

بررسی اثر بریدگی‌های دایره‌ای اسپار جلویی بال بر دقت داده‌های پله‌ای کرنش‌سنجی برای استخراج بار برشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۴

نوید حیات داودی^۱، مسعود مسیبی^{۲*}، شهرام یوسفی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر،

۲. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، m.mosayebi@mut-es.ac.ir

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر.

چکیده

برای اندازه‌گیری کرنش ناشی از اعمال نیروی برشی بر یک اسپار بال، لازم است کرنش‌سنج روی تار خنثی نصب شود. اگر در محل تار خنثی، بریدگی وجود داشته باشد، می‌توان کرنش‌سنج‌هایی را در خارج از بریدگی نصب کرد. هدف اصلی این تحقیق، بررسی تأثیر بریدگی‌های دایره‌ای بر دقت داده‌های پله‌ای کرنش‌سنجی به‌منظور محاسبه بار برشی است. سازه اسپارجلوبی بال یک هواپیمای سبک و تجهیز آن در دو مقطع به پله‌های کرنش‌سنجی در نظر گرفته شده است. برای هر مقطع اندازه‌گیری، یک پل روی تار خنثی و دو پل با فاصله‌های معین از تار خنثی نصب شده است. بارمترکز به کمک عملگرهای خطی مجهز به حسگر نیرو، به سازه اعمال شده است. به روش کالیبراسیون بارهای زمینی، معادله‌های بار نوشته شده و با سیگنال‌های استخراج شده از آزمون، مقادیر بارها در مقاطع مورد نظر محاسبه شده‌اند. نیروهای یادشده در حالت‌های مختلف، محاسبه و اختلاف بین آن‌ها ارزیابی شده است. بر این اساس، تأثیر بریدگی‌های دایره‌ای در میزان دقت خروجی پله‌های کرنش‌سنجی تعیین شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده صحت روند اجرای آزمون‌ها و معادله‌های بار نوشته شده است.

واژه‌های کلیدی: اسپار جلویی، پله‌های کرنش‌سنجی، اندازه‌گیری تجربی، بریدگی دایره‌ای، باربرشی

Assessment of Effect of Circular Cutout of front spar on Accuracy of Strain Gauge Bridge Data to Obtain Shear Load

Navid Hayatdavoudi¹, Masoud Mosayebi², Shahram Yousefi³

1. MSc. Student, Mechanical Engineering Department, Malek-E-Ashtar university of technology, Iran

2. Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Malek-E-Ashtar university of technology, Iran

3. Associated Professor, Mechanical Engineering Department, Malek-E-Ashtar university of technology, Iran

Abstract

In order to measure the strain due to the shear force applied on a wing's spar, it is necessary to install a strain gauge on the neutral axis. In cases such as a circular hole on the neutral axis, it is impossible to install a strain gauge. Therefore, by installing strain gauges outside the cutting area of the hole, it will be useful to measure the shear load. Therefore, the main objective of this study is to investigate the effect of circular slices on the accuracy of strain gauge data acquired for calculating shear load. In this regard, the front spar structure of a lightweight aircraft with two sections are considered as strain gauge bridges. In the laboratory for each measurement section, a bridge is installed on the neutral axis and another two bridges with certain distances from the neutral axis are installed. Concentrated load at specific points has been applied by linear electromotor actuators equipped with S-type load cells. Using the calibration method of ground loads, the load equations are written and finally by using of strain gauge signals which extracted from the test, the concentrated loads are calculated. The forces are calculated in non-creep conditions and in spite of the cuts in the sections, and the differences between them are evaluated. Accordingly, the effect of circular slices on the accuracy of the output of the strain gauge bridges was determined. The results show the correctness of the tests and the accuracy of the load equations.

Keywords: Front spar, Circular cutout, Experimental measurement, Strain gauge bridges, Shear load.

۱۸۱

سال دهم - شماره ۱۰

بهار و تابستان ۱۴۰۰

نشریه علمی

دانش و فناوری هوافضا



دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر

بررسی اثر بریدگی‌های دایره‌ای اسپار جلویی بال بر دقت داده‌های پله‌ای کرنش‌سنجی برای استخراج بار برشی



۱. مقدمه

استفاده از پل‌های کرنش‌سنجی کالیبره شده برای اندازه‌گیری بارهای پروازی روشی است که از سال ۱۹۵۰ تاکنون استفاده شده است. اسکوپینسکی^۱ چگونگی استخراج معادله‌های بار با استفاده از اطلاعات بارهای کالیبراسیون و خروجی پل‌های کرنش‌سنجی، را ارائه کرده است.

اسکوپینسکی و آیکن^۲ نخستین افرادی بودند که در سال ۱۹۵۳ روش اندازه‌گیری بارهای پروازی، شامل نیروی برشی، ممان خمشی و گشتاور پیچشی در مقاطع بال و دم هواپیما، به وسیله کرنش‌سنج‌های کالیبره شده ارائه کردند [۱].

