

## **Improve the Accuracy of Inertial Sensors Using Lifting Wavelet Transform and Genetic Algorithm applicable in intelligent positioning system**

**Received: 17 November 2021****Accepted: 25 January 2022****Article type: Research Article****PP: 41-53****DOI:**[10.22034/pitc.2022.1265600.1098](https://doi.org/10.22034/pitc.2022.1265600.1098)**Homan Alaeiyan**School of Electrical Engineering, Iran  
University of Science and Technology,  
Narmak, Tehran 16846-13114, Iran[h\\_alaeiyan@elec.iust.ac.ir](mailto:h_alaeiyan@elec.iust.ac.ir)**Mohammad Reza Mosavi**School of Electrical Engineering, Iran  
University of Science and Technology,  
Narmak, Tehran 16846-13114, Iran[M\\_Mosavi@iust.ac.ir](mailto:M_Mosavi@iust.ac.ir)**Behnam Dorostkar Yaghouti**

Amin Police University, Tehran, Iran

[Behnamdorostkar@gmail.com](mailto:Behnamdorostkar@gmail.com)**Ahmad Dolatkah**Supreme National Defense University,  
Tehran, Iran[ict.ahmad93@gmail.com](mailto:ict.ahmad93@gmail.com)**(Corresponding author)****Abstract**

Knowing the location and location of equipment, vehicles and forces in order to make the police smarter for the accurate execution of missions is a requirement and in this regard, the inertial navigation system has high accuracy and efficiency and can be used in electronic warfare.

Due to the increasing use of Inertial Navigation Systems (INSs) in various fields, increasing the accuracy and efficiency of this system is significant. INS is a standalone system that works in any weather conditions and can provide continuous navigation information of position, velocity, and attitude without affecting the environment. However, due to errors in gyroscope and accelerometer sensors, the accuracy of INS sensor performance decreases over time. Therefore, the main problem in using INS for navigation systems is the unlimited errors that occur over time. In other words, over time, its performance suffers from errors that are increasing rapidly. Therefore, to achieve the desired outputs, noise removal must be performed. In this paper, according to the types of sensors, the best noise removal method has been presented. The wavelet noise removal based on the lifting scheme is utilized for de-noising. The lifting method is real-time and does not require blocking the received data. Also, we have leveraged some multi-level liftings. Further, we propose an optimization method based on the genetic algorithm to increase accuracy by combining the results of multi-level liftings. For evaluation, two types of dynamic and static data have been used. The achieved results have clarified the effectiveness of our proposed method. Therefore, a suitable method for good, reliable, and fast noise removal is presented.

**Keywords:** Inertial Navigation System, Wavelet Transform, Lifting Scheme, Genetic Algorithm, Allan Standard Deviation

## بهبود دقت حسگرهای اینرسی با استفاده از تبدیل موجک مبتنی بر لیفتینگ و الگوریتم ژنتیک قابل بکارگیری در سامانه موقعیت یابی هوشمند

### چکیده

اطلاع از موقعیت و مکان تجهیزات، خودروها و نیروها در راستای هوشمندسازی پلیس برای اجرای دقیق ماموریت‌ها یک الزام بوده و در این راستا سامانه ناوبری اینرسی دارای دقت و کارایی بالایی می‌باشد. سامانه ناوبری اینرسی (INS) یک نوع سامانه مستقل است که در هر نوع شرایط آب‌وهوایی کار کرده و می‌تواند اطلاعات جهت‌یابی پیوسته‌ای از مکان، سرعت و حالت را بدون اینکه تحت تاثیر محیط واقع شود، فراهم کند. اما به دلیل خطاهای ناشی از حسگرهای ژيروسکوپ و شتاب‌سنج، دقت عملکرد حسگر INS، با گذشت زمان کاهش می‌یابد. بنابراین، مشکل اصلی در استفاده از INS برای سامانه‌های ناوبری، خطاهای نامحدودی است که در طول زمان اتفاق می‌افتد. لذا، برای دستیابی به خروجی‌های مطلوب، حذف نویز به خوبی باید در آن صورت پذیرد. در این مقاله، با توجه به نوع حسگر آن‌ها، روشی مناسب برای حذف نویز مطابق با شرایط آن حسگر انتخاب شده است. روش انتخابی، روش حذف نویز موجک مبتنی بر طرح لیفتینگ می‌باشد. لازم به ذکر است که این روش بلادرنگ بوده و نیاز به تهیه داده‌های دریافتی به صورت بلوکی نمی‌باشد. در این مقاله از لیفتینگ‌های چندسطحی و همچنین با ترکیب خروجی این لیفتینگ‌ها جهت بهینه‌سازی دقت سامانه، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. برای مشاهده عملکرد روش، از دو نوع داده‌های پویا و ایستاد استفاده شده است که نتایج خروجی، مبین کارایی روش پیشنهادی در حذف مناسب نویز با قابلیت اطمینان بالا و سرعت زیاد می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: سامانه ناوبری اینرسی (INS)، تبدیل موجک، طرح لیفتینگ، الگوریتم ژنتیک، انحراف از معیار آن، سامانه هوشمند

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۵

نوع مقاله: پژوهشی

صص: ۴۱-۵۳

شناسه دیجیتال (doi):

[10.22034/pitc.2022.1265600.1098](https://doi.org/10.22034/pitc.2022.1265600.1098)

### هومان علاییان

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران

[h\\_alaeiyan@elec.iust.ac.ir](mailto:h_alaeiyan@elec.iust.ac.ir)

سید محمد رضا موسوی میرکلایی

استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران

[M\\_Mosavi@iust.ac.ir](mailto:M_Mosavi@iust.ac.ir)

### بهنام درستکار یاقوتی

گروه فناوری اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه علوم انتظامی امین، تهران، ایران

[Behnamdorostkar@gmail.com](mailto:Behnamdorostkar@gmail.com)

### احمد دولتخواه

دانشجوی دکتری، دانشگاه عالی دفاع ملی، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

[ict.ahmad93@gmail.com](mailto:ict.ahmad93@gmail.com)

## ۱- مقدمه

دلیل تجزیه و تحلیل زمان و فرکانس حذف نویز خوبی را می‌تواند ارائه دهد [۱۰ و ۱۱]. با این حال، پیاده‌سازی تبدیل موجک چالش‌های بسیاری را می‌تواند تحمیل کند. در این مقاله از تبدیل موجک مبتنی بر لیفتینگ استفاده شده است. لیفتینگ‌ها، رویکردی جدید از موجک‌ها می‌باشند که به اصطلاح به آن‌ها موجک‌های نسل دوم گفته می‌شود. این نوع موجک‌ها الزاماً بر پایه‌ی انتقال<sup>۱۰</sup> و مقیاس‌گذاری<sup>۱۱</sup> نمی‌باشند [۱۲].

یکی از مهم‌ترین مزیت‌های طرح لیفتینگ پیاده‌سازی راحت‌تر و اجرای سریع آن است، زیرا تبدیل آن شامل یک سری گام‌های سلسله‌مراتبی می‌باشد. هر گام، دارای جمع و ضرب اسکالر یا عمل شیفت است و این اجرای سریع سبب می‌شود که بتوان یک روش حذف نویز بلادرنگ خوبی را ارائه دهیم [۱۳]. در کارهای گذشته برای حذف نویز حسگرهای اینرسی از لیفتینگ تک سطحی استفاده شده است. مشکل لیفتینگ تک سطحی به دلیل تجزیه کم داده‌ها است [۱۴]. با این حال، در این مقاله برای یک حذف نویز خوب از لیفتینگ چند سطحی و یک روش حذف نویز بلادرنگ، استفاده شده است.

الگوریتم‌های هوشمند در چند سال اخیر کاربردهای بسیاری در علوم مختلف پیدا کرده‌اند. الگوریتمی که در این مقاله استفاده شده است، الگوریتم ژنتیک می‌باشد. الگوریتم ژنتیک می‌تواند به وسیله‌ی جستجوهای که در نقاط کمینه انجام می‌دهد و سوق پیدا کردن ژن‌ها به نقطه کمینه اصلی، عمل بهینه‌سازی را انجام دهد [۱۵].

این مقاله، فقط شامل حذف نویز از خطاهای حسگر اینرسی خواهد بود و به عنوان مکملی برای سامانه‌های تلفیقی مرتبط با آن می‌باشد [۱۶ و ۱۷].

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، از انحراف از معیار آلن به عنوان یک معیار مرجع که یک تحلیل در حوزه زمان می‌باشد و می‌تواند پارامترهای نویزی را از داده‌های حسگر اینرسی بدست آورد، استفاده شده است [۱۷].

سازمان‌دهی مقاله به صورت مقابل می‌باشد: در بخش دوم نگاهی به کارهای گذشته می‌اندازیم. در بخش سوم، روش پیشنهادی را بررسی می‌کنیم. بخش چهارم، روش‌های ارزیابی و نتایج بدست آمده را بررسی کرده و در انتها نیز نتیجه‌گیری قرار می‌گیرد.

