

Implementing the Modified Phase-Space Thresholding despiking algorithm on the Acoustic Tomographic data to improve the measurement accuracy (Anzali Port)

Morteza Eftekhari^{1*}, Amir hsein Hasanabadi², Nemat Karimi³, Reza Roozbahani⁴, Mohammad Rezaei⁵, Masoud Bahreinimotlagh⁶

1- Assistant Professor, Department of Water Resources and Studies, Water Research Institute, Tehran, Iran

2- Researcher at Sanjab Fanavari Khalije Fars Ltd., and PhD candidate, Department of Water, Soil, Environment, National Institute of Scientific Research, Québec, Canada

3- Assistant Professor, Department of Water Resources and Studies, Water Research Institute, Tehran, Iran

4- Assistant Professor, Department of Water Resources and Studies, Water Research Institute, Tehran, Iran

5- PhD, Department of Mechanics, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

6- Assistant Professor, Department of Water Resources and Studies, Water Research Institute, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 2022/12/25

Revised: 2023/12/19

Accepted: 2023/12/6

Keywords:

Underwater Remote Sensing

Despiking

Flow monitoring

Measurement

accuracy improvement

*Corresponding author:

✉ m.eftekhari@wri.ac.ir

orcid: 0000-0002-0521-3609

doi: [10.52547/joc.14.55.1](https://doi.org/10.52547/joc.14.55.1)

dor:

ABSTRACT

Background and Objectives: The Acoustic Tomography (AT) systems are one of the remote sensing technologies used to measure flow characteristics in aquatic environments. The only difference among various types of AT systems is the frequency. For the ocean class, frequencies ranged from 20 Hz to 1 kHz, for the sea class from 1 kHz to 10 kHz, and for the river, dam, or lake class from 10 kHz to 60 kHz. The output of this type of system also contains outlier data, just like other acoustic measurement devices. Neglecting the detection and replacement of outliers can lead to a decrease in measurement accuracy and have an adverse effect on flow modeling and data assimilation in models. The review of the previous studies shows that the removal of outlier data in this type of system is generally done by the simple method of standard deviation. In the latest study, the analysis of the AT data was performed using the three-dimensional Rousseeuw Phase-Space thresholding (3D-RPS) algorithm and compared with the standard deviation method, which indicated its better performance than the simple standard deviation method.

Methods: In this study, the Modified Phase-Space Thresholding algorithm (mPST) is applied to AT data and its results are compared with the 3D-RPS method. For this purpose, the data collected in Gono River, Japan has been used, and outliers were identified and replaced with appropriate values using the two mentioned algorithms and five outlier replacement methods. Then, the results were validated with Rating-Curve (RC) data obtained from the hydrometric station of the study area as reference data. Furthermore, in another experiment in the Anzali port, using the mPST algorithm, the analysis of the AT data was performed and the volume of water entering the Caspian Sea was measured.

Findings: The results of this research showed that the use of the mPST algorithm has increased the accuracy of flow measurement. The relative difference in flow rate, measured with the AT system after applying this method in combination with the average signal replacement methods and the last valid data with flow rate measured by RC method, is limited to the range of -15% to +20%. By applying the 3D-RPS algorithm, this value is in the range of -20% to +30%. The results of the sound recording test at Anzali port also recorded a volume of 200 m³/s flowing to the Caspian Sea.

Conclusion: Since AT data used in the data assimilation of ocean, sea, and river models, it is crucial to analyze system's outlier data and replace it with appropriate data. In this study, an attempt was made to improve the accuracy of the measurement by applying the mPST algorithm to the AT data. The comparison of the output results from different outlier mining methods showed that the mPST method, when combined with average signal replacement methods and the last valid data before the detected outlier, demonstrated the best performance. As a result, the mPST method is recommended to be applied to AT data.



NUMBER OF TABLES

3



NUMBER OF FIGURES

14



NUMBER OF REFERENCES

18

مقاله پژوهشی (مهندسی)

اعمال الگوریتم پرت کاوی فضای فازی اصلاح شده بر روی داده‌های تیکه‌نگاری صوتی به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری جریان (بندر انزلی)

مرتضی افتخاری^{۱*}، امیرحسین حسن‌آبادی^۲، نعمت‌اله کریمی^۳، رضا روزبهانی^۴، محمد رضایی^۵، مسعود بحرینی مطلق^۶

۱- عضو هیات علمی، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران

۲- کارشناس پژوهشی شرکت سنج آب فناوری خلیج فارس، شیراز، ایران، و دانشجوی دکتری، دانشکده آب، خاک، محیط زیست، موسسه ملی تحقیقات علمی، کبک، کانادا

۳- عضو هیات علمی، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران

۴- عضو هیات علمی، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران

۵- دکتری مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

۶- عضو هیات علمی، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۴

تاریخ بازبینی: ۱۴۰۲/۹/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۹/۱۵

واژگان کلیدی:

سنجش از دور زیر آب

پرت کاوی

پایش جریان

بهبود دقت اندازه‌گیری

*نویسنده مسئول

✉ m.eftekhari@wri.ac.ir

orcid: 0000-0002-0521-3609

doi: 10.52547/joc.14.55.1

doi:

پیشینه و اهداف: سامانه‌های تیکه‌نگاری صوتی یکی از فناوری‌های سنجش از دور به منظور اندازه‌گیری مشخصات جریان در محیط‌های آبی است. تنها تفاوت موجود در سامانه‌های تیکه‌نگاری صوتی بسامد مورد استفاده است به طوری که در سطح اقیانوس از بسامدهای ۲۰ هرتز تا ۱ کیلوهرتز، در سطح دریا از بسامدهای ۱ کیلوهرتز تا ۱۰ کیلوهرتز و در سطح رودخانه، مخازن سد و با دریاچه از بسامدهای ۱۰ کیلوهرتز تا ۶۰ کیلوهرتز استفاده می‌شود. خروجی این نوع سامانه‌ها نیز همانند سایر سامانه‌های صوتی اندازه‌گیری جریان حاوی داده‌های پرت است. عدم توجه به موضوع تشخیص و جایگزینی نقاط پرت باعث کاهش دقت اندازه‌گیری و همچنین تأثیر نامناسب بر روی مدل سازی جریان و داده‌گذاری مدل‌ها می‌شود. بر روی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که حذف داده‌های پرت در این نوع سامانه عموماً توسط روش ساده انحراف معیار انجام می‌شود. در آخرین مطالعه انجام شده پرت کاوی داده‌های تیکه‌نگاری صوتی با استفاده از روش سه‌بعدی روسیو-فضای فازی انجام و با روش انحراف معیار مقایسه گردید که نشان‌دهنده عملکرد مناسب‌تر آن نسبت به روش ساده انحراف معیار بود.

روش‌ها: در این مطالعه الگوریتم فضای فازی اصلاح شده بر روی داده‌های تیکه‌نگاری صوتی اعمال شده و نتایج آن با روش سه‌بعدی روسیو-فضای فازی مقایسه شده است. بدین منظور از داده‌های برداشت شده در رودخانه گونو ژاپن استفاده شده است و با استفاده از دو الگوریتم ذکر شده و با پنج روش جایگزینی نقاط پرت، داده‌های پرت شناسایی و با مقادیر مناسب جایگزین شدند. سپس نتایج با داده‌های دی-اشل به دست آمده از ایستگاه آب سنجی محل آزمایش به عنوان داده مرجع مورد صحت سنجی قرار گرفتند. همچنین در آزمایش دیگری در بندر انزلی، با استفاده از الگوریتم فضای فازی اصلاح شده پرت کاوی داده‌های تیکه‌نگاری صوتی انجام شد و حجم آب ورودی به دریای خزر اندازه‌گیری گردید.

یافته‌ها: نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از روش پرت کاوی فضای فازی اصلاح شده باعث افزایش دقت اندازه‌گیری گردیده است، به این صورت که مقدار اختلاف نسبی دی‌انزلی اندازه‌گیری شده با سامانه تیکه‌نگاری صوتی پس از اعمال این روش به صورت ترکیبی با روش‌های جایگزینی میانگین سیگنال و آخرین داده معتبر با دی‌انزلی اندازه‌گیری شده به روش دی-اشل در محدوده ۱۵- تا ۲۰+ درصد محدود گردیده است. در حالی که با اعمال روش سه بعدی روسیو-فضای فازی این مقدار در محدوده ۲۰- درصد تا ۳۰+ درصد واقع گردیده است. نتایج آزمایش تیکه‌نگاری صوتی بندر انزلی نیز حجم ورودی ۱۰۰ تا ۳۰۰ مترمکعب بر ثانیه به دریای خزر را ثبت نمود.

