

## طراحی و ساخت کالیبراتور تراز الکترونیکی دقیق و تحلیل عدم قطعیت در فرآیند کالیبراسیون

مهدی غفارزاده<sup>۱</sup>، علی کمالی ایگلی<sup>۲\*</sup>، رضوان عابدینی<sup>۳</sup>، روح اله رجبی<sup>۴</sup>، محمد توکلی کجانی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران  
<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران  
<sup>۴</sup> دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۸ آذر ۱۳۹۵  
بازنگری: ۲۲ اردیبهشت ۱۳۹۶  
پذیرش: ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۱۷ خرداد ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

تراز الکترونیکی  
کالیبراسیون  
عدم قطعیت اندازه‌گیری  
حسگر الکترونیکی

**چکیده:** تراز الکترونیکی به عنوان ابزار تنظیم زوایای دقیق در تجهیزات پیشرفته کاربرد دارند. دقت و صحت عملکرد تراز باید با استفاده از وسایل کالیبراسیون ظریف و حساس مورد ارزیابی قرار گیرد. در این پژوهش به منظور کالیبراسیون و ارزیابی دقت یک تراز الکترونیکی دو محوره دقیق، یک ابزار کالیبراسیون با قابلیت موقعیت‌دهی و تفکیک‌پذیری یک میکرون طراحی و ساخته شده است. سپس به بررسی روابط خطی و غیرخطی حاکم بر رفتار تراز الکترونیکی پرداخته شده است. خطای غیرخطی بودن رفتار تراز و همچنین تکرارپذیری رفتار آن در زوایای مختلف، جهت سنجش میزان قابلیت اطمینان حسگر استخراج شده است. با بکارگیری و مقایسه دو روش میانگین حسابی و هندسی، به روش تحلیلی و با شناسایی عوامل موثر بر خطای خروجی کالیبراتور، اثر دقت و خطای اندازه‌گیری هر کدام از آن عوامل بر روی عدم قطعیت اندازه‌گیری زاویه در فرآیند کالیبراسیون بدست آمده است. نتایج نشان دهنده آن است که می‌توان از هر دو روش میانگین‌گیری معرفی شده برای استخراج رابطه انتشار عدم قطعیت با دقت خوبی استفاده نمود. همچنین، تحلیل عدم قطعیت پایه ساخته شده و فرآیند کالیبراسیون تناسب تجهیزات بکارگرفته شده را برای ارزیابی تراز الکترونیکی دقیق نمایان می‌سازد.

### ۱- مقدمه

امروزه از انواع حسگر و ابزارهای اندازه‌گیری به طور وسیعی در اندازه‌گیری و کنترل حرکت ماشین‌آلات و تجهیزات استفاده می‌گردد. انکودرها، تاکومترها، سینکروها و ترازهای دیجیتال از مهم‌ترین ابزارهای اندازه‌گیری دقیق می‌باشند. دقت و قابلیت اطمینان این ابزارها تأثیر مستقیم بر عملکرد مناسب دستگاه دارد [۱ و ۲]. در این بین ترازها به دلیل تعیین موقعیت تمایل دستگاه یا محورهای آن نسبت به سطح افق زمین از اهمیت بالایی برخوردارند.

ابزارهای اندازه‌گیری زاویه تمایل با نام‌های مختلفی نظیر تراز، کلینومتر و اینکلینومتر نامیده می‌شوند. تراز ابزاری است که زاویه تمایل (انحراف) را نسبت به پایدارترین مرجع یعنی «محور گرانش عمودی زمین» اندازه‌گیری می‌نماید. مهم‌ترین کاربرد ترازهای دقیق در سامانه موقعیت‌دهی و کنترل ماشین‌ها، ربات‌ها، موقعیت‌دهی و تراز پایه‌ها، پایش سازه‌ها و یا فونداسیون آن‌ها (ساختمان‌ها و پل‌ها)، سامانه‌های کنترل PLC، تحقیقات زمین‌شناسی، ناوبری هوایی، دریایی و زیردریایی، تلسکوپ‌های نوری و رادیویی، رادارها و تحقیقات بر روی حرکت‌های زمین برای اندازه‌گیری موقعیت زاویه‌ای و حرکت چرخش می‌باشد.

از مهم‌ترین انواع ترازها بر مبنای اصول عملکرد می‌توان به ترازهای الکلی، الکترونیکی، پاندولی و MEMS اشاره نمود [۳]. ترازهای الکترونیکی یکی از دقیق‌ترین انواع ترازهای الکترونیکی حال حاضر جهان با تفکیک‌پذیری  $1/0.001$  درجه و صحت  $0.001$  درجه می‌باشند [۴ و ۵]. مهم‌ترین پارامترهای عملکردی یک تراز الکترونیکی شامل ولتاژ و جریان منبع تغذیه حسگر، دامنه (منفی و مثبت)، دامنه مطلق، حساسیت متقابل محورها، نویز، خطی بودن، امپدانس خروجی، خطای صفر، ضریب تأثیر دما و ضریب دمای نقطه مبدا می‌باشند.

کالیبراسیون و دیجیتال نمودن ولتاژ آنالوگ خروجی حسگر تراز، توسط مدار خواننده آن یکی از مهم‌ترین مراحل طراحی و ساخت یک سامانه اندازه‌گیری زاویه متشکل از منبع تغذیه، حسگر و خواننده آن می‌باشد [۶]. در فرآیند کالیبراسیون تراز، هدف تعیین دقیق رابطه بین ولتاژ خروجی حسگر و مقدار زاویه واقعی قرارگیری آن است [۷ و ۸].

در منابع مختلف روش‌های متنوعی برای کالیبراسیون تراز مد نظر قرار گرفته است. لو و همکاران بررسی دقت یک تراز یک جهته با دامنه  $0-90^\circ$  را توسط روش‌های مختلف مورد ارزیابی قرار دادند [۹]. در فرآیند کالیبراسیون، مبنای اندازه‌گیری زاویه دقیق، روش‌هایی نظیر گنج بلوک سنجش زاویه،

1 Resolution  
2 Accuracy

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: alikamalie@aut.ac.ir

خروجی با استفاده از روش میانگین حسابی در به دست آوردن تابع تحلیلی پرداخته شده است.

در این مقاله، پس از طراحی و ساخت یک ابزار کالیبراسیون، کالیبراسیون و تحلیل عدم قطعیت اندازه‌گیری در فرایند کالیبراسیون یک تراز دو محوره براساس روش GUM ارائه گردیده است. به منظور انجام فرایند کالیبراسیون، یک میز دقیق به گونه‌ای طراحی و ساخته شده تا بتوان به طور همزمان هر دو محور تراز را با دقت مناسب در موقعیت دلخواه قرار داد. در بخش کالیبراسیون تأثیر روابط جبران خطا و تبدیل مقادیر آنالوگ به دیجیتال مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. همچنین، به دلیل اهمیت و لزوم تعیین عدم قطعیت در اندازه‌گیری، اثر دقت و خطای هر کدام از پارامترها از جمله خطای نصب وسیله و تجهیزات الکترونیکی و ... در عدم قطعیت اندازه‌گیری زاویه و کالیبراسیون به دست آمده است. همچنین به دو روش میانگین هندسی و حسابی، روابط موجود برای تحلیل عدم قطعیت استخراج و بررسی شده اند. تکرار آزمایش‌ها به تحلیل خطی و یا غیرخطی بودن روابط حاصله برای استفاده و همچنین تکرارپذیری آزمون‌ها کمک شایانی می‌نماید.

## ۲- اصول کارکرد تراز و مدار خواننده

عملکرد حسگر تراز الکترونیکی بر این اصل استوار است که جابجایی شناور درون مایع الکترولیت، همیشه در جهت عمود بر محور گرانش زمین قرار می‌گیرد. ترازهای الکترونیکی دارای یک منبع تغذیه دقیق و استاندارد ولتاژ AC برای تغذیه حسگر می‌باشند. جابجایی درون محفظه پر شده از الکترولیت همراه با سه الکتروود (یا پنج الکتروود برای حسگر دو جهته) قرار دارد. هنگامی که ولتاژ AC در بین دو الکتروود تحریک‌کننده اعمال می‌گردد ولتاژ خروجی اندازه‌گیری شده در الکتروود مرکزی براساس تابعی از زاویه تمایل تغییر می‌نماید (شکل ۱). ولتاژ AC خروجی تراز حاصل از حسگر دارای رابطه خطی با سینوس (یا تانژانت) زاویه تمایل می‌باشد. در سطح تراز، حسگر تراز خروجی ولتاژ صفر می‌دهد. تبدیل جریان AC به جریان DC توسط یک مدار واسط تأمین می‌گردد [۱۷].