## ۲- کارهای گذشته

استفاده از روش‌هایی که دارای بازخورد<sup>۱۲</sup> می‌باشند، لزوماً برای حذف نویز به دلیل پیچیدگی بالای محاسباتی و زمانی، مناسب نمی‌باشد، بلکه بیش‌تر برای حذف خطاهای حسگر اینرسی در حالت کلی (نویز موجود در آن نیز به عنوان زیرمجموعه‌ای از خطاهای

در صحنه جنگ الکترونیک لازم است تمامی سامانه‌ها به صورت پایدار عمل نموده و بتوان موقعیت مکانی نیرو و تجهیزات را به صورت دقیق در دسترس داشت. همچنین در راستای هوشمندسازی پلیس، یکی از اولویت‌ها این است که خدمات و ماموریت‌ها بدون وقفه انجام گردد. یکی از ابزارهای پایش تجهیزات و نیروها، استفاده از سامانه‌های موقعیت یاب می‌باشد در گشت‌های پلیسی (خودرو و بدون خودرو) لازم است تا مکان دقیق نیروها و اهداف مورد نظر در اسرع وقت مشخص شده تا در زمان صرفه جویی گردد و ماموریت‌ها بدون وقفه انجام پذیرد. همچنین در برخی موارد در مرزهای کشور، دلیل جغرافیای کشور، اطلاع از مکان دقیق نیروها و تجهیزات می‌تواند در تصمیم‌گیری‌ها موثر باشد. لذا در این مقاله تلاش شده است از سامانه ناوبری اینرسی<sup>۱</sup> (INS) و سامانه موقعیت‌یاب جهانی<sup>۲</sup> (GPS) ارکان اصلی برای موقعیت‌یابی و اطلاعات حالت<sup>۳</sup> در مختصات جغرافیایی برای کاربرد بیان شده، تحلیلی جامع انجام و چالش‌های و مشکلات را بررسی و پیشنهادهای ارائه می‌گردد [۱]. حسگرهای اینرسی<sup>۴</sup> ارزان قیمت با توجه به ساختاری که دارند، شامل نویزهای مختلفی بوده که باعث می‌شود در بلند مدت، دقت آن کاهش پیدا کند [۲ و ۳].

INS دارای دقت خوبی در کوتاه مدت است، در مقابل GPS دقت بلند مدت خوبی دارد. با این حال، با گذشت زمان، به دلیل ماهیت آن خطاهای بزرگی که در واحد اندازه‌گیری اینرسی<sup>۵</sup> (IMU) رخ می‌دهد، دقت INS با گذشت زمان کاهش می‌یابد [۴].

واحد اندازه‌گیری اینرسی، خود شامل ژيروسکوپ<sup>۶</sup> و شتاب‌سنج<sup>۷</sup> می‌باشد که مشخصه‌های نویزی مختلفی دارند [۵]. اگرچه، شتاب‌سنج دارای خطایی جزئی در عملکرد سامانه می‌باشد، خطای ژيروسکوپ نقش بسیار مهمی در کاهش دقت حسگرهای اینرسی دارد [۶ و ۷]. ژيروسکوپ‌های مبتنی بر MEMS<sup>۸</sup> به دلیل ارزان قیمت بودن، کوچک بودن اندازه‌ی آن، مصرف انرژی کم و موارد دیگر، در چند سال اخیر گسترش زیادی یافته‌اند [۸]. بنابراین، مطالعه بر روی روش‌های حذف نویز آن برای بهبود عملکرد حسگرهای اینرسی مبتنی بر MEMS مهم است.

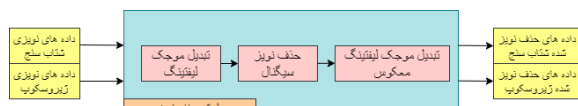
مقالات متعددی در خصوص این امر با نتایج مناسب چاپ شده است [۵-۸]. استفاده از تبدیل موجک گسسته<sup>۹</sup> یکی از روش‌های مرسوم برای حذف نویز سیگنال یا تصویر می‌باشد [۹]. تبدیل موجک به

- 1 Inertial Navigation System
- 2 Global Positioning System
- 3 Attitude
- 4 Inertial Sensors
- 5 Inertial Measurement Unit
- 6 Gyroscope
- 7 Accelerometer
- 8 Micro-Electro-Mechanical System
- 9 Discrete Wavelet Transform

- 10 Translation
- 11 Scaling
- 12 Feedback

مطابق شکل (۱) واحد اندازه‌گیری اینرسی به دو بخش، واحد ژيروسکوپ و شتاب‌سنج تقسیم بندی می‌شود. واحد مکانیزاسیون صرف نظر از ارتباط بین واحدها در ساده‌ترین حالت به سه بخش، واحد محاسبه حالت، واحد محاسبه سرعت و نیز واحد محاسبه موقعیت تقسیم می‌شود. مطابق آنچه پیش‌تر به آن اشاره شد، نوپزهای مربوط به یک سامانه ناوبری اینرسی، عمدتاً مربوط به واحد اندازه‌گیری اینرسی می‌باشند. لذا، الگوریتم پیشنهادی حذف نوپز، بلوکی بین بلوک واحد IMU و بلوک مکانیزاسیون می‌باشد.

بلوک حذف نوپز نیز، خود شامل چندین بلوک می‌باشد که در شکل (۲) به آن اشاره شده است. در بخش‌های ۱-۳ و ۲-۳ به ترتیب نحوه تبدیل و گام‌های لیفتینگ و حذف نوپز ارائه شده است. مطابق آنچه که در ادامه مشاهده می‌شود، سه موجک داووبیچیز ۴، داووبیچیز ۶ و هار به عنوان پرکاربردترین موجک‌ها برای این روش پیشنهادی به کار می‌روند.



شکل (۲): اجزای داخلی بلوک حذف نوپز.

در ادامه نیز باید ضرایبی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک بدست آوریم که پاسخ بهینه حاصل شود. این واحد سیگنال‌های حذف نوپز شده را با استفاده از واحد پردازش ژنتیکی و به عنوان بهینه‌ساز ضرایب ترکیب و واحد انحراف از معیار آلن به عنوان تابع شایستگی برای پردازش ژنتیکی عمل می‌کند تا برای حسگر اینرسی بهترین ضریب ممکنه را بدست آورد. در بخش ۳-۳، چگونگی ترکیب سیگنال‌های حذف نوپز شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک و در بخش ۴-۳، برای انحراف از معیار آلن بیان شده است.

### ۳-۱- تبدیل موجک گسسته مبتنی بر لیفتینگ

طرح لیفتینگ<sup>۲</sup> یا تبدیل موجک گسسته مبتنی بر لیفتینگ<sup>۳</sup> (LWT)، یک رویکرد کارآمد برای ساخت به اصطلاح "موجک‌های نسل دوم" است. به طور کلی این موجک‌ها الزامات توابع انتقال و اتساع (مقیاس‌گذاری) نمی‌باشند. موجک‌هایی که در ابتدا بیان شد، تحت عنوان موجک‌های نسل اول یا موجک‌های کلاسیک شناخته می‌شوند. طرح لیفتینگ اجرای سریع‌تر تبدیل موجک را فراهم می‌کند و باعث می‌شود تا از بهره‌گیری شباهت‌های میان فیلترهای بالاگذر و پائین‌گذر استفاده شده و سرعت محاسبه بیشتر گردد. این رویکرد محاسبات را بدون هیچ حافظه کمکی برآورده می‌کند [۱۲].

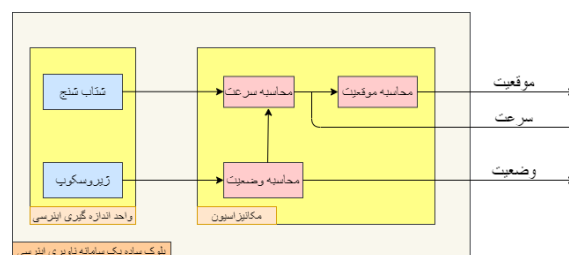
حسگر اینرسی می‌باشد) و به عنوان نوعی از تلفیق برای این نوع حسگرها به کار می‌روند. روش‌های استفاده شده اغلب با استفاده از شبکه‌های عصبی مختلف و الگوریتم‌های تکاملی یا فیلترهای تطبیقی می‌باشند [۴-۱۶].

در تبدیل موجک گسسته، داده‌های مربوط به سیگنال را می‌توان با استفاده از یک تجزیه و تحلیل بانک فیلتر و کاهش نمونه‌برداری<sup>۱</sup>، تحلیل کرد. در حذف نوپز سیگنال یا در هر کاربرد دیگری از موجک، منظور از یک بانک فیلتر مجموعه‌ای از فیلترهای پائین‌گذر و بالاگذر در هر مرحله است. این فیلترها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که ویژگی‌های خاصی از داده‌ها را برای برخی از کاربردها، مناسب نشان می‌دهند. برای سطوح بالاتر ممکن است تبدیل موجک گسسته با استفاده از فیلترهای بالاگذر و پائین‌گذر، بار محاسباتی را افزایش دهد. از طرف دیگر، شرط بازسازی کامل مطرح می‌شود که لزوماً یک تبدیل موجک گسسته معکوس‌پذیر نمی‌باشد. یعنی مشخص نیست که تبدیل موجک معکوس، یک وارونه واقعی تبدیل رو به جلو است. بازسازی کامل فقط با استفاده از تجزیه و تحلیل فوریه قابل بررسی است. نکته دیگر، تبدیل معکوس طرح لیفتینگ می‌تواند با استفاده از تبدیل رو به جلو پیاده‌سازی شود. بنابراین، طرح لیفتینگ می‌تواند جایگزین خوبی برای موجک‌های سنتی هم از لحاظ سرعت و هم چنین معکوس‌پذیری تبدیل باشد [۱۲].

از لیفتینگ تک سطحی برای حذف نوپز ژيروسکوپ‌ها استفاده شده است که میزان بهبود ۱۰ درصدی را شامل می‌شود [۱۴]. این حذف نوپز کم به دلیل تجزیه کم داده‌های ژيروسکوپ به زیرباندهای موجک است و با افزایش تعداد تجزیه زیرباند می‌توان عمل حذف نوپز را بهبود داد. بنابراین، در این مقاله از لیفتینگ‌های چندسطحی و ترکیب آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است و نوپز را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.

### ۳-۲ روش پیشنهادی

سامانه ناوبری اینرسی در حالت کلی به دو بخش، بلوک واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU) و بلوک مکانیزاسیون مطابق شکل (۱) تقسیم می‌شود [18].



شکل (۱): یک بلوک ساده از سامانه ناوبری اینرسی.

2 Lifting Scheme  
3 Lifting Based Discrete Wavelet Transform

1 Decimation

• زمانی که  $i = 2^k + 1$  طول توالی داده به صورت  $(x_2, x_3, \dots, x_{2^k+1})$  است، توالی داده‌ها بعد از حذف نویز به صورت  $(\hat{x}_2, \hat{x}_3, \dots, \hat{x}_{2^k+1})$  می‌باشد که در آن، نتیجه حذف نویز داده  $x_{2^k+1}$  به عنوان خروجی است.

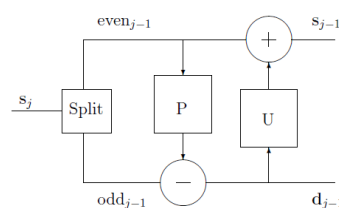
پنجره داده گام به گام رو به جلو حرکت می‌کند تا زمانی که تمام داده‌های نمونه پردازش شوند. با این روش دیگر نیاز به دریافت داده‌ها به صورت بلوکی نمی‌باشد و پردازش برای تک داده ورودی با توجه به داده‌های قبلی است [19]. برای جلوگیری از اعوجاج مرزی، فرض شود که دنباله سیگنال به صورت  $x(t)$  باشد به طوری که در آن،  $a(i)$  نیز گسترش متقارن از  $x(t)$  است؛ زمانی که  $t \geq L$  باشد:

$$a(i) = \begin{cases} x(t-L+i), & i = 1, 2, \dots, L \\ x(t+L-i), & i = L+1, L+2, \dots, 2L \end{cases} \quad (1)$$

که در آن،  $L$  عرض پنجره داده‌ها می‌باشد.

جدول (۲): گام‌های لیفتینگ برای سه موجک هار، داوبیچیز<sup>۴</sup> و ۶.

گام‌های لیفتینگ معکوس	گام‌های لیفتینگ مستقیم
گام‌های لیفتینگ برای موجک هار <sup>۴</sup> :	
$s_l^{(0)} = s_l - \frac{1}{2}d_l$ $d_l^{(0)} = d_l + s_l^{(0)}$ $x_{2l+1} = d_l^{(0)}$ $x_{2l} = s_l^{(0)}$	$s_l^{(0)} = x_{2l}$ $d_l^{(0)} = x_{2l+1}$ $d_l = d_l^{(0)} - s_l^{(0)}$ $s_l = s_l^{(0)} + \frac{1}{2}d_l$
گام‌های لیفتینگ برای موجک داوبیچیز <sup>۴</sup> :	
$d_l^{(2)} = \frac{\sqrt{3}+1}{\sqrt{2}}d_l$ $s_l^{(1)} = \frac{\sqrt{3}-1}{\sqrt{2}}s_l$ $d_l^{(1)} = d_l^{(2)} - s_l^{(1)}$ $x_{2l}$ $= s_l^{(1)} - \frac{\sqrt{3}}{4}d_l^{(1)}$ $- \frac{(\sqrt{3}-2)}{4}d_{l+1}^{(1)}$ $x_{2l+1} = d_l^{(1)} + \sqrt{3}x_{2l}$	$d_l^{(1)} = x_{2l+1} - \sqrt{3}x_{2l}$ $s_l^{(1)} = x_{2l} + \frac{\sqrt{3}}{4}d_l^{(1)}$ $+ \frac{(\sqrt{3}-2)}{4}d_{l+1}^{(1)}$ $d_l^{(2)} = d_l^{(1)} + s_{l-1}^{(1)}$ $s_l = \frac{\sqrt{3}+1}{\sqrt{2}}s_l^{(1)}$ $d_l = \frac{\sqrt{3}-1}{\sqrt{2}}d_l^{(2)}$
گام‌های لیفتینگ برای موجک داوبیچیز <sup>۶</sup> :	
$d_l^{(2)} = \xi d_l$ $s_l^{(1)} = \frac{1}{\xi} s_l$ $d_l^{(1)} = d_l^{(2)} - \delta s_l^{(2)}$ $s_l^{(1)} = s_l^{(2)} - \gamma d_l^{(1)} - \gamma' d_{l+1}^{(1)}$ $x_{2l+1} = d_l^{(1)} - \beta s_{l-1}^{(1)} - \beta' s_l^{(1)}$ $x_{2l} = s_l^{(1)} - \alpha x_{2l+1}$	$s_l^{(1)} = x_{2l} + \alpha x_{2l+1}$ $d_l^{(1)} = x_{2l+1} + \beta s_{l-1}^{(1)} + \beta' s_l^{(1)}$ $s_l^{(2)} = s_l^{(1)} + \gamma d_l^{(1)} + \gamma' d_{l+1}^{(1)}$ $d_l^{(2)} = d_l^{(1)} + \delta s_l^{(2)}$ $s_l = \xi s_l^{(2)}$ $d_l = \frac{1}{\xi} d_l^{(2)}$
$\alpha = -0.4122865950$ $\beta' = 0.3523876576$ $\gamma' = 0.4921518449$ $\xi = 1.918202946$	$\beta = -1.5651362796$ $\gamma = 0.0284590896$ $\delta = -0.3896203900$



شکل (۳): گام‌های لیفتینگ با تک سطح تجزیه [۱۲].

روند عملیات شکل (۳)، با سه گام در جدول (۱) توصیف شده است. گام‌های لیفتینگ مستقیم و معکوس برای موجک‌های مختلف به صورت جدول (۲) می‌باشد. مطابق جدول (۲) در هر سطح تجزیه ممکن است چندین گام به‌روزرسانی و پیش‌بینی وجود داشته باشد [۱۷].

جدول (۱): توضیح مراحل گام‌های لیفتینگ.

گام‌های لیفتینگ	گام‌های لیفتینگ
دوبخش کردن!	سیگنال ورودی را به دو بخش زوج ( $even_{j-1}$ ) و فرد ( $odd_{j-1}$ ) تقسیم می‌کند
پیش‌بینی:	$d_{j-1} = odd_{j-1} - P(even_{j-1})$
به‌روزرسانی:	$s_{j-1} = even_{j-1} - P(d_{j-1})$

### ۳-۲- روش حذف نویز

از آن‌جا که تبدیل موجک گسسته دارای ویژگی‌های مختلف است، بدست آوردن روابط بازگشتی در مورد تبدیل موجک و حذف نویز موجک، دشوار است. در نتیجه، بر روی کاربرد بلادرنگ حذف نویز موجک تاثیر می‌گذارد. برای تحقق بخشیدن به پردازش بلادرنگ در حذف نویز سیگنال، از روش انتقال پنجره داده‌ها از مرجع [۱۹] استفاده شده است.

فرض شود که طول داده‌ها برابر  $2^k$  به صورت  $k \in Z, k > 1$  باشد.  $x_i$  نیز نامین نمونه بلادرنگ سیگنال باشد. پنجره گام به گام، با طول ثابت حرکت می‌کند که به صورت خلاصه شامل گام‌های زیر می‌باشد.

• زمانی که  $i < 2^k$ ، به دلیل اینکه طول توالی داده  $(x_1, x_2, \dots, x_i)$  کوتاه است، نیاز حداقل طول را برآورده نمی‌کند، بنابراین روش حذف نویز موجک به کار گرفته نمی‌شود و داده‌ها به صورت مستقیم در خروجی ظاهر می‌شوند.

• زمانی که  $i = 2^k$ ، طول توالی داده مورد نظر  $(x_1, x_2, \dots, x_{2^k})$  به حدصاب خود رسیده است، اولین حذف نویز صورت می‌گیرد. داده‌های حذف نویز شده به صورت  $(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_{2^k})$  می‌باشند و در نهایت  $\hat{x}_{2^k}$  به عنوان خروجی حذف نویز سیگنال  $x_{2^k}$  است.

### ۳-۳- ترکیب با الگوریتم ژنتیک

به عنوان نوآوری، برای بهبود پاسخ لیفتینگ‌های استفاده شده یک میانگین گیری وزن دار برای داده‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک صورت گرفته است. الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم تکاملی مادر است. این الگوریتم از عمل جهش برای رهایی از به دام افتادن نقاط در بهینه محلی و همچنین ادغام<sup>۲</sup> برای بهبود یا کمینه نمودن تابع هزینه استفاده می‌کند. مطابق آنچه پیش‌تر بیان شد، در این مقاله گام‌های لیفتینگ برای سه موجک داووییچیز<sup>۴</sup>، ۶ و هار استفاده شده است و سیگنال‌های حذف نویز شده حاصل از این موجک‌ها با یکدیگر مطابق شکل (۵) ترکیب می‌شوند. داده‌های حذف نویز شده با یک سری ضرایب که توسط الگوریتم ژنتیک بهینه شده‌اند، جمع شده و انحراف از معیار آلن برای آن‌ها محاسبه می‌شود و بلوک پردازش ژنتیکی نیز تا جای ممکن ضرایب را در بازه کوچک‌تر از یک، بهینه می‌کند.

فلوچارت بلوک پردازش ژنتیکی مطابق شکل (۶) می‌باشد. در ابتدا، باید یکسری مقادیر اولیه برای ضرایب به صورت تصادفی تعیین شود. ضرایب به طوری انتخاب می‌شوند که مجموع یکدیگر برابر یک بوده تا مطابق رابطه (۶) ترکیب دو سیگنال دیگر نیاز به عمل تقسیم نباشد.

$$\hat{s}(k) = \frac{\alpha \hat{s}_1(k) + \beta \hat{s}_2(k) + \dots + \omega \hat{s}_n(k)}{\alpha + \beta + \dots + \omega = 1} \quad (6)$$

$$= \alpha \hat{s}_1(k) + \beta \hat{s}_2(k) + \dots + \omega \hat{s}_n(k)$$

در هر بار به روزرسانی ضرایب با عملیات‌های ادغام و جهش، برای سیگنال حذف نویز شده حاصل از ترکیب، انحراف از معیار آلن که در بخش ۳-۴ بیان شده است، به عنوان تابع شایستگی و هدف بهینه سازی محاسبه می‌شود [21]. این مراحل تا زمانی که به تعداد دوره مشخص شده دست پیدا کنند، تکرار می‌شوند. ضرایبی که بدست می‌آیند می‌تواند برای داده‌های دیگر از این حسگر نیز به کار روند، ولی برای هر حسگر باید ضرایب به طور جداگانه‌ای پردازش و بدست آورده شوند

### ۳-۴- انحراف از معیار آلن

انحراف از معیار آلن (AV)، یک روش تجزیه و تحلیل در حوزه زمان است که در ابتدا برای پایداری فرکانسی نوسانگرها<sup>۳</sup> طراحی و اخیراً این مورد به طور موفقیت‌آمیزی برای مدل‌سازی حسگرهای اینرسی استفاده شده است [22].

$\hat{a}(i)$  نتیجه حذف نویز موجک برای  $a(i)$  است و در نهایت نتیجه حذف نویز نهایی  $\hat{x}(t)$  در زمان  $t$  به صورت رابطه (۲) می‌باشد [19].

$$\hat{x}(t) = \frac{\hat{a}(L) + \hat{a}(L+1)}{2} \quad (2)$$

در این مقاله از حداکثر سطح تجزیه برای حذف نویز استفاده شده است. دلیل استفاده از حداکثر طبقات این است که در نهایت داده‌ی مورد هدف، به صورت یک تک عدد حذف نویز در آن رخ می‌دهد. برای حذف نویز، در ابتدا باید عمل تخمین سطح نویز را انجام دهیم. تخمین نویز با استفاده از ضرایب موجک و ریزترین مقیاس (بخش بالاگذر) که معمولاً بیش‌ترین توان نویز نسبت به سیگنال در آن تمرکز پیدا می‌کند، به صورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$\hat{\sigma}_N = \frac{\text{median}\{|w_k - \text{median}(w_k)|\}_{k=1,2,3,\dots}}{0.6745} \quad (3)$$

که در آن،  $w_k$  ضرایب موجک سیگنال آمیخته به نویز در ریزترین مقیاس هستند [20].

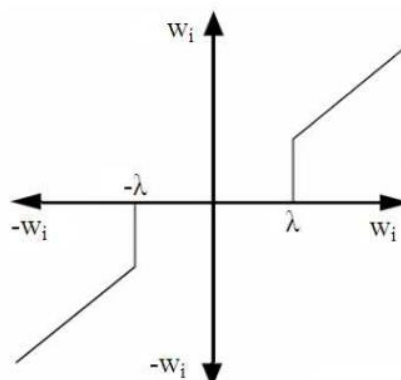
پس از محاسبه نمودن تخمین سطح نویز، نوبت به محاسبه آستانه تقطیع شده است که خود شامل چندین روش می‌شود و با توجه به کاربردهای مورد نظر، روش‌های خاص خود را دارا می‌باشند. در این مقاله از روش تنظیم آستانه سراسری<sup>۱</sup> مطابق رابطه (۴) استفاده شده است.

$$\lambda^u = \hat{\sigma}_N \sqrt{2 \log N} \quad (4)$$

که در آن،  $N$  تعداد نمونه‌های ضرایب موجک در ریزترین مقیاس است. رابطه مربوط به آستانه‌گذاری سخت مطابق رابطه (۵) می‌باشد.

$$D_H^\lambda(w) = \begin{cases} w & |w| > \lambda \\ 0 & 0 \leq |w| \leq \lambda \end{cases} \quad (5)$$

با توجه به رابطه (۵)، اگر مقدار  $w_i$  بزرگ‌تر از مقدار حد آستانه باشد، همان مقدار جایگزین می‌شود و اگر کوچک‌تر از آن باشد، برابر صفر خواهد بود. نمودار آن مطابق شکل (۴) خواهد بود [20].



شکل (۴): نمودار آستانه‌گذاری سخت [20].



درصد بهبود در کنار بهترین نتیجه، یعنی داووییچیز ۴ به صورت ۶۴ نقطه‌ای می‌باشند.

طبق نتایج بدست آمده از جدول (۴)، بهترین عملکرد از نظر رفتار سطح تجزیه حذف نویز، برای موجک داووییچیز ۴ می‌باشد. از داووییچیز ۴، ۲ سطحی (۲ نقطه‌ای) تا ۶ الی ۷ سطحی (۳۲ الی ۶۴ نقطه‌ای)، میزان بهبود حذف نویز به صورت یک روند صعودی می‌باشد، در صورتی که برای موجک‌های داووییچیز ۶ یا ۸ این چنین نیست و برای برخی از سطوح، حذف نویز به صورت مناسب انجام می‌شود.

برای استفاده از الگوریتم ژنتیک در ابتدا تعداد سیگنال‌های حذف نویز شده، طبق رابطه (۷) برابر سه سیگنال قرار می‌دهیم. بلوک پردازش ژنتیکی توسط فلوچارتی در شکل (۶) نشان داده شده است. در مرحله اول، باید جمعیت اولیه و تعداد ضرایب و تعداد کل مراحل را انتخاب کنیم. در این مقاله، برای بررسی کل شرایطها از ۳۰۰ جمعیت اولیه و ۴۰۰ دوره برای اینکه بتوان بهترین پاسخ را استخراج کرد، استفاده شده است. تعداد ضرایب در این پروژه در بیشترین حالت برابر ۳ و حالت بعدی برابر ۲ می‌باشد که در قسمت‌های بعدی به توضیح آن می‌پردازیم.

مطابق شکل (۶)، در ابتدا ضرایب اولیه به صورت تصادفی انتخاب شده و واریانس آن برای هر کدام محاسبه می‌شود. سپس از لحاظ تابع هزینه، پاسخ مرتب شده و عمل ادغام و جهش دوره‌های بعدی انجام می‌شود. این کار تا زمانی که به تعداد دوره‌ای که مشخص شده است برسد، تکرار خواهد شد و در پایان نیز بهترین پاسخ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

*iSensor* 16448 با نرخ ۲۰۰ هرتز می‌باشد [23].

در ابتدا مطابق جدول (۳)، اندازه نویز را با استفاده از انحراف از معیار آلن برای شتابسنج‌ها و ژيروسکوپ‌های حسگرهای ایستان و پویا بدست آورده شده‌اند.

با توجه به جدول (۳)، نویزهای ژيروسکوپ برای داده‌های ایستان و پویا به طور کامل بیان شده است. اندازه نویز در داده ایستان به دلیل حالت سکون بودن و لرزش بالا، مقدار نسبتاً بیشتری نسبت به حالت پویا دارد. در قسمت‌هایی که در آن خط تیره مشاهده می‌شود، نشان دهنده آن است که واریانس آلن، نویز مرتبط با آن را پیدا نکرده است. نویزهای گام تصادفی و ناپایداری بایاس عاملی موثر در نویزدار بودن داده‌های حسگر می‌باشند. از طرف دیگر، در شتابسنج نیز نویزهای گام تصادفی و ناپایداری بایاس، عامل‌های بیشتری در نویزدار بودن داده‌های حسگر می‌باشند. اندازه‌های نویزی شتابسنج مطابق آنچه در بخش‌های قبل بیان شد، بسیار کم‌تر از اندازه‌های نویزی در ژيروسکوپ است. خطای  $\pm$  که در هر قسمت بیان شده، از رابطه (۸) محاسبه شده است. در داده‌های مربوط به هر قسمت، یک واریانس کلی نیز مطابق رابطه (۷) محاسبه شده است که در جدول‌های بعدی و همچنین به عنوان معیاری برای بهینه‌سازی به کار می‌رود، می‌باشد. لازم به ذکر است برای جلوگیری از افزایش پیچیدگی برای طراحی یک سامانه حذف نویز، بهینه‌سازی برای شتابسنج به دلیل کم بودن مقدار اندازه نویزی آن انجام نمی‌شود و فقط برای آن، حذف نویز با استفاده از موجک‌های لیفتینگ صورت می‌گیرد. برای محاسبه‌ی انحراف از معیار آلن از ۹۰ خوشه طبق روش سعی و خطا، استفاده شده است.

نتایج واریانس کلی بعد از حذف نویز با استفاده از موجک‌های مختلف و تعداد نقاط ابتدایی مختلف در جدول (۴) بیان شده است. در ابتدا نتایج بدست آمده برای داده‌های شتابسنج را بررسی می‌کنیم. برای داده‌های پویا، بهترین نتیجه برای موجک هار با ۶۴ نقطه است. یعنی باید به اندازه ۶۳ نقطه اول صبر نموده و عمل حذف نویز انجام نشود و برای داده ۶۴ام عمل حذف نویز صورت پذیرد. این به منزله‌ی آن است که برای حداکثر سطوح تجزیه، نیاز به ۷ سطح تجزیه می‌باشد. با این روش، بهبود ۶۰ درصدی برای شتابسنج حاصل می‌شود. برای داده‌های ایستان نیز بهترین نتیجه برای داووییچیز ۴ با ۶۴ نقطه بدست آمده است که بهبودی ۳۶ درصدی را حاصل می‌دهد. بهترین جواب برای شتابسنج برای هر کدام به صورت پررنگ در جدول (۴) نشان داده شده است.

برای ژيروسکوپ و در حالت پویا، بهترین پاسخ مربوط به موجک داووییچیز ۴ با ۶۴ نقطه است که میزان بهبودی برابر ۸۰ درصد را در اختیار ما می‌گذارد. موجک‌های دیگر نیز با نتایج نزدیک قابل مشاهده است. موجک‌های هار و داووییچیز ۶ به صورت نقطه‌ای، تقریباً با ۷۷ درصد بهبود و داووییچیز ۴ به صورت ۳۲ نقطه‌ای با ۶۰



جدول (۳): نتایج اولیه انحراف از معیار آلن قبل از حذف نویز.

نویز ژيروسکوپ محور	گام تصادفی $\text{Deg}/\frac{1}{s^2}$	شیب سرعت رانش $\text{Deg}/s^2$	نویز کوانتیزاسیون $\text{Deg}$	گام تصادفی سرعت $\text{Deg}/\frac{3}{s^2}$	ناپایداری بایاس $\text{Deg}/s$
داده‌های پویا:					
X	$2.3423 \pm 0.1287$	-	-	-	$4.6703 \pm 0.2566$
Y	-	-	-	-	$0.7707 \pm 0.0423$
Z	$1.2419 \pm 0.0682$	-	-	-	$1.1344 \pm 0.0623$
واریانس کل $\sigma_{Total} = 5.5427$					
داده‌های ایستادن:					
X	$6.1482 \pm 0.2152$	-	-	-	$6.1118 \pm 0.2139$
Y	$3.5560 \pm 0.1245$	-	-	-	$4.0801 \pm 0.1428$
Z	$3.6748 \pm 0.1286$	-	-	-	$2.2983 \pm 0.0804$
واریانس کل: $\sigma_{Total} = 11.1010$					
نویز شتابسنج محور	گام تصادفی $m/s/\frac{1}{s^2}$	شیب سرعت رانش $m/s/s^2$	نویز کوانتیزاسیون $m/s$	گام تصادفی سرعت $m/s/\frac{3}{s^2}$	ناپایداری بایاس $m/s/s$
داده‌های پویا:					
X	-	-	-	-	$0.0766 \pm 0.0042$
Y	$0.0753 \pm 0.0041$	-	-	-	$0.0348 \pm 0.0019$
Z	-	-	-	-	$0.5285 \pm 0.0296$
واریانس کل: $\sigma_{Total} = 0.55$					
داده‌های ایستادن:					
X	$0.3136 \pm 0.0110$	-	-	-	$0.1214 \pm 0.0043$
Y	$0.1513 \pm 0.0053$	-	-	-	$0.1522 \pm 0.0053$
Z	$0.2571 \pm 0.0090$	-	-	$0.8722 \pm 0.0305$	$0.2934 \pm 0.0103$
واریانس کل: $\sigma_{Total} = 1.0354$					

می‌باشد. میزان بهبود ژيروسکوپ برابر ۸۲ درصد می‌باشد که نسبت به سیگنال‌های حذف نویز شده به صورت منفرد، پاسخ بهتری در اختیار ما می‌گذارد. در حالت بعدی از داوپیچیز ۴ شش سطحی (۳۲ نقطه‌ای)، داوپیچیز ۶ و هار هفت سطحی (۶۴ نقطه‌ای) استفاده شده است و ضرایب به ترتیب همان اولویت قبلی در جدول (۵) می‌باشد. میزان بهبود ژيروسکوپ تقریباً برابر ۸۴ درصد است که پاسخی بهتر نسبت به حالت پیچیده‌تر خود که ترکیب با هفت سطح برای داوپیچیز ۴ می‌باشد، ولی همانطور که ضرایب ترکیب ۳ تایی مشاهده می‌شود، برای برخی از حالات ضرایب نزدیک به صفر یا کوچک‌تر از ۰.۱ می‌باشد، لذا به جای پردازش ژنتیکی با سه سیگنال حذف نویز شده برای میانگین‌گیری هوشمند از دو سیگنال استفاده می‌کنیم.

عمل ادغام بین دو ضریب انجام می‌شود. برای مثال، اگر ضرایب  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  که برداری سه تایی هستند را بخواهیم در این پروژهدادام کنیم، درآیه سوم  $\alpha_1$  با درآیه اول  $\alpha_2$  یا حالت‌های دیگر از این جابه‌جایی‌ها را می‌تواند انجام دهد. برای جهش نیز کل حالات یعنی برای تعداد ضرایب سه تایی،  $3! = 6$  حالت و برای تعداد ضرایب دوتایی،  $2! = 2$  حالت در نظر گرفته شده است. این کار به دلیل این است که ما می‌خواهیم مجموع ضرایب برای هر دوره برابر یک باشد. نخست فرض کنید سیگنال‌های حذف نویز شده داوپیچیز ۴، ۶ و هار که هر کدام دارای هفت سطح تجزیه می‌باشند را با الگوریتم ژنتیک، در یکدیگر ادغام نماییم. نتایج ضرایب در جدول (۶) نشان داده شده است  $(\alpha)$  ضریب مربوطه به داوپیچیز ۴،  $(\beta)$  ضریب مربوطه به داوپیچیز ۶ و  $(\gamma)$  ضریب مربوطه به هار. همانطور که از ضرایب مشاهده می‌شود، داوپیچیز ۴ دارای بیش‌ترین سهم از ضرایب

جدول (۴): نتایج بدست آمده انحراف از معیار آلن کلی از موجک‌های مبتنی بر لیفتینگ با پایه‌های مختلف برای داده‌های ایستان و پویا حسگرهای اینرسی.

Haar N=۶۴	DB6 N=۶۴	DB6 N=۳۲	DB4 N=۶۴	DB4 N=۳۲	DB4 N=۱۶	DB4 N=۸	DB4 N=۴	DB4 N=۲	نتایج اولیه	تعداد نقاط و نوع موجک / نوع داده
۱.۲۲۱۷	۱.۲۶۴۳	۱.۶۷۴۰	۱.۱۰۰۷	۲.۱۸۲۶	۲.۹۳۹۵	۳.۸۳۵۰	۴.۲۸۱۲	۴.۶۹۳۱	۵.۵۴۲۷	انحراف از معیار کل ژيروسکوپ پویا
۷۷.۹۶	۷۷.۱۹	۶۹.۸۰	۸۰.۱۴	۶۰.۶۱	۴۶.۹۶	۳۰.۸۱	۲۲.۷۶	۱۵.۳۲	-	بهبود (%)
۸.۰۷۹۸	۸.۴۰۸۷	۸.۸۹۸۱	۵.۷۰۵۱	۶.۳۰۷۲	۸.۶۸۰۵	۹.۱۱۱۱	۹.۲۹۴۰	۹.۹۵۱۸	۱۱.۱۰۱۰	انحراف از معیار کل ژيروسکوپ ایستان
۲۷.۲۱	۲۴.۲۵	۱۹.۸۴	۴۸.۶۰	۴۳.۱۸	۲۱.۸۰	۱۷.۹۲	۱۶.۲۷	۱۰.۳۵	-	بهبود (%)
۰.۲۳۳۹	۰.۲۸۱۱	۰.۲۴۹۰	۰.۲۳۶۱	۰.۲۸۶۱	۰.۳۴۱۹	۰.۳۸۶۱	۰.۴۲۵۳	۰.۴۳۴۹	۰.۵۵	انحراف از معیار کل شتاب‌سنج پویا
۵۹.۲۹	۴۸.۸۹	۵۴.۷۳	۵۷.۰۶	۴۷.۹۷	۳۷.۸۳	۲۹.۸۰	۲۲.۶۷	۲۰.۹۲	-	بهبود (%)
۰.۹۸۲۳	۰.۹۸۰۵	۰.۹۷۴۹	۰.۶۶۴۱	۰.۶۹۸۸	۰.۷۴۶۶	۰.۸۱۳۲	۰.۸۷۵۹	۰.۹۲۷۱	۱.۰۳۵۴	انحراف از معیار کل شتاب‌سنج ایستان
۵.۱۲	۵.۳۰	۵.۸۴	۳۵.۸۶	۳۲.۵۰	۲۷.۸۹	۲۱.۴۶	۱۵.۴۰	۱۰.۴۵	-	بهبود (%)

و (۹) نشان داده شده است. برای داده‌های ایستان نیز به همین صورت رفتار می‌کنیم. مطابق جدول (۴) واریانس کلی برای سیگنال نویزی ژيروسکوپ برابر ۱۱.۱۰۱۰ می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود، این حسگر دارای نویز بیش‌تری است. دلیل آن این است که کوادکوپتر روشن در حالت ایستان لرزش دارد، لذا مولفه‌های نویزی آن دارای اندازه بزرگ‌تری می‌باشند. در حالت تک موجکی، بهترین پاسخ واریانس کل برای موجک داووییچیز ۴ با هفت سطح تجزیه بدست آمد. در این حالت واریانس کل برابر ۵.۷۰۵۱ حاصل شده که بهبودی ۴۸.۶۰٪ را به همراه دارد. برای ترکیب‌های دوتایی و سه‌تایی بهترین جواب برای آن، ترکیب دوتایی، داووییچیز ۴ و ۶ که هر کدام هفت سطح تجزیه دارند، می‌باشد. واریانس کلی آن برابر ۳.۱۶۰۱ و درصد بهبودی آن برابر ۷۱.۵۳٪ می‌باشد. نمودار سیگنال‌های نویزی و حذف نویز شده شتاب‌سنج و ژيروسکوپ مطابق شکل‌های (۱۰) و (۱۱) می‌باشد. نتایج خروجی برای هر یک از داده‌های ایستان و پویا در جدول (۶) بیان شده است. برای مقایسه نیز حالت تک سطحی به عنوان مقایسه با کار دیگران در جدول (۷) نتایج آن لحاظ شده است. نتایج بدست آمده نسبت به حالت تک سطحی به مراتب بهتر است. برای انجام عمل حذف نویز کار شده در این مقاله، با توجه به افزایش یافتن سطوح تجزیه، پیچیدگی سخت‌افزاری و زمانی نیز بالاتر می‌رود، ولی با توجه به مستقیم بودن لیفتینگ و همچنین سرعت بالای آن جای نگرانی ندارد و قابل قبول می‌باشد.

با توجه به نتایج بدست آمده از ترکیب دوتایی‌های مختلف، نتیجه می‌گیریم که ترکیب دوتایی هم از لحاظ پاسخ‌گویی به جواب مسئله و بار محاسباتی در مقابل ترکیب سه‌تایی بهتر است. بنابراین، ترکیب دوتایی جایگزین ترکیب سه‌تایی می‌شود. حال باید بین این ترکیب‌های دوتایی بهترین ترکیب را انتخاب نمود. در ابتدا معیار اول را پاسخ مسئله می‌گذاریم. از شش ترکیب دو ترکیب، مناسب‌تر از بقیه می‌باشند (داووییچیز ۴- شش سطح، داووییچیز ۶- هفت سطح و ترکیب داووییچیز ۴- شش سطح، هار- هفت سطح). از لحاظ خروجی، انحراف از معیار کلی ترکیب داووییچیز ۴- شش سطح، هار- هفت سطح دارای پاسخ بهتر است. مزیت دیگر سهم هر ضریب می‌باشد که مناسب‌تر از ترکیب‌های دیگر می‌باشد و مزیت آخر و مهم‌ترین مزیت، صرف نظر از انحراف از معیار خروجی و سهم ضرایب، میزان بار محاسباتی آن کم‌تر از باقی ترکیب‌ها است. با توجه به اینکه برای هر دو ترکیب داووییچیز ۴- شش سطحی انتخاب شده و مورد دوم آن‌ها با هم متفاوت است (برای اولی داووییچیز ۶- هفت سطح و برای دومی هار- هفت سطح). اگر به رابطه‌های جدول (۲) رجوع کنید، به این نکته دست خواهید یافت که گام‌های لیفتینگ برای موجک هار، برابر ۲، با کم‌ترین محاسبات جمع و ضرب بوده و گام‌های لیفتینگ برای داووییچیز ۶، برابر ۶ می‌باشد که هر کدام از گام‌ها نیاز به چندین جمع‌کننده و ضرب‌کننده و همچنین واحدهای شیفت دارند. لذا ترکیبی که مورد استفاده قرار می‌گیرد ترکیب داووییچیز ۴- شش سطح، هار- هفت سطح می‌باشد. بنابراین، سیگنال‌های نویزی و حذف نویز شده ژيروسکوپ و شتاب‌سنج به ترتیب در شکل‌های (۸)

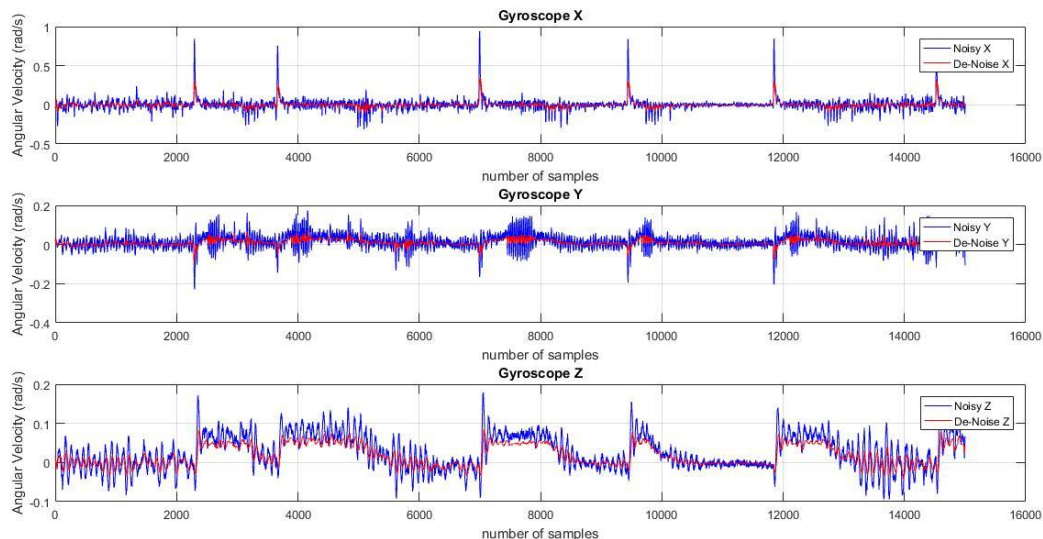
### ۵. نتیجه گیری

بهبود برای ژيروسکوپ و شتابسنج به ترتیب حدود ۷۲٪ و ۳۶٪ حاصل شد. موجک‌های لیفتینگ با پایه‌های مختلف برای این روش استفاده شد. نتایج حاصله حاکی از کارایی روش پیشنهادی در حذف نویز بود. در مقایسه با حالت تک سطحی تعداد سطح‌های تجزیه تا ۶ الی ۷ سطح تجزیه بالاتر رفته و پیچیدگی سخت‌افزاری نیز در قبال آن بالا می‌رود.

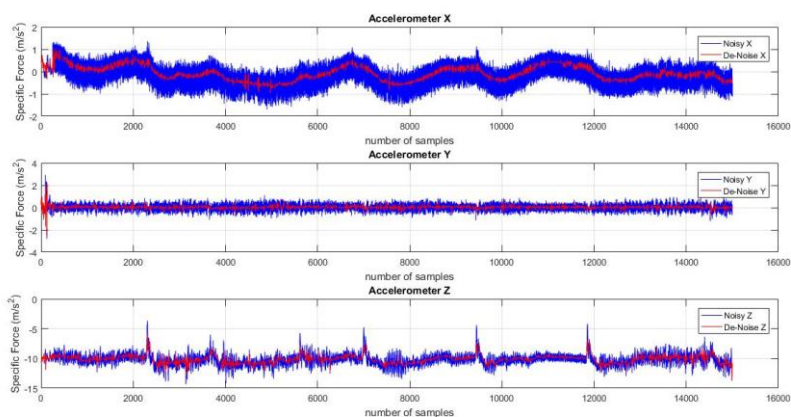
به دلیل ماهیت نویزپذیری بالا حسگرهای اینرسی یعنی شتابسنج و ژيروسکوپ، هدف در این مقاله حذف نویز حسگرهای اینرسی به عنوان مکملی برای حذف خطای حسگرهای اینرسی می‌باشد. روش‌های پیشنهادی با استفاده از تبدیل موجک مبتنی بر لیفتینگ و ترکیب آن با الگوریتم ژنتیک پیشنهاد گردید. برای داده‌های پویا میزان بهبود برای ژيروسکوپ حدود ۸۴٪ و شتابسنج حدود ۶۰ درصد و همچنین برای داده‌های ایستادن در محسط نویزی نیز میزان

جدول (۵): نتایج حاصل از بهینه‌سازی برای ژيروسکوپ با استفاده از الگوریتم ژنتیک.

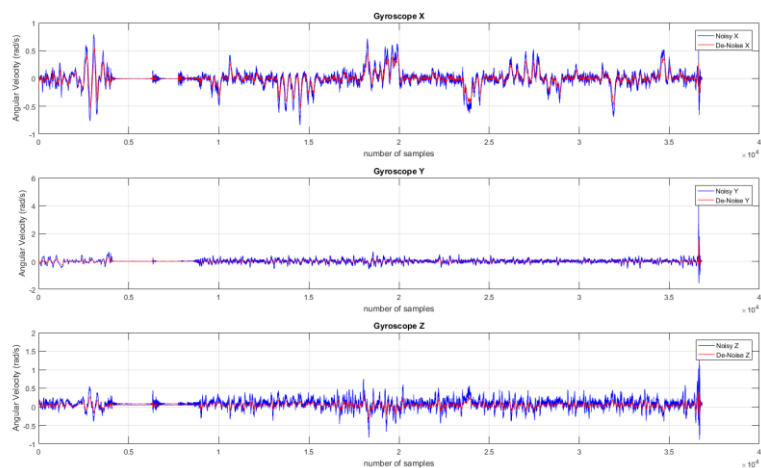
نوع ترکیب و تعداد نقاط	DB4, ۳۲ Haar, ۶۴	DB4, ۶۴ Haar, ۶۴	DB6, ۶۴ Haar, ۶۴	DB4, ۳۲ DB6, ۳۲	DB4, ۳۲ DB6, ۶۴	DB4, ۶۴ DB6, ۶۴	DB4, ۳۲ DB6, ۶۴ Haar, ۶۴	DB4, ۶۴ DB6, ۶۴ Haar, ۶۴	انحراف از معیار آلن کلی
انحراف از معیار آلن کلی	۰.۸۹۲۴	۰.۹۹۱۵	۱.۲۰۶۱	۱.۰۱۸۳	۰.۹۴۴۰	۰.۹۸۱۷	۰.۸۹۲۰	۰.۹۹۶۵	
بهبود (%)	۸۳.۸۹	۸۲.۱۱	۷۸.۲۳	۸۱.۶۲	۸۲.۹۳	۸۲.۲۸	۸۳.۹۰	۸۲.۰۲	
ضرایب	$\alpha = \begin{bmatrix} 0.9531 \\ 0.7428 \\ 0.7482 \\ 0.0469 \end{bmatrix}$ $\beta = \begin{bmatrix} 0.2572 \\ 0.2518 \end{bmatrix}$	$\alpha = \begin{bmatrix} 0.9995 \\ 0.8329 \\ 0.9995 \\ 0.0005 \end{bmatrix}$ $\beta = \begin{bmatrix} 0.1671 \\ 0.0005 \end{bmatrix}$	$\alpha = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.8775 \\ 0.0173 \\ 0 \end{bmatrix}$ $\beta = \begin{bmatrix} 0.1225 \\ 0.9827 \end{bmatrix}$	$\alpha = \begin{bmatrix} 0.7930 \\ 0.4620 \\ 0.9900 \\ 0.2070 \end{bmatrix}$ $\beta = \begin{bmatrix} 0.5380 \\ 0.0100 \end{bmatrix}$	$\alpha = \begin{bmatrix} 0.2118 \\ 0.7201 \\ 0.7804 \\ 0.7882 \end{bmatrix}$ $\beta = \begin{bmatrix} 0.2799 \\ 0.2196 \end{bmatrix}$	$\alpha = \begin{bmatrix} 0.9994 \\ 0.9692 \\ 0.9997 \\ 0.0006 \end{bmatrix}$ $\beta = \begin{bmatrix} 0.0308 \\ 0.0003 \end{bmatrix}$	$\alpha = \begin{bmatrix} 0.9085 \\ 0.7526 \\ 0.7578 \\ 0.0034 \end{bmatrix}$ $\beta = \begin{bmatrix} 0.1757 \\ 0.0756 \\ 0.0881 \end{bmatrix}$ $\gamma = \begin{bmatrix} 0.0717 \\ 0.1666 \end{bmatrix}$	$\alpha = \begin{bmatrix} 0.9128 \\ 0.9054 \\ 0.9922 \\ 0.0072 \end{bmatrix}$ $\beta = \begin{bmatrix} 0.0684 \\ 0.0049 \\ 0.0800 \end{bmatrix}$ $\gamma = \begin{bmatrix} 0.0262 \\ 0.0030 \end{bmatrix}$	



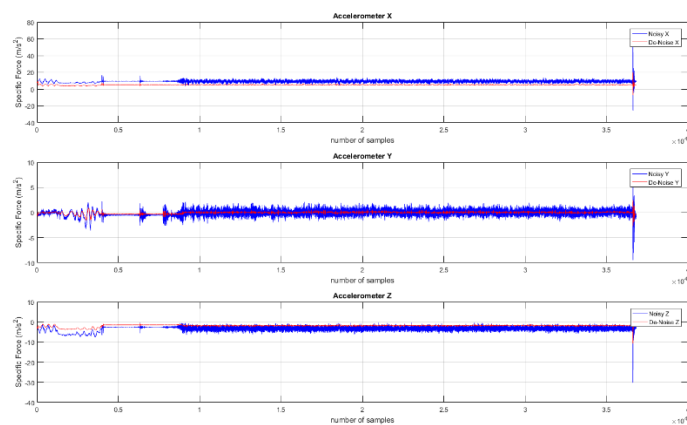
شکل (۸): نمودار سیگنال‌های نویزی و حذف نویز شده ژيروسکوپ برای سه محور داده‌های پویا.



شکل (۹) نمودار سیگنال‌های نویزی و حذف نویز شده شتابسنج برای سه محور داده‌های پویا.



شکل (۱۰): نمودار سیگنال‌های نویزی و حذف نویز شده ژيروسکوپ و مقایسه آن‌ها با یکدیگر برای هر سه محور داده‌های ایستادن.



شکل (۱۱): نمودار سیگنال‌های نویزی و حذف نویز شده شتابسنج و مقایسه آن‌ها با یکدیگر برای هر سه محور داده‌های ایستادن.

جدول (۶): انحراف از معیار آلن برای خروجی حذف نویز شده.

ناپایداری بایاس $Deg/s$	گام تصادفی سرعت $Deg/s^2$	نویز کوانتیزاسیون $Deg$	شیب سرعت رانش $Deg/s^2$	گام تصادفی $Deg/s^2$	نویز ژيروسکوپ محور
Haar (64) DB4 (32) داده‌های پویا:					
$0.2905 \pm 0.0160$	-	-	-	-	X
$0.4214 \pm 0.0232$	-	-	-	-	Y
$0.7310 \pm 0.0402$	-	-	-	-	Z
$\sigma_{Total} = 0.8924$	(/.۸۳.۸۹)				
DB6 (64) DB4 (64) داده‌های ایستار:					
$0.7626 \pm 0.0267$	-	-	-	-	X
$0.1528 \pm 0.0054$	-	-	-	$1.9934 \pm 0.0698$	Y
$1.2706 \pm 0.0445$	-	-	-	$1.9475 \pm 0.0682$	Z
$\sigma_{Total} = 3.1601$	(/.۷۱.۵۳)				
ناپایداری بایاس $m/s/s$	گام تصادفی سرعت $m/s/s^2$	نویز کوانتیزاسیون $m/s$	شیب سرعت رانش $m/s/s^2$	گام تصادفی $m/s/s^2$	نویز شتاب‌سنج محور
Haar (64) داده‌های پویا:					
$0.0351 \pm 0.0019$	-	-	-	-	X
$0.0352 \pm 0.0019$	-	-	-	-	Y
$0.2184 \pm 0.0120$	-	-	-	-	Z
$\sigma_{Total} = 0.2239$	(/.۵۹.۲۹)				
DB4 (64) داده‌های ایستار:					
$0.0679 \pm 0.0019$	-	-	-	$0.1688 \pm 0.0120$	X
$0.0497 \pm 0.0019$	-	-	-	$0.0799 \pm 0.0120$	Y
$0.0947 \pm 0.0120$	$0.6246 \pm 0.0120$	-	-	-	Z
$\sigma_{Total} = 0.6641$	(/.۳۶)				

جدول (۷): مقایسه نتایج.

نوع حذف نویز نوع داده	نتایج اولیه	لیفتینگ تک سطحی [14]	لیفتینگ چند سطحی (روش پیشنهادی در این مقاله)	لیفتینگ چند سطحی (روش پیشنهادی در این مقاله)
انحراف از معیار کل ژيروسکوپ پویا	۵.۵۴۲۷	۴.۵۸	۱.۱۰	۰.۸۹
بهبود (%)	-	۱۷.۳	۸۰	۸۳.۹
انحراف از معیار کل ژيروسکوپ ایستار	۱۱.۱۰۱۰	۹.۸۱	۵.۷	۳.۱۶
بهبود (%)	-	۱۱.۶	۴۸	۷۱.۵
انحراف از معیار کل شتاب‌سنج پویا	۰.۵۵	۰.۴۲	۰.۲۲	-
بهبود (%)	-	۲۳	۵۹.۲	-
انحراف از معیار کل شتاب‌سنج ایستار	۱.۰۳۵۴	۰.۹۲	۰.۶۶	-
بهبود (%)	-	۱۰.۳	۳۶	-

## مراجع

- [1].E. S. Abdolkarimi and M. R. Mosavi, "Wavelet-Adaptive Neural Subtractive Clustering Fuzzy Inference System to Enhance Low-Cost and High-Speed INS/GPS Navigation System," *Journal of GPS Solutions*, Vol. 24, No. 2, PP. 1-17, 2020.
- [2].A. G. Quinchia, G. Falco, E. Falletti, F. Dovis, and C. Ferrer, "A Comparison Between Different Error Modeling of MEMS Applied to GPS/INS Integrated Systems," *Sensors*, Vol. 13, No. 8, PP. 9549-9588, 2013.
- [3].E. S. Abdolkarimi, G. Abaei, and M. R. Mosavi, "A Wavelet-extreme Learning Machine for Low-Cost INS/GPS Navigation System in High-Speed Applications," *GPS Solutions*, Vol. 22, No. 1, PP. 1-13, 2018
- [4].M. El-Diasty and S. Pagiatakis, "Calibration and Stochastic Modelling of Inertial Navigation Sensor Errors," *Journal of Global Positioning Systems*, Vol. 7, PP. 170-182, 2008.
- [5].W. Fang, J. Jiang, S. Lu, Y. Gong, Y. Tao, Y. Tang, P. Yan, H. Luo, and J. Liu, "A LSTM Algorithm Estimating Pseudo Measurements for Aiding INS during GNSS Signal Outages," *Remote Sensing*, Vol. 12, No. 2, P. 256, 2020.
- [6].M. Zhu, L. Pang, Z. Xiao, C. Shen, H. Cao, Y. Shi, and J. Liu, "Temperature Drift Compensation for High-G MEMS Accelerometer Based on RBF NN Improved Method," *Applied Sciences*, Vol. 9, PP. 4-17, 2019.
- [7].P. Aggarwal, Z. Syed, X. Niu, and N. El-Sheimy, "A Standard Testing and Calibration Procedure for Low Cost MEMS Inertial Sensors and Units," *The Journal of Navigation*, Vol. 61, PP. 323-336, 2008.
- [8].H. Xing, B. Hou, Z. Lin, and M. Guo, "Modeling and Compensation of Random Drift of MEMS Gyroscopes based on Least Squares Support Vector Machine Optimized by Chaotic Particle Swarm Optimization," *Sensors*, Vol. 17, No. 10, P. 2335, 2017.
- [9].M. Sharie, M. R. Mosavi, and N. Rahemi, "Acquisition of Weak GPS Signals using Wavelet-based De-noising Methods," *Journal of Survey Review*, 2019, (DOI: 10.080/00396265.2019.1648718).
- [10].N. El-Sheimy, S. Nassar, and A. Noureldin, "Wavelet de-noising for IMU alignment," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Vol. 19, No. 10, PP. 32-39, 2004.
- [11].J. Song, Z. Shi, B. Du, L. Han, H. Wang, and Z. Wang, "MEMS gyroscope wavelet de-noising method based on redundancy and sparse representation," *Microelectronic Engineering*, Vol. 217, PP. 58-67, 2019.
- [12].I. Daubechies and W. Sweldens, "Factoring Wavelet Transforms into Lifting Steps," *Journal of Fourier Analysis and Applications*, Vol. 4, No. 3, PP. 247-269, 1998.
- [13].M. M. Hasan and K. A. Wahid, "Low-cost Lifting Architecture and Lossless Implementation of Daubechies-8 Wavelets," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, Vol. 68, No. 8, PP. 2515-2523, 2018.
- [14].Z. Liu, Y. Mi, and Y. Mao, "Improved Real-Time Denoising Method Based on Lifting Wavelet Transform," *Measurement science review*, Vol. 14, No. 3, PP. 152-159, 2014.
- [15].N. Okati, M. R. Mosavi, and H. Behroozi, "A Novel Genetic-Based Resource Allocation and Cooperative Node Selection Technique for Physical Layer Security Designs," *Journal of Wireless Personal Communications*, Vol. 95, No. 4, PP. 4733-4746, 2017.
- [16].D. Li, X. Jia, and J. Zhao, "A Novel Hybrid Fusion Algorithm for Low-Cost GPS/INS Integrated Navigation System During GPS Outages," *IEEE Access*, Vol. 41, No. 5, PP. 2166-2173, 2020.
- [17].N. El-Sheimy, H. Hou, and X. & Niu, "Analysis and Modeling of Inertial Sensors Using Allan Variance," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 57, No. 1, PP. 140-149, 2008.
- [18].J. Weston and D. Titterton, "Modern Inertial Navigation Technology and Its Application," *Electronics & Communication Engineering Journal*, Vol. 12, No. 2, PP. 49-64, 2000.
- [19].X. Rui, M. Ke, Q. Feng, and W. Zhen-Lei, "Online Wavelet Denoising Via a Moving Window," *Acta Automatica Sinica*, Vol. 33, No. 9, PP. 897-901, 2007.
- [20].D. Donoho, "De-noising by Soft-Thresholding," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 41, No. 3, PP. 613-627, 1995.
- [21].A. Lotfi, M. Kaveh, M. R. Mosavi, and A. R. Rahmati, "An Enhanced Fuzzy Controller Based on Improved Genetic Algorithm for Speed Control of DC Motors," *Journal of Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2020, (DOI: 10.1007/s10470-020-01599-9).
- [22].D. Wang, Y. Dong, Q. Li, Z. Li and J. Wu, "Using Allan Variance to Improve Stochastic Modeling for Accurate GNSS/INS Integrated Navigation," *GPS Solutions*, Vol. 22, No. 2, 2018.
- [23].M. Burri, J. Nikolic, P. Gohl, T. Schneider, J. Rehder, S. Omari, M. W. Achtelik, and R. Siegwart, "The EuRoC Micro Aerial Vehicle Datasets," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 35, No. 10, PP. 1157-1163, 2016.