نتیجه‌گیری: از آنجایی که داده‌های تیکه‌نگاری صوتی در داده‌گذاری مدل‌های جریان اقیانوسی، دریایی و رودخانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد، پرت کاوی داده‌های پرت سامانه و جایگزینی آن با داده‌های مناسب حائز اهمیت است. در این مطالعه با اعمال الگوریتم فضای فازی اصلاح شده بر روی داده‌های تیکه‌نگاری صوتی، سعی بر بهبود دقت اندازه‌گیری شد. مقایسه نتایج خروجی روش‌های مختلف پرت کاوی سامانه تیکه‌نگاری صوتی نشان داد که روش فضای فازی اصلاح شده به صورت ترکیبی با روش‌های جایگزینی میانگین سیگنال و آخرین داده معتبر پیش از داده پرت کشف شده، بهترین عملکرد را دارد. در نتیجه روش پرت کاوی فضای فازی اصلاح شده جهت اعمال بر روی داده‌های تیکه‌نگاری صوتی توصیه می‌شود.

مقدمه

وجود داده‌های پرت یکی از چالش‌های مهم در سامانه‌های صوتی مورد استفاده در پایش محیط‌های آبی است [1]. فناوری تیکه نگاری صوتی به‌عنوان یکی از روش‌های سنجش‌ازدور، یک ابزار صوتی است که با توجه به بسامد مورد استفاده سرعت جریان را در مقیاس اقیانوس، دریا و رودخانه اندازه‌گیری می‌کند [2] (جدول (۱)).

جدول ۱: انواع سامانه‌های تیکه نگاری صوتی

نام دستگاه	بسامد (KHz)	کاربرد
تیکه‌نگاری اقیانوسی (OAT ^۱) [3]	> ۱	در اقیانوس‌ها
تیکه نگاری صوتی ساحلی (CAT ^۲) [4]	۵	در دریاچه‌ها و سواحل دریایی
	۷	
	۱۰	
تیکه نگاری صوتی رودخانه‌ای (FAT ^۳) [5]	۳۰	در رودخانه‌ها و کانال‌ها
	۵۰	

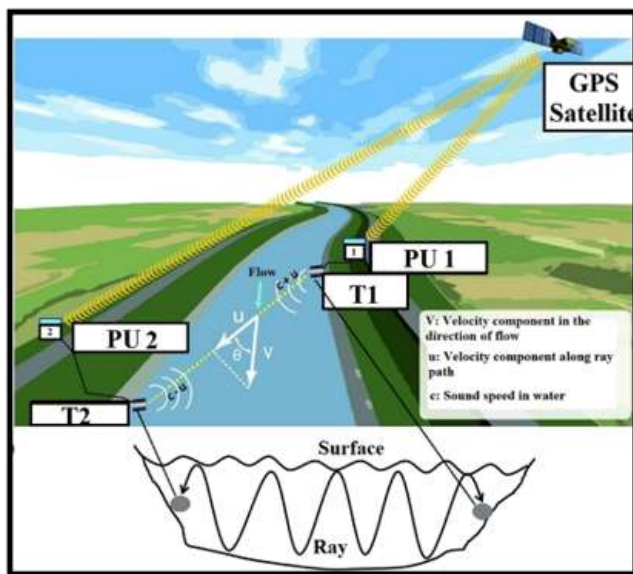
سامانه‌های تیکه‌نگاری صوتی با اتصال به ماهواره‌های جی‌ان‌اس‌اس، با دقت نانو ثانیه هم‌زمان‌سازی می‌گردند و در فواصل زمانی منظم و در یک زمان واحد، امواج صوتی را به سمت یکدیگر ارسال می‌کنند. با تجزیه و تحلیل زمان رسیدن امواج صوتی به دستگاه‌ها، خصوصیات جریان آب محاسبه می‌گردد. سامانه‌ها حداقل از دو پردازنده که هرکدام از آن‌ها توسط یک کابل به یک تراگذر^۴ که در درون آب قرار گرفته و امواج صوتی را ارسال و دریافت می‌کند، تشکیل شده است. با معلوم بودن فاصله دو ایستگاه از یکدیگر و ثبت زمان رسیدن موج‌های صدا در ایستگاه‌های بالادست و پایین‌دست سرعت متوسط جریان آب با دقت بالا اندازه‌گیری می‌شود و با داشتن سطح مقطع دبی رودخانه محاسبه می‌شود [6]. شکل ۱ الگوی مفهومی سیستم تیکه نگاری صوتی رودخانه‌ای را نشان می‌دهد.

در خروجی همه سامانه‌های اندازه‌گیری محیطی مشکل کیفیت و اعتبار داده‌ها وجود دارد. لذا پیش از انجام فرایندهای داده‌کاوی، ضرورتاً نیاز به عملیات پاک‌سازی (پیش‌پردازش داده‌های خام و آماده‌سازی) داده‌ها است.

از مشکلاتی که کیفیت داده‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند، داده‌های پرت هستند. [7].

محققان روش‌های مختلفی جهت پرت‌کاوی انواع داده‌ها ارائه کرده‌اند. در این تحقیق با توجه به شباهت ماهیت داده‌های تیکه‌نگاری صوتی به سرعت-سنج ADV^۵، روش‌های پرت‌کاوی اعمال شده به دستگاه ADV مورد بررسی قرار گرفته است.

Goring and Nikora (2002) در تحقیقی که به‌منظور حذف داده‌های پرت و بر روی سیگنال به‌دست‌آمده از دستگاه ADV انجام دادند از چندین روش استفاده کرده و درنهایت یک روش جدید به نام روش آستانه گذاری فضای فازی^۶ ارائه دادند. این روش که در مطالعات زیادی پس‌از آن مورد استفاده قرار گرفته است، نشان داد که یک روش مناسب برای تشخیص داده‌های پرت می‌باشد. برای این تحقیق بهترین روش جایگزینی داده‌های پرت حذف‌شده، استفاده از درونیایی چندجمله‌ای درجه سوم ۱۲ نقطه‌ای در هر طرف داده پرت، به‌منظور یافتن جایگزین داده پرت عنوان‌شده است [8].



شکل ۱: الگوی شماتیک مفهومی سیستم تیکه‌نگاری صوتی [9]

Mori et al (2007) در پژوهشی برای حذف داده‌های پرت در سیگنال ADV که با ایجاد حباب‌های هوا توسط یک ژنراتور تولید حباب، در آن داده پرت ایجادشده بود در محیط آزمایشگاهی اقدام کردند. آن‌ها از روش

5. Acoustic Doppler Velocimeter
6. Phase-Space Thresholding Method

1. Ocean Acoustic Tomography
2. Coastal Acoustic Tomography
3. Fluvial Acoustic Tomography
4. Transducer

شاخه اصلی رودخانه گونو می‌باشد که در فاصله حدوداً ۳ کیلومتری سایت برداشت داده‌ها به یکدیگر می‌رسند. محل قرار گیری تراگذرها یک خم عریض ۱۱۵ متری انتخاب گردید. شیب بستر رودخانه در محدوده ریج مورد نظر ۰/۱٪ اندازه گیری شد و جنس بستر از نوع شن و بولدر تشکیل شده است. عمق آب در شرایط کم آبی و پرآبی به ترتیب حدوداً ۰/۵۵ متر و ۱ متر می‌باشد. مقدار متوسط دبی سالانه ایستگاه آب‌سنجی اوزکیاما^۲ که در ۱/۱ کیلومتر بالاتر از سایت داده برداری واقع است، حدوداً ۷۳ مترمکعب بر ثانیه محاسبه گردیده است [14]. به منظور داده‌برداری در این سایت از تراگذرهای با بسامد ۳۰ کیلوهرتز استفاده شد و فاصله افقی بین آن‌ها ۲۹۴/۶۳ متر اندازه‌گیری شد. عمق و دمای آب هر ۱۰ دقیقه یکبار توسط سطح آب نگار که به تراگذرها متصل شده بود اندازه‌گیری شده است. که در شکل ۲ الف محدوده برداشت داده‌ها و محل قرارگیری ایستگاه‌های بالا دست و پایین دست و محل قرارگیری ایستگاه هیدرومتری دربالادست مشخص شده است. همچنین سایت داده‌برداری بندر انزلی ایران، محل ایستگاه‌های پایین دست و بالا دست و موقعیت جغرافیایی آن‌ها در شکل ۲ ب قابل مشاهده می‌باشد. در این سایت فاصله افقی بین دو ایستگاه ۲۸۷/۳۳ متر بوده و مجموعاً ۵۸۶ داده در ۲۳ جون ۲۰۲۱ و در بازه زمانی ۱۰/۴۵ تا ۱۴/۳۰ و ۲۴ جون ۲۰۲۱ در بازه زمانی ۳/۴۰ تا ۶ برداشت و پردازش شده است.

