

# ارزیابی روش‌های SPS، RLS و MP در کالیبراسیون MEMS\_IMU

فرزاد جواهری\*<sup>۱</sup>، محمد سعادت سرشت<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نقشه‌برداری، فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران  
farzadjavaheeri@ut.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران  
msaadat@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت دی ۱۳۹۵، تاریخ تصویب تیر ۱۳۹۶)

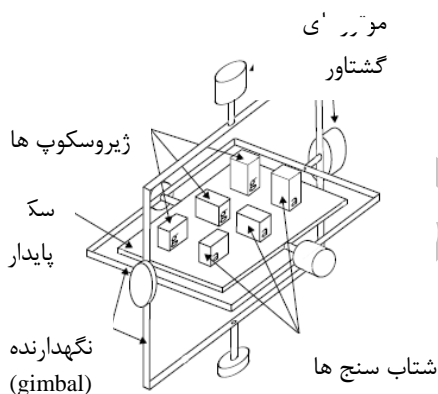
## چکیده

تاریخچه واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU) به سال ۱۹۳۰ میلادی برمی‌گردد. در آن زمان این فناوری به دلیل محدودیت‌های جدی در اندازه، هزینه و مصرف انرژی، قابل بکارگیری در دستگاه‌های کوچک و استفاده عموم نبوده است. پیشرفت‌های اخیر سنجنده‌های واحد اندازه‌گیری اینرسی از نوع میکروالکترومکانیکی (MEMS) که بسیار سبک‌تر، کوچک‌تر و ارزان‌تر از دیگر انواع سیستم‌های اینرسی می‌باشند. اما با این وجود این سیستم‌ها نسبت به سیستم‌های اینرسی دیگر دقت پایین‌تری دارند. بنابراین برای بهبود در عملکرد و دقت مشاهدات، سیستم‌های اینرسی نیاز به کالیبراسیون دارند. در این مقاله در ابتدا به معرفی انواع سیستم‌های اینرسیایی و تمرکز بیشتر بر روی سیستم‌های مبتنی بر میکروالکترومکانیکی پرداخته شده است و مدل ریاضی مورد استفاده که در آن خطاهای بایاس، فاکتور مقیاس و عدم تعادل محورها قرار گرفته است. در ادامه راهکارهای برای کالیبره سازی سیستم‌های اینرسیایی بصورت استاتیک ارائه شده است. که این روش‌ها به ترتیب شش موقعیت استاتیک (SPS)، چند موقعیتی (MP) و کمترین مربعات بازگشتی (RLS) می‌باشند که منجر به تعیین پارامترهای خطای واحد اندازه‌گیری اینرسیایی می‌شوند. در این پژوهش از نرم افزار OARS استفاده شده است، یک سیستم جمع‌آوری داده توسعه یافته بر روی سیستم عامل آندروید می‌باشد. نتایج روش‌های پیشنهادی نشان دادند که اولاً در مدل ریاضی با ۱۲ پارامتر وابستگی بالای بین پارامترها نسبت به مدل ریاضی با ۹ پارامتر وجود دارد. ثانیاً اگر از مشاهدات خام با یک وضعیت خاص ابتدا میانگین گرفته شود و این مقادیر وارد معادلات گردد نتایج بهتری دارد نسبت به وارد کردن مشاهدات خام یا مشاهداتی که به روش تبدیل موجک گسسته نویزشان حذف شده است. مقادیر خطا واحد اندازه‌گیری در روش چند موقعیتی در این سه حالت به ترتیب بدست آمده است.  $m/s^2$  ۰,۰۸۲۹۵۲ و ۰,۰۸۳۱۴۰،  $m/s^2$  ۰,۰۸۲۳۴۵ و ۰,۱۶۱۵۲۰،  $m/s^2$  ۰,۱۴۶۲۴۵ و ۰,۰۸۲۳۴۵. ثالثاً نتایج مقدار خطا واحد اندازه‌گیری در سه روش پیشنهادی به ترتیب پارامترهای کالیبراسیون نشان می‌دهد که روش چند موقعیتی از دو روش دیگر بهتر عمل کرده است.

**واژگان کلیدی:** کالیبراسیون، سیستم ناوبری اینرسیال، شتاب‌سنج، ژيروسکوپ، میکروالکترومکانیکی، موجک، آندروید

## ۱- مقدمه

صورت می‌گیرد، قاب جهانی گفته می‌شود. البته از طرفی دیگر می‌توان سیستم‌های اینرسی را به دو دسته تقسیم کرد: شش محوره و نه/ده محوره. سیستم‌های اینرسی سکوی پایدار حسگرهای اینرسی بر روی یک سکو که از هر حرکت دورانی خارجی جدا شده است نصب شده‌اند. به عبارت دیگر سکو در هماهنگی با قاب جهانی قرار می‌گیرد. همانطور که در شکل (۱) می‌بینید. در سیستم‌های strap down حسگرهای اینرسی بر روی دستگاه نصب شده است و بنابراین مقادیر خروجی در قاب بدنه به جای قاب‌های جهانی اندازه‌گیری می‌شود [۱،۴]. برای جهت‌یابی از سیگنال‌های دریافتی ژيروسکوپ با یکبار انتگرال‌گیری محاسبه می‌شود و برای ردیابی موقعیت، سه سیگنال شتاب‌سنج از طریق جهت‌یابی ژيروسکوپ، به مختصات جهانی انتقال یافته و با دو بار انتگرال‌گیری محاسبه می‌گردد. سکو پایدار و سیستم‌های strap down هر دو در اصول اساسی یکسان هستند. با این تفاوت که سیستم‌های strap down پیچیدگی مکانیکی را کاهش داده و پایداری فیزیکی کمتری از سیستم سکو پایدار دارند [۱،۴].



شکل ۱- IMU با سکوی پایدار

## ۱-۲- ژيروسکوپ

ساختمان ژيروسکوپ به سه حالت اپتیکی، مکانیکی و میکروالکترومکانیکی می‌باشد. در این بخش به شرح ژيروسکوپ‌های میکروالکترومکانیکی پرداخته می‌شود. برای بررسی بیشتر در زمینه انواع ژيروسکوپ‌ها و جزئیات آن‌ها می‌توان به منبع [۲]، مراجعه نمود. با وجود سال‌ها توسعه در ژيروسکوپ‌های مکانیکی و نوری، هنوز هم بواسطه تعداد بالای قطعات حساس و گران‌قیمت این سیستم‌ها، بکارگیری این سیستم‌ها در بسیاری از کاربردها

تاریخچه واحد اندازه‌گیری اینرسی<sup>۱</sup> به سال ۱۹۳۰ میلادی برمی‌گردد که در نوابری سیستم‌های بزرگ مورد استفاده قرار می‌گرفت. در آن زمان این فناوری به دلیل محدودیت‌های جدی آن در اندازه و هزینه قابل بکارگیری در دستگاه‌های کوچک و استفاده عموم نبوده است. پیشرفت‌های اخیر در بهبود عملکرد سیستم‌های اینرسی مبتنی بر سیستم میکروالکترومکانیکی<sup>۲</sup> که بسیار سبکتر، کوچکتر و ارزاتر از قبل شده‌اند، باعث شده است که امروزه بکارگیری آن‌ها در انواع دستگاه‌های کوچک مانند تلفن‌های همراه هوشمند<sup>۳</sup> مورد توجه قرار گیرد [۴]. در این رابطه، برای دسترسی به داده‌های دقیق‌تر در تعیین موقعیت و وضعیت توسط سنجنده‌های واحد اندازه‌گیری اینرسی به خصوص برای مقاصد نوابری اینرسی باید آن‌ها را کالیبره نمود. از این رو این مقاله با هدف ارائه و مقایسه سه روش شش موقعیت استاتیک<sup>۴</sup>، کمترین مربعات بازگشتی<sup>۵</sup> و چند موقعیتی<sup>۶</sup> برای کالیبراسیون سیستم اینرسی در حالت استاتیک نوشته شده است و بطور عمده تمرکز بر سنجنده‌های واحد اندازه‌گیری اینرسی از نوع strap down مبتنی بر سیستم میکروالکترومکانیکی دارد.

