ماهنامه علمى پژوهشى



مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

طراحی بهینه ینل تقویت شده فشاری تحت قید کمانش با استفاده از مدل جایگزین کوسی

مرتضى دزيانى¹، حسين دلايلى ^{2*}، شهرام يوسفى ³، حميد 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

*شاهين شهر، صندوق پستى hdalayeli@mut-es.ac.ir، 83145/115

چکیدہ	اطلاعات مقاله
ر این مقاله با استفاده از نتایج روش طراحی تقریبی شناسه سازه به عنوان گام اولیه، فرایند طراحی بهینه پنل تقویت شده فشاری با استفاده	مقاله پژوهشی کامل
مدل جایگزین گوسی ایجاد شده است. مدلسازی با استفاده از پاسخهای حاصل از تحلیلهای غیرخطی کمانش اجزاء محدود صورت گرفت	دريافت: 03 فروردين 1395 : م بـ 12 بـ م بـ 1305
است. از مدل جایگزین برای کاهش تعداد تحلیلهای اجزاء محدود و کاهش زمان طراحی استفاده شده است. با به کارگیری نقاط پرکننده د	پدیرش. ۱2 اردیبهشت ۱۵۹۵ ارائه در سایت: 31 خرداد 1395
— طول فرایند بهینهسازی، همگرایی به بهینه محلی تضمین شده است. از دو مسئله آزمایشی برای به تصویر کشیدن راهبرد روش مدل جایگزیز	ر از گان: کلید واژگان:
بررسی حساسیت طرح نموندبرداری اولیه و انتخاب گام نهایی مناسب استفاده شده است. همچنین شرط همگرایی مرسوم در روش مدل جایگزیر	پنل تقویت شدہ فشاری
اصلاح گردید تا ضمن تسریع در همگرایی کیفیت پاسخ نیز کاهش نیابد. با معرفی یک تکنیک کارآمد، یافتن بهینه فراگیر مدل جایگزین در ه	بهینهسازی
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 تعدا	مدل جایگزین
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 تقوید	کمانش غیرخطی
شده نوع ب با شش متغیر طراحی طرح نمونه برداری اولیه با 57 نقطه ایجاد گردیده و فرایند بهینهسازی پس از اضافه کردن 173 نقط	مدل گوسی
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

Accepted 01 May 2016

Keywords:

Optimization Surrogate model

Nonlinear buckling

Gaussian model

Received 22 March 2016

Compression stiffened panel

Available Online 20 June 2016

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.

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

1- مقدمه

پنل 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 Mechanicat* Engineering, Vol. 16, No. 6, pp. 205-216, 2016 (in Persian)

حالی که تحت بار گذاری غالب محوری فشاری قرار دارند یافت.

رفتار پنل تقویت شده تحت بار فشاری را می توان با استفاده از یک معادله ديفرانسيل مرتبه چهار مورد بررسي قرار داد [1] که البته اين 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 می گذارد [2-4]. 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 قيود طراحي و به كارگيري تقريب هايي قابل قبول، طراحي ابعادي پنل تقویت شده در یک گام با توجه به مقدار شناسه سازه و خصوصیات مواد به دست می آید [5]. در روشهای عددی بهینهسازی نیاز به یک نقطه آغازین برای شروع فرایند بهینهسازی را میتوان از طریق پاسخ این روشهای طراحی اوليه مرتفع كرد.

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 تحلیل های اجزاء محدود به انجام رساند، نتیجه طراحی یک گام به فاز طراحی نهایی نزدیکتر خواهد بود. یکی از دلایل محدودیت به کار گیری مستقیم تحلیل های 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 بخشيدن به فرايند بهينهسازي با استفاده از جايگزينهايي براي توابع هدف و قيود ميباشد [6]. اين روش علاوه بر دستيابي به پاسخ ممكن بهينه با حداقل تعداد ارزیابیها از تابع اصلی (دقت بالا)، باعث ایجاد یک برآورد کلی در فضای طراحی نیز می گردد. این روش تقریب و بهینهسازی در تمام شاخههای مهندسی هوافضا مانند سازه، آیرودینامیک [7] و حتی طراحی مفهومی فضاپیما [8] نیز به کارگرفته شده است.

در مرجع شماره [9] یک تابع جایگزین برای پیشبینی بار کمانش نهایی تركيب ورق و تقويت كننده Yشكل با استفاده از تحليل اجزاء محدود غیرخطی (با استفاده از نرمافزار انسیس²) ارائه شده است. برای ایجاد مدل جایگزین در این تحقیق ³5 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 ۲ شکل، 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

طراحي اوليه پنلهاي تقويت شده براي مخزن پيشران يک وسيله حمل و نقل فضایی بازگشتیذیر³ با استفاده از مدل جایگزین و نرمافزار تحلیل پاندا⁴2 در مرجع [10] گزارش شده است. تخمینی از تعداد تحلیلهای لازم برای مطالعه روند طراحی بهینه پنل تقویت شده مخزن سوخت 84700 تحلیل میباشد که لزوم استفاده از مدل جایگزین را نشان میدهد. در این تحقيق بررسى دقت پاسخ از طريق مقايسه با مدل اجزاء محدود صورت پذیرفته است. راهبرد بهینهسازی فراگیر در نرمافزار پاندا2 شروع چند باره و تصادفي جستجوى خطى براى يافتن بهينه فراگير مىباشد كه مىتواند لزوما به بهینه فراگیر همگرا نشود.

مقایسه روشهای مختلف بهینهسازی شامل برنامهریزی محدب ترتیبی⁵، بهينهسازي فاقد مشتق، مدل جايگزين، مدل جايگزين پايه⁶ و الگوريتم ژنتیک برای طراحی پنل 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 کمانش 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 بهینه سازی 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 سازهاى روش الگوريتم ژنتيک 1955 تحليل اجزاء محدود است. مهمترين نتايج نهايي اين تحقيق به اين صورت گزارش شده است: الف - از لحاظ هزينه محاسباتی روش مدل جایگزین به کمترین تعداد تحلیل سازهای نیاز دارد و روش الگوريتم ژنتيک نيازمند بيشترين تعداد تحليل سازهاى مىباشد 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 مى باشد. در اين تحقيق نتايج كمى محرمانه تلقى شده و نحوه انتخاب حدود فضای طراحی نیز گزارش نشده است.

1-1- چارچوب و اهداف تحقيق

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 می گردد. نقصی 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 می گردد. دومین گام ارزیابی روش مدل جایگزین قبل از اعمال آن به مسئله اصلى، نشان دادن كارايي اين روش براى يافتن طراحي بهينه پنل تقويت شده با روش شناسه سازه است. در این بخش نیز پاسخ بهینه مسئله سازهای مشخص است.

¹ Surrogate model ²ANSYS

³ Reusable Launch Vehicle: RLV

⁴ PANDA2

Sequential convex programming ⁶Basic Surrogate Based Optimization: Basic SBO

مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1395، دوره 16،شماره 6

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 گوسی¹ و به کارگیری تحلیلهای غیرخطی کمانش حاصل از نرمافزار اجزاء محدود انتخاب و اجرا می گردد. 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 می گردند. در پایان نیز نتایج حاصل از این تحقیق به صورت توصیههای کلی و نتایج کاربردی ارائه می گردد و مسیر برای بهینهسازی فراگیر مشخص می شود.

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 می شود. در روش نمونهبرداری ابرمکعب لاتینی، تصویر نقاط نمونهبرداری شده بر روی محورهای مختصات (ابعاد فضای طراحی) همپوشانی ندارند [12]. این خاصیت باعث می شود که هر نقطه نمونهبرداری منحصرا 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 اصطلاحا 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 اصطلاحا به معیار بیشینه-کمینه مشهور است [6].

2-2- ساختن مدل جايگزين

👖 مېندسي مکانيک مدرس، شهريور 1395، دوره 16،شماره 6

روشهای متنوعی برای ساختن مدل جایگزین با استفاده از دادههای

⁶ Radial Basis Functions: RBF



شكل 1 طرحواره روش بهينهسازي مدل جايگزين

نمونهبرداری شده وجود دارد. در بیشتر این روشها، مدل جایگزین پاسخ را در نقاط نمونهبرداری شده به طور دقیق تکرار می کند. 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 (\hat{f}).

یکی از متداول ترین توابعی که به عنوان مدل جایگزین استفاده می شود، توابع با پایه شعاعی⁶ می باشند. 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 عددی Y را بدهد و بر اساس طرح نمونه برداری با n نقطه = S(X^1, X^2, \dots, X^n) پاسخهای (ny^2, \dots, y^n) و جود باشند، تقریب تابع با پایه شعاعی به شکل عمومی مطابق با رابطه (1) تعریف می شود.

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

در رابطه (1)¹ دلالت دارند بر مراکز تابع پایه یعنی همان نقاط نمونهبرداری شده که مقدار دقیق تابع در آن نقاط موجود است و X محل پیش بینی 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 پیش بینی که تحت تاثیر تابع Ψ قرار گرفته است. اگر این فاصله τ نامیده شود، Ψ تابعی است که نحوه به کارگیری این فاصله را با توجه به نوع تابع پایه تعیین می نماید. 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 می اشد، می توان انعطاف پذیری بیشتری برای مدل جایگزین (2) استفاده می شود [12]. در رابطه (1) ضرایب وزن Wرا می توان با نقطه نمونهبرداری شده یک پارامتر وزن w وزن w ازاء هر

¹ Gaussian surrogate model

² Meta model

³ Training set

⁴ Latin Hypercube Sampling: LHS

⁵ Space filling



Fig. 2 Latin hyper cube sampling plan : A: random, B: optimum شکل 2 طرح نمونهبرداری ابر مکعب لاتینی A: طرح تصادفی، B: طرح بهینه

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

پارامتر تنظیم (θ) را نیز می توان با استفاده از یک معیار بهینه سازی مناسب یافت. روشی که در این تحقیق برای یافتن مقدار پارامتر تنظیم استفاده می می شود، روش اعتبار سنجی متقاطع¹ نام دارد. در این روش داده های نمونه برداری شده به p زیر مجموعه تقریبا مساوی تقسیم می شوند. سپس یک مدل جایگزین با مقدار مشخص پارامتر تنظیم، p بار ایجاد می شود و درهر بار یکی از زیر مجموعه ها برای ارزیابی مدل جایگزین و محاسبه خطا جدا شده و از 1-p زیر مجموعه دیگر برای ایجاد مجموعه یادگیری استفاده می شوند. سپس می شود. خطا برای هر مقدار یارامتر تنظیم، p بار ایجاد می مود و محاسبه خطا جدا شده و از 1-p زیر مجموعه دیگر برای ایجاد مجموعه یادگیری استفاده می شوند. سبت می شود. خطا برای هر مقدار یارامتر تنظیم، متوسط اندازه p خطای به دست آمده است [6]. در نهایت مقداری که کمترین خطا را ایجاد نماید به عنوان پارامتر تنظیم مدل جایگزین انتخاب می شود.

2-3- بهينهسازي مدل جايگزين

به طور عمومی و با در دست داشتن یک مدل جایگزین با هزینه ارزیابی اندک که یک تابع ریاضی پیوسته است [12,6]، می توان از هر الگوریتم بهینه سازی برای یافتن بهینه آن استفاده کرد. الگوریتم های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات² با توجه به احتمال دستیابی به بهینه، از پرطرفدارترین روشهای بهینه سازی 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 صرفا 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 مدل سازی 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 می گردد، به طور قاطع وابسته به نقطه شروع الگوریتم بهینهسازی است.

مدل جایگزین از طریق درونیابی دادههای نمونهبرداری شده ساخته می شود. 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

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 نمی باشد.

5 -4- به هنگامسازی مدل جایگزین با استفاده از نقاط پرکننده-4-2

اضافه کردن نقاط پرکننده به طرح نمونهبرداری اولیه و پس از ارزیابی مدل جایگزین در مقایسه با تابع اصلی صورت می پذیرد. به این منظور پس از به دست آوردن نقاط داده و ایجاد مجموعه یادگیری، مدل جایگزین ساخته می شود. با داشتن مدل جایگزین به صورت یک تابع تحلیلی، بهینه فراگیر آن با روش بخش 2-3 به دست می آید. سپس این بهینه با استفاده از تابع اصلی مورد ارزیابی قرار گرفته و پاسخ دقیق آن نیز حاصل می شود. با اضافه کردن این نقطه به طرح نمونهبرداری اولیه مجددا مدل جایگزین ایجاد شده و فرایند تا بر آورده شدن شرایط همگرایی ادامه می یابد (نمودار شکل 1). به عبارت دیگر در این روش کمینه مدل جایگزین ساخته شده در تکرار *i* به عنوان نقطه پرکننده در تکرار 1+*i* منظور می گردد.

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 انعطاف پذیری 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- معيار همگرايي

عدم بهبود مقدار تابع هدف در گامهای متوالی (معمولا 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. معمولا گامهای همگرایی می ایست متوالی و اصطلاحا 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، معمولا حصول شرایط همگرایی در گامهای دقیقا متوالی دشوار بوده و باعث طولانیتر شدن فرایند بهینهسازی بدون بهبود چشمگیر در تابع هدف می گردد. برای اجتناب از این موضوع، در تعریف شرط همگرایی فرایند بهینهسازی مدل جایگزین با استفاده از تابع گوسی، شرط دقیقا متوالی بودن با حالت صرفا متوالی بودن جایگزین می گردد. یعنی اگر نقطه مفروض برX با مقدار تابع هدف با بهبود اندک یا بدون بهبود در چند دست آمد و مجددا این مقدار تابع هدف با بهبود اندک یا بدون بهبود در چند گام بعد به عنوان نقطه بهینه به دست آمد (در گام t+i و t-1) عملا فرایند بهینهسازی به مقدار f_{opt} همگرا شده است. البته در هر صورت شرط قابل قبول بودن خطای پیشبینی میبایست برآورده گردد.

¹Cross-validation

 ² Particle swarm optimization
 ³ Sequential Quadratic Programming

⁴ MATLAB (Version 7)

⁵ Infill points

⁶ Feasible



Fig. 3 Behavior of the surrogate model between the sampled points شکل 3 رفتار مدل جایگزین بین نقاط نمونهبرداری 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 می شود. مثال اول صرفا به منظور به تصویر کشیدن راهبرد مدل جایگزین برای یافتن بهینه فراگیر تابع یک متغیره آزمون ارائه می گردد. 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 می باشند.

1-3- تابع يک متغيره آزمون

(3)

رابطه تحلیلی تابع یک متغیره آزمون عبارت است از:

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

در این مثال، برای ایجاد مدل جایگزین از یک طرح نمونهبرداری 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 نمونهبرداری 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 نمونهبرداری عبارت است از:

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

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

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

$$\theta = 0.1100$$

اضافه کردن به نقاط پر کننده 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 نمونهبرداری 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).

	يت پاسخ بهينه	اوليه در كيف	; نمونەبردارى	تأثير طرح	دول 1 بررسی
Table 1 Effect	of initial san	npling plan	on the resp	onse qua	ality

x _{opt}	گامهای همگرایی	طرح نمونه برداري اوليه	رديف
0.76	8	0.4981, 0.9009, 0.5747	1
0.76	8	0.0427, 0.6352, 0.2819	2
0.14	<u>6</u>	0.1776, 0.3986, 0.1339	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 ۱ فقط در ردیف سوم که تمام نقاط نمونه برداری شده اولیه در یکسوم 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 ۱ 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 نمونهبرداری از برخی نقاط مانند حدود بالایی و پایینی

3-2- طراحي ابعادي پنل تقويت شده با تقويت كننده تيغهاي

(4)

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].

$$K = \frac{N}{L}$$

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 می شود. در شکل 5 پنل تقویت شده با تقویت کننده تیغهای با بال بیرون زده نشان داده شده است که با حذف بال آن تبدیل به پنل تقویت شده با تقویت کننده تیغهای می گردد. قیود کمانش همان روابط تحلیلی-تجربی هستند که عینا در روش شناسه سازه مورد استفاده قرار می گیرند.

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 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].

¹ Fully stressed design

323

4.20

48.8



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

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

$$\begin{pmatrix} E \end{pmatrix}$$

$$t = 0.56 \left(\frac{1}{E}\right) \tag{6}$$

$$\frac{c_w}{t} = 1.7847$$
 (7)

$$\frac{b_w}{b} = 0.714 \tag{8}$$

طراحی بهینه باید تحت بار بحرانی مشخص ($P_{\rm cr} = N$) به عنوان قید تساوی به بیشینه تنش بحرانی ممکن دست یابد. همچنین بیشینه تنش برابر با كمترين مقدار از ميان سه مقدار تنش كمانش كلى (9)، تنش كمانش محلى 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 می گردد. 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.

$$\sigma_{\rm CB} = \frac{\pi E I}{L^2 A} \tag{9}$$

$$\sigma_{\rm SkB} = 3.62 E \left(\frac{t}{b}\right)^2 \tag{10}$$

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

در این مثال، مدل جایگزین با استفاده از یک طرح نمونهبرداری ابرمکعب لاتيني بهينه با 50 نقطه ساخته شده و به ازاء هر نقطه طراحي معلوم با چهار متغیر (b, t, b_w, t_w) پاسخی را به عنوان تنش مجاز دراختیار می گذارد. پاسخ حاصل با كمترين مقدار تنش به دست آمده از روابط (9) تا (11) مقايسه و اعتبار سنجی می گردد، سپس به عنوان یک نقطه پرکننده در گام بعدی فرایند منظور می گردد. 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، مدل های جایگزین ساده از لحاظ سرعت همگرایی بسیار مطلوب هستند (تعداد کم گامهای 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 گونهای تعریف شدهاند که مسئله دارای پاسخهای ممکن فراوان در نزدیکی حدود بهینه می باشد، موضوعی که در مسائل اجزاء محدود کمتر

جدول 2 نتایج بهینهسازی پنل تقویت شده با تقویت کننده تیغهای (تمام ابعاد به mm و تابع هدف (تنش) با واحد MPa مى باشد) Table 2 Optimization results of blade stiffened panel (all dimensions

are in mm and the objective function (stress) in MPa)									
font		x	opt	NC ⁽⁺⁾	14(r)				
John .	t_w	b_w	t	b	_	Ψ			
312	4.40	51.35	2.42	70.54	8	خطی (r)			
318	4.34	49.77	2.65	76.76	23	مكعبى(r3)			
313	4.37	51.21	2.42	70.60	15	منحنی (r² in r)			
323	4.22	48.39	2.22	62.25	147	گوسی(e ^{-r²/2θ²})			

2.4

68.3

⁽⁺⁾تعداد گامهای همگرایی

شناسه سازه

انتظار می رود. در کلیه تحلیل های صورت گرفته در این مقاله به منظور قابل مقايسه بودن نتايج، طول پنل تقويت شده L = 762 mm ، مدول الاستيک E = 73774 MPa و ضريب پوآسون v = 0.33 در نظر گرفته شده است.

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

بهینهسازی فراگیر نیازمند یک یا دو مرتبه تلاش محاسباتی بیشتر نسبت به بهینهسازی محلی می باشد [10]، از این رو هدف اولیه از این تحقیق ارائه یک طرح بهینه محلی و نه لزوما فراگیر است. امکان دستیابی به بهینه محلی و یا فراگير تابع اصلى، وابسته به طرح نمونهبردارى اوليه، نوع مدل جايگزين، تكنيك اضافه كردن نقاط پركننده و روش يافتن بهينه فراگير مدل جايگزين است. امکان قضاوت قطعی در مورد دستیابی به بهینه فراگیر یک تابع اصلی که رفتار آن مجهول بوده و صرفا با نمونهبرداری از فضای طراحی رفتار آن تقريب زده مى شود وجود ندارد. البته با توجه به نتايج بخش 3 و موفقيت روش پیشنهادی در یافتن بهینه فراگیر مسائل آزمون، استفاده از مدل جایگزین گوسی به همراه طرح نمونهبرداری ابرمکعب لاتینی و روش پیشنهاد شده برای یافتن بهینه فراگیر مدل جایگزین، احتمال همگرایی به بهینه فراگیر تابع اصلی را افزایش میدهد. در هر صورت این بهینهسازی اولیه ضروری بوده و مسیر دستیابی به بهینه فراگیر 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 پنل تقویت شده فشاری در دو پیکربندی پنل تقویت شده با تقویت کننده تیغهای (نوع الف) و پنل تقویت شده با تقویت کننده تیغهای با بال بیرون زده (نوع ب) مورد بررسی قرار می گیرد (شکل 5).

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 می شود (جدول 3). با توجه به اینکه یکی از اهداف این مقاله مقایسه نسبتهای بهینه حاصل از روش شناسه سازه و مدل جایگزین می باشد، حدود متغیرهای طراحی به گونهای انتخاب شدهاند که وقتی متغیرهای متناظر با ابعاد پوسته بی بعد شوند در گستره **30% ح**دود بهینه روش شناسه سازه قرار داشته باشند. به عنوان مثال:

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

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 بی بعد نشان داده شده در جدول 3، همان مقادیر بهینه ای هستند که توسط روش شناسه سازه و به صورت عمومی به دست آمده اند [5]. مجموعه یادگیری برای پنل تقویت شده نوع الف با 55 نقطه و برای نوع ب با 57 نقطه نمونه برداری شده ایجاد می شود. طرح نمونه برداری اولیه بر اساس روش نمونه برداری 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 پنل تقویت شده انجام می گردد. 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 می آید. به این طریق به ازاء هر نقطه نمونهبرداری

> **جدول 3** حدود متغیرهای طراحی برای دو نوع پنل تقویت شده (تمام ابعاد به میلی متر 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)							
حد بالایی	مقدار بهینه ^(*)	حد پایینی	متغير طراحي				
81.6509	68.3140	59.9154	b				
2.843	2.3787	2.0863	t				
55.6134	48.7762	40.8091	$b_{\rm w}$				
4.8404	4.2453	3.5519	t _w				
 نسبتهای بیبعد طراحی							
2.3201	1.7847	1.2493	$r_t = t_w/t$				
0.9282	0.714	0.4998	$r_b = b_w/b$				
پنل تقویت شده با تقویت کننده تیغهای با بال بیرون زده (نوع ب)							
حد بالایی	مقدار بهينه	حد پایینی	متغير طراحي				
60.9067	50.9582	44.6933	b				
2.5886	2.1658	1.8995	t				
58.1013	50.9582	42.6347	b_w				
2.4694	2.1658	1.8120	t_w				
17.9870	15.7756	13.1988	b_f				
1.9942	1.749	1.4633	t_f				
نسبتهای بیبعد طراحی							
2.1125	1.25	0.6125	$SR = A_{st}/A_{sk}$				
1.3	1	0.7	$T = t_w/t$				
	[- 1		(*)				

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

شده یک ضریب وزنی w_i به دست میآید. مقدار بهینهای نیز برای تنها پارامتر تنظیم θ ، با استفاده از روش اعتبارسنجی متقاطع محاسبه می گردد. طراحی پنل 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 پنل تقویت شده می باشند (رابطه 12). جنس پوسته و تقویت کننده یکسان بوده و پنل از نوع یکپارچه¹ در نظر گرفته می شود.

$$P_{cr} = N$$
 قید تساوی:
 σ_{ave} تابع هدف: بیشینه کردن σ_{ave}
 $b_{t}t_{b}w_{t}t_{w_{t}}b_{f}t_{f}$ متغیرهای طراحی:

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 کمانش و تنش متوسط متناظر با آن، ایجاد یک مدل جایگزین برای پیش,بینی تنش بحرانی (تابع هدف) و بار بحرانی کمانش (قید تساوی) در سازه کافی است. در صورتیکه طرح بهینه روش شناسه سازه (جدول 3) با روش اجزاء محدود تحلیل کمانش غیرخطی شود، بار بحرانی کمانش برای پنل تقویت شده نوع الف و ب به ترتیب برابر با مقادیر N_a = 1731 N/mm جا تا 20 مان مادی به عنوان بار بحرانی طراحی در بهینه سازی به روش مدل جایگزین مورد به عنوان بار بحرانی طراحی در بهینه سازی 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 می رسد (جدول 4). در این فرایند از نقاط پر کنندهای که بر اساس بهینه مدل جایگزین در تکرار قبل به دست آمده استفاده شده است. فرایند بهینهسازی هنگامی متوقف می شود که نقطه بهینه معرفی شده توسط مدل جایگزین اولا کمتر از دو درصد خطا در مقایسه با تحلیل اجزاء محدود داشته باشد و ثانیا 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 عملا 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 محت این همگرایی و عدم بهبود تابع هدف، فرایند ایجاد مدل جایگزین و اضافه شده در این مرحله در مقایسه با تعداد ارزیابیهای تابع هدف و قیود در اضافه شده در این مرحله در مقایسه با تعداد ارزیابیهای تابع هدف و قیود در هر گام بهینهسازی کاملا به صرفه است (جدول 5). همانطور که از نتایج جدول 5 مشخص است، بهینه مدل جایگزین شش بار به یک نقطه (با تقریب قابل قبول) همگرا میشود (ردیفهای مشخص شده با خط)، اگرچه رجوع به این نقطه دقیقا پشت سرهم نبوده و با فاصله صورت میپذیرد.

4-2- تحلیل کمانش غیرخطی پنل تقویت شده تحت بار فشاری محوری

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

¹Integral stiffened panel

² Feasible designs



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



Fig. 7 FEM model and the corresponding boundary condition شكل 7 مدل اجزاء محدود و شرايط مرزى اعمال شده بر آن

5 - بررسی نتایج

گرچه روش شناسه سازه یک روش تحلیلی بر پایه روابط تحلیلی- تجربی سازهها می باشد و فرایند بهینه سازی با استفاده از مدل جایگزین و تحلیل های اجزاء محدود یک روش کاملا 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 می شود اختلاف مقادیر حاصل برای نسبتهای r_t و eta حاصل از دو روش etaکمتر از بیست درصد می باشد. از آنجایی که این نسبتها مربوط به پیشبینی كمانش محلى اجزاء پنل تقويت شده مىباشند، مىتوان نتيجه گرفت كه روابط تجربی به کارگرفته شده در روش شناسه سازه تقریبا 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 تکیه گاه ساده برای پوسته در روش شناسه سازه فرضی محافظه کارانه است. این فرض به معنى صرفنظر كردن از حمايت الاستيكى است كه توسط تقويت كننده صورت می پذیرد. مقدار تأثیر حمایت تقویت کننده بر شرایط تکیه گاهی 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 یوسته و کریپلینگ مقطع تقویت کننده به صورت جداگانه در نظر گرفته شده و اثر متقابل آنها بر روی یکدیگر منظور نمیگردد. این

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

به منظور انجام تحليل غيرخطي كمانش، ابتدا يك تحليل خطي كمانش از پنل تقویت شده صورت پذیرفته و مقدار بار بحرانی کمانش خطی (P_{cr}LI) ثبت می شود. سپس بار به صورت غیرخطی و در بازههای معین تا حد بار كمانش خطى به سازه اعمال مىشود. با اعمال تدريجي بار جابجايي سازه نيز در هر مرحله منظور می گردد. با بررسی نمودار نیرو- جابجایی در نقاط بحرانی سازه (شکل 6)، مقدار بار کمانش غیرخطی (P_{cr}NL) به دست می آید. 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 اولیه^ا میباشد [10]. بدیهی است در صورتیکه که یک ستون کاملا صاف و بدون نقص اولیه تحت بار قرار گرفته و به صورت غیرخطی تحلیل شود، نیرو و جابجایی رفتاری تقریبا 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 به سزایی در مقدار بار بحرانی کمانش غیرخطی دارد [10]. یکی از روشهای مرسوم برای اعمال نقص اولیه در تحلیل کمانش غیرخطی، استفاده از شكل مد بحراني حاصل از تحليل خطى به عنوان نقص اوليه ميباشد [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 یوسته تعیین می گردد. سیس بار گذاری مجددا از ابتدا آغاز شده و تحلیل غیرخطی انجام می شود. در نهایت با بررسی نمودار نیرو-جابجایی (شکل 6) مقداری برای بار کمانش غیرخطی سازه منظور می گردد .[14]

انتخاب المان مناسب (شل ¹181) 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).

Fig. 5 Geometry design variables of the stiffened panel شكل 5 هندسه و متغيرهای طراحی پنل تقويت شده

¹ Initial imperfections ² SHELL181

L181

مرتضی دزیانی و همکاران

جدول 4 گامهای بهینهسازی پنل 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 ($P_{cr} = 1731 \text{ N/mm}$ for surrogate model in all steps)

⁽⁺⁾ %PR	^(*) TNFE	$P_{\rm cr}$ (FEM)	$\sigma_{\rm ave}({\rm FEM})$	نقطه بهینه (مدل جایگزین) (mm)				15
		(N/mm)	(MPa)	t_w	b_w	t	b	ںم —
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 5 گامهای بهینهسازی پنل تقویت شده نوع ب (بار بحرانی مدل جایگزین در تمام گامها N/**mm ۱۳82 ا**

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

0% DD (+)	TNEE ^(*)	$P_{\rm cr}({\rm FEM})$	$\sigma_{\rm ave}$ (FEM)	نقطه بهينه (مدل جايگزين) (mm)					.IE	
701 K	TINE	(N/mm)	(MPa)	t_f	b_f	t_w	b_w	t	b	- تم
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>	1759	<u>471</u>	1.46811	15.2583	1.81868	42.6649	<u>1.99528</u>	57.4497	20
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
0.8	28524	1768	473	1.4634	15.3032	<u>1.9033</u>	42.6362	<u>1.9401</u>	57.6579	64
27.9	46903	1284	344	1.65879	13.9001	1.83294	43.2961	1.92891	56.6794	80
<u>1.2</u>	44621	<u>1760</u>	471	1.4815	15.2570	1.8163	42.6555	1.9939	57.4532	<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>	474	1.4633	15.3231	1.8737	42.6347	1.9617	57.6656	102
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>	470	1.4818	<u>15.5108</u>	<u>1.8121</u>	43.2138	1.9312	56.1282	121
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>	57201	<u>1762</u>	472	<u>1.47782</u>	<u>15.2624</u>	1.81496	42.6465	1.99585	57.4465	<u>173</u>

^(*) تعداد کل ارزیابیهای تابع در فرایند بهینهسازی

⁽⁺⁾ خطای پیشبینی

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 آنجاییکه 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 پنل تقویت شده فشاری کاربردیتر است. بر خلاف روشهای بهینهسازی معمول، مدل جایگزین به شدت از تعداد تعلیلهای 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 1000 بار است. بدیهی است که در این تحقیق منظور از ارزیابی تابع همان تحلیل غیرخطی کمانش و به

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

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 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	شناسه سازه	مدل جایگزین	نسبت بىبعد
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	$SR = A_{\rm st}/A_{\rm sk}$ (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)

جایگزین به عنوان یک روش عددی، ابزار مدلسازی، نوع پیکربندی و بارگذاری منحصر به مسئله مورد بررسی میباشد، در نتیجه اعتبار پاسخ بهینه نیز معمولا از طریق مقایسه آن با ابزار مدلسازی (تابع اصلی) [19-17،16,11]، (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 پیش بینی) و قابل قبول بودن آن نشان دهنده صحت پاسخ می باشد.

5-1- بررسی تحلیلهای کمانش پنل 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 پنل تقویت شده فشاری استفاده از این روابط به صورت تعیین حدودی برای نسبت منظری اجزاء مختلف (عرض به ضخامت جزء مورد نظر) و نسبتهای بی بعد طراحی (مانند نسبت سفتی که عبارت است از مساحت تقویت کننده به مساحت پوسته) در روشهای نیمه تحلیلی [2-4] مرسوم است. این نسبتها معمولا از نمودارها و آزمونهای تجربی استخراج می شوند. در روشهای 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 میتوان حدودی را برای تعیین نسبت منظری 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 پنلهای 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 پنل 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 تحلیل های اجزاء محدود روش مدل جایگزین، طول تمام ینلها 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 (PerNL PerLI) 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 می گردد طرحهایی که مقدار نسبت بار آنها به واحد نزدیک تر است (یعنی مقدار بار بحرانی کمانش خطی و غیرخطی به هم نزدیک هستند)، به سطح بالاتری از تنش دست یافته و بهینه رند. همچنین میتوان با رسم

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

با توجه به اینکه تنش تسلیم ماده 530MPa تعریف شده است و حداکثر تنش متوسط مجاز اعمالی بر سازه **478 MPa = 531 × 0.9** در نظر گرفته میشود [3,2]، حدودی که در آنها امکان قرار گرفتن نقطه بهینه وجود دارد، در طرحهایی منظور می گردد که تنش بحرانی آنها بیشتر از 400MPa باشد. به این ترتیب امکان تأثیر متقابل اجزاء پوسته و تقویت کننده نیز به طور محافظه کارانه ای منظور گردیده است. با این توضیحات و با توجه به شکلهای و تا 14 میتوان حدود نسبتهای بی بعد و نسبتهای 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 می باشد. این نسبتها متناظر با نسبتهای طراحی بهینه ای هستند که در می شناسه سازه به دست آمدهاند. حدود بهینه نسبتهای منظری به دست آمده برای اجزاء سطح مقطع نیز به ترتیب در روابط (16) تا (18) ار (18) برای پوسته می امد. این نسبتها متناظر با نسبتهای طراحی بهینه ای هستند که در می شناسه سازه به دست آمدهاند. حدود بهینه نسبتهای منظری به دست آمده برای اجزاء سطح مقطع نیز به ترتیب در روابط (16) تا (18) برای پوسته،



شکل 9 نسبت سفتی به مقدار تنش بحرانی متوسط

¹ Wide columns

جدول 7 مقايسه نسبتهاى بهينه طراحى 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 طراحي
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 پنل 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- نتیجه گیری

در این مقاله روش طراحی بهینه پنل 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 پنل 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 نمونه برداری با پراکندگی مناسب (ابر 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 ینل تقویت شده با تقویت کننده تیغهای (نوع الف) با 4 متغیر
- طراحی بهینه پس هویت شده با هویت کننده بیعدای روع اها) با به معیر طراحی. پس از اضافه شدن 5 نقطه پر کننده به طرح نمونهبرداری اولیه (با 55 نقطه) فرایند به پاسخ بهینه همگرا گردید.
- طراحی بهینه پنل تقویت شده با تقویت کنده 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 می گذارد.
 - **-** 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 علايم
- A مساحت (^{mm2}) ^{cⁱ} مرکز تابع پایه؛ نقطه نمونهبرداری شده E مدول الاستیک (^{Nmm⁻²})











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



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)

شكل 14 نسبت منظرى بال بيرون زده تقويت كننده به مقدار تنش بحراني متوسط

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

- f تابع اصلی (دقیق)
 - تابع تقريبى \hat{f}
- ممان اینرسی دوم سطح (*mm) I
 - طول پنل تقویت شده (mm) L
 - خطى LI
 - شدت بار محوری (Nmm⁻¹) Ν
 - غيرخطي NL
 - بار كمانش (Nmm⁻¹ Р
 - خطای پیشبینی PR
- تعداد زیر مجموعههای نقاط نمونهبرداری شده q
 - فاصله (نرم اقليدسي) r
 - نسبت بيبعد طراحي، نسبت عرضها r_b
 - نسبت بى بعد طراحى، نسبت ضخامت ها r_t
 - طرح نمونهبرداري شامل چندين نقطه طراح S
 - نسبت سفتے SR
 - نسبت ب<u></u>بعد طراح Т
 - تعداد ارزیابیهای تابع TNFE
 - پارامتر وزنی w
 - بردار ضرايب وزنى W
 - متغير طراحي x
 - Χ نقطه طراحي
 - y
 - پاسخ تابع اصلی Υ
 - بردار پاسخهای تابع اصلی

علايم يوناني

- β نسبت بيبعد طراحي
 - پارامتر تنظیم heta
 - ضريب يوآسون
 - (Nmm⁻²) تنش σ
 - تابع تاثير ψ
 - Ψ
- بردار فواصل که تحت تابع تاثیر قرار گرفته

زيرنويسها

ave

- متوسط CB كمانش كلى (كمانش ستون)
 - cr
 - lb
 - حد یا
 - opi حالت sk

st

- SkB
- كمانش محلى پوسته
 - تقويت كننده
- كمانش محلى تقويت كننده StB
 - ub حد بالایے

- 8- مراجع
- [1] S. Timoshenko, S. Woinowski-Krieger, Theory of plates and shells, Second Edition, pp. 79-83, New York: McGraww-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. (فارسى 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 فارسى)
- [9] S. F. Badran, A. O. Nassef, S. M. Metwalli, Y-stiffened panel multiobjective 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, Optimizatin 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 platesunder 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 analysisapplications 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, Opimization 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, Opimization and engineering, Vol. 16, No. 2, pp. 483-505, 2015.