۲. سری زمانی مصنوعی با نقاط پرت تصادفی:

به منظور بررسی عملکرد و دقت روش‌های اعمال شده، در این بخش یک سری زمانی مصنوعی تولید شده است که دارای تعداد مشخصی داده پرت بوده و محل وقوع این نقاط پرت در سری زمانی و همچنین شدت آن‌ها به صورت رندوم و در یک بازه مشخص تعریف و تولید شد. مزیت استفاده از این نوع سری زمانی به‌عنوان ورودی در الگوریتم‌های پرت کاوی با توجه به مشخص بودن محل وقوع نقاط پرت پیش از انجام فرایند پرت کاوی در این است که می‌توان عملکرد روش‌ها را با استفاده از پارامترهایی که در ادامه تعریف می‌شود اندازه‌گیری کرد و بهترین روش را شناسایی نمود. یکی دیگر از مزیت‌های استفاده از سری زمانی مصنوعی این است که برای روش‌هایی که در آن‌ها از ضرایب دلخواهانه‌ای و بر اساس قضاوت مهندسی به‌منظور محاسبات استفاده می‌شود، می‌توان مقدار بهینه پارامترها را به دست آورد. در این تحقیق به این منظور از یک سری

فضای فازی سه‌بعدی اصلاح‌شده‌ای^۱ که توسط وال (۲۰۰۳) [10] ارائه شده بود استفاده کردند و این دو روش را با یکدیگر مقایسه نمودند و به این نتیجه رسیدند که عملکرد روش سه‌بعدی روسیو-فضای فازی به‌طور مناسبی برای داده‌های آن‌ها خوب بوده و از روش اصلی اولیه عملکرد بهتری دارد و این روش را به‌عنوان مؤثرترین روش در دسترس برای شناسایی داده‌های پرت در سیگنال ADV نمودند [11].

اگرچه مطالعات زیادی در خصوص اعمال روش‌های پرت‌کاوی به داده‌های ADV انجام شده است، اما تنها یک مطالعه در خصوص پرت‌کاوی داده‌های تیکه‌نگاری صوتی انجام شده است. حسن‌آبادی و همکاران (۲۰۲۲)، در تحقیقی برای اولین بار به پرت‌کاوی خروجی سامانه تیکه‌نگاری صوتی رودخانه‌ای پرداختند. در این تحقیق از دو روش آستانه‌گذاری فضای فازی و روش سه‌بعدی روسیو-فضای فازی استفاده شد و نتایج نشان داد که روش سه‌بعدی روسیو فضای فازی عملکرد مناسب‌تری در افزایش دقت خروجی این سامانه برای داده‌های مورد استفاده در آن تحقیق داشته است [13].

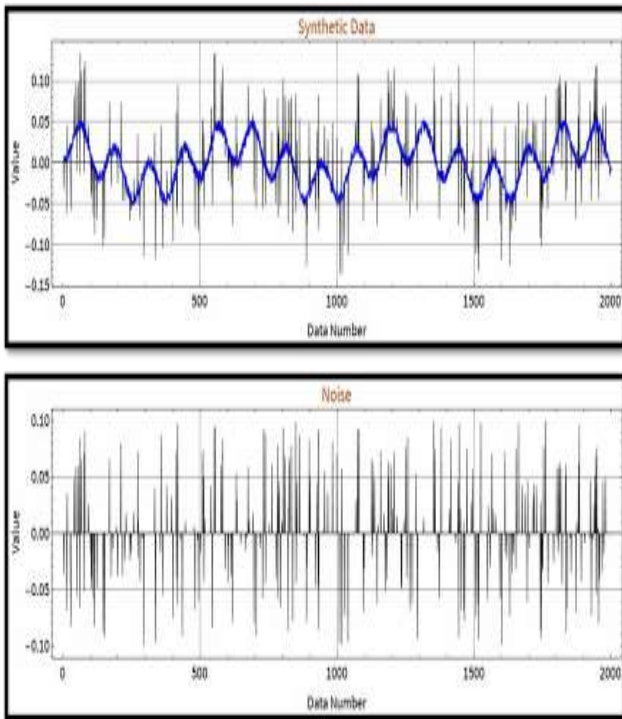
در تحقیق حاضر روش ارائه‌شده در مطالعه گذشته یعنی روش سه‌بعدی روسیو فضای فازی با روش اصلاح‌شده فضای فازی که به‌عنوان روشی جدیدتر و بهینه‌تر در پرت‌کاوی داده‌های ADV اثبات شده است، مورد مقایسه قرار گرفته و عملکرد این دو روش بر روی داده‌های سامانه تیکه‌نگاری صوتی رودخانه‌ای مورد تحلیل واقع شده است.

روش پژوهش

۱. داده‌های سامانه تیکه‌نگاری صوتی:

سامانه‌های تیکه‌نگاری صوتی به دو روش ثابت به‌منظور داده‌برداری بلندمدت و پرتابل به‌منظور داده‌برداری کوتاه‌مدت مورد استفاده قرار می‌گیرد. داده‌های استفاده شده در این تحقیق، از نوع سرعت جریان رودخانه بوده است که شامل داده‌های برداشت شده از رودخانه گونو واقع در شهر میوشی استان هیروشیما ژاپن (ایستگاه ثابت) و داده‌های برداشت شده در بندر انزلی ایران (ایستگاه پرتابل) می‌باشد. داده‌های برداشت شده در رودخانه گونو ژاپن دارای طول زمانی ۶ روز می‌باشد که در بازه زمانی ۷ فوریه ۲۰۱۶ تا ۱۳ فوریه ۲۰۱۶ و هر ۳۰ ثانیه یکبار برداشت شده است. تعداد کل داده‌ها پس از حذف داده‌هایی که نسبت سیگنال به نویز آن‌ها کمتر از ۱۰ دسی بل بود، ۱۲۲۳۲ داده می‌باشد. طول رودخانه گونو به صورت تقریبی ۱۹۴ کیلومتر برآورد شده است. رودخانه‌های سایجو و باسن دو

1. True three-dimensional (3D) phase space Method
2. Ozeki-yama gauging station



شکل ۳ سیگنال مصنوعی تولید شده با ۱۵٪ شدت نقاط پرت

۳. داده‌های سرعت جریان:

در روش تیکه‌نگاری صوتی، سرعت جریان با استفاده از اندازه‌گیری زمان رسیدن امواج صوتی به ایستگاه مقابل به دست می‌آید. زمان رسیدن امواج صوتی در ایستگاه پایین‌دست (در جهت جریان آب) عبارت است از فاصله بین دو ایستگاه تقسیم بر مجموع سرعت صوت و سرعت جریان آب در آن مقطع، و زمان رسیدن امواج صوت در ایستگاه بالادست (خلاف جهت جریان آب) عبارت است از فاصله دو ایستگاه تقسیم بر تفاضل سرعت صوت و سرعت جریان آب [15].

$$t_{up} = \frac{L}{c_m - u_m} \quad (2)$$

$$t_{down} = \frac{L}{c_m + u_m} \quad (3)$$

که در این روابط t_{up} و t_{down} به ترتیب زمان رسیدن سیگنال‌ها به ایستگاه‌های بالادست و پایین‌دست، L فاصله افقی بین دو ایستگاه صوتی، C_m سرعت صدا در آب، و u_m سرعت متوسط جریان در راستای امواج صوتی می‌باشد. با حل معادلات ۲ و ۳ سرعت متوسط جریان و سرعت صدا و سرعت جریان محاسبه می‌شود (روابط ۴ و ۵):

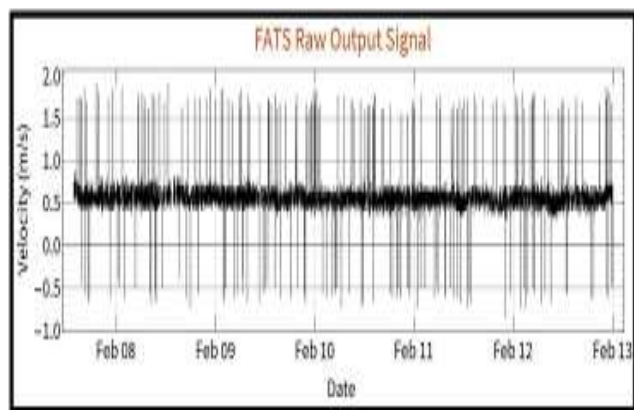
زمانی اولیه با معادله زیر به عنوان سری زمانی نرمال و بدون داده پرت استفاده گردید و سپس مقادیر پرتی به صورت تصادفی از نظر مکانی و شدتی به سری زمانی اولیه با درصدهای مشخصی از تعداد داده‌ها اضافه گردید.