## ۱-۱- پیکربندی سیستم‌های اینرسیایی

واحد اندازه‌گیری اینرسی به طور معمول از دو سنجنده شتاب‌سنج<sup>۷</sup> و ژيروسکوپ<sup>۸</sup> تشکیل می‌شود. البته گاهی سنجنده کمکی دیگر مانند مغناطیس‌سنج و بارومتر نیز به سیستم‌های اینرسی اضافه می‌شود که هدف آن‌ها بهبود در داده‌های سیستم می‌باشد. تقریباً تمام سنجنده‌های اینرسی در یکی از دو دسته مشخص شده زیر قرار می‌گیرند: سکوی پایدار<sup>۹</sup> و strap down، تفاوت بین این دو دسته به چارچوب مرجعی که در آن ژيروسکوپ و شتاب سنج عمل می‌کنند برمی‌گردد. در سراسر این پژوهش به قاب سیستم نوابری مرجع به عنوان قاب بدنه و به چارچوب مرجع که در آن نوابری

<sup>۱</sup> Inertial Measurement Unit

<sup>۲</sup> Micro Electro Mechanical

<sup>۳</sup> Smart Mobile

<sup>۴</sup> Six Position Static

<sup>۵</sup> Recursive Least Square

<sup>۶</sup> Multi Position

<sup>۷</sup> Accelerometer

<sup>۸</sup> Gyroscope

<sup>۹</sup> Stabilized

زاویه‌ای  $\omega$  و وزن  $m$  در حال حرکت با سرعت  $v$  شتاب آن با معادله (۱) محاسبه می‌گردد [۲،۳].

$$F_c = -2m(\omega \times v) \quad (1)$$

در جدول (۱) منابع خطای ژيروسکوپ‌های میکرو-الکترومکانیکی توضیح داده شده است.

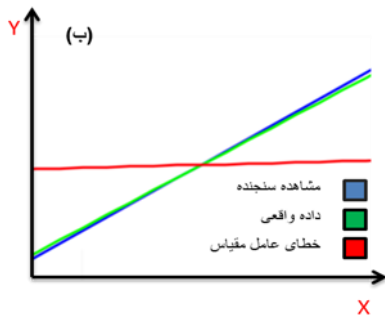
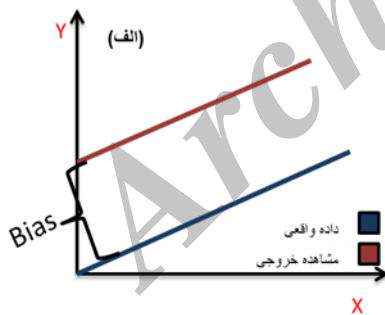
جدول ۱- منابع خطای ژيروسکوپ و شتاب‌سنج میکروالکترومکانیکی

نوع خطا	توضیح خطا
بایاس	بایاس ثابت (E)
نویز سفید	نویز سفید با انحراف معیار $\sigma$
اثرات دما	دما وابسته به بایاس باقیمانده
کالیبراسیون	خطای قطعی شامل فاکتور مقیاس، خطی سازی ژيروسکوپ و عدم تعادل

بنابراین در بخش بعد در ابتدا از مدل ریاضی برای کالیبراسیون سیستم اینرسی و بعد از آن روش‌های مختلف برآورد پارامترهای کالیبراسیون بیان می‌گردد [۵].

## ۲- روش‌های پیشنهادی

در این بخش از مقاله در ابتدا مدل ریاضی مورد استفاده و بعد از آن روش‌های مختلف برای بهبود دقت در تعیین پارامترهای وضعیت، سرعت و دوران (پارامترهای ناوبری) توسط سیستم‌های اینرسیایی ارزان قیمت مورد بحث قرار می‌گیرد.



غیر عملی و غیر اقتصادی است. در مقابل، ژيروسکوپ‌های میکروالکترومکانیکی بسیار کوچک بوده و تولید آنها ارزان تمام می‌شود. ژيروسکوپ‌های میکروالکترومکانیکی با استفاده از اثر کوریولیس عمل می‌کنند، که در یک چارچوب یا فریم مرجع چرخش یک جرم با سرعت

## ۱-۳- شتاب‌سنج

ساختمان شتاب‌سنج‌ها معمولاً به سه صورت دستگاه مکانیکی، دستگاه حالت جامد<sup>۱</sup> و یا میکروالکترومکانیکی است. در این بخش بر روی سیستم‌های میکروالکترومکانیکی تمرکز می‌شود. برای بررسی بیشتر در زمینه انواع شتاب‌سنج‌ها و جزئیات آنها می‌توان به منبع [۲]، مراجعه نمود. شتاب‌سنج میکروالکترومکانیکی با استفاده از فناوری میکرو ماشین‌کاری سیلیکونی<sup>۲</sup> ساخته شده است. مزایای استفاده از دستگاه‌های میکروالکترومکانیکی در بخش قبل ذکر شده است. که شامل کوچک، سبک، مصرف توان کم و راه‌اندازی سریع می‌باشد. نقطه ضعف اصلی آنها این است که در حال حاضر دقت آن کمتر از شتاب‌سنج‌های مکانیکی و حالت جامد است اما این نقیصه به سرعت در حال بهبود است. در جدول (۱) منابع خطای شتاب‌سنج‌های میکروالکترومکانیکی به اختصار توضیح داده شده است [۲،۳].

## ۱-۴- کالیبراسیون واحد اندازه‌گیری اینرسی

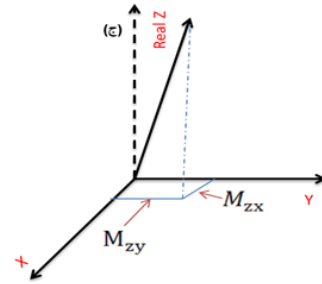
همان‌طور که می‌دانیم واحد اندازه‌گیری اینرسی مبتنی بر سیستم‌های میکروالکترومکانیکی دارای دقت پایین می‌باشند. بنابراین برای بهبود عملکرد سیستم‌های اینرسیایی برای تعیین پارامترهای ناوبری نیاز به کالیبراسیون این سیستم‌ها می‌باشد. اولین گام در یک فرآیند کالیبراسیون، مدل سازی رابطه بین اندازه‌گیری و اطلاعات مرجع است.

<sup>۱</sup> Solid State  
<sup>۲</sup> Micro Machined Silicon

در معادلات بالا  $l$  و  $a$  به ترتیب مشاهدات خروجی از سنجنده واحد اندازه‌گیری اینرسی و مقادیر واقعی آن می باشد و به ترتیب پارامترهای بایاس، فاکتور مقیاس در سه محور اندازه‌گیری سنجنده در معادلات (۲) و (۳) با  $B$  و  $S$  نشان داده شده است و در آخر  $M$  پارامترهای عدم تعامد بین سه محور سیستم اینرسیایی می باشند. البته بین ۶ پارامتر مربوط به عدم تعامد محورها وابستگی وجود دارد، این وابستگی سبب عدم صحت پارامترهای کالیبراسیون می شود. میزان وابستگی بین این پارامترها را با ضریب همبستگی<sup>۴</sup> نمایش می دهند. بنابراین این ۶ پارامتر تبدیل به ۳ پارامتر می شود. بنابراین معادله (۲) تبدیل به معادله (۳) می شود. به همین علت در روش لی و همکاران در سال ۲۰۱۱ و همچنین در روش ویتولد ایلاویچ و الکساندر نولاچ در سال ۲۰۱۳ از مدل ۱۲ پارامتر استفاده شده است. که می توان از معایب این نوع از روش‌ها بیان کرد.