ترازهای الکترونیکی دارای اجزای مکانیکی متحرک نیستند تا بشکنند یا دچار سایش شوند و به دلیل مرجع‌گیری از گرانش، آن‌ها را می‌توان در هر

انکودر دورانی سوار شده بر میز دقیق، میله سینوسی [۱۰] و اتوکالیباتور می‌باشد. مشکل روش استفاده از گیج بلوک، دقت کمتر و محدودیت در انتخاب گام‌های تغییر زاویه می‌باشد. با به کارگیری اتوکالیباتور می‌توان در زوایای بسیار محدود و با دقت مناسب، کالیبراسیون تراز را انجام داد. همچنین، توسط روش انکودر دورانی می‌توان تراز یک جهته را با دقت مناسب در محدوده عملکردش کالیبره نمود.

استفاده از اتوکالیباتور و انکودر دورانی، دارای دقت مناسبی می‌باشند؛ اما تنها برای کالیبراسیون ترازهای تک محوره مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین با استفاده از میله سینوسی تنها می‌توان تراز را به طور مستقل در هر محور کالیبره نمود و در زوایای بالاتر از  $30^\circ$  خطای این روش افزایش می‌یابد [۹]. به عنوان یک راه‌حل، می‌توان با طراحی میز با قابلیت تغییر زاویه در دو محور به طور همزمان خروجی هر دو محور تراز را مورد ارزیابی قرار داد [۱۱ و ۱۲].

از طرفی، به دلیل وجود خطای اجتناب‌ناپذیر در ابزارهای اندازه‌گیری، انجام اندازه‌گیری در فرایند کالیبراسیون با عدم قطعیت‌هایی همراه است. در واقع، عدم قطعیت بیانگر میزان و اهمیت هر کدام از عوامل به وجود آورنده خطا و همچنین خطای کل در اندازه‌گیری و کالیبراسیون می‌باشد. به طور معمول دو روش 'ISO-GUM' و مونت کارلو<sup>۲</sup> برای تعیین عدم قطعیت در اندازه‌گیری مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۰ و ۱۳].

براساس روش GUM در استاندارد ISO، مقادیر عدم قطعیت برای مراحل مختلف آزمون شناسایی و کمی شده و سپس این مقادیر با یکدیگر ترکیب می‌شوند و عدم قطعیت کل روش آزمون به دست می‌آید. تعیین عدم قطعیت اندازه‌گیری، شامل ایجاد یک مدل ریاضی است که تمامی متغیرهای اندازه‌گیری را در بر می‌گیرد [۱۴].

در برخی حالات به دلیل مشکلات موجود در استخراج روابط تحلیلی بین عوامل ایجاد خطا و بررسی تحلیلی توزیع خطای حاصل، استفاده از روش‌های عددی پیشنهاد می‌گردد. یکی از پرکاربردترین روش‌های عددی در این زمینه مونت کارلو می‌باشد. روش مونت کارلو، با استفاده از نتایج آزمون‌های تجربی و براساس توزیع احتمالات هر کدام از متغیرها عمل می‌نماید [۱۵]. البته در این روش نیز، دقت نهایی تخمین، به تعداد بالای آزمایش بستگی دارد که با ازدیاد پارامترهای مؤثر بر آزمون، تعداد آزمایش مورد نیاز بیشتر نیز می‌گردد. هزینه زیاد ناشی از تعداد آزمون متعدد، از معایب این روش عددی است.

پارکر<sup>۳</sup> و همکاران در [۱۶]، به مدل‌سازی و کالیبراسیون یک تراز دو محوره به وسیله میله سینوسی پرداختند. در این پژوهش، به دلیل محدودیت میله سینوسی در استخراج و تحریک تک محوره خروجی، ابتدا توسط چند معیار تراز دومحوره در زوایای مشخص چرخانده و روی میله سینوسی سوار شده است. سپس در زوایای مختلف به بررسی رابطه غیرخطی ورودی و

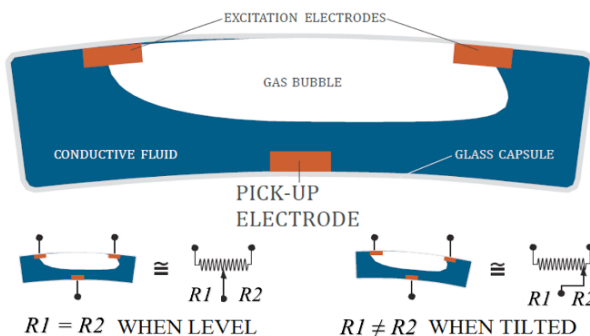


Fig. 1. Mechanism of Electrolytic tiltmeter sensor [4]

شکل ۱: سازوکار عملکرد حسگر تراز الکترونیکی [۴]

- 1 Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)
- 2 Monte Carlo
- 3 David H. Parker

توسط یک ابزار دقیق ایجاد شده و با زاویه نمایش داده شده توسط تراز مقایسه می‌گردد.

در این پژوهش، به منظور دریافت خروجی تراز در دو جهت به صورت همزمان، یک پایه قابل تنظیم دقیق ساخته شده است (شکل ۳). تنظیم اولیه پایه نسبت به سطح افق با استفاده از دو میکرومتر معمول و یک میکرومتر دیجیتال و به کمک تراز الکلی دقیق (حداکثر خطا  $0.0005$  درجه) انجام می‌گیرد. با استفاده از این پایه می‌توان با تفکیک‌پذیری یک میکرومتر ( $1\mu m$ ) تراز را در دو محور مستقل حول محور دوران چرخاند. حین آزمون، مجموعه اجزای اصلی کالیبراسیون بر روی یک میز گرانیت با پایه قابل تنظیم قرار داده می‌شوند (شکل ۳).

در شکل ۲،  $\theta$  چرخش پایه دقیق حول محور  $X$  و  $\phi$  چرخش حول محور  $Y$  می‌باشد که توسط حرکت سه پایه میکرومتری تأمین می‌شود. زاویه چرخش حاصل در تراز برابر  $\gamma_x$  و  $\gamma_y$  می‌باشد. مرحله ابتدایی فرایند کالیبراسیون شامل افزایش پله‌ای زاویه توسط میز دقیق کالیبراسیون و خوانش ولتاژ خروجی در دو محور (در مرحله ساخت) و یا زاویه دو محور (در کالیبراسیون دوره‌ای) می‌باشد.

#### ۴- تعیین زاویه تمایل پایه دقیق و تراز

۴-۱- تعیین زاویه مبنا (پایه دقیق)

برای اندازه‌گیری زاویه انحراف تراز اغلب از یک میله سینوسی و مجموعه گیج بلوک استفاده می‌شود. در میله سینوسی فاصله بین دو پایه (غلتک) و مقدار ارتفاع گیج بلوک‌های زیر پایه مبنای اندازه‌گیری قرار می‌گیرد (شکل ۳). در چیدمان ارائه شده برای بررسی دقت تراز دو جهت از یک میکرومتر دیجیتال برای اندازه‌گیری جابه‌جایی و خوانش مقدار تغییر ارتفاع پایه میز استفاده شده است. در استفاده از میله سینوسی، ارتفاع گیج بلوک، عمود بر محور میز گرانیت اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۳ (a)) در حالی که در استفاده از پایه کالیبراسیون با میکرومتر دیجیتال مقدار ارتفاع عمود بر محور پایه اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۳ (b)). تفاوت این دو در رابطه تعیین زاویه چرخش می‌باشد. در استفاده از گیج بلوک و میله سینوسی، زاویه چرخش

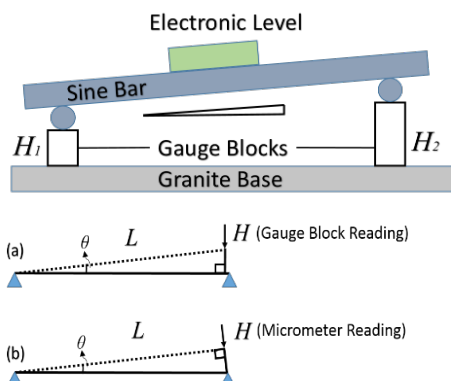


Fig. 3. methods for calculation of tilt angle of precision plate

شکل ۳: روش‌های محاسبه زاویه چرخش پایه دقیق

موقعیتی، بدون نیاز به فیکسچر یا پایه پیچیده، نصب نمود.

