفاده از مدل جایگزین گوسی به همراه طرح نمونه برداری ابرمکعب لاتینی و روش پیشنهاد شده برای یافتن بهینه فراگیر مدل جایگزین، احتمال همگرایی به بهینه فراگیر تابع اصلی را افزایش می دهد. در هر صورت این بهینه سازی اولیه ضروری بوده و مسیر دستیابی به بهینه فراگیر را مشخص می کند. 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 پنل تقویت شده فشاری در دو پیکربندی پنل تقویت شده با تقویت کننده تیغه ای (نوع الف) و پنل تقویت شده با تقویت کننده تیغه ای با بال بیرون زده (نوع ب) مورد بررسی قرار می گیرد (شکل 5).

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

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

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

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

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) می باشد. لازم به ذکر است که کمانش کلی یا کمانش ستون به حالتی از ناپایداری سازه تحت بار محوری فشاری گویند که کل سازه دچار اعوجاج و تغییر شکل می گردد. در مقابل این نوع ناپایداری، در حالت کمانش محلی فقط بخش هایی از پوسته و یا تقویت کننده دچار اعوجاج و تغییر شکل می شوند، به عبارت دیگر در این حالت فقط تغییر شکل اجزاء ورقی سازه به طور جداگانه رخ می دهد.

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

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

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

در این مثال، مدل جایگزین با استفاده از یک طرح نمونه برداری 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 می گذارد. پاسخ حاصل با کمترین مقدار تنش به دست آمده از روابط (9) تا (11) مقایسه و اعتبار سنجی می گردد، سپس به عنوان یک نقطه پرکننده در گام بعدی فرایند منظور می گردد. با توجه به توضیحات فوق نتایج بهینه سازی 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، مدل های جایگزین ساده از لحاظ سرعت همگرایی بسیار مطلوب هستند (تعداد کم گام های همگرایی). از طرف دیگر مدل جایگزین گوسی با توجه به انعطاف پذیری 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 گونه ای تعریف شده اند که مسئله دارای پاسخ های ممکن فراوان در نزدیکی حدود بهینه می باشد، 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 پنل تقویت شده به صورت یک مسئله بهینه‌سازی با قرار دادن مقدار بار بحرانی کماتش به صورت یک قید تساوی تعریف می‌شود. تابع هدف نیز بیشینه کردن تنش متوسط در سازه است. متغیرهای طراحی نیز ابعاد مقطع پنل تقویت شده می‌باشند (رابطه 12). جنس پوسته و تقویت کننده یکسان بوده و پنل از نوع یکپارچه¹ در نظر گرفته می‌شود.

$$P_{Cr} = N \quad \text{قید تساوی:} \\ \sigma_{ave} \quad \text{تابع هدف:} \\ b, t, b_w, t_w, b_f, t_f \quad \text{متغیرهای طراحی:} \quad (12)$$

مشابه روش شناسه سازه در اینجا نیز تحلیل‌های اجزاء محدود فقط با در نظر گرفتن یک تقویت کننده و پوسته متناظر آن (شکل 5) انجام می‌شود. با این شرایط، طراحی بهینه، طرحی خواهد بود با بار بحرانی برابر با N و بالاترین تنش در میان طرح‌های ممکن².

با توجه به مرتبط بودن بار بحرانی کماتش و تنش متوسط متناظر با آن، ایجاد یک مدل جایگزین برای پیش‌بینی تنش بحرانی (تابع هدف) و بار بحرانی کماتش (قید تساوی) در سازه کافی است. در صورتیکه طرح بهینه روش شناسه سازه (جدول 3) با روش اجزاء محدود تحلیل کماتش غیرخطی شود، بار بحرانی کماتش برای پنل تقویت شده نوع الف و ب به ترتیب برابر با مقادیر $N_a = 1731 \text{ N/mm}$ و $N_b = 1782 \text{ N/mm}$ خواهد بود. این مقادیر به عنوان بار بحرانی طراحی در بهینه‌سازی به روش مدل جایگزین مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