طول این سری زمانی ۲۰۰۰ داده انتخاب و t در بازه ۰ تا ۲۰ یک‌صدم یک صدم افزایش یافته و سری زمانی اصلی ایجاد شد که شامل نوسانات کوچکی در بازه -0.008 تا 0.008 شده و سپس هر بار نقاط پرت با شدت‌های $0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.40, 0.50$ ٪ طول سری زمانی و در بازه -0.1 تا 0.1 به صورت تصادفی به آن اضافه گردید (رابطه ۱). در شکل ۳ سری زمانی مصنوعی شبیه سازی شده با شدت ۱۵٪ حضور نقاط پرت و شدت نقاط پرت اضافه شده به سیگنال اولیه قابل مشاهده است.

$$Y(t) = \sin\left(\frac{3t}{5}\right) * \sin\left(\frac{t}{2}\right) + \text{RandomOscillation}\{-0.008, 0.008\} \quad (4)$$



شکل ۲: الف) سایت برداشت داده‌های رودخانه گونو ژاپن و ب) سایت داده‌برداری بندر انزلی ایران، موقعیت قرارگیری ایستگاه‌های بالادست و پایین دست تیکه‌نگاری صوتی و مختصات دقیق جغرافیایی آن‌ها



شکل ۵ سیگنال خروجی خام سیستم تیکه‌نگاری صوتی

۳. روش‌های پرت‌کاوی:

۳-۱- روش سه بعدی روسیو_ فضای فازی ۱:

روش سه بعدی روسیو- فضای فازی توسط ژونگ و همکاران (۲۰۲۰) [16]، از ترکیب دو الگوریتم مختلف توسعه پیدا کرده است: روش آستانه گذاری فازی سه بعدی وال [10] ۲۰۰۳ و روش تخمین قوی روسیو ۱۹۸۸ [17].

۳-۲، روش فضای فازی اصلاح‌شده ۲:

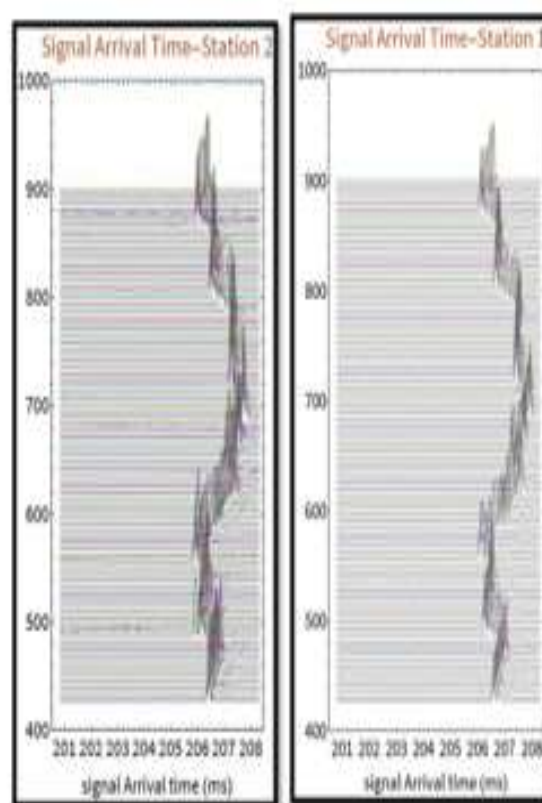
روش آستانه‌گذاری فضای فازی اصلاح‌شده توسط پارشه و همکاران ۲۰۱۰ به منظور پرت‌کاوی خروجی سرعت سنج صوتی ای دی وی توسعه پیدا کرده است [12]. در این روش نقاط پرت به کمک حالت اصلاح‌شده‌ای از روش آستانه‌گذاری فضای فازی شناسایی شده و سپس جایگزین می‌شوند. در این روش دو پیش شرط برای بهبود عملکرد روش پرت‌کاوی، پیش از پرت‌کاوی اعمال می‌شود که باعث بهینه‌تر شدن روش فضای فازی و کمتر شدن تکرارهای لازم می‌شود. در توسعه این روش محققین آن به این نکته توجه کردند که در روش اصلی آستانه گذاری فضای فازی که از معادلات تفاضلات مرکزی جهت محاسبه مشتقات اول و دوم سیگنال استفاده می‌شود، برخی نقاط مجاور نقاط پرت در نتیجه گسسته سازی، به اشتباه به‌عنوان نقاط پرت شناسایی شده و حذف می‌شوند. این موضوع به این علت

است که مقدار Δu و یا $\Delta^2 u$ در نقاط داده اطراف داده پرت، ممکن است مقادیر غیرواقعی بزرگی بگیرند که این مقادیر از آستانه تعریف شده بزرگ تر بوده و در خارج از محدوده آستانه مورد نظر ما قرار گرفته و به اشتباه به‌عنوان نقاط پرت شناسایی شوند. در نهایت به منظور اصلاح و جبران این محدودیت روش فضای فازی، پیشنهاد دادند که با توجه به یافته‌های آن‌ها

$$C_m = \frac{L}{t_m} \quad (4)$$

$$u_m = \frac{C_m^2}{2L} \Delta t \quad (5)$$

که در شکل ۱ می‌توان پارامترهای معرفی شده در روابط بالا را مشاهده نمود. در شکل ۴ زمان رسیدن سیگنال‌های صوتی به ایستگاه‌های بالادست (چپ) و پایین‌دست (راست) قابل مشاهده می‌باشد. مقدار میانگین زمان رسیدن سیگنال‌ها ۲۰۶،۷۳۶ میلی‌ثانیه و میانگین اختلاف زمان رسیدن سیگنال‌ها به ایستگاه‌های بالا و پایین دست ۰،۱۸۷ میلی‌ثانیه محاسبه گردید. در نهایت در شکل ۵، داده‌های خام سرعت جریان اندازه‌گیری شده توسط روش تیکه‌نگاری صوتی پس از پردازش‌های اولیه نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود نقاط پرت متعددی وجود دارد که عدم توجه به حذف و جایگزینی آن‌ها با مقادیر مناسب، باعث ایجاد خطا در محاسبات سرعت و دبی خواهد شد.



شکل ۴ زمان رسیدن سیگنال‌های صوتی ارسالی از ایستگاه بالادست به پایین دست و بالعکس

هر نقطه داده ای که رابطه زیر برای آن صدق کند، به عنوان نقطه پرت شناسایی و با مقدار مناسب جایگزین می شود.

$$|u'| > u_m \quad (9)$$

در روابط بالا $C_2 \times \theta_u$ تخمین زن مقیاس می باشد که θ_u با پارامتر انحراف مطلق میانه محاسبه می شود و C_2 ضریب تجربی می باشد. وال (۲۰۰۳) [10]

برای $C_2 \times \theta_u$ پیشنهاد داده است که از $C_2 = 1.483$ استفاده شود تا این تخمین زن مقیاس بر اساس انحراف مطلق میانه را متشابه با پارامتر انحراف معیار سازد. در این تحقیق از مقدار $C_2 = 1$ استفاده شده است چرا که بهینه ترین حالت برای حذف داده های پرت آشکار برای این سیگنال ورودی بوده است. حذف نقاط پرت با مقادیر بزرگ سبب کاهش مقادیر $\Delta u'$ و $\Delta^2 u'$ نقاط داده نزدیک به این داده های پرت شده و در نتیجه از حذف آن ها در فرایند پرت کاوی جلوگیری می کند. بعد از این گام سیگنال ورودی به فرایند پرت کاوی تعداد خیلی کمتری داده پرت را شامل می شود که همین امر باعث کاهش قابل توجه تعداد تکرارهای مورد نیاز برای انجام فرایند پرت کاوی می شود. در نهایت پس از اعمال پیش شرط دوم، که داده های پرت آشکار سیگنال ورودی حذف و جایگزین شده اند خروجی این مرحله وارد فرایند پرت کاوی فضای فازی سه بعدی شده و در انتهای هر گام این روش پیش شرط اول یعنی بدون تغییر ماندن داده های نزدیک قله تابع توزیع چگالی احتمال اعمال شده و این روش پس از جایگزینی مقادیر پرت شناسایی شده در تکرار حاضر، وارد تکرار بعدی شده تا جایی که هیچ نقطه داده ای در خارج بیضوی سه بعدی آستانه قرار نگیرد.