## ۲-۲- مشاهدات ورودی

در این بخش به نحوه اعمال اطلاعات به معادلات کالیبراسیون سیستم اینرسی بررسی خواهد شد. که در این مقاله سه حالت مشاهدات خام، مشاهدات میانگین گرفته شده و مشاهدات بدون نویز که نویز آن‌ها به روش موجک حذف گردیده است. مشاهدات خام که همان مشاهدات برداشت شده توسط سیستم اینرسی می باشد. مشاهدات میانگین گرفته شده با این فرض بیان می شود که وقتی سنجنده ای در حالت ساکن مشاهده جمع‌آوری می کند. از یک مشاهده به صورت تکراری اطلاعات جمع‌آوری می کند. پس می توان از مشاهدات میانگین گرفت و با توجه به فرض ماتریس وارپانس کوواریانس مشاهده سیستم اینرسی در هر حالت خاص نیز محاسبه کرد. که در این حالت دیگر احتیاج نمی شود که ماتریس وزن در روش‌های کالیبراسیون را یک فرض کرد بلکه می توان از معکوس ماتریس وارپانس کوواریانس آن به عنوان ماتریس وزن هر مشاهده استفاده کرد. در آخر مشاهداتی که به روش تبدیل موجک گسسته<sup>۵</sup> نویز آن‌ها حذف شده است. در روش تبدیل موجک گسسته مانند تبدیل فوریه<sup>۶</sup> می باشد با این تفاوت که سرعت بالاتر دارد و



شکل ۳- (الف) خطای بایاس، (ب) خطای ایجاد شده در خروجی سنجنده توسط فاکتور مقیاس، (ج) نمایش عدم تعامد بین محور Z و صفحه XY

## ۲-۱- مدل ریاضی مورد استفاده

با توجه به نحوه اندازه‌گیری مشاهدات در سیستم‌های ناوبری اینرسیال می توان خطاها را به سه نوع اصلی بایاس<sup>۱</sup>، فاکتور مقیاس<sup>۲</sup> و عدم تعامد<sup>۳</sup> بین محورها تقسیم کرد [۶،۷،۸،۹،۱۰،۱۱].

بایاس برای شتاب‌سنج و ژيروسکوپ به ترتیب، خطا در اندازه‌گیری، بدون در نظر گرفتن نیروها و یا نرخ وارد بر روی سنجنده می باشد. خطای فاکتور مقیاس رابطه بین خروجی یک سنجنده با نیرو یا نرخ وارده بر سنجنده را بیان می کند. به عبارت دیگر این خطا تفاوت شیب بین مشاهده ایده‌آل و خروجی سنجنده را نشان می دهد و در سیستم‌های ناوبری اینرسیال شیب خطی در مشاهدات تولید می شود. عدم تعامد بین محورها خطای ناشی از نقص در ساخت و ساز و عدم هم ترازی سه محور اندازه‌گیری در شتاب‌سنج و یا ژيروسکوپ می باشد [۱۰،۱۱،۱۲]. همان‌طور که در شکل (۳) می بینید عدم تعامد بین محور Z و دو محور X و Y سبب خطا در مقدار مشاهده در محور Z می شود. با توجه به مباحث بالا مدل ریاضی برای کالیبراسیون واحد اندازه‌گیری اینرسی به صورت معادله (۲) یا (۳) در می آید.

$$\begin{bmatrix} l_{ax} \\ l_{ay} \\ l_{az} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & S_y & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & S_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} l_{ax} \\ l_{ay} \\ l_{az} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ M_{yx} & S_y & 0 \\ M_{zx} & M_{zy} & S_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ M_{yx} & S_y & 0 \\ M_{zx} & M_{zy} & S_z \end{bmatrix}^{-1} \times \left\{ \begin{bmatrix} l_{ax} \\ l_{ay} \\ l_{az} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \right\} \quad (4)$$

<sup>۴</sup> Correlation Coefficient  
<sup>۵</sup> Discrete Wavelet Transform  
<sup>۶</sup> Fourier Transform

<sup>۱</sup> Bias  
<sup>۲</sup> Scale Factor  
<sup>۳</sup> Misalignment and Non-orthogonality

بین خروجی دستگاه با اطلاعات مرجع شناخته می‌باشد. برای برآورد پارامترهای خطا، در این مقاله از سه روش شش موقعیت استاتیک، چند موقعیتی و کمترین مربعات بازگشتی استفاده می‌شود.

### ۲-۳-۱- روش شش موقعیت استاتیک (SPS)

در این روش دستگاه باید بر روی یک سطح مسطح و در یک قاب تراز قرار گیرد و هر سه محور سیستم اینرسی به تناوب در جهت بالا و پایین قرار گیرد [۱۶، ۸، ۶]. برای یک سنجنده واحد اندازه‌گیری اینرسی این کار باید برای هر سه محور صورت گیرد، که در مجموعه شش حالت اندازه‌گیری خواهد شد. در این روش بایاس، فاکتور مقیاس و عدم تعادل بین سه محور را از تبدیل معادله (۳) به معادله (۵) می‌توان بدست آورد. می‌توان بیان کرد که دقت در این روش وابستگی زیادی به تراز بین محورهای سنجنده و قاب محلی دارد.

$$\begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & & \\ & A_2 & \\ & & A_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & & \\ & A & \\ & & A \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

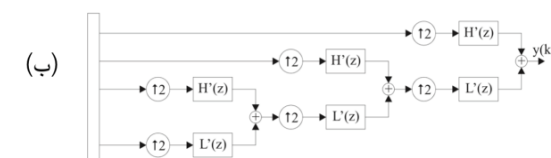
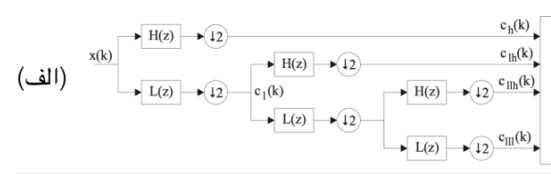
$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ g \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}, \dots \quad (7)$$

در معادلات (۷) شش حالت متفاوت برای شتاب‌سنج نمایش داده شده است. برای محاسبه درایه های ماتریس پارامترهای خطا با توجه به اینکه معادله (۶) از فرم  $l = AX$  تبعیت می‌کند. پس می‌توان با استفاده از کمترین مربعات پارامتریک خطی پارامترهای خطا را محاسبه کرد.

$$X = (A^t \times P \times A)^{-1} \times A^t \times P \times L \quad (8)$$

در معادله (۸)  $L$  ماتریس مشاهدات و  $P$  ماتریس وزن مشاهدات می‌باشد. باید در این روش به این نکته اشاره داشت

نیاز به تابع سینک<sup>۱</sup> ندارد [۱۶، ۱۳]. تبدیل موجک گسسته از دو بخش تشکیل می‌شود که در بخش اول با توجه به تعداد سطوح مورد نظر ابتدا سیگنال ورودی به وسیله دو فیلتر بالاگذر<sup>۲</sup> و پایین‌گذر<sup>۳</sup> به دو سیگنال تبدیل می‌شود. بعد از آن در هر مرحله سیگنال تولید شده از فیلتر پایین‌گذر مرحله قبل بعد از یک نمونه‌برداری کاهش<sup>۴</sup> با دو فیلتر بالاگذر و پایین‌گذر دوباره به دو سیگنال تبدیل می‌شود. که این روش به تقریب چند مقیاسی<sup>۵</sup> (MSA) معروف است. بخش دوم همان بازسازی سیگنال است. که از سیگنال های تولید شده توسط فیلترهای بالاگذر و سیگنال تولیدی از فیلتر پایین‌گذر سطح آخر به صورت شکل (۴) بازسازی می‌شود [۱۶، ۱۴، ۱۳].



شکل ۴- نمایش سیستم موجک با سه سطح (الف) تقریب چند مقیاسی (ب) بازسازی سیگنال [۱۳]

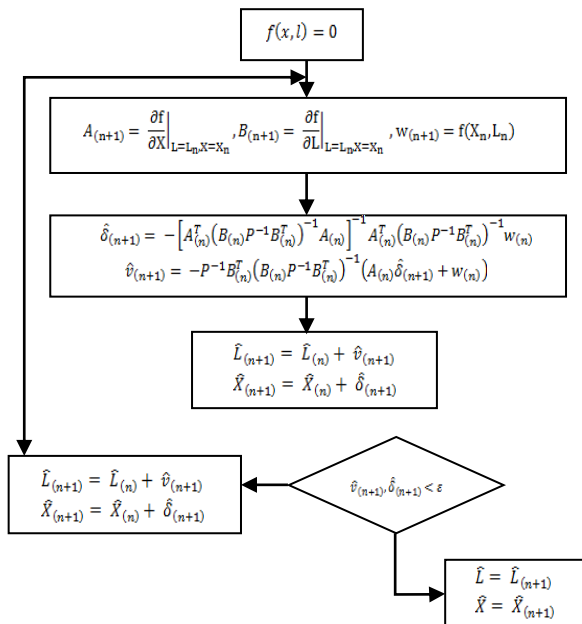
در شکل (۴) یک سیستم موجک گسسته با سه سطح نمایش داده شده است. در تصویر (۴) فیلتر بالاگذر  $H(z)$  و فیلتر پایین‌گذر  $L(z)$  هر کدام تشکیل دهنده نصف سیگنال اصلی می‌باشند. (۲ ↓) نمایش نمونه‌برداری کاهش<sup>۴</sup> و (۲ ↑) نمایش نمونه‌برداری افزایش<sup>۶</sup> می‌باشند.  $c(k)$  نمایش دهنده سیگنال تولیدی از نمونه‌برداری کاهش سیگنال فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر می‌باشد.  $x(k)$  و  $y(k)$  به ترتیب سیگنال اولیه و سیگنال بدون نویز می‌باشند.

### ۲-۳- انواع روش‌های کالیبراسیون

کالیبراسیون ابزار اینرسی برای کاهش خطا در محاسبه اندازه‌گیری پارامترهای ناوبری مورد نیاز است. کالیبراسیون به عبارتی دیگر مقایسه و تعیین پارامترهای

۱ Sinc Function  
 ۲ High Pass Filter  
 ۳ Low Pass Filter  
 ۴ Downsampling  
 ۵ Approximation Multiscale  
 ۶ Upsampling

معادلات با استفاده از مقدار برآورد شده مشاهدات و مجهولات در هر یک می‌باشد.



شکل ۵- فلوجارت سرشکنی با روش ترکیبی

### ۲-۳-۳- روش کمترین مربعات بازگشتی (RLS)

حداقل مربعات بازگشتی یک فیلتر انطباقی<sup>۱</sup> که به صورت بازگشتی مجهولاتی که تابع هزینه (مجموع مربعات باقیمانده‌ها) مربوط به سیگنال‌های ورودی را به حداقل می‌رساند پیدا می‌کند. که شامل الگوریتم‌های دیگری مانند کمترین مربعات می‌شود. در حداقل مربعات بازگشتی، سیگنال‌های ورودی قطعی در نظر گرفته می‌شوند، در حالی که برای کمترین مربعات و الگوریتم شبیه آن‌ها سیگنال‌های ورودی تصادفی در نظر گرفته می‌شود. در مقایسه با بسیاری از رقبا خود، همگرایی حداقل مربعات بازگشتی بسیار سریع می‌باشد [۷]. در این روش نیز مانند روش شش موقعیت استاتیک در ۶ وضعیت مشخص که مقدار واقعی یا مرجع آن-ها نیز معلوم می‌باشد، استفاده می‌گردد. روش حداقل مربعات بازگشتی به شرح زیر مدل می‌شود. حال با تبدیل شکل معادله (۴) به معادله (۹) می‌توان با استفاده از معادلات (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) پارامترهای ماتریس  $\Phi$  را محاسبه کرد.

$$Z = H\Phi \quad (9)$$

که در معادله (۹) ماتریس  $H$  به عنوان ماتریس مشاهدات ارجاع داده می‌شود،  $\Phi$  ماتریس مجهولات و

<sup>۱</sup> Adaptive filter

که برای جمع‌آوری داده ژيروسکوپ در این روش به دستگامی با دقت بالا نیاز است، که سرعت زاویه‌ای ثابتی بر واحد اندازه-گیری اینرسیایی وارد کند. بنابراین در این مقاله این روش فقط بر روی سنجنده شتابسنج آزمایش شده است.

### ۲-۳-۲ روش کالیبراسیون چند موقعیتی (MP)

این روش کالیبراسیون از این واقعیت استفاده می‌کند، که صرف نظر از جهت واحد اندازه‌گیری اینرسی، برآیند مقادیر مشاهده شده توسط شتابسنج و ژيروسکوپ در حالت ساکن به ترتیب برابر با گرانش و سرعت چرخش زمین می‌باشد. بنابراین معادلات (۱۷) و (۱۸) در صورت نبود هیچ خطای برابر با مقدار صفر خواهند بود [۸، ۱۱].

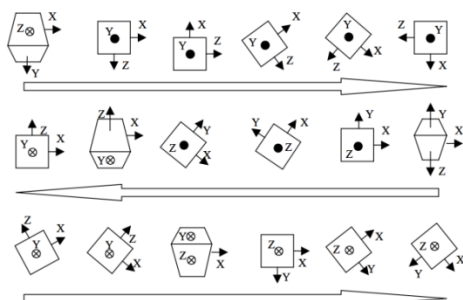
$$f_g = \sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2} - g \quad (17)$$

$$f_\omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2} - \omega_{ie} \quad (18)$$

در معادلات (۱۷) و (۱۸) مقادیر  $g$  و  $\omega_{ie}$  مقادیر واقعی جاذبه محلی زمین و سرعت زاویه‌ای دوران زمین می‌باشند. که مقدار جاذبه محلی زمین با استفاده از عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح مینا، محل اندازه‌گیری مشاهدات بدست می‌آید. حال با توجه به وجود خطاهای بایاس، فاکتور مقیاس و عدم تعادد بین محورها و یا به عبارت دیگر مدل ریاضی بین مقادیر واقعی مشاهدات و مقدار مشاهده شده، می‌توان مقادیر هر یک از محورهای شتابسنج و ژيروسکوپ در معادلات (۱۷) و (۱۸) را با استفاده از معادله (۳) بر پایه مقادیر مشاهده شده توسط سیستم اینرسی نوشت.

حال با مشخص شدن مدل ریاضی و به دلیل این‌که مدل ریاضی از مدل  $f(x, l) = 0$  تابعیت می‌کند. که در این معادله  $x$  نشان‌دهنده مجهولات (پارامترهای کالیبراسیون) و  $l$  مشاهدات خروجی سنجنده می‌باشد. می‌توان با استفاده از سرشکنی ترکیبی و خطی سازی معادله بر پایه مجهولات و مشاهدات پارامترهای کالیبراسیون را بدست آورد. در شکل (۵) فلوجارت کمترین مربعات به روش ترکیبی را می‌توان دید. در تصویر (۵) ماتریس  $A$  نمایش‌دهنده مشتق از معادلات نسبت به مجهولات، ماتریس  $B$  نمایش‌دهنده مشتق از معادلات نسبت به مشاهدات می‌باشد و بردار  $W$  مقدار برآورد شده

جمع‌آوری داده با ویژگی یکسان نیاز می‌باشد و در روش سوم نیز به جمع‌آوری داده در چند وضعیت مختلف نیاز است. در روش شش موقعیت استاتیک و کمترین مربعات بازگشتی نیاز به مشاهداتی می‌باشد، که مقدار واقعی آن‌ها نیز مشخص باشد. برای شتاب‌سنج وضعیت‌ها با مقدار واقعی مشاهدات در جدول (۲) آمده است [۷،۸]. همان‌طور که توضیح داده شد، به علت نبود دستگاهی با دقت بالا برای اعمال سرعت زاویه‌ای ثابت به سیستم اینرسیایی داده برای ژيروسکوپ در این آزمایش جمع‌آوری نشده است. در روش چند موقعیتی، اگرچه در سیستم‌های اینرسیایی محور در قاب محلی قرار دارند. ولی برای جلوگیری از سینگولاریتی در محاسبه معکوس ماتریس نرمال به حداقل ۹ وضعیت مختلف برای سیستم اینرسیایی در زمان اندازه‌گیری نیاز است. با توجه به اینکه واحد اندازه‌گیری اینرسی دارای ۶ وجهه، ۱۲ پال و ۸ راس می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت ۲۶ وضعیت مختلف برای سیستم اینرسیایی وجود دارد [۱۲]. در شکل (۶) ۱۸ وضعیت مختلف از واحد اندازه‌گیری اینرسی را می‌توان دید.