روش یادشده برای بال‌های با نسبت منطری^۳ معمول که اغلب با دو اسپار و به صورت تیر یکسر درگیر به بدنه هواپیما متصل می‌شوند، همچنین برای سطوح فرمان‌ها به کار می‌رود. برای بال‌های با نسبت منطری کوچک که اغلب دلتا شکل هستند و بیش از دو اسپار دارند این روش نیازمند تغییراتی است. همچنین برای بال‌های با نسبت منطری زیاد که اثرات غیرخطی در آن‌ها پررنگ می‌شود و برای بال‌های با هسته‌های ساندویچی، این روش نیاز به تغییراتی دارد.

مشکلات روش بالا برای اندازه‌گیری بارهای پروازی در سازه‌های دارای چند اسپار با نسبت منطری پایین، باعث شد که وبر^۴ و همکارانش در سال ۱۹۶۹ روش گفته‌شده را برای بال‌های با بیش از دو اسپار و نسبت منطری پایین، بهینه‌سازی نمایند [۲].

اکستر^۵ در سال ۱۹۷۶ روش اندازه‌گیری بارهای پروازی با کرنش‌سنج‌های کالیبره شده‌ی ارائه‌شده کرد که روی سطح پوسته بال، با ضخامت کم و نسبت منطری پایین و هسته‌های ساندویچی نصب شده بودند. او در

جریان این فعالیت تحقیقاتی به نتایج مهمی دست یافت که عبارت بودند از [۳]:

تعیین اینکه خروجی کدام یک از پل‌های کرنش‌سنجی باید برای معادله‌های بار استفاده شوند با ارزیابی خطاها؛

استفاده بیش از سه پل کرنش‌سنجی در هر معادله بار بیشتر به خطاهای بزرگ در یک یا چند ضریب بار منجر می‌شود.

جنکینز^۶ و همکارش در سال ۱۹۷۷ روش اسکوپینسکی را برای استفاده در بال‌های دلتا شکل با نسبت منطری پایین و چیدمانی داخلی پیچیده به کار گرفت و از مدل ساده‌شده المان محدود برای تخمین معادله‌های بار قبل از اجرای کار آزمایشگاهی بهره گرفتند [۴].

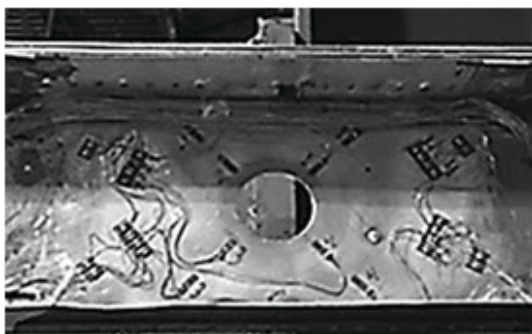
در سال ۱۹۸۹ ناسا روش کالیبراسیون بار برای بال‌های دلتا شکل با نسبت منطری پایین در دماهای بالا را ارائه کرد. در پرنده‌های با سرعت بالا که اغلب سطوح خارجی آن دچار افزایش دما می‌شوند و از طرف دیگر با توجه به شکل دلتایی بال آن‌ها که به نسبت منطری پایین منجر می‌شود، لورنس^۷ اقدام به توسعه روش اسکوپینسکی به منظور کالیبراسیون پل‌های کرنش‌سنجی این سازه‌ها کرد. آنچه به‌عنوان نوآوری در حوزه کالیبراسیون پل‌های کرنش‌سنجی مطرح بود، ورود پارامترهای دمایی در معادله‌های بار بود [۵].

آزمون‌های پروازی بخش مهمی از فرایند دریافت گواهینامه برای یک پرنده هستند. ضمن اینکه بارگذاری تجربی در مراکز طراحی باید با بارهای پروازی (واقعی) مقایسه و اعتبارسنجی شوند. تعیین بارهای پروازی در گام اول نیازمند نصب پل‌های کرنش‌سنجی در نقاط خاصی است تا بتوان مقایسه‌ای بین بارهای

کرنش سنجی در اطراف آن طبق شکل ۲، آزمون قبلی تکرار شده است.



شکل ۱. پل‌های برشی نصب‌شده و بریدگی دایره‌ای رسم شده به منظور سوراخ‌کاری در مرحله بعدی با نوشتن معادله‌های بار از مرجع [۱] و یافتن ضرایب بار کالیبراسیون و استفاده از سیگنال‌های پل کرنش سنجی، بار برشی در آن مقطع محاسبه شده است. با نام‌گذاری خطا به صورت اختلاف بین بارهای اعمال شده و محاسبه شده، مقدار آن در حالت‌های مختلف بارگذاری محاسبه شده است. فرایند بالا برای یک مقطع اندازه‌گیری دیگر نیز تکرار شده تا صحت انجام آزمایش‌ها و صحت ضرایب بار کالیبراسیون محاسبه شده، اثبات شود.