۳،۳ روش های جایگزینی نقاط پرت

در روش های پرت کاوی اعمال شده در این تحقیق، پس از شناسایی نقاط پرت توسط الگوریتم روش مورد نظر بایستی برای مقادیر پرت، جایگزین منطقی در نظر گرفت تا پس از حذف داده پرت کشف شده سیگنال پیوستگی خود را حفظ کرده و علاوه بر آن، مقدار جایگزین، خود مقداری پرت و نامعقول نباشد. هر یک از روش های پرت کاوی به علت الگوریتم خاصی که دارند با روش جایگزینی خاصی عملکرد بهتری دارند و پارامترهای آماری، برتری عملکرد آن حالت خاص پرت کاوی- جایگزینی نسبت به بقیه حالات را نشان می دهند. البته عملکرد روش های ترکیبی پرت کاوی- جایگزینی خود

نقاط داده نرمال در اطراف قله تابع چگالی احتمال و در نزدیکی آن و دور از دامنه آن قرار دارند، لذا طی فرایند پرت کاوی این نقاط بایستی بدون تغییر باقی بمانند و به عنوان نقاط نرمال شناسایی شوند. در پیش شرط دوم نقاط پرت آشکار مشخص شده و پیش از ورود به الگوریتم پرت کاوی این نقاط حذف می گردند. مراحل انجام این روش به صورت زیر می باشد:

پس از حذف مقدار میانگین سیگنال از آن، نقاط داده ای که نوسانات آن ها حول میانگین $u' = u - U$ در بازه زیر قرار دارد به عنوان نقاط معتبر و غیر قابل تغییر در نظر گرفته می شوند:

$$-C_1 \times \theta_u \leq u' \leq C_1 \times \theta_u \quad (6)$$

ضریب C_1 پارامتر آستانه دلخواهی می باشد که مقدار آن برای سری زمانی استفاده شده در این تحقیق ۱،۴۸۳ لحاظ شد. مقدار این ضریب به این دلیل این مقدار در نظر گرفته شد که نتایج حاصل از آن بهینه بود و از حذف تعداد زیادی نقطه داده که در نزدیکی قله تابع چگالی احتمال قرار داشتند جلوگیری می کرد. مقدار بهینه این پارامتر بسته به نوع و شکل تابع چگالی احتمال سرعت متفاوت بوده و برای گروه داده های مختلف به صورت دلخواهانه بایستی انتخاب شود. با فرض توزیع نرمال داده ها، مقدار تابع چگالی احتمال داده ها به صورت زیر محاسبه شد و در مورد بهینه ترین ضریب C_1 تصمیم گرفته شد:

$$f(z) = \frac{e^{\frac{-1}{2}[(z-\mu)/\sigma]^2}}{\sigma \times \sqrt{2\pi}} \quad (7)$$

در این رابطه مقدار μ میانگین سیگنال و σ انحراف معیار داده ها می باشد.

برای اعمال دومین پیش شرط، به این نکته توجه می شود که مقدار u' برای نقاط پرت آشکار نسبت به داده های نرمال بسیار بیشتر است و پیش از انجام فرایند پرت کاوی برای پیدا کردن سایر نقاط پرت، این داده های پرت آشکار را حذف کرده و با مقدار مناسبی جایگزین کرده و سیگنال به دست آمده وارد فرایند پرت کاوی می شود. برای این کار مقدار u' با u_m مقایسه می شود که u_m مقدار بیشینه مورد انتظار برای u می باشد و به صورت زیر محاسبه می شود:

$$u_m = C_2 \times \theta_u \times \sqrt{2 \times \ln n} \quad (8)$$

در روابط بالا، TP تعداد واقعی نقاط پرتی است که به درستی توسط الگوریتم پرت کاوی به عنوان نقطه پرت شناسایی شده است. FN تعداد نقاط پرتی است که الگوریتم پرت کاوی نتوانسته شناسایی کند و به اشتباه به عنوان نقاط نرمال شناسایی شده اند. FP تعداد واقعی نقاط نرمالی است که به اشتباه به عنوان نقاط پرت شناسایی شده اند و TN تعداد واقعی نقاط نرمالی است که به درستی به عنوان نرمال شناسایی شده اند. معیار نرخ تشخیص (Detection Rate) اطلاعاتی در مورد تعداد نسبی نمونه های درست تشخیص داده شده به عنوان پرت فراهم می کند و معیار نرخ خطا (False Alarm Rate) مقدار نسبی نقاط نرمالی که به اشتباه پرت تشخیص داده شده اند را ارائه می دهد. هر چه مقدار پارامتر DR به یک نزدیک تر و مقدار پارامتر FAR به صفر نزدیک تر باشد، الگوریتم مورد بررسی از دقت بالاتری برخوردار بوده است. پارامترهای یاد شده در گروه داده هایی استفاده می شوند که تعداد و محل وقوع نقاط پرت در آن ها مشخص است، لذا این پارامترها برای دیتا مصنوعی شبیه سازی شده استفاده خواهد شد و برای دیتاست واقعی خروجی سیستم تیکه نگاری صوتی از پارامترهای آماری مناسبی چون

ضریب همبستگی پیرسون (R^2) ، RMSE، MAPE و NSE استفاده شده است و به کمک این پارامترها، دبی خروجی گروه داده واقعی تیکه نگاری صوتی پس از پرت کاوی سیگنال سرعت جریان و تبدیل آن به دبی با داشتن مشخصات مقطع عرضی مایل رودخانه، با دبی خروجی روش دبی اشل به عنوان مرجع مقایسه گردیده و نتایج آن در ادامه آورده شده است. علاوه بر این پارامترها از پارامتر اختلاف نسبی دبی^۵ به منظور مقایسه خروجی روش های پرت کاوی و روش دبی اشل استفاده شده است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\text{Relative Discharge Difference}(X, X_{\text{reference}}) = \frac{X - X_{\text{reference}}}{X_{\text{reference}}} \quad (12)$$

نتایج و بحث

۱. نتایج روش سه بعدی روسیوفضای فازی:

در گام اول انجام این روش و برای اعمال روش آستانه گذاری سه بعدی وال، پس از حذف مقدار میانه سیگنال سرعت که مقدار آن ۰.۵۷۸ متر بر ثانیه محاسبه شد، مقدار مشتقات اول و دوم نوسانات سرعت حول میانه مطابق

به نوع سیگنال مورد نظر بستگی دارد. به عنوان مثال گورینگ و نیکورا^{۲۰۰۲} [18]، پس از اعمال روش فضای فازی^۱ به منظور جایگزینی نقاط پرت و پس از بررسی عملکرد روش های جایگزینی گوناگون، روش درونیایی چندجمله ای درجه سوم به کمک ۱۲ نقطه داده در طرفین نقطه پرت کشف شده (مجموعاً ۲۴ نقطه)، را به عنوان بهترین روش جایگزینی نقاط پرت در سیگنال خروجی سرعت سنج صوتی ADV معرفی نمودند. در این تحقیق به منظور بررسی و معرفی بهترین روش های پرت کاوی-جایگزینی، عملکرد ۵ روش جایگزینی مختلف (که در تحقیقات پیشین بیشتر مورد استفاده قرار گرفته بودند و عملکرد بهتری داشتند)، بر روی داده های خروجی سیستم تیکه نگاری صوتی، به کمک پارامترهای آماری مناسب مورد بررسی قرار گرفته و بهترین روش ترکیبی پرت کاوی-جایگزینی معرفی شده است. این ۵ روش جایگزینی شامل موارد زیر می باشند:

- ۱- میانگین دو نقطه در هر طرف داده پرت کشف شده (مجموعاً ۴ داده)^۲.
 - ۲- درونیایی از ۱۲ نقطه در هر طرف داده پرت کشف شده (مجموعاً ۲۴ داده)^۳.
 - ۳- درونیایی از ۴ نقطه در هر طرف داده پرت کشف شده (مجموعاً ۸ داده)^۴.
 - ۴- جایگزینی نقطه پرت کشف شده با میانگین کلی سیگنال^۵.
 - ۵- جایگزینی نقطه پرت کشف شده با آخرین داده معتبر پیش از خود^۶.
- ۴،۳ بررسی آماری عملکرد روش های پرت کاوی:

به منظور بررسی عملکرد و تأثیر الگوریتم های مختلف پرت کاوی بر گروه داده های یاد شده در قسمت قبل و شناسایی بهترین روش از نظر عملکردی، پارامترهای مشخصی تعریف شد و از آن ها در کنار پارامترهای آماری مناسب، جهت بررسی عملکرد روش ها استفاده گردید. برای بررسی عملکرد الگوریتم های پرت کاوی به صورت تیپیکال از پارامترهایی همچون نرخ تشخیص "Detection Rate" و نرخ خطا "False Alarm Rate" استفاده می شود که به صورت زیر تعریف می شوند:

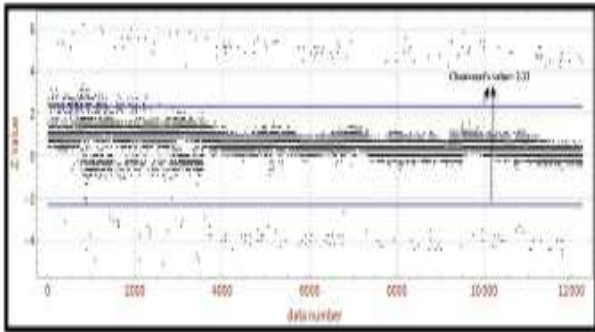
$$\text{DetectionRate} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (10)$$

$$\text{FalseAlarmRate} = \frac{FP}{FP + TN} \quad (11)$$

5. Signal Mean (SM)
6. Last Good Value (LGV)
7. Relative Discharge Difference

1. Phase-Space Thresholding
2. 4 Points mean (4PM)
3. 24 Points Interpolation (24PI)
4. 8 Points Interpolation (8PI)

قابل مشاهده می‌باشد. در این گام در مجموع ۸۹۷ داده از ۱۲۲۳۲ (۷,۳۳٪) داده به‌عنوان نقاط دورافتاده شناسایی شدند.