شکل ۶- نمایش ۱۸ وضعیت مختلف از یک واحد اندازه‌گیری اینرسیایی [۱۳]

ماتریس Z به عنوان ماتریس مشاهدات، مستقل از متغیرها می‌باشد. معادله تعیین پارامترهای خطا (۴) می‌توان به صورت معادله (۱۱) و (۱۲) بیان کرد.

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \overline{M}^{-1} \times \begin{bmatrix} l_{ax} \\ l_{ay} \\ l_{az} \end{bmatrix} - \left( \overline{M}^{-1} \times \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \right) \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = A_F^S \times \begin{bmatrix} Q_{11} \\ Q_{22} \\ Q_{33} \end{bmatrix} + A_F^M \times \begin{bmatrix} Q_{21} \\ Q_{31} \\ Q_{32} \end{bmatrix} - B_F' \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \frac{[A_F^S \quad A_F^M \quad -I_{3 \times 3}] \times [s_1 \quad s_2 \quad B_F']^T}{H} \quad (12)$$

$$A_F^S = \begin{bmatrix} l_{ax} & 0 & 0 \\ 0 & l_{ay} & 0 \\ 0 & 0 & l_{az} \end{bmatrix}, A_F^M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ l_{ax} & 0 & 0 \\ 0 & l_{ax} & l_{ay} \end{bmatrix} \quad (13)$$

همان‌طور که در روش بالا بیان شد، این روش نیز فقط بر روی سنجنده شتاب‌سنج آزمایش می‌توان کرد. مگر آنکه بتوان سرعت زاویه‌ای ثابتی بر واحد اندازه‌گیری اینرسی وارد کرد، که نیاز به دستگاهی با سرعت زاویه‌ای ثابت است.

$$\hat{\Phi}_n = \hat{\Phi}_{n-1} + K_n(z_n - H_n \hat{\Phi}_{n-1}) \quad (14)$$

$$K_n = P_{n-1}^{-1} H_n^T (H_n P_{n-1}^{-1} H_n^T + I_{3 \times 3})^{-1} \quad (15)$$

$$P_n = (I_{12 \times 12} - K_n H_n) P_{n-1}^{-1} \quad (16)$$

## ۲-۴- تست کالیبراسیون

در این مقاله سه روش برای برآورد پارامترهای کالیبراسیون بیان شده است. که در روش اول و دوم به

جدول ۲- پیکربندی وضعیت IMU برای تست شتاب سنج [۷]

	جهت محورها			مقدار شتاب سنج در هر جهت ( $m/s^2$ )		
	X	Y	Z	X	Y	Z
۱	بالا	شرق	شمال	g	0	0
۲	پایین	غرب	شمال	-g	0	0
۳	غرب	بالا	شمال	0	g	0
۴	شرق	پایین	شمال	0	-g	0
۵	شرق	شمال	بالا	0	0	g
۶	غرب	شمال	پایین	0	0	-g

### ۳- پیاده‌سازی

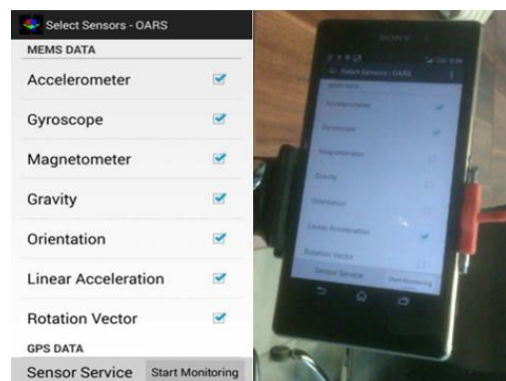
موقعیتی که باید در چند وضعیت مختلف از سیستم اینرسیایی برداشت شده باشد و در آخر اطلاعاتی به عنوان داده چک برای ارزیابی پارامترهای کالیبراسیون بدست آمده. برای روش‌های اول و دوم بر اساس جدول (۲) در ۶ حالت مشخص مشاهدات را جمع‌آوری کرده و برای روش چند موقعیتی در این آزمایش در ۲۳ وضعیت مختلف اطلاعات جمع‌آوری شده است. در پژوهش روش‌های کالیبراسیون با استفاده از خطا واحد اندازه‌گیری<sup>۲</sup> به صورت کمی مقایسه می‌شوند. همان‌طور که گفته شده است آزمایش مربوط به دو روش شش موقعیت ساکن و کمترین مربعات بازگشتی فقط برای کالیبراسیون شتاب‌سنج انجام گرفته است. این دو روش در این آزمایش برای کالیبراسیون ژيروسکوپ به علت اینکه مقدار نویز دستگاه از مقدار سرعت دورانی زمین بیشتر است، قابل اجرا نمی‌باشد. مگر اینکه با استفاده از دستگاه دقیقی، سرعت دورانی ثابت (بیشتر از میزان نویز دستگاه) به سیستم اینرسی اعمال شود.

#### ۳-۱- مقایسه دو مدل ریاضی

همان‌طور که در مقاله بیان شده است. در مدل ۱۲ پارامتری بین پارامترهای عدم تعاد محورها واحد اندازه‌گیری اینرسی وابستگی وجود دارد. این همبستگی بین پارامترها را می‌توان با استفاده از ضریب همبستگی که از معادله (۱۹) بدست می‌آید بیان کرد. در این بخش در تصویر (۸) نتایج بدست آمده از دو مدل به روش چند موقعیتی نشان می‌دهد که در مدل ۱۲ پارامتری بین پارامترهای عدم تعاد محورهای XY، XZ و YZ به ترتیب با پارامترهای عدم تعاد محورها YX، ZX و ZY وجود دارد. که ضریب همبستگی آنها نسبت به هم به ترتیب ۹۹٫۹۶٪، ۹۹٫۹۹٪ و ۹۹٫۹۸٪ می‌باشد. این همبستگی باعث عدم صحت پارامترهای کالیبراسیون بدست آمده از این مدل می‌شود. بنابراین با حذف سه پارامتر عدم تعاد XY، XZ و YZ همبستگی بین پارامترهای کالیبراسیون از بین می‌رود.

$$\text{correlation coefficient} = \frac{\text{COV}_{XY}}{\delta_X \times \delta_Y} \quad (19)$$

برای پیاده‌سازی روش‌های بیان شده از نرم افزار OARS<sup>۱</sup> استفاده شده است، که یک سیستم جمع‌آوری داده توسعه یافته بر روی سیستم عامل آندروید می‌باشد. این سیستم توانایی جمع‌آوری اطلاعات با نرخ ۱۰۰ هرتز را دارد و همچنین داده‌های سیستم موقعیت جهانی مانند طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی، ارتفاع و ... را نیز با نرخ ۱ هرتز ذخیره می‌سازد. تمام داده‌ها در ساختار پایگاه داده SQLite در دستگاه ذخیره خواهد شد. اشکالات شناخته شده‌ای در این نرم‌افزار وجود دارد که باید بر این نکات دقت داشت. هنگامی که اطلاعات ثبت می‌گردد نرم‌افزار داده‌ای با فرمت CSV با توجه به داده با فرمت SQLite ایجاد می‌کند. که در این داده اطلاعات بدون در نظر گرفتن اینکه نرخ هر کدام از حسگرها متفاوت است در کنار هم قرار می‌گیرند. بنابراین بهتر است از داده با فرمت SQLite استفاده گردد که نرخ زمان هر کدام از حسگرها بطور جداگانه در آن قرار گرفته است. دومین مشکل در زمان قفل شدن صفحه گوشی‌های هوشمند داده‌های اشتباه و نویزهای زیاد ممکن است ضبط شود که علت آن فرآیندهای دیگر در حال اجرا در گوشی فرض می‌شود. در نتیجه بهتر است گوشی در زمان اجرا برنامه همواره روشن باشد یا به عبارتی صفحه آن قفل نگردد.