1-4- نتایج بهینه‌سازی پنل تقویت شده

تلاش برای یافتن طرح بهینه پنل تقویت شده نوع الف با پنج گام به نتیجه می‌رسد (جدول 4). در این فرایند از نقاط پرکننده‌ای که بر اساس بهینه‌سازی 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 خطا 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 پنل تقویت شده نوع ب، فرایند بهینه‌سازی پس از اضافه شدن 173 نقطه پرکننده متوقف شده است. با در نظر گرفتن تعریف همگرایی ارائه شده در بخش 2-5، فرایند بهینه‌سازی عملاً با اضافه شدن 64 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 173 ادامه پیدا کرده است. تعداد زیاد نقاط پرکننده اضافه شده در این مرحله در مقایسه با تعداد ارزیابی‌های تابع هدف و قیود در هر گام بهینه‌سازی کاملاً به صرفه است (جدول 5). همانطور که از نتایج جدول 5 مشخص است، بهینه‌سازی 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.

2-4- تحلیل کماتش غیرخطی پنل 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 11 می‌باشد.

در این تحقیق از نتایج روش تحلیلی شناسه سازه برای تعیین حدود متغیرهای طراحی در فرایند بهینه‌سازی مدل جایگزین استفاده می‌شود (جدول 3). 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 بی‌بعد شوند در گستره $\pm 30\%$ حدود بهینه روش شناسه سازه قرار داشته باشند. به عنوان مثال:

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

تمام ابعاد مقطع به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین در پنل تقویت شده نوع الف، تعداد متغیرهای طراحی $k = 4$ و در حالت پنل تقویت شده نوع ب، $k = 6$ می‌باشد (شکل 5).

پارامترهای بی‌بعد نشان داده شده در جدول 3، همان مقادیر بهینه‌ای هستند که توسط روش شناسه سازه و به صورت عمومی به دست آمده‌اند [5]. مجموعه یادگیری برای پنل تقویت شده نوع الف با 55 نقطه و برای نوع ب با 57 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 کماتش خطی و غیرخطی برای هر نقطه نمونه‌برداری متناظر با یک طرح ابعادی منحصر به فرد پنل 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 (1)) از طریق درونیابی مدل جایگزین در نقاط نمونه‌برداری شده به دست می‌آید. به این طریق به ازاء هر نقطه نمونه‌برداری

جدول 3 حدود متغیرهای طراحی برای دو نوع پنل 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)

پنل تقویت شده با تقویت کننده تیغه‌ای (نوع الف)			
متغیر طراحی	حد پایینی	مقدار بهینه ⁽¹⁾	حد بالایی
b	59.9154	68.3140	81.6509
t	2.0863	2.3787	2.843
b_w	40.8091	48.7762	55.6134
t_w	3.5519	4.2453	4.8404
نسبت‌های بی‌بعد طراحی			
$r_t = t_w/t$	1.2493	1.7847	2.3201
$r_b = b_w/b$	0.4998	0.714	0.9282
پنل تقویت شده با تقویت کننده تیغه‌ای با بال بیرون زده (نوع ب)			
متغیر طراحی	حد پایینی	مقدار بهینه	حد بالایی
b	44.6933	50.9582	60.9067
t	1.8995	2.1658	2.5886
b_w	42.6347	50.9582	58.1013
t_w	1.8120	2.1658	2.4694
b_f	13.1988	15.7756	17.9870
t_f	1.4633	1.749	1.9942
نسبت‌های بی‌بعد طراحی			
$SR = A_{st}/A_{sk}$	0.6125	1.25	2.1125
$T = t_w/t$	0.7	1	1.3

⁽¹⁾ مقدار بهینه حاصل از روش شناسه سازه [5]