شکل ۲. پل‌های برشی نصب‌شده در اطراف بریدگی دایره‌ای یادآوری می‌شود که بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده در مراجع موجود، اندازه‌گیری نیروی برشی روی اسپار

طراحی در آن نقاط با بارهای واقعی انجام داد. از آنجا که، اندازه‌گیری‌ها در فرایند کالیبراسیون قطعیت^۸ ندارد، باید این عدم قطعیت‌ها در محاسبات لحاظ شوند. این کار را نخستین بار گنزالس^۹ و همکارش در سال ۲۰۱۳ انجام دادند و میزان عدم قطعیت موجود در روش اسکوپینسکی را بررسی کردند [۶].

به‌منظور اشاره به نوآوری این تحقیق که بر اساس مطالعات انجام‌شده در مراجع گوناگون، هیچ گزارشی شبیه آنچه در این تحقیق در نظر گرفته شده، یافته نشد. در اصل برای تأثیر وجود بریدگی‌های دایره‌ای شکل در اسپار بال هواپیماهای سبک بر دقت داده‌های مستخرج از پل‌های کرنش سنجی و رسیدن به مقدار نیروی برشی در مقاطع دارای این بریدگی‌ها، مرجع مشخصی وجود ندارد.

۲. بیان مسئله

در مواردی که طراح به‌واسطه وجود بریدگی‌های دایره‌ای شکل، ملزم به نصب پل‌های کرنش سنجی در اطراف آن‌ها و به فاصله دورتری از تار خنثی می‌شود، ضروری است دقت خروجی داده‌های پل‌های یادشده و به دنبال آن دقت بار برشی به‌دست‌آمده از آن داده‌ها تعیین شود. به این منظور، از روش ارائه شده توسط اسکوپینسکی برای اسپار جلویی بال یک هواپیمای سبک استفاده شده است.

ابتدا با نصب کرنش سنج روی تار خنثی طبق شکل ۱، در مقطع مورد نظر روی اسپار یادشده و نصب اسپار روی سازه از قبل ساخته شده و اعمال بار معین (به‌وسیله حسگر نیرو اندازه‌گیری می‌شود) در نقاط مشخصی از آن، مقدار نیروی برشی در آن مقطع، محاسبه شده است. سپس با ایجاد بریدگی دایره‌ای در آن مقطع و نصب پل

$$\begin{cases} M = Vy \\ T = Vx \end{cases} \quad (2)$$

در نتیجه رابطه (۱) به شکل زیر قابل بازنویسی است:

$$\frac{\mu_i}{V} = \alpha_{i1} + \alpha_{i2}y + \alpha_{i3}x \quad (3)$$

رابطه (۳) در حالت کلی شامل عبارتهای غیرخطی

به صورت زیر است [۱]:

$$\mu_i = \alpha_{i1}V + \alpha_{i2}Vy + \alpha_{i3}Vx + \alpha_{i4}Vxy \quad (4)$$

$$+ \alpha_{i5}Vx^2 + \alpha_{i6}Vy^2 + \dots + \alpha_{ij}Vx^r y^s$$

هنگامی که تعداد زپیل کرنش سنجی پاسخهای خود

را ارائه دهند، رابطه (۴) به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} \mu_1 = \alpha_{11}V + \alpha_{12}Vy + \alpha_{13}Vx + \dots + \alpha_{1j}Vx^r y^s \\ \mu_2 = \alpha_{21}V + \alpha_{22}Vy + \alpha_{23}Vx + \dots + \alpha_{2j}Vx^r y^s \\ \mu_3 = \alpha_{31}V + \alpha_{32}Vy + \alpha_{33}Vx + \dots + \alpha_{3j}Vx^r y^s \\ \vdots \\ \mu_j = \alpha_{j1}V + \alpha_{j2}Vy + \alpha_{j3}Vx + \dots + \alpha_{jj}Vx^r y^s \end{cases}$$

و شکل ماتریسی رابطه (۴) به صورت زیر است:

$$\begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \\ \vdots \\ \mu_j \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \dots & \alpha_{1j} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \dots & \alpha_{2j} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & \dots & \alpha_{3j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{j1} & \alpha_{j2} & \alpha_{j3} & \dots & \alpha_{jj} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} V \\ Vy \\ Vx \\ \vdots \\ Vx^r y^s \end{pmatrix}$$

یا به صورت:

$$\{\mu\} = [\alpha] \{Vx^r y^s\} \quad (5)$$

رابطه (۵) خروجی پلها را به صورت تابع خطی از

عبارتهای $Vx^r y^s$ بیان می کند. رابطه عکس آن نیز

صادق است، یعنی $Vx^r y^s$ بارها می توانند به صورت

بال در محل هایی که بریدگی های دایره ای شکل وجود دارند، چالشی جدی است و هیچ گزارش مشابهی که عیناً چنین تحقیقی درباره اسپار بال هواپیمای سبک انجام داده باشد، یافته نشد. بنابراین، روش ارائه شده در این تحقیق می تواند برای سازه های مشابه دیگر نیز به کار گرفته شود.