شکل ۷- از چپ به راست به ترتیب نمایی از نرم‌افزار OARS، و نمایی از تلفن همراه همراه هوشمند در حال جمع‌آوری اطلاعات به روش MP

همان‌طور که در بخش قبل بیان شده است. آزمایش به سه صورت انجام گرفته است. یکی برای روش شش موقعیت ساکن و کمترین مربعات بازگشتی و دومی برای روش چند

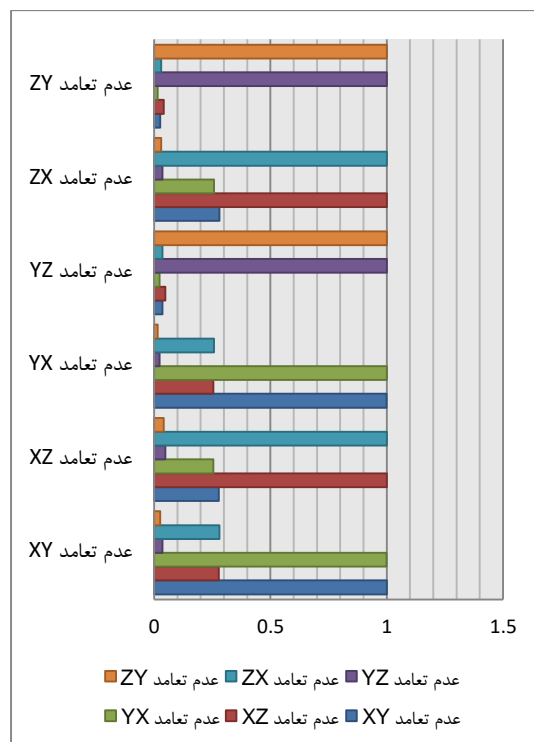
<sup>۲</sup> Root Mean Square Error

<sup>۱</sup> Orientational Awareness And Reaction Systems



### ۳-۲- مقایسه سه مشاهده ورودی

در این بخش نتایج کالیبراسیون شتابسنج با توجه به اینکه مشاهدات ورودی به سه صورت مشاهدات خام (RD)، مشاهدات بدون نویز (حذف نویز به روش موجک) (DD) و میانگین گرفته شده (MD) وارد محاسبات شده- اند برای هر سه روش به نمایش در می‌آید. در جدول (۳) پارامترهای کالیبراسیون و انحراف معیار روش چند موقعیتی را با سه مشاهده ورودی مختلف نمایش داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود خطا واحد اندازه-گیری در مشاهدات ورودی میانگین گرفته شده برابر  $0.082345 \text{ m/s}^2$  با و کمتر از مشاهدات خام و مشاهدات بدون نویز می‌باشد. که مقادیر خطا واحد اندازه‌گیری آن‌ها به ترتیب برابر  $0.083140$  و  $0.082952 \text{ m/s}^2$  است. البته این نتیجه برای هر سه روش به یک صورت بوده است. در نتیجه در بخش بعد برای کالیبراسیون شتابسنج فقط با مشاهدات ورودی میانگین گرفته شده سه روش پیشنهادی بررسی خواهد شد.



شکل ۸- نمایش ضریب همبستگی بین پارامترهای عدم تعامد محورها در مدل ۱۲ پارامتری

جدول ۳- پارامترهای کالیبراسیون شتابسنج به روش MP برای مشاهدات ورودی RD، DD و MD

پارامترهای خطا	محور	مشاهدات ورودی					
		RD	$STD^{RD}$	DD	$STD^{DD}$	MD	$STD^{MD}$
بایاس $(\frac{m}{s^2})$	X	۰.۶۵۸۴۴	۰.۰۷۷۰۶	۰.۶۹۴۲۱	۰.۰۷۷۰۶	۰.۶۹۴۸۱	۰.۰۱۲۶۹
	Y	۰.۲۸۱۷۰	۰.۰۶۸۵۰	۰.۳۳۶۹۳	۰.۰۶۸۵۰	۰.۳۳۷۷۸	۰.۰۰۷۸۱
	Z	۰.۱۲۰۴۸	۰.۰۴۵۸۶	۰.۰۷۸۶۴	۰.۰۴۵۸۷	۰.۰۷۸۱۰	۰.۰۰۶۴۳
فاکتور مقیاس (بدون واحد)	X	۰.۹۸۹۸۵	۰.۰۰۸۲۲	۰.۹۸۱۶۹	۰.۰۰۸۲۲	۰.۹۸۱۵۹	۰.۰۰۱۴۰
	Y	۰.۹۷۸۴۶	۰.۰۰۸۳۲	۰.۹۷۹۲۱	۰.۰۰۸۳۲	۰.۹۷۹۲۵	۰.۰۰۰۹۰
	Z	۰.۹۹۳۲۲	۰.۰۰۵۰۶	۰.۹۹۱۷۱	۰.۰۰۵۰۷	۰.۹۹۱۶۹	۰.۰۰۰۷۲
عدم تعامد محور-ها (rad)	YX	۰.۰۱۱۳۱	۰.۰۲۰۸۸	۰.۰۰۱۵۱	۰.۰۲۰۸۸	۰.۰۰۱۴۱	۰.۰۰۲۸۹
	ZX	۰.۰۳۰۸۷	۰.۰۱۹۶۶	۰.۰۱۵۱۹	۰.۰۱۹۶۶	۰.۰۱۴۹۷	۰.۰۰۲۹۳
	ZY	-۰.۰۲۲۱۰	۰.۰۲۰۶۰	-۰.۰۲۳۹۶	۰.۰۲۰۵۹	-۰.۰۲۳۹۴	۰.۰۰۳۱۵
$\frac{m}{s^2}$ خطا واحد اندازه‌گیری		۰.۰۸۳۱۴۰		۰.۰۸۲۹۵۲		۰.۰۸۲۳۴۵	

گرفته شده نمایش داده شده است. این مقادیر با توجه به جاذبه محلی که با توجه به عرض جغرافیایی نقطه جمع-آوری اطلاعات برابر  $9.8067 \text{ m/s}^2$  بدست آمده است محاسبه شده است. شکل (۹) نمایش‌دهنده هیستوگرام باقیمانده‌ها در سه روش بالا می‌باشد.

### ۳-۳- نتایج شتابسنج

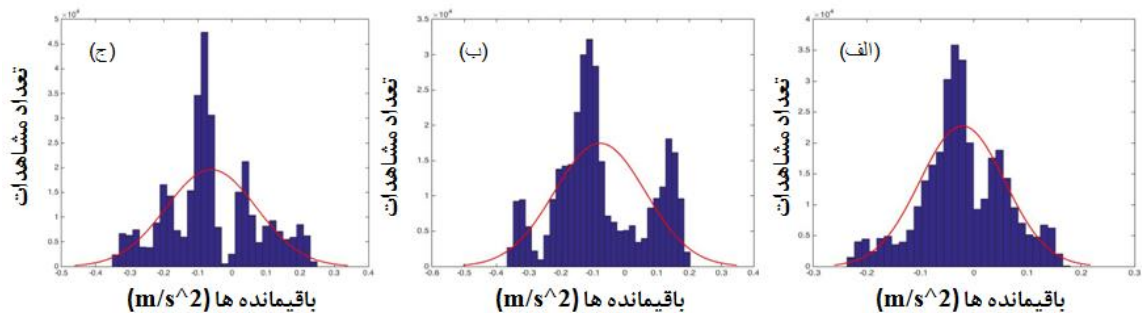
در جدول (۴) مقادیر بدست آمده بایاس، فاکتور مقیاس و عدم تعامد بین محورها برای سنجنده شتابسنج توسط سه روش شش موقعیت استاتیک، کمترین مربعات بازگشتی و چند موقعیتی برای مشاهدات ورودی میانگین