¹ Integral stiffened panel

² Feasible designs

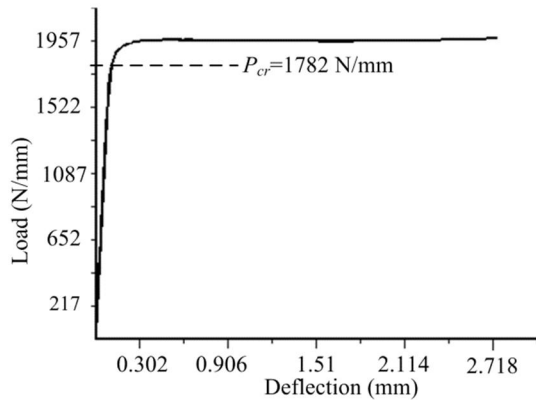


Fig. 6 Load-deflection curve for determining nonlinear buckling load

شکل 6 نمودار نیرو- جابجایی برای تعیین بار کمانش غیرخطی

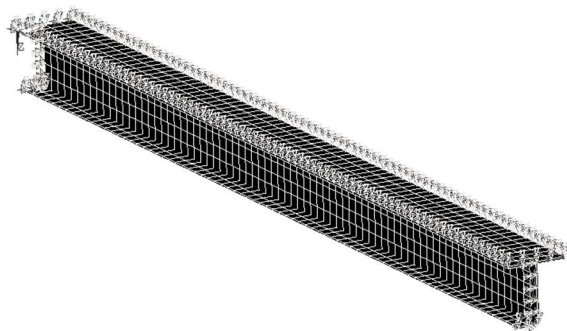


Fig. 7 FEM model and the corresponding boundary condition

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 T ، β و r_b حاصل از دو روش کمتر از بیست درصد می‌باشد. از آنجایی که این نسبت‌ها مربوط به پیش‌بینی کمانش محلی اجزاء پل تقویت شده می‌باشند، می‌توان نتیجه گرفت که روابط تجربی به کارگرفته شده در روش شناسه سازه تقریباً با نتایج حاصل از تحلیل‌های اجزاء محدود در این حوزه همخوانی دارند. از طرفی اختلاف بین نسبت‌های r_b و SR 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 محافظه‌کارانه 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 خرابی 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 پل تقویت شده

با استفاده از نرم‌افزار انسیس ویرایش 11 می‌باشد. این نرم‌افزار توانایی انجام تحلیل‌های خطی و غیرخطی کمانش را دارد.

به منظور انجام تحلیل غیرخطی کمانش، ابتدا یک تحلیل خطی کمانش از پل تقویت شده صورت پذیرفته و مقدار بار بحرانی کمانش خطی (P_{crLI}) 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_{crNL}) 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 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 غیر خطی به دست خواهد آمد. مقدار و روش در نظر گرفتن نقص اولیه سازه تأثیر به‌سزایی 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 حداکثر ضخامت پوسته تعیین می‌گردد. سپس بارگذاری مجدداً 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 (شکل 181²) 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 پل 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 4 گام‌های بهینه‌سازی پل تقویت شده نوع الف (بار بحرانی مدل جایگزین در تمام گام‌ها $P_{cr} = 1731$ N/mm)

Table 4 Optimization steps for type 1 stiffened panel ($P_{cr} = 1731$ N/mm for surrogate model in all steps)

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

جدول 5 گام‌های بهینه‌سازی پل تقویت شده نوع ب (بار بحرانی مدل جایگزین در تمام گام‌ها $P_{cr} = 1782$ N/mm)

Table 5 Optimization steps for type 2 stiffened panel ($P_{cr} = 1782$ N/mm for surrogate model in all steps)

