



طراحی و توسعه یک لودسل نیرو و گشتاور شش محوره نوع ستونی

محمدرضا ملاکزاده^۱، حسین اکبری^{۲*}

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۲- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

*تهران، صندوق پستی ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶، h_akbarii@MechEng.iust.ac.ir

چکیده

استفاده از مدل‌های گوناگون لودسل شش محوره برای اندازه‌گیری همزمان نیروها و گشتاورهای استاتیکی و دینامیکی در دستگاه‌های مختصات دکارتی یک سیستم، همواره مورد توجه صنایع گوناگونی از جمله کنترل و رباتیک، ماشین‌کاری، خودرو و هوافضا بوده است. از جمله این مدل‌ها، نوع ستونی آن با سازه حس‌کننده سیلندر شکل می‌باشد. هدف اصلی این مقاله ارائه تکنیکی جهت طراحی و توسعه یک لودسل شش محوره نوع ستونی شامل ۲۴ کرنش‌سنج در قالب شش پل وتسون کامل برای دریافت همزمان بارهای سه‌بعدی در دستگاه مختصات آن می‌باشد. با توجه به الگوی نصب کرنش‌سنج‌ها، معادلات برآمده از این لودسل گویای عدم تداخل تئوریک در خروجی هر یک از شش پل آن بوده که در این حالت ماتریس 6×6 کالیبراسیون لودسل قطری می‌شود. با انجام آزمایش‌های کالیبراسیون، میزان خطای پذیری در آنالیز رگرسیون خطی برای هر یک از پل‌های A، B، C، D، E و F به ترتیب برابر 0.999998 ، 0.999998 ، 0.999998 ، 0.999998 ، 0.999998 و 0.999999 حاصل گردید. افزون بر این، اندازه حساسیت واقعی یا مقدار درایه‌های قطر اصلی ماتریس کالیبراسیون تجربی لودسل استخراج و درصد خطای آن نسبت به مقادیر تئوریک ارائه شده است.

کلید واژگان: لودسل شش محوره، اندازه‌گیری نیرو و گشتاور، کرنش‌سنج، کالیبراسیون.

Design and development of a column type six-axis force/moment load cell

Mohammadreza Mallakzadeh, Hossein Akbari*

Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

*P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, h_akbarii@MechEng.iust.ac.ir

ABSTRACT

Using various models of six-axis load cells to simultaneously measure a multiple of static and dynamic forces and moments in the Cartesian coordinate system has always been considered by the several industries including control, robotics, machining, automotive and aerospace. One of these models is a column type with a cylindrical elastic force-sensing element. Main goal of this paper is to provide a technical insight to design and development of a column type six-axis load cell includes 24 strain gauges as six Wheatstone bridge circuits for simultaneous measurement of three-dimensional loads in the Cartesian coordinate system of the load cell. According to the installation pattern of the strain gauges, the derived equations from this load cell state the theoretical expression of no interference in the output value of all six bridges. This is the case when the load cell 6×6 calibration matrix is diagonal. Using linear regression analysis, the linearity for each of the bridges A, B, C, D, E and F have been obtained as 0.999995, 0.999998, 0.999998, 0.999998, 0.99879 and 0.999999 respectively by performing calibration tests. In addition, the load cell's actual sensitivity or the elements of the main diameter of its experimental calibration matrix and the percent error comparing the theoretical values have been extracted and presented.

Keywords: Calibration, Force and Moment Measurement, Six-axis Load Cell, Strain Gauge.

یا همسانی اندازه‌ها [۱]. بطور مثال اگر سنسور در مچ یک ربات نصب گردد

که تحت کنترلی پایدار برای انجام وظایف متغیر و انعطاف‌پذیر باشد، نیاز به دکوپله بودن یک فاکتور مهم محسوب می‌شود [۲]. افزون بر این، چون شش مولفه بار همزمان اندازه‌گیری می‌شوند بنابراین؛ سعی می‌شود حساسیت اندازه‌گیری این مولفه‌ها تقریباً یکسان باشد. همچنین حساسیت اندازه‌گیری باید تا حد امکان بیشتر شود تا دقت ماکزیمم گردد [۲].