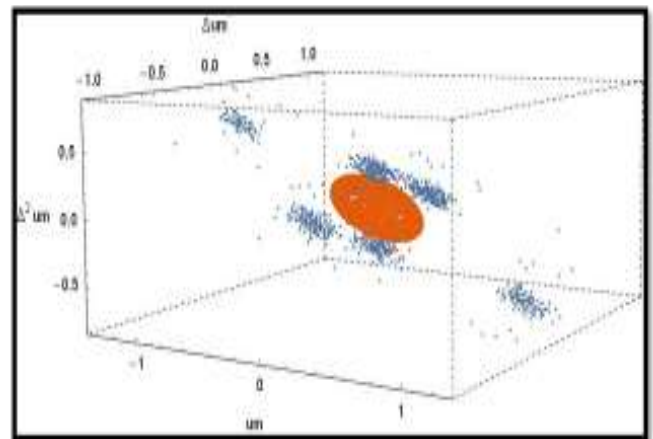


شکل ۸ مقادیر استاندارد شده نقاط داده و وضعیت آن‌ها نسبت به مقدار آستانه شایوونت

پس از شناسایی نقاط پرت طی دو گام یاد شده، اجتماع این نقاط که طی دو مرحله شناسایی شده‌اند گرفته شده و به‌عنوان مجموع نقاط پرت شناسایی شده در نظر گرفته می‌شوند و سپس به کمک روش جایگزینی با مقادیر مناسبی جایگزین می‌گردند. در مجموع و پس از اجتماع‌گیری از نقاط پرت شناسایی شده در دو گام ۱۹۷۶ داده از ۱۲۲۳۲ داده (۱۶,۱۵٪) از کل داده‌ها به‌عنوان نقاط پرت شناسایی شدند.

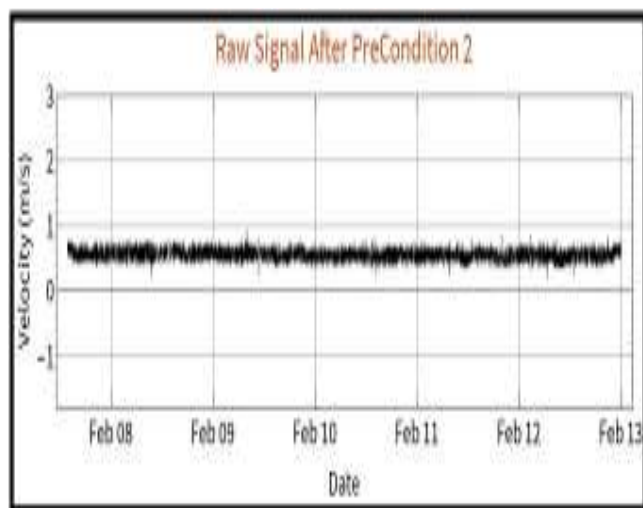
در شکل ۹، نتیجه نهایی روش سه‌بعدی روسیو-فضای فازی قابل مشاهده می‌باشد. در این شکل سیگنال مشکی رنگ مربوط به سیگنال خام ورودی اولیه به الگوریتم پرت‌کاوی، سیگنال آبی رنگ مربوط به گام اول اعمال روش (فضای فازی سه‌بعدی)، سیگنال سبز رنگ مربوط به گام دوم روش (الگوریتم تخمین قوی) (که البته به دلیل انطباق با سیگنال قرمز رنگ قابل مشاهده نیست) و در نهایت سیگنال قرمز رنگ نتیجه نهایی ترکیب نتایج دو گام اجرا شده پس از جایگزینی نقاط پرت می‌باشد.

روابط ۸ و ۹ محاسبه شده و مقدار انحراف مطلق میانه (MAD) سیگنال سرعت و مشتقات آن به کمک رابطه ۱۵ محاسبه گردید و سپس با محاسبه پارامترهای رابطه ۱۲، مختصات نقاط روی سطح بیضوی سه‌بعدی آستانه در محیط سه‌بعدی $u-\Delta u-\Delta^2 u$ محاسبه گردید و سپس با داشتن مقادیر سرعت و مشتقات اول و دوم آن، تمام نقاط داده در این فضای سه‌بعدی ترسیم گردیدند. مطابق شکل ۷، مجموعه نقاط داده و بیضوی سه‌بعدی آستانه در فضای سه‌بعدی ترسیم شده است. تمام نقاطی که در خارج از بیضوی آستانه سه‌بعدی قرار دارند به‌عنوان نقاط پرت شناسایی و جایگزین می‌شوند. به منظور شناسایی این نقاط کافی است تا فاصله آن‌ها تا مرکز مختصات سه بعدی $u-\Delta u-\Delta^2 u$ محاسبه گردیده (ρ) و با فاصله نقاط هم‌راستای آن‌ها و روی سطح بیضوی آستانه تا مرکز مختصات (ρ_e) مقایسه گردد. با انجام این مقایسه تعداد ۱۲۱۵ عدد داده از مجموع ۱۲۲۳۲ داده (۹,۹۳٪) به‌عنوان نقاط پرت شناسایی گردیدند. لازم به ذکر است که در این قسمت نتایج مربوط به روش جایگزینی نقاط پرت با " استفاده از میانگین کلی سیگنال" که با توجه به جدول، در میان روش‌های جایگزینی دیگر عملکرد مناسب‌تری داشته است آورده شده است.

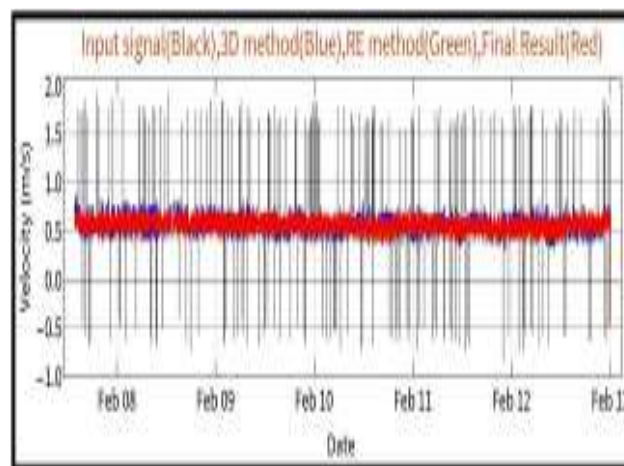


بعدی و بیضوی سه‌بعدی سه‌شکل ۷ نمودار مجموعه نقاط داده در فضای سه‌بعدی آستانه

به منظور اعمال گام دوم این روش و اعمال روش تخمین قوی (RE)، به کمک رابطه ۱۶، نقاط داده را به صورت استاندارد در آورده و با تقسیم داده‌ها به دسته‌های ۲۵ تایی مقدار آستانه شایوونت برای هر یک از دسته‌ها ۲,۳۳ لحاظ گردید. علت استفاده از دسته‌های ۲۵ تایی ایجاد بهینه‌ترین حالت مقدار آستانه شایوونت بوده است که به خوبی نقاط دورافتاده را از نقاط معتبر جدا می‌کند. در شکل ۸ مقدار استاندارد شده داده‌ها و آستانه شایوونت