جدول ۴- پارامترهای کالیبراسیون شتابسنج برای سه روش SPS، RLS و MP

پارامترهای خطا	محور	روش‌های کالیبراسیون					
		SPS	STD <sup>SPS</sup>	RLS	STD <sup>RLS</sup>	MP	STD <sup>MP</sup>
بایاس ( $\frac{m}{s^2}$ )	X	۰,۰۶۵۶۹۶	۰,۰۰۷۹۸	۰,۰۶۵۷۷۳	---	۰,۰۶۹۴۸۱	۰,۰۱۲۶۹
	Y	۰,۰۲۸۰۱۳	۰,۰۰۵۶۶	۰,۰۲۸۲۲۸	---	۰,۰۳۳۷۷۸	۰,۰۰۷۸۱
	Z	۰,۰۱۲۱۷۷	۰,۰۰۶۸۷	۰,۰۱۵۲۴۵	---	۰,۰۷۸۱۰	۰,۰۰۶۴۳
فاکتور مقیاس (بدون واحد)	X	۰,۹۹۰۰۹	۰,۰۰۱۱۲	۰,۹۹۰۷۴	---	۰,۹۸۱۵۹	۰,۰۰۱۴۰
	Y	۰,۹۷۸۴۳	۰,۰۰۰۹۷	۰,۹۸۵۴۴	---	۰,۹۷۹۲۵	۰,۰۰۰۹۰
فاکتور مقیاس	Z	۰,۹۹۳۳۱	۰,۰۰۱۳۸	۰,۹۹۲۷۷	---	۰,۹۹۱۶۹	۰,۰۰۰۷۲
عدم تعامد محور-ها ( $rad$ )	YX	۰,۰۱۱۵۱	۰,۰۰۱۰۸	۰,۰۱۲۵۰	---	۰,۰۰۱۴۱	۰,۰۰۲۸۹
	ZX	۰,۰۳۱۴۸	۰,۰۰۱۳۳	۰,۰۳۱۱۷	---	۰,۰۱۴۹۷	۰,۰۰۲۹۳
	ZY	-۰,۰۲۲۰۲	۰,۰۰۰۹۷	-۰,۰۳۰۶۲	---	-۰,۰۲۳۹۴	۰,۰۰۳۱۵
خطا واحد اندازه‌گیری ( $\frac{m}{s^2}$ )		۰,۱۴۶۲۴۵		۰,۱۶۱۵۲۰		۰,۰۸۲۳۴۵	

می‌توان استفاده از کمترین مربعات ترکیبی و حالت تکراری آن است و اینکه در دقت دو روش شش موقعیت استاتیک و کمترین مربعات بازگشتی به تراز دقیق سیستم اینرسی در قاب محلی بر می‌گردد، ولی در روش چند موقعیتی احتیاج به قرارگیری سیستم اینرسی در وضعیتی خاص نیست. فقط باید در آن حالت ساکن باشد. شکل (۱۰) تا (۱۲) پارامترهای کالیبراسیون برای سه روش بالا را نمایش می‌دهد.

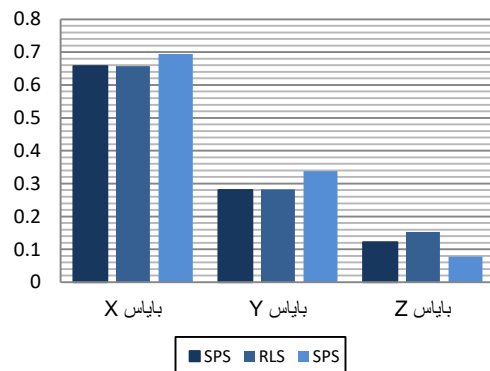
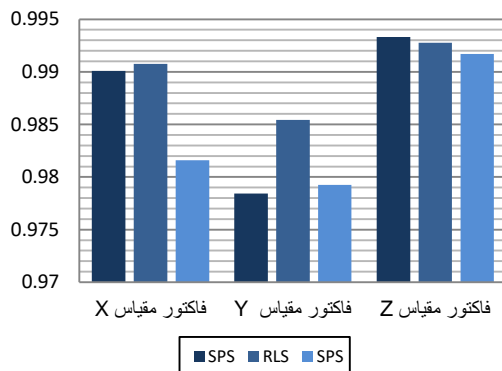
همان‌طور که در جدول (۴) دیده شد. مقادیر خطا واحد اندازه‌گیری در روش‌های شش موقعیت استاتیک، کمترین مربعات بازگشتی و چند موقعیتی به ترتیب برابر ۰,۱۴۶۲۴۵، ۰,۱۶۱۵۲۰ و ۰,۰۸۲۳۴۵  $m/s^2$  شده است. این مقادیر نشان‌دهنده این است روش چند موقعیتی بهتر از دو روش دیگر و روش شش موقعیت استاتیک نیز بهتر از روش کمترین مربعات بازگشتی عمل کرده‌اند. علت این نتایج را



شکل ۹- نمایش فراوانی تجمعی (هیستوگرام) باقیمانده‌ها (الف) روش MP، (ب) روش RLS و (ج) روش SPS

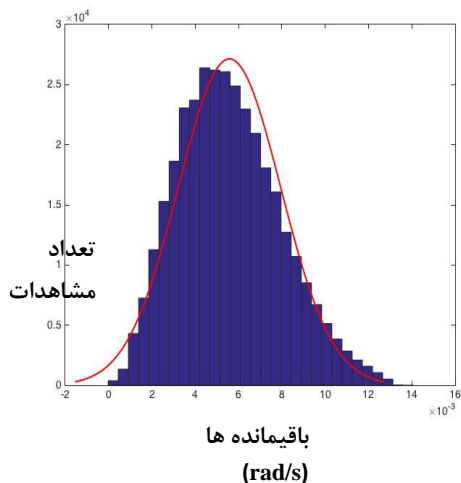
(بدون واحد)

(متر بر مجذور ثانیه)



شکل ۱۱- پارامترهای فاکتور مقیاس در سه محور شتابسنج

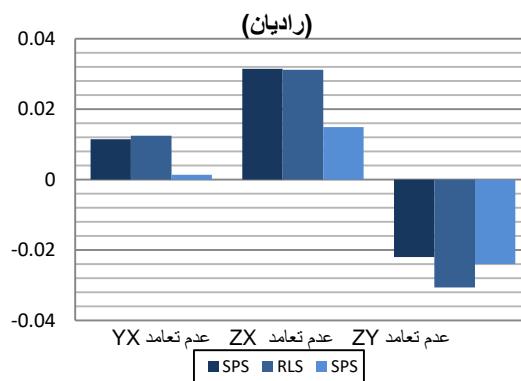
شکل ۱۰- پارامترهای بایاس در سه محور شتابسنج



شکل ۱۳- نمایش باقیمانده‌ها روی داده‌های چک ژيروسکوپ

#### ۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله به بیان ساختار واحد اندازه‌گیری اینرسیایی میکرو الکترومکانیکی و همچنین کالیبراسیون این سنجنده‌ها برای بهبود عملکرد و دقت در تعیین پارامترهای ناوبری (وضعیت، سرعت و موقعیت) به روش-های شش موقعیت ساکن، کمترین مربعات بازگشتی و چند موقعیتی با برآورد پارامترهای کالیبراسیون (بایاس، فاکتور مقیاس و عدم تعامد محورها) برای سنجنده‌های شتاب‌سنج و ژيروسکوپ تشکیل‌دهنده واحد اندازه‌گیری اینرسی پرداخته شده است. با پیاده‌سازی روش‌های پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار OARS بر روی گوشی با سیستم عامل آندروید و جمع‌آوری داده‌های آزمایشی به دو صورت و همچنین داده چک به نتایج زیر در این مقاله دست‌یافته شده‌است. در مقایسه ضریب همبستگی در مدل ریاضی ۱۲ پارامتر به این نتیجه رسیده شد که پارامترهای عدم تعامد محوره‌های  $XY$ ،  $XZ$  و  $YZ$  به ترتیب با پارامتر-های عدم تعامد محورها  $YX$ ،  $ZX$  و  $ZY$  وجود دارد. که ضریب همبستگی آنها نسبت به هم به ترتیب  $۹۹٫۹۶\%$ ،  $۹۹٫۹۹\%$  و  $۹۹٫۹۸\%$  می‌باشد. بنابراین از مدل ۹ پارامتر در این مقاله استفاده شده است. در مقایسه بعدی به نحوه ورود مشاهدات در معادلات پرداخته شده بود. که روش میانگین-گیری به علت برآورد ماتریس کواریانس در این روش نتایج بهتری دست یافته شد نسبت به ورود مشاهدات خام و مشاهدات بدون نویز (حذف نویز به روش موجک) که مقادیر خطا واحد اندازه‌گیری در این روش‌ها برابر با  $۰٫۰۸۲۳۴۵$ ،  $۰٫۰۸۳۱۴۰$  و  $۰٫۰۸۲۹۵۲$   $m/s^2$  شده است.