هنگامی که حسگر تراز می‌باشد، مایع رسانا سطحی مساوی از هر الکتروده را پوشش می‌دهد. مقاومت‌های  $R_1$  و  $R_2$  بین الکترودهای تحریک و الکتروده داده‌برداری، دارای مقدار برابر هستند. هنگامی که حسگر متمایل می‌گردد مایع درون حباب، یکی از الکترودهای تحریک را بیش از الکتروده دیگر پوشش می‌دهد و برابری مقاومت‌های  $R_1$  و  $R_2$  از بین می‌رود. یک تراز از یک یا دو حسگر تراز برای اندازه‌گیری زاویه چرخش استفاده می‌نماید. مدار الکترونیک تراز یک سیگنال بالانس AC تولید می‌نماید که به شکل تفاضلی بر دو الکتروده تحریک حسگر تراز اعمال می‌گردد. دامنه و فاز سیگنال خروجی در الکتروده داده‌برداری اندازه‌گیری می‌شود، دامنه و جهت حرکت چرخش را تعیین می‌نماید.

ترازهای دو محوره معمول از دو تراز یک جهته با خروجی ولتاژهای  $V_x$  و  $V_y$  تشکیل شده‌اند. برای کالیبراسیون تراز دو جهته، کالیبراسیون هر محور تراز به صورت مجزا کافی نیست. به این صورت که اگر تراز در یک جهت نسبت به افق تراز گردد و حول محور عمودی دوران نماید، خروجی محور دیگر ثابت نخواهد ماند. دقت عمود بودن نصب ترازهای مجزا در دو محور نیز یک منبع خطای تکرارپذیر می‌باشد که می‌توان آن را حین فرایند کالیبراسیون شناسایی و جبران نمود.

#### ۳- کالیبراسیون و مدل‌سازی تراز دو جهته

کالیبراسیون یک تراز، شامل یافتن رابطه بین زاویه دقیق چرخش  $\theta$  حول محور  $X$  (و  $\phi$  حول محور  $Y$ ) و ولتاژ اندازه‌گیری شده توسط مدار الکترونیک می‌باشد. به منظور اطمینان از دقت عملکرد تراز، فرایند کالیبراسیون در مدت زمان استفاده از آن باید به صورت دوره‌ای انجام گیرد. در این مرحله زاویه

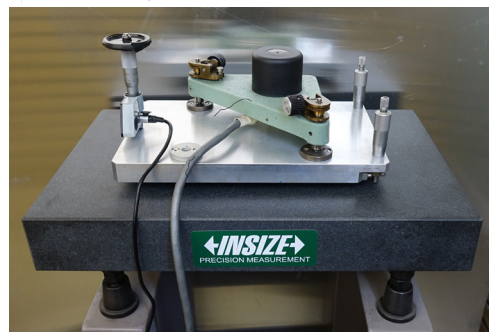
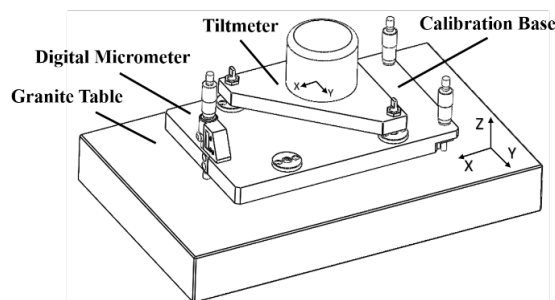


Fig. 2. Schematic of granite base and adjustable precision plate

شکل ۲: نمای میز گرانیت و پایه دقیق قابل تنظیم

برابر  $\sin \theta = H / L$  [۱۶] و در استفاده از میکرومتر دیجیتالی (برای تنظیم و خوانش زاویه) در پایه کالیبراسیون دقیق برابر  $\tan \theta = H / L$  می‌باشد.

که  $V_x$  و  $V_y$  برحسب ولتاژ هستند.

#### ۴-۲- تعیین زاویه تراز

زاویه تراز بر مبنای خروجی ولتاژ سامانه خواننده تراز در دو محور  $X$  و  $Y$  تعیین می‌گردد. زاویه تراز به صورت تابعی از ولتاژ دو محور می‌باشد. رابطه تعیین زاویه از ولتاژ می‌تواند در برگیرنده عبارت‌هایی متشکل از پارامتر ولتاژ  $V_x$  و  $V_y$  به صورت مستقل و یا ترکیبی از ضرایب آن‌ها باشد.

به عنوان اولین فرض، تانژانت زوایا می‌تواند به صورت تابعی از ولتاژهای خروجی دو محور در نظر گرفت:

$$\tan(\gamma_x) = f(V_x, V_y) \quad (۱)$$

$$\tan(\gamma_y) = f(V_x, V_y) \quad (۲)$$

تابع تخمین تانژانت زوایا را می‌توان به شکل هر یک از رابطه‌های (۳) الی (۵) بیان نمود. در فرایند کالیبراسیون بررسی چرخش حول محور  $X$  مدنظر قرار گرفته است. در معادله (۳) زاویه تمایل تنها وابسته به ولتاژ خروجی همان محور می‌باشد. در رابطه (۴) زاویه تمایل دارای رابطه خطی با ولتاژ هر دو محور  $(V_x, V_y)$  تراز می‌باشد. در رابطه (۵) زاویه تمایل با ولتاژ هر دو محور دارای رابطه چند جمله‌ای درجه ۳ می‌باشد.

$$\tan(\gamma_x) = a_0 + a_1 V_x \quad (۳)$$

$$\tan(\gamma_x) = a_0 + a_1 V_x + a_2 V_y \quad (۴)$$

$$\tan(\gamma_x) = a_0 + a_1 V_x + a_2 V_y + a_3 V_x^2 + a_4 V_x V_y + a_5 V_y^2 + a_6 V_x^3 + a_7 V_x^2 V_y + a_8 V_x V_y^2 + a_9 V_y^3 \quad (۵)$$

در نظر گرفتن اثر متقابل دو محور و غیرخطی بودن در معادله (۵) در نظر گرفته شده است؛ بنابراین می‌توان برای زوایای  $\gamma_x(\theta, \phi)$  و  $\gamma_y(\theta, \phi)$  ولتاژهای خروجی اندازه‌گیری شده  $V_x(\gamma_x, \gamma_y)$  و  $V_y(\gamma_x, \gamma_y)$  ضرایب  $a_i$  و  $b_i$  را با استفاده از فرایند رگرسیون استاندارد محاسبه نمود.

معادله (۵) برای چرخش حول هر دو محور  $X$  و  $Y$  را می‌توان به شکل رابطه (۶) در قالب ماتریس ارائه نمود:

$$\begin{pmatrix} \tan(\gamma_x) \\ \tan(\gamma_y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ V_x \\ V_y \\ V_x^2 \\ V_y^2 \\ V_x V_y \\ V_x^3 \\ V_y^3 \\ V_x^2 V_y \\ V_x V_y^2 \\ V_x^3 \\ V_y^3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_7 & a_8 & a_9 \\ b_0 & b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 & b_7 & b_8 & b_9 \end{pmatrix} \quad (۶)$$

#### ۴-۳- تخمین عدم قطعیت اندازه‌گیری در کالیبراسیون تراز

عدم قطعیت اندازه‌گیری نشاندهنده پراکندگی مقادیر اندازه‌گیری شده بوده و اطلاعاتی درباره کیفیت اندازه‌گیری ارائه می‌دهد. دلیل پراکندگی مقادیر اندازه‌گیری شده، کمیت‌های تأثیرگذار در آن می‌باشد. در عمل تعیین تمامی کمیت‌های تأثیرگذار غیرممکن می‌باشد و باید بتوان مهم‌ترین عوامل را شناسایی نمود و تأثیر آن‌ها را بر نتیجه اندازه‌گیری تخمین زد.