۳. تئوری کالیبراسیون بارهای زمینی

در این بخش تئوری کالیبراسیون بارهای زمینی که اولین بار اسکوپینسکی ارائه کرد، برای کالیبراسیون بارهای آزمون این تحقیق، ارائه می شود. ساده ترین رابطه بین خروجی کرنش سنج (μ) و بارهای برشی V ، خمشی M و پیچشی T روی یک سازه با رابطه خطی زیر قابل بیان است [۱]:

$$\mu_i = \alpha_{i1}V + \alpha_{i2}M + \alpha_{i3}T \quad (1)$$

که در آن اندیس i منظور کرنش سنج α_{i1} ، α_{i2} ، α_{i3} به ترتیب ضرایب بارهای برشی، خمشی و پیچشی هستند. رابطه (۱) بیان می کند که مقدار کرنش در یک مکان خاص بر اساس بارهایی که همزمان در چند نقطه بر سازه اعمال می شود، برابر جمع جبری کرنش های حاصل از اعمال بارها به صورت منفرد (متمرکز) در نقاط مورد نظر است. به عبارت دیگر برای انجام فرایند کالیبراسیون، نیاز به اعمال بار حقیقی (گسترده) نیست بلکه با استفاده از قانون جمع آثار می توان از بارهای منفرد و نقطه ای استفاده کرد.

بر اساس رابطه (۱) یک سازه می تواند فقط تحت بار برشی V در نقطه ای خاص به مختصات x در امتداد محور عرضی و y در امتداد محور طولی قرار گیرد. این بار برشی می تواند ممان خمشی و گشتاور پیچشی در مقطع مورد نظر به صورت زیر ایجاد نماید:



تابع خطی از خروجی پل‌ها بیان شوند.

$$\{Vx^r y^s\} = [\beta] \{\mu\} \quad (6)$$

که در آن:

$$[\beta] = [\alpha]^{-1} \quad (7)$$

شرط وجود جواب برای دستگاه معادله‌های رابطه (۶) این است که دترمینان ماتریس ضرایب $[\alpha]$ در رابطه (۵) مخالف صفر باشد. یعنی باید:

$$|\alpha| \neq 0 \quad (8)$$

این شرایط بدین معنی است که کرنش‌سنج‌ها باید خصوصیات متفاوتی داشته باشند. به عبارت دیگر مقادیر یک سطر از ماتریس $[\alpha]$ مانند یک پل باید با مقادیر سطر دیگری از ماتریس $[\alpha]$ مانند پل‌های دیگر مستقل خطی باشد [۱].

در صورت وجود جواب گفته شده نیازی به فهمیدن مقادیر ثابت α_{ij} در معادله‌های ضریب تأثیر (۵) نیست زیرا ضرایب بار β_{ij} در معادله‌های بار (۶) با استفاده از روند مناسبی قابل تخمین هستند. هدف اولیه این روند برقرار کردن روابط بین پاسخ پل‌ها با نیروی برشی، ممان خمشی و گشتاور پیچشی است. بنابراین ارزیابی تمام ضرایب $[\beta]$ در معادله (۶) ضروری نیست و فقط به مقادیر ضرایب در سه ردیف اول نیاز است، بنابراین برای تعداد زپل کرنش‌سنجی:

$$\begin{Bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \\ \vdots \\ \mu_j \end{Bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{Bmatrix} V \\ M \\ T \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \beta_{11}\beta_{12}\beta_{13}\dots\beta_{1j} \\ \beta_{21}\beta_{22}\beta_{23}\dots\beta_{2j} \\ \beta_{31}\beta_{32}\beta_{33}\dots\beta_{3j} \end{Bmatrix}$$

با دانستن مقادیر بار و داشتن مقادیر کرنش از پل‌های نصب شده، محاسبه ضرایب β_{ij} در رابطه (۹) امکان پذیر

خواهد بود. این ضرایب می‌توانند برای معادله‌های بار در یک نرم‌افزار استفاده شوند که ورودی آن سیگنال‌های به دست آمده از پل‌های کرنش‌سنجی نصب شده بر سازه در حین انجام پرواز است. با داشتن آن‌ها، امکان محاسبه بارهای وارد شده به سازه فراهم خواهد شد. ضرایب β_{11} تا β_{1j} در رابطه (۹) مانند نیروی برشی هستند، بنابراین سطر اول آن را می‌توان چنین نوشت:

$$V = [\beta_{11}\beta_{12}\beta_{13}\dots\beta_{1j}] \begin{Bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \\ \vdots \\ \mu_j \end{Bmatrix} \quad (10)$$

و یا ترانزپاده آن به صورت:

$$V = [\mu_1\mu_2\mu_3\dots\mu_j] \begin{Bmatrix} \beta_{11} \\ \beta_{12} \\ \beta_{13} \\ \vdots \\ \beta_{1j} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