شکل ۱۲- پارامترهای عدم تعامد بین محوره‌های شتاب‌سنج

#### ۳-۴ نتایج ژيروسکوپ

در جدول (۵) مقادیر بدست‌آمده پارامترهای کالیبراسیون و انحراف معیار پارامترهای کالیبراسیون ژيروسکوپ نمایش داده شده است. این مقادیر برای سه محور محور ژيروسکوپ توسط روش چند موقعیتی بدست آمده است. همان‌طور که در جدول (۵) دیده می‌شود انحراف معیار برای پارامترهای فاکتور مقیاس و عدم تعامد محورها مقادیر زیادی می‌باشند که نشان‌دهنده عدم صحت این مقادیر است. می‌توان علت مقدار بالای انحراف معیار در پارامترهای فاکتور مقیاس و عدم تعامد را همان مقدار نویز بالا در سیستم‌های اینرسی میکروالکترومکانیکی نسبت به مقدار سرعت دوران زمین دانست. بنابراین بهتر است که در این روش فقط از پارامتر-های بایاس در کالیبره کردن ژيروسکوپ استفاده گردد. شکل (۱۳) نمایش‌دهنده هیستوگرام باقیمانده‌ها بروی داده چک می‌باشد و خطا واح اندازه‌گیری برای داده چک در این روش برابر با  $۰٫۰۰۶۰۶۱$   $rad/s$  شده است.

جدول ۵- پارامترهای خطا ژيروسکوپ برای روش MP

پارامترهای خطا	محور	MP	$STD^{MP}$
بایاس ( $\frac{rad}{s}$ )	X	۰٫۰۰۰۱۰۶۶	۰٫۰۱۲۴۳
	Y	-۰٫۰۰۰۱۳۳	۰٫۰۰۷۰۳
	Z	۰٫۰۰۰۰۵۴۹۰	۰٫۰۵۸۵۷
فاکتور مقیاس (بدون واحد)	X	۸٫۷۱۱۹۲۶۸	۱۸۵٫۳۱۲۱۸
	Y	۷٫۹۰۵۹۲۲۲	۷۳٫۴۵۳۷۵۰
	Z	۶٫۵۱۴۹۹۷۶	۷۳۵٫۴۹۶۶۲
عدم تعامد محورها ( $rad$ )	YX	-۴٫۶۶۵۴۲۵۴	۱۳۲٫۳۲۷۵۱
	ZX	۱٫۴۸۱۵۸۷۲۸	۵۰۰٫۹۷۸۷۷
	ZY	-۰٫۲۵۷۸۷۰۳	۲۲۶٫۲۴۱۹۷
خطا واحد اندازه‌گیری ( $\frac{rad}{s}$ )			۰٫۰۰۶۰۶۱۰

نویز تولیدی در سیستم‌های اینرسیایی میکروالکترومکانیکی مفدار بیشتری نسبت به سرعت دوران زمین دارند و خطا واحد اندازه‌گیری فقط با اعمال بایاس بر مشاهدات برابر با  $0.006061 \text{ rad/s}$  شده است. برای تحقیقات آتی نیز پیشنهاد داده می‌شود برای حل مشکل محاسبه پارامترهای ضریب مقیاس و عدم تعامد محورها در ژيروسکوپ برای روش چند موقعیتی دستگاهی با دقت بالا برای اعمال سرعت‌زاویه‌ای مشخص به واحد اندازه‌گیری اینرسیایی تعبیه گردد.

در آزمون بعدی نتایج کالیبراسیون در سه روش پیشنهادی با داده‌های میانگین گرفته شده که با توجه به مقادیر خطا واحد اندازه‌گیری در این سه روش که برابر با  $0.146245$ ،  $0.161520$  و  $0.082345 \text{ m/s}^2$  می‌توان نتیجه گرفت که روش چند موقعیتی به علت استفاده از روش کمترین مربعات ترکیبی و حالت تکراری آن روش بهتری نسبت به دو روش دیگر است. البته مزیت دیگر این روش به هیچ‌گونه ابزاری برای همسطح‌سازی واحد اندازه‌گیری اینرسیایی ندارد و در آخرین آزمون دلیل عدم محاسبه ضریب مقیاس و عدم تعامد محورها در ژيروسکوپ به این علت است که

## مراجع

- [1] J. Asgari, A., Alireza Amiri, B.C. and F Zanganeh, D. (2012). "Combining Real-Time Kinematic GPS Navigation System With MEMS IMU Applications", Journal of Science and Space Technology, Volume 5, PP . 57-49.
- [2] TON, D. & WESTON, J. L. 2004. "Strapdown inertial navigation technology", IET.
- [3] Ghsem Abdi, A. (2012) "Pos Estimation of Aerial Vehicles Based on Multi Sensor Data Fusion", Department of surveying and Geomatic Engineering, College of Engineering, University of Tehran.
- [4] WOODMAN, O. J. 2007. "An introduction to inertial navigation. University of Cambridge", Computer Laboratory, Tech. Rep. UCAMCL-TR-696, 14, 15
- [5] , D. 2006. "Optimal state estimation: Kalman, H infinity, and nonlinear approaches", John Wiley & Sons.
- [6] ILEWICZ ,W. & NAWRAT, A. 2013. "Direct method of IMU calibration. Advanced Technologies for Intelligent Systems of National Border Security". Springer.
- [7] LEE, D., LEE, S., PARK, S. & KO, S. 2011. "Test and error parameter estimation for MEMS—based low cost IMU calibration". International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 12, 597-603.
- [8] SYED, Z., AGGARWAL, P., GOODALL, C., NIU, X. & EL-SHEIMY, N. 2007. "A new multi-position calibration method for MEMS inertial navigation systems". Measurement Science and Technology, 18, 1897.
- [9] FONG, W., ONG, S. & NEE, A. 2008. "Methods for in-field user calibration of an inertial measurement unit without external equipment". Measurement Science and Technology, 19, 085202.
- [10] TEDALDI, D. 2013. "IMU calibration without mechanical equipment".(Calibrazione di IMU svincolata da apparati meccanici).
- [11] SHIN, E.-H& EL-SHEIMY, N. 2002. "A new calibration method for strapdown inertial navigation systems". Zeitschrift für Vermessungswesen.–2002.–Zfv, 127, 41-50.
- [12] SHIN, E.-H. & EL-SHEIMY, N. 2003. "Accuracy improvement of low cost INS/GPS for land applications", National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada.
- [13] SCHNEIDERS, M. 2001. "Wavelets in control engineering". DCT.
- [14] NGUYEN, T. & STRANG, G. 1997. "Wavelet and Filters Banks". Wellesley-Cambridge Press, Wellesley, MA.
- [15] ASLAN, G. & SARANLI, A. "Characterization and calibration of MEMS inertial measurement units". Signal Processing Conference, 2008 16th European, 2008. IEEE, 1-5.
- [16] ADDISON, P. S. 2002. "The illustrated wavelet transform handbook". introductory theory and applications in science, engineering, medicine and finance, CRC press.