امروزه مدل‌های گوناگونی از این مبدل‌های نیرو و گشتاور توسعه یافته و خصوصیات آن‌ها بررسی شده است. از جمله می‌توان به مدل‌های مالتس-کراس، شینمن، آستک، میپر، ستونی، نوع E^5 ، $PPBS^6$ ، تیر T شکل^۳، مدل دو-سوراخه^۷ و سکوی استوارت^۸ اشاره کرد. در این بین، نوع ستونی با سازه

۱- مقدمه

مدل‌های گوناگون لودسل‌های شش محوره^۱ به عنوان تجهیزات اندازه‌گیری پیشرفته در طراحی ربات‌ها و بازوهای مکانیکی ماهر، عملیات‌های ماشین‌کاری، صنایع اتومبیل، هوافضا و تحقیقات بیومکانیک استفاده شده و امکان توسعه مطالعات و پژوهش‌های گسترده‌تری را برای دانش‌پژوهان و صنعت-گران این حوزه‌ها فراهم می‌سازد. این ابزار می‌تواند همزمان بارهای استاتیکی و دینامیکی شامل سه بردار نیرو (P_x, P_y, P_z) و سه بردار گشتاور (M_x, M_y, M_z) را به ترتیب در امتداد و حول محورهای x ، y و z در دستگاه مختصات دکارتی یک سیستم دلخواه اندازه‌گیری کند.

مسئله کلیدی، طراحی اعضای الاستیک این لودسل‌ها می‌باشد که با توجه به کاربرد آن‌ها، سه ملاحظه در طراحی دخیل بوده و همواره تأکید شده است. حساسیت اندازه‌گیری، دکوپله^۲ بودن یا جداسازی اندازه‌ها و ایزوتروپی^۳

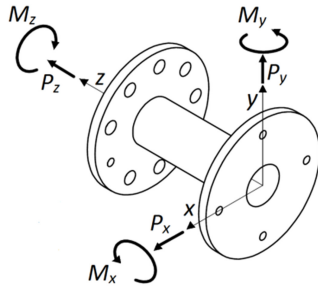
3. Isotropy
4. E-type membrane
5. Parallel plate-beams
6. T-shaped bar
7. Binocular-type
8. Stewart platform

Please cite this article using:

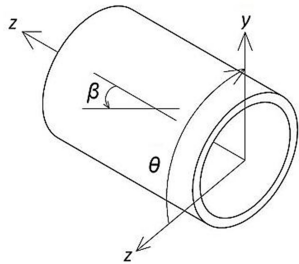
M.R. Mallakzadeh, H. Akbari, Design and development of a column type six-axis force/moment load cell, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 511-515, 2015 (in Persian/Farsi)

1. Six-Axis Load Cell
2. Decoupling

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل ۱ دستگاه مختصات دکارتی لودسل و راستای شش مولفه‌ی بار



شکل ۲ راستای زوایای θ و β در سازه الاستیک لودسل

$$\tau = -\frac{P_x Q_{\max} \sin \theta}{I(D-d)} + \frac{P_y Q_{\max} \cos \theta}{I(D-d)} + \frac{M_z r}{J} \quad (3)$$

I : ممان اینرسی حول مرکز جرم (m^4)

I : ممان اینرسی قطبی (m^4)

Q_{\max} : ماکزیمم ممان اول سطح (m^3)

A : مساحت سطح مقطع (m^2)

d, D, r : شعاع خارجی، قطر داخلی و قطر خارجی سطح مقطع (m)

۲-۳- رابطه بار - کرنش

حال با جای گذاری روابط (۲ و ۳) در رابطه (۱)، معادله بار - کرنش لودسل به صورت رابطه (۴) قابل بیان است:

$$\varepsilon_{\beta} = \left(\frac{-M_x r \sin \theta + M_y r \cos \theta}{2EI} - \frac{P_z}{2EA} \right) \times [(1-\nu) + (1+\nu) \cos(2\beta)] + \left(\frac{(-P_x \sin \theta + P_y \cos \theta) Q_{\max}}{EI(D-d)} + \frac{M_z r}{EJ} \right) \times [(1+\nu) \sin(2\beta)] \quad (4)$$

این رابطه بیانگر یک معادله خطی بین بارهای وارده و کرنش ایجاد شده بر سطح بیرونی سازه حس کننده لودسل است. همان گونه که از رابطه (۴) پیداست، کرنش اندازه گیری شده آمیخته‌ای از کرنش‌های ناشی از همه مولفه‌های بار می باشد. اما خوشبختانه ضرایب هر یک از مولفه‌های بار ثابت و تابعی از زاویه و مکان قرارگیری کرنش سنج‌ها می باشد و می توان با انتخاب مناسب زوایای θ و β برای هر یک از سنسورها، این رابطه را ساده و اصطلاحاً دکوپله نمود.

۲-۴- انتخاب جهت نصب کرنش سنج‌ها

با استفاده از رابطه (۱)؛ درحالتی که لازم است تنها کرنش ناشی از تنش‌های

حس کننده سیلندر شکل به دلیل همسان نبودن اندازه‌ها در مقابل نیروها و گشتاورها در شش جهت بخصوص در راستای محور سیلندر، کمتر مورد توجه بوده است [۳-۵]. اما سهولت ساخت و عدم نیاز به ماشین کاری‌های پیچیده، هزینه کم، استحکام بالا و قابلیت اندازه‌گیری همزمان محدوده وسیعی از بارها از خصوصیات بارز آن می باشد.

هدف اصلی این مقاله، ارائه و توصیف تکنیکی جهت طراحی و توسعه یک لودسل شش محوره نوع ستونی شامل ۲۴ کرنش سنج^۱ در قالب شش پل و تسون کامل^۲ به نام‌های A, B, C, D, E و F برای دریافت همزمان نیروها و گشتاورهای سه بعدی است.

در ادامه معادلات حاکم بر رفتار خروجی لودسل در بخش دوم بررسی می شود. در بخش سوم خصوصیات فیزیکی لودسل ارائه شده است. در بخش چهارم نتایج کالیبراسیون لودسل و میزان خطی پذیری محورها درج شده و در پایان در بخش پنجم نتیجه گیری و مزایای این لودسل ارائه می گردد.

۲- مدل سازی پارامتری

بارها در دستگاه مختصات دکارتی سازه ستونی، در شش جهت دسته بندی می شوند (شکل ۱). یک نیرو و یک گشتاور (M_z, P_z) به ترتیب در راستا و حول محور استوانه و دو نیرو (P_y, P_x) و دو گشتاور (M_y, M_x) به ترتیب در راستا و حول محورهایی که متقابلاً برهم عمود بوده و هریک بر محور استوانه نیز عمود می باشند.

از آن جا که در یک سیستم ممکن است هر سنسور کرنش سنج نصب شده بر سطح سازه حس کننده الاستیک لودسل، همزمان آمیخته‌ای از کرنش‌های مربوط به بارهای شکل ۱ را دریافت می کند بنابراین؛ با یک کرنش سنج نمی توان به تنهایی هیچ یک از شش مولفه‌ی بار را اندازه گیری نمود. در عوض، با نصب الگوهای مختلفی از کرنش سنج‌ها در قالب چند پل و تسون بر سطح سازه مبدل، امکان اندازه گیری مستقل هریک از شش مولفه-ی بار به کمک اندازه ولتاژ خروجی پل‌ها فراهم خواهد شد.

۲-۱- تنش - کرنش

معادله (۱) رابطه اساسی تنش - کرنش برای یک لودسل سیلندر شکل با استفاده از تئوری‌های مقاومت مصالح در محدوده خطی است [۳].

$$\varepsilon_{\beta} = \frac{\sigma}{2E} [(1-\nu) + (1+\nu) \cos(2\beta)] + \frac{\tau}{E} (1+\nu) \sin(2\beta) \quad (1)$$

ε : کرنش نرمال سطح بیرونی سیلندر در زاویه β

σ : برآیند تنش‌های نرمال ($N.m^{-2}$)

τ : برآیند تنش‌های برشی ($N.m^{-2}$)

E : مدول الاستیسیته ($N.m^{-2}$)

ν : نسبت پواسون

β : زاویه‌ی جهت نصب کرنش سنج‌ها (rad) (شکل ۲)

θ : زاویه‌ی مکان نصب کرنش سنج‌ها (rad) (شکل ۲)

۲-۲- روابط بار - تنش

با استفاده از قانون دست راست برای ناحیه اول در دستگاه مختصات دکارتی لودسل (شکل ۱)، برآیند تنش‌های نرمال و برشی در روابط (۲) و (۳) برابر:

$$\sigma = -\frac{M_x r \sin \theta}{I} + \frac{M_y r \cos \theta}{I} - \frac{P_z}{A} \quad (2)$$

1. Strain gauge
2. Full Wheatstone Bridge

جایی که \vec{F} ماتریس $n \times 1$ بار است که درایه‌هایش شامل مولفه‌های نیرو و گشتاور می‌باشد. \vec{K} ماتریس $m \times 1$ سیگنال‌های نرماله شده کرنش است، که مطابق رابطه (۸) درایه‌هایش شامل m سیگنال نرماله شده کرنش اندازه‌گیری شده از m نقطه روی سازه حس‌کننده الاستیک می‌باشد [۶]:

$$\vec{S}_i = \frac{\Delta V_i}{FV}, \quad i = 1, 6, \quad (8)$$

[C] هم ماتریس $m \times n$ انطباق کرنش^۲ است. شروط $n \geq m$ و $\text{Rank}(C) = n$ باید برقرار باشند [۶]. شرط $m \geq n$ ملزم می‌کند که تعداد نقاط اندازه‌گیری کرنش، باید بزرگ‌تر و مساوی تعداد مولفه‌های بار گردد. شرط $\text{Rank}(C) = n$ بیانگر حداقل تعداد سطر و ستون‌های مستقل خطی لازم ماتریس [C] برای اندازه‌گیری مستقل n مولفه بار می‌باشد. به طور کلی، n همواره کوچکتر و مساوی شش است. هر یک از درایه‌های C_{ij} ماتریس [C]، برآیند چهار کرنش پل و تسون i به ازاء اندازه واحدی از مولفه‌ی بار j می‌باشد بنابراین؛ اندازه ماتریس [C] برای محاسبه جداگانه شش مولفه بار 6×6 خواهد بود و امکان یافتن مستقیم \vec{F} با استفاده از معکوس این ماتریس به صورت رابطه (۹) فراهم می‌گردد که [A] ماتریس کالیبراسیون^۳ لودسل می‌باشد [۶]:

$$\vec{F} = [C]^{-1} \cdot \vec{S} = [A] \cdot \vec{S} \quad (9)$$

حال می‌توان رابطه حساسیت این لودسل را به شکل رابطه (۱۰) نوشت:

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_C \\ \Delta V_D \\ \Delta V_E \\ \Delta V_A \\ \Delta V_B \\ \Delta V_F \end{bmatrix}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{11} = \frac{EI(D-d)}{FV \times 2\sqrt{v} \sin(\theta_{C_1}) Q_{\max}} \\ A_{22} = \frac{EI(D-d)}{FV \times 2\sqrt{v} \cos(\theta_{D_1}) Q_{\max}} \\ A_{33} = -\frac{2EA}{FV \times (1+v)} \\ A_{44} = -\frac{2EI}{FV \times D \sin(\theta_{A_1})} \\ A_{55} = \frac{2EI}{FV \times D \cos(\theta_{B_1})} \\ A_{66} = -\frac{2EJ}{FV \times D(1+v)} \end{array} \right. \quad (10)$$

۳- مشخصات فیزیکی سازه الاستیک لودسل

با توجه به ماکزیمیم بار مجاز^۴ پیش‌بینی شده برای لودسل در جدول (۱)، و نیز ایجاد فضای کافی برای نصب کرنش‌سنج‌ها؛ لذا؛ اندازه قطر داخلی، قطر خارجی و طول سازه حس‌کننده‌ی آن به ترتیب ۳۰، ۳۵ و ۱۰۰ میلی‌متر انتخاب شد. کرنش مجاز با اعمال یک ضریب ایمنی (F.S)^۵ به کمک کرنش تسلیم به صورت رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$\epsilon_{\text{allowable}} = \frac{\epsilon_{\text{yeild}}}{F.S} \quad (11)$$

معمولاً لودسل‌های تجاری آلومینیومی با آلیاژ ۲۰۲۴ (T4) ساخته می‌شوند. اما برای دستیابی به ابعاد مناسب و نیز اهمیت سبک بودن این لودسل با توجه به اتخاذ ضرایب ایمنی ۱۰ و نیز استفاده از کرنش‌های مجاز بالاتر، آلیاژ آلومینیوم ۷۰۰۰ (T6) (۷۰۷۵) که دارای تنش تسلیم بالاتری نسبت به آلیاژ ۲۰۲۴ است انتخاب و برای حفاظت مکانیکی از پوشش محافظ پلاستیکی استفاده شد. کرنش‌سنج‌ها نیز