عدم قطعیت اندازه‌گیری در کالیبراسیون تراز، ترکیبی از عدم قطعیت تراز و سامانه خواننده آن، عدم هم‌راستایی محور تراز و محور اصلی پایه دقیق و عدم قطعیت ابزار اندازه‌گیری است. منابع اصلی ایجاد خطا، شامل خطای ایجاد زوایای  $\theta$  و  $\phi$  و اندازه‌گیری ولتاژهای خروجی  $V_x$  و  $V_y$  می‌باشد؛ اما برای محاسبه عدم قطعیت از روش تحلیلی و به روش مجذور جمع مربعات به رابطه‌ای نیاز است تا کلیه پارامترهای دارای عدم قطعیت در آن حضور داشته باشند. در اینجا دو رابطه برای  $\tan(\gamma_x)$  استخراج شده است که یکی  $(\tan(\theta) = H / L)$  اثر ابعاد و اندازه‌های مؤثر را در خود دارد و دیگری اثر عوامل الکترونیکی (هرکدام از روابط (۳) تا (۵)) را نشان می‌دهد. می‌توان هرکدام از روابط (۳) تا (۵) را بسته به تناسب مورد نظر با تابع  $\tan(\theta) = H / L$  ترکیب نمود تا به تابع  $\tan(\gamma_x)$  به عنوان تابعی از کلیه متغیرهای اندازه‌گیری دست یافت. همچنین، زاویه بین محور تراز و محور اصلی پایه دقیق به مقدار  $\alpha$  می‌باشد. این زاویه در عمل باید صفر باشد؛ اما در تنظیم هم‌راستایی باید خطای آن نیز در نظر گرفته شود (به عبارت دیگر  $\tan(\gamma_x) \approx \tan(\theta) \cos(\alpha)$ ).

بدین ترتیب ترکیب نمودن هرکدام از روابط (۳) تا (۵) با تابع  $\tan(\theta) = H / L$  را می‌توان به روش میانگین حسابی [۱۶] و یا هندسی انجام داد. فرض کنید دو متغیر  $\eta$  و  $\zeta$  به عنوان گزینه‌های ترکیب و تابع حاصل را  $\lambda_\eta = (\eta + \zeta) / 2$  و  $\lambda_\zeta = \sqrt{\eta \zeta}$  به ترتیب برای میانگین حسابی و هندسی نامیده شوند. در واقع  $\eta$  و  $\zeta$  همان دو روش محاسبه یک پارامتر (در اینجا  $\tan(\gamma_x)$ ) هستند که هرکدام بخشی از عوامل عدم قطعیت را در خود دارند و در صورتی که از لحاظ مقداری به هم مشابه باشند، حاصل میانگین حسابی و یا هندسی همواره برابر با پارامتر اصلی خواهد بود. حال با در نظر گرفتن عدم قطعیت  $u_\zeta$  و  $u_\eta$ ، عدم قطعیت هر حالت به شرح روابط (۷) و (۸) می‌باشد.

$$u_{\lambda_\eta} = (u_\eta + u_\zeta) / 2 \quad (۷)$$

$$u_{\lambda_\zeta} = \frac{u_\eta \zeta + u_\zeta \eta}{2\sqrt{\eta \zeta}} \quad (۸)$$

در روابط بالا ضریب حساسیت برای حالت میانگین حسابی برابر ۰/۵ بوده ولی برای میانگین هندسی تابعی از مقدار تابع نیز می‌باشد (به ترتیب  $\frac{\zeta}{2\sqrt{\eta \zeta}}$  و  $\frac{\eta}{2\sqrt{\eta \zeta}}$  برای  $\eta$  و  $\zeta$ ).



## ۵- مراحل آزمون کالیبراسیون

کالیبراسیون برای هر یک از دو محور  $X$  و  $Y$  به طور مستقل انجام می‌شود. در فرایند کالیبراسیون، محوری که در جهت محور اصلی پایه دقیق قرار دارد و تغییر ارتفاع در آن توسط میکرومتر دیجیتال انجام می‌گیرد به عنوان محور اصلی شناخته می‌شود. محور عمود بر آن که تغییر آن توسط پایه تنظیم تراز الکترونیکی در محور مورد نظر انجام می‌شود، به عنوان محور فرعی شناخته می‌شود.

برای کالیبراسیون در هر محور سه سری آزمون به عنوان آموزش و سه سری آزمون به عنوان تعیین خطا در نظر گرفته شدند. در هر سری از آزمون‌ها ۱۷ ایستگاه ( $\pm 60 \mu\text{m}$ ) برای محور اصلی و ۷ ایستگاه برای محور فرعی ( $0, \pm 1/5, \pm 4/5$  و  $\pm 9$  ولت) در نظر گرفته شده است.

در هر مرحله زاویه هر دو محور اصلی و فرعی توسط پیچ تنظیم میکرومتر در دو محور، صفر می‌گردد (تراز نسبت به افق) و سپس حرکت دوران حول محور اصلی توسط میکرومتر دیجیتال تأمین می‌گردد. اثر متقابل تغییر زاویه دو محور بر ولتاژ خروجی با تمایل حول محور اصلی، علاوه بر تغییر ولتاژ خروجی محور اصلی، ولتاژ خروجی محور فرعی را نیز تغییر می‌دهد.

## ۶- تعیین خطای تراز الکترونیکی

شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب نمودار برازش و خطای تراز الکترونیکی ( $E$ ) را برای محورهای  $X$  ( $\theta$ ) و  $Y$  ( $\phi$ ) برحسب ثانیه قوسی<sup>۳</sup> نمایش می‌دهد. نمودارهای  $a_1$  تا  $a_3$  در هر شکل بیانگر نتایج آزمون تجربی و منحنی برازش و نمودارهای  $b_1$  تا  $b_3$  بیانگر خطای باقیمانده تراز الکترونیکی پس از کالیبراسیون می‌باشند. اندیس ۱ تا ۳ مربوط به روابط ۳ تا ۵ می‌باشند.

جدول ۱ مقادیر حداکثر، حداقل و خطای کل تعیین زوایای محورهای  $X$  و  $Y$  تراز را نمایش می‌دهد. همچنین درصد خطا با تقسیم مقدار خطای کل بر دامنه اندازه‌گیری حاصل شده است. با توجه به مقادیر درصد خطا، مشاهده می‌شود برازش براساس رابطه (۳) که در آن تنها ولتاژ محور اصلی مد نظر قرار گرفته است دارای بیشترین خطا (۷/۷٪ محور  $X$  و ۵/۴٪ محور  $Y$ ) و اختلاف قابل ملاحظه با خطای روابط دیگر (دربرگیرنده ولتاژ هر دو محور) می‌باشد. در عین این که خطای برازش در محورهای  $X$  و  $Y$  براساس رابطه‌های (۴) و (۵) دارای اختلاف در حدود ۱٪ می‌باشد. به نظر می‌رسد

جدول ۱: مقادیر خطای تعیین زوایای محورهای تراز (برحسب ثانیه قوسی)

Table 1 Error of tiltmeter angle (Arcsec) detection

محور	رابطه	حداکثر خطا	حداقل خطا	خطای کل	درصد خطا (%)
$X$	(۳)	۲/۸۳	-۳/۲۹	۶/۱۲	۷/۷
	(۴)	۰/۹۱	-۱/۲۵	۲/۱۶	۲/۷
	(۵)	۱/۰۱	-۱/۲۱	۲/۲۲	۲/۸
$Y$	(۳)	۲/۶۲	-۱/۶۸	۴/۳۰	۵/۴
	(۴)	۰/۹۴	-۰/۷۴	۱/۶۸	۲/۱
	(۵)	۰/۷۹	-۰/۶۹	۱/۴۸	۱/۹

روش‌های تحلیلی متفاوتی جهت محاسبه عدم قطعیت توابعی که ترکیبی از پارامترهای متفاوت هستند وجود دارد که در این مقاله، روش پیشنهادی مؤسسه ملی تکنولوژی و استاندارد (NIST) مورد استفاده قرار گرفته است. براساس رابطه (۹)، مجذور جمع مربعات عدم قطعیت پارامترها ( $u_j, j = 1..n$ ) با ضریب تأثیر حساسیت ( $S_j, j = 1..n$ ) با یکدیگر جمع می‌شوند تا عدم قطعیت استاندارد کل<sup>۲</sup> ( $u_c$ ) را نتیجه دهند [۱۹].

$$u_c = \sqrt{S_1^2 u_1^2 + S_2^2 u_2^2 + \dots + S_n^2 u_n^2} \quad (9)$$

بدین ترتیب برای حالت میانگین حسابی از رابطه (۱۰) استفاده می‌شود. در ادامه پژوهش و برای جلوگیری از طولانی شدن مطلب با فرض میانگین حسابی، مسأله حل شده و در نهایت با میانگین هندسی نیز مقایسه می‌گردد.

$$\tan(\gamma_x) = f(\theta, \alpha, V_x, V_y) = [\tan(\theta) \cos(\alpha) + a_0 + a_1 V_x + a_2 V_y + a_3 V_x^2 + a_4 V_x V_y + a_5 V_y^2 + a_6 V_x^3 + a_7 V_x^2 V_y + a_8 V_x V_y^2 + a_9 V_y^3] / 2 \quad (10)$$