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

(¹) تعداد کل ارزیابی‌های تابع در فرایند بهینه‌سازی

(²) خطای پیش‌بینی

فراگیر 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 روش مدل

جدول 6 مقایسه نسبت‌های بی‌بعد 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	شناسه سازه	مدل جایگزین	نسبت بی‌بعد
18.8%	1.7847	2.121	$r_t = t_w/t$ (نوع الف)
30.0%	0.714	0.500	$r_b = b_w/b$ (نوع الف)
30.2%	1.25	0.872	$SR = A_{st}/A_{sk}$ (نوع ب)
9.1%	1	0.909	$T = t_w/t$ (نوع ب)
16.4%	0.25	0.291	$\beta = A_4/A_3$ (نوع ب)

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 تنش فقط در فضای طراحی که توسط حدود بالایی و پایینی متغیرهای طراحی تعریف 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. بر خلاف 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. بدیهی 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 بی‌بعد اجزاء پل تقویت شده به تنش بحرانی کمانش غیرخطی، حدود نسبت‌های بهینه طراحی و نسبت منطری اجزاء را برای پل تقویت شده نوع ب استخراج کرد. این حدود برای محدود کردن فضای طراحی در فرایند بهینه‌سازی فراگیر و در یک فضای طراحی گسترده می‌تواند مؤثر باشد. نتایج این بررسی در شکل‌های 9 تا 14 نشان داده شده است.

با توجه به اینکه تنش تسلیم ماده 530 MPa تعریف شده است و حداکثر تنش متوسط مجاز اعمالی بر سازه $0.9 \times 531 = 478 \text{ MPa}$ در نظر گرفته می‌شود [3,2]، حدودی که در آنها امکان قرار گرفتن نقطه بهینه وجود دارد، در طرح‌هایی منظور می‌گردد که تنش بحرانی آنها بیشتر از 400 MPa باشد. به این ترتیب امکان تأثیر متقابل اجزاء پوسته و تقویت کننده نیز به طور محافظه‌کارانه‌ای منظور گردیده است. با این توضیحات و با توجه به شکل‌های 9 تا 14 می‌توان حدود نسبت‌های بی‌بعد و نسبت‌های منطری بهینه را برای پل 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 می‌باشد. این نسبت‌ها متناظر با نسبت‌های طراحی بهینه‌ای هستند که در روش شناسه سازه به دست آمده‌اند. حدود بهینه نسبت‌های منطری 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 شده‌اند.

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

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

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

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

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

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

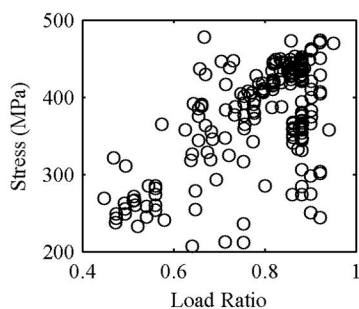


Fig. 8 Load ratio vs. critical stress (average)

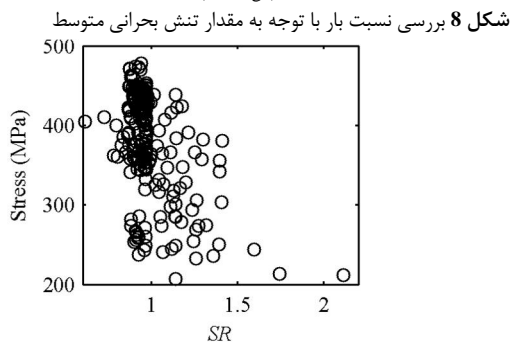


Fig. 9 Stiffening ratio vs. critical stress (average)