با تعمیم رابطه (۱۱) بر اساس تعداد مشخصی بار برشی متمرکز در آزمایشگاه به صورت V^i تا V^j که به سازه اعمال می‌شود، می‌توان نوشت:

$$\begin{Bmatrix} V^1 \\ V^2 \\ \vdots \\ V^j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mu_1\mu_{12}\dots\mu_{1j} \\ \mu_2\mu_{22}\dots\mu_{2j} \\ \vdots \\ \mu_j\mu_{j2}\dots\mu_{jj} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta_{11} \\ \beta_{12} \\ \vdots \\ \beta_{1j} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

یا به صورت ماتریسی:



$$\{V'\} = [\mu]\{\beta\} \quad (13)$$

برای تعداد j پل کرنش سنجی و اعمال تعداد n بار متمرکز با مقادیر V'_1 تا V'_n ، رابطه (۱۲) به صورت زیر قابل بیان است:

$$\begin{Bmatrix} V'_1 \\ V'_2 \\ \vdots \\ V'_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_1 \mu_{12} \dots \mu_{1j} \\ \mu_2 \mu_{22} \dots \mu_{2j} \\ \vdots \\ \mu_n \mu_{n2} \dots \mu_{nj} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta_{11} \\ \beta_{12} \\ \vdots \\ \beta_{1j} \end{Bmatrix}$$

یا به صورت ماتریسی:

$$\{V'\}_{n \times 1} \triangleq \{\overline{V'}\} = [\mu]_{n \times j} \{\beta\}_{j \times 1} \quad (14)$$

$$\triangleq [\overline{\mu}] \{\overline{\beta}\}$$

با ضرب دو طرف رابطه (۱۴) در ترانهاده ماتریس پاسخ پل‌ها می‌توان نوشت:

$$[\overline{\mu}]^T \{\overline{V'}\} = [\overline{\mu}]^T ([\overline{\mu}] \{\overline{\beta}\}) \quad (15)$$

مقادیر ضرایب بار $\{\overline{\beta}\}$ به وسیله حل دستگاه معادله رابطه (۱۵) به شکل زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$\overline{\beta} = ([\overline{\mu}]^T [\overline{\mu}])^{-1} ([\overline{\mu}]^T \{\overline{V'}\}) \quad (16)$$

هنگامی که n بار برشی با مقادیر V'_1 در n نقطه بارگذاری، اعمال شود تعداد n مقدار ممان خمشی و گشتاور پیچشی تعیین می‌شود؛ بنابراین فرایند بیان شده با معادله‌های (۱۱) تا (۱۶) می‌تواند برای تخمین ضرایب بار با مقادیر $\{\beta_{2j}\}$ ، $\{\beta_{3j}\}$ نیز استفاده شود [۱].

۴. انجام آزمایش و تحلیل نتایج

برای انجام آزمایش روی سازه اسپار جلوئی بال

انتخاب شده، دو مقطع برای محل نصب پل‌های برشی و γ نقطه برای اعمال بار بر سازه در نظر گرفته شد. در مورد مکان‌های اعمال بارهای خارجی روی سازه اسپار محدودیت‌هایی وجود دارد زیرا در فرایند کالیبراسیون بار به صورت متمرکز اعمال می‌شود. بنابراین یافتن نقاطی که استحکام زیادی داشته باشد، لازم و ضروری است. تجربه نشان داده که بهترین محل اعمال بار روی اسپار، محل تقاطع اسپار و ریب متصل به آن است. در امتداد طول اسپار مورداشاره، γ محل تقاطع با ریب‌ها مشاهده شد که همه آن‌ها به‌عنوان نقاط اعمال بار کالیبراسیون در نظر گرفته شدند.

نکته بسیار مهم دیگری که در هنگام اعمال بار متمرکز به اسپار باید به آن توجه نمود این است که به دلیل شکل سطح مقطع آن، در صورت اعمال بار در مرکز هندسی مقطع، علاوه بر برش و خمش، پدیده پیچش نیز اتفاق خواهد افتاد. به همین دلیل برای جلوگیری از بروز پیچش در هنگام اعمال بار، موقعیت نقاط مرکز برش هر مقطع به صورت جداگانه تعیین شده و مختصات مکانی نقاط اعمال بار متمرکز به دست آمده است.

روی تار خنثی در هر یک از مقاطع شش و هفت یک پل برشی و در فاصله‌های شعاعی معینی دورتر از تار خنثی یادشده برای هر یک از مقاطع شش و هفت، چهار پل برشی دیگر نصب شد. مناسب‌ترین مکان برای نصب کرنش‌سنج در اطراف سوراخ ایجاد شده، در ناحیه الاستیک و در واقع در نقطه‌ای است که تغییرات کرنش آن شیب ملایم داشته باشد. نصب کرنش‌سنج در نزدیکی لبه سوراخ یا در ناحیه پلاستیک اطراف آن، به دلیل وجود جابه‌جایی خارج صفحه‌ای و شیب تند تغییرات کرنش، به ایجاد خطای قابل ملاحظه‌ای منجر خواهد شد [۷].



