

Design of Optimal Arrangement for Improving Accuracy of Tilt Measurement Unit for Wind Tunnel Balance

M. Mirzaei¹ M. Abbaszadeh² I. Hosseini³ M..H. Montazeri⁴ 

Shiraz University, Shiraz, Iran

(Received: 2024/03/02, Revised: 2024/06/05, Accepted: 2024/06/23, Published: 2024/07/22)





DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1403.13.1.7.3>

ABSTRACT

The wind tunnel is one of the most widely used equipment in the design of flight vehicles to investigate the control surface effectiveness and also, aerodynamic pre-flight behavior of these vehicles. On the other hand, one of the most essential parts of the wind tunnel is the balance tilt measurement unit, which measures the attitude of the balance and installed model with high accuracy. There are several ways to design the tilt measurement unit of wind tunnel balance. One of them is to use proper and efficient accelerometers by considering selection, and optimal installation of them in the tilt measurement unit of wind tunnel balance. These Considerations are necessary to reduce the measuring error and make the test results reliable. In this paper, firstly, the effective parameters and calibration methods will be presented. Then, several arrangement methods for installation of these accelerometers will be presented and finally, the optimal design method will be proposed.

Keywords: Wind Tunnel; Balance; Tilt Measurement Unit; Accelerometer; Calibration; Optimization

طراحی چیدمان بهینه جهت بهبود دقت واحد زاویه‌سنج بالانس تونل باد

مجتبی میرزائی^۱  محمد عباسزاده^۲  ایمان حسینی^۳  محمد حسین منتظری^۴ 

دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۳، انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱)

چکیده

تونل باد یکی از پرکاربردترین تجهیزات در زمینه طراحی وسایل پرنده است که به کمک آن رفتار آیرودینامیکی و قدرت سطوح کنترلی یک وسیله پرنده پیش از پرواز مورد بررسی قرار می‌گیرد. از طرفی یکی از ضروری‌ترین بخش‌های تونل باد، واحد زاویه‌سنج بالانس آن است که به وسیله آن تنظیم زاویه مدل و قرائت دقیق آن در هنگام تست تونل باد در هر لحظه بادقت بالا انجام می‌شود. طراحی واحد زاویه‌سنج در بالانس تونل باد، ملاحظات متعددی را در مرحله انتخاب، نصب و راه‌اندازی می‌طلبد. این اقدامات ضروری به منظور کاهش خطای اندازه‌گیری و در نتیجه قابل قبول بودن نتایج تست‌های عملی انجام می‌پذیرد. در این مقاله به بررسی و تحلیل پارامترهای مهم در طراحی بهینه زاویه‌سنج بالانس تونل باد پرداخته خواهد شد. در ابتدا پارامترهای مؤثر و روش‌های کالیبراسیون بیان و سپس چیدمان‌های متعدد نصب و استفاده از واحد زاویه‌سنج بالانس بررسی و روش بهینه طراحی چیدمان برای آن در تونل باد انتخاب خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: تونل باد، بالانس، زاویه‌سنجی، کالیبراسیون، بهینه‌سازی

۱- دانشیار: mmirzaei@shirazu.ac.ir

۲- استادیار: mabbaszadeh@shirazu.ac.ir

۳- استادیار: ihoseini@shirazu.ac.ir

۴- استادیار (نویسنده پاسخگو): montazeri@shirazu.ac.ir

فهرست علائم و اختصارات

انحراف موجود در کالیبراسیون شتابسنج	$a_{s_1 \dots s_3}$
بهره موجود در کالیبراسیون شتابسنج	$S_1 S_2 S_3$
مؤلفه‌های شتاب گرانش اندازه‌گیری شده توسط شتابسنج	$g_{s_1}, g_{s_2}, g_{s_3}$
سیستم مختصات شتابسنج	$S_1 S_2 S_3$
سیگنال ولتاژ متناظر با محورهای شتابسنج	$U_{s_1 \dots s_3}$
سیستم مختصات اینرسی	xyz

علائم یونانی

زاویه چرخش، درجه	φ
زاویه حمله، درجه	θ
زاویه محور حساس شتابسنج با محور Z_0 ، درجه	ψ

۱- مقدمه

تونل‌های باد برای بررسی رفتار یک وسیله پرنده در سرعت‌های مختلف پروازی، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. اهمیت تونل باد در استخراج و بررسی نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی هر وسیله پرنده است ([۲] و [۳]). به عبارتی دیگر طراح با استفاده از تونل باد، به صحت و بهینه بودن طراحی خود مطمئن می‌شود. اطلاعات آیرودینامیکی هر وسیله برای استفاده در طراحی سیستم کنترل وسیله پرنده حیاتی می‌باشند ([۴] و [۵]). در این میان، بالانس بخش مهمی از تونل باد است که مدل بر روی آن نصب و به وسیله آن نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی وارد بر مدل در زوایای حمله^۱ و چرخش^۲ مختلف اندازه‌گیری می‌شود [۶]. نصب و کالیبراسیون صحیح بالانس به منظور کاهش خطاهای احتمالی یکی از فعالیت‌های ضروری پیش از راه اندازی تونل باد است ([۷] و [۸]). معمولاً استفاده از واحد زاویه‌سنج بالانس با مشکلاتی مواجه است. یکی از این مشکلات، دقت پایین در اندازه‌گیری واحد زاویه‌سنج است. این مشکل باعث می‌شود که نتایج حاصل از دستگاه نیاز به اصلاح و تنظیم داشته باشند. علاوه بر این، در بعضی موارد،

اغتشاش فرکانس بالا^۳ و خطا در داده‌های اندازه‌گیری ممکن است باعث عدم صحت نتایج شود. بنابراین، طراحی یک چیدمان بهینه در این موارد ضروری است تا با استفاده از زاویه‌سنج مناسب، زاویه حمله و چرخش برای بالانس مورد استفاده اندازه‌گیری شود ([۹] و [۱۰]). برای بهبود دقت واحد زاویه‌سنج بالانس، می‌توان از راهکارهای مختلفی استفاده کرد. در ادامه به برخی از این راهکارها پرداخته خواهد شد:

- استفاده از واحد اندازه‌گیری دقیق: انتخاب واحد اندازه‌گیری بادقت بالا و قابلیت اندازه‌گیری دقیق تغییرات سرعت زاویه‌ای و شتاب بهبود قابل توجهی در دقت واحد زاویه‌سنج بالانس به همراه دارد. در اینجا می‌توان از شتاب‌سنج‌های میکروالکترومکانیکی^۴ با وضوح^۵ بالا و پایداری بالا استفاده کرد.
- استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته: انتخاب یک الگوریتم مناسب جهت پردازش داده‌ها نیز می‌تواند به بهبود دقت واحد زاویه‌سنج بالانس کمک کند. الگوریتم‌های پیشرفته مانند فیلتر کالمن^۶، فیلتر کالمن پیشینه^۷ می‌توانند از اغتشاشات محیطی و اشکالات در داده‌های اندازه‌گیری جلوگیری کنند.
- چیدمان بهینه واحدهای اندازه‌گیری: یکی از مهم‌ترین عوامل در بهبود دقت واحد زاویه‌سنج بالانس، چیدمان بهینه آنهاست. بسته به نیاز و محدودیت‌های سیستم، می‌توان از چیدمان‌های مختلفی استفاده کرد. به‌عنوان مثال، استفاده از شتاب‌سنج‌های متعدد در جهات مختلف می‌تواند به دقت واحد زاویه‌سنج کمک کند.
- کالیبراسیون منظم: کالیبراسیون منظم واحد زاویه‌سنج بالانس می‌تواند دقت آن را افزایش دهد. با انجام کالیبراسیون منظم، می‌توان داده‌های اندازه‌گیری شده را با داده‌های معتبر و دقیق مقایسه کرد و بهبودهای لازم را در نتایج اندازه‌گیری اعمال کرد [۱۱].

³ Noise⁴ MEMS⁵ Resolution⁶ Kalman filter⁷ Advanced Kalman filter¹ Angle of attack² Roll angle

روش‌های متعددی از جمله زاویه‌سنج الکترولیتی [۱۲]، ژيروسکوپ [۱۳]، روش‌های اپتیکی [۱۴]، روش‌های مبتنی بر لیزر [۱۵] و استفاده از شتاب‌سنج‌ها در طراحی یک واحد زاویه‌سنج بالانس وجود دارند. از طرفی نحوه صحیح اتصال حسگرها و کالیبراسیون آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۶]. در سال ۲۰۰۰، اون [۱۷] روش اپتیکی جدیدی را معرفی کرده و مدعی شد که بادقت $0/006$ درجه زوایای بالانس تونل باد را اندازه‌گیری می‌کند. او با این روش خطای ناشی از خم شدن بالانس تونل باد در حین تست را حذف کرد. در این روش از پرتو نورانی استفاده شده است که انحراف آن از حالت تعادل با تغییر زاویه بالانس، متناسب است. در سال ۲۰۰۲ ونگ [۱۲] رفتار سه زاویه‌سنج الکترولیتی را برای اندازه‌گیری زاویه حمله تونل باد در آزمایشگاه مورد بررسی قرار داده و بهینه‌ترین آن‌ها را انتخاب کرد. به علاوه، این زاویه‌سنج‌ها را با یک شتاب‌سنج مقایسه کرد که دقت آن‌ها یک مرتبه پایین‌تر از دقت شتاب‌سنج‌ها برآورد گردید. در نتیجه اگرچه این زاویه‌سنج‌های الکترولیتی هزینه کمتری دارند، عملکرد آن‌ها غیر قابل‌قبول بود. در سال ۲۰۰۸ روگر [۱۳]، با استفاده از یک ژيروسکوپ خاص^۱ سیستمی برای اندازه‌گیری زاویه بالانس تونل باد ارائه و عملکرد آن را مناسب ارزیابی کرد. او با استفاده از این روش علاوه بر تغییر زاویه بالانس، موفق به حذف خطای ناشی از خمیدگی بالانس از محاسبات گردید. در سال ۲۰۱۹ یانگ و همکارانش [۱۸] با طراحی فیلتر مکمل غیر خطی با استفاده از چهارگان‌ها^۲، الگوریتمی را ایجاد کردند که باعث کاهش خطای اندازه‌گیری زاویه گردید. در ابتدا با استفاده از یک سیستم کنترل PI، اغتشاشات موجود در سیستم حذف و سپس در تونل باد تست شده است. دقت اندازه‌گیری زاویه حمله و چرخش با استفاده از این روش به ترتیب در حدود $0/08$ و $0/05$ درجه محاسبه گردید.

موتورهای پایدار، کنسول بازی‌های کامپیوتری [۲۰]، گوشی‌های موبایل هوشمند [۲۱]، بررسی حرکت حیوانات [۲۲] و انسان [۲۳] تجهیزات اصلاح حرکت [24] و روش‌های مختلف هدایت و ناوبری [۲۵] و [۲۶] اشاره کرد. یکی از مهم‌ترین کاربردهای شتاب‌سنج‌ها، استفاده از آن‌ها در طراحی واحد زاویه‌سنج بالانس است. ویژگی‌هایی شامل دقت قابل‌قبول و تکرارپذیری، شتاب‌سنج‌ها را به ابزاری مناسب برای طراحی واحد زاویه‌سنج تبدیل کرده است. این حسگرها با اندازه‌گیری جهت بردار شتاب گرانش، زاویه حمله و چرخش مدل را اندازه‌گیری می‌کنند. کاربرد اندازه‌گیری زاویه با استفاده از شتاب‌سنج، فقط در شرایط ساکن یا شبه‌ساکن است. البته در شرایط شبه‌ساکن، ممکن است در فرکانس بالا و در شرایط افت دامنه، خطاهای دیگری نیز وارد محاسبات شوند [۲۷] و [۲۸]. در مراحل نصب و استفاده از شتاب‌سنج‌ها بر روی بالانس به منظور اندازه‌گیری زاویه، کالیبراسیون شتاب‌سنج از اهمیت بالایی برخوردار است [۲۹].