شکل 9 نسبت سفتی به مقدار تنش بحرانی متوسط

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

1-5- بررسی تحلیل‌های کمانش پل تقویت شده: تعیین حدود طراحی بهینه

یکی از روش‌های کاستن هزینه محاسباتی لازم برای جستجوی بهینه فراگیر، تعیین روابط بین متغیرهای طراحی است. این روابط انتخاب‌ها را محدود کرده و همگرایی را در یک فضای طراحی گسترده تسریع می‌کند. در موضوع طراحی پل تقویت شده فشاری استفاده از این روابط به صورت تعیین حدودی برای نسبت منطری اجزاء مختلف (عرض به ضخامت جزء مورد نظر) و نسبت‌های بی‌بعد طراحی (مانند نسبت سفتی که عبارت است از مساحت تقویت کننده به مساحت پوسته) در روش‌های نیمه تحلیلی [2-4] مرسوم است. این نسبت‌ها معمولاً از نمودارها و آزمون‌های تجربی استخراج می‌شوند. در روش‌های عددی نیز استفاده از حدودی برای نسبت منطری اجزاء گزارش شده است [11]، اگرچه نحوه استخراج این حدود مشخص نیست.

در این مقاله با در اختیار داشتن 230 تحلیل غیرخطی کمانش از پل تقویت شده نوع ب می‌توان حدودی را برای تعیین نسبت منطری بهینه و نسبت‌های بی‌بعد طراحی استخراج کرد. پراکندگی نقاط طراحی در حد امکان در طرح نمونه‌برداری اولیه (57 نقطه اول) لحاظ گردیده است و در مابقی نقاط (173 نقطه پرکننده بعدی) با هدف رسیدن به بهینه و تحمل بار بحرانی یکسان نقاط پرکننده انتخاب شده‌اند. تمام پل‌های تقویت شده مورد بررسی طول و مشخصات ماده یکسانی داشته و فقط در خصوصیات هندسی مقطع متفاوت هستند. با بررسی رفتار کمانشی نقاط داده شامل نقاط نمونه‌برداری شده و نقاط پرکننده می‌توان به نتایج جالب توجهی در خصوص تعیین حدود نسبت‌های بهینه دست یافت. ذکر این نکته ضروری است که مقایسه طرح‌های مختلف پل تقویت شده یا ستون‌های عریض¹ که تحت بار محوری فشاری قرار دارند از لحاظ بهینه بودن با مقایسه مقدار تنش بحرانی کمانش متناظر آنها میسر است. این مقایسه زمانی صحیح است که سازه‌های مورد بررسی توانایی تحمل بار بحرانی کمانش یکسانی را داشته و طول آنها نیز برابر باشد. از آنجایی که در تحلیل‌های اجزاء محدود روش مدل جایگزین، طول تمام پل‌ها یکسان در نظر گرفته شده است، لذا نزدیک بودن مقدار بار بحرانی کمانش امکان مقایسه صحیح دو طرح مختلف را فراهم می‌آورد.

یکی از عوامل مهمی که در طراحی بهینه پل تقویت شده فشاری تحت قید کمانش نقش دارد نسبت بار بحرانی کمانش غیرخطی به بار بحرانی کمانش خطی $(\frac{P_{crNL}}{P_{crLI}})$ است که در این مقاله به اختصار نسبت بار خوانده می‌شود. برای بررسی این عامل می‌توان نموداری را برحسب نسبت بار و مقدار تنش بحرانی کمانش غیرخطی ترسیم کرد (شکل 8). با انجام این مقایسه مشاهده می‌گردد طرح‌هایی 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 بهینه‌ترند. همچنین می‌توان 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 فراگیر 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 (بر مکعب لاتینی)، مدل جایگزین گوسی و روش ارائه شده برای یافتن بهینه فراگیر مدل جایگزین که احتمال دستیابی به بهینه فراگیر 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 55 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 فراگیر باشد.

