مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 14، ص‌ص 291-298

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# طراحی و ساخت سیستم اندازه گیری نیرو و گشتاور برای تست مدلی در تونل آب

نوروز محمد نوری[1*]، مریم کامران[2]، کریم مصطفی پور[3]، رباب بهادری[2]

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم صنعت ایران، تهران
2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران ، تهران
* تهران، صندوق پستی 16316765، mnouri@iust.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 24 اردیبهشت 1393
پذیرش: 28 تیر 1393
ارائه در سایت: 26 مهر 1393

*کلید واژگان:*
بالانس نیرو
کرنش‌سنج
کالیبراسیون
تونل آب

**چکیده**

اندازه‌گیری نیروهای هیدرودینامیکی روی اجسام زیر آب یکی از نیازهای اساسی تونل آب می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های تونل آب برای این کار یک بالانس دقیق نیرو لازم است. هدف از این مقاله طراحی، ساخت و کالیبراسیون یک بالانس شش مؤلفه‌ای جهت اندازه‌گیری نیروها و گشتاورهای وارده بر مدل در تست‌های مدلی استاتیکی و دینامیکی داخل تونل آب، می‌باشد. برای این منظور فرآیند تولید بالانس نیرو گشتاور شامل مراحل طراحی سازه‌ای بالانس، تدوین تکنولوژی و ساخت، طراحی مکانیزم تست کالیبراسیون و کالیبراسیون بالانس شش مؤلفه‌ای صورت گرفته است. بالانس طراحی شده، قابلیت اندازه‌گیری سه مؤلفه نیرو و سه مؤلفه گشتاور، بطور همزمان و مستقیم جهت اجرای تست‌های مدلی تونل آب تحت شرایط با و بدون کاویتاسیون را دارد. این سیستم بر اساس اصول کرنش‌سنج‌ها و قوانین تیرهای خمشی طراحی شده است. با در نظر گرفتن رابطه بین نیرو و سیگنال خروجی بالانس و استفاده از مدل‌های کالیبراسیون اندازه‌گیری مستقیم نیروها و گشتاورهای وارد بر مدل در تونل آب فراهم می‌شود. جهت کالیبراسیون بالانس یک مکانیزم کالیبراسیون شش درجه آزادی طراحی شده است. طراحی این سیستم بر اساس قابلیت اجرای تکنیک طراحی آزمایش متداول، استفاده از راستای گرانش برای بارگذاری بالانس و سادگی تراز و موقعیت‌دهی بالانس نسبت به راستای گرانش می‌باشد. با استفاده از این مکانیزم بالانس شش مؤلفه‌ای برای کاربردهای تونل آب کالیبره شده است. خطای استاندارد بین مؤلفه‌های اندازه‌گیری شده و بدست آمده از مدل کالیبراسیون در داده‌های بالانس کمتر از 0/1% حاصل شد.

# Design and fabrication of a force-moment measurement system for testing of the models in a water tunnel

Noruz Mohammad Nouri[1*], Maryam Kamran[2], Karim Mostafapur[3], Robab Bahadori[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
3- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 16316765 Tehran, Iran, mnouri@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 14 May 2014
Accepted 19 July 2014
Available Online 18 October 2014

*Keywords:*
Force balance
Strain gage
Calibration
Water tunnel

ABSTRACT

The measurement of hydrodynamic loads on submerged bodies is one of the main uses of water tunnels. Due to the limitations of the water tunnel, an accurate force balance is necessary. This paper describes the design, fabrication and calibration of a new six-component force moment balance system for measuring the forces and moments acting on the model, in static and dynamic water tunnel testing. A balanced team performed many areas for designing balance system such as structural design, balance technology, design of calibration mechanism, balance calibration etc. A six-component balance is able to measure the three elements of force and three components of moment simultaneously and instantly on cavitating and non- cavitating models in a water tunnel. The concept used in the balance design is the bending beam and the strain gage principle. The electrical signals are proportional to the forces applied to the model. By considering the relationship between the applied force and the balance's output signal and by using the calibration models, the forces and moments exerted on the model in the water tunnel can be measured directly. To calibrate multi component balance, a new six-degree of freedom calibration rig is designed and constructed. The system is designed based on applicability of formal experimental design techniques, using gravity for balance loading and balance position and alignment relative to gravity. The six-component balance was calibrated using this rig. The standard error between the measured values and the values obtained from calibration model less than 0.1 percent of maximum loading was achieved.

## 1- مقدمه

از زمان لئوناردو داوینچی تونل‌های آب در فرم اولیه یا بعد از آن برای کشف مکانیک سیال و پدیده‌های آیرودینامیکی استفاده شده‌اند[1]. در سال‌های اخیر تونل آب به عنوان تأسیسات بسیار مفید برای ارزیابی و تخمین پارامترهای مختلف عملکردی هیدرودینامیک، شناسایی شده‌اند. آشکارسازی جریان در تونل‌های آب توانایی شگرفی برای مشاهده‌ی جزئیات جریان در

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
N. Mohammad Nouri, M. Kamran, K. Mostafapur, R. Bahadori, Design and fabrication of a force-moment measurement system for testing of the models in a water tunnel, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 14, pp. 291-298, 2015 (In Persian)

وضعیت‌های مختلف فراهم می‌کند. درک ساختار جریان و چگونگی میدان جریان و عکس‌العمل آن با سطح اجسام برای حل مسائل ایرودینامیکی و هیدرودینامیکی ارزش زیادی دارند.

اندازه‌گیری نیروهای هیدرودینامیکی روی اجسام زیر آب، همچنین نیروهای آیرودینامیکی ایرفول‌ها یکی از اساسی‌ترین کاربردهای تونل آب می‌باشد. ورود تکنولوژی کرنش‌سنج‌ها[1]، دستگاه‌های مربوط به اکتساب داده از قبیل آمپلی فایرهای اختلال پایین، فیلترهای الکترونیک و ثبت کننده‌های دیجیتال، اندازه‌گیری دقیق کرنش‌های بسیار کوچک را امکان‌پذیر ساخته‌اند.

به طور عمومی نیروهای جریانی که روی یک مدل تونل آب اعمال می‌شوند بوسیله ترم‌هایی شامل سه مؤلفه نیرو و سه مؤلفه گشتاور که نسبت به مختصات کارتزین روی مدل در جهت جریان ثابت شده، توصیف می‌شوند. بنابراین برای اندازه‌گیری، یک حسگر چند مؤلفه‌ای مورد نیاز است که بطور جداگانه و مستقیم هر یک از شش مؤلفه را اندازه‌گیری کرده و فرصت ارزیابی هر یک از مؤلفه‌ها را برآورده سازد. در تونل آب برای اندازه‌گیری نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی، از بالانس‌های کرنش‌سنج چندمؤلفه‌ای[2] استفاده می‌شود. علاوه بر اندازه‌گیری نیرو و گشتاور استاتیک، بالانس تونل آب، ظرفیت را برای اندازه‌گیری دینامیکی فراهم می‌کند[2].

هدف از طراحی تونل آب مدار بسته دانشگاه علم و صنعت ایران نیز بررسی هیدرودینامیکی جریان در نواحی مختلف، جهت رسیدن به شرایط مطلوب در مقطع آزمایش برای انجام تست‌های مورد نیاز می‌باشد. در این مقاله با توجه به نیاز تونل آب دانشگاه علم وصنعت ایران جهت اندازه‌گیری بارهای وارده بر مدل‌های هیدرودینامیکی در تست‌های مدلی استاتیکی و دینامیکی، یک بالانس نیرو گشتاور طراحی و کالیبره شده است.

بالانس نیرو گشتاور یک سازه الاستیک پیچیده با تعدادی المان انعطاف پذیر است که در آن نیروهای وارده بر مدل باعث ایجاد کرنش بر روی المان‌های انعطاف‌پذیر می‌شوند. کرنش‌های تولید شده روی المان‌های الاستیک بوسیله کرنش‌سنج‌ها در مدار پل وتستون[3] به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌شود. با در نظر گرفتن رابطه بین نیرو و سیگنال خروجی بالانس و استفاده از مدل‌های کالیبراسیون، اندازه‌گیری مستقیم نیروها و گشتاورهای وارد بر مدل فراهم می‌شود[3]. این بالانس می‌تواند اندازه‌گیری بارهای وارده بر مدل‌های زیرسطحی، انواع کوتیتورها و پروانه‌ها را در شش درجه آزادی فراهم کند. در این مکانیزم جسم مدل از طریق یک سازه الاستیک به استینگ مونت[4] متصل می‌شود. یکی از مشکلات اندازه‌گیری ضرایب هیدرودینامیکی و ایرودینامیکی تداخل اثرات گشتاور و نیروی ایجادکننده آن (به عنوان مثال گشتاور پیچ و نیرو لیفت) می‌باشد. در این مقاله با طراحی مقطع‌ها و سیم بندی مناسب این مشکل نسبت به بالانس‌های کاربرد مشابه برطرف شده است، همچنین دقت اندازه‌گیری بالانس با در نظر گرفتن مدل کالیبراسیون مشابه افزایش خواهد یافت.

## 2- بالانس شش مؤلفه‌ای نیرو گشتاور

با توجه به نیاز تونل آب برای اندازه‌گیری نیروها و گشتاورها، یک بالانس شش مؤلفه‌ای سه تکه طراحی شده‌است. این سیستم، قابلیت اندازه‌گیری نیروهای $F_X$، $F_y$، $F_z$ و گشتاورهای $M_X$، $M_y$، $M_z$ به طور همزمان و مستقیم در آزمایش‌های تست مدلی تونل آب در حالت‌های دینامیکی و استاتیکی را دارد.

**جدول 1** محدوده بارهای طراحی بالانس نیرو گشتاور

| مؤلفه بار | میزان بار |
|---|---|
| نیروی درگ | $F_D = 0$ to 6 kg |
| نیروی لیفت | $F_L = -5$ to5 kg |
| نیروی جانبی | $F_S = -5$ to 5 kg |
| گشتاور پیچ | $M_Y = -0.1$ to0.1 kg.m |
| گشتاور رول | $M_X = -0.1$ to 0.1 kg.m |
| گشتاور یاو | $M_Z = -0.1$ to0.1kg.m |

طراحی بالانس به گونه‌ای است که نیروها و گشتاورهای وارد بر مدل را در راستای مختصات متصل به محورهای مدل اندازه‌گیری می‌کند.

### 2-1- نیازمندی‌های طراحی

در طراحی بالانس نیرو گشتاور طیف وسیعی از پارامترها مانند اندازه بالانس، حداکثر ابعاد هندسی مجاز بالانس، نحوه ارتباط بالانس با مدل و استینگ، تعداد مؤلفه‌ها و میزان بارهای طراحی، دقت مورد نیاز و شرایط محیطی(فشار، دما و رطوبت محیط) تأثیرگذار خواهد بود. با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و امکانات موجود، نیازمندی‌های طرح به صورت زیر تعریف شده‌اند.

1) حداکثر قطر بالانس می‌تواند 20 میلی‌متر باشد (با توجه به محدودیت‌های الگوی جریان).
2) محدوده بارهای طراحی مطابق با جدول 1 می‌باشد.
3) مقطع تونل آب (20×10cm)
4) شرایط محیطی طراحی
- فشار (0/4 bar)
- دما (دمای محیط)
5) حداکثر سرعت جریان10 متر بر ثانیه می‌باشد.

### 2-2- طراحی سازه‌ی بالانس نیرو گشتاور

در بخش طراحی سازه‌ای برای اندازه‌گیری نیروها و گشتاورها، یک بالانس جدید شش مؤلفه‌ای طراحی شده است. عملکرد بالانس به شدت بستگی به شکل سازه‌ای طراحی شده بالانس دارد. تفکیک مؤلفه‌ها نسبت به هم با استفاده از طراحی و سیم‌بندی مناسب المان‌های الاستیک انجام می‌شود. هر المان به طور مجزا باید قابلیت اندازه‌گیری مؤلفه خاص نیرو و گشتاور را داشته باشد به‌طوری‌که عکس‌العمل آن در اثر مؤلفه‌های دیگر حداقل باشد. تفکیک‌پذیری و خطی بودن بالانس دو عامل مهم برای عملکرد بالانس‌ها می‌باشند. هر یک از این عوامل تحت تأثیر طراحی سازه‌ای، ساخت و کالیبراسیون هستند. تفکیک‌پذیری و خطی بودن بالانس در مرحله طراحی سازه‌ای بستگی به ابعاد، شکل سازه‌ای و ماده انتخاب شده دارد[4].

ملاحظات در نظر گرفته شده در طراحی مقطع‌ها، صلبیت بالای المان‌های انعطاف‌پذیر بالانس برای کم کردن خطای تداخلی مکانیکی و استاتیکی ناشی از اندازه‌گیری بارها، انحراف حداقل بالانس از محور طولی برای مینیمم کردن خطاهای غیرخطی، هیسترزیس پایین، سادگی ماشین‌کاری و اندازه‌گیری مستقیم و مجزای یک مؤلفه خاص بدون نیاز تبدیل اثرات یکسان به یکدیگر، جهت کاهش تداخل الکتریکی می‌باشد.

برای طراحی بالانس از المان‌های انعطاف پذیر و کرنش‌سنج‌ها استفاده شده است که هر مؤلفه نیرو یا گشتاور متناسب با کرنش ایجاد شده روی المان الاستیک خاص می‌باشد. این سیستم بر اساس اصول کرنش‌سنج‌ها و قوانین تیرهای خمشی طراحی شده است[3] و مطابق شکل 1 دارای چهار

1- Strain gage
2- Multi component balance
3- Wheatstone bridge
4- Sting mount

مقطع می‌باشد. با طراحی مناسب مقطع‌های بالانس و حالت قرارگیری کرنش‌سنج‌ها، جداسازی نیروها و گشتاورها امکان‌پذیر شده‌اند. بالانس طراحی شده در شکل 1 نشان داده شده است. مقطع‌های اندازه‌گیری عبارتند از:

1- مقطع اندازه‌گیری درگ: با توجه به اینکه بالانس طراحی شده در راستای محورهای متصل به مدل قرار می‌گیرد، مقطع اندازه‌گیری درگ به گونه‌ای طراحی شده است که کرنش ایجاد شده در محل نصب کرنش‌سنج‌ها در اثر نیروی محوری از نوع خمشی باشد. این مقطع بارهای 5 مؤلفه‌ی دیگر را تحمل می‌کند ولی در جهت نیروی محوری نسبتا انعطاف‌پذیر است.

2- مقطع گشتاور رول: مقطع گشتاور رول سطح مقطعی صلیبی شکل است که از چهار تیر مستطیلی تشکیل شده است. چهار کرنش‌سنج استفاده شده روی چهار تیر قرار می‌گیرد. این مقطع صلیبی شکل نسبت به تغییرات گشتاور بسیار حساس است و در برابر مؤلفه‌های دیگر صلیبت نسبتا بالایی دارد.

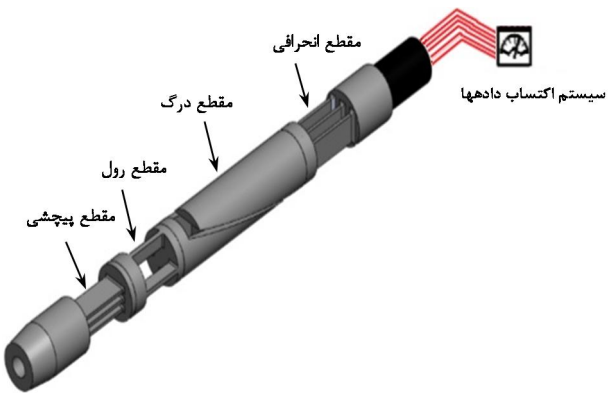
3- مقطع پیچشی: این مقطع از سه تیر مستطیلی شکل تشکیل شده است. نیروی لیفت و گشتاور پیچشی توسط این مقطع اندازه‌گیری می‌شود. کرنش-سنج‌ها روی تیرهای کناری که نسبت به تیر مرکزی متقارن هستند نصب می‌شوند با استفاده از سیم‌بندی و آرایش مناسب کرنش‌سنج‌ها روی مقطع طراحی شده می‌توان نیروی لیفت و گشتاور خمشی را از هم تفکیک و مستقل از هم اندازه‌گیری کرد. تیرها برای فراهم کردن حساسیت مورد نیاز به اندازه کافی نازک هستند تا جایی که حداقل انحراف از خط مرکز ممان اینرسی و صلبیت لازم را فراهم می‌نمایند.

4- مقطع انحرافی: مقطع انحرافی شبیه مقطع پیچشی می‌باشد تنها با این تفاوت که مقطع انحرافی نسبت به مقطع پیچشی 90 درجه حول محور مرکز چرخیده است. این مقطع نیروی ساید و گشتاور انحرافی را اندازه‌گیری می‌کند.

## 2-3- آنالیز کرنش

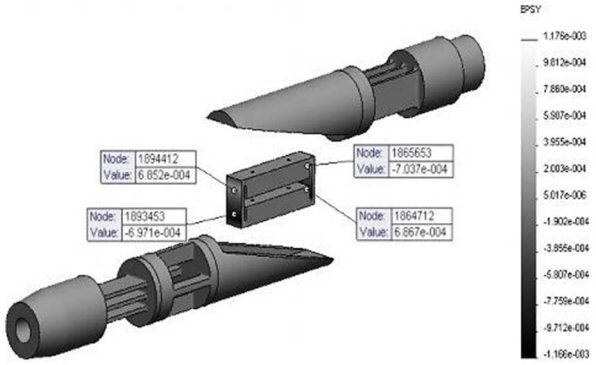
خروجی الکتریکی هر مقطع اندازه‌گیری به کرنش ایجاد شده در ناحیه نصب کرنش وابسته است، بنابراین چگونگی توزیع کرنش تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی عملکرد بالانس دارد. محل نصب و آرایش کرنش‌سنج‌ها تحت تأثیر پارامترهای مختلفی مانند میزان بار طراحی، میزان کرنش مورد نیاز، ابعاد مقطع‌ها و ابعاد کرنش‌سنج می‌باشد. برای حداقل نگه‌داشتن اثرات تداخلی، نصب کرنش‌سنج‌ها در محل مناسب ضروری است. یک بالانس شش مؤلفه‌ای یک سازه پیچیده با شمار زیادی از ابعاد و متغیرهای طراحی است.

بنابراین نمی‌توان به تنهایی با استفاده از روش تحلیلی، ابعاد بهینه مقطع‌ها را محاسبه کرد. ابعاد بهینه بالانس با ترکیبی از روش تحلیلی و نرم افزاری محاسبه شده‌اند [5].

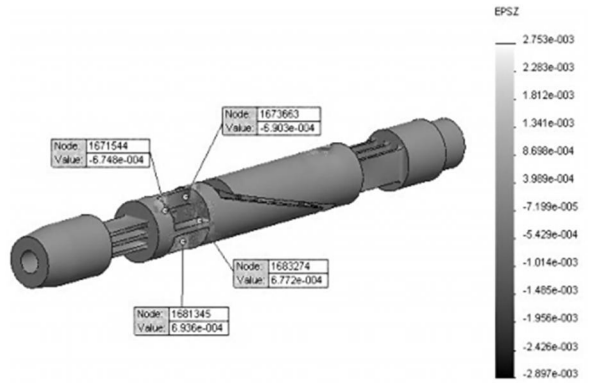



**شکل 1** بالانس شش مؤلفه ای نیرو گشتاور

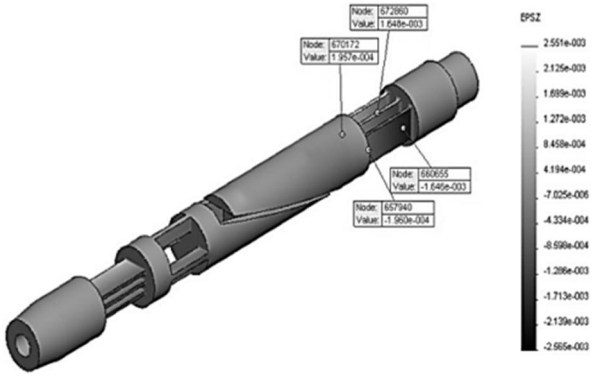
طراحی مناسب بالانس نیازمند آگاهی دقیق از معیارهای طراحی و پایبندی به این معیارها است. مقطع‌های اندازه‌گیری، نواحی سنجش کرنش ایجاد شده در بالانس هستند که با توجه به معیار ماکزیمم خروجی 1/5 mV/V و ماکزیمم کرنش $\mu\varepsilon$ 750 بر اساس بار ماکزیمم بهینه شده‌اند[3]. یک فرایند تکراری برای بدست آوردن اندازه بهینه مقطع‌ها و خروجی مناسب در ناحیه‌ی نصب کرنش‌سنج‌ها انجام شده است. تحلیل توزیع کرنش مانند شکل‌های 2، 3 و 4 با استفاده از نرم افزار کاسموس[1]انجام گرفته و مدل بصوت آزاد مش زده شده است. تعداد المان تولید شده برای شبیه سازی بالانس 991764 است. در تست‌های تونل آب دانشگاه علم وصنعت ایران معمولا بارهای ترکیبی روی مدل‌های آزمایشی اعمال می‌شوند چنین بارهای مرکبی به بالانس به صورت پیچیده‌تری تنش وارد می‌کنند. بعد از محاسبه‌ی ابعاد نهایی هر مقطع، بالانس تحت بارگذاری‌های مختلف مشابه با شرایط واقعی تونل آب شبیه‌سازی شده و اثرات تداخلی، محدوده تمرکز تنش و چگونگی توزیع کرنش بر روی مقطع‌ها بررسی شده است [5].




**شکل 2** تحلیل توزیع کرنش در مقطع درگ(نیروی فشاری)

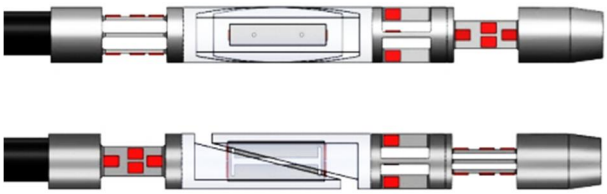



**شکل 3** تحلیل توزیع کرنش در مقطع گشتاور چرخشی رول

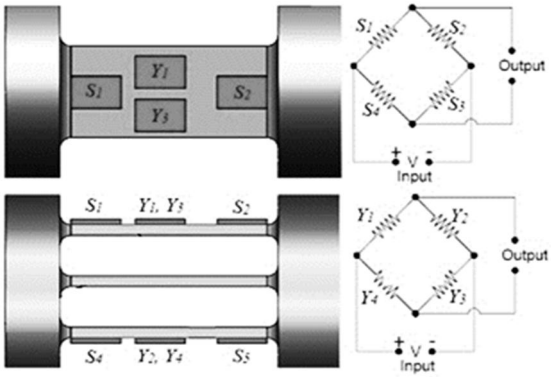



**شکل 4** تحلیل توزیع کرنش در مقطع انحرافی (نیروی جانبی)

1- Cosmos



**شکل 5** جانمایی کرنش‌سنج‌ها در مقطع‌های بالانس




**شکل 6** شماتیک مدار پل وتستون مقطع انحرافی

محل نصب و آریش کرنش‌سنج‌ها بصوت پل وتستون به گونه‌ای است که ماکزیمم حساسیت کرنش را در جهت مؤلفه مورد نظر و حداقل عکس‌العمل نسبت به مؤلفه‌های دیگر را داشته باشد. جانمایی کرنش‌سنج‌ها در هر مقطع مطابق شکل 5 می‌باشد. در شکل 6 شماتیک نحوه آرایش کرنش‌سنج‌ها در پل وتستون بر روی مقطع انحرافی نشان داده شده است.

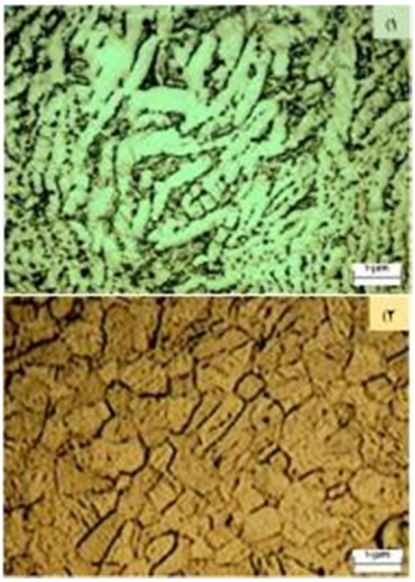
## 3- فرآیند ساخت بالانس نیرو گشتاور

روند ساخت بالانس نیرو گشتاور بسیار حساس است و نیاز به توجه ویژه‌ای دارد. در این مرحله تدوین تکنولوژی بالانس بر اساس مفاهیم طراحی، مواد بالانس‌های مختلف، فرایند ماده جدید و تکنیک‌های ساخت انجام شده است. در راستای اجرای این هدف، ابتدا سیستم مذکور بطور کامل شناسایی و روش ساخت آن تعیین شده و پس از تعیین دستورالعمل آزمایش‌ها و معیارهای کنترل کیفی، مراحل ساخت آن روی نمونه اولیه اجرا گردیده است.

باتوجه به مطالعات اولیه و بررسی انجام شده بر روی انواع عملیات ماشین‌کاری مورد نیاز برای ساخت بالانس، آلیاژ Ti – Al6 – V4 ، به دلیل داشتن خواصی مانند هیسترزیس پایین، مقاومت به خوردگی بالا، نسبت استحکام به وزن بالا، عملیات حرارت‌پذیری مناسب، ضریب انبساط حرارتی کم و چقرمگی مناسب به عنوان ماده اصلی انتخاب گردید [6]. خواص مکانیکی ماده مثل خزش پلاستیک، هیسترزیس در دقت اندازه‌گیری بالانس نقش مهمی را ایفا می‌کنند. این خواص به وسیله عملیات حرارتی بهبود می‌یابند. برای بدست آوردن عملکرد قابل قبول فرایند عملیات حرارتی حل‌سازی و پیرسازی با شرایط دمایی متفاوت روی المان‌های فنری بالانس طراحی شده انجام شد [7]. تغییر ریزساختارها در اثر عملیات های حرارتی در شکل 7 نشان داده شده است.

فرآیند ساخت بالانس نیرو گشتاور شامل، تراشکاری، سوراخکاری، سنگ زنی، ماشین‌کاری به روش تخلیه اکتریکی، پولیش‌کاری و غیره می‌باشد. برخی از عملیات برای اولین بار در کشور انجام گرفت. ماشین‌کاری مقطع‌های اندازه‌گیری به روش تخلیه اکتریکی از ایجاد تنش‌های کششی[1] در سطح و تغییر خواص سطح مقطع‌ها جلوگیری خواهد کرد.

1- Tensile stress



**شکل 7** ریزساختار ماده اولیه 1) قبل از عملیات حرارتی 2) بعد از عملیات حرارتی

**شکل 8** سازه بالانس شش مؤلفه ای

چنین تنش‌هایی باعث کاهش عمر خستگی بالانس تحت بارهای دینامیکی و افزایش خطای هیسترزیس خواهد شد. برای بالابردن عمر خستگی بالانس و رفع تنش‌های پسماند[2] حاصل از فرآیند ساخت از روش الکتروشیمیایی[3] استفاده شده است(شکل 8). براساس دستورالعمل‌ها و معیارهای تدوین شده، مواد اولیه و فرآیندهای ساخت قطعات، تحت کنترل و بررسی قرار گرفتند.

کنترل ابعادی قطعات مختلف، آنالیز مواد اولیه و آزمایش متالوگرافی بر روی قطعات انجام شد. آزمایش‌های انجام شده تطابق نتایج را با معیارهای تدوین شده نشان داد.

پس از ساخت سازه‌ی بالانس و آماده‌سازی مقطع‌ها، ساخت مداراهای الکتریکی هر پل بر روی مقطع‌ها صورت خواهد گرفت. نوع اتصال کرنش‌سنج‌ها به سطح و نحوه‌ی آرایش آنها در پل وتستون تأثیر قوی بر روی میزان حساسیت بالانس دارد. حساسیت موجود در این مرحله عدم انحراف کرنش‌سنج‌ها در جانمایی، ایجاد خط چسبندگی مناسب جهت جلوگیری از خطای خزش، ایجاد تعادل در بازوهای هر پل وتستون جهت جبران اثرات گرمایی و کاهش انحراف صفر هر پل می‌باشد. در ساخت یک مبدل هیچ چیزی به اندازه چسباندن کرنش‌سنج‌ها روی المان در کارایی و ماندگاری مبدل تأثیر ندارد[8].

جهت جانمایی و سیم‌بندی کرنش‌سنج‌ها، 24 کرنش‌سنج مدل FLA-1-350-11 از شرکت TML در آرایش 6 پل وتستون کامل بر روی سطوح مقطع‌ها توسط چسب سیانواکریلیت[4] چسبانده و سیم‌بندی شده است.

کارایی کرنش‌سنج با عواملی چون رطوبت، خوردگی شیمیایی و یا ضربات مکانیکی کاهش می‌یابد. در نتیجه کرنش‌سنج‌ها به پوشش با درجات مختلفی مطابق با شدت و سختی محیط عملکردی نیاز دارند. پس از نصب

2- Residual stress
3- Electrochemical method
4- Cyanoacrylate

کرنش‌سنج‌ها و اتمام سیم‌بندی آنها از سه لایه مواد محافظ متشکل از یک لایه میکروکریستال وگس[1] جهت آب‌بندی و دو لایه‌ی سیلیکون رابر[2] و چسب ضدآب آرالدیت[3] جهت حفاظت فیزیکی و مکانیکی استفاده شده است[9]. بالانس شش مؤلفه‌ای نیرو گشتاور ساخته شده در شکل 9 نشان داده شده است.

## 4- کالیبراسیون بالانس شش مؤلفه‌ای

برای تخمین نیروها و گشتاورها از ولتاژ خروجی، احتیاج به کالیبراسیون است. ممارست معمول در طراحی بالانس حذف خطاهای تکرارپذیر، غیرتکرارپذیر و غیر معمول می‌باشد. طراحی بالانس به‌گونه ایست که این برهم‌کنش‌های نامطلوب را به حداقل برساند اما به دلیل محدودیت در طراحی بالانس نمی‌توان آنها را به طور کامل حذف کرد. هدف از کالیبراسیون تخمین حساسیت و عکس‌العمل‌ها است. این عکس‌العمل‌ها تکرارپذیر است و داده‌های بالانس می‌توانند با دقت قابل قبول تصحیح شوند. تکنیک‌های نامناسب در این مرحله می‌تواند به آسانی کارهای انجام شده برای طراحی را بی‌اثر کند. بنابراین کالیبراسیون یک گام مهم در ساخت بالانس برای تست تونل آب می‌باشد.

### 4-1- معادلات کالیبراسیون بالانس نیرو گشتاور

برای یک بالانس شش مؤلفه‌ای تعیین پاسخ هر یک از مقطع‌های اندازه‌گیری در صفحه ابتدایی عملکردش و نیز نسبت به بارهایی که در صفحه‌های دیگر عمل می‌کنند ضروری است. به طورکلی برای کالیبراسیون بالانس مدل‌های مختلفی وجود دارد که بسته به نوع معادلات انتخابی برای پردازش داده‌ها و میزان دقت کار می‌توان از مراتب مختلفی از معادله‌ها استفاده نمود.

در این مقاله پس از مقایسه‌ی مدل‌های مختلف کالیبراسیون با در نظر گرفتن پارامترهای متفاوت بر حسب نیاز تست‌های مورد بررسی در تونل آب و طرح بالانس از مدل $[R]=[C][H]$ استفاده شده است که در آن ولتاژ خروجی (R) تابعی از ضرایب کالیبراسیون (C) و بارهای اعمالی (H) بر روی بالانس می‌باشد[10].

واکنش‌ها را می توان به صورت اجزای ماتریس‌ها در نظر گرفت. ماتریس را می‌توان به صورت جمع عبارات مطابق معادله‌ی 1 نوشت:

$$R_i = \sum_{i=1}^{6} A_{ij} H_j + \sum_{i=1}^{6}\sum_{i=1}^{6} B_{ijk} H_j H_k + \sum_{i=1}^{6} C_{ij} H_j^3 \quad (1)$$

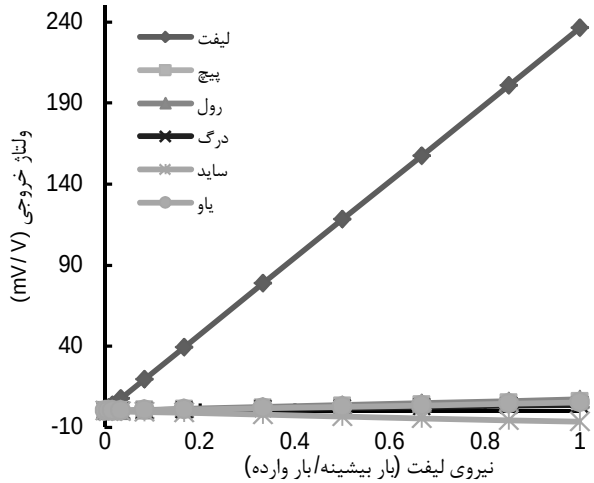
این ماتریس 33×6 همه‌ی اثرات 6 مؤلفه را لحاظ می‌کند. $A_{ij}$ نشان‌دهنده‌ی 36 ضریب و $B_{ij}$ نشان‌دهنده‌ی 126 ضریب می‌باشد. شش عضو $A_{ij}$ با $i=j$ حساسیت‌های مستقیم 6 مؤلفه بار می‌باشند[3].

**شکل** 9 بالانس شش مؤلفه ای نیرو گشتاور ساخته شده

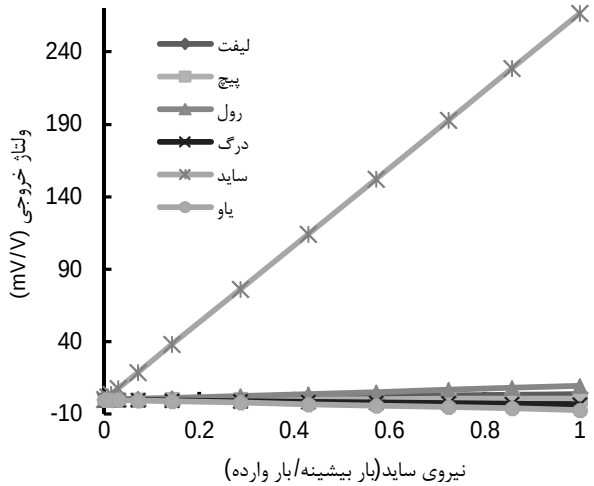
در کالیبراسیون بالانس شش مؤلفه‌ای، در نظر گرفتن اثرات تداخلی بین مقطع‌ها ضروری است و با استفاده از مدل مرتبه دوم با 27 ضریب می‌توان به دقت مطلوب رسید. در این راستا برای بدست آوردن ضرایب کالیبراسیون جدول بارگذاری با در نظر گرفتن شرایط واقعی تست‌ها از روش تکینک طراحی آزمایش متداول[4]، طراحی شده است. روش تکینک طراحی آزمایش متداول متشکل از همه‌ی ترکیب بارهای دو تایی از 6 مؤلفه‌ی ایجاد شده می‌باشد[11]. طرح کلی حاوی 5 نقطه طراحی مرکزی برای برآورد خطای خالص است که در کل شامل 77 تست می‌باشد. برای این طراحی، همه ترکیب‌های احتمالی دو و یک اثر فعال در هر بردار مورد آزمایش قرار گرفته است.

### 4-2- نمودار ولتاژ- نیرو

پس از ساخت بالانس و سیم‌بندی، به منظور اطمینان از خطی بودن بالانس، در همه‌ی محدوده‌ها بارگذاری به صورت مستقل انجام گرفت. برای نمونه مطابق نمودارهای بدست آمده شکل‌های 10، 11 و 12 از نقطه داده‌های کالیبراسیون عکس‌العمل هر پل نسبت به بار اصلی خود و بارهای دیگر خطی می‌باشد. بزرگترین پاسخ خطی برای هر کانال، مربوط به بار اصلی است در حالی که همه عکس‌العمل‌ها کوچک و کاملا خطی هستند. این موضوع نشان‌دهنده تفکیک‌پذیری و حساسیت مناسب هر پل خواهد بود.

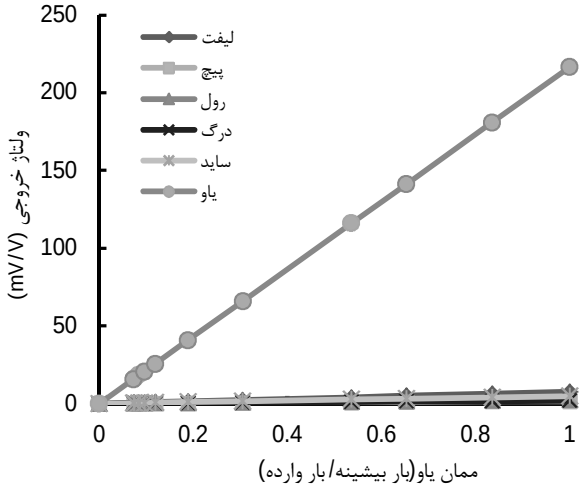



**شکل** 10 بررسی عملکرد خطی بالانس شش مؤلفه ای نیرو گشتاور (نیروی لیفت)




**شکل** 11 بررسی عملکرد خطی بالانس شش مؤلفه ای نیرو گشتاور (نیروی ساید)

1- Microcrystalline Wax
2- Silicon Rubber
3- Araldite
4- Design of experiment method (DOE)




**شکل 12** بررسی عملکرد خطی بالانس شش مؤلفه ای نیرو گشتاور (گشتاور یاو)

خروجی خطی نشان‌دهنده صحت روند سیم‌بندی و کارکرد صحیح سنسور می‌باشد.

## 4-3- مکانیزم کالیبراسیون بالانس

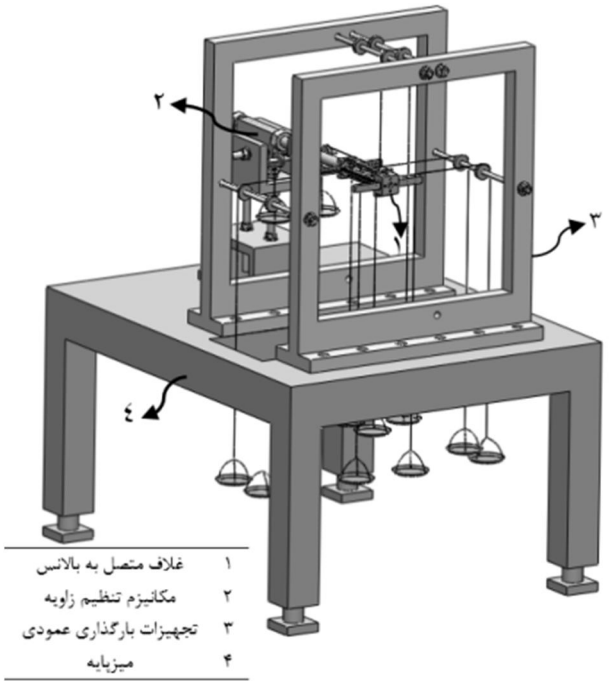
جهت اجرای تست‌های کالیبراسیون بالانس نیرو گشتاور، سیستم کالیبراسیون شش درجه آزادی طراحی و ساخته شده است. این سیستم کالیبراسیون، قابلیت اعمال بار در شش درجه آزادی به صورت هم‌زمان و مستقل را با در نظر گرفتن اصول و ملاحظات طراحی دارا می‌باشد. طراحی این سیستم بر اساس اصول کالیبراسیون دستی و با استفاده از روش اعمال وزن مرده[1] برای بارگذاری انجام شده است[3]. هدف از طراحی این مکانیزم قابلیت اجرای تکنیک طراحی آزمایش متداول، استفاده از راستای گرانش برای بارگذاری بالانس، سادگی تراز و موقعیت‌دهی بالانس و محورهای بارگذاری آن نسبت به راستای گرانش می‌باشد.

مکانیزم کالیبراسیون شش درجه آزادی مطابق شکل 13 شامل چهار بخش اصلی غلاف متصل به بالانس، سیستم تنظیم زاویه و جابه‌جایی، تجهیزات بارگذاری عمودی و میز پایه می‌باشد. بالانس در انتهای تکیه‌گاهی خود از طریق استینگ به پایه نگهدارنده متصل شده است و به سر مدل بالانس، یک غلاف متصل می‌باشد. این غلاف نشان دهنده‌ی مدل درون تونل آب است که دستگاه محور مرجع بر روی آن قرار دارد. بارها با استفاده از وزنه‌های استاندارد دقیقا در راستای عمودی وارد می‌شوند و بنابراین مهم است که غلاف کالیبراسیون پس از هر بار تغییر در بارگذاری دوباره هم‌راستا گردد. برای این هم‌راستاسازی و قرارگیری بالانس در مرکز سیستم کالیبراسیون، همچنین برای حذف انحراف سیستم در اثر بارگذاری‌های ترکیبی یک مکانیزم تنظیم زاویه در سه جهت گشتاور رول، پیچ و جانبی ایجاد شده است. موقعیت و جهت‌دهی بالانس از طریق این پایه‌ی نگه‌دارنده تنظیم می‌شود. با در نظر گرفتن رابطه بین نیرو و سیگنال خروجی بالانس و استفاده از مدل‌های کالیبراسیون اندازه‌گیری مستقیم نیروها و گشتاورهای وارد بر مدل در تونل آب فراهم می‌شود.

طراحی این مکانیزم به‌گونه‌ای است که با حداقل اجزای مکانیکی قابلیت اعمال بار نیروها و گشتاورهای مختلف به بالانس، به صورت هم‌زمان و بدون نیاز به چرخش بالانس، در نقطه بارهای مختلف مطابق با نیاز جدول بارگذاری کالیبراسیون را دارا می‌باشد. سادگی سیستم، زمان و هزینه کالیبراسیون را کاهش و دقت آن را افزایش می‌دهد. با استفاده از این دستگاه، خطای سیستماتیک با استفاده از تکنیک طراحی آزمایش متداول کاهش می‌یابد. سیستم کلی کالیبراسیون بالانس در شکل 14 نشان داده شده است.

## 4-4- تعیین ضرایب کالیبراسیون

ضرایب کالیبراسیون، از روش رگراسیون حداقل مربعات[2] با استفاده از داده‌های گسسته ثبت شده (مؤلفه‌های وارده و سیگنال خروجی) محاسبه خواهد شد. در این روش ابتدا رابطه سیگنال خروجی هر مؤلفه بالانس بر حسب بارهای اعمالی جدول بارگذاری برازش شده‌اند و سپس با استفاده از آنالیز آماری و استفاده از روش سطح پاسخ بهینه[3] ضرایب تأثیرگذار اصلی ماتریس ضرایب کالیبراسیون استخراج شده است. در مرحله‌ی دوم پس از استخراج معادلات، با فرض داشتن حداقل اختلاف بین خروجی به دست آمده از مدل کالیبراسیون و مقدار واقعی، ضرایب کالیبراسیون در فرآیند کالیبراسیون معکوس محاسبه گردیده‌اند.




**شکل13** مکانیزم کالیبراسیون شش درجه آزادی

**شکل 14** سیستم کالیبراسیون بالانس نیرو گشتاور

1- Dead weigh

2- Least-squares regression method
3- Response surface methodology

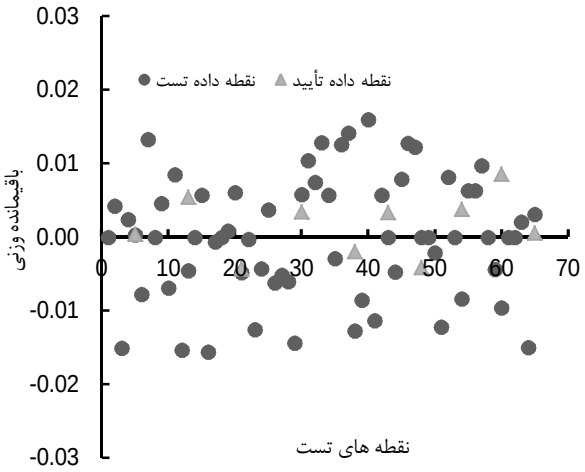
برای بهینه‌سازی خطای استاندارد داده‌ها در تحلیل آماری از معیار چاونت[1] استفاده شده است. حذف داده‌ها در معیار چاونت بر پایه تحلیل آماری است و باعث حذف داده‌هایی که رفتار واقعی بالانس را نمایان می‌کنند، نمی‌شود[10]. تحلیل‌ها با استفاده از نرم افزار آماری مینی‌تب[2] انجام گرفته است. ماتریس ضرایب کالیبراسیون مرتبه اول مطابق با معادله 2 می‌باشد.

$$C = \begin{bmatrix} 0.7089 & -0.0609 & 0.0164 & -0.1392 & 0.0121 & 0.0232 \\ 0.0175 & -0.0242 & 0.7177 & -0.1160 & 0.0023 & 0.0048 \\ 0.0221 & -0.0164 & -0.0135 & 0.7598 & 0.0283 & 0.0065 \\ 0.0112 & 0.6436 & 1.75E-04 & 0.0048 & -0.0100 & 0.0061 \\ 0.0197 & 0.0357 & 3.08E-04 & -0.1415 & 0.8003 & 0.0145 \\ 0.0156 & -0.0134 & 5.61E-05 & 0.1161 & -0.0210 & 0.6496 \end{bmatrix} \quad (2)$$

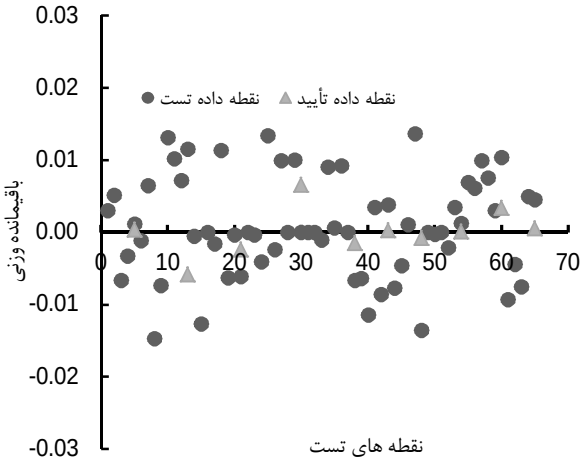
آنالیز آماری برای باقیمانده‌های وزنی داده‌های مدل و تأیید بالانس شش مؤلفه‌ای برای سه مؤلفه گشتاور پیچ، نیروی درگ و نیروی ساید در شکل‌های 15، 16، 17 برای نمونه نشان داده شده است. با استفاده از معادله 3 خطای استاندارد بیشینه بالانس شش مؤلفه‌ای کمتر از 0/1 % بار بیشینه بدست آمده است.

$$\sigma_e = \left( \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} \Delta F_{e,i}^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

$\Delta F_{e,i}$ برابر است با باقیمانده خطای $i$ امین بارگذاری مؤلفه‌ی $e$ که در نهایت $\sigma_e$ خطای استاندارد مؤلفه‌ی $e$ ام را بیان می‌کند[12].

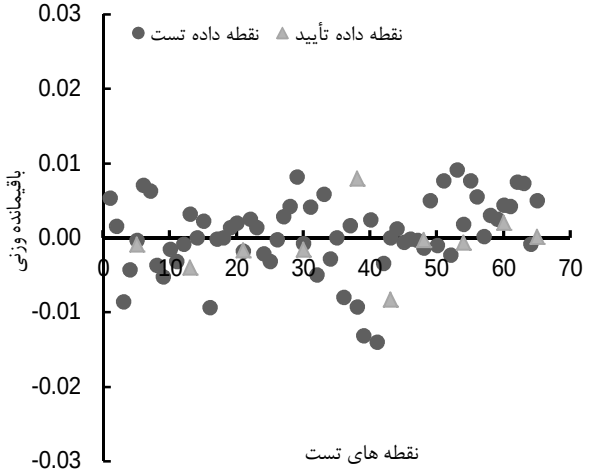



**شکل 15** باقیمانده های گشتاور پیچ برای داده های مدل و تأیید گشتاور پیچ




**شکل 16** باقیمانده های نیروی درگ برای داده های مدل و تأیید نیروی درگ

1- Chauvenet's criterion optimization
2- Minitab




**شکل 17** باقیمانده های نیروی ساید برای داده های مدل و تأیید نیروی ساید

## 5- نتیجه گیری

در مقاله حاضر با توجه به نیاز تونل آب دانشگاه علم و صنعت ایران برای اندازه‌گیری نیروها و گشتاورها فرآیند ساخت و کالیبراسیون یک بالانس شش مؤلفه‌ای انجام شده است. بالانس طراحی شده، قابلیت اندازه‌گیری نیروهای $F_X$، $F_y$، $F_z$ و گشتاورهای $M_X$، $M_y$، $M_z$ به طور هم‌زمان و مستقیم در تست‌های استاتیکی و دینامیکی تونل آب را دارد. فازهای ساخت و طراحی بالانس شش مؤلفه‌ای شامل طراحی سازه‌ای، تدوین تکنولوژی بالانس، ساخت سازه‌ی بالانس، طراحی و ساخت مدارهای تبدیل نیرو به سیگنال الکتریکی و آماده‌سازی بالانس برای شرایط کاری در تونل آب انجام گرفته است. در این مقاله ابتدا با در نظر گرفتن شرایط واقعی بارگذاری اثرات تداخلی برای مقاطع مختلف بررسی شده و سپس با قرار دادن و سیم بندی مناسب کرنش-سنج‌های داخل پل امکان جداسازی نیروها و گشتاورها امکان پذیر شده است. ملاحظات طراحی سازه‌ای با در نظر گرفتن سیستم اکتساب داده‌ها و عوامل موثر بر دقت آن‌ها اعمال شده‌اند.

راهکار جمع آوری داده‌ها از یک بالانس نیرو گشتاور، کالیبراسیون دقیق و قابل تکرار است. جهت کالیبراسیون بالانس شش مؤلفه‌ای، یک سیستم کالیبراسیون شش درجه آزادی طراحی و ساخته شد. سیستم طراحی شده با حداقل اجزای مکانیکی قابلیت اعمال بار نیروها و گشتاورهای مختلف به بالانس، به صورت هم‌زمان و بدون نیاز به چرخش بالانس، در نقطه بارهای مختلف مطابق با نیاز جدول بارگذاری کالیبراسیون را دارا می‌باشد. این سیستم زمان و هزینه کالیبراسیون را کاهش و دقت آن را افزایش می‌دهد. سیستم کالیبراسیون طراحی شده توانایی ایجاد انواع بارگذاری‌های ترکیبی و خالص را در شش درجه آزادی دارا می‌باشد.

پس از ساخت بالانس و سیم‌بندی (سیستم الکتریکی)، ابتدا به منظور اطمینان از خطی بودن بالانس، در همه محدوده بارهای طراحی بارگذاری به صورت مستقل انجام گرفت که مطابق نمودارهای بدست آمده شکل 10 تا 12 از نقطه داده‌های کالیبراسیون، عکس‌العمل هر پل نسبت به بار اصلی خود و بارهای دیگر خطی می‌باشد. این موضوع نشان‌دهنده تفکیک‌پذیری و حساسیت مناسب هر پل خواهد بود. خروجی خطی نشان دهنده صحت روند سیم بندی و کارکرد صحیح سنسور می‌باشد.

برای آنالیز خطا، بالانس طراحی شده کالیبره شد. ابتدا جدول بارگذاری-های مورد نیاز کالیبراسیون مطابق با شرایط واقعی تست‌های مدلی از تکینک طراحی آزمایش متداول استخراج شد. سپس ضرایب کالیبراسیون از داده‌های

بارهای گسسته به کار برده شده و نسبت ولتاژ خروجی با استفاده از روش رگراسیون حداقل مربعات تخمین زده شده‌اند. سپس با استفاده از آنالیز آماری و استفاده از روش سطح پاسخ بهینه ضرایب تأثیرگذار اصلی ماتریس ضرایب کالیبراسیون استخراج شده است. ضرایب بدست آمده نشان دهنده حساسیت‌ها و عکس‌العمل‌های هر پل با در نظر گرفتن اثرات ساخت، مونتاژ و سیم‌بندی می‌باشد، نتایج بدست آمده نشان می‌دهند هر مقطع در برابر بار صفحه مربوطه حساسیت مطلوب و صلبیت لازم در برابر مؤلفه‌های دیگر را فراهم می‌کند. مطابق با باقیمانده‌های وزنی بدست آمده برای نقطه داده‌های تست کالیبراسیون و نقطه داده‌های تأیید بالانس شش مؤلفه‌ای خطای استاندارد بین مؤلفه‌های اندازه‌گیری شده و بدست آمده از مدل کالیبراسیون کمتر از 0/1% حاصل شده است. در نتیجه در این طرح با در نظر گرفتن حداقل تداخل‌های مکانیکی و الکتریکی، بالانس با خطای کمتر از 0/1% بار ماکزیمم امکان تخمین بارهای وارد بر مدل را فراهم خواهد کرد. بالانس شش مولفه‌ای ساخته شده توانایی اندازه‌گیری نیروها و گشتاورهای وارده بر مدل-های هیدرودینامیکی و ایرودینامیکی در تست‌های مدلی استاتیکی و دینامیکی داخل تونل آب، تانک کشش و تونل باد را دارا می‌باشد. این بالانس می‌تواند اندازه‌گیری بارهای وارده بر مدل‌های زیرسطحی، انواع کوتیتورها و پروانه‌ها را در شش درجه آزادی فراهم کند.

در بالانس‌های مشابه تداخل مکانیکی گشتاور پیچ با لیفت و گشتاور یاو با نیروی ساید باعث بوجود آمدن تداخل پیش بینی نشده الکتریکی می‌شوند. یکی از مشکلات اندازه‌گیری ضرایب هیدرودینامیکی تداخل اثرات گشتاور و نیروی ایجاد کننده آن (به عنوان مثال گشتاور پیچ و نیرو لیفت) می‌باشد. با طراحی مناسب مقاطع و همچنین سیم‌بندی مناسب این مشکل نسبت به بالانس‌های کاربرد مشابه برطرف شده است، و دقت اندازه‌گیری بالانس با در نظر گرفتن مدل کالیبراسیون مشابه افزایش یافته است. همچنین سیستم کالیبراسیون طراحی شده به دلیل امکان ایجاد بارگذاری مستقل هر شش مولفه و عدم نیاز به چرخش بالانس در ترکیب بارگذاری‌های مورد نیاز زمان و هزینه کالیبراسیون را کاهش و دقت آن را افزایش می‌دهد.

## 6- فهرست علائم

| | |
|---|---|
| $C$ | ضریب کالیبراسیون |
| $F$ | نیرو(kg) |
| $H$ | بار اعمالی(kg) |
| $M$ | گشتاور(kg.m) |
| $V$ | ولتاژخروجی(Volt) |

**علایم یونانی**

| | |
|---|---|
| $\mu\varepsilon$ | میکرو کرنش |
| $\sigma$ | خطای استاندارد |

**زیرنویس‌ها**

| | |
|---|---|
| D | درگ |
| E | مولفه بار |
| J | شماره بارگذاری |
| L | لیفت |
| P | پیچ |
| R | رول |
| S | ساید |
| Y | یاو |

## 7- مراجع

[1] C. J. Suárez, G. N. Malcolm, B. R. Kramer, B. C. Smith & B. F. Ayers, *Development of a multicomponent force and moment balance for water tunnel applications,* Vol. I, NASA Contractor Report 4642, 1994.

[2] G. M. Hotz, J. T McGraw, *The high speed water tunnel three-component force balance,* Hydrodynamics Laboratory California Institute of Technology Pasadena, California, Report No. 47-1, 1955.

[3] K. Hufnagel, G. Schewe, *Force and moment measurement,* in: C. Tropea, A. L. Yarin, J. F. Foss, *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics,* pp. 566-596, Berlin, 2007.

[4] A. Bray, G. Barbato, R. Levi, *Theory and Practice of Force Measurement,* pp. 42-168, London, Academic Press, 1990.

[5] N. M. Nouri, K. Mostafapour, M. Kamran, Strain and stress analysis of six-component strain gauge balance water tunnel for optimization of performance, *The 10th Iranian aerospace society conference,* Tehran, Iran, 2011.

[6] D. R. Chichili, K. T. Ramesh, K. J. Hemker, *The high strain rate response of alphatitanium, Experiments. deformation mechanisms and modeling,* pp. 46-1025, Acta Materialia, 1998.

[7] J. St. Pierre, V. Carburizing, *Heat treating,* Vol. 4, *ASM handbook,* ASM Internation , pp. 2044-2071, 1991.

[8] M. Kamran, *Construction and calibration of six-component force/moment balance for cavitation tunnel,* MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, 2012, (In Persian).

[9] TML company, *TML strain gauge users' guide,* coating materials, Tokyo, Sokki Kenkyujo, 2012.

[10] S. Y. F. Leung, Y. Y. Link, *Comparison and analysis of strain gauge balance calibration matrix mathematical models,* DSTO-TR-0857, Aeronautical and maritime research laboratory, Defence science and technology organisation, Australia, Melbourne, 1999.

[11] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments,* John Wiley and Sons, Inc., New York, 2005.

[12] G. Yanamashetti, H. S. Murthy, *Application of global regression method for Calibration of wind tunnel balances,* Symposium on Applied Aerodynamics and Design of Aerospace Vehicles, Bangalore, India, 2011.