براساس استاندارد ISO-GUM، برای تعیین عدم قطعیت کل، مشتق جزئی هر پارامتر (در تابع اصلی) در میزان عدم قطعیت آن پارامتر ضرب می‌شود مقدار خطا براساس رابطه (۱۱) محاسبه می‌گردد:

$$\Delta f = (\partial f / \partial \theta) \times u_\theta + (\partial f / \partial \alpha) \times u_\alpha + (\partial f / \partial V_x) \times u_{V_x} + (\partial f / \partial V_y) \times u_{V_y} = [(1 + \tan^2(\theta)) \cos(\alpha) \times u_\theta - \tan(\theta) \sin(\alpha) \times u_\alpha + (a_1 + a_4 V_y + 2a_3 V_x + 3a_6 V_x^2 + 2a_7 V_x V_y + a_8 V_y^2) \times u_{V_x} + (a_2 + a_4 V_x + 2a_5 V_y + a_7 V_x^2 + 2a_8 V_x V_y + 3a_9 V_y^2) \times u_{V_y}] / 2 \quad (11)$$

به عنوان مثال برای کالیبراسیون تراز با چرخش حول محور  $X$  عدم قطعیت کل برابر است با

$$u_c = \{ [0.5(1 + \tan^2(\theta)) \cos(\alpha) \times u_\theta]^2 + [0.5 \tan(\theta) \sin(\alpha) \times u_\alpha]^2 + [0.5(a_1 + a_4 V_y + 2a_3 V_x + 3a_6 V_x^2 + 2a_7 V_x V_y + a_8 V_y^2) \times u_{V_x}]^2 + [0.5(a_2 + a_4 V_x + 2a_5 V_y + a_7 V_x^2 + 2a_8 V_x V_y + 3a_9 V_y^2) \times u_{V_y}]^2 \}^{1/2} \quad (12)$$

معادلات مشابهی را می‌توان برای چرخش حول محور  $Y$  استخراج نمود. زاویه  $\theta$  (و یا  $\phi$ ) حاصل انحراف میز دقیق نسبت به سطح افق می‌باشند و وابسته به مشخصه‌های میکرومتر دیجیتال (تفکیک‌پذیری  $u_{H1}$  و دقت  $u_{H2}$ )، دقت تراز اولیه میز دقیق  $u_Z$  و دقت فاصله بین پایه‌های میکرومتر  $u_L$  می‌باشد ( $\tan(\theta) = H / L$ )؛ لذا عدم قطعیت زاویه پایه نسبت به سطح افق ( $u_\theta$ ) در رابطه (۱۱) را می‌توان از رابطه (۱۳) محاسبه نمود.

$$u_\theta^2 = \left[ \frac{\partial \theta}{\partial H} \right]^2 \times (u_{H1}^2 + u_{H2}^2) + \left[ \frac{\partial \theta}{\partial L} \right]^2 \times u_L^2 + u_Z^2 \quad (13)$$

- 1 Root-sum-of-squares
- 2 Combined standard uncertainty

وسيله اندازه‌گیری دیجیتالی [۲۰].

$$u_{\text{standard}} = \frac{1}{2} \text{Resolution} = 1 \text{ LSD} \quad (17)$$

برای تعیین عدم قطعیت کل اندازه‌گیری در فرایند کالیبراسیون، اثر عدم قطعیت هر کدام از عوامل براساس رابطه (۱۶) محاسبه شده و در رابطه (۱۳) قرار داده می‌شود. عوامل مؤثر بر عدم قطعیت عبارتند از:

۱- خطای حداقل حرکت (تفکیک‌پذیری) میکرومتر دیجیتالی (محاسبه در عدم قطعیت  $u_{H1}$ )

۲- خطای دقت میکرومتر در محدوده اندازه‌گیری (محاسبه در عدم قطعیت  $u_{H2}$ )

۳- دقت تراز اولیه سطح پایه دقیق بر روی میز گرانیات (محاسبه در عدم قطعیت  $u_Z$ )

۴- فاصله بین پایه‌های میکرومتر (محاسبه در عدم قطعیت  $u_L$ )

۵- خطای عدم همراستایی تراز و پایه دقیق (محاسبه در عدم قطعیت  $u_\alpha$ )

۶- خطای مولتی‌متر خواننده حسگر تراز (محاسبه در عدم قطعیت  $u_V$ ).

۷- ۱- عدم قطعیت خطای تنظیم زاویه ( $u_\theta$ )

با در نظر گرفتن فاصله بین میکرومترها برابر ۳۰۰ میلی‌متر، برای ایجاد زاویه ۲۰۰ میکرو رادیان، مقدار اختلاف ارتفاع میکرومترها باید برابر ۶۰ میکرومتر باشد. حداقل تفکیک‌پذیری میکرومتر دیجیتالی برابر  $1 \mu\text{m}$  ( $u_{H1}$ ) و دقت میکرومتر دیجیتالی در محدوده ۰-۲۵ mm برابر  $2 \mu\text{m} \pm$  ( $u_{H2}$ ) می‌باشد.

برای ایجاد زاویه 42arcsec با در نظر گرفتن فاصله بین میکرومترها  $(L = 300.00 \pm 0.01 \text{mm})$  و دقت ساخت پایه، خطای طول برابر ۱۰ میکرومتر ( $u_L$ ) برای فاصله ۳۰۰ میلی‌متری بین میکرومترها فرض گردید. دقت تراز زاویه افق پایه دقیق تراز بر روی میز گرانیات برابر تفکیک‌پذیری تراز الکلی دقیق مورد استفاده برای تراز اولیه سنگ گرانیات و پایه دقیق و برابر  $0.0005$  درجه (معادل  $\pm 0.00025$  درجه و یا  $\pm 4/36$  میکرو رادیان  $(u_Z)$ ) می‌باشد.

در نتیجه مقدار عدم قطعیت حاصل از تنظیم زاویه  $\theta$  بین  $a_\theta$  و  $-a_\theta$  می‌باشد که براساس رابطه (۱۳) و  $u_\theta$  عدم قطعیت استاندارد براساس رابطه (۱۶) برابرند با

$$a_\theta^2 = \frac{1}{(1 + \tan^2(\theta))^2} \left( \left[ \frac{1}{L} \right]^2 \cdot (u_{H1}^2 + u_{H2}^2) + \left[ \frac{H}{L^2} \right]^2 \times u_L^2 \right) + u_Z^2$$

$$a_\theta^2 = \frac{1}{(1 + \tan^2(0.0002))^2} \left( \left[ \frac{1}{300000} \right]^2 \times (1^2 + 2^2) + \left[ \frac{60}{300000} \right]^2 \times 10^2 \right) + 4.36^2$$

$$= 19.01$$

$$u_\theta = 4.36 / \sqrt{3} \mu\text{rad}$$

اختلاف محدود خطای برازش در دو رابطه اخیر به دلیل رفتار خطی حسگر دو جهته تراز در محدوده عملکرد اندازه‌گیری باشد. رفتار خطی حسگر تراز در دامنه ولتاژی عملکرد خود در محور  $X$  و  $Y$  به ترتیب در نمودارهای  $a_1$  الی  $a_3$  در شکل ۴ و شکل ۵ قابل ملاحظه می‌باشد.

عرض بازه خطا در بخش دوم از هر دو شکل ۴ و ۵، نشان‌دهنده تکرارپذیری نتایج می‌باشد که البته در این قسمت خطای ناچیز، نمایانگر آن است که تکرارپذیری در تراز و تجهیزات مورد نظر بسیار خوب می‌باشد. از جمله عواملی که سبب به وجود آمدن این عرض خطا در هر ایستگاه کاری می‌باشد، نویز و یا سایر عواملی است که در آزمون‌ها وجود داشته و به دلیل ناشناخته بودن و یا عدم توانایی در اندازه‌گیری، در محاسبات تحلیلی واردند. هرچه عرض بازه خطا در آزمون‌ها به نتایج تحلیلی ارائه شده در پیش‌بینی، نزدیکتر باشد این عوامل شناسایی نشده و یا نویز موجود در آزمون کمتر و ناچیز بوده‌اند.

با توجه به رفتار خطی حسگر در هر دو محور  $X$  و  $Y$ ، معادله (۴) شامل رابطه خطی در برگرفته ولتاژ هر دو محور با دقت  $2/16$  و  $1/68$  ثانیه قوسی به ترتیب برای محورهای فوق جهت اندازه‌گیری زاویه و کالیبراسیون تراز مد نظر قرار می‌گیرد.