بر این اساس کرنش‌سنج‌ها با فاصله شعاعی حدود ۱۳ میلی‌متر از لبه بریدگی‌ها باید نصب شوند. پس‌از آن، بر اساس مدارک و مستندات هواپیما، ابعاد هندسی موردنیاز برای محاسبه سهم بار واردشده به اسپار جلویی در حالت ضریب بار مساوی با یک، استخراج شد و سهم بار مربوط به اسپار جلویی طبق جدول ۱ به دست آمد. در نهایت حداکثر بار اعمالی معادل ۵۰٪ بار محاسبه‌شده در هر مقطع در نظر گرفته شد.

در هر نقطه اعمال بار، به کمک عملگر الکتروموتوری خطی طبق شکل ۳ مقدار بار از صفر با افزایش تدریجی به میزان ۲۰٪ در ۵ مرحله به مقدار حداکثر خود رسانده شده، سپس با همان حالت کاهش بار تا رسیدن به صفر انجام شده است. این کار در دو سیکل کامل برای هر مقطع بارگذاری انجام شد.



شکل ۳. اسپار نصب‌شده برای اعمال بار به وسیله عملگر خطی

جدول ۱. موقعیت و مقدار بار اعمالی به سازه اسپار جلویی بال

نقطه اعمال بار	فاصله از تکیه‌گاه ثابت (mm)	سهم بار وارد بر اسپار جلویی (kg)
Lp^1	۴۲۱۰	۲۴/۸۹
Lp^2	۳۷۵۰	۳۰/۲۷
Lp^3	۳۲۹۰	۲۳/۳۵
Lp^4	۲۸۳۰	۲۸/۲۶
Lp^5	۲۳۸۰	۲۹/۲۳
Lp^6	۱۹۲۰	۳۴/۲۹
Lp^7	۱۵۰۰	۳۱/۹۰

در این تحقیق پل برشی نصب‌شده روی تار خنثی، پل میانی^{۱۰} و نصب‌شده در اطراف بریدگی با شعاع کوچک‌تر، پل درونی^{۱۱} و برشی نصب‌شده در اطراف بریدگی با شعاع بزرگ‌تر، پل بیرونی^{۱۲} نام‌گذاری می‌شود. همچنین بریدگی دایره‌ای با شعاع کوچکتر به قطر $d=46\text{ mm}$ با C^1 و بریدگی دایره‌ای با شعاع بزرگتر با قطر $d=92\text{ mm}$ با C^2 نام‌گذاری شده است.

سپس بار به سازه بدون بریدگی دایره‌ای اعمال شده و خروجی پل‌های برشی نصب‌شده روی تار خنثی در مقاطع شش و هفت ثبت شدند. پس‌از آن بریدگی به قطر ۴۶ میلی‌متر (بریدگی C^1) در مقاطع شش و هفت ایجاد و بارگذاری و داده‌برداری قبلی تکرار شد. در مرحله آخر بریدگی به قطر ۹۲ میلی‌متر (بریدگی C^2) در مقاطع شش و هفت ایجاد و بارگذاری و داده‌برداری انجام شد.

با برنامه‌های نوشته‌شده برای انجام محاسبات و ثبت داده‌ها، همه نتایج به دست آمده در حالت‌های مختلف اشاره‌شده بالا، استفاده شدند. با روش کالیبراسیون تشریح شده در بخش قبلی، با نوشتن معادله‌های بار و محاسبه ضرایب بار کالیبراسیون، بار مانند داده‌های پل‌های کرنش‌سنجی محاسبه شد. مقادیر بار اعمالی در حین انجام آزمون‌ها نیز از حسگر نیروی نصب‌شده بر عملگر به وسیله سیستم داده‌برداری ثبت شده بودند. اختلاف بار به دست آمده از محاسبات کالیبراسیون با بار اعمال‌شده به سازه با عنوان خطا محاسبه شدند و به صورت درصد خطا برای نقاط مختلف بارگذاری استخراج شدند.

نسبت خروجی پل‌های کرنش‌سنجی به بار اعمالی یا μ/V ضریب تأثیر^{۱۳} نام دارد. این ضریب بیان‌کننده حساسیت پل نسبت به بار برشی اعمال شده است.

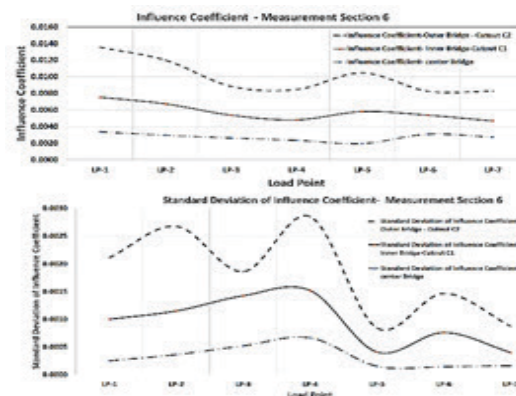




اگر بارهای برشی مختلف به سازه اعمال شود و نسبت خروجی پل‌های برشی به بار طبق شکل‌های ۴ و ۵ ترسیم شود، شیب نمودار حاصل همان مقدار ضریب‌تأثیر مانند آن بار خواهد بود.