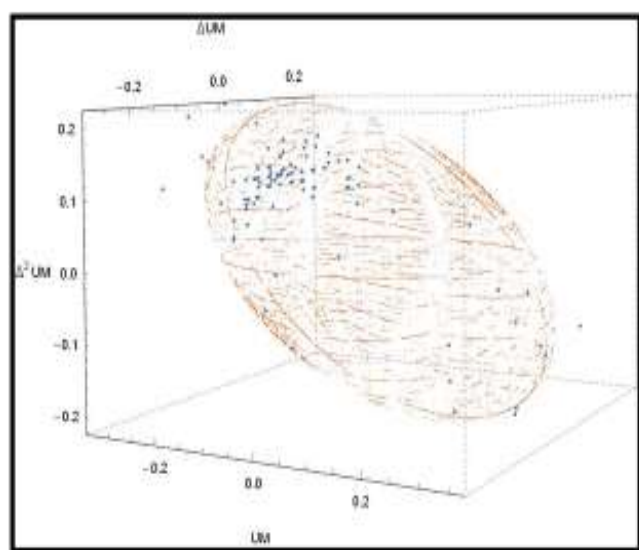
نگاری پس از اعمال پیش شکل ۱۰ سیگنال خام خروجی سیستم تیکه شرط دوم روش فضای فازی اصلاح شده



شکل ۹ نتیجه نهایی خروجی روش سه بعدی روسیو-فضای فازی (قرمز) و مقایسه با سیگنال ورودی (مشکی)، گام اول (آبی) و گام دوم روش (سبز)

۲. نتایج روش فضای فازی اصلاح شده:

پس از اعمال پیش شرطها مشابه با روش فضای فازی سه بعدی، به صورت تکرار شونده شروع به شناسایی نقاط پرت خارج از بیضوی سه بعدی آستانه می‌کنیم. در تکرار اول تعداد ۱۲۵ داده شناسایی و جایگزین شدند. لازم به ذکر است که طبق جدول شماره ۳ و مشابه با روش سه بعدی روسیو-فضای فازی، روش جایگزینی استفاده از میانگین کلی سیگنال نسبت به سایر روشها عملکرد بهتری داشته و نتایج مربوط به این روش در این قسمت آورده شده است. در شکل ۱۱ وضعیت نقاط داده خارج از بیضوی سه بعدی آستانه به همراه بیضوی سه بعدی آستانه قابل مشاهده است.



شکل ۱۱ وضعیت نقاط پرت خارج از بیضوی سه بعدی آستانه در تکرار اول روش فضای فازی اصلاح شده

در این روش پس از حذف مقدار میانگین از سیگنال سرعت که مقدار آن ۰٫۵۶۳ متر بر ثانیه محاسبه گردید، دو پیش شرط اول و دوم اعمال شد. برای اعمال پیش شرط اول در ابتدا مقدار تابع چگالی احتمال دادهها مطابق رابطه ۱۹ محاسبه گردید و سپس با توجه به شکل تابع چگالی احتمال مقدار پارامتر $C1 = 1,483$ انتخاب گردید تا به صورت مناسبی نقاط داده نزدیک قله آن به عنوان نقاط معتبر شناخته شده و در هنگام پرت کاوی این نقاط معتبر بدون تغییر و جایگزینی باقی بمانند. در این مرحله تعداد ۸۵۹۱ داده از کل دادهها معادل ۷۰٫۲۳٪ از دادهها در پیش شرط اول به عنوان نقاط معتبر و غیر قابل تبدیل مشخص شدند. در مرحله بعد و برای اعمال پیش شرط دوم این روش که منجر به حذف نقاط پرت آشکار از دادهها می‌شود، برای اعمال ضریب $C2$ از مقدار ۱ برای آن استفاده گردید. علت انتخاب مقدار ۱، حذف و تشخیص بهینه و مناسب نقاط پرت آشکار با این مقدار می‌باشد. پس از اعمال پیش شرط دوم ۲۴۹ داده از کل دادهها معادل ۲٫۰۴٪ از کل دادهها به عنوان نقاط پرت آشکار شناسایی و حذف گردیدند و پیش از ورود به فرایند پرت کاوی به علت جلوگیری از ایجاد ناپیوستگی در سیگنال مقدار آن‌ها با میانگین کلی سیگنال جایگزین گردید. در شکل ۱۰ سیگنال خام ورودی پس از حذف نقاط پرت آشکار و جایگزینی با مقدار مناسب نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود اعمال این پیش شرط به خوبی دادهها را مهیای اعمال فرایند پرت کاوی کرده و به علت حذف نقاط پرت آشکار، از پرت انگاشته شدن نقاط داده در همسایگی آن‌ها جلوگیری به عمل می‌آید.

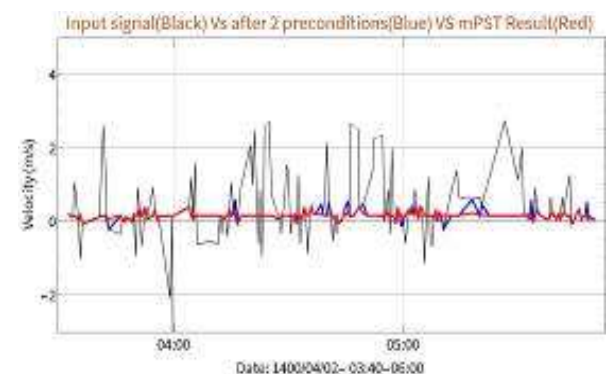
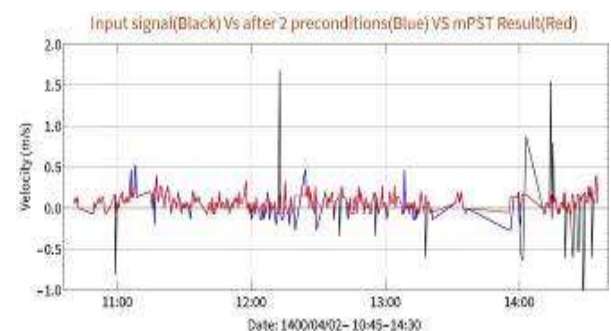
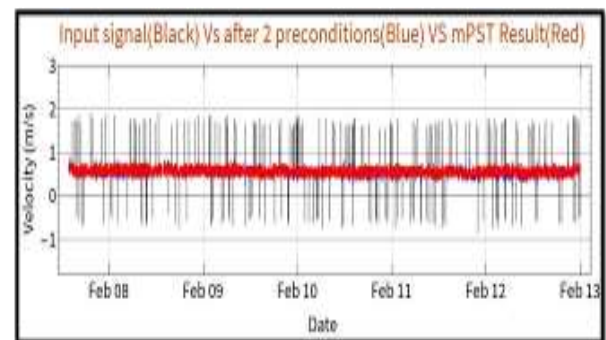
انزلی: خروجی روش فضای فازی اصلاح‌شده (قرمز) و مقایسه با داده‌های خام ب (مشکی) و وضعیت سیگنال پس از اعمال دو پیش شرط این روش (آبی)

۳. مقایسه آماری نتایج روش‌های اعمال‌شده:

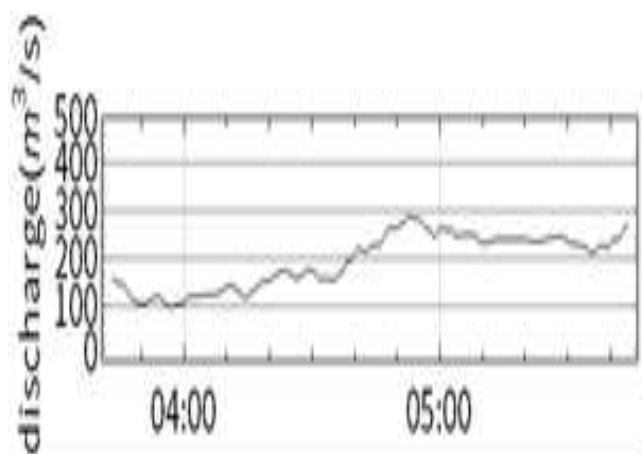
در این قسمت به بررسی عملکرد روش‌ها به کمک پارامترهای مشخص آماری پرداخته می‌شود که به صورت دقیق‌تری مقایسه عملکرد روش‌ها انجام شود. با توجه به در دسترس بودن نتایج دبی خروجی ایستگاه هیدرومتری از کیاما در بالادست سایت داده‌برداری از این داده‌ها می‌توان به‌عنوان مرجعی برای مقایسه عملکرد روش‌های پرت‌کاوی استفاده نمود. همچنین با توجه به در دسترس بودن داده‌های عمق سنجی و همچنین هیدروگرافی بستر رودخانه در راستای بین دوتراگذر، سطح مقطع مایل رودخانه در دسترس بوده و با تصویر کردن این سطح مقطع در راستای عمود بر جهت جریان و ضرب آن در مقدار سرعت جریان پس از تبدیل سرعت در راستای دوتراگذر به سرعت در راستای جهت جریان، دبی جریان از روش توموگرافی به دست می‌آید. در شکل ۱۳ نتیجه مقایسه‌ای روش‌های پرت-کاوی اعمال‌شده در این تحقیق پس از تبدیل به دبی با دبی خروجی روش دبی-اشل قابل مشاهده می‌باشد. همان‌گونه که مشخص است تطابق میانگین متحرک ۲۰ خروجی روش فضای فازی اصلاح‌شده با روش دبی-اشل به خوبی قابل مشاهده می‌باشد.