نرمال اندازه‌گیری شود، باید عبارت $\sin(2\beta) = 0$ گردد که اندازه زوایای نصب $\beta = 0$ یا $\beta = \pi/2$ بدست می‌آید. اما زمانی که لازم است تنها کرنش ناشی از تنش‌های برشی اندازه‌گیری گردد، باید عبارت $(1-\nu) + (1+\nu)\cos(2\beta) = 0$ باشد که اندازه زوایای نصب $\beta = \pm 0.5\cos^{-1}[(\nu-1)/(\nu+1)]$ حاصل می‌شود. زاویه β_r فقط تابع نسبت پواسون است و از آنجا که این عدد حدود ۰/۳ است اندازه معمول آن حدود یک رادیان یا ۶۰ درجه می‌باشد. با جایگزینی زوایای β_σ و β_τ در معادله (۱) رابطه (۵) حاصل می‌گردد:

$$\epsilon_0 = \frac{\sigma}{E}, \quad \epsilon_{\pi/2} = \frac{-\nu\sigma}{E}, \quad \epsilon_{\pm\beta_r} = \pm \frac{-2\tau\sqrt{\nu}}{E} \quad (5)$$

۲-۵- انتخاب مکان نصب کرنش‌سنج‌ها

معادله (۶) رابطه حاکم در پل و تسونی است که در هر یک از چهار بازوی آن یک کرنش‌سنج با گنج فاکتور k قرار دارد [۳]:

$$\frac{V_0}{V_s \times K} = \frac{1}{4}(\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \quad (6)$$

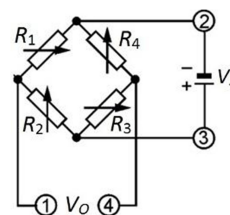
که R_1 ولتاژ خروجی از پل، V_s ولتاژ تحریک پل و ϵ اندازه کرنش وارده به هریک از کرنش‌سنج‌ها است (شکل ۳).

اکنون به کمک روابط (۴) و (۵) باید زاویه مناسب مکان نصب هر کرنش-سنج (θ) را انتخاب نمود. در این حالت مطابق رابطه (۶)، اندازه ولتاژ خروجی حاصل از برآیند کرنش‌های اعمال شده به چهار کرنش‌سنج در یک پل و تسون باید تنها معادل یکی از شش مولفه‌ی بار برآورد گردد. اصطلاحاً این عملیات را حذف همپوشانی کرنش‌ها^۱ گویند. پل‌های C, D, E, A, B و F به ترتیب برای اندازه‌گیری نیروهای P_x, P_y, P_z و گشتاورهای M_x, M_y, M_z طراحی شده‌اند (شکل ۴).

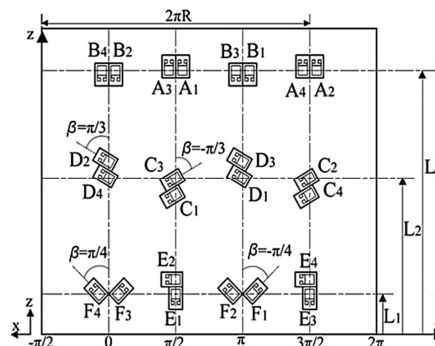
۲-۶- ماتریس کالیبراسیون لودسل

هدف از کالیبراسیون، مدل‌سازی ارتباط بین بارهای ورودی و سیگنال‌های خروجی است که می‌تواند به صورت رابطه (۷) نوشته شود [۶]:

$$\vec{S} = [c] \cdot \vec{F} \quad (7)$$



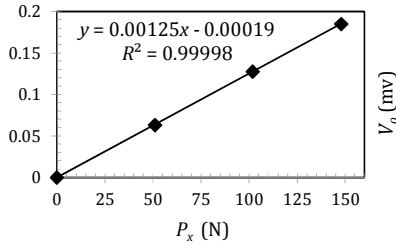
شکل ۳ آرایش کرنش‌سنج‌ها در پل و تسون



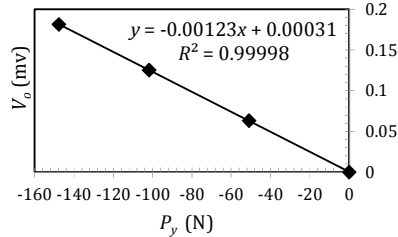
شکل ۴ الگوی نصب ۲۴ کرنش‌سنج بر سطح گسترش‌یافته سازه لودسل

2. Strain compliance matrix
3. Calibration matrix
4. Rated capacity
5. Factor Safety

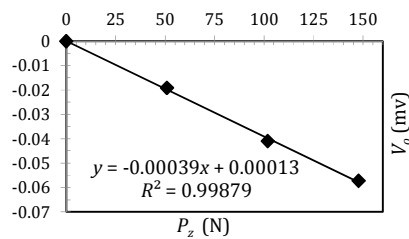
1. Strain cancellation



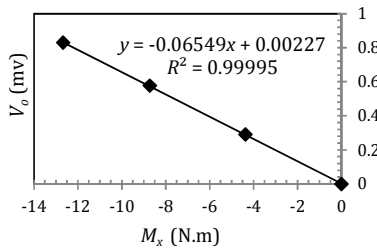
شکل ۶ نمودار کالیبراسیون پل C



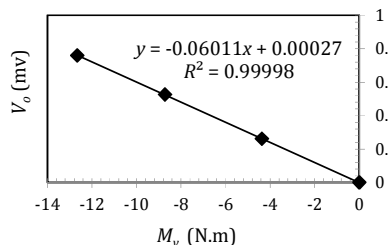
شکل ۷ نمودار کالیبراسیون پل D



شکل ۸ نمودار کالیبراسیون پل E



شکل ۹ نمودار کالیبراسیون پل A



شکل ۱۰ نمودار کالیبراسیون پل B

در تمام نمودارها، خروجی هر پل قبل از بارگذاری توسط کلیدی که در برد دیتالاگر در نظر گرفته شده صفر شده است. مقدار تجربی درایه‌های قطر اصلی در رابطه (۱۰)، با استفاده از برازش

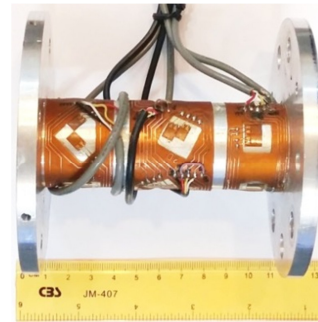
جدول ۱ ظرفیت شش مولفه‌ی بار لودسل ساخته شده

نوع بار	فاکتور ایمنی (F.S)	ظرفیت	واحد
P_x	۱۰	۲۰۰	N
P_y	۱۰	۲۰۰	N
P_z	۱۰	۳/۵	KN
M_x	۱۰	۸۰	N.m
M_y	۱۰	۸۰	N.m
M_z	۱۰	۱۲۰	N.m

مدل 3/350LE LK13S-4 ساخت شرکت HBM با مقاومت نامی 35.0 ± 0.5 اهم مخصوص سازه آلومینیومی انتخاب شده‌اند. برای اتصالات کرنش‌سنج‌ها از روش ابتکاری بردهای انعطاف‌پذیر نسوز با ضخامت 0/۱۵ میلی‌متر استفاده گردید (شکل ۵).
با توجه به مشخصات فیزیکی لودسل، مقدار درایه‌های ماتریس [A] در رابطه (۱۰) محاسبه و در جدول (۲) درج شده است:

۴- نتایج کالیبراسیون

عواملی نظیر همگن نبودن ساختار سازه حس‌کننده لودسل در تمام جهت‌ها، خطای نصب کرنش‌سنج‌ها در زوایای β و θ ، مجهول بودن اندازه دقیق پارامترهای K ، E ، تلرانس اندازه D و d و بارگذاری نامناسب در حین انجام آزمایش‌های کالیبراسیون باعث ایجاد اختلافی بین مقادیر تئوری و تجربی درایه‌های ماتریس [A] می‌شود [۷-۱۰]. بنابراین نمی‌توان مستقیماً از ماتریس [A] استفاده نمود بلکه مقدار تجربی درایه‌های آن که توسط آزمایش‌های کالیبراسیون به دست می‌آیند مبنای عملکرد خواهد بود. در ادامه نمودار کالیبراسیون هر پل در شکل‌های ۶ تا ۱۱ که با نرم افزار اکسل نسخه ۲۰۱۰ ترسیم شده‌اند ارائه می‌گردد. شیب هر یک از نمودارها بیانگر نسبت ولتاژ خروجی به بار وارده بوده که نشان‌دهنده حساسیت واقعی هر یک از پل‌ها است.



شکل ۵ تصویری از لودسل شش محوره ساخته شده بدون پوشش محافظ

جدول ۲ مقدار تئوریک درایه‌های ماتریس A

شماره درایه ماتریس A	مقدار درایه ^(۵)	واحد
A_{11}	۷۹۹/۶۱	N/mv
A_{22}	-۷۹۹/۶۱	N/mv
A_{33}	-۲۷۵۲/۱۴	N/mv
A_{44}	-۱۳/۹۹	N.m/mv
A_{55}	-۱۳/۹۹	N.m/mv
A_{66}	-۲۰/۸۸	vN.m/m

^(۵) $E = 71.7 \text{ GPa}$, $\nu = 0.33$, $F = 2$, $V = 5000 \text{ mv}$, $\theta_{A1} = 97^\circ$, $\theta_{B1} = 187^\circ$, $\theta_{C1} = 90^\circ$, $\theta_{D1} = 180^\circ$

ماتریس کالیبراسیون رابطه (۱۰) گذارده شده است. مقدار ϵ و خطای تداخل در حداکثر بار مجاز^۴ برای هر یک از کانال‌ها باید توسط یک سیستم کالیبراسیون شش‌محوره برآورد گردد [۱۰-۱۲]. قابلیت بارگذاری مستقل در هر یک از شش محور با عدم قطعیت معین از خصوصیات بارز این سیستم است [۱۲]. هدف بعدی این پژوهش توسعه این سیستم و تعیین درصد خطای تداخل برای هر شش محور لودسل خواهد بود.

۶- مراجع

[1] A.L. Sheng, L.T. Hung, A novel six-component force sensor of good measurement isotropy and sensitivities, *Sensor and Actuators A: Physical*, Vol. 100, No. 2, pp. 223-230, 2002.

[2] G.R. Vossoughi, A. Selk Ghaffari, P. Rostami Yeganeh, Design, optimization and fabrication of a 6-DOF force sensor Part I: modeling, analysis of material strength and dimensions optimization, in the *9th Annual International Conference on Mechanical Engineering*, Isfahan, Iran, 2005. (In Persian)

[3] B.L. Spletzer, *LOAD CELL*, US Patent No. 5850044, 1998.

[4] D.I. Kang, H.H. Shin, J.H. Kim, and Y.K. Park, Design and Analysis of a Column Type Multi-Component Force/Moment Sensor, in *Proceedings of the 17th International Conference on Force, Mass, Torque and Pressure Measurements*, IMEKO TC3, pp. 17-21, 2001.

[5] Y.K. Park, R. Kumme, D. Roeske, D.I. Kang, EVALUATION OF MULTI-COMPONENT FORCE TRANSDUCERS HAVING COLUMN TYPE SENSING ELEMENT, in *XIX IMEKO World Congress on Fundamental and Applied Metrology*, pp. 368-372, 2009.

[6] C.G. Kang, Maximum Structural Error Propagation of Multi-Axis Force Sensors, *JSMIE International Journal Series C*, Vol. 44, No. 3, pp. 676-681, 2001.

[7] Wu. Baoyuan, Luo. Jianfei, Shen. Fei, Ren. Yang, Wu. Zhongcheng, Optimum design method of multi-axis force sensor integrated in humanoid robot foot system, *Measurement*, Vol. 44, No. 9, pp. 1651-1660, 2011.

[8] Y. Nakamura, T. Yoshikawa, and I. Futamata, Design and signal processing of six-axis force sensor, in *Proceedings of the 4th International Symposium of Robotics Research*, pp. 75-81, 1988.

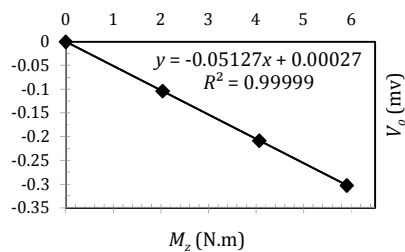
[9] G.S. Kim, D.J. Kang, S.H. Rhee, Design and fabrication of a 6-component force/moment sensor, *Sensor and Actuators A: Physical*, Vol. 77, No. 3, pp. 209-220, 1999

[10] G.S. Kim, The design of a six-component force/moment sensor and evaluation of its uncertainty, *Measurement Science and Technology*, Vol. 12, No. 9, pp. 1445-1455, 2001.

[11] G.S. Kim, H.D. Lee, Development of a six-axis force/moment sensor and its control system for an intelligent robot's gripper, *Measurement Science and Technology*, Vol. 14, No. 8, pp. 1265-1274, 2003.

[12] G.S. Kim, The development of a six-component force/moment sensor testing machine and evaluation of its uncertainty, *Measurement Science and Technology*, Vol. 11, No. 9, pp. 1377-1382, 2000.

خطی داده‌ها در نمودارهای ۶ تا ۱۱ به صورت رابطه (۱۲) می‌باشد:



شکل ۱۱ نمودار کالیبراسیون پل F

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \epsilon & \epsilon & \epsilon & \epsilon & \epsilon \\ \epsilon & A_{22} & \epsilon & \epsilon & \epsilon & \epsilon \\ \epsilon & \epsilon & A_{33} & \epsilon & \epsilon & \epsilon \\ \epsilon & \epsilon & \epsilon & A_{44} & \epsilon & \epsilon \\ \epsilon & \epsilon & \epsilon & \epsilon & A_{55} & \epsilon \\ \epsilon & \epsilon & \epsilon & \epsilon & \epsilon & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_C \\ \Delta V_D \\ \Delta V_E \\ \Delta V_A \\ \Delta V_B \\ \Delta V_F \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} A_{11} = 798.57, A_{22} = -815.79, A_{33} = -2548.63, \\ A_{44} = -15.27, A_{55} = -16.63, A_{66} = -19.50 \end{cases} \quad (12)$$

علامت‌های منفی در درایه‌های رابطه (۱۰) و (۱۲) با توجه به جهت دستگاه مختصات انتخاب شده برای این لودسل و الگوی چینش کرنش‌سنج‌ها (زاویه θ) ظاهر می‌گردد که با تغییر آن‌ها قابل اصلاح است. با توجه به مقادیر جدول (۲) و رابطه (۱۲) و با استفاده از رابطه (۱۳)، درصد اختلاف^۱ بین مقادیر درایه‌های تئوری و تجربی قطر اصلی ماتریس [A] برای پل‌های A, B, C, D, E و F به ترتیب برابر ۹/۱۲، ۱۸/۸۴، ۰/۱۳، ۰/۱۰۲، ۷/۳۹ و ۶/۶۴ حاصل گردید.

$$\%Error = \frac{|Experimental - Theoretical|}{|Theoretical|} \times 100 \quad (13)$$

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تکنیکی جهت طراحی و توسعه یک لودسل شش‌محوره نوع ستونی تشریح گردید. با توجه به الگوی نصب کرنش‌سنج‌ها در پل‌های وتسون، روابط برآمده از این لودسل گویای عدم تداخل تئوریک در خروجی هر یک از کانال‌ها بوده که در این حالت ماتریس ۶×۶ کالیبراسیون لودسل قطری می‌گردد. با انجام آزمایش‌هایی، اندازه حساسیت واقعی یا مقدار درایه‌های قطر اصلی ماتریس کالیبراسیون تجربی لودسل استخراج و ارائه شده است. همچنین مقدار R^2 که نشان دهنده خطی‌پذیری^۲ مقادیر تجربی در آنالیز رگرسیون خطی است، توسط نرم‌افزار اکسل برای هر یک پل‌های A, B, C, D, E و F به ترتیب برابر ۰/۹۹۹۹۵، ۰/۹۹۹۹۸، ۰/۹۹۹۹۸، ۰/۹۹۹۹۸، ۰/۹۹۹۹۸، ۰/۹۹۹۹۸ و ۰/۹۹۸۷۹ حاصل گردید که رفتار بسیار خطی هر یک از پل‌ها را نشان می‌دهد. همچنین کمترین و بیشترین درصد اختلاف بین مقادیر درایه‌های تئوری و تجربی قطر اصلی ماتریس [A] به ترتیب برای پل‌های C و B برابر ۰/۱۳٪ و ۱۸/۸۴٪ برآورد شد. عواملی مانند فرضیات استفاده شده در حل معادلات، خطای نصب کرنش‌سنج‌ها، تیرانس ماشین‌کاری سازه حس‌کننده الاستیک، بارگذاری نامناسب در حین انجام آزمایش‌های کالیبراسیون و ... باعث بروز این اختلاف و خطای تداخل^۳ در کانال‌های لودسل‌های چند محوره می‌شود. پارامتر ϵ در رابطه (۱۲) نیز به همین دلیل به جای مقادیر صفر در

1. Percent error
2. linearity
3. Interference error

4. Rated load