برای تعیین رفتار حسگر و تعیین عدم قطعیت در اندازه‌گیری در فرایند کالیبراسیون، مشخصه‌های غیرخطی بودن حسگر باید تعیین گردد. معادله برازش منتخب شامل رابطه خطی متشکل از هر دو ولتاژ محور اصلی و فرعی به شکل رابطه‌های (۱۴) و (۱۵) می‌باشد.

$$\gamma_x (\text{Arcsec}) = 1.34 + 5.08V_x + 0.22V_y \quad (14)$$

$$\gamma_y (\text{Arcsec}) = -0.18 - 0.19V_x - 4.51V_y \quad (15)$$

در معادلات برازش خطی، خطای غیرخطی بودن با تقسیم قدرمطلق بیشترین اختلاف بر مقدار باند اندازه‌گیری حاصل می‌شود. با توجه به مقادیر خطا در جدول ۱ خطای غیرخطی بودن حسگر در محورهای  $X$  و  $Y$  به ترتیب برابر با  $1/56$  درصد و  $1/18$  درصد می‌باشد.

## ۷- محاسبه عدم قطعیت ابزار کالیبراسیون

برای تخمین عدم قطعیت پارامترهایی که در بازه تغییرات مشخص قرار دارند نیز، روش پیشنهادی مؤسسه ملی تکنولوژی و استاندارد (NIST) [۱۹] مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش مقدار عدم قطعیت (با فرض توزیع یکنواخت یا مستطیلی) بین دو مقدار  $a$  و  $-a$  تعیین می‌شود. در این صورت عدم قطعیت استاندارد برابر است با

$$u_{\text{standard}} = a / \sqrt{3} \quad (16)$$

در استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری دیجیتالی و آنالوگ در فرایند کالیبراسیون، عدم قطعیت به ترتیب برابر است با نصف تفکیک‌پذیری وسیله اندازه‌گیری آنالوگ و همچنین برابر است با کوچکترین مقدار قابل خواندن در

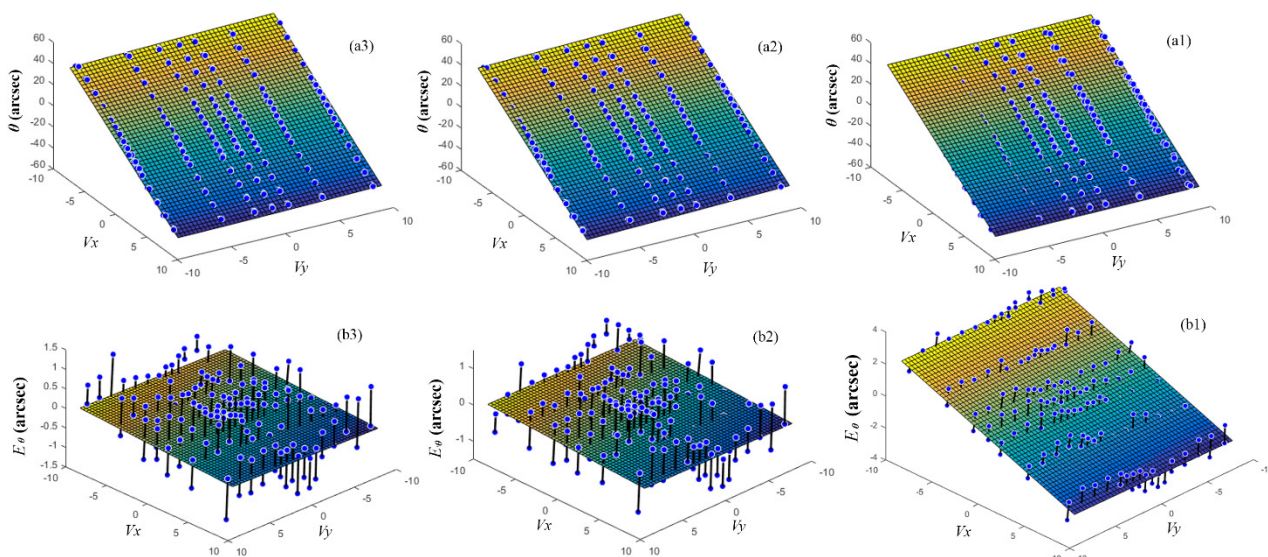


Fig. 4 Fitting curve for the angle of X-axis ( $\theta$ ) based on  $V_x$  and  $V_y$  ( $a_1$  to  $a_3$ ) and curve-fitting error for that angle ( $b_1$  to  $b_3$ ) associated with the equations 3 to 5

شکل ۴: نمودار برازش زاویه محور اصلی  $X$  ( $\theta$ ) بر حسب ولتاژ محور اصلی ( $V_x$ ) و فرعی ( $V_y$ ) ( $a_1$  الی  $a_3$ ) و خطای کالیبراسیون محور  $X$  ( $b_1$  الی  $b_3$ ) به ترتیب برای سه رابطه (۳) الی (۵)

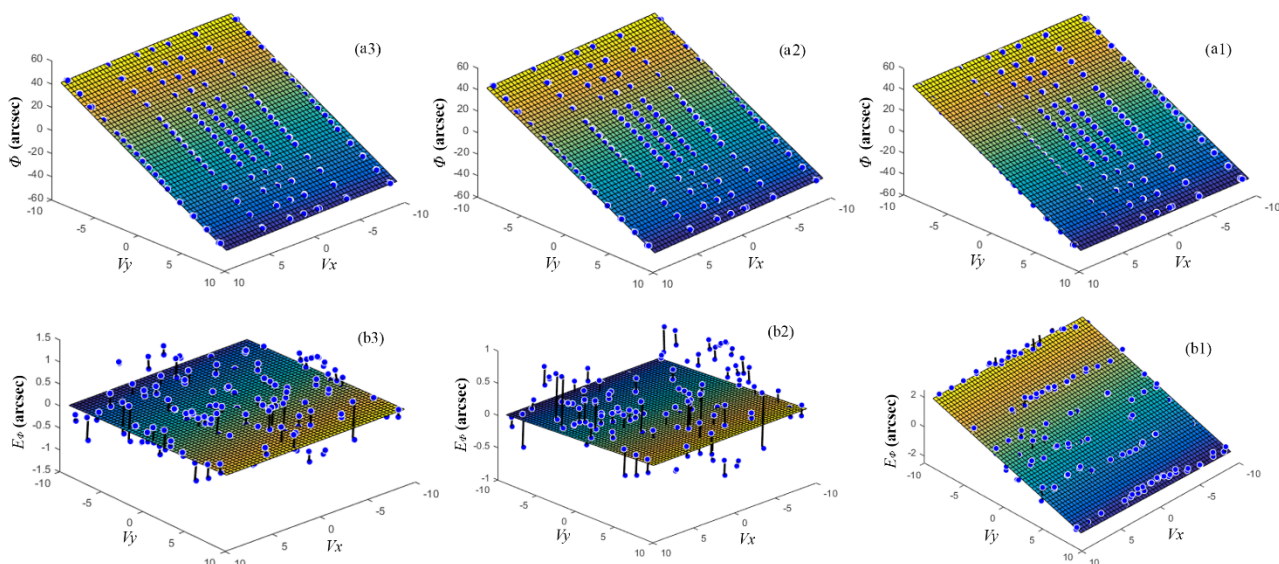


Fig. 5. fitting curve for the angle of Y-axis ( $\theta$ ) based on  $V_y$  and  $V_x$  and ( $a_1$  to  $a_3$ ) and curve-fitting error for that angle ( $b_1$  to  $b_3$ ) associated with the equations 3 to 5

شکل ۵: نمودار برازش زاویه محور اصلی  $Y$  ( $\theta$ ) بر حسب ولتاژ محور اصلی ( $V_y$ ) و فرعی ( $V_x$ ) ( $a_1$  الی  $a_3$ ) و خطای کالیبراسیون محور  $Y$  ( $b_1$  الی  $b_3$ ) به ترتیب برای سه رابطه (۳) الی (۵)

۷-۳- عدم قطعیت ابزار اندازه‌گیری ولتاژ ( $u_v$ )