7- فهرست علائم

A	مساحت (mm^2)
c^i	مرکز تابع پایه؛ نقطه نمونه‌برداری شده
E	مدول الاستیک (Nmm^{-2})

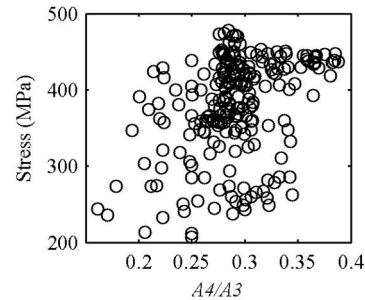


Fig. 10 $\beta = A_4/A_3$ ratio vs. critical stress (average)

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

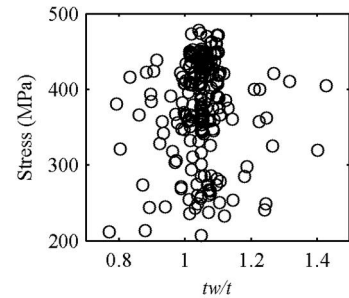


Fig. 11 $T = t_w/t$ ratio vs. critical stress (average)

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

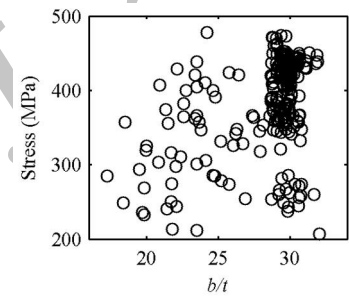


Fig. 12 Skin aspect ratio vs. critical stress (average)

شکل 12 نسبت منطری پوسته به مقدار تنش بحرانی متوسط

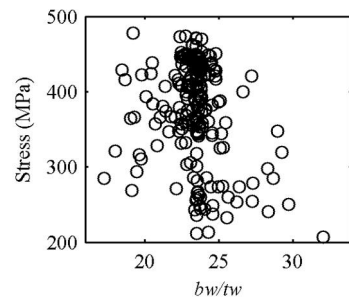


Fig. 13 Stiffener web aspect ratio vs. critical stress (average)

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

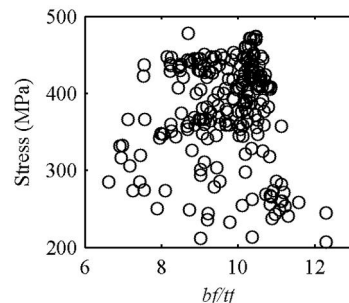


Fig. 14 stiffener Outstanding flange aspect ratio vs. critical stress (average)

شکل 14 نسبت منطری 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 Conmilit 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. Haftka, 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. Bruyneel, 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. Söbester, 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.

f	تابع اصلی (دقیق)
\hat{f}	تابع تقریبی
I	ممان اینرسی دوم سطح (mm^4)
L	طول پیل تقویت شده (mm)
L_I	خطی
N	شدت بار محوری (Nmm^{-1})
NL	غیر خطی
P	بار کمانش (Nmm^{-1})
PR	خطای پیش‌بینی
q	تعداد زیر مجموعه‌های نقاط نمونه‌برداری شده
r	فاصله (نرم اقلیدسی)
r_b	نسبت بی‌بعد طراحی، نسبت عرض‌ها
r_t	نسبت بی‌بعد طراحی، نسبت ضخامت‌ها
S	طرح نمونه‌برداری شامل چندین نقطه طراحی
SR	نسبت سفتی
T	نسبت بی‌بعد طراحی
$TNFE$	تعداد ارزیابی‌های تابع
w	پارامتر وزنی
W	بردار ضرایب وزنی
x	متغیر طراحی
X	نقطه طراحی
γ	پاسخ تابع اصلی
Y	بردار پاسخ‌های تابع اصلی

علائم یونانی

β	نسبت بی‌بعد طراحی
θ	پارامتر تنظیم
ν	ضریب پواسون
σ	تنش (Nmm^{-2})
ψ	تابع تاثیر
Ψ	بردار فواصل که تحت تابع تاثیر قرار گرفته

زیر نویس‌ها

ave	متوسط
CB	کمانش کلی (کمانش ستون)
cr	بحرانی
lb	حد پایینی
opt	حالت بهینه
sk	پوسته
SkB	کمانش محلی پوسته
st	تقویت کننده
StB	کمانش محلی تقویت کننده
ub	حد بالایی