در این مقاله با انجام بررسی‌های لازم سعی شده است که با انتخاب یک شتاب‌سنج مناسب، واحد زاویه‌سنج بالانس بهینه برای تونل باد طراحی شود. به منظور طراحی یک واحد زاویه‌سنج بالانس بادقت و دامنه اندازه‌گیری مناسب، باید نوع شتاب‌سنج، جهت‌گیری آن و موقعیت اولیه به صورت مناسب انتخاب شوند. نتایج برآمده از تجربه نشان داده است که در هنگام ساخت، نصب محورهای واحد زاویه‌سنج بالانس نسبت به یکدیگر بعضی اوقات تا بیش از $0/1$ درجه خطا دارد که با جهت‌گیری مناسب آنها می‌توان آن محورهایی از واحد زاویه‌سنج بالانس که دارای بیشترین خطای نصب است را از محاسبات حذف کرد. یکی از راه‌حل‌های موجود به منظور طراحی واحد زاویه‌سنج بالانس، استفاده از شتاب‌سنج‌های میکروالکترومکانیکی دارای سه محور و با استفاده از فرمول‌های تانژانت است. البته در این مقاله، مواردی نیز ذکر می‌شوند که استفاده از شتاب‌سنج‌های دومحوره ممکن است کیفیت طراحی را بهبود بدهند.

¹ Gyro attitude position system

² Quaternion

۲- تئوری

برای محاسبه زوایای چرخش و حمله، می‌توان از فرمول‌های (۵) و (۶) استفاده نمود:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{-g_{s_1}}{\sqrt{g_{s_2}^2 + g_{s_3}^2}} \quad (5)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{g_{s_2}}{g_{s_3}} \quad (6)$$

که در آن $g_{s_1}, g_{s_2}, g_{s_3}$ مولفه‌های شتاب‌سنج در دستگاه مختصات بدنی هستند. از طرفی، نوع قرارگیری شتاب‌سنج برای محاسبه زوایا و همچنین وضعیت اولیه آن در دقت زاویه‌سنج اهمیت زیادی دارد [۳۰].

همان‌طور که در مقدمه ذکر شد، استفاده از شتاب‌سنج‌ها در طراحی واحد زاویه‌سنج بالانس مستلزم کالیبره کردن آنها است. در این صورت امکان اندازه‌گیری دو پارامتر مهم سیگنال آنالوگ خروجی شتاب‌سنج که شامل انحراف^۲ و بهره^۳ آن است فراهم می‌شود. جهت کالیبراسیون واحد زاویه‌سنج بالانس از روابط (۷) الی (۹) استفاده می‌شود.

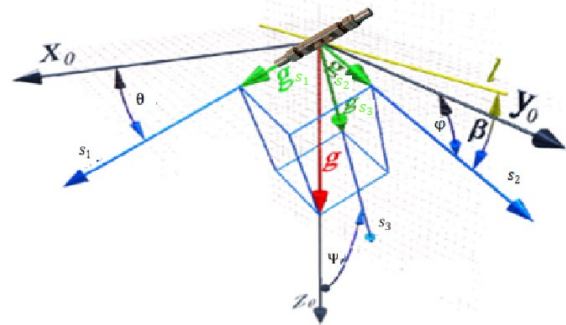
$$U_{s_1} = a_{s_1} + b_{s_1} \sin \theta \quad (7)$$

$$U_{s_2} = a_{s_2} + b_{s_2} \sin \phi \quad (8)$$

$$U_{s_3} = a_{s_3} + b_{s_3} \sin \psi \quad (9)$$

در روابط بالا $U_{s_1 \dots s_3}$ بیانگر سیگنال ولتاژ متناظر با محورهای s_1, s_2, s_3 ، $a_{s_1 \dots s_3}$ و $b_{s_1 \dots s_3}$ به ترتیب بیانگر انحراف و بهره سیگنال $U_{s_1 \dots s_3}$ می‌باشند. مراحل کالیبراسیون واحد زاویه‌سنج بالانس امکان تعیین عدم قطعیت اندازه‌گیری زوایا را فراهم می‌آورد [۳۱] و [۳۲]. در مواردی که ارتعاشات شدیدی وجود دارد، استفاده از واحد زاویه‌سنج بالانس دچار مشکل می‌شود. تاثیر این ارتعاشات

معمول‌ترین روش تعریف جهت‌گیری به این صورت است که زوایای آن طبق تعریف مفاهیم هوانوردی به صورت چرخش (φ) و تاب^۱ (θ) (یا زاویه حمله در حالتی که جریان به صورت موازی با تونل به جسم برخورد می‌کند) تعریف شوند. طبق شکل ۱، زاویه φ به عنوان زاویه چرخش در نظر گرفته می‌شود، زیرا این زاویه به صورت مستقیم توسط شتاب‌سنج به دست می‌آید. دستگاه مختصات S_1, S_2, S_3 دستگاه بدنی است که به سیستم اندازه‌گیری چسبیده و همراه آن می‌چرخد اما دستگاه مختصات X_0, Y_0, Z_0 دستگاه مختصات اینرسی و ثابت است.



شکل (۱): تعریف دستگاه‌های مختصات و زوایا بر روی واحد زاویه‌سنج بالانس

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، رابطه مابین شتاب گرانش (g) و مولفه‌های آن $(g_{s_1}, g_{s_2}, g_{s_3})$ در روابط (۱) الی (۴) نشان داده شده است.

$$g = \sqrt{g_{s_1}^2 + g_{s_2}^2 + g_{s_3}^2} \quad (1)$$

$$g_{s_1} = -g \sin \theta \quad (2)$$

$$g_{s_2} = g \cos \theta \sin \phi \quad (3)$$

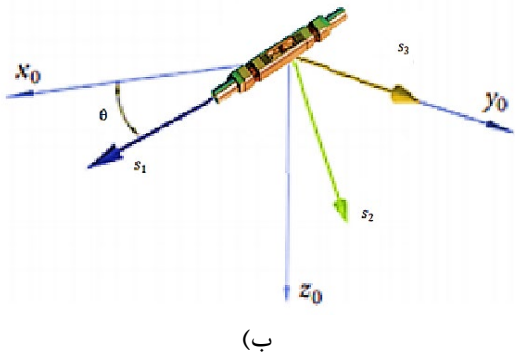
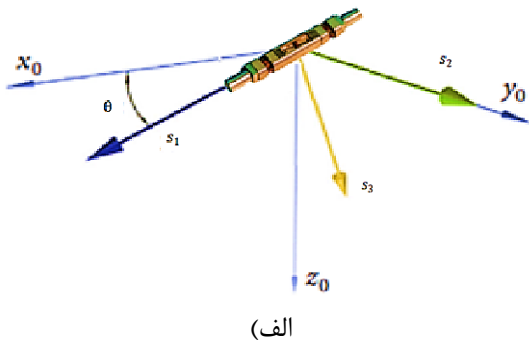
$$g_{s_3} = g \cos \theta \cos \phi \quad (4)$$

² Offset

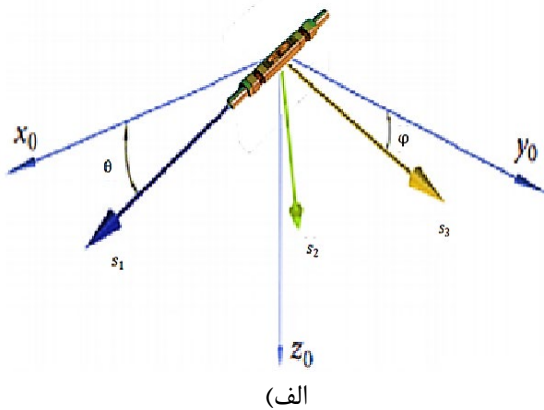
³ Gain

¹ Pitch angle

جای استفاده از چیدمان شکل ۲-الف بهتر است که از چیدمان شکل ۲-ب استفاده کنیم.



شکل (۲): الف) چیدمان شتاب‌سنج (محور دوران محور S_2 است) ب) چیدمان شتاب‌سنج (محور دوران محور S_3 است) اگر اندازه‌گیری در دو محور انجام می‌شود و زاویه حمله (θ) قرار است بادقت بالاتری اندازه‌گیری شود، بهتر است از چیدمان شکل ۳-الف استفاده شود. اگر زاویه چرخش (φ) بادقت بالاتری قرار است اندازه‌گیری شود، بهتر است از چیدمان شکل ۳-ب استفاده شود.



را می‌توان با استفاده از یک فیلتر مرتبه دو هموار بر روی اندازه‌گیری‌های انجام شده، کاهش داد.

جهت کالیبره کردن واحد زاویه‌سنج توجه شود که در حالت ساکن و بدون انحراف از افق، مجموع مقادیر شتاب اندازه‌گیری شده توسط واحد زاویه‌سنج بالانس با اندازه بردار گرانش مساوی است. همان‌طور که در روابط (۷) و (۸) نشان داده شد، به‌منظور کالیبراسیون واحد زاویه‌سنج بالانس ۶ پارامتر باید مشخص گردد که شتاب‌سنج‌ها در ۶ یا ۱۲ جهت‌گیری مختلف قرار می‌گیرند [۳۳].

در ادامه و در شکل‌های ارائه‌شده انواع حالت‌های قرارگیری واحد زاویه‌سنج بالانس و وضعیت اولیه پیشنهادی آن‌ها با توجه به تعداد محورهای حساس واحد زاویه‌سنج بیان شده است.

۳- طراحی چیدمان بهینه جهت بهبود دقت واحد زاویه‌سنج بالانس تونل باد با استفاده از سنسورهای میکروالکترومکانیکی

در هنگام استفاده از سنسورهای میکروالکترومکانیکی، مشکلاتی مانند انحراف^۱ گرمایی یا دمایی در مدت طولانی و خطای نصب زاویه^۱ سنسورها نسبت به هم به وجود می‌آیند. خطای نصب سنسورها نسبت به هم در صورتی که در مرحله ساخت اجتناب‌ناپذیر باشد، باید حتماً قبل از استفاده در آزمایشگاه و با استفاده از میزهای دقیق جبران‌سازی شود. در بعضی از انواع حسگرهای مورد استفاده در واحد زاویه‌سنج بالانس، به جز کالیبراسیونی که در کارخانه سازنده روی آن‌ها انجام می‌شود، نیاز است که یک مرحله دیگر کالیبراسیون، نیز در هنگام تست توسط کاربر انجام شود.

اگر برای اندازه‌گیری یک یا دو زاویه از یک شتاب‌سنج سه محور در واحد زاویه‌سنج بالانس استفاده شود، لازم است که ابتدا محوری که دارای بیشترین خطا و اغتشاش است شناسایی شود (در خیلی از موارد محور S_3 شتاب‌سنج دارای این ویژگی است) و در محاسبات از آن استفاده نشود. بنابراین به عنوان مثال برای اندازه‌گیری زاویه در یک محور، بهتر است که به جای استفاده از چیدمان شکل ۲-الف، از چیدمان شکل ۲-ب استفاده شود تا محور S_3 که دارای اغتشاش بیشتری است وارد محاسبات نشود. پس به‌منظور کاهش خطای نصب محورهای حساس بهتر است که به

¹ Drift

دوران بالانس تونل باد، مابین این محورهای زاویه‌ای ایجاد می‌شود که همان زاویه مورد نظر برای اندازه‌گیری است. در ادامه مجموعه روابطی ارائه خواهد شد که نتیجه نهایی آن‌ها نیز همانند روابط (۵) و (۶) است. اما با توجه به چیدمان‌های مختلف شتاب‌سنج، استفاده از برخی از روابط ارائه شده می‌تواند خطای محاسبات مربوط به چیدمان‌های مختلف را تا حد قابل قبولی کاهش دهد. اندازه‌گیری‌هایی که در تونل باد مورد نیاز است شامل زاویه‌های حمله و چرخش هستند که در روابط ارائه شده و شکل‌های موجود به ترتیب با θ و ϕ مشخص گردیده‌اند. اگر چه زاویه ψ در محاسبات مربوط به تونل باد کاربردی ندارد، در این بخش به منظور جامع بودن مباحث ارائه شده‌است. لازم به ذکر است که زاویه ψ زاویه دوران حول محور Z_0 نیست و زاویه محور حساس با محور Z_0 است. زیرا اندازه‌گیری دوران حول محور Z_0 (زاویه سمت^۱) توسط شتاب‌سنج امکان‌پذیر نیست.

$$\theta = \sin^{-1} \frac{g_{s_1}}{g} \quad (10)$$

$$\phi = \sin^{-1} \frac{g_{s_2}}{g} \quad (11)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{\sqrt{g_{s_2}^2 + g_{s_3}^2}}{g} \quad (12)$$

$$\phi = \cos^{-1} \frac{\sqrt{g_{s_1}^2 + g_{s_3}^2}}{g} \quad (13)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{g_{s_2}}{g_{s_1}} \quad (14)$$

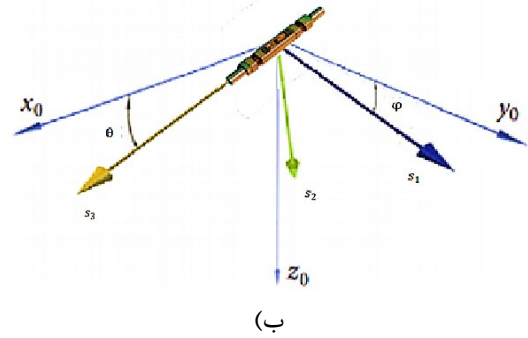
$$\theta = \cos^{-1} \frac{g_{s_3}}{g} \quad (15)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{g_{s_1}}{g_{s_3}} \quad (16)$$

$$\psi = \cos^{-1} \frac{g_{s_3}}{g} \quad (17)$$

$$\psi = \sin^{-1} \frac{\sqrt{g_{s_1}^2 + g_{s_2}^2}}{g} \quad (18)$$

$$\psi = \tan^{-1} \frac{\sqrt{g_{s_1}^2 + g_{s_2}^2}}{g_{s_3}} \quad (19)$$



شکل (۳): الف) چیدمان شتاب‌سنج در واحد زاویه‌سنج بالانس (اندازه‌گیری زاویه θ توسط محور S_1 باعث افزایش دقت اندازه‌گیری این زاویه می‌شود). ب) چیدمان شتاب‌سنج در واحد زاویه‌سنج بالانس (اندازه‌گیری زاویه θ توسط محور S_3 باعث کاهش دقت اندازه‌گیری این زاویه می‌شود.)

در صورت استفاده از شتاب‌سنج مناسب و چیدمان مناسب می‌توان به دقت زیر یک دهم درجه در اندازه‌گیری زاویه دست یافت. برای انتخاب بهترین چیدمان شتاب‌سنج‌ها در واحد زاویه‌سنج بالانس، علاوه بر موارد گفته شده، لازم است که بین چیدمان‌های مختلف، سعی و خطا انجام شود. روش‌های مختلف نصب شتاب‌سنج‌ها بر روی بالانس تونل باد در شکل‌های زیر نشان داده شده‌است که این روش‌ها به تعداد محورهای شتاب‌سنج وابسته است. لازم به ذکر است که برای اندازه‌گیری زاویه در بازه‌ی کامل بین صفر تا ۳۶۰ درجه، علامت بردار شتاب باید مورد بررسی قرار بگیرد. در صورتی که زاویه در محدوده بین ۹۰- تا ۹۰+ قرار داشته‌باشد، علامت بردار شتاب مثبت و در غیر اینصورت علامت منفی خواهد بود. برای اندازه‌گیری زاویه در این حالت، شتاب‌سنج باید دارای دو محور باشد [۳۰]. شتاب‌سنج‌ها از نظر تعداد محورهای حساس به دسته‌های تک محوره، دو محوره، سه محوره و چند محوره تقسیم می‌شوند. در شکل‌هایی که در ادامه از نحوه چیدمان شتاب‌سنج‌ها نشان داده شده‌است، محورهای حساس با S_1 ، S_2 ، S_3 و S_4 مشخص شده‌اند. محورهای X_0 ، Y_0 و Z_0 دستگاه مختصات اینرسی را تشکیل می‌دهند و زاویه مابین محورهای حساس شتاب‌سنج (S_1 ، S_2 ، S_3 و S_4) و این محورها زاویه حمله و چرخش نامیده می‌شود. به عبارت دیگر زاویه مابین یکی از محورهای حساس شتاب‌سنج و محور X زاویه حمله و زاویه مابین یکی از محورهای حساس شتاب‌سنج و محور Y_0 زاویه چرخش نامیده می‌شود. در بسیاری از چیدمان‌های شتاب‌سنج‌ها، محورهای حساس در حالت اولیه بر محورهای دستگاه مختصات اینرسی منطبق است و پس از

^۱ Yaw angle

جدول (۲): رابطه موقعیت اولیه شتاب‌سنج با

چیدمان‌های مختلف

شماره چیدمان	موقعیت اولیه شتاب‌سنج
شکل ۴-الف	$S_1 \parallel X_0$
شکل ۴-ب	$S_1 \parallel Z_0$
شکل ۵-الف	$S_1 \parallel X_0 \quad S_2 \parallel Z_0$
شکل ۵-ب	$S_1 \parallel X_0 \quad S_2 \parallel Y_0$
شکل ۶-الف	$S_1 \parallel X_0 \quad S_2 \parallel Z_0$
شکل ۶-ب	$S_1 \parallel Y_0 \quad S_2 \parallel Z_0$
شکل ۷-الف	$S_1 \parallel X_0 \quad S_2 \parallel Y_0 \quad S_3 \parallel Z_0$
شکل ۷-ب	$S_1 \parallel X_0 \quad S_2 \parallel Y_0 \quad S_3 \parallel Z_0$
شکل ۸-الف	$S_1 \parallel X_0 \quad S_2 \parallel Z_0 \quad S_3 \parallel Y_0$
شکل ۸-ب	$S_1 \parallel X_0 \quad S_2 \parallel Z_0 \quad S_3 \parallel Y_0$
شکل ۹-الف	$S_1 \nparallel X_0 \quad S_2 \nparallel Y_0 \quad S_3 \parallel Z_0$
شکل ۹-ب	$S_1 \parallel Z_0 \quad S_2 \parallel Y_0 \quad S_3 \parallel X_0$
شکل ۱۰-الف	$\angle S_2 Y_0 = \angle S_1 X_0 = 35/3$
شکل ۱۰-ب	$\angle S_2 Y_0 = \angle S_1 X_0 = 35/3$
شکل ۱۱	$\angle S_2 Z_0 = \angle S_1 Z_0 = 54/7$ $S_1 \notin X_0 Z_0 \quad S_2 \notin Y_0 Z_0$

در ادامه مواردی، در مورد چیدمان‌های بیان شده ذکر خواهد شد:

- ۱- چیدمان‌های شکل‌های ۴-الف، ۵-الف، ۵-ب و ۷-الف بسیار شناخته شده هستند و استفاده از آن‌ها رایج است.
- ۲- چیدمان شکل ۴-ب یک روش رایج برای اندازه‌گیری زاویه با استفاده از شتاب‌سنج تک محوره در واحد زاویه‌سنج بالانس است.
- ۳- چیدمان‌های شکل‌های ۶-الف و ۶-ب برای اندازه‌گیری بازه کامل دو زاویه تنها با استفاده از دو محور حساس کاربرد دارند. تفاوت این دو در این است که چیدمان شکل ۶-الف برای اندازه‌گیری حول زاویه $\theta = 0$ و $\phi = 90$ و چیدمان شکل ۶-ب برای اندازه‌گیری حول زاویه $\theta = 90$ و $\phi = 0$ مناسب‌تر می‌باشند.
- ۴- در صورت نیاز به دقت اندازه‌گیری بالای زوایا، استفاده از چیدمان‌های شکل‌های ۷-الف و ۸-الف توصیه نمی‌شود.

توضیحات مربوط به پارامترهای معرفی شده در روابط بالا در شکل‌های ۴ الی ۱۱ به صورت شماتیک بیان شده است. چیدمان‌های ارائه شده در این شکل‌ها، روش‌های متعدد نصب این شتاب‌سنج‌ها در واحد زاویه‌سنج بر روی بالانس تونل باد است. در جدول ۲ چیدمان‌ها ارائه شده و بهترین رابطه مربوط به آن چیدمان مشخص گردیده است.

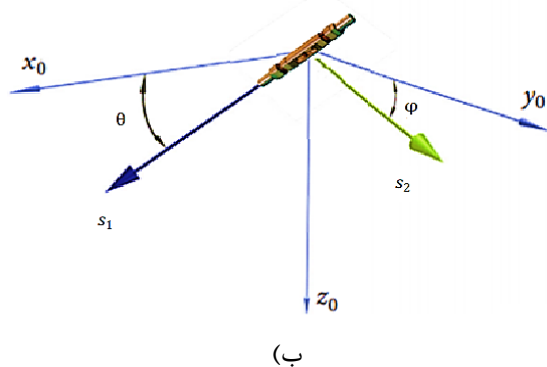
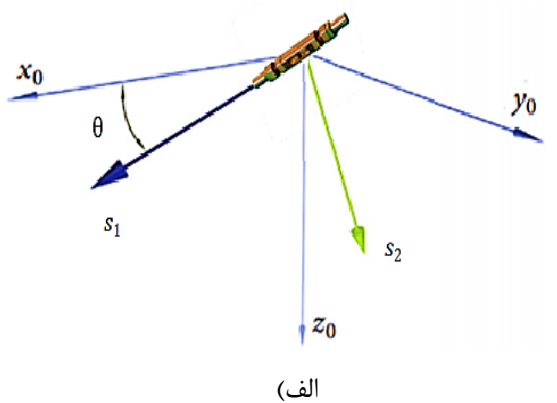
جدول (۱): روابط محاسبه زوایا مرتبط با چیدمان‌های

مختلف

شماره چیدمان	شماره رابطه بهینه جهت محاسبه زوایا
شکل ۴-الف	θ : رابطه (۱۰)
شکل ۴-ب	ψ : رابطه (۱۷)
شکل ۵-الف	θ : روابط (۱۶)، (۱۵) و (۱۰)
شکل ۵-ب	θ : رابطه (۱۰) ϕ : رابطه (۱۱)
شکل ۶-الف	θ : رابطه (۱۰) ϕ : رابطه (۱۳)
شکل ۶-ب	θ : رابطه (۱۲) ϕ : روابط (۱۴) و (۱۱)
شکل ۷-الف	θ : روابط (۱۶)، (۱۵) و (۱۰)
شکل ۷-ب	θ : روابط (۵)، (۱۲) و (۱۰) ϕ : روابط (۱۴)، (۶)، (۱۳) و (۱۱)
شکل ۸-الف	θ : روابط (۱۶)، (۱۵) و (۱۰)
شکل ۸-ب	θ : روابط (۵)، (۱۲) و (۱۰) ϕ : روابط (۱۴)، (۶)، (۱۳) و (۱۱)
شکل ۹-الف	θ : روابط (۲۰)، (۱۸) و (۱۷)
شکل ۹-ب	θ : روابط (۵)، (۱۲) و (۱۰) ϕ : روابط (۱۴)، (۶)، (۱۳) و (۱۱)
شکل ۱۰-الف	θ : روابط (۱۶)، (۱۵) و (۱۰)
شکل ۱۰-ب	θ : روابط (۵)، (۱۲) و (۱۰) ϕ : روابط (۱۴)، (۶)، (۱۳) و (۱۱)
شکل ۱۱	θ : روابط (۱۹)، (۱۸) و (۱۷)

در جدول ۲ توضیحات تکمیلی در مورد نحوه قرارگیری این شتاب‌سنج‌ها ارائه گردیده است. در جدول علامت \parallel نشان دهنده انطباق دو محور بر یکدیگر و علامت \nparallel نشان دهنده عدم انطباق دو محور در لحظه نصب شتاب‌سنج در واحد زاویه‌سنج بالانس است.

اندازه‌گیری می‌شوند. از طرفی در شکل ۵-الف، موقعیت اولیه محور حساس S_2 منطبق بر محور Z_0 بوده است. اما در شکل ۵-ب موقعیت اولیه محور حساس S_2 منطبق بر محور Y_0 می‌باشد که این موضوع قابلیت اندازه‌گیری زاویه چرخش توسط شتاب‌سنج را فراهم می‌کند.



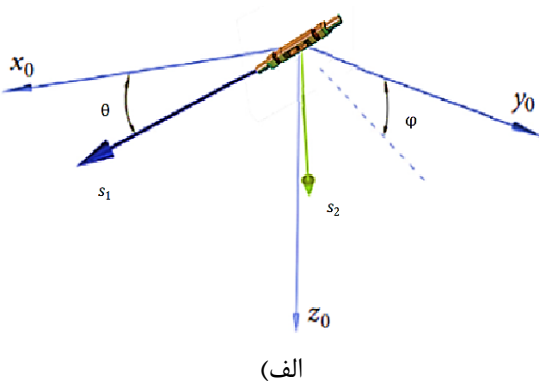
شکل (۵): (الف) شتاب‌سنج دو محوره در واحد زاویه‌سنج

بالانس با بازه اندازه‌گیری $\theta = \langle 0^\circ, +180^\circ \rangle$ (ب)

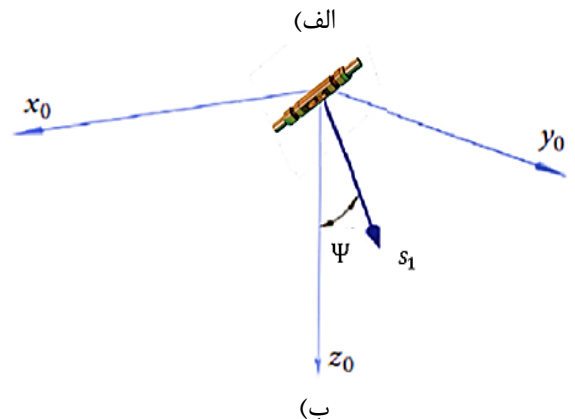
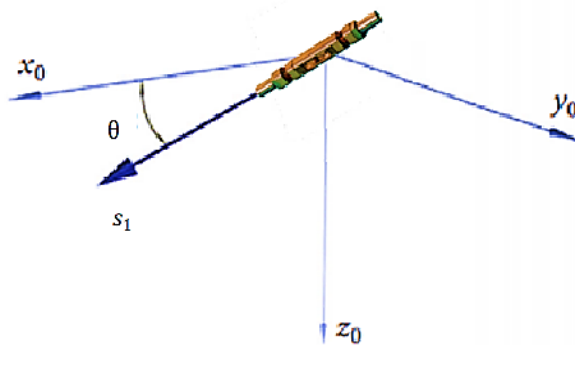
شتاب‌سنج دو محوره با بازه اندازه‌گیری

$$\theta = \langle -90^\circ, +90^\circ \rangle \text{ و}$$

$$\varphi = \langle -90^\circ, +90^\circ \rangle$$



چیدمان‌های موجود در شکل‌های ۴-الف و ۴-ب، شتاب‌سنج‌های تک محوره را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که در استفاده از شتاب‌سنج‌های تک محوره، نحوه قرارگیری محور حساس، به زاویه‌ای که نیاز به اندازه‌گیری دارد وابسته است. در شکل ۴-الف هدف اندازه‌گیری زاویه حمله بالانس و در شکل ۴-ب هدف اندازه‌گیری زاویه چرخش بالانس بوده است.



شکل (۴): چیدمان‌های شتاب‌سنج تک محوره در واحد

زاویه‌سنج بالانس (الف) شتاب‌سنج تک محوره با بازه

اندازه‌گیری $\theta = \langle -90^\circ, +90^\circ \rangle$ (ب) شتاب‌سنج تک

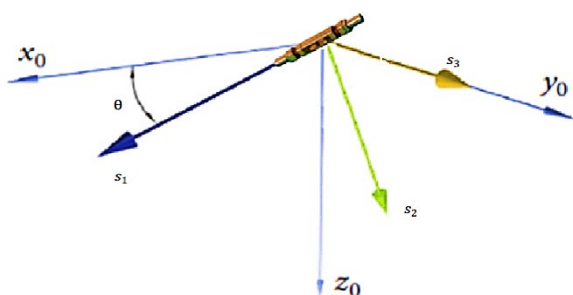
محوره با بازه اندازه‌گیری $\psi = \langle 0^\circ, +180^\circ \rangle$

در ادامه و در شکل‌های ۵ و ۶ شتاب‌سنج‌های دو محوره در واحد زاویه‌سنج بالانس نشان داده شده است. در صورت نحوه اتصال مناسب این شتاب‌سنج‌ها توانایی اندازه‌گیری دو زاویه را به صورت همزمان دارند. بازه‌ی اندازه‌گیری زوایا توسط این شتاب‌سنج‌ها به نحوه اتصال آن‌ها وابسته است.

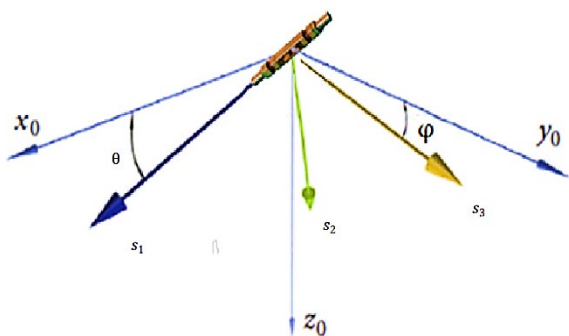
شکل‌های ۵-الف و ۵-ب اگرچه شبیه یکدیگر هستند اما تفاوت‌هایی با یکدیگر دارند که عملکرد آن‌ها را متفاوت می‌کند. در شکل ۵-الف هدف اندازه‌گیری زاویه حمله بوده و در شکل ۵-ب دو زاویه حمله و چرخش به صورت همزمان

شکل (۷): الف) شتاب‌سنج سه محوره در واحد زاویه‌سنج بالانس با بازه اندازه‌گیری $\theta = \langle 0^\circ, +180^\circ \rangle$ (ب) شتاب‌سنج سه محوره با بازه اندازه‌گیری $\theta = \langle 0^\circ, +180^\circ \rangle$ و $\varphi = \langle 0^\circ, +360^\circ \rangle$

چیدمان‌های شکل ۹-الف و ۹-ب این امکان را فراهم می‌کنند که در زمانی که قرار است یک زاویه اندازه‌گیری شود، از تمامی محورهای حساس^۱ استفاده شود که می‌تواند اندکی دقت را افزایش دهد. البته برای استفاده از این دو چیدمان باید خطای زاویه‌ی نصب محورهای مختصات نسبت به هم از ۰/۰۵ درجه کمتر شود. (در هنگام ساخت شتاب‌سنج، محورها با این دقت نصب شوند و یا به صورت عددی، جبران سازی انجام شود). در غیر این صورت، اگر خطای نصب از ۰/۰۵ بیشتر شود، ممکن است این چیدمان‌ها نه تنها باعث افزایش دقت نشوند، بلکه دقت را کاهش دهند.

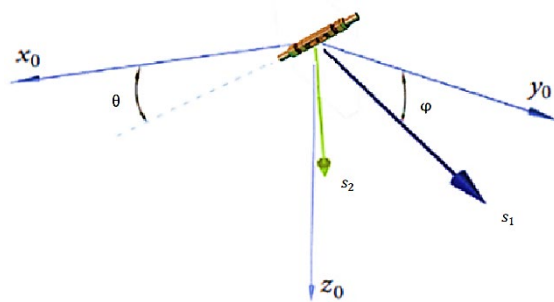


الف)



ب)

شکل (۸): الف) شتاب‌سنج سه محوره در واحد زاویه‌سنج بالانس با بازه اندازه‌گیری $\theta = \langle 0^\circ, +180^\circ \rangle$ (ب) شتاب‌سنج سه محوره با بازه اندازه‌گیری $\theta = \langle 0^\circ, +180^\circ \rangle$ و $\varphi = \langle 0^\circ, +360^\circ \rangle$



ب)

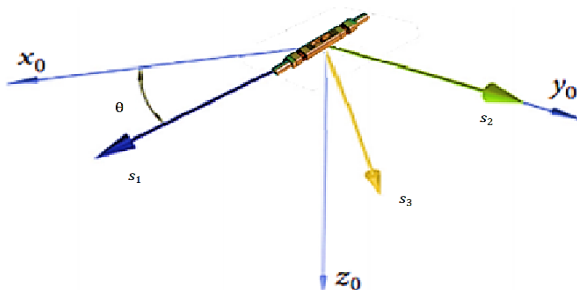
شکل (۶): الف) شتاب‌سنج دو محوره در واحد زاویه‌سنج

بالانس با بازه اندازه‌گیری $\theta = \langle 0^\circ, +180^\circ \rangle$

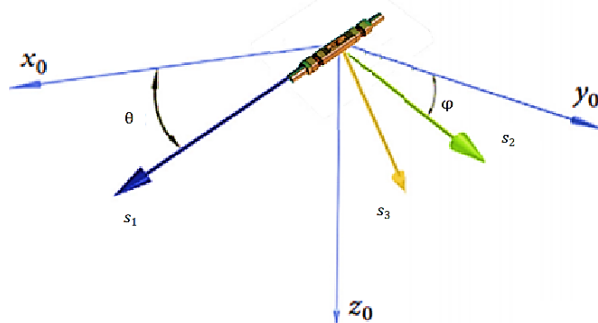
ب) شتاب‌سنج دو محوره با بازه

اندازه‌گیری $\theta = \langle 0^\circ, +180^\circ \rangle$ و $\psi = \langle 0^\circ, +360^\circ \rangle$

اگر برای افزایش سرعت یا کاهش محاسبات، لازم باشد تعداد محورهای حساس شتاب‌سنج در واحد زاویه‌سنج بالانس، کمتر شود، چیدمان‌های شکل‌های ۶-الف و ۶-ب می‌توانند مناسب باشند. در ادامه و در شکل‌های ۷ الی ۹ شتاب‌سنج‌های سه محوره نشان داده شده است.

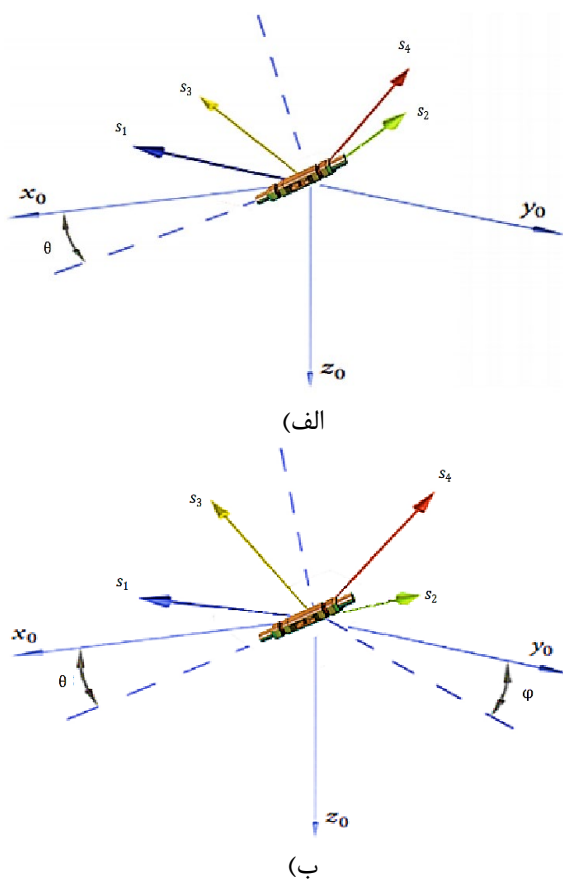


الف)



ب)

^۱ Sensitive axis

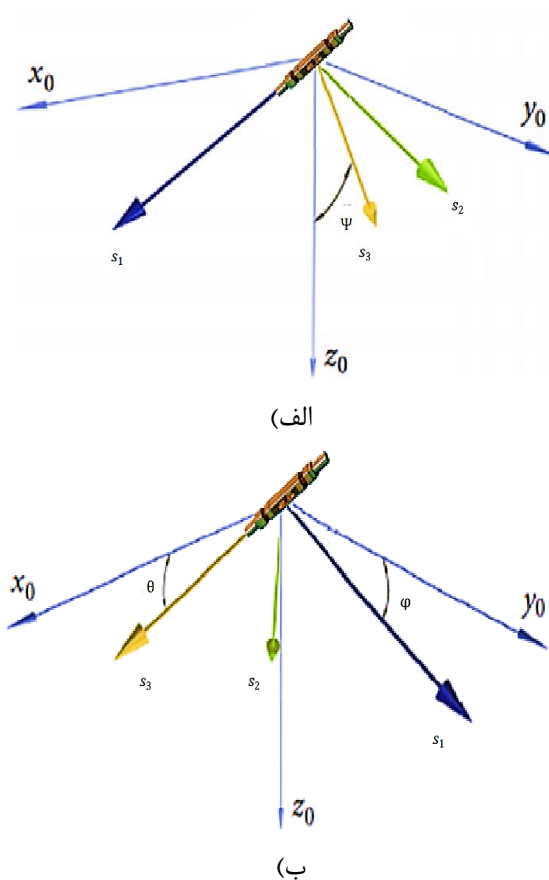


شکل (۱۰): الف- شتابسنج چند محوره در واحد زاویهسنج

بالانس با بازه اندازه‌گیری $\theta = \langle 0^\circ, +180^\circ \rangle$ ب-

شتابسنج چند محوره با بازه اندازه‌گیری

$$\theta = \langle 0^\circ, +180^\circ \rangle \quad \text{و} \quad \varphi = \langle 0^\circ, +360^\circ \rangle$$

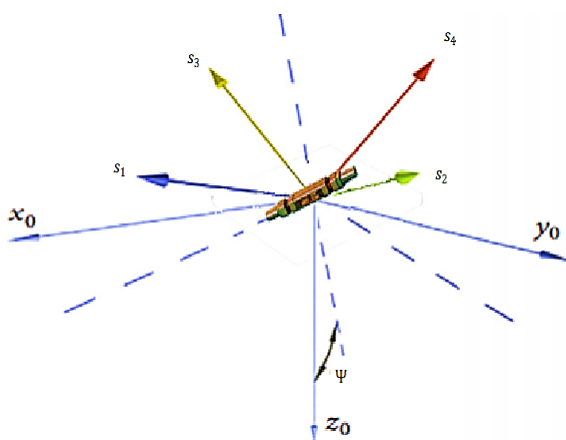


شکل (۹): الف) شتابسنج سه محوره در واحد زاویهسنج

بالانس با بازه اندازه‌گیری $\psi = \langle 0^\circ, +360^\circ \rangle$ ب)

شتابسنج سه محوره با بازه اندازه‌گیری

$$\theta = \langle 0^\circ, +180^\circ \rangle \quad \text{و} \quad \varphi = \langle 0^\circ, +360^\circ \rangle$$



شکل (۱۱): شتابسنج چند محوره در واحد زاویهسنج

بالانس با بازه اندازه‌گیری $\psi = \langle 0^\circ, +360^\circ \rangle$

از شتابسنج‌های چند محوره، موجود در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ برای افزایش دقت اندازه‌گیری زاویه تا ۱۳٪ استفاده می‌شود. این افزایش دقت نتیجه اطلاعات اضافی است که توسط محور چهارم شتابسنج در اختیار کاربر قرار می‌گیرد. از آنجایی که نحوه ساخت و مواد استفاده شده برای تمامی محورهای حساس شتابسنج چند محوره یکسان است، می‌توان عدم قطعیت هریک از این محورها را به صورت تقریبی یکسان دانست. با استفاده از این فرضیه می‌توان عدم قطعیت محورهای اندازه‌گیری شتابسنج را تعیین و با استفاده از آن دقت اندازه‌گیری را افزایش داد [۳۴].

بادقت اندازه‌گیری بالا مدنظر باشد، محور حساس باید افقی باشد. اگر اندازه‌گیری زاویه‌ای بزرگ (بزرگتر از ۴۵ درجه) مدنظر باشد، محور حساس باید عمودی باشد.

زمانی که از دو محور حساس برای اندازه‌گیری زاویه استفاده می‌شود، اگر یک زاویه برای اندازه‌گیری وجود داشته باشد، یک محور حساس باید افقی و دیگری باید عمودی باشد و زمانی که دو زاویه برای اندازه‌گیری وجود داشته باشد، هر دو محور حساس باید افقی باشند.

از طرفی شتاب‌سنجی برای ساخت واحد زاویه‌سنج بالانس مناسب‌تر است که ولتاژ تغذیهٔ مربوط به آن پایدارتر باشد. یکی دیگر از معیارهای انتخاب واحد زاویه‌سنج بالانس این است که پهنای باند^۲ آن کمتر باشد که باعث می‌شود اغتشاش اندازه‌گیری^۳ کمتر شود [۳۶]. در جدول ۳ خصوصیات شتاب‌سنج مناسب برای ساخت واحد زاویه‌سنج بالانس تونل باد آورده شده‌است:

جدول (۳): مشخصات شتاب‌سنج مناسب برای طراحی

زاویه‌سنج بالانس تونل باد

دامنهٔ کاری	g۲
پایداری بایاس	$g۲ \leq$
خطی بودن	استاندارد (در محدوده زاویه ۳۰ درجه)
آستانهٔ تحمل شوک محیطی	g ۲۰۰۰
اندازهٔ سنسور	جهت استفاده در بالانس باید بادقت بالا انتخاب شود
	باید بادقت و پایداری بالا تأمین شود

در ادامه سعی شده است تا انواع مختلف شتاب‌سنج با هم مقایسه و شتاب‌سنج مناسب جهت واحد زاویه‌سنج بالانس تونل باد پیشنهاد شود.

در صورت استفاده از دو شتاب‌سنج دومحوره از نوع میکروالکترومکانیکی^۴ از نوع ADXL202E ([۳۵] و [۳۷]) با استفاده از روابط (۱) و (۲)، در اندازه‌گیری زاویه بین ۰ تا ۹۰ درجه، خطا از ۰/۱۸ درجه، بیشتر نخواهد شد. می‌توان از شتاب‌سنج شرکت ADIS 16201 و Analog Device برای ساخت واحد زاویه‌سنج بالانس استفاده کرد که در ساخت آن تلاش شده که مشکل انحراف گرمایی و سایر مشکلات

۴- بررسی نتایج تجربی در واحد زاویه‌سنج بالانس

تونل باد

به‌طور کلی می‌توان گفت که برای انتخاب واحد زاویه‌سنج بالانس مناسب بهتر است که دامنهٔ اندازه‌گیری آن واحد زاویه‌سنج کمتر باشد تا دقت اندازه‌گیری و وضوح آن افزایش یابد. همچنین برای انتخاب واحد زاویه‌سنج مناسب، ولتاژ موردنیاز شتاب‌سنج، پایداری گرمایی سنسورها و انحراف^۱ آنها از موارد دیگری هستند که باید در نظر گرفته شوند.

واحد زاویه‌سنج بالانس دارای شتاب‌سنج‌هایی می‌باشد که می‌توانند تک‌محوره، دومحوره، سه محور و چند محور باشند. استفاده از شتاب‌سنج‌های چند محور (بیشتر از سه محور) برای ساخت واحد زاویه‌سنج بالانس می‌تواند دقت آن‌ها را تا ۱۳٪ افزایش دهد [۳۰]. در صورت به‌کاربردن روش صحیح برای اندازه‌گیری زاویه، افزایش تعداد محورهای حساس می‌تواند موجب افزایش دقت شود. محورهای شتاب‌سنج ممکن است در حالت‌هایی (مثلاً در شتاب‌سنج‌های دارای چند محور) بر هم عمود نباشند. انتخاب تعداد محورهای شتاب‌سنج برای ساخت واحد زاویه‌سنج بالانس به دامنهٔ اندازه‌گیری مطلوب زاویه‌سنج، نوع زاویه‌سنج و الگوریتم به کار رفته برای به دست آوردن زاویه‌ها بستگی دارد. همان‌طور که قبلاً گفته شد، افزایش تعداد محورهای حساس شتاب‌سنج می‌تواند باعث افزایش دقت اندازه‌گیری شود اما به جای استفاده از شتاب‌سنج سه محوره با سه محور حساس، استفاده از دو شتاب‌سنج دو محوره با دو محور حساس با وجود افزایش هزینه، می‌تواند دقت بیشتری داشته‌باشد، زیرا در بعضی موارد دقت نصب محور سوم شتاب‌سنج‌های سه محوره زیاد نمی‌باشد و اغتشاش اندازه‌گیری شتاب در راستای محور سوم بیشتر است که این امر باعث افزایش خطای اندازه‌گیری زاویه می‌شود.

در مواردی که اندازه‌گیری یک زاویه مدنظر است؛ ولی از چند محور حساس استفاده شده است، به‌منظور افزایش دقت اندازه‌گیری، هیچ یک از محورهای حساس نباید با محور زاویه موردنظر هم‌پوشانی داشته باشند [۳۵]. اگر استفاده از یک محور حساس برای اندازه‌گیری زاویه کافی باشد و زاویه ای کوچک

^۲ Bandwidth

^۳ Noise

^۴ MEMS

^۱ Bias

معمولاً فرکانس 100Hz فرکانس کاری مناسب برای اکثر خلبان‌های خودکار^۱ اجسام پرنده می‌باشد.

جدول (۵): میزان حساسیت اندازه‌گیری شده

ولتاژ تغذیه (V)	محدوده شوک	حساسیت $\frac{mV}{g}$	سنسور
۱۵	g۵۰۰۰	۲۰۰	7290 A -10
۵	g۱۰۰۰	۱۰۰	ADXL210A
۵	g۲۰۰۰	۴۰۰	SD2012-10
۵	بالا	۲۵۰	M1220D

جدول (۶): میزان خطی بودن رفتار شتاب‌سنج

حداکثر غیرخطی بودن (%)	حساسیت منفی $\frac{mV}{g}$	حساسیت مثبت $\frac{mV}{g}$	محدوده اندازه‌گیری	سنسور
۰/۲۵۱	۱۹۸/۲	۱۹۸/۶	g۱۹/۴	7290 A -10
۰/۴۴۱	۱۱۰/۴	۱۰۹/۸	g۱۷/۸	ADXL210A
۰/۵۳۱	۳۹۵/۳	۳۹۱/۱	g۱۳/۳	SD2012 -10
۰/۶۹۴	۲۵۲/۳	۲۴۸/۸	g۱۰/۸	M1220 D

در جدول ۶، دامنه کاری اندازه‌گیری شده‌ی شتاب‌سنج‌ها و خطی بودن رفتار آن‌ها با هم مقایسه شده‌است. همچنین در این جدول، میزان حساسیت شتاب‌سنج‌ها نسبت به شتاب در جهت مثبت و منفی با هم مقایسه شده‌اند. هر چه تفاوت حساسیت شتاب‌سنج در جهت مثبت و منفی بیشتر باشد، احتمالاً رفتار شتاب‌سنج در حرکت‌هایی که ممکن است علامت شتاب در آن‌ها عوض شود، بحرانی‌تر است.

با بررسی جداول ۴ الی ۶، این نتیجه به دست آمده است که شتاب‌سنج‌های ADXL210 و Endeveco7290A به علت پروسه‌ی تولید مناسب و هندسه‌ی متقارن، رفتارشان خطی‌تر است و در مقابل شتاب‌های جهت‌های مختلف رفتار متقارن‌تری دارند.

شتاب‌سنج SD2012 به علت وجود دو الکتروود متقارن در ساختار آن، حساسیت محورهای^۲ کمتری دارد. تغییرات حساسیت این شتاب‌سنج با تغییر دما، به علت وجود نیکل

شتاب‌سنج‌های میکرو الکترومکانیکی تا حد امکان برطرف شود و برای ساخت زاویه‌سنج مناسب است. همچنین در ساخت شتاب‌سنج SCA100T مربوط به Murata Electronics نیز تلاش شده‌است تا مشکلات شتاب‌سنج‌های میکرو الکترومکانیکی تا حد امکان جبران‌سازی شود و برای ساخت زاویه‌سنج مناسب می‌باشد.

اگر در ساخت واحد زاویه‌سنج بالانس از شتاب‌سنج‌های ADXL 327 , ADXL 330 استفاده کنیم ممکن است خطای نصب بین محورهای مختلف بین ۰/۰۵ تا ۱ درجه باشد [30]. این خطای نصب زاویه‌ی بین محورهای شتاب‌سنج باید به صورت عددی در آزمایشگاه جبران‌سازی شود تا خطای اندازه‌گیری زاویه تا حد امکان کاهش یابد. جبران‌سازی خطای نصب همراه با استفاده از چیدمان مناسب شتاب‌سنج می‌تواند خطای اندازه‌گیری زاویه را تا ۱ درجه کاهش دهد. در جدول ۴، چهار نوع شتاب‌سنج آزمایش شده و نتایج آن‌ها با هم مقایسه شده‌است. محدوده شتاب، محدوده شوک و محدوده دمایی عملکرد از موارد مهم یک شتاب‌سنج هستند که می‌بایست برای ساخت یک زاویه‌سنج مورد توجه قرار گیرند.

جدول (۴): ویژگی‌های شتاب‌سنج‌ها

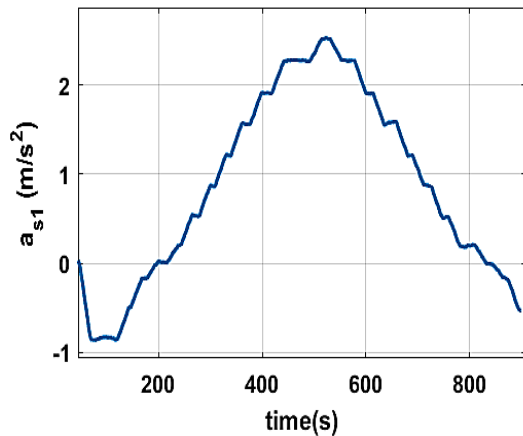
شرکت سازنده	سنسور	محدوده شتاب	محدوده شوک	محدوده دمایی (C)
اندوکو (Endevco)	7290 A -10	g۱۰	g۵۰۰۰	-۵۵+۱۲۱
آنالوگ دیوایس (Analog Devices)	ADXL210 A	g۱۰	g۲۰۰۰	-۴۰+۸۵
سیلیکون دیزاین (Silicon Design)	SD2012-10	g۱۰	g۲۰۰۰	-۴۰+۸۵
موتورولا (Motorola)	M1220D	g۸	بالا	-۴۰+۸۵

در جدول ۵، میزان حساسیت اندازه‌گیری شده‌ی شتاب‌سنج‌ها با هم مقایسه شده‌است. همچنین در این جدول، میزان تغییر حساسیت شتاب‌سنج‌ها در فرکانس 100Hz مقایسه شده‌است.

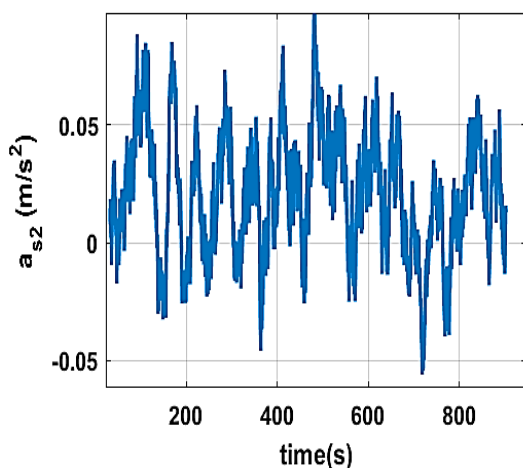
¹ Autopilot

² Cross axis sensitivities

که مشاهده می‌شود مقدار اندازه‌گیری شده در حدود صفر متر بر مجذور ثانیه متغیر است.



(الف)



(ب)

شکل (۱۳): الف) نتایج اندازه‌گیری شتاب توسط محور s_1 واحد زاویه‌سنج بالانس در ماخ 0.3 ، ب) نتایج اندازه‌گیری شتاب توسط محور s_2 واحد زاویه‌سنج بالانس در ماخ 0.3 شکل ۱۳-ب نتایج اندازه‌گیری شتاب توسط محور s_2 واحد زاویه‌سنج بالانس را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است مقدار اندازه‌گیری شده از 1 تا 3 متر بر مجذور ثانیه متغیر است. در شکل ۱۴ نتایج اندازه‌گیری شتاب توسط محور s_3 واحد زاویه‌سنج بالانس ارائه شده است. همانطور که در شکل مشخص است، مقدار اندازه‌گیری شده در حدود $9/8$ متر بر مجذور ثانیه است.

در ساختار آن (مدول یانگ نیکل با تغییر دما، عوض می‌شود) زیاد است. شتاب‌سنج Endevo7290A دارای بالاترین دامنه اندازه‌گیری شتاب است، باین وجود دارای بیشترین وضوح و کمترین سطح اغتشاش است. در ادامه، نتایج تجربی یک واحد زاویه‌سنج بالانس پس از کالیبراسیون به‌عنوان نمونه ارائه شده است. این واحد زاویه‌سنج دارای واحد زاویه‌سنج شرکت Analogue Device است.



(الف)



(ب)

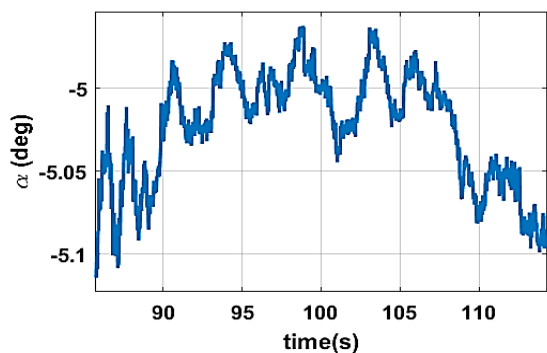
شکل (۱۲): الف) واحد اندازه‌گیری سنسور شرکت

Analogue Device قبل از نصب بر روی بالانس، ب) بالانس تونل باد دانشگاه شیراز و مدل نصب شده بر روی آن

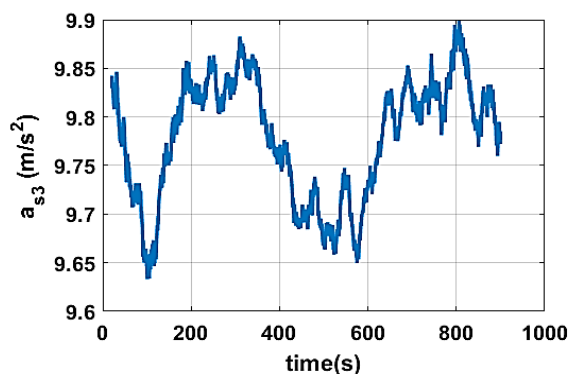
در شکل ۱۲ سنسور و بالانس تونل باد و مدل نصب شده بر روی آن در دانشگاه شیراز در ماخ 0.3 تا 0.7 به صورت نمونه نشان داده شده است. در این آزمایش، سعی شده است تا به کمک این سنسور یا سنسور دیگر از نوع میکروالکترومکانیکی در حالی که زاویه چرخش تقریباً صفر نگه داشته شده است، زاویه حمله از 5 تا 15 درجه تغییر داده شود. زمان آزمایش حدود 2000 ثانیه طول کشیده است.

در شکل ۱۳-الف نتایج اندازه‌گیری شتاب توسط محور s_1 واحد زاویه‌سنج بالانس نشان داده شده است. همانطور

¹ X body coordinate system



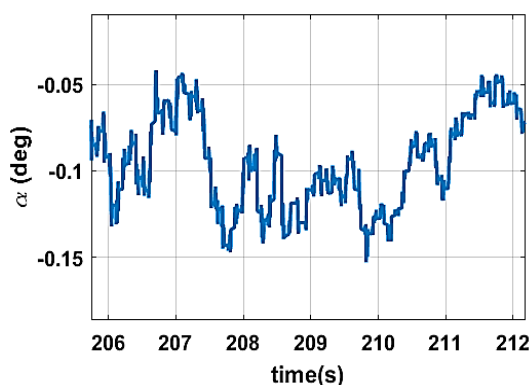
(الف)



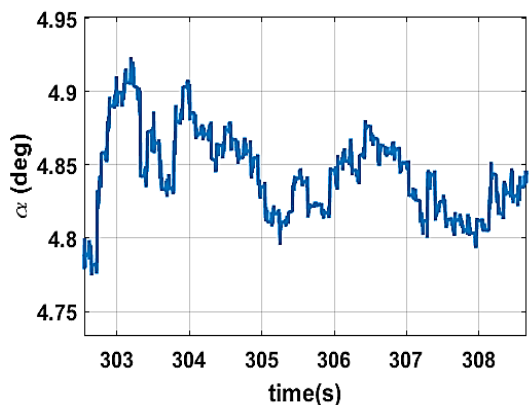
شکل (۱۴): نتایج اندازه گیری شتاب توسط محور s_3

شتاب سنج در ماخ ۰/۳

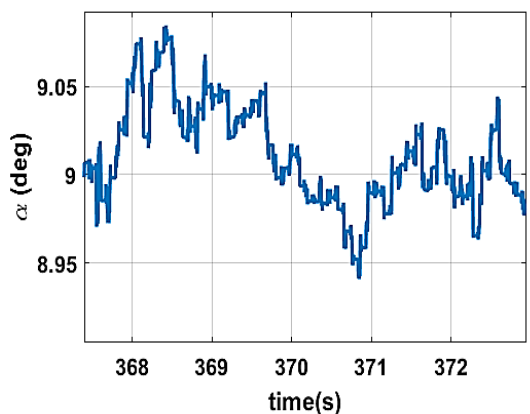
در شکل ۱۵-الف نتایج اندازه‌گیری زاویه چرخش بر حسب زمان نشان داده شده است. مقدار زاویه اندازه‌گیری شده در حدود صفر درجه است. در شکل ۱۵-ب نتایج اندازه‌گیری زاویه حمله بر حسب زمان نشان داده شده است. مقدار زاویه اندازه‌گیری شده در ماخ ۰/۳ از زاویه ۵- تا ۱۵درجه است. در شکل ۱۶ تصویر بزرگنمایی شده از زوایای مختلف حمله مشاهده می‌شود.



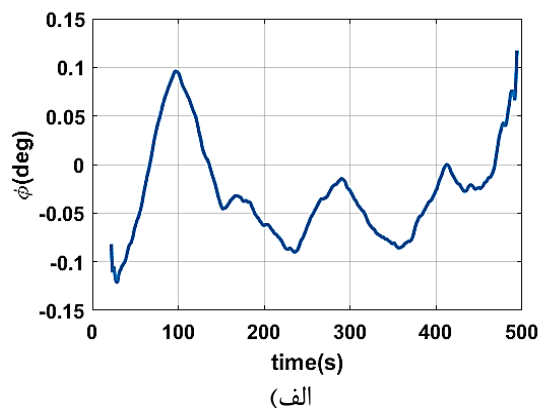
(ب)



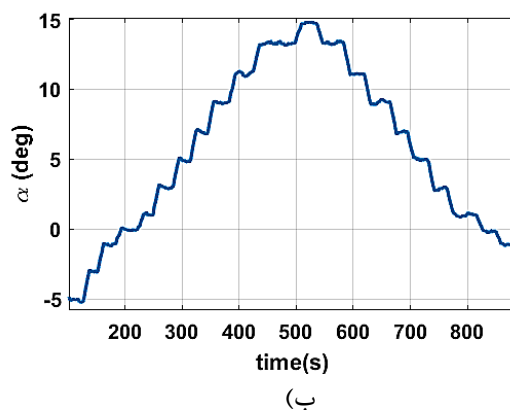
(ج)



(د)

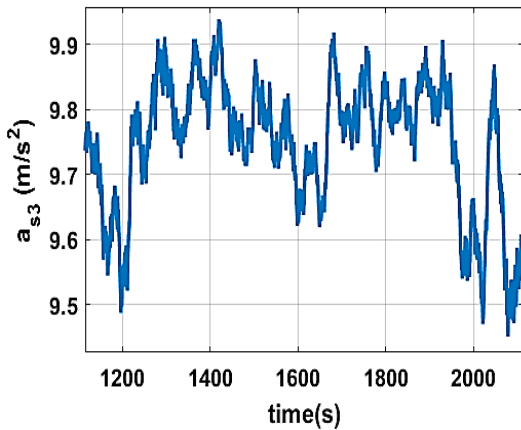


(الف)



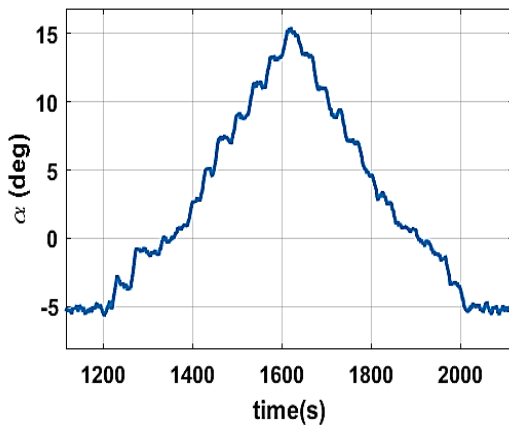
(ب)

شکل (۱۵): (الف) نتایج اندازه‌گیری زاویه چرخش توسط واحد زاویه‌سنج بالانس در ماخ ۰/۳، (ب) نتایج اندازه‌گیری زاویه حمله توسط واحد زاویه‌سنج بالانس در ماخ ۰/۳

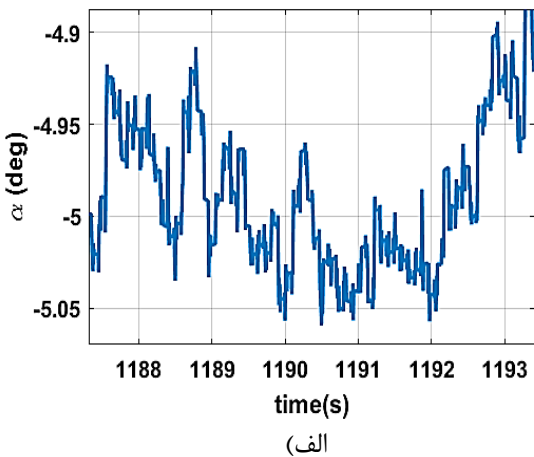


(ج)

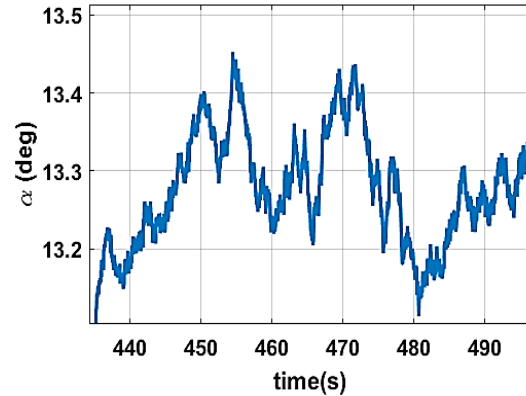
شکل (۱۷): الف) نتایج اندازه‌گیری شتاب توسط محور S_1 واحد زاویه‌سنج بالانس در ماخ ۰/۷، ب) نتایج اندازه‌گیری شتاب توسط محور S_2 واحد زاویه‌سنج بالانس در ماخ ۰/۷، ج) نتایج اندازه‌گیری شتاب توسط محور S_3 واحد زاویه‌سنج بالانس در ماخ ۰/۷



شکل (۱۸): نتایج اندازه‌گیری زاویه حمله توسط واحد زاویه‌سنج بالانس در ماخ ۰/۷



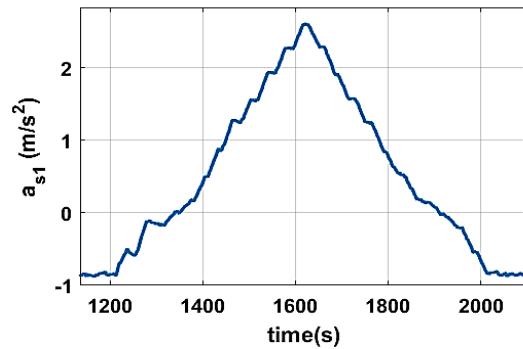
(الف)



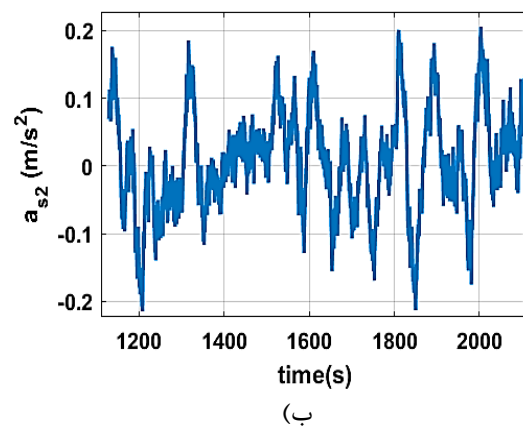
(ه)

شکل (۱۶): نتایج اندازه‌گیری زاویه حمله توسط واحد زاویه‌سنج بالانس (بزرگنمایی شده) در ماخ ۰/۳، الف) ۵- درجه، ب) ۰/۱- درجه، ج) ۴/۸۵ درجه، د) ۹ درجه، ه) ۱۳/۳ درجه

در شکل ۱۷ نتایج اندازه‌گیری شتاب توسط محور های مختلف واحد زاویه‌سنج بالانس در ماخ ۰/۷ نشان داده شده است. در شکل ۱۸ نتایج اندازه‌گیری زاویه حمله بر حسب زمان نشان داده شده است. مقدار زاویه اندازه‌گیری شده در ماخ ۰/۷ از زاویه ۵- تا ۱۵ درجه است. در شکل ۱۹ تصویر بزرگنمایی شده از زوایای مختلف حمله مشاهده می‌شود.



(الف)

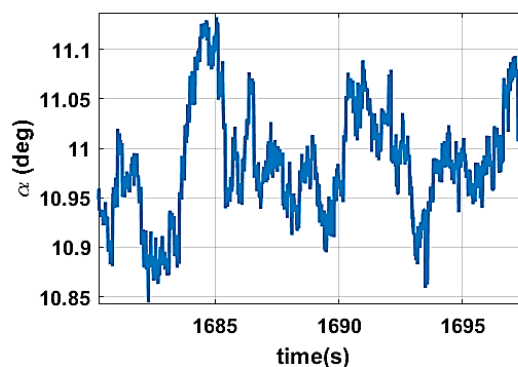


(ب)

۳- دقت اندازه‌گیری واحد زاویه‌سنج بالانس که با مواردی همچون اغتشاش شتاب‌سنج و همچنین فرمول استفاده شده برای به دست آوردن زوایا تعیین شد. در استفاده از چیدمان شکل ۵-ب در تونل باد دانشگاه شیراز و با استفاده از جدول ۱، به‌منظور محاسبه زوایای حمله و چرخش به ترتیب از روابط (۱۰) و (۱۱) پیشنهاد شد

۵- مراجع

- [1] Arezoomand A. Parhizgar B. and Tarabi H. Numerical Analysis of Missile With Grid Fins and Investigating the Fin Type Geometry Effects On Aerodynamics Coefficients. Fluid Mech. Aerodyn. J. 2020; 8(2):153-168. doi: 10.1001.1.23223278.1398.8.2.12.5
- [2] Selig M. S. and McGranahan B. D. Wind Tunnel Aerodynamic Tests of Six Airfoils for Use on Small Wind Turbines J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME. 2004;126(4):986-1001. doi: 10.1115/1.1793208.
- [3] Zhang R. W. Du Q. Li and X. Cui Aerodynamic design of 2.4 m continuous transonic wind tunnel Kongqi Donglixue Xuebao/Acta Aerodyn. Sin. 2023;41(1).doi: 10.7638/kqdlxxb-2022.0185.
- [4] Kaliyari D. Nusrath TK K. and Singh J. Validation and Update of Aerodynamic Database at Extreme Flight Regimes. 2015; 157-172. doi: 10.4271/2015-01-2567.
- [5] Wong K. H. Lai W. Ng J. H. Fazlizan A. Sopian K. and Sahoo N. Open-Loop Subsonic Suction Type Wind Tunnel: Design Simulation Build and Test J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci. 202;105(2). doi: 10.37934/arfms.105.2.204223.
- [6] Besharati M. Jozvaziri M. and Rabiee A. Design High Temperature Cored Brick Heater for Hypersonic Wind Tunnel Fluid Mech. Aerodyn. J. 2020; 9(1):45-66.
- [7] Reis M. L. Mello O. and Uyeno S. Calibration Uncertainty of an External Six-Component Wind Tunnel Balance in 33rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Jun. 2003; June.1-10. doi: 10.2514/6.2003-3884.
- [8] He, R., Sun, H., Gao, X., and Yang, H., Wind tunnel tests for wind turbines: A state-of-the-art review, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022;166. doi: 10.1016/j.rser.2022.112675.
- [9] Smith A. L. Mee D. J. Daniel W. J. T. and Shimoda T. Design Modelling and Analysis of a Six Component Force Balance for Hypervelocity Wind Tunnel Testing Comput. Struct. 2001;79(11):1077-1088 doi: 10.1016/S0045-7949(01)00005-0.
- [10] Abdelwahab M. Ghazal T. and Aboshosha H. Designing a multi-purpose wind tunnel suitable for limited spaces Results Eng. 2022;14. doi: 10.1016/j.rineng.100458.
- [11] Abdel Aziz S. S. Moustafa E. B. and Salem Said A. H. S. Experimental Investigation of the Flow Noise and Vibration Effect on the Construction and Design of Low-Speed Wind Tunnel Structure Machines. 2023;11(3). doi:



(ب)

شکل (۱۹): نتایج اندازه‌گیری زاویه حمله توسط واحد زاویه‌سنج بالانس (بزرگنمایی شده) در ماخ ۰/۷ (الف) و ۵-درجه، (ب) ۱۱ درجه،

نتایج به‌دست‌آمده توسط واحد زاویه‌سنج بالانس دارای نوسان است که در شکل‌ها مشاهده می‌شود. این نوسانات فرکانس بالا ناشی از جریان هوا و ارتعاشات موتور در تونل باد است که می‌توان با استفاده از فیلترهای رایج، نتایج را هموارتر کرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، معیارهای متعددی که در طراحی واحد زاویه‌سنج بالانس تونل باد مؤثر است بررسی شده است. از طرفی برای افزایش دقت اندازه‌گیری زاویه توسط زاویه‌سنج طراحی‌شده، نیازمند استفاده از حسگرهای دقیق‌تر و طبیعتاً گران‌تر است. به همین دلیل یکی از معیارهای انتخاب واحد زاویه‌سنج بالانس، دقت موردنیاز زاویه‌سنج طراحی شده است. مواردی که در انتخاب واحد زاویه‌سنج بالانس مناسب جهت طراحی و ساخت مدنظر قرار گرفت به‌صورت زیر است:

- ۱- تعداد زوایایی که قرار است توسط زاویه‌سنج اندازه گرفته‌شوند دو زاویه چرخش و حمله است.
- ۲- تعداد محورهای شتاب‌سنج واحد زاویه‌سنج بالانس، دو محوره انتخاب شد و دامنه اندازه‌گیری این شتاب‌سنج‌ها تا حد امکان کوچک و در عین حال بزرگ‌تر از g در نظر گرفته شد. برای نمونه در تونل باد دانشگاه شیراز شتاب‌سنج همانند چیدمان شکل ۵-ب بر روی بالانس تونل باد پیشنهاد گردید. با استفاده از این چیدمان هر دو زاویه حمله و چرخش با دقت قابل قبولی اندازه‌گیری می‌شوند.

- Areas J. *Sensors*. 2013;1–11. doi: 10.1155/2013/197090.
- [27] Sahoo N. Mahapatra D. R. Jagadees G. Gopalakrishnan S. and Reddy K. P. J. An Accelerometer Balance System for Measurement of Aerodynamic Force Coefficients Over Blunt Bodies in a Hypersonic Shock Tunnel Meas. Sci. Technol. 2003;14(3):260–272. doi: 10.1088/0957-0233/14/3/303.
- [28] Albarbar, A., Badri, A., Sinha, J. K., and Starr, A., Performance Evaluation of MEMS Accelerometers, *Measurement*. 2009;42(5):790–795. doi: 10.1016/j.measurement.2008.12.002.
- [29] matthew C. E. Calibration of Accelerometer Output for Adults Med. Sci. Sport. Exerc. 2005;37:512–S522. doi: 10.1249/01.mss.0000185659.11982.3d.
- [30] Luczak S. Grepł R. and Bodnicki M. Selection of MEMS Accelerometers for Tilt Measurements *J. Sensors*. 2017;1–14. doi: 10.1155/2017/9796146.
- [31] Ripper G. P. Dias R. S. and Garcia G. A. Primary Accelerometer Calibration Problems Due to Vibration Exciters Meas. J. Int. Meas. Confed. 2009;42(9):1363–1369. doi: 10.1016/j.measurement.2009.05.002.
- [32] Beravs T. Podobnik J. and Munih M. Three-Axial Accelerometer Calibration Using Kalman Filter Covariance Matrix for Online Estimation of Optimal Sensor Orientation *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2012;61(9): 2501–2511. doi: 10.1109/TIM.2012.2187360.
- [33] Won S. H. P. and Golnaraghi F. A Triaxial Accelerometer Calibration Method Using a Mathematical Model *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2010;59(8):2144–2153 doi: 10.1109/TIM.2009.2031849.
- [34] Luczak S. and Oleksiuk W. Increasing Accuracy of Tilt Measurements *Eng. Mech.* 2007;14(1):143–154.
- [35] Łuczak S. Guidelines for Tilt Measurements Realized by MEMS Accelerometers *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2014;15(3):489–496. doi: 10.1007/s12541-014-0362-5.
- [36] Inc A. D. Low Cost ± 2 g Dual Axis Accelerometer With Duty Cycle Output ADXL 202E. 2000;1–4.
- [37] Mon K. and New T. Analysis on Modeling and Simulation of Low Cost MEMS Accelerometer ADXL202. *Proc. World Academy of Science Engineering and Technology*. 2008;32:568–571. doi: 10.3390/machines11030360.
- [12] Wong D. T. Evaluation of Electrolytic Tilt Sensors for Wind Tunnel Model Angle-of-Attack (AOA) Measurements in ICIASF '91 Record. International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities. 1991;382–391 doi: 10.1109/ICIASF.1991.186261.
- [13] Rueger M. and Lafferty J. Demonstration of a Gyro-Based Model Attitude Measurement System at the AEDC Tunnel 9 Test Facility in 38th Fluid Dynamics Conference and Exhibit Jun. 2008;June:1–12 doi: 10.2514/6.2008-4042.
- [14] Lee G. Study of Optical Techniques for The Ames Unitary Wind Tunnel Part 7. 1993;1–26.
- [15] McDevitt F. K. O. Kevin T. An optical angle of attack sensor. *Int. Congr. Instrum. Aerosp. Simul. Facil.* 1989;113–124.
- [16] Finley T. and Tchong P. Model Attitude Measurements at NASA Langley Research Center in 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 1992;Jan:1–8 doi: 10.2514/6.1992-763.
- [17] Owen F. McDevitt T. Morgan D. and Owen A. Wind Tunnel Model Angle of Attack Measurements Using an Optical Model Attitude System in 38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2000;Jan:1–5 doi: 10.2514/6.2000-414.
- [18] Yang H. Zhou B. We Q. Wang X. Xu X. and Zhang R. Accurate Attitude Estimation of HB2 Standard Model Based on QNCF in Hypersonic Wind Tunnel Test *Chinese J. Aeronaut.* 2020;33(1):64–72. doi: 10.1016/j.cja.2019.07.021.
- [19] Mosavi A. and Varkonyi-Koc A. R. y Recent Global Research and Education: Technological Challenges. December. Cham: Springer International Publishing. 2017;519.
- [20] Macdonald E. 3D Printing for the Rapid Prototyping of Structural Electronics *IEEE Access*. 2014;2:234–242. doi: 10.1109/ACCESS.2014.2311810.
- [21] Fatikow S. and Rembold U. *Microsystem Technology and Microrobotics*. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 1997.
- [22] Nelson T. C. Research Tools to Investigate Movements Migrations and Life History of Sturgeons (Acipenseridae) with an Emphasis on Marine-Oriented Populations *PLoS One* 2013;8(8):1–22. doi: 10.1371/journal.pone.0071552.
- [23] Yuan X. Yu S. Zhang S. Wang G. and Liu S. Quaternion-Based Unscented Kalman Filter for Accurate Indoor Heading Estimation Using Wearable Multi-Sensor System *Sensors*. 2015;15(5):10872–10890. doi: 10.3390/s150510872.
- [24] Loh B. G. and Rosen J. Kinematic Analysis of 7 Degrees of Freedom Upper-Limb Exoskeleton Robot with Tilted Shoulder Abduction *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2013;14(1):69–76. doi: 10.1007/s12541-013-0011-4.
- [25] Navidi N. Landry R. J. Chen J. and Gingras D. A New Technique for Integrating MEMS-Based Low-Cost IMU and GPS in Vehicular Navigation *J. Sensors*. 2016;1–16. doi: 10.1155/2016/5365983.
- [26] Ali A. and El-Sheimy N. Low-Cost MEMS-Based Pedestrian Navigation Technique for GPS-Denied