بر این اساس دقت شیب نمودار μ/V مورد ارزیابی، در حقیقت همان دقت خروجی پل‌های کرنش‌سنجی نسبت به بار برشی در اطراف بریدگی‌های دایره‌ای خواهد بود. برای تعیین دقت خروجی پل‌ها باید ابتدا انحراف استاندارد مربوط به مقدار میانگین و خطای استاندارد، سپس درصد عدم قطعیت ضریب‌تأثیر را محاسبه نمود.

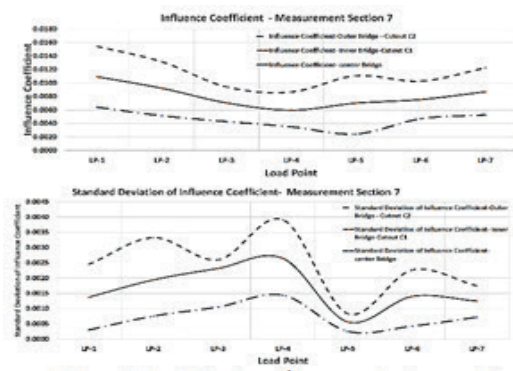
با تجمیع و بررسی پاسخ‌های دریافت شده از پل‌ها (شکل ۴ برای مقطع اندازه‌گیری ۶ و شکل ۵ برای مقطع اندازه‌گیری ۷) و مقایسه نمودارهای مربوط، همان‌طور که مشاهده می‌شود با جابه‌جایی محل اعمال بار از نقطه یک تا چهار ضریب‌تأثیر پل‌های برشی در مقاطع اندازه‌گیری کاهش می‌یابد.



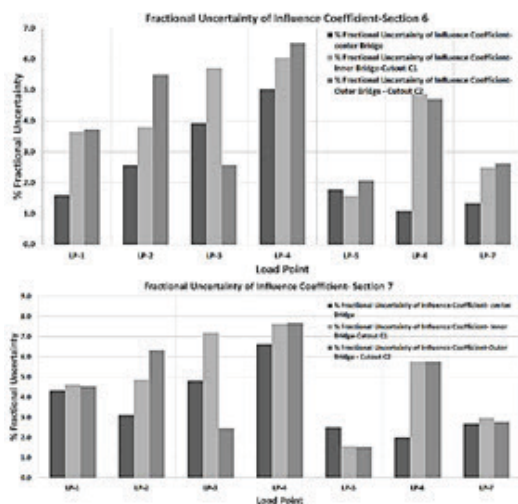
شکل ۴. نمودارهای ضریب‌تأثیر و انحراف استاندارد مقطع ۶

در نتیجه، انحراف استاندارد مانند آن افزایش یافته و در نقطه پنج، انحراف استاندارد به کمترین مقدار خود رسیده و بعد با نزدیک شدن محل اعمال بار به مقاطع اندازه‌گیری، یعنی همان محل نصب پل‌های برشی، تغییر در شیب نمودار پاسخ پل‌ها رخ می‌دهد که به

دلیل تمرکز تنش ناشی از ایجاد بریدگی‌ها و همچنین تمرکز تنش ایجادشده در محل اعمال بار و تأثیر آن بر کانتورهای تنش اطراف بریدگی‌هاست. در نهایت با محاسبه خطاهای ضریب‌تأثیر در مقاطع شش و هفت برای پل‌های برشی میانی، درونی، و بیرونی، می‌توان طبق شکل ۶ عدم قطعیت نسبی مربوط به هر یک از پل‌ها را ترسیم نمود.



شکل ۵. نمودارهای ضریب‌تأثیر و انحراف استاندارد مقطع ۷

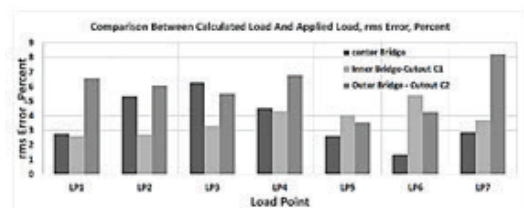


شکل ۶. نمودارهای عدم قطعیت ضریب‌تأثیر برای مقاطع ۶ و ۷

طبق شکل ۶، میزان عدم قطعیت حساسیت پل‌های کرنش‌سنجی نسبت به بار برشی در اطراف بریدگی‌های دایره‌ای C1 و C2 در بهترین نقطه از نظر بارگذاری، حدود ۲٪ و در بدترین حالت حدود ۸٪ است. به عبارت دیگر

دقت خروجی داده‌های پل‌های کرنش‌سنجی نسبت به بار برشی در بدترین حالت ۹۲٪ و در بهترین حالت حدود ۹۸٪ است.