ولتاژ توسط مولتی‌متر دیجیتال Hioki-3256-50 اندازه‌گیری شده است. دقت اندازه‌گیری ولتاژ DC آن برابر است با  $\pm 0.35\%$  و در نتیجه عدم قطعیت  $u_v$  حاصل از مولتی‌متر در دامنه ۱۰ ولت (در ارتفاع ۶۰ میکرومتری میکرومتر دیجیتال) براساس رابطه (۱۶) برابر است با

$$a_v = 0.0035 \times 10V = 35mV$$

$$u_v = 35 / \sqrt{3}mV$$

۷-۲- عدم قطعیت خطای عدم هم‌راستایی تراز و پایه دقیق ( $u_a$ )

در صورتی که هم‌راستایی تراز با محور اصلی پایه دقیق با خطای  $\pm 1^\circ$  انجام شود، بازه عدم قطعیت حاصل بین  $a_\alpha$  و  $-a_\alpha$  می‌باشد که  $a_\alpha$  براساس رابطه (۱۳) و  $u_\alpha$  عدم قطعیت استاندارد براساس رابطه (۱۶) برابرند با

$$a_\alpha = 0.017rad$$

$$u_\alpha = 0.017 / \sqrt{3}rad$$

$$u_{\lambda_g} = \frac{\sqrt{\zeta^2 u_{\eta}^2 + \eta^2 u_{\zeta}^2}}{2\sqrt{\eta\zeta}} \quad (19)$$

با توجه به آن که در طول مقاله پیش‌رو از روش میانگین حسابی استفاده شده است، محاسبه عدم قطعیت کل با روش میانگین هندسی نشان‌دهنده همان مقادیر می‌باشد. به عبارت دیگر، مقدار عدم قطعیت کل در کالیبراسیون زوایای صفر ( $u_c |_{\theta=0 \mu rad}$ ) و ۲۰۰ میکرورادیان ( $u_c |_{\theta=200 \mu rad}$ )، به ترتیب برابر ۱/۲۵۹ و ۱/۲۶۰ میکرو رادیان (در سطح اطمینان ۶۸٪) به دست آمده است. این مقادیر با دقت خوبی مشابه مقادیری است که با روش میانگین حسابی به دست آمده است. این مطلب با توجه به خطی بودن حسگر مورد استفاده و دقت بالای تجهیزات به کار گرفته شده قابل توجهی می‌باشد.

### ۸- بحث و تحلیل نتایج

در روش ISO-GUM به دلیل پرداختن به عوامل ایجاد خطا و تأثیر هر کدام در عدم قطعیت اندازه‌گیری، اولویت‌بندی عوامل جهت بهبود دقت کالیبراسیون تعیین می‌شود و برنامه‌ریزی فعالیت‌های اجرایی جهت بالا بردن دقت تجهیزات ابزار دقیق بر این اساس صورت می‌پذیرد.

عدم قطعیت کل اندازه‌گیری در فرایند کالیبراسیون تابعی از عوامل تأثیرگذار در عدم قطعیت اندازه‌گیری زاویه واقعی توسط پایه دقیق و عدم قطعیت در تعیین ولتاژ خروجی و برازش زاویه نهایی در مدار خواننده می‌باشد. از عوامل اثرگذار در عدم قطعیت در تنظیم و اندازه‌گیری زاویه واقعی توسط پایه می‌توان به تفکیک‌پذیری تنظیم پایه (برابر ۱ میکرو رادیان)، خطای میکرومتر دیجیتال در محدوده اندازه‌گیری خود (برابر  $\pm 1$  میکرو رادیان)، خطای تنظیم تراز بودن صفحه پایه (۰/۰۰۰۵ درجه) و ... اشاره نمود.

دقت اندازه‌گیری مولتی‌متر دیجیتال (یا مدار) مورد استفاده برای اندازه‌گیری ولتاژ و دقت ولتاژ تولید شده در منبع تغذیه مدار تحریک حسگر تراز مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در تعیین ولتاژ خروجی تراز می‌باشند.

همانطور که از نتایج عدم قطعیت در زوایای صفر و ۲۰۰ میکرو رادیان برمی‌آید، مقدار عدم قطعیت در هر دو زاویه حدوداً برابر با ۱/۲۶۰ میکرو رادیان معادل ۰/۵۲ ثانیه قوسی می‌باشد. به منظور افزایش دقت کالیبراسیون لازم است از ابزارهای دقیق‌تر در تنظیم و اندازه‌گیری ارتفاع پایه و خواندن ولتاژ خروجی استفاده نمود.

در تعیین روابط تحلیلی، به منظور ارتباط بین ولتاژ خروجی و زاویه تمایل تراز، رابطه‌های (۴) و (۵) دربرگیرنده ترم‌های ولتاژ هر دو محور  $X$  و  $Y$ ، دارای خطای کمتری در برازش نسبت به رابطه (۳) می‌باشند. در نتیجه می‌توان بیان داشت با توجه به رفتار خطی حسگر تراز استفاده از رابطه خطی دربرگیرنده ولتاژ هر دو محور خروجی برای تعیین ولتاژ مناسب می‌باشد. استفاده از روابط غیرخطی و با روابط چند جمله‌ای به دلیل بالا رفتن حجم محاسبات و کاهش سرعت پاسخ مدار دیجیتال در این موارد ضروری به نظر نمی‌رسد.

### جدول ۲: مقادیر و ضرایب عدم قطعیت و تأثیر هر کدام بر عدم قطعیت کل

Table 2. parameters uncertainty coefficients and its effects on combined standard uncertainty

منبع خطا	$u_V$	مقدار، $\mu rad$	ضریب	انحراف استاندارد $\mu rad$
دقت پایه کالیبراتور	$u_{\theta}$	$(4/36) / \sqrt{3}$	۰/۵	۱/۲۵۸
هم‌راستایی	$u_{\alpha}$	$1 / \sqrt{3}$ $(0/017)$ $1 / \sqrt{3}$	۰/۰۰۰۰۰۰۰۳	$\approx 0/00$
مولتی‌متر کل	$u_V$	$(0/035)$	۲/۵۴۲	۰/۰۵۱
کل (در سطح اطمینان ۶۸٪)	$u_c 68\%$	-	-	۱/۲۶۰
کل (در سطح اطمینان ۹۵٪)	$u_c 95\%$	-	-	۲/۵۱۸

با تعیین عدم قطعیت‌های سامانه موقعیت‌دهی (کالیبراتور) و سامانه خواننده ولتاژ (مولتی‌متر) حال می‌توان عدم قطعیت را در زاویه صفر (سطح تراز افق) و حد بالا عملکرد تراز برابر زاویه 42arcsec (معادل ۲۰۰ میکرو رادیان) تعیین نمود:

$$u_c |_{\theta=0 \mu rad} \approx \{ [0.5(1 + \tan^2 0) \cos(0.017) \times 4.36 / \sqrt{3}]^2 + [0.5 \tan(0) \sin(0.017) \times 0.017 / \sqrt{3}]^2 + [0.5(5.08) \times 0.035 / \sqrt{3}]^2 + [0.5(0.22) \times 0.035 / \sqrt{3}]^2 \}^{1/2}$$

مقدار عدم قطعیت کل در کالیبراسیون زوایای صفر ( $u_c |_{\theta=0 \mu rad}$ ) و ۲۰۰ میکرو رادیان ( $u_c |_{\theta=200 \mu rad}$ )، به ترتیب برابر ۱/۲۵۹ و ۱/۲۶۰ میکرو رادیان (در سطح اطمینان ۶۸٪) به دست آمده است. سهم هر کدام از عوامل به وجود آورنده عدم قطعیت در جدول ۲ (برای زاویه ۲۰۰ میکورادیان) ارائه گردیده است.

لازم به ذکر است که عدم قطعیت استاندارد محاسبه شده (۱/۲۶۰ میکرو رادیان برای زاویه ۲۰۰ میکرو رادیان) در سطح اطمینان ۶۸٪ بوده و برای به دست آوردن عدم قطعیت استاندارد در سطح اطمینان ۹۵٪ باید از ضریب پوشش  $k=2$  استفاده شود [۱۹]. بدین ترتیب مقدار مورد نظر دو برابر می‌گردد (۲/۵۱۸ میکرو رادیان برای زاویه ۲۰۰ میکرو رادیان).

