

کنترل کیفی داده‌های بویه‌های موج‌نگار در دریای خزر

سید مصطفی نوربخش^۱، احمدرضا زمانی^۲، محمدعلی بدری^{۳*}

۱- استادیار مخابرات، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، پست الکترونیکی: mostafanoorbaksh@gmail.com

۲- استادیار مکانیک، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، پست الکترونیکی: arzamani@cc.iut.ac.ir

۳- استادیار مکانیک، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، پست الکترونیکی: malbdr@cc.iut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۴

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۱/۹/۲۲

© نشریه علمی - پژوهشی اقیانوس‌شناسی ۱۳۹۳، تمامی حقوق این اثر متعلق به نشریه اقیانوس‌شناسی است.

چکیده

داده‌های ارسال شده توسط بویه‌های موج‌نگار (Wave Measurement Buoy) به لحاظ شرایط سخت استقرار بویه در دریا و تلاطم آب در طول زمان نیاز به بررسی صحت و کنترل کیفی دارند. در این مقاله با توجه به اصول موج‌نگاری و الگوریتم‌های کنترل کیفی، نتایج اجرای الگوریتم‌های کنترل کیفی (Data Quality Control) داده‌های چند بویه موج‌نگار که در آب‌های دریای خزر (Reactive oxygen species) فعال بوده‌اند، عرضه می‌گردد. این نتایج نشان می‌دهد الگوریتم‌های کنترل کیفی طراحی شده قادر است موارد وقوع خطا در داده‌های بویه‌های موج‌نگار را آشکارسازی کرده و مجموعه‌ی داده‌های معتبر و قابل اعتمادی را برای استفاده فراهم نماید.

کلمات کلیدی: بویه‌ی موج‌نگار، کنترل کیفی داده‌ها، دریای خزر.

۱. مقدمه

انحراف از تراز چرخش^۱ و پیچش^۲، حرکت عمودی بویه نسبت به سطح متوسط دریا^۳، زاویه دوران افقی بویه^۴ نسبت به دستگاه مختصات مغناطیسی زمین و مختصات جغرافیایی بویه (GPS) مجهز است. علاوه بر سری‌های زمانی سنسورها، سامانه بویه معمولاً برخی اطلاعات حاصل از پردازش روی داده‌های خام را نیز عرضه می‌نماید. از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به مقادیر طیفی که با برخی تبدیل‌های زمان به فرکانس روی داده‌های سنسورها به‌دست می‌آیند و مقادیر کلی^۵ یا پارامترهای موج‌نگاری که حاصل پردازش‌های مختلف روی داده‌های سنسورها هستند،

بویه‌های موج‌نگار نقش موثری در جمع‌آوری اطلاعات پایه‌ای در محیط دریا دارند. اطلاعات این بویه‌ها در زمینه‌های گوناگونی نظیر مدل‌سازی امواج، طراحی سازه‌های دریایی، تحلیل‌های آماری و ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای استفاده می‌شوند. شرایط سخت کارکرد بویه‌های موج‌نگار در محیط دریا از یک طرف و لزوم برخورداری از داده‌های مطمئن از طرف دیگر، لزوم کنترل کیفی داده‌های ثبت شده را ضروری می‌سازد. یک بویه‌ی موج‌نگار به‌صورت معمول به سنسورهای اندازه‌گیری کمیت‌هایی نظیر سرعت باد، جهت باد، دمای آب، دمای هوا، زاویه‌های

¹ roll

² pitch

³ heave

⁴ yaw

⁵ bulk

ارزیابی سونامی^۶ است. مرکز NDBC علاوه بر این کنترل کیفی نزدیک به ۳۰۰ ایستگاه دیگر مربوط به IOOS^۷، ۲۰۰ ایستگاه مربوط به NOS^۸، ۷۰ ایستگاه مربوط به MMS^۹ را عهده‌دار است. در سایت اینترنتی <http://www.ndbc.noaa.gov/ioos.html> برنامه‌های IOOS آمده است. بخشی از داده‌های بویه‌ها جهت کنترل داده‌های سنجش از راه دور (نظیر ماهواره‌ها)، تغییرات آب و هوا، آمارهای طولانی مدت برای کاربردهای مهندسی و غیره به کار می‌روند.

با توجه به گستردگی شبکه مربوط به NOS، IOOS، NOBC و MMS که شامل شبکه‌های اندازه‌گیری دریایی و ساحلی هستند، بررسی کنترل کیفی داده‌های این مرجع از اهمیت خاصی برخوردار است. نسخه‌های پیشین این دستورالعمل‌ها در سال‌های ۱۹۹۶، ۱۹۹۸، ۲۰۰۳ و ۲۰۰۹ ارائه شده است. یکی از مراجع پر استناد مرجع مربوط به شرکت اشنور است که توسط UNESCO انتشار یافته و روش‌های کنترل کیفی داده‌های اقیانوسی را مورد بررسی قرار داده است. این مرجع دو مفهوم کلی برای کنترل کیفی داده‌ها در نظر گرفته است. مفهوم اول اختصاص به کنترل کیفی اتوماتیک دارد که توسط برنامه رایانه‌ای و بر اساس الگوریتم‌های خاص انجام می‌شود. این الگوریتم‌ها شامل کنترل مواردی همانند محدوده فیزیکی، ثابت بودن داده‌ها، نرخ تغییرات، وجود وقفه و غیره می‌شوند. این نوع کنترل‌ها همان‌گونه که گفته شد بر مبنای نرم‌افزار صورت گرفته و به همین دلیل به آن‌ها «کنترل کیفی خودکار»^{۱۰} گفته می‌شود. دسته دوم از کنترل‌ها به منطقی بودن^{۱۱} داده‌ها اشاره دارد. هدف از این نوع کنترل کیفی، ارزیابی داده‌ها از نظر هماهنگی با یکدیگر و یا هماهنگی با سایر منابع داده‌ها است. بنابراین مفاهیم فیزیکی برداشت شده از داده‌ها نقش مهمی را در این حالت دارا هستند و بدین ترتیب، آزمون‌های مورد نظر توسط افراد یا گروه‌های خبره صورت می‌گیرد. به این دسته از کنترل‌های انجام شده «ارزیابی داده‌های هواشناسی و اقیانوس‌شناسی»^{۱۲} اطلاق شده است. این مرجع معیارهای کنترل

اشاره کرد. اطلاعات موج‌نگاری در خلال مدت فعالیت بویه در دریا ممکن است هر چند گاه دچار خطا بشوند. برخی علل خطا عبارتند از:

- (الف) استهلاک و معیوب شدن سنسورها به مرور زمان،
- (ب) شرایط سخت استقرار بویه در دریا و تلاطم‌های آب در طول زمان،
- (ج) وقوع زمان‌هایی که بویه توسط لنگر خود کشیده شده و آزادی حرکت همراه با امواج دریا را ندارد،
- (د) خطا در ارسال داده‌ها.

به همین دلیل، بررسی صحت و کنترل کیفی داده‌های بویه‌های موج‌نگار بسیار ضروری است. بررسی کنترل کیفی داده‌های اقیانوسی توسط گروه‌ها و ارگان‌های مختلفی صورت گرفته است. یکی از مهم‌ترین گروه‌های کاری که در سال‌های اخیر و به‌طور گسترده به بررسی و تدوین راه‌کارهای مختلف در این زمینه پرداخته است، گروه کاری QARTOD^۱ است. این گروه تا کنون پنج کارگاه آموزشی را در زمینه‌های کنترل کیفی داده‌ها به انجام رسانیده است. دوره‌های فوق از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ برگزار شده و از این لحاظ از جمله مراجع جدید به‌شمار می‌آیند. یکی از مراجع انتشار یافته توسط مرکز ملی داده‌های بویه‌ی آمریکا (NDBC)^۲ است که به کنترل کیفی داده‌های امواج مربوط می‌شود که بر اساس توصیه‌های QARTOD انتشار یافته است. در مراجع فوق علاوه بر خلاصه‌ی آزمون‌های لازم، به شرکت‌ها و موسسات استفاده‌کننده از روش‌های پیشنهادی نیز اشاره شده است.