برای همه پل‌های برشی، شامل پل‌های نصب‌شده روی تار خنثی و پل‌های نصب‌شده در اطراف بریدگی‌های دایره‌ای، خروجی پل‌ها ثبت شده و محاسبات مربوط به تعیین ضرایب بار کالیبراسیون انجام شده است. در نهایت معادله‌های بار استخراج شده و محاسبات برای هر هفت نقطه اعمال بار انجام شده و بار برشی نظیر محاسبه شده است. سرانجام برای ارزیابی صحت معادله‌های بار، بر اساس آنچه در [۸] آمده است، درصد rms اختلاف بار اعمال شده و بار محاسبه شده برای پل‌های میانی، درونی، و بیرونی تعیین شده و نتایج آن به صورت نمودار شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. نمودار مقایسه درصد خطای rms بار اعمالی و بار محاسبه شده

همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین درصد اختلاف بین بار واقعی اعمال شده و بار محاسبه شده از معادله‌های بار کالیبراسیون، حدود ۸٪ در بدترین حالت از نظر نقطه اعمال بار یعنی نقطه ۷ (نزدیک‌ترین نقطه به محل نصب پل‌های کرنش‌سنجی است) بوده و در نقاط دیگر اختلاف بار اعمالی و بار محاسبه شده حدود ۳٪ تا ۷٪ است.

خطاهای مشاهده شده می‌تواند در اثر هر یک از موارد زیر اتفاق بیفتد:

- وجود نویز اندازه‌گیری در حسگرها؛
- دقت اندازه‌گیری نیرو به وسیله حسگر نیرو؛

- وجود نویزهای محیطی اثرگذار روی سیگنال؛
 - خطای انسانی در چگونگی اعمال بار؛
 - خطای انسانی در نصب کرنش‌سنج‌ها در زوایای ۴۵ درجه در اطراف بریدگی‌های دایره‌ای شکل؛
 - عدم دقت در تعیین محل تارخنثی و در جهت‌گیری نصب کرنش‌سنج.
- مجموع این عوامل، باعث بروز خطای حداکثری ۸٪ شده است.

۵. نتیجه‌گیری

هدف این تحقیق تعیین تأثیر بریدگی‌های دایره‌ای بر دقت خروجی داده‌های پل‌های کرنش‌سنجی بود. اسپار جلویی بال یک هواپیمای سبک در آزمایشگاه برای انجام آزمون‌های موردنظر، انتخاب شد. در هفت مقطع از اسپار، بارگذاری متمرکز انجام شد و در دو مقطع، بریدگی‌های دایره‌ای شکل، ایجاد شد. بارهای وارد شده از سوی حسگر نیرو اندازه‌گیری و ثبت شدند و با استخراج داده‌های پل‌های نصب‌شده، مقادیر بار مانند آن‌ها محاسبه شدند. نتایج به دست آمده نشان دادند که عدم قطعیت حساسیت پل‌های کرنش‌سنجی نصب‌شده نسبت به بار برشی وارد شده، در بهترین نقطه بارگذاری (نقطه ۵) حدود ۲٪ و در بدترین نقطه بارگذاری (نقطه ۷) حدود ۸٪ است که حاکی از صحت روند انجام آزمون‌ها و معادله‌های بار نوشته شده و ضرایب بار کالیبراسیون به دست آمده است.

۶. پی‌نوشت‌ها

1. Skopinski
2. Aiken
3. Aspect Ratio
4. Webber
5. Eckstrom
6. Jenkins
7. Lawrence



8. Uncertainty
9. Gonzales
10. Center Bridge
11. Inner Bridge
12. Outer Bridge
13. Influence Coefficient

۷. مآخذ

- [1] T.H. Skopinski, W.S. Aiken and W.B. Huston, Calibration of Strain-gage Installations in Aircraft Structures for the Measurement of Flight Loads, Report (United States. National Advisory Committee for Aeronautics), 1954.
- [2] P. B.Hovell, D. A. Webber, and T. A. Roberts, "The Use of Calibrated Strain Gauges for Flight Load," C.P. No. 1041, Her Majesty's Stationery Office, London, 1969.
- [3] C. V. Eckstrom, "Flight load measurements obtained from calibrated strain gauge bridges mounted externally on the skin of a low aspect ratio wing," NASA Technical Note D-8349, Washington D.C., 1976.
- [4] J. M. Jenkins, A. E. Kuhl, A. L. Carter, "The Use of A Simplified Structural Model As An Aid in The Strain Gage Calibration of A Complex Wing," NASA TM 56046, California, 1977.
- [5] R.F. Lawrence, "Evaluation of a Strain-Gage Load Calibration on a Low-Aspect-Ratio Wing Structure," NASA TP-2921, June 1989.
- [6] M. Gonzales, C. Gogu, N. Binaud, C. Espinosa, J. Morlier, S. Quoniam, "Uncertainty quantification in aircraft load calibration," 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, May 19 - 24 , Orlando, Florida, USA, Vol. 1, pp. 78-85, 2013.
- [7] E. Pooladi Borj, Kh Farhangdoost, "Proper locus for mounting strain gage around cold worked hole for residual stress determination," Modares Mechanical Engineering, (in Persian), Vol. 15, No. 1, pp. 332-338, 2015.
- [8] W. A. Lokos, R. Stauf, "Strain-Gage Loads Calibration Parametric Study," 10th World Congress on Structural and