در انتها برای مقایسه دو روش معرفی شده برای به دست آوردن عدم قطعیت کل در فرآیند کالیبراسیون (ترکیب با میانگین حسابی و هندسی در روابط (۷) و (۸))، با روش معرفی شده در مرجع [۱۹]، عدم قطعیت کل در روابط (۱۸) و (۱۹) محاسبه شده است.

$$u_{\lambda_{ii}} = \frac{\sqrt{u_{\eta}^2 + u_{\zeta}^2}}{2} \quad (18)$$

- 1 Confidence Level
- 2 Coverage Factor



## ۹- نتیجه گیری

در این مقاله طراحی و ساخت یک سامانه کالیبراسیون برای کالیبره کردن یک تراز دو جهته دقیق با طراحی و ساخت یک پایه با تفکیک پذیری میکرونی قابل تنظیم انجام گرفته است. در ادامه، رابطه بین خطای زاویه خروجی و کلیه عوامل مؤثر بر خطای آزمون استخراج شد تا به صورت تحلیلی، قابلیت اطمینان خروجی تخمین زده شود. در فرایند کالیبراسیون، زاویه واقعی توسط رابطه‌هایی با ولتاژ خروجی مدار خواننده تراز متناسب گردید. به منظور برازش بهتر منحنی و به حداقل رساندن خطا سه رابطه براساس ولتاژ خروجی در دو محور ارائه شد. همچنین خطای غیرخطی بودن رفتار سامانه و تکرارپذیری سامانه مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت مقدار خطا براساس اختلاف مقدار زاویه نشان داده شده توسط مدار خواننده تراز و مقدار تنظیم شده در پایه دقیق تعیین گردید. براینده نتایج به شرح زیر می‌باشد:

- در روابط کالیبراسیون هر محور تراز باید ولتاژ خروجی هر دو محور مورد استفاده قرار گیرد و در محدوده  $\pm 200$  میکرو رادیان عملکرد تراز الکترونیکی عدم قطعیت اندازه‌گیری برابر  $1/260$  میکرو رادیان می‌باشد.

- عدم قطعیت اندازه‌گیری تراز تابعی از عوامل اثرگذار در (۱) عدم قطعیت اندازه‌گیری زاویه واقعی توسط پایه دقیق و (۲) عدم قطعیت در تعیین ولتاژ خروجی و (۳) برازش زاویه نهایی در مدار خواننده در فرایند کالیبراسیون تراز است.

- عدم قطعیت در تنظیم و تعیین میکرومتر دیجیتال پایه دقیق و عدم قطعیت در اندازه‌گیری ولتاژ خروجی خواننده تراز تأثیرگذارترین عوامل خطا می‌باشند و بیشترین میزان عدم قطعیت در اندازه‌گیری را ایجاد می‌نمایند.

- با توجه به تأثیر خطای هر کدام از ابزارهای مورد استفاده در فرایند کالیبراسیون مانند پایه دقیق، میکرومتر دیجیتال، ابزار سنجش ولتاژ خروجی و ... به منظور افزایش دقت کالیبراسیون لازم است از ابزارهای دقیق‌تر در تنظیم و اندازه‌گیری ارتفاع پایه و خواندن ولتاژ ورودی استفاده نمود.

- با توجه به رفتار خطی حسگر تراز در محدوده اندازه‌گیری آن و خطای کمتر رابطه خطی دربرگیرنده ولتاژ هر دو محور  $X$  و  $Y$  ( $V_X$ ) و رابطه ( $V_Y$ ) (۴) به منظور برازش منحنی ولتاژ در فرایند کالیبراسیون و دیجیتال نمودن خروجی تراز پیشنهاد می‌گردد.

## فهرست علائم

$H$  ارتفاع میکرومتر دیجیتال،  $\mu\text{m}$

$L$  فاصله سر میکرومتر پایه دقیق،  $\text{mm}$

$u_H$  عدم قطعیت تنظیم ارتفاع میکرومتر دیجیتال،  $\mu\text{m}$

$u_j$  عدم قطعیت استاندارد،  $\mu\text{rad}$

$u_L$  عدم قطعیت فاصله بین پایه‌های میکرومتر،  $\mu\text{m}$

$u_V$  عدم قطعیت خوانش مولتی‌متر،  $V$

$u_Z$  عدم قطعیت دقت تراز اولیه سطح پایه دقیق،  $\mu\text{rad}$

$u_\alpha$  عدم قطعیت همراستایی تراز و پایه،  $\mu\text{rad}$

$u_\phi$  عدم قطعیت موقعیت‌دهی زاویه‌ای پایه دقیق،  $\mu\text{rad}$

$V_x$  ولتاژ خروجی چرخش حول محور  $x$ ،  $V$

$V_y$  ولتاژ خروجی چرخش حول محور  $y$ ،  $V$

## علائم یونانی

$\alpha$  زاویه خطا همراستایی تراز و پایه،  $\mu\text{rad}$

$\theta$  زاویه چرخش حول محور  $x$ ،  $\mu\text{rad}$

$\phi$  زاویه چرخش حول محور  $y$ ،  $\mu\text{rad}$

$\gamma_x$  تخمین زاویه چرخش حول محور  $x$ ،  $\mu\text{rad}$

$\gamma_y$  تخمین زاویه چرخش حول محور  $y$ ،  $\mu\text{rad}$

## مراجع

- [1] H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema, A. Weckenmann, R. Schmitt, F. Delbressine, Geometric error measurement and compensation of machines: an update, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 57(2) (2008) 660-675.
- [2] ISO/CDTR 230-11, Test code for machine tools, Part 11: *Measuring instruments suitable for machine tool geometry tests*, (2013) 1-12.
- [3] J. Dunicliff, *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*, Second Edition, New York: John Wiley & Sons, (1993).
- [4] <http://www.jewellinstruments.com>, *Electrolytic Tiltmeter Basics*, (2014).
- [5] <http://www.geomechanics.com>, A. Geomechanics, *Tiltmeters and Clinometers: Electrolytic Tilt Sensors*, (2009).
- [6] <http://www.frederickscom.com>, T. F. Company, Principals of operation: *Electrolytic tilt sensor signal conditioning*, (2014).
- [7] C. W. Kennedy, E. G. Hoffman, S. D. Bond, Inspection and gaging: a training manual and reference work that discusses the place of inspection in industry, *Industrial Press Inc.*, (1987).
- [8] B. Acko, Calibration of electronic levels using a special sine bar, *Precision Engineering*, 29(1) (2005) 48-55.
- [9] J. H. Lau, B. Y. Kuu, H. H. J.K.Li, A Comparative Study on Testing of Wide-Range Angles Precision 2-axis Digital Angular Measuring Instrument, *Innovation & Technology driven*, 29(1) (2011) 48-55.

- BIPM *Joint Committee for Guides in Metrology*, (2008).
- [15] ISO JCGM 101:2008, Guide to the expression of uncertainty in measurement: Propagation of distributions using a Monte Carlo method, *JCGM's publications*, (2008).
- [16] D. H. Parker, F. R. Schwab, J. W. Shelton, T. L. Weadon, Calibration and modeling of a dual-axis inclinometer, *Precision Engineering*, 29(3) (2005) 381-385.
- [17] <http://www.geomechanics.com>, A. Geomechanics, *Electrolytic Tilt Sensors*, (2015).
- [18] P. R. Bevington, D. K. Robinson, *Data reduction and error analysis for the physical sciences*, First Edition, McGraw-Hill, (2003).
- [19] B. N. Taylor, Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results, *DIANE Publishing Company*, (2009).
- [10] A. Piratelli-Filho, B. Di Giacomo, Uncertainty evaluation in small angle calibration using ISO-GUM approach and Monte Carlo method, *XVII IMEKO word congress*, Dubrovnik, Croatia, (2003).
- [11] H. Woschitz, K. Macheiner, Static and kinematic testing of tiltmeters: facilities and results, *Vermessung & Geoinformation*, 2(2) (2007) 134-142.
- [12] [www.geomechanics.com](http://www.geomechanics.com), Model 791 *Calibration Plate for Tiltmeters and Inclinometers*, (2015).
- [13] D. Theodorou, L. Meligotsidou, S. Karavoltsos, A. Burnetas, M. Dassenakis, M. Scoullas, Comparison of ISO-GUM and Monte Carlo methods for the evaluation of measurement uncertainty: *Application to direct cadmium measurement in water by GFAAS*, *Talanta*, 83(5) (2011) 1568-1574.
- [14] ISO JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data- Guide to the expression of uncertainty in measurement,

Please cite this article using:

M. Ghafarzade, A. Kamali E. , R. Abedini, R. Rajabi, M. Tavakoli K., A., Design and Construction of an Electronic Tiltmeter Calibrator and Estimation of Calibration Uncertainty, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(5) (2018) 1113-1122.  
DOI: 10.22060/mej.2017.12144.5294

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