یکی دیگر از مراجع معتبر، دستورالعمل‌های ارائه شده توسط مرکز علوم جوی و اقیانوسی آمریکا (NOAA)^۳ است. آخرین دستورالعمل‌های پیشنهادی NOAA در قالب دستورالعمل‌ها و روش‌های کنترل کیفی بیان شده است. در این مرجع به معرفی اجمالی از ایستگاه‌های موسسه علوم جوی و اقیانوسی آمریکا (NOAA) و همچنین مرکز هواشناسی آمریکا (NWS)^۴ پرداخته شده است. بخشی از این شبکه که به بویه‌های اندازه‌گیری اختصاص دارد توسط NDBC راه‌بری می‌شود. در مجموع شبکه اندازه‌گیری شامل ۱۰۰ بویه‌ی مهار شده، ۵۰ ایستگاه ساحلی، ۵۵ ایستگاه جوی مناطق حاره‌ای^۵، ۳۹ ایستگاه آب عمیق گزارش و

⁶ Deep-Ocean reporting and assessment of Tsunamis

⁷ Integrated Ocean Observing system (IOOS)

⁸ National Ocean Service (NOS)

⁹ Minerals Management System

¹⁰ Automatic Quality Control

¹¹ reasonableness of data

¹² Oceanographic and meteorological assessment

¹ Quality Assurance of Real-time Oceanographic Data (QARTOD)

² National Buoy Data Center (NDBC)

³ National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA)

⁴ National weather service (NWS)14

⁵ Tropical Atmospheric Ocean

زمانی سیگنال، پارامترهای طیفی و پارامترهای موج به چشم می‌خورد.

این مقاله به معرفی الگوریتم‌های کنترل کیفی داده‌های موج‌نگاری و بیان نتایج اعمال این الگوریتم‌ها روی داده‌های برداشت شده توسط بویه‌های نصب شده در دریای خزر اختصاص دارد. در بخش ۲ به مرور نظریه موج‌نگاری و تعریف‌های اولیه آن، از جمله مقادیر طیفی و مقادیر کلی پرداخته شده است. در بخش ۳ الگوریتم‌های کنترل کیفی انتخاب شده برای بررسی صحت یا کیفیت داده‌ها معرفی گردیده‌اند. بخش ۴ به بیان نتایج اعمال این الگوریتم‌ها روی داده‌های چند بویه موج‌نگار که در آب‌های خزر فعال بوده‌اند، اختصاص دارد. در پایان، ضمن نتیجه‌گیری، به موارد لازم در توسعه کار حاضر پرداخته می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

در بحث نظریه موج‌نگاری، امکان حرکت عمودی بویه (حرکت در راستای محور z) و دوران حول محورهای x ، y و z در نظر گرفته شده و از حرکت‌های افقی بویه صرف‌نظر می‌گردد. شکل ۱ محورهای مختصات مورد استفاده و زوایای دوران را نشان می‌دهد. در این شکل، مختصات بویه $(x_0, y_0, z(t))$ ، زاویه دوران افقی α ، و زاویه‌های چرخش و پیچش به ترتیب β و γ نظر گرفته شده‌اند. ترتیب دوران، ابتدا α ، سپس β و سپس γ است.

طبق رابطه ۱، شیب‌های بویه نسبت به محورهای مختصات x و y بر حسب زوایای چرخش و پیچش و دوران افقی به دست می‌آیند (نوربخش، ۱۳۸۹):

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial x}(x_0, y_0, t) &= \eta'_x(t) = -\cos \alpha(t) \operatorname{tg} \beta(t) - \sin \alpha(t) \frac{\operatorname{tg} \gamma(t)}{\cos \beta(t)} \\ \frac{\partial z}{\partial y}(x_0, y_0, t) &= \eta'_y(t) = \cos \alpha(t) \frac{\operatorname{tg} \gamma(t)}{\cos \beta(t)} - \sin \alpha(t) \operatorname{tg} \beta(t) \end{aligned} \quad (1)$$

سنسورهای اندازه‌گیر زاویه‌های α ، β ، γ به ترتیب روی محورهای دستگاه مختصات بدنه $x'y'z'$ که دوران یافته است، نصب شده‌اند و به ترتیب زاویه‌های γ_s ، β_s و α_s را اعلام می‌کنند. محور x در امتداد محور شمال و محور y در امتداد محور غرب انتخاب می‌شود. قطب‌نما روی یک صفحه تراز، سنجش زاویه دوران افقی را انجام می‌دهد که محور

کیفی داده‌ها در مورد انواع متغیرهای هواشناسی، اقیانوس‌شناسی و موج‌نگاری را بیان کرده است.

یکی از مهم‌ترین بخش‌های کنترل کیفی داده‌ها، اختصاص به الگوریتم‌های کنترل کیفی داده‌های امواج و پردازش آن‌ها دارد (Stennis Space Center, 1996; Lang, 1987; Ochi, 2005). تقسیم‌بندی کلی انجام شده در مورد آزمون‌های موج‌نگاری در مراجع فوق در سه دسته‌بندی کلی شکل می‌گیرد. این سه دسته‌بندی شامل سری‌های زمانی، طیف انرژی و پارامترهای موج‌نگاری است.

در کار انجام شده دیگری که توسط اتحادیه اروپا حمایت شده است، نحوه کنترل کیفی داده‌های بویه‌های هواشناسی و اقیانوس‌شناسی با نام اختصاری M3A در آب‌های مدیترانه انجام شده است. این کار بخشی از برنامه‌ی پیش‌بینی شرایط محیطی دریای مدیترانه بوده است. UKOOA گزارشی از روش‌های به کار رفته را ارائه نموده است. این مرجع توسط موسسه ایتالیایی OGS^۱ انتشار یافته است. در کار انجام شده توسط OGS، کنترل کیفی اتوماتیک داده‌ها که از آن به کنترل کیفی سطح صفر نیز یاد شده است انجام می‌شود. آزمون‌های نوعی مطرح شده در این مرجع به‌طور مشابه در مراجع NDBC و UNESCO نیز به کار رفته‌اند. روش‌های توصیه شده در کنترل کیفی و اعتبارسنجی داده‌های هواشناسی و اقیانوس‌شناسی و موج‌نگاری در شرکت‌های نفتی توسط انجمن عملیات فراساحلی انگلستان^۲ (UKOOA) پیشنهاد شده است (Sara et al., 2010). در این مرجع نیز روش‌های کنترل کیفی خودکار و ارزیابی الگوی داده‌ها بیان شده‌اند. اگرچه مرجع حاضر بر مبنای اندازه‌گیری‌ها در آب‌های انگلستان تنظیم شده است، لیکن نحوه بیان مسئله به گونه‌ای است که نتایج آن به آب‌های دیگر نیز قابل تعمیم بوده و کاملاً کاربردی است. ضمناً این مرجع عیناً در دستورالعمل‌های یونسکو انتشار یافته است. کنترل کیفی خودکار داده‌ها در این مرجع به محدوده فیزیکی سنسورها، نرخ تغییرات، ایستایی داده‌ها و وجود وقفه در داده‌ها اختصاص دارد. همچنین بر مبنای اطلاعات حاصل از QATROD-V اطلاعات خلاصه‌ای از آزمون‌های کنترل کیفی مرتبط با دستگاه‌های سنجش موج و جریان از طریق سامانه‌های صوتی بیان شده است. در تقسیم‌بندی آزمون‌های ارائه شده در این مرجع نیز آزمون‌های مربوط به سری

^۱ Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale-OGS

^۲ UK offshore Operation Association Limited (UKOOA)

$$\begin{aligned} R_{11}(\tau) &= E\{z(t+\tau)z(t)\} \\ R_{12}(\tau) &= E\{z(t+\tau)z'_x(t)\} \\ R_{13}(\tau) &= E\{z(t+\tau)z'_y(t)\} \end{aligned} \quad (2)$$

در رابطه ۲، R_{ij} معرف تابع خودهمبستگی (به ازای $i=j$) یا همبستگی متقابل (به ازای $i \neq j$) است. همچنین $E\{\cdot\}$ امید ریاضی و τ انتقال زمانی است. در این رابطه جهت سادگی از اندیس ۱ تا ۳ به ترتیب برای نمایش حرکت عمودی، شیب نسبت به محور x و شیب نسبت به محور y استفاده شده است. با داشتن دسته روابط ۲، طیف فرکانسی حرکت عمودی و طیف‌های متقابل حرکت عمودی با شیب‌های بویه از رابطه زیر به دست می‌آیند:

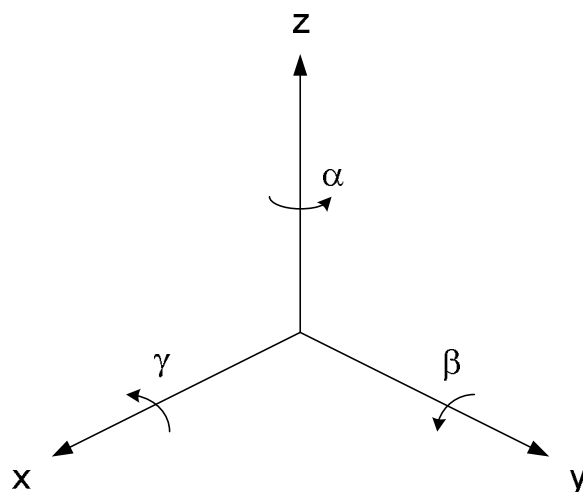
$$\begin{aligned} S(f) &= 2 \int R_{11}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau, f \geq 0 \\ S_{12}(f) &= 2 \int R_{12}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau, f \geq 0 \\ S_{13}(f) &= 2 \int R_{13}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau, f \geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

در رابطه ۳، $S(f)$ معرف طیف بدون جهت عمودی و $S_{12}(f)$ و $S_{13}(f)$ طیف‌های متقابل حرکت عمودی با شیب‌های بویه هستند. همچنین f فرکانس موج بر حسب Hz است و j نیز برابر $\sqrt{-1}$ است. طیف‌های متقابل $S_{12}(f) = j Q_{12}(f)$ و $S_{13}(f) = j Q_{13}(f)$ موهومی محض هستند. جهت متوسط موج در هر فرکانس f از رابطه ۴ به دست آمده است (Ochi, 2005).

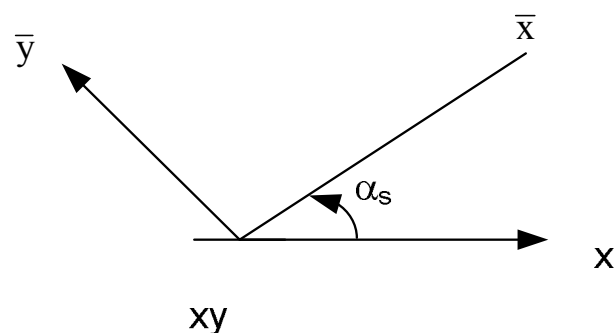
$$\bar{\theta}(f) = \tan^{-1} \frac{Q_{13}(f)}{Q_{12}(f)} \quad (4)$$

در رابطه ۴، $\bar{\theta}$ جهت متوسط موج و عبارت‌های Q_{12} و Q_{13} بخش‌های موهومی طیف‌های متقابل را نشان می‌دهند. دسته دیگر از داده‌های موج نگاری، پارامترهای موج نگاری هستند. از جمله آن‌ها می‌توان به حداکثر ارتفاع موج (H_{max})، ارتفاع مؤثر موج (H_s)، پرپود متوسط عبور از صفر (T_z) و فرکانس و پرپود اوجی ($T_p = 1/f_p$) طیف حرکت عمودی اشاره کرد. ارتفاع موج یک سری زمانی است، که از روی سری زمانی حرکت عمودی به دست می‌آید. این ارتفاع، فاصله مکانی بین قله‌ها و قعرهای موج را نشان می‌دهد. همچنین بر اساس تعریف، ارتفاع مؤثر موج مبین متوسط یک سوم بزرگ‌ترین ارتفاع امواج است.

آن، تصویر محور x' روی صفحه xy است. شاخص سنسور یاو (قطب‌نما) امتداد محور شمال را نشان داده و منطبق بر محور x (در دستگاه ثابت مرجع) است. طبق شکل ۲ زاویه این شاخص با محور \bar{x} در صفحه xy ($Z=0$) مقدار زاویه α_s است.



شکل ۱: دستگاه محورهای مختصات و زوایه‌های دوران



شکل ۲: اندازه‌گیری زاویه دوران افقی توسط قطب‌نما

با فرض‌های صورت گرفته، ارتباط سه زاویه دوران α ، β ، γ در دستگاه ثابت مرجع با زوایه‌های دوران اندازه‌گیری شده توسط سنسور عبارت است از $\alpha = \alpha_s$ ، $\gamma = \gamma_s$ ، $\beta = \cos \gamma_s \tan \beta_s$ (نوربخش، ۱۳۸۹).

مقادیر طیفی موج بر اساس طیف حرکت عمودی و طیف‌های متقابل حرکت عمودی با شیب‌های بویه نسبت به محورهای مختصات x و y تعریف می‌شود (Ochi, 2005). توابع خودهمبستگی و همبستگی متقابل به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

۳. کنترل کیفی داده‌های موج‌نگاری

قطعات مجاور مقایسه می‌شود. اگر تفاوت بیش از P بود، داده‌ها کلاً مردود اعلام شده و hf اعلام می‌شود.

(T4) آزمون ثابت ماندن داده‌ها: برای هر یک از انواع داده‌ها، یک زمان T تعیین می‌شود که داده‌ها حداکثر در آن زمان می‌توانند ثابت بمانند. قالب داده‌ای که شرط ثابت ماندن داده‌ها به میزان حداکثر T را نقض کند، مردود اعلام شده و برای آن hf اعلام می‌شود.

(T5) آزمون گوسی بودن حرکت عمودی: انتظار می‌رود که نمونه‌های حرکت عمودی موج از توزیع چگالی گوسی پیروی کنند. لذا برای هر قالب داده حرکت عمودی، هیستوگرام M نقطه‌ای استخراج شده و با تابع چگالی احتمال گوسی $f_z(z) = (2\pi P)^{-1/2} \exp(-z^2 / (2P))$ با پارامتر $P = E\{z_i^2\}$ که از آن قالب داده تخمین زده می‌شود، مقایسه می‌گردد (به صورت متوسط مربعات تفاوت دو تابع). $f_z(z)$ تابع چگالی احتمال، z حرکت عمودی موج با متوسط صفر و P واریانس حرکت عمودی است. اگر تفاوت بین هیستوگرام و توزیع گوسی بیش از خطای مجاز بود، sf اعلام می‌شود.

برخی الگوریتم‌های کنترل کیفی برای مقادیر طیفی (طیف بدون جهت حرکت عمودی) عبارتند از:

(S1) انطباق بین سری زمانی و طیف: طیف سری زمانی حرکت عمودی، $S'(f_i)$ ، تخمین زده شده و با طیف ارائه شده توسط نرم افزار مرتبط با بویه، $S(f_i)$ ، مقایسه می‌گردد. برای تخمین طیف، از همان پارامترهای فرکانس نمونه‌برداری و تعداد فرکانس‌ها که در تخمین $S(f_i)$ به کار رفته است، استفاده می‌شود. روش تخمین $S'(f_i)$ ، مدلینگ AR^6 با درجه n انتخاب می‌شود. این روش نسبت به مجموعه روش‌های پرودوگرام^۷، مزیت خطا و نوسانات^۸ کمتر را دارد (Kay, 1999). مقایسه $S(f_i)$ و $S'(f_i)$ به صورت بررسی

$$\sum_i |S(f_i) - S'(f_i)| / \sum_i S'(f_i)$$

می‌باشد که اگر از آستانه $\Delta = 0.48$ بیشتر باشد، sf اعلام می‌شود. (S2) آزمون محدوده فرکانسی طیف: طیف حرکت عمودی به صورت طبیعی در یک محدوده فرکانس حداقل f_{min} و فرکانس حداکثر f_{max} مقدار دارد. در این آزمون این محدوده برای طیف ارائه شده توسط سامانه بویه، $S(f_i)$ ، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در الگوریتم‌های کنترل کیفی در مورد اعتبار داده‌های موج‌نگاری و میزان قابلیت اعتماد به آن‌ها تصمیم‌گیری می‌شود. الگوریتم‌های کنترل کیفیت در مورد داده‌های تحلیل شده یکی از سه حالت زیر را در نظر می‌گیرد:

۱- صحیح و معتبر (OK)، ۲- کیفیت نامطلوب ولی قابل استفاده با اصلاحات^۱ (sf)، ۳- نامعتبر و غیر قابل استفاده (hf).
برخی الگوریتم‌های کنترل کیفی برای سری‌های زمانی α, β, γ و z عبارتند از:

(T1) آزمون جهش غیر مترقبه^۲: در این آزمون متوسط و انحراف استاندارد داده‌های سری زمانی، σ محاسبه می‌شود. هر نمونه داده‌ای که به اندازه $M\sigma$ از میزان متوسط فاصله داشته باشد، برای جهش نامربوط در نظر گرفته شده و مقدار جدیدی برای آن به وسیله درون‌یابی یا برون‌یابی n نقطه‌ای از مرتبه‌ی 0 ($0 < n$) مشخص می‌شود. ($n = 2$) بیانگر مقدار متوسط نمونه قبل و بعد است. اگر $N\%$ نقاط برای جهش نامربوط شناخته شدند، قطعه داده کلاً مردود در نظر گرفته شده و hf اعلام می‌شود. در صورت وجود نقاط جهش نامربوط کم‌تر از $N\%$ ، روند کنترل جهش‌های نامربوط حداکثر تا P مرتبه تکرار می‌شود. اگر پس از P تکرار، باز هم جهش نامربوط وجود داشت، برای قطعه داده hf، و در غیر این صورت، sf اعلام می‌شود.

(T2) آزمون محدوده^۴: در این آزمون قرار گرفتن داده‌های سری زمانی در یک محدوده مورد انتظار کنترل می‌شود. این محدوده با توجه به شرایط فیزیکی و یا با توجه به خصوصیات سنسور مشخص می‌شود. برای هر یک از داده‌هایی که محدوده مشخص شده را نقض کند، به وسیله درون‌یابی یا برون‌یابی N نقطه‌ای از مرتبه 0 ($0 < N$)، مقداری برای آن تهیه شده و جایگزین مقدار اولیه می‌شود. در صورت رخداد نقض محدوده مشخص شده، sf اعلام می‌شود.

(T3) آزمون جهش مقدار متوسط: قطعه‌ی داده‌ها به N زیر قطعه M نقطه‌ای تقسیم می‌شود. متوسط این قطعات با متوسط

¹ Soft flag
² Hard flag
³ Spike
⁴ Range

5 Heave
6 Autoregressive
7 Periodogram
8 Ripple

مقدار گستردگی زاویه‌ای در فرکانس اوجی طیف باید حداقل باشد. در این آزمون مقدار گستردگی زاویه‌ای در فرکانس اوجی طیف با آستانه $\theta=30^\circ$ مقایسه می‌شود. در صورت تجاوز از این آستانه، برای کل داده‌های طیفی یاد شده، sf اعلام می‌شود. برخی الگوریتم‌های کنترل کیفی برای مقادیر پارامتری عبارتند از:

(B1) آزمون محدوده معتبر: برای هر یک از پارامترهای موج نگاری، محدوده معتبر تعیین شده و مقدار هر نمونه پارامتر با این محدوده آزمون می‌شود. در صورت نقض محدوده معتبر، hf اعلام می‌گردد.

(B2) آزمون حداکثر مجاز تغییرات: برای هر یک از پارامترهای موج نگاری، حداکثر میزان تغییر Δ که می‌تواند با نمونه قبلی داشته باشند، تعیین شده و تفاوت مقدار هر نمونه پارامتر با نمونه قبلی با این میزان آزمون می‌شود. در صورت تجاوز از محدوده، hf اعلام می‌گردد.

(B3) آزمون ثابت ماندن بیش از حد پارامترها در بلند مدت: آزمون ثابت ماندن داده‌ها: برای هر یک از پارامترهای موج نگاری، یک زمان T تعیین می‌شود که مقادیر پارامترها حداکثر در آن زمان می‌توانند ثابت بمانند. هرگاه شرط ثابت ماندن داده‌ها به میزان حداکثر T نقض شود، hf اعلام می‌شود.

(B4) شرط شکست موج: شرط « $H_s/T_z^2 < K$ » برای نمونه‌های همزمان ارتفاع مؤثر موج H_s (m) و پریود عبور از صفر T_z (sec) اجرا می‌شود. بر اساس انتشارات کمیته اقیانوس‌شناسی اروپایی، در عمل این نامساوی همواره برقرار است. زیرا ارتفاع موج طبق این نامساوی با پدیده «شکست موج» محدود می‌شود. در صورت نقض این شرط، hf اعلام می‌شود.

۴. اعمال الگوریتم‌های کنترل کیفی بر داده‌های موج‌نگاری

آزمون‌های کنترل کیفی داده‌های موج‌نگاری در قسمت قبل به‌صورت یک نرم‌افزار پیاده‌سازی گردیده است که برای داده‌های ضبط شده توسط بویه‌های موج‌نگار قابل اجرا باشد. عموم این آزمون‌ها (Noorbakhsh, 2009)، یک یا تعدادی پارامتر کنترلی دارند که باید تنظیم گردد. پارامترهای کنترلی را می‌توان به پنج دسته تقسیم کرد:

الف) برای تمام فرکانس‌های f_i زیر f_{min} ، شرط $S(f_i) \leq 0.05 \text{ mean } S(f_k)$ کنترل می‌شود.

ب) برای تمام فرکانس‌های f_i بالای f_{max} ، شرط $S(f_i) \leq 0.05 \text{ mean } S(f_k)$ کنترل می‌شود.

در صورت عدم برآورده شدن شرط‌های فوق، برای قالب داده طیف تحت آزمون، sf اعلام می‌شود.

(S3) آزمون جهت امواج دوردست^۱: بر اساس داده طیفی موج که حاوی اطلاعات جهت موج هستند، این موضوع که امواج دوردست از سمت دریای باز می‌توانند وارد شوند نه از سمت خشکی، کنترل می‌گردد. این داده طیفی عبارت است از «جهت متوسط موج در هر فرکانس» که در رابطه ۴ تعریف شده است. در این آزمون، محدوده فرکانسی امواج دوردست $0.1/0.3 - 0.1/0.3$ Hz در نظر گرفته می‌شود. در این محدوده فرکانسی، جهت متوسط موج باید در محدوده زاویه‌ای که مشخصات جغرافیایی بویه نسبت به ساحل تعیین می‌کند، قرار داشته باشد. در صورت نقض این شرط، برای جهت متوسط موج، sf اعلام می‌شود.

(S4) آزمون کنترل نسبت: طبیعت امواج دریا اقتضا می‌کند که تابع $\sqrt{(C_{22}(f) + C_{33}(f)) / C_{11}(f)}$ با مقدار عدد موج $k(f)$ در هر فرکانس f (Hz) برابر باشد (Ochi, 2005). در این آزمون نزدیک بودن نسبت «مقدار تابع یاد شده به عدد موج» به مقدار واحد با لحاظ یک تolerانس $\epsilon \pm 1$ در فرکانس‌های مختلف کنترل می‌شود. $C_{11}(f)$ ، $C_{22}(f)$ ، و $C_{33}(f)$ به ترتیب عبارتند از طیف حرکت عمودی موج، طیف شیب موج نسبت به محور x و طیف شیب موج نسبت به محور y بر حسب فرکانس f. عدد موج از حل معادله $\omega^2 = kg \tanh(kh)$ بر حسب فرکانس ω (rad/s) بدست می‌آید (Ochi, 2005); که $\omega = 2\pi f$; عمق دریا بر حسب متر و $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ شتاب جاذبه زمین است. در صورت نقض تolerانس $\epsilon \pm 1$ در این آزمون، برای کل مقادیر طیفی، sf اعلام می‌شود.

(S5) آزمون گستردگی زاویه‌ای در فرکانس اوجی طیف: گستردگی زاویه‌ای یک تابع طیفی است که نشان می‌دهد در هر فرکانس f (Hz)، امواج آب چقدر پراکنش زاویه‌ای دارد. این تابع به‌صورت زیر تعریف می‌شود (Oceanor, 2000):

$$\sigma_0(f) \text{ (deg)} = (180/\pi) \sqrt{2 \left(1 - \frac{\sqrt{Q_{12}^2(f) + Q_{13}^2(f)}}{k(f)C_{11}(f)} \right)} \quad (5)$$

^۱ Swell

PSU، و برای منطقه دریای خزر به صورت ۳۰ تا ۳۳ PSU قرار داده می‌شود (World Ocean Atlas, 2005). محدوده زاویه‌ای مجاز برای ورود امواج دور دست نیز که وابسته به منطقه‌ی جغرافیایی است، در این دسته قرار می‌گیرد (آزمون S3).

دسته پنجم، پارامترهایی هستند که به هیچ کدام از روشهای فوق نمی‌توان به صورت مناسبی آنها را تعیین نمود. در این حالت، روش تعیین پارامترها، روش تجربی است. منحنی‌های داده‌های ضبط شده در خلال دوره‌های اندازه‌گیری در مناطق مختلف مشاهده شده و پس از تایید شهودی سالم بودن آنها، مقادیری برای این پارامترها با در نظر گرفتن حاشیه‌ای مناسب انتخاب می‌شود. برای نمونه، آستانه میزان ثابت ماندن بیش از حد داده‌های از نوع سری زمانی (T4) و از نوع پارامتری (B3) در این دسته است. طبیعت برخی پارامترها که تغییرات کندی داشته و توسط سنسور نیز با دانه بندی درشت، کوانتیزه شده‌اند، ایجاب می‌کند که مقدار آستانه بزرگتر انتخاب شود. برخی دیگر از پارامترها دائماً در حال تغییر هستند و لذا این آستانه برای آنها باید کوتاه‌تر انتخاب شود. برای مثال برای میزان شارژ خورشیدی باطری که در طی شب مقدار ثابت صفر می‌ماند، آستانه مذکور برابر با ۴۸ ساعت قرار داده می‌شود. این آستانه برای کمیت جهت باد، برابر با ۱۰ ساعت انتخاب می‌شود. مشخصات بویه‌های مورد نظر در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین جدول‌های ۲ تا ۵ نشان می‌دهند که چگونه محدوده‌های حداقل و حداکثر، حداکثر میزان تغییرات قابل قبول نمونه‌های متوالی برای حداکثر ارتفاع موج، ارتفاع موثر موج، پریود عبور از صفر و پریود اوجی به دست آمده‌اند. البته برخی از پارامترها توسط مشخصات سنسور و برخی دیگر در مراجع کنترل کیفی داده‌های موج‌نگاری (Ochi, 2005) تعیین شده‌اند.

جدول ۱: مشخصات بویه‌های موج‌نگاری مورد استفاده

نام بویه	KEPCO ۸۰۰	KEPCO ۴۰	KEPCO ۳۰	Anzali ۲
مکان تقریبی	میانه دریای خزر	بندر امیر آباد	بندر امیر آباد	بندر انزلی
طول جغرافیایی (درجه)	۵۱/۵۱۴	۵۲/۳۱۵	۵۲/۳۸۹	۴۹/۴۴۹
عرض جغرافیایی (درجه)	۳۷/۸۷۱	۳۷/۸۷۰	۳۶/۹۵۳	۳۷/۵۲۱
عمق آب (متر)	۸۰۰	۴۰	۳۰	۲۵-۳۰

جدول ۲: محدوده‌های تجربی و آستانه تصمیم‌گیری برای حداکثر ارتفاع موج (متر)

نام بویه محدوده‌ها	KEPCO ۸۰۰	KEPCO ۴۰	KEPCO ۳۰	Anzali ۲	محدوده تصمیم‌گیری برای آزمون
حداقل	۰	۰	۰	۰	۰
حداکثر	۱۰	۵/۲	۵	۶	۱۵
حداکثر تغییرات قابل قبول	۴/۶	۱/۹	۲	۲/۱	۷

دسته اول، پارامترهایی هستند که به سادگی با توجه به مشخصات برگه فنی^۱ سنسورها تعیین می‌شوند. برای مثال اگر در برگه فنی سنسور فشار هوا قید شود که محدوده اندازه‌گیری به صورت ۸۰۰ تا ۱۱۰۰ μPa است، پارامترهای کمینه و بیشینه‌ی آزمون کنترل محدوده (B1) طبق این مقادیر تعیین می‌شوند.

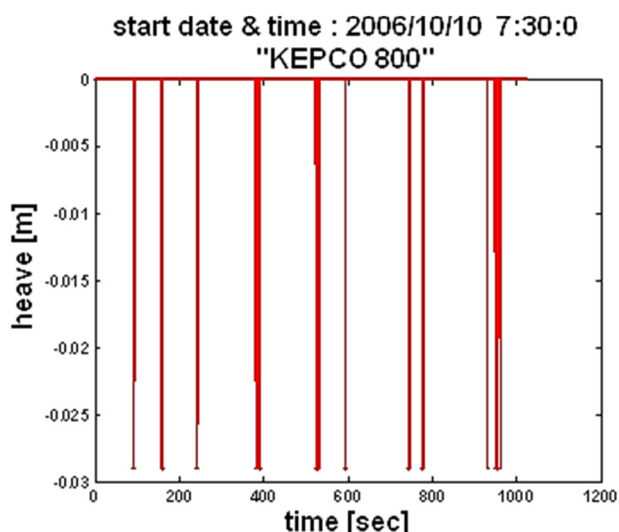
دسته دوم، پارامترهایی هستند که با توجه به مقادیر پیشنهادی در مراجع به صورت سر راست تعیین می‌شوند. برای نمونه، آستانه حداکثر میزان پراکندگی زاویه‌ای در فرکانس اوجی، $\theta=30^\circ$ ، طبق ضمیمه A1-A4 کمیته اقیانوس‌شناسی اروپایی معرفی شده است و همین مقدار نیز استفاده می‌شود (آزمون S5). همچنین آستانه شرط شکست موج، $K=0/22$ ، در همین مرجع مشخص شده و مورد استفاده است (آزمون B4).

دسته سوم، پارامترهایی هستند که به صورت شهودی یا با برخی تحلیل‌های ساده روی داده‌های شبیه سازی شده قابل تعیین هستند. برای نمونه، ضریب M در آزمون جهش غیر مترقبه (T1) با یک شبیه‌سازی ساده روی داده‌های با توزیع گاوسی برابر با $M=6$ تصمیم‌گیری می‌شود. در واقع، حساسیتی روی یک مقدار دقیق از آنها وجود ندارد؛ کما اینکه دیده شده است در برخی موارد، مستندات کنترل کیفی، مقادیر متفاوتی برای پارامترها پیشنهاد می‌کنند. برای نمونه ضریب M در آزمون جهش غیر مترقبه در مرجع QARTOD برابر با ۴ و در ضمیمه A1-A4 کمیته اقیانوس‌شناسی اروپایی برابر با ۶ پیشنهاد شده است. نمونه‌های دیگر از چنین پارامترها عبارتند از مرتبه درونیابی در آزمون‌های محدوده (T2) و کشف جهش غیر مترقبه T1؛ و نیز آستانه‌های مشابهت سنجی توزیع گاوسی برای سری زمانی حرکت عمودی موج و آستانه $\Delta=0/48$ در آزمون انطباق بین سری زمانی و طیف (S1).

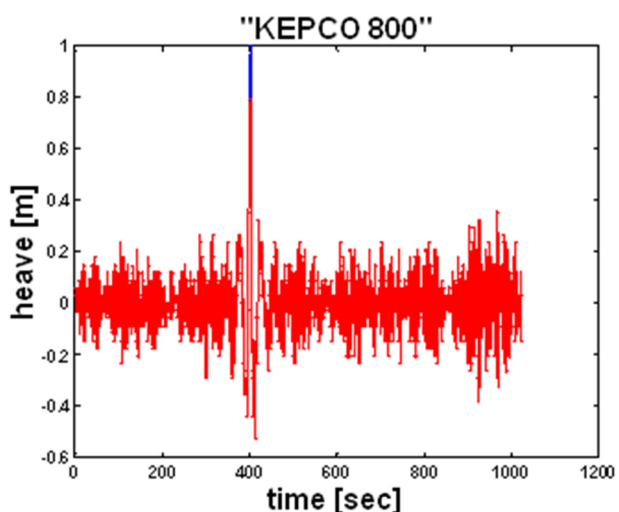
دسته چهارم، پارامترهایی هستند که برای کنترل دقیق‌تر داده‌ها با توجه به مکان‌ها یا زمان‌های مختلف تعیین می‌شوند. برای نمونه با توجه به تغییرات دمایی طبیعی در منطقه دریایی خلیج فارس و دریای عمان، محدوده دمایی ۱۰ تا ۴۰ درجه برای آزمون کنترل محدوده (B1) انتخاب می‌گردد. برای منطقه دریای خزر، همین محدوده به صورت ۱- تا ۳۶ درجه انتخاب می‌گردد. همین‌طور محدوده شوری آب در منطقه آب‌های جنوب به صورت ۳۵ تا ۴۰

¹ Data Sheet

رخداد خطا را گزارش نموده است. از طرف دیگر بروز خطای نشان داده شده منجر به غیر گاوسی شدن حرکت عمودی می‌گردد. شکل ۴ نیز نمونه‌ای دیگر از سری زمانی حرکت عمودی بویه موج‌نگار را نشان می‌دهد.



شکل ۳: کشف ثابت ماندن بیش از حد داده‌ها و غیر گاوسی بودن حرکت عمودی موج



شکل ۴: کشف جهش نامربوط در حرکت عمودی موج

در این شکل محور افقی زمان برداشت اطلاعات بر اساس ثانیه و محور عمودی مقدار خروجی سنسور حرکت عمودی بویه موج‌نگار را در یک دوره دیگر برداشت اطلاعات نشان می‌دهد. در این شکل، رخداد یک جهش نامربوط در محدوده زمانی ۴۰۰ ثانیه دیده می‌شود. نرم‌افزار کنترل کیفی در بخش سری‌های زمانی با شناسایی خطای جهش نامربوط تاریخ و ساعت وقوع خطا را به

جدول ۳: محدوده‌های تجربی و آستانه تصمیم‌گیری برای ارتفاع موثر موج (متر)

نام بویه محدوده‌ها	KEPCO ۸۰۰	KEPCO ۴۰	KEPCO ۳۰	Anzali ۲	محدوده تصمیم‌گیری برای آزمون
حداقل	۰/۰۷	-	-	-	-
حداکثر	۶	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۱۵
حداکثر تغییرات قابل قبول	۱/۸	۱/۳	۱/۱	۱	۳

جدول ۴: محدوده‌های تجربی و آستانه تصمیم‌گیری برای پرپود عبور از صفر (ثانیه)

نام بویه محدوده‌ها	KEPCO ۸۰۰	KEPCO ۴۰	KEPCO ۳۰	Anzali ۲	محدوده تصمیم‌گیری برای آزمون
حداقل	۲/۴	۱/۷	۲	۲/۲	۱/۵
حداکثر	۸/۶	۷	۸	۱۴	۱۵
حداکثر تغییرات قابل قبول	۱/۶	۱/۷	۲/۸	۹	۳/۲

جدول ۵: محدوده‌های تجربی و آستانه تصمیم‌گیری برای پرپود فرکانس اوجی (ثانیه)

نام بویه محدوده‌ها	KEPCO ۸۰۰	KEPCO ۴۰	KEPCO ۳۰	Anzali ۲	محدوده تصمیم‌گیری برای آزمون
حداقل	۱/۹۸	۱/۵	۱/۹	۲	۱/۵
حداکثر	۱۲/۲	۱۲/۵	۱۲	۲۵	۱۸
حداکثر تغییرات قابل قبول	۵/۵	۷/۱	۷	-	۱۰

۴. نتایج

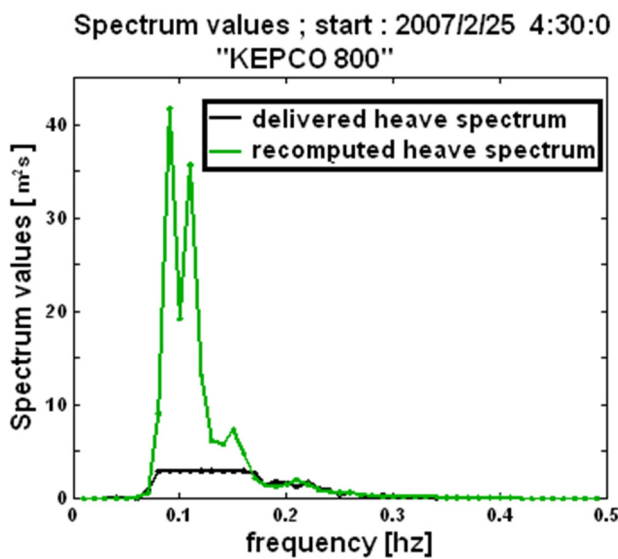
در ادامه برخی نتایج اعمال الگوریتم‌های کنترل کیفی روی داده‌های موج‌نگاری ثبت شده ارائه می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که نرم‌افزار تهیه شده برای کنترل کیفی داده‌های موج‌نگاری می‌تواند انواع داده‌های ثبت شده توسط بویه‌های موج‌نگار را کنترل نماید. بویه‌های موج‌نگاری متعلق به شرکت Oceanor نورژ هستند. در این داده‌ها، سری‌های زمانی ۱۰۲۴ نمونه‌ای با نرخ برداری ۱ هرترز به ازای هر ساعت دریافت شده‌اند. به‌ازای هر کدام از این قالب‌های ۱۰۲۴ نمونه‌ای، مقادیر طیفی و مقادیر پارامتری (کلی) از قبیل حداکثر ارتفاع موج تخمین زده شده‌اند. این شکل‌ها در سه دسته زیر آورده شده است:

الف) نتایج اعمال الگوریتم‌های کنترل کیفی بر سری‌های زمانی داده‌های بویه‌ی KEPCO 800 در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ آمده است.

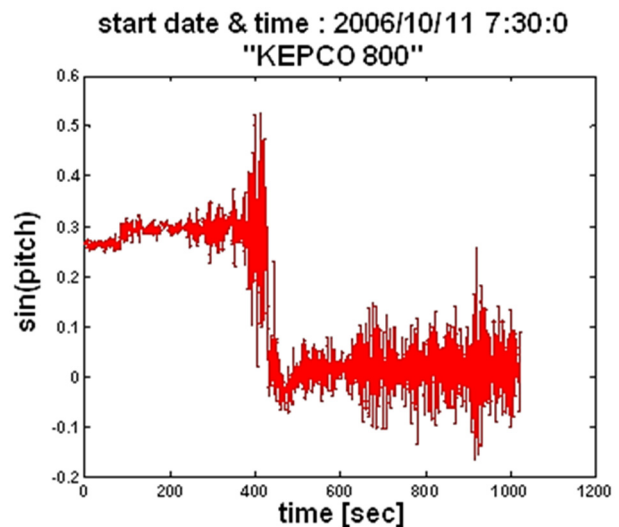
شکل ۳ یک نمونه از سری زمانی حرکت عمودی بویه‌ی موج‌نگار را نشان می‌دهد که در بخش‌های متوالی از آن، داده‌های جمع‌آوری شده ثابت باقی مانده‌اند. در این شکل محور افقی زمان برداشت اطلاعات بر اساس ثانیه، و محور عمودی مقدار خروجی سنسور حرکت عمودی بویه‌ی موج‌نگار را نشان می‌دهد. نرم‌افزار کنترل کیفی پس از شناسایی خطا با ذکر تاریخ و ساعت وقوع

شده است از خطاهای مختلف پردازشی و خطاهای احتمالی ارسال اطلاعات مصون بوده و بنابراین از اعتماد کافی برخوردار است. نمونه‌ی دیگری از بروز خطای طیفی که نسبت به شکل ۶ از وضوح بیشتری برخوردار است در شکل ۷ نشان داده شده است بویه مطابق این شکل در محدوده فرکانسی داده شده مقدار ثابت طیفی را گزارش نموده است که با واقعیت سازگار نیست. این در حالی است که طیف محاسبه شده از روی همان سری زمانی و به کمک نرم‌افزار جداگانه طراحی شده تغییرات واقعی‌تری را نشان می‌دهد.

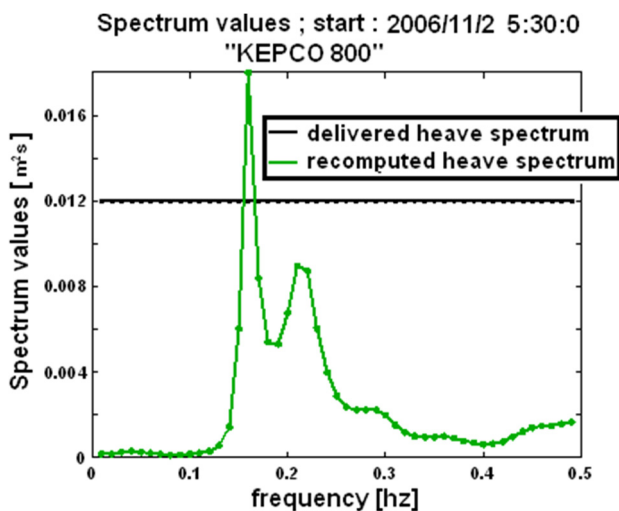
اطلاع کاربر می‌رساند. شکل ۵ نمونه‌ی دیگری از خطای سری‌های زمانی را نشان می‌دهد که این بار این خطا در مورد زاویه‌ی پیچش بویه رخ داده است. در این شکل محور افقی زمان برداشت اطلاعات سنسور زاویه‌ی پیچش بویه، و محور عمودی سینوس زاویه پیچش را نشان می‌دهد. رخداد خطای فوق نیز در نزدیکی نمونه‌ی زمانی ۴۰۰ ثانیه بوده است. هم‌زمانی وقوع این خطا به همراه خطای به وجود آمده در شکل ۴ نشان می‌دهد که سری زمانی ارتفاع و زوایای سنسور موج‌نگار در تاریخ و ساعت نشان داده شده از اعتبار لازم برخوردار نیست.



شکل ۶: کشف عدم انطباق بین سری زمانی و طیف حرکت عمودی موج



شکل ۵: کشف انتقال مقدار متوسط در سری زمانی زاویه پیچش



شکل ۷: کشف برآورده نشدن شرط محدوده فرکانسی طیف
 $(f_i < f_{min} = 0.02 \text{ Hz}$ و $S(f_i) \leq 0.05 \text{ mean } S(f_i))$

ب) برخی از نتایج اعمال الگوریتم‌های کنترل کیفی بر مقادیر طیفی، داده‌های بویه KEPCO 800 در شکل‌های ۶ و ۷ آمده است. در شکل ۶ نمونه‌ای از حرکت عمودی بویه نشان داده شده است. در این شکل محور افقی فرکانس موج و محور عمودی طیف متناظر با فرکانس‌های مربوطه را نشان می‌دهد.

طیف محاسبه شده توسط بویه‌ی موج‌نگار در محدوده فرکانسی ۰/۰۸ تا ۰/۱۸ هرتز به صورت کاملاً تخت در شکل ۶ نشان داده شده است. این درحالی است که محاسبه طیف به صورت جداگانه و مستقل از نرم‌افزار بویه‌ی موج‌نگار و به کمک همان سری زمانی منجر به شکل واقعی‌تر گردیده است. تفاوت بین طیف‌های فوق به عنوان یک هشدار اضافی به کاربر نرم‌افزار کنترل کیفی اعلام می‌گردد. باید توجه نمود که طیفی که از روی سری زمانی و در خارج از نرم‌افزارهای پردازشی بویه‌ی موج‌نگار مجدداً محاسبه

شکل ۸ نمونه‌ای از بروز خطا در مقدار پارامتر پریود اوجی را نشان می‌دهد. در شکل ۸ محور افقی روز برداشت اطلاعات و محور عمودی دوره تناوب متناظر با قله طیفی را نشان می‌دهد. منحنی شکل ۸ به‌خوبی حضور دو نمونه پرش نامربوط در داده‌های دوره تناوب را نشان می‌دهد. در شکل ۹ نیز خطای ثابت بودن مقدار دمای آب اندازه‌گیری شده توسط بویه گزارش گردیده است.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج اعمال الگوریتم‌های کنترل کیفی بر داده‌های موج‌نگاری نشان می‌دهد که می‌توان با چندین آزمون متفاوت، موارد رخداد داده‌های نادرست را کشف نمود تا در نهایت مجموعه‌ای از داده‌های معتبر و قابل اعتماد برای استفاده فراهم آورد. پارامترهای کشف خطا در این الگوریتم‌ها با بررسی تجربی داده‌های اندازه‌گیری شده در مناطق مختلف دریایی ایران، قابل تنظیم هستند و می‌توان نتایج آن را به آب‌های مناطق دیگر نیز تعمیم داد.

منابع

نوربخش، م.، ۱۳۸۹. تبدیل زاویه‌های roll pitch اندازه‌گیری شده از دستگاه مختصات بدنه به دستگاه مختصات ثابت، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا، دانشگاه صنعتی اصفهان، گزارش داخلی.

Intergovernmental Oceanographic Commission, Commission of the European Communities, 2009. Manual and Guides 26, Manual of Quality Control Procedures for Validation of Oceanographic Data, Section 2.2, Appendix A1-A4: "Wave Data".

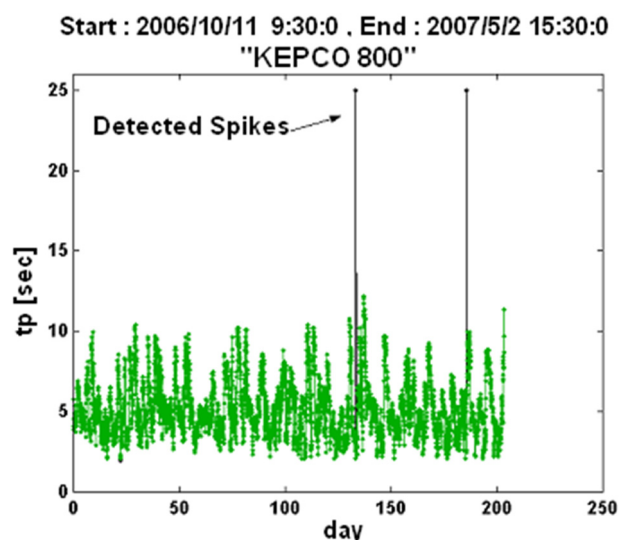
Kay, S., 1999. Modern spectral estimation: Theory and Application, Prentice Hall.

Lang, N.C., 1987. An algorithm for the quality checking of wind speeds measured at sea against measured wave spectral energy, IEEE Journal of Ocean Engineering, 12(4): 560-567.

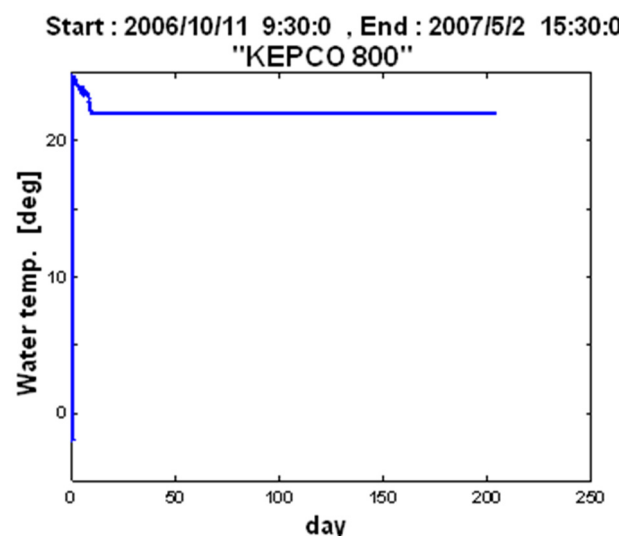
National Data Buoy Center, Stennis Space Center, 2009. NDBC Technical Document 09-02, Handbook of Automated Data Quality Control Checks and Procedures of the National Data Buoy Center.

علت خطا در محاسبه طیف موج توسط بویه موج‌نگار می‌تواند به شرح زیر باشد: الف) استفاده از روش مقدماتی و دارای خطای زیاد پریودوگرام، ب) قابل ملاحظه بودن خطای کوانتیزاسیون سری زمانی حرکت عمودی هنگامی که دریا آرام بوده و مقادیر هیو کوچک هستند، ج) رخداد خطا یا از دست دادن داده‌ها حین انتقال اطلاعات از طریق مودم رادیویی از بویه به ایستگاه ساحلی به دلیل شرایط جوی، ضعف باتری سیستم، یا غیره، د) حالت‌های یاد شده به‌طور همزمان.

ج) برخی نتایج اعمال الگوریتم‌های کنترل کیفی بر مقادیر پارامتری داده‌های بویه‌ی KEPCO 800 در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است.



شکل ۸: کشف عدم رعایت حداکثر تغییرات مجاز پارامتر پریود اوجی Tp



شکل ۹: کشف ثابت ماندن بیش از حد پارامتر دمای آب

UK offshore Operators Association limited, Department of Energy project 76, 1987. UKOOA Recommended procedures for validation and Documentation of Oil Company Met Ocean Data.

World Ocean Atlas, 2005. Ocean Climate Laboratory of the National Oceanographic Data Center (U.S.) Annual Report.

فهرست نمادها و نشانه‌ها

E : متوسط‌گیری آماری

f : فرکانس (Hz)

t : زمان (sec)

Z : حرکت عمودی موج (m)

$\partial z/\partial x$ و $\partial z/\partial y$: شیب موج نسبت به محور افقی x و y

α : زاویه دوران افقی (yaw)

β : زاویه پیچش (pitch)

γ : زاویه چرخش (roll)

τ : شیف‌ت زمانی (sec)

ω : فرکانس زاویه‌ای (rad/s)

Noorbakhsh, M.; Zamani, A.R., 2009. Quality control of Wave Measurement Buoy, Research Institute for Subsea Science & Technology, Isfahan University of Technology, Technical Report.

Oceanor (Oceanographic Company of Norway ASA), 2000. GENI 2000 Data Acquisition Unit User Manual, Revision 1.33.

Ochi, M.K., 2005. Ocean Waves: The Stochastic Approach, Cambridge Ocean Technology Series.

Quality Assurance of Real-Time Oceanographic Data (QARTOD) Workshops and the Waves Technical Workshop 2007. Real-Time Quality Control Tests for In Situ Ocean Surface Waves.

Sara, H.; Crout, R.; Bosch, j.; Burnett, W.; Fredericks, J.; symods, D.; Thomas, J., 2010. A summary of Quality control tests for waves and in situ currents and their effectiveness, proceeding of IEEE/OES/CWEM/Tenth Conference on Current measurement technology, 100-106.

Stennis Space Center, 1996. NDBC Technical Document 96-01, Non directional and Directional Wave Data Analysis Procedures.