همچنین در شکل ۱۴ مقادیر اختلاف نسبی دبی این دو روش پرت-کاوی با در نظر گرفتن دبی روش دبی-اشل به‌عنوان مرجع، نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل اول ملاحظه می‌گردد اختلاف دبی نسبی خروجی روش سه‌بعدی روسیو-فضای فازی و روش دبی-اشل در اکثر نقاط داده در بازه منفی ده درصد تا مثبت ده درصد می‌باشد، این در حالی است که همان‌طور که مشخص است در نواحی خاصی از سیگنال این روش به‌خوبی عمل‌نکرده است و مقدار اختلاف نسبی دبی در تعداد قابل توجهی از نقاط به محدوده منفی مثبت بیست درصد رسیده و حتی در برخی نقاط این مقدار تا چهل درصد و بیشتر از آن هم می‌رسد. در شکل دوم اختلاف نسبی دبی خروجی روش فضای فازی اصلاح‌شده و روش دبی-اشل آورده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود مجدداً مقدار اختلاف نسبی دبی این دو روش در اکثریت نقاط در بازه منفی ده تا مثبت ده درصد قرار دارد که برای نقاط محدودی این محدوده به منفی پانزده درصد و مثبت بیست درصد می‌رسد. در نهایت می‌توان نتیجه‌گیری کرد که عملکرد هر دو این روش‌ها مناسب بوده و روش فضای فازی اصلاح‌شده به صورت محدودی بهتر از روش سه‌بعدی روسیو-فضای فازی عمل کرده است.

پس از جایگزینی نقاط پرت شناسایی شده مجدداً روش فضای فازی سه‌بعدی اعمال شده و در تکرار دوم تنها ۴ داده پرت شناسایی شد. لازم به ذکر است که در انتهای هر تکرار، پیش شرط اول یعنی عدم حذف و جایگزینی داده‌های معتبر، چک شده و در صورت شناسایی اشتباه این نقاط به‌عنوان پرت مجدداً مقدار اولیه آن‌ها برگردانده شده است. در نهایت در تکرار سوم هیچ داده‌ای خارج از بیضوی آستانه قرار نگرفت نتیجه انتهای تکرار دوم به‌عنوان نتیجه نهایی این روش تعیین شد. همان‌گونه که مشخص است اعمال پیش شرط‌ها در این روش سبب شد تعداد تکرارهای لازم برای انجام پرت‌کاوی کاهش یابد. در شکل ۱۲ خروجی نهایی روش فضای فازی اصلاح‌شده قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۲ الف) رودخانه گونو ژاپن: خروجی روش فضای فازی اصلاح‌شده و مقایسه آن با سیگنال خام و سیگنال خام پس از اعمال پیش شرط‌ها، ب) بندر



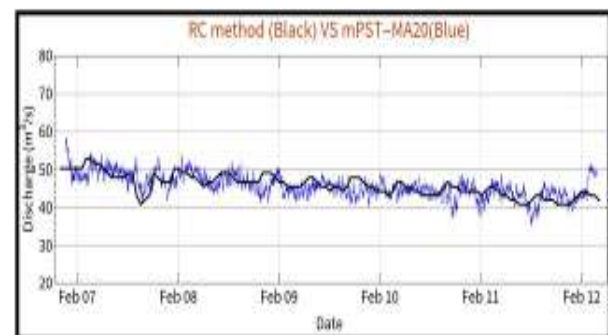
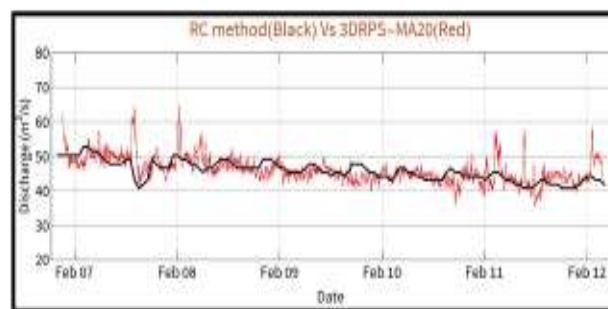
شکل ۱۵ اندازه‌گیری حجم آب ورودی به دریای خزر با روش تیکه‌نگاری صوتی

در جدول ۳ نتایج آماری روش‌های ترکیبی پرت‌کاوی-جایگزینی آورده شده‌است. ۱۰ حالت مختلف پرت‌کاوی-جایگزینی شامل دو روش پرت‌کاوی و ۵ روش جایگزینی اعمال شده و مورد بررسی قرار گرفته‌است. اثر روش جایگزینی بر نتایج نهایی روش‌های پرت‌کاوی در این جدول به خوبی مشخص است.

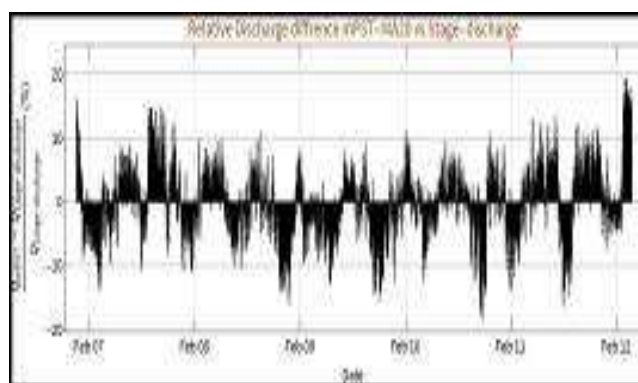
همان‌طور که مشاهده می‌شود برای روش سه‌بعدی روسیو-فضای فازی بهترین روش جایگزینی، روش استفاده از میانگین کلی سیگنال بوده است. این حالت ترکیبی پرت‌کاوی-جایگزینی در تمام پارامترهای آماری مورد بررسی بهترین نتیجه را بین حالات مختلف برای روش سه‌بعدی روسیو-فضای فازی داشته است.

همچنین برای روش فضای فازی اصلاح‌شده نتایج روش جایگزینی میانگین کلی سیگنال و روش آخرین داده معتبر پیش از داده پرت کشف شده عملکرد مشابه و نزدیکی داشته‌اند و در سه پارامتر RMSE، MAPE، NSC، میانگین کلی سیگنال قدری بهتر عمل کرده اما در پارامتر R^2 ، روش آخرین داده معتبر عملکرد بهتری داشته است.

همان‌گونه که مشخص است روش میانگین کلی سیگنال به‌عنوان یک روش مناسب برای جایگزینی نقاط پرت کشف شده توسط الگوریتم‌های پرت‌کاوی برای داده‌های سیستم تیکه‌نگاری صوتی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. علت بهتر بودن عملکرد این روش نسبت به سایر روش‌ها به نظر می‌رسد این مورد باشد که در سایر روش‌های جایگزینی، با توجه به اینکه از مقادیر چندین نقطه داده اطراف داده پرت تشخیص داده شده برای تعیین مقدار جایگزین استفاده می‌شود که خود این نقطه ممکن است مقادیر پرتی داشته باشند و لذا روی مقدار داده جایگزین تأثیر داشته باشند این در حالی است که اثر مقادیر پرت بر روی مقدار میانگین کلی سیگنال بسیار کمتر از سایر روش‌های اعمال شده می‌باشد.



شکل ۱۳ مقایسه دبی خروجی روش دبی-اشل با روش: سه بعدی روسیو-فضای فازی (بالا) ، فضای فازی اصلاح‌شده (پایین)



شکل ۱۴ مقادیر اختلاف دبی نسبی روش‌های پرت‌کاوی اعمال شده با خروجی روش دبی-اشل به‌عنوان مرجع

مقدار دبی ورودی به دریای خزر که با استفاده از روش تیکه‌نگاری صوتی اندازه‌گیری شده است در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

در نهایت در مورد این جدول نکات زیر حائز اهمیت است:

۱- در تمامی موارد با افزایش درصد حضور نقاط پرت در سیگنال مقدار نرخ تشخیص (DR) نقاط پرت کاهش می‌یابد. یعنی با افزایش تعداد نقاط پرت، دقت الگوