



## طراحی اولیه پنل تقویت شده فشاری با استفاده از مفهوم شناسه سازه

مرتضی دزیانی<sup>1</sup>، شهرام یوسفی<sup>2\*</sup>، حمید نخ فروش<sup>3</sup>، حسین دلایلی<sup>4</sup>

- 1- دانشجوی دکتری، سازه‌های هوایی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر - مجتمع دانشگاهی مکانیک هوافضا، شاهین شهر
  - 2- دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر - مجتمع دانشگاهی مکانیک هوافضا، شاهین شهر
  - 3- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، پژوهشکده فناوری‌های هوایی دانشگاه فردوسی، مشهد
  - 4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر - مجتمع دانشگاهی مکانیک هوافضا، شاهین شهر
- \*شاهین شهر، صندوق پستی 83145/115، yousefi100@mut-es.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 29 اردیبهشت 1393  
پذیرش: 03 مرداد 1393  
ارائه در سایت: 12 مهر 1393  
کلید واژگان:  
پنل تقویت شده فشاری  
شناسه سازه  
طراحی بهینه

### چکیده

پوسته‌های تقویت شده‌ای که بارگذاری غالب بر روی آنها فشاری محوری است به عنوان پنل تقویت شده فشاری شناخته می‌شوند. این پنل‌ها دارای کاربرد گسترده‌ای در سازه‌های هوافضا می‌باشند. روش‌های جاری طراحی برای این نوع سازه‌ها نیازمند انجام فرایندهای تکراری سعی و خطا می‌باشد. طراحی بر اساس مفهوم شناسه سازه، یک روش طراحی و تحلیل همزمان است. این روش با دریافت پارامتر کلیدی شناسه سازه و خصوصیات مواد، اندازه‌دهی کاملی از مقطع پنل تقویت شده فشاری را در یک گام در اختیار طراح قرار می‌دهد. نتیجه حاصل از روش شناسه سازه یک نتیجه تحلیلی و صریح است. در این مقاله، روش طراحی پنل تقویت شده با مفهوم شناسه سازه با پیکربندی کلی (شامل امکان انتخاب نوع تقویت کننده، امکان طراحی پنل تقویت شده یکپارچه و یا پنل تقویت شده پوسته-استرینگر) مورد بررسی قرار گرفته است. با انجام اصلاحاتی، نتایج روش شناسه سازه به نتایج تحلیل‌های چرخه‌ای مرسوم نزدیکتر شده است. نتایج حاصل را می‌توان به عنوان بهینه‌سازی اولیه نیز در نظر گرفت. این نتایج با روش‌های جاری طراحی و روش اجزاء محدود مقایسه شده‌اند که علی‌رغم نزدیکی آنها، روش شناسه سازه نتایج محافظه کارانه‌تری در اختیار می‌گذارد. این موضوع به علت ماهیت بهینه‌سازی تقریبی این روش می‌باشد. این روش علاوه بر این که خود می‌تواند یک طراحی اولیه قابل قبول باشد، به عنوان نقطه شروع طراحی در روش‌های عددی بهینه‌سازی نیز قابل استفاده است.

## Preliminary design of compression stiffened panel using structural index concept

Morteza Dezyani<sup>1</sup>, Shahram Yousefi<sup>1\*</sup>, Hamid Nakhforoosh<sup>2</sup>, Hosein Dalayeli<sup>1</sup>

- 1- Department of Mechanical Aerospace, MalekAshtar University of Technology, Shahinshahr, Iran
  - 2- Sun Air Research Institute, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
- \*P.O.B. 83145/115 Shahinshahr, Iran, yousefi100@mut-es.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 19 May 2014  
Accepted 25 July 2014  
Available Online 04 October 2014

**Keywords:**  
Compression stiffened panel  
Structural index  
Optimal design

### ABSTRACT

Compression stiffened panels are reinforced skins that are mainly subjected to axial compressive load and are widely used in aerospace structures. Iterative design loops are the common methods for these types of structure. Design methodology based on structural index concept is a coupled design and analysis method. In this method detailed design of the compression stiffened panel is fully accomplished based on the key parameters of structural index and material properties of the panel. The complete design is obtained in single stage in an analytical and explicit manner. In this paper the design methodology of stiffened panel using structural index concept that could be applied on selective configuration of compression stiffened panel (including selection of stiffener type and the type of panel: integral or skin-stringer) is analyzed. The results are extracted and modified from two different approaches to manage the results of common iteration methods that are currently used in the preliminary sizing of stiffened panel. This procedure could be regarded as a near optimum design and therefore would be more conservative with respect to common methods. Final results of the derived methodology are compared with reported and FEM results. The results could be considered an acceptable design; furthermore, they can be used as an appropriate starting point in numerical optimization methods.

### 1- مقدمه

ضروری است. در دسترس بودن یک پیش‌بینی اولیه از هندسه و رفتار جزء سازه‌ای مورد نظر و امکان به روزرسانی آن با توجه به تغییر در دیگر پارامترهای فرایند طراحی، برخی از دلایل نیاز به این راهبرد می‌باشند. این روش می‌بایست حتی‌الامکان سریع، دقیق و کلی باشد. علاوه بر قابل استفاده

در تمامی مراحل طراحی سازه‌های هوایی از مرحله طراحی اولیه تا طراحی جزئیات، در اختیار داشتن یک روش پارامتریک کلی برای اندازه کردن<sup>1</sup> اجزاء

1- Sizing

رابطه‌ای مناسب برای ممان دوم سطح استخراج گردیده و در نهایت با ترکیب روابط به دست آمده، طراحی ابعادی پنل تقویت شده در یک گام صورت گرفته است. از نقاط برجسته این روش، تحلیلی و صریح بودن روابط حاصل، امکان به کارگیری آن با تقویت کننده‌های نوع  $l$  و  $Z$  و قابل اعمال بودن آن در پنل‌های تقویت شده یکپارچه و پوسته استرینگر می‌باشد. در پایان نیز نتایج حاصل با نتایج ارائه شده توسط دیگر محققان و روش اجزاء محدود مورد مقایسه و اعتبارسنجی قرار گرفته است.

## 2-1- معرفی روش شناسه سازه

شناسه سازه یک روش تحلیل و طراحی همزمان است که با استفاده از روابط تحلیلی موجود در سازه‌ها، یک رابطه کلی برای سطح تنش مجاز و ابعاد بهینه سازه به طور پارامتریک به دست می‌دهد. ورودی‌های مسئله در این روش طراحی، پارامتر شناسه سازه (رابطه 1) و خصوصیات مواد، می‌باشند.

$$K = \frac{N}{L} \quad (1)$$

در رابطه 1،  $N$  شدت بار اعمالی (نیرو بر واحد طول) و  $L$  طول پنل (برای مثال فاصله بین دو ریب در بال) می‌باشد. پارامتر شناسه سازه  $K$  با بعد  $\frac{\text{نیرو}}{\text{مربع طول}}$  است [6]. روش شناسه سازه برای تحلیل و اندازه کردن عناصر سازه‌ای مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است که می‌توان به انواع تیرهای فشاری و خمشی [7]، پوسته‌ها و پوسته‌های تقویت شده اشاره کرد [6]. همچنین در سازه‌های با مواد مرکب و تیرهای فشاری با هسته و پوسته با جنس متفاوت نیز این روش به کار گرفته شده است [8].

استفاده از مفهوم شناسه سازه و روش تحلیل و طراحی همزمان این راهبرد در موضوع پنل تقویت شده به مقاله معتبر فرار<sup>4</sup> در سال 1949 بر می‌گردد [9] که در بسیاری از مراجع دیگر نیز [6، 10] کلیات آن به روش‌های مختلفی تکرار شده است. موارد ذیل مهمترین دلایلی است که نویسندگان را به ادامه این راهبرد ترغیب کرد:

- وابسته بودن نتایج در مراجع اشاره شده به شکل خاصی از تقویت کننده با نسبت‌های هندسی مشخص، در حالی که در تحقیق فعلی رابطه کلی استخراج گردیده و قابل اعمال به پیکربندی دلخواه پنل تقویت شده یکپارچه و یا پوسته - استرینگر<sup>5</sup> می‌باشد.
- لزوم بکارگیری روابط تجربی جدیدتر برای پیش‌بینی کمانش محلی تقویت کننده و مقایسه آن با نتایج ارائه شده قبلی.
- استفاده از رابطه دقیق‌تر اوپلر - جانسون برای تحلیل کمانش موجی<sup>6</sup> پنل تقویت شده با توجه به مقدار تنش کریپلینگ<sup>7</sup> تقویت کننده.
- تحلیل نتایج حاصل از روش شناسه سازه و اعتبارسنجی آن به عنوان اولین گام طراحی.

## 2- طراحی پنل تقویت شده فشاری

پنل تقویت شده یا همان پوسته تقویت شده مقید (شکل 2)، از یک پوسته با طول و عرض مشخص به همراه تعدادی تقویت کننده<sup>8</sup> یا استرینگر با شکل و ابعاد مشخص تشکیل شده است. بسته به بارگذاری مورد نظر، شکل و ابعاد

بودن این روش در طراحی مقدماتی سازه وسیله نقلیه هوایی، نتایج آن به عنوان یک نقطه شروع طراحی مناسب برای به دست آوردن طرح بهینه نهایی قابل استفاده است. بدیهی است که نتایج این روش تا تبدیل شدن به طرح نهایی دستخوش تغییرات زیادی شده و امکان اعمال روش‌های بهینه‌سازی متنوع و جدیدتر نیز بر روی آن وجود دارد.

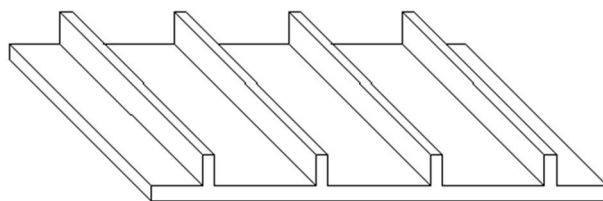
تعیین بار مجاز کمانش پنل تقویت شده فشاری یکپارچه<sup>1</sup> با تقویت کننده ساده تیغه‌ای<sup>2</sup> (شکل 1) از طریق روش‌های انرژی امکان‌پذیر بوده [1] و معمولاً جواب دقیقی به همراه دارد. اما این راهبرد برای مقاصد عملی و پیکربندی‌های پیچیده‌تر کاربردی نبوده و روشی مناسب برای طراحی ابعادی پنل تقویت شده با بار مجاز طراحی معلوم نمی‌باشد. یکی دیگر از روش‌های قابل اطمینان برای ارزیابی بار بحرانی یک پنل تقویت شده، استفاده از روش اجزاء محدود است که صرفاً یک روش تحلیل بوده و به عنوان یک ابزار طراحی قابل استفاده نیست.

در اغلب روش‌های کاربردی تحلیل و طراحی پنل تقویت شده، نقطه شروع طراحی و ابعاد اولیه با توجه به معلومات مسئله طراحی معین نمی‌گردند و از روابط تجربی [۲، ۳، ۴] و نمودارهای طراحی اولیه برای تعیین آنها استفاده می‌شود. محدودیت استفاده از نوع مصالح، محدوده بارگذاری، هندسه تقویت کننده و نامشخص بودن دقت و مبنای استخراج آنها، باعث ایجاد محدودیت در استفاده از این نمودارهای تجربی می‌گردد. همچنین در بیشتر موارد دو یا چند پارامتر اولیه می‌بایست توسط طراح انتخاب گردد که معمولاً معیار مشخصی برای آنها وجود ندارد.

از آنجایی که نتایج روش‌های طراحی بهینه عددی [5] کاملاً وابسته به مقادیر عددی مسئله مورد نظر می‌باشند، قابلیت استنتاج یک نتیجه کلی وجود ندارد. در این روش‌ها با هر بار تغییر در پارامترهای ورودی، تمام فرایند بهینه‌سازی می‌بایست مجدداً از نقطه آغازین تکرار شود. روش‌های عددی بهینه‌سازی در مراحل نهایی طراحی، هنگامی که تمام جزییات با کمترین ساده‌سازی در نظر گرفته می‌شوند، کارآمد می‌باشند.

راهبردی که در اینجا برای طراحی اولیه پنل تقویت شده فشاری مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش طراحی بهینه براساس مفهوم شناسه سازه<sup>3</sup> است. در این روش پس از استخراج نتایج، تنش مجاز و ابعاد نسبی پارامترهای طراحی در دسترس خواهند بود. این روش در گام‌های اولیه طراحی که بسیاری از پارامترها به طور دقیق معین نیستند، کارآمدی بیشتری داشته و یک ابزار تحلیلی مناسب برای به دست آوردن ابعاد اولیه سازه به حساب می‌آید.

در مقاله حاضر با استفاده از راهبرد شناسه سازه و به کارگیری روابط تحلیلی موجود، فرایند طراحی و تحلیل پنل تقویت شده فشاری ارائه گردیده است. بدین ترتیب پس از معرفی قیود طراحی به صورت روابط تحلیلی،



شکل 1 پوسته با تقویت کننده یکپارچه در چهار گام

1- Integrally stiffened panel  
2- Blade stiffener  
3- Structural index

4- Farrar  
5- Skin-stringer panel  
6- Global or flexural buckling  
7- Crippling  
8- Stiffener

متغیرهای طراحی اصلی که در روابط بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از جزییات مقطع پوسته  $(b, t)$ ، جان استرینگر  $(b_w, t_w)$  و مساحت بال‌های استرینگر  $(A_2, A_4)$ .

در انتهای فرایند طراحی، روشی برای اندازه‌کردن جزییات بال‌های بالایی و پایینی استرینگر ارائه خواهد شد. جزییات مقاطع بال‌های استرینگر عبارتند از  $b_a$  و  $b_f$  به ترتیب برای عرض و ضخامت بال بالایی استرینگر و  $b_r$  و  $t_r$  به ترتیب برای عرض و ضخامت بال پایینی استرینگر (بال بیرون زده استرینگر).

در مسائلی با کلیت بهینه‌سازی، معیاری که یک طرح را قابل قبول و یا مردود می‌سازد، قید مسئله طراحی نام دارد. از آنجایی که هدف، ارائه یک نتیجه کلی پارامتریک با استفاده از راهبرد شناسه سازه برای پل تقویت شده فشاری است، می‌توان سه قید تنش کمانش کلی یا موجی، تنش کمانش محلی یا کریپلینگ و تنش تسلیم فشاری ماده را به عنوان قیود طراحی نام برد. سطح تنش در هر جزیی از پل نباید از این سه مقدار فراتر رود.

### 1-1-2-1- کمانش کلی یا موجی

روش معمول برای محاسبه تنش کمانش کلی، استفاده از رابطه اویلر است. طبق روابط (4) و (5) داریم:

$$\sigma_{gb} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L'}{\rho}\right)^2} \quad (4)$$

$$\rho = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (5)$$

به طوری که  $\rho$  شعاع ژیراسیون،  $I$  ممان دوم سطح حول محوری گذرنده از مرکز سطح پل موازی عرض پوسته  $b$ ،  $A$  سطح مقطع و  $E$  مدول الاستیک می‌باشد. مقدار  $L'$  نیز طول تصحیح شده پل فشاری پوسته-استرینگر است که بسته به شرایط تکیه‌گاهی و نوع اتصال آن به ریب‌ها معمولاً مقدار رابطه  $L' = \frac{L}{\sqrt{c}} = \frac{L}{\sqrt{1.5}}$  برای آن منظور می‌گردد [2].

رابطه 4 یک رابطه عمومی برای کمانش کلی ستون‌ها است و می‌توان اصلاحات ذیل را برای محاسبه دقیق‌تر کمانش کلی منظور کرد:

1. در نظر گرفتن مدول الاستیک مماسی  $E_T$  به جای مدول الاستیک  $E$ ، تا از این طریق مقدار تنش حاصل با در نظر گرفتن اثرات قرار گرفتن در ناحیه غیر خطی نمودار تنش- کرنش ماده لحاظ گردد. مقدار مدول مماسی نیز بستگی به سطح تنش و نوع ماده داشته و از رابطه رامبرگ- اوزگود [4] قابل محاسبه است. قرار گرفتن در ناحیه غیرخطی نمودار تنش- کرنش و استفاده از مدول الاستیک مماسی علاوه بر اینکه باعث پیش‌بینی دقیق‌تری از شروع ناپایداری در سازه می‌گردد، امکان استفاده از سطوح بالاتر تنش مجاز را فراهم کرده و باعث کاهش وزن نیز خواهد شد. این موضوع به ویژه در سازه‌های هوایی که از نوع جدار نازک می‌باشند اهمیت می‌یابد. لازم به ذکر است که مدول الاستیک مماسی  $E_T$  و مدول الاستیک  $E$  در ناحیه خطی نمودار تنش-کرنش با یکدیگر برابرند.

2. در برخی موارد با توجه به نسبت لاغری پل، استفاده از رابطه اویلر جاسون برای محاسبه تنش کمانش کلی دقیق‌تر است. از آنجایی که نسبت لاغری پل تقویت شده بعد از تکمیل طراحی ابعادی مشخص می‌گردد، استفاده از رابطه 6 برای محاسبه تنش کمانش کلی می‌بایست به عنوان یک گام اصلاحی در نظر گرفته شود:

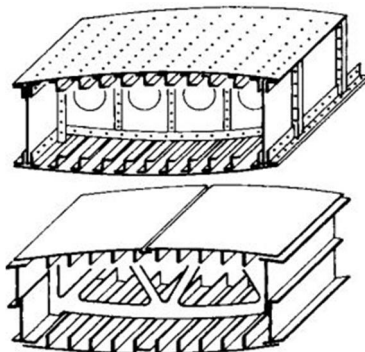
تقویت کننده متغیر خواهد بود، اما در پل تقویت شده‌ای که بارگذاری غالب بر روی آن از نوع فشاری محوری است، متداول‌ترین نوع تقویت کننده، نوع Z و L می‌باشد. یکی از دلایل استفاده از این دو شکل تقویت کننده، سهولت بازرسی‌های دوره‌ای است [2]. این عنصر سازه‌ای به طور گسترده‌ای در سازه‌های هوایی و فضایی کاربرد داشته و در سازه بال و بدنه هواپیمای سنگین و نیمه‌سنگین مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### 1-2- معرفی تابع هدف، متغیرها و قیود طراحی

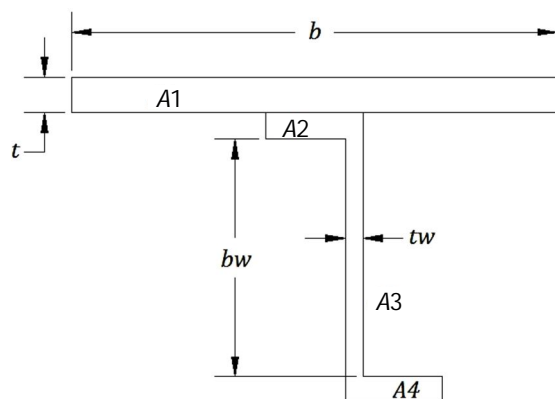
هندسه پل تقویت شده پوسته-استرینگر با تقویت کننده نوع Z در یک گام، در شکل 3 نشان داده شده است. این هندسه کلی بوده و امکان تبدیل آن به پل تقویت شده با تقویت کننده نوع L و پل تقویت شده یکپارچه با شکل دلخواه تقویت کننده (تیغه‌ای شکل و یا با بال بیرون زده<sup>1</sup>) وجود دارد. از این رو نتایج به دست آمده برای این شکل کلی قابل تعمیم به موارد فوق می‌باشد. متغیرهای طراحی همان ابعاد هندسی مقطع پل تقویت شده هستند که به عنوان مجهولات مسئله طراحی در نظر گرفته می‌شوند (رابطه 2). تابع هدف کمینه‌کردن<sup>2</sup> وزن است و در صورتیکه جنس پوسته و استرینگر یکسان در نظر گرفته شود معادل با به دست آوردن کمترین سطح مقطع پل تقویت شده خواهد بود (رابطه 3). بدیهی است که با ثابت در نظر گرفتن پارامتر شناسه سازه، کمینه‌کردن سطح مقطع به مفهوم بیشینه کردن تنش مجاز اعمال شده بر سازه خواهد بود [11].

$$X = \{b, t, b_a, t_a, b_w, t_w, b_f, t_f\} \quad (2)$$

$$f(x) = \min(bt + b_a t_a + b_w t_w + b_f t_f) \quad (3)$$



شکل 2 پل تقویت شده در دو حالت تقویت کننده یکپارچه و پرچ شده [12]



شکل 3 هندسه پل تقویت شده با تقویت کننده نوع Z در یک گام

1- Blade stiffener with outstanding flange  
2- Minimization

## 2-2- محاسبه ممان دوم سطح مقطع پل تقویت شده

به دست آوردن یک رابطه تقریبی برای محاسبه ممان دوم سطح مقطع پل تقویت شده با پیکربندی نشان داده شده در شکل 3 به گونه‌ای که ضمن فراهم کردن یک نتیجه کلی از دقت قابل قبولی نیز برخوردار باشد، ضروری است. این رابطه علاوه بر امکان اعمال به پل تقویت شده با استرینگرهای نوع I و Z، محدود به نسبت خاصی از ابعاد مقطع تقویت کننده نمی‌گردد.

ابتدا مساحت بال‌های بالایی و پایینی استرینگر به صورت نسبتی از مساحت جان استرینگر به صورت روابط (10) و (11) تعریف می‌شوند:

$$b_a t_a \equiv A_2 = \alpha A_3 = \alpha (b_w t_w) \quad (10)$$

$$b_f t_f \equiv A_4 = \beta A_3 = \beta (b_w t_w) \quad (11)$$

$\alpha$  و  $\beta$  نسبت بی‌بعد مساحت‌ها می‌باشند. با صرف نظر کردن از عبارات درجه دوم و درجات بالاتر ضخامت‌ها، عبارت ساده شده (12) برای ممان اینرسی مقطع پل تقویت شده حول محور خنثی موازی عرض پوسته به دست خواهد آمد:

$$I_{xx} = \frac{1}{12} \frac{b_w^3 t_w}{bt + b_w t_w \alpha + b_w t_w + b_w t_w \beta} \times (4b_w t_w \alpha + 12\alpha \beta b_w t_w + b_w t_w + 4\beta b_w t_w + 4bt + 12\beta bt) \quad (12)$$

با تعریف نسبت سفتی پل<sup>3</sup> به صورت رابطه (13):

$$SR \equiv \frac{A_{st}}{A_{sk}} = \frac{b_w t_w (\alpha + \beta + 1)}{bt} \quad (13)$$

که یک نسبت مهم در طراحی پل تقویت شده می‌باشد، می‌توان رابطه 13 را به صورت رابطه (14) نوشت:

$$I_{xx} = \frac{1}{12} \frac{b_w^3 t_w (SR \times f_1 + f_2)}{(1 + SR)} \quad (14)$$

به طوری که طبق روابط (15-17):

$$f_1 = \frac{4\alpha + 4\beta + 12\alpha\beta + 1}{\alpha + \beta + 1} \quad (15)$$

$$f_2 = 4 + 12\beta \quad (16)$$

$$f_3 = \alpha + \beta + 1 \quad (17)$$

و مساحت کل مقطع پل تقویت شده (تابع هدف) طبق رابطه (18) عبارت خواهد بود از:

$$A = bt(1 + SR) \quad (18)$$

## 2-3- طراحی نزدیک به بهینه پل تقویت شده فشاری

با برابر قراردادن هر سه قید طراحی و استفاده از رابطه 7 برای پیش‌بینی تنش کمانش محلی پوسته و جان استرینگر، می‌توان ابعاد بهینه پل را به گونه‌ای یافت که هیچکدام از قیود نقض نشده و همزمان هر سه قید طراحی فعال باشند. از آنجایی که در این راهبرد از اصل طراحی بهینه سازه تمام تنیده<sup>4</sup> استفاده می‌شود، نتیجه حاصل نیز به نوعی نزدیک به بهینه است [17, 18]. فرایند اجرایی این راهبرد به صورت زیر است:

1. با استفاده از روابط 4، 5 و 12 می‌توان رابطه تنش کمانش کلی را به صورت زیر نوشت. طبق روابط (19) و (20) داریم:

$$\sigma_{gb} = \sigma_{cy} - \frac{\sigma_{cy}^2 \left( \frac{L'}{\rho} \right)^2}{4\pi^2 E} \quad (6)$$

به طوری که  $\sigma_{cy}$  تنش مجاز فشاری ماده می‌باشد. در یک پل تقویت شده پوسته- استرینگر، رسیدن تنش به سطح تنش کریپلینگ در هر کدام از اجزای استرینگر به عنوان تنش بحرانی و یکی از مدهای خرابی آن در نظر گرفته می‌شود (با شرط:  $\sigma_{cr} < 0.9\sigma_{cy}$ ). در نتیجه می‌توان با قرار دادن تنش کریپلینگ به جای تنش مجاز فشاری ماده در رابطه 6 به تقریبی دقیق‌تر از تنش کمانش کلی رسید [13, 2].

برای استفاده مناسب از تصحیحات اعمال شده در بند اول، یعنی به کارگیری مدول الاستیک مماسی انجام یک فرایند چرخه‌ای<sup>1</sup> ضروری است.

## 2-1-2- تنش کمانش محلی یا کریپلینگ

در روش طراحی ارائه شده، پوسته و تقویت‌کننده به گونه‌ای اندازه می‌شوند که کمانش محلی در هیچ کدام از اجزاء آن رخ ندهد. به عبارت دیگر تمام عرض پوسته، موثر در نظر گرفته می‌شود [14, 15]. لذا می‌توان از رابطه کلی ارائه شده در تئوری صفحه برای تحلیل تنش کمانش محلی پوسته و استرینگر استفاده کرد [11]. طبق رابطه (7) داریم:

$$\sigma_{lb} = k_{cr} E \left( \frac{t}{b} \right)^2 \quad (7)$$

در رابطه 7،  $t$  ضخامت ورق تحت بارگذاری فشاری محوری و  $b$  بعدی از ورق است که بار محوری فشاری به آن اعمال می‌شود. در صورتی که نسبت طول به عرض ورق ( $a/b$ ) بیشتر از 3 فرض شود (که در پل تقویت شده فشاری فرض صحیحی است)، دقت رابطه 7 قابل قبول خواهد بود. ضریب  $k_{cr}$  بسته به شرایط تکیه‌گاهی ورق دارد و برای یک ورق با چهار طرف تکیه‌گاه ساده (مانند جان استرینگر<sup>2</sup> یا پوسته پل)  $k_{cr} = 3.62$  منظور می‌گردد [11]. با توجه به سفتی تقویت‌کننده، می‌توان فرض کرد که پوسته بر روی تکیه‌گاهی با استحکام بیشتر از تکیه‌گاه ساده قرار دارد و فرض تقویت‌کننده‌ها به عنوان تکیه‌گاه ساده یک فرض محافظه کارانه است.

روش دیگر تحلیل کمانش محلی پوسته و استرینگر، استفاده از رابطه 7 برای تحلیل کمانش پوسته و استفاده از روابط تجربی زیر برای کمانش محلی یا کریپلینگ استرینگر است. طبق روابط (8) و (9) داریم:

$$\sigma_{cr} = 0.6121 \sigma_{cy} \left[ \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{cy}}{E}} \right]^{-0.7735} \quad (8)$$

$$\sigma_{cr} = 1.1819 \sigma_{cy} \left[ \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{cy}}{E}} \right]^{-0.7882} \quad (9)$$

رابطه 8 تنش مجاز کریپلینگ مقطع استرینگر را با این شرط که جزء مورد نظر دارای یک سر آزاد باشد (مانند بال بیرون زده استرینگر) در اختیار می‌گذارد (با شرط:  $\sigma_{cr} < 0.9\sigma_{cy}$ ). برای محاسبه تنش کریپلینگ در جان استرینگر از رابطه 9 استفاده می‌شود که برای اجزاء بدون سر آزاد معرفی گردیده است [16, 4, 3].

3- Stiffening ratio  
4- Fully stressed design

1- Iterative process  
2- Stringer web

$$\sigma_{\text{allow}} = (k_1 k_2 k_3^2)^{\frac{1}{4}} \left( \frac{NE}{L} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

همان طور که مشاهده می‌گردد، پارامتر شناسه سازه با توان  $\frac{1}{2}$  بوده و  $F$  فاکتور کارایی شکل است که تابعی از پارامترهای  $t_w/t$  و  $SR$  می‌باشد:

$$F = (k_1 k_2 k_3^2)^{\frac{1}{4}} \rightarrow F = \frac{0.9523}{1+SR} \left[ \frac{\left( \frac{k_2}{f_3^3} \right) SR^3 (SR \times f_1 + f_2)}{\left( \frac{t_w}{t} \right)^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (31)$$

می‌توان با استفاده از رابطه (25) تعداد متغیرهای تابع کارایی شکل را به یک متغیر کاهش داد، لذا با تعریف  $T = t_w/t$ :

$$F = 1.3136 \left( \frac{T^4 (f_1 f_3 T^2 + f_2)}{(1 + f_3 T^2)^4} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (32)$$

و یا با متغیر فرض کردن  $SR$  به دست می‌آید:

$$F = 1.3136 \left( \frac{SR^2 (SR f_1 + f_2)}{f_3^2 (1 + SR)^4} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (33)$$

با مشتق‌گیری از رابطه 32 و 33 می‌توان مقدار بهینه را پیدا کرد:

$$\left( \frac{t_w}{t} \right)_{\text{opt}} = \frac{1}{f_1 f_3} \times \left( 0.707 \sqrt{f_1 f_3 (3f_1 - 2f_2 + \sqrt{9f_1^2 - 4f_1 f_2 + 4f_2^2})} \right) \quad (34)$$

$$SR_{\text{opt}} = \frac{0.5}{f_1} \left( 3f_1 - 2f_2 + \sqrt{9f_1^2 - 4f_1 f_2 + 4f_2^2} \right) \quad (35)$$

با استفاده از روابط 28، 29، 34 و 35 می‌توان ابعاد نزدیک به بهینه پل تقویت شده فشاری و مقدار مجاز تنش فشاری را برای هر پیکربندی دلخواه (متغیرهای  $\alpha$  و  $\beta$ ) در مقدار معین شناسه سازه یافت. همچنین با توجه به اینکه فاکتور کارایی شکل (که مقادیر بهینه  $t_w/t$  و  $SR$  در آن جایگذاری شده‌اند)، خود تابعی از  $\alpha$  و  $\beta$  می‌باشد، می‌توان تغییرات آن را نسبت به تغییر در این دو پارامتر مشاهده کرد (شکل 4).

### 2-3-1- اصلاح مقدار تنش مجاز پل تقویت شده فشاری

در راهبرد ارائه شده برای طراحی پل تقویت شده هر سه مقدار مجاز تنش (تنش کماتش کلی پل، تنش کریپلینگ استرینگر و تنش کماتش محلی پوسته) باهم برابر قرار داده شدند. از طرفی مقدار صحیح تنش کماتش کلی یا ستونی پل تقویت شده بستگی به نسبت لاغری آن داشته و این نسبت تا قبل از طراحی کامل پل تقویت شده معلوم نمی‌باشد. از اینرو می‌توان با قرار دادن مقدار تنش به دست آمده از رابطه 30 در رابطه 6 (با توجه به نسبت لاغری پل)، مقدار اصلاح شده تنش مجاز پل تقویت شده را به دست آورد:

$$\sigma_{\text{allow}} = \sigma_{\text{opt}} \frac{\sigma_{\text{opt}}^2 \left( \frac{L}{\rho} \right)^2}{4\pi^2 E} \quad (36)$$

و شدت بار مجاز طراحی عبارت خواهد بود از:

$$N_{\text{allow}} = \frac{\sigma_{\text{allow}} A}{b} \quad (37)$$

$$\sigma_1 = k_1 E \left( \frac{b}{L} \right)^2 \quad (19)$$

$$k_1 = \frac{\pi^2}{12} \left( \frac{b_w}{b} \right)^3 \left( \frac{t_w}{t} \right) \left[ \frac{(SR \times f_1 + f_2)}{(1 + SR)^2} \right] \quad (20)$$

رابطه (21) برای پیش‌بینی کماتش محلی (پوسته و جان استرینگر) مورد استفاده قرار می‌گیرد (بازنویسی رابطه 7):

$$\sigma_2 = k_2 E \left( \frac{t}{b} \right)^2 \quad (21)$$

اگر پوسته در حالت بحرانی باشد، ضریب کماتش محلی طبق رابطه (22) عبارت خواهد بود از [11]:

$$k_2 \equiv k_{2sk} = 3.62 \quad (22)$$

رابطه مورد استفاده برای پیش‌بینی کماتش بحرانی جان استرینگر طبق رابطه (23) عبارت است از [11]:

$$\sigma_{\text{lb-stringer-web}} = k_{\text{cr}} E \left( \frac{t_w}{b_w} \right)^2 \quad (23)$$

اگر تقویت کننده از نوع I یا Z باشد:  $KCF=3.62$  و اگر از نوع تیغه‌ای بدون بال بیرون زده باشد  $KCF=0.58$  خواهد بود.

ضریب کماتش محلی در حالت بحرانی بودن استرینگر طبق رابطه (24) عبارت خواهد بود از:

$$k_2 \equiv k_{2st} = k_{\text{cr}} f_3^2 \left( \frac{t_w}{t} \right)^4 \left( \frac{1}{SR} \right)^2 \quad (24)$$

اگر پوسته و استرینگر به طور همزمان در حد نهایی تنش مجاز قرار بگیرند، حالت بهینه به دست می‌آید. طبق رابطه (25) داریم:

$$k_{2sk} = k_{2st} \rightarrow SR = f_3 \sqrt{\frac{k_{\text{cr}}}{k_{2sk}}} \left( \frac{t_w}{t} \right)^2 \quad (25)$$

3. رابطه تنش حدی<sup>1</sup> طبق رابطه (26,27) عبارت است از:

$$\sigma_3 = k_3 \left( \frac{N}{t} \right) \quad (26)$$

$$k_3 = \frac{1}{1 + SR} \quad (27)$$

با برابر قرار دادن تنش‌های مجاز  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$  و معلوم فرض کردن ضرایب  $k_1, k_2, k_3$  ابعاد بهینه پوسته به دست خواهد آمد. طبق روابط (28,29) داریم:

$$t = \left( \frac{k_3^2}{k_1 k_2} \right)^{\frac{1}{4}} \left( \frac{LN}{E} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

$$b = \left( \frac{k_2 k_3^2}{k_1^3} \right)^{\frac{1}{4}} \left( \frac{NL^3}{E} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

با جایگذاری این ابعاد در هر کدام از روابط تنش (19، 21 یا 26) حداکثر تنش مجاز در مقدار معین شناسه سازه طبق رابطه (30) عبارت خواهد بود از:

$$\sigma_1 = \left( \frac{\pi^2 (SR)^3 (SR \times f_1 + f_2)}{12 f_3 (1+SR)^2} \right) \left( \frac{b}{LT} \right)^2 \quad (39)$$

$$\sigma_{2st} = E \left[ k \sigma_{cy} \left( E^{-\frac{1}{p}} \sqrt{\frac{E}{\sigma_{cy}}} \right)^p \left( \frac{f_3}{SR} \right)^p \right] \left[ T^{2p} \left( \frac{t}{b} \right)^p \right] \quad (40)$$

$$\sigma_{2sk} = 3.62E \left( \frac{t}{b} \right)^2 \quad (41)$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{1+SR} \left( \frac{N}{t} \right) \quad (42)$$

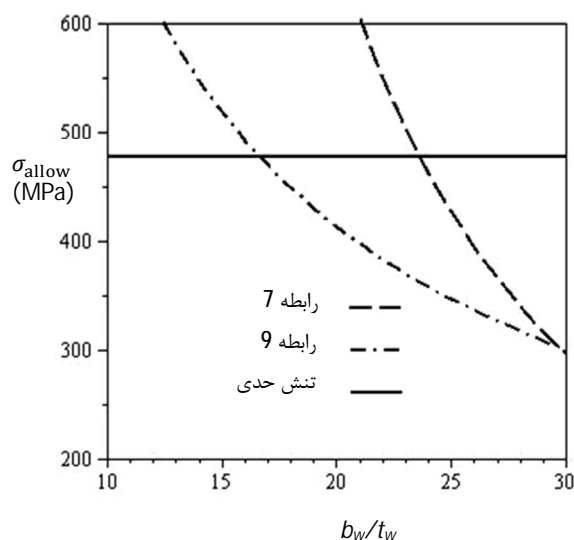
اگر ضرایب سمت چپ در روابط فوق به ترتیب  $k_1, k_2, k_3$  و متغیرهای طراحی  $SR, b, t$  و  $T \equiv t_w/t$  فرض شوند، می‌توان با انجام عملیات ریاضی لازم، متغیرهای طراحی و شکل نهایی تابع تنش را بر حسب شناسه سازه به دست آورد:

$$\sigma_{opt} = \left( k_1 k_{2sk}^{\frac{1}{2}} k_{2st}^{\frac{1}{p}} k_3^2 \right)^{\frac{2p}{7p+2}} E^{\frac{3p+2}{7p+2}} \left( \frac{N}{L} \right)^{\frac{4p}{7p+2}} \quad (43)$$

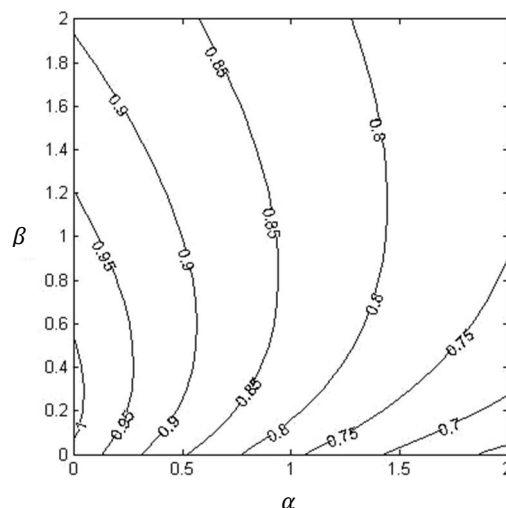
به طوری که برای پل تقویت شده با تقویت کننده  $Z, k=1.1819$  و  $p=+0.7882$  می‌باشد. مشخصات ماده نیز مطابق با جدول 1 است. در نتیجه:

$$\sigma_{opt} = 0.5184 \left( \left( \frac{SR}{f_3} \right)^3 \frac{(SR \times f_1 + f_2)}{(1+SR)^4} \right)^{0.2097} \left( \frac{N}{L} \right)^{0.4194} \quad (44)$$

با استفاده از رابطه 44 می‌توان مقدار بیشینه یا بهینه تنش فشاری مجاز را برای هر پیکربندی دلخواه پل (متغیرهای  $\alpha$  و  $\beta$  و  $SR$ ) یافت. همچنین با معلوم بودن متغیرهای  $\alpha$  و  $\beta$ ، می‌توان با مشتقگیری از رابطه 44 مقدار بهینه‌ای برای  $SR$  یافت و یا اینکه بسته به ملزومات طراحی آن را به صورت دلخواه انتخاب کرد. در نهایت برای اصلاح مقدار تنش مجاز و شدت بار بحرانی بسته به نسبت لاغری پل تقویت شده طراحی شده، روابط 36 و 37 به کار گرفته می‌شوند.



شکل 5 مقایسه روابط 7 و 9 برای پیش‌بینی کرنش استرینگر



شکل 4 اثر تغییرات مقادیر  $\alpha$  و  $\beta$  در مقدار بهینه فاکتور کارایی شکل

و مقدار واقعی شناسه سازه به دست می‌آید:

$$K_{real} = \frac{N_{allow}}{L} \quad (38)$$

4-2- طراحی پل تقویت شده با استفاده از روابط تجربی تنش کرنش کرنش رابرد کلی معرفی شده در بخش 2-3 را می‌توان با بکارگیری روابط 8 و 9 برای محاسبه تنش کرنش کرنش مقطع جان استرینگر، بهبود بخشید. با مقایسه روابط 7 و 9 برای پیش‌بینی تنش کرنش کرنش جان استرینگر در نمودار شکل 5 می‌توان نتیجه گرفت که رابطه تجربی اخیر محافظه کارانه‌تر بوده و با اضافه کردن این شرط اضافی به قیود طراحی مسئله، نتیجه حاصله بهبود می‌یابد.

لازم به ذکر است که در روش‌های معمول طراحی نسبت  $b_w/t_w$  معمولاً بین 18 تا 22 در نظر گرفته می‌شود [۲۰،۳۴] و در نسبت‌های بیشتر از 30، مقدار مجاز تنش کرنش کرنش جان استرینگر به شدت کاهش می‌یابد. نمودارهای شکل 5 با در نظر گرفتن مشخصات ماده مطابق با جدول 1 رسم شده‌اند.

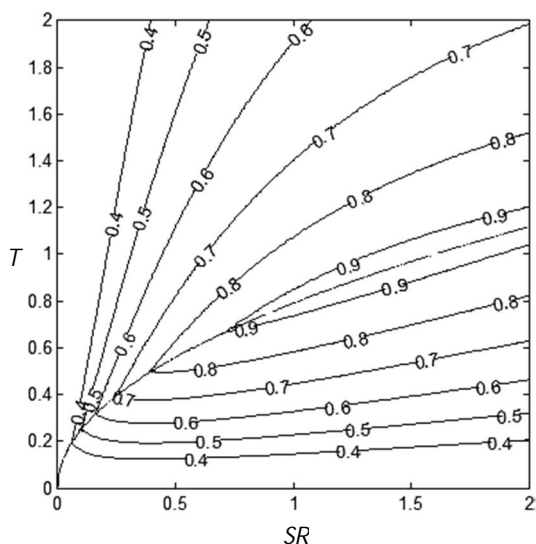
در صورتی که سطح تنش در مقطع استرینگر بیشتر از مقدار پیش‌بینی شده توسط رابطه 9 باشد مقطع دچار کماتش محلی یا کرنش کرنش شده و طراحی غیر قابل قبول خواهد بود. بیشترین مقدار تنشی که می‌توان برای کرنش کرنش در نظر گرفت،  $0.9\sigma_{cy}$  است. اعمال تنشی بالاتر از این مقدار نیازمند آزمایش تجربی برای بررسی عدم کرنش کرنش مقطع است.

#### 4-2-1- معرفی قیود طراحی و استخراج نتایج

در این رابرد چهار رابطه برای معرفی تنش‌های بحرانی در سازه معرفی می‌شوند که از برابر قرار دادن آنها سه معادله مستقل به دست می‌آید. این روابط به ترتیب عبارتند از: تنش مجاز کماتش کلی، تنش کرنش کرنش جان استرینگر، تنش کماتش پوسته و تنش معادل در سازه (به ترتیب روابط 39 تا 42).

جدول 1 مشخصات ماده پل تقویت شده [2]

مقدار	پارامتر ماده
$E = 73774 \text{ MPa}$	مدول الاستیک
$\sigma_{cy} = 531 \text{ MPa}$	تنش تسلیم فشاری
$\nu = 0.33$	ضریب پواسون



شکل 6 تغییرات فاکتور کارایی شکل در اثر تغییرات مقادیر  $SR$ ,  $T$

$$\left(\frac{t_w}{t}\right)_{opt} = 0.94 \quad (49)$$

$$SR_{opt} = 1.4127 \quad (50)$$

$$F_{opt} = 0.943 \quad (51)$$

$$\sigma_{opt} = 0.943(KE)^{\frac{1}{2}} \quad (52)$$

مقادیر به دست آمده فوق قابل مقایسه با مقادیر بهینه ذکر شده در مرجع [11] هستند که عبارتند از:  $t_w/t=1.05$  و  $SR=1.5$  و  $F=0.95$ . اختلاف بین مقادیر بهینه به علت استفاده از ضرایب دقیق تر کمانش محلی در مرجع [11] با توجه به نمودارهای تجربی موجود بوده است.

در صورتی که رابطه تنش بهینه به دست آمده در بخش 4-2 (رابطه 44)

با پیکربندی  $\alpha = \beta = 0.3$  و مشخصات ماده مطابق با جدول 1 استخراج گردد، رابطه تنش بهینه ای حاصل می شود که کاملاً قابل مقایسه با رابطه 52 است:

$$\sigma_{opt} = 4737.4 \left(\frac{N}{L}\right)^{0.4194} \quad (53)$$

با رسم نمودارهای تنش بهینه هر دو راهبرد بر حسب شناسه سازه در شکل 7 مشخص می شود نتایج هر دو روش نزدیک به هم می باشند، اگرچه رابطه 53 مقادیر دقیق تری در اختیار می گذارد.

### 3-1- مقایسه نتایج روش شناسه سازه و روش های موجود

با استفاده از نتایج تحلیل های بخش 4-2 (رابطه 44) ابعاد بهینه و شدت بار محوری مجاز پل تقویت شده به دست آمده و با مقادیر بیان شده در مرجع [2] مقایسه شده است (جدول 2). در هر دو مورد پارامترهای شناسه سازه و خصوصیات مواد یکسان در نظر گرفته شده اند.

لازم به ذکر است که در طراحی کاربردی پل های تقویت شده فشاری به علت برخی ملزومات طراحی از نسبت سفتی غیر بهینه استفاده می شود (معمولاً  $SR=0.5$ ) [4,6]. بدیهی است در صورت استفاده از مقدار بهینه نسبت سفتی، مقدار تنش مجاز افزایش خواهد یافت.

در صورتی که ابعاد طراحی شده جدول 2، با روش تحلیلی-چرخه ای

### 2-5- اندازه کردن بال های استرینگر

تاکنون روش هایی برای اندازه کردن ابعاد اصلی پل تقویت شده پوسته- استرینگر مطرح گردید که در آن ابعاد پوسته، مساحت استرینگر و ابعاد جان استرینگر به دست آمدند. با توجه به در نظر گرفتن تقریبی از ممان دوم سطح مقطع پل تقویت شده که در آن از جزییات ابعاد بال های پایینی و بالایی استرینگر صرف نظر شده و فقط نسبت مساحت هایشان مطرح گردیده است، می توان چنین نتیجه گرفت که مهم ترین شرط برای اندازه کردن این اجزاء عدم کمانش محلی یا کریپلینگ این مقاطع است. با این شرط می توان هر دو نوع استرینگر  $l$  و  $Z$  را با توجه به نیاز طراح اندازه کرد. برای نیل به این هدف از رابطه تجربی تنش کریپلینگ 8 استفاده می شود. با توجه به رابطه 8 برای استرینگرهای نوع  $Z$  می توان نوشت:

$$\frac{b_a}{t_a} \leq \left[ \frac{\frac{p}{E^2} \sigma_{allow}}{k \sigma_{cy}^{1+\frac{p}{2}}} \right]^{\frac{1}{p}} \quad (45)$$

$$b_a t_a = \alpha b_w t_w \quad (46)$$

به طوریکه  $k=0.6121$  و  $p=0.7735$  می باشد. در صورتی که قید طراحی خاصی بر روی ابعاد بال استرینگر وجود نداشته باشد، رابطه کوچکتر مساوی به مساوی تبدیل می شود.

همچنین در استرینگرهای نوع  $l$ :

$$\frac{b_a}{2t_a} \leq \left[ \frac{\frac{p}{E^2} \sigma_{allow}}{k \sigma_{cy}^{1+\frac{p}{2}}} \right]^{\frac{1}{p}} \quad (47)$$

$$b_a t_a = \alpha b_w t_w \quad (48)$$

در صورتی که قید طراحی خاصی بر روی ابعاد بال استرینگر وجود نداشته باشد، رابطه کوچکتر مساوی به مساوی تبدیل می شود.

در روابط فوق،  $\sigma_{allow}$  همان تنش مجاز اعمال شده بر روی پل است که از روابط بهینه شده شناسه سازه محاسبه گردیده است. در صورتی که از روش فوق برای اندازه کردن بال بیرون زده استرینگر (بال پایینی) استفاده شود، می بایست در روابط 46 و 48 ضریب  $\beta$  اعمال گردد.

### 3- تحلیل و اعتبار سنجی نتایج

به منظور بررسی صحت و اعتبار سنجی رابطه کلی 31، نتایج آن با نمونه حل شده در مرجع [11] مقایسه می گردد. در این حالت  $\alpha = \beta = 0.3$  است و ضخامت جان استرینگر با ضخامت بال های آن برابر و مساوی  $t_w$  در نظر گرفته می شود:  $t_a = t_w$ . با این توضیحات  $f_1=2.8$ ,  $f_2=7.6$ ,  $f_3=1.6$  و ضریب کمانش بحرانی محلی،  $k_2$  نیز بسته به بحرانی بودن پوسته و یا استرینگر مطابق با روابط 22 و یا 24 به دست خواهد آمد. با این معلومات می توان فاکتور کارایی شکل را بر حسب متغیرهای طراحی رسم کرده و مقادیر بهینه آن را به دست آورد. بسته به پیکربندی پل (مقادیر  $SR$  و  $T$ )، پوسته و یا استرینگر در معرض کمانش محلی خواهد بود. مطابق با نمودار شکل 6، اگر  $SR < f_3 (t_w/t)^2$  پوسته و اگر  $SR > f_3 (t_w/t)^2$  استرینگر در حالت بحرانی کمانش قرار می گیرد. نقطه بهینه طراحی زمانی است که پوسته و استرینگر همزمان به بار کمانش بحرانی محلی برسند. این موقعیت برابر با کمانش کل پل نیز خواهد بود (نمودار نقطه چین در شکل 6). در این حالت مقادیر بهینه عبارتند از:

جدول 3 مقایسه نتایج پل تقویت شده با استرینگر نوع Z با بال‌های مساوی

بخش 2-4	بر اساس مرجع [4]	روش طراحی
	بر اساس مرجع [4]	مشخصات ماده
4/3 (4/96)	4/3	شناسه سازه (N/mm <sup>2</sup> )
0/5	0/5	نسبت سفتی SR
2837/1	2837/1	شدت بار مجاز (kN/m)
ابعاد پل تقویت شده (mm)		
136/38	124/14	b
5/64	5/29	t
56/75	54/8	b <sub>w</sub>
3/16	2/8	t <sub>w</sub>
33/86	23/6	b <sub>a</sub>
3/02	3/68	t <sub>a</sub>
1152/9	985/7	A

## 3-2- مقایسه با نتایج حاصل از تحلیل‌های اجزاء محدود

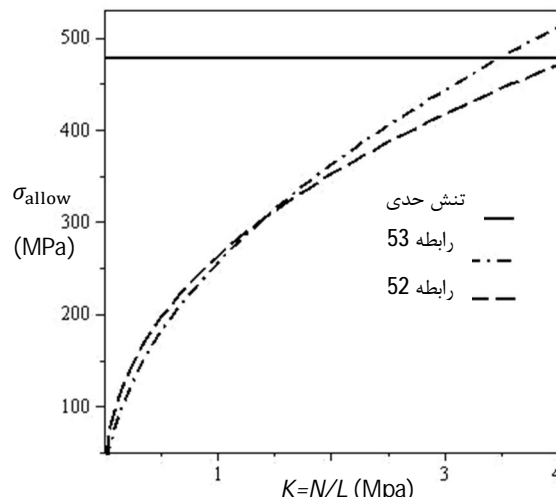
پیچیدگی رفتار پل تقویت شده تحت اثر بار محوری باعث احتمال وقوع مدهای کمانش متفاوت شامل مدهای کمانش کلی و محلی پوسته و تقویت کننده [19,20] در این نوع سازه می‌گردد. به علت این پیچیدگی استفاده از روش‌های اجزاء محدود و یا آزمایش‌های تجربی برای پیش‌بینی دقیق مقدار بار بحرانی و مد کمانشی ضروری و در برخی مواقع یگانه روش مورد استفاده است [21]. در این بخش به منظور انجام فرایند اعتبارسنجی از نتایج طراحی ابعادی روش شناسه سازه، بسته تجاری اجزاء محدود ANSYS11 برای تحلیل پل تقویت شده و مقایسه نتایج به کار گرفته می‌شود. المان پوسته SHELL63 در این تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین تعداد مناسب المان‌ها با توجه به مطالعات مشابه و نتایج حاصل از همگرایی انتخاب گردیده است [22,23].

در پل‌هایی که در آن پوسته و استرینگر با اتصال پرچ به یکدیگر متصل شده‌اند، موضوع مهمی که در مقدار بار بحرانی مود اول کمانش حائز اهمیت است، فاصله بین پرچ‌ها و مسئله کمانش بین پرچی است. اندازه‌کردن فاصله بین پرچ‌ها از طریق روش‌های ساده تحلیلی در مراجع مورد بررسی قرار گرفته و در اینجا از ذکر مجدد آن خودداری می‌گردد [۲،۳،۴]. از اینرو پل تقویت شده یکپارچه با تقویت کننده تیغه‌ای و پل تقویت شده یکپارچه با تقویت کننده تیغه‌ای با بال بیرون زده از طریق روش شناسه سازه برای بار طراحی 1751.3 kN/m اندازه می‌گردند. سپس پل تقویت شده طراحی شده با مشخصات ماده‌ای مطابق با جدول 1 از طریق روش اجزاء محدود تحلیل شده و بار بحرانی کمانش آن به دست می‌آید.

نتایج حاصل از دو روش در جدول 4 مقایسه شده‌اند. نتایج نشان دهنده معتبر بودن طراحی در محدوده بار بحرانی کمانش می‌باشد. لازم به ذکر است که در طراحی پل تقویت شده یکپارچه با تقویت کننده تیغه‌ای با بال بیرون زده از مقدار بهینه  $\beta = 0.25$  استفاده شده است. شکل اولیه و مود اول کمانش در شکل 8 و شکل 9 به ترتیب برای حالت پوسته با تقویت کننده تیغه‌ای و پوسته با تقویت کننده تیغه‌ای با بال بیرون زده در یک گام آورده شده است.

جدول 4 مقایسه بار بحرانی کمانش (kN/m) از روش شناسه سازه و اجزاء محدود

نوع پل تقویت شده	شناسه سازه	اجزاء محدود	% اختلاف
پل یکپارچه با تقویت کننده تیغه‌ای	1751/3	2289/8	23%
تقویت کننده تیغه‌ای با بال بیرون زده	1751/3	1820/1	3.8%



شکل 7 مقایسه مقدار تنش بیشینه از دو روش مختلف بر اساس شناسه سازه

معرفی شده در مرجع [2] مورد تحلیل قرار گیرد، شدت بار محوری مجاز  $N_{allow} = 2007.3$  kN/m به دست می‌آید که کاملاً نزدیک به نتایج حاصل در جدول 2 است.

لازم به ذکر است که در جدول 2 و جدول 3 مقدار اولیه شناسه سازه در داخل پراتر آورده شده است که با توجه به نسبت لاغری پل طراحی شده این مقدار توسط روش بخش 2-3-1 اصلاح گردیده و مقدار واقعی شناسه سازه نوشته شده است.

طراحی ابعادی پل تقویت شده فشاری در مرجع [4] با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی SQP بهبود یافته است و نتایج حاصل از این روش و روش ارائه شده در این مقاله در جدول 3 مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. از آنجاییکه در مرجع [4] از یک روش بهینه‌سازی عددی - چرخه‌ای استفاده شده است، نتایج بهتری در بر خواهد داشت، اما روش شناسه سازه همچنان برتری خود را به عنوان یک ابزار اولیه و سریع در طراحی ابعادی پل تقویت شده فشاری حفظ خواهد کرد.

جدول 2 مقایسه نتایج پل تقویت شده با استرینگر نوع

بخش 2-4	بر اساس مرجع [2]	روش طراحی
جدول 1	جدول 1	مشخصات ماده
2/3(3/4)	2/3	شناسه سازه (N/mm <sup>2</sup> )
0/5	0/5	نسبت سفتی SR
1917/7	1920/3	شدت بار مجاز (kN/m)
ابعاد پل تقویت شده (mm)		
139/03	129/03	b
4/98	3/94	t
55/37	48/01	b <sub>w</sub>
2/29	2/44	t <sub>w</sub>
50/5	51/3	b <sub>a</sub>
3/2	2/7	t <sub>a</sub>
29/2	19/1	b <sub>r</sub>
1/8	2/4	t <sub>r</sub>
1308/2	805/9	A



$L$	طول پل تقویت شده (m)
$N$	شدت بار مجاز محوری ( $Nm^{-1}$ )
$SR$	نسب مساحت استرینگر به مساحت پوسته؛ نسبت سفتی پل
$T$	نسبت ضخامت جان تقویت کننده به ضخامت پوسته

## علائم یونانی

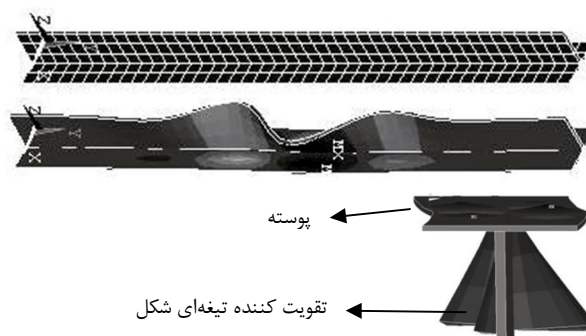
$\alpha$	نسبت مساحت بال استرینگر به جان استرینگر
$\beta$	نسبت مساحت بال بیرون زده استرینگر به جان استرینگر
$\nu$	نسبت پواسون
$\rho$	شعاع ژیراسیون ( $m^2$ )
$\sigma$	تنش ( $Nmm^{-2}$ (MPa))

## زیرنویس‌ها

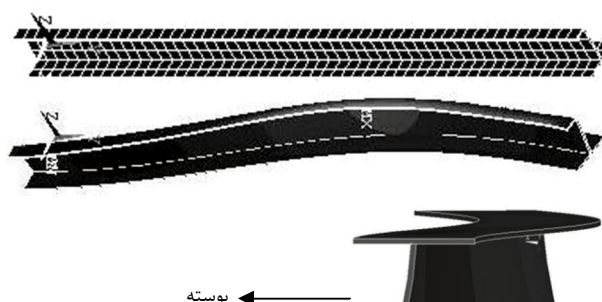
allow	مقدار مجاز
cr	کریپلینگ (مربوط به تنش)
cy	تسلیم فشاری (مربوط به تنش)
gb	کمانش کلی
lb	کمانش محلی
opt	مقدار بهینه
sk	پوسته
st	تقویت کننده (استرینگر)

## 6- مراجع

- [1] S. P. Timoshenko, J. M. Gere, *Theory of Elastic Stability*, Second Edition, New York: McGraw-hill book company, 1961.
- [2] C-Y. M. Niu, *Airframe Stress Analysis and Sizing*, Second Edition, Hong kong conmillit press, 2001.
- [3] M. Abdo, P. P. Piperni, F. Kafyke, Conceptual design of stringer stiffened compression panels, in *Canadian aeronautics and space institute 50th AGM and conference*, Montreal, 2003.
- [4] S. Chintapalli, M. 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.
- [5] A. Fereidoon, H. Hemmatian, A. Mohammadzadeh, E. Assareh, Sandwich panel optimization based on yielding and buckling criteria by using of imperialist competitive algorithm, *Moades Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 25-35, 2013. (In Persian)
- [6] J. Wiedemann, *Leichtbau 2: Kontruktion*. Berlin: Springer-verlag, 1996. (in Germany).
- [7] M. Dezyani, H. Nakhforoosh, S. Yousefi, H. Dalayeli, An Investigation On The Optimum Design Using Structural Index Concept: Study Of Bending Beams, in *21st International Conference on Mechanical Engineering*, Tehran, 2013. (In Persian).
- [8] B. Budiansky, On the minimum weights of compression structures, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 36, No. 24, no. 25, pp. 3677-3708, 1999.
- [9] D. J. Frrar, The design of compression structures for minimum weight, *Journal of aeronautical society*, vol. 53, pp. 1041-1053, 1949.
- [10] D.M. Richards, *The minimum weight design of compression structures including plasticity effects*, PhD Thesis, Cranfield institute of technology, 1977.
- [11] D. W. A. Rees, *Mechanics of optimal structural design*, New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- [12] J. Wiedemann, *Leichtbau1: Elemente*, Berlin: Springer, 1996. (in Germany)
- [13] S. van der Veen, D. Coatta, Stiffened panels in compression: redirecting loads toward high-strength stiffeners, in *45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference*, Palm Springs, 2004.
- [14] E. F. Bruhn, *An analysis and design of flight vehicle structures*, Tri-state offset company, 1973.
- [15] Sh. Yousefi, *Analysis of aerospace structure*, Tehran: Sazmane sanaye havafaza, 2006. (In Persian)
- [16] G. Gerard, *Handbook of structural stability- failure of plates and composite elements*, Washington: NACA, NACA TN 3784, 1957.
- [17] V.B. Venkayya, Design of optimum structures, *Computers&Structures*, Vol. 1, No. 1-2, pp. 265-309, 1971.



شکل 8 شکل مود کمانش اول پل تقویت شده یکپارچه با تقویت کننده تیغه‌ای در یک گام



شکل 9 شکل مود کمانش اول پل تقویت شده یکپارچه با تقویت کننده تیغه‌ای با بال بیرون زده در یک گام

## 4- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله روند طراحی پل تقویت شده فشاری با استرینگرهای نوع L و Z با پیکربندی و خصوصیات مواد دلخواه بر اساس مفهوم شناسه سازه تشریح و فرایند طراحی ابعادی آن بیان شد. ابزار طراحی ابعادی ارائه شده در یک گام و به صورت تحلیلی و صریح طراحی اولیه پل تقویت شده فشاری را ارائه می‌کند. در مقایسه با نتایج دیگر محققان که از روش‌های چرخه‌ای استفاده می‌کنند، نتایج حاصل اگر چه از لحاظ وزن سنگین‌تر اما در حوزه بار بحرانی قابل قبول می‌باشد. مقایسه بار بحرانی طراحی براساس روش شناسه سازه و بار بحرانی کمانش حاصل از تحلیل‌های اجزاء محدود نشان دهنده معتبر بودن طراحی می‌باشد. به کارگیری نتایج روش شناسه سازه برای نقاط اولیه طراحی در روش‌های بهینه‌سازی عددی باعث بهبود نتایج و کاهش هزینه محاسبات بهینه‌سازی می‌گردد.

در نظر گرفتن موضوع کمانش بین پرچی و اندازه کردن فاصله بین پرچ‌ها در پل تقویت شده پوسته- استرینگر از مواردی است که می‌تواند در ادامه تحقیق فعلی ارائه گردد. همچنین استفاده از مفهوم عرض موثر در محاسبات شناسه سازه می‌تواند به بهبود و تکمیل نتایج ارائه شده کمک کند.

## 5- فهرست علائم

$A$	مساحت مقطع پل تقویت شده ( $m^2$ )
$C$	ضریب ثابت نوع تکیه‌گاه
$E$	مدول الاستیک ( $Nm^{-2}$ )
$I$	گشتاور دوم سطح ( $m^4$ )
$K$	شناسه سازه ( $Nm^{-2}$ )

- [21] B. Colson, M. Bruynee, 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.
- [22] T. Subramani, A. Sugathan, Finite Element Analysis of Thin Walled-Shell Structures by ANSYS and LS-DYNA, *International Journal of Modern Engineering Research*, Vol. 2, no. 4, pp. 1576–1587, 2012.
- [23] S.F. Badrana, A. O. Nassef, S. M. Metwallic, Y-stiffened panel multi-objective optimization using genetic algorithm, *Thin-Walled Structures*, Vol. 47, no. 11, pp. 1331–1342, 2009.
- [18] 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.
- [19] O. Bedair, Analysis and Limit State Design of Stiffened Plates and Shells: A World View, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 62, 2013.
- [20] M. Mirali, A.S. Safari, N. Zhiani, Buckling ultimate analysis of stiffened plate under combined axial and lateral pressure, in 16th International Conference on Mechanical Engineering, Kerman, 2008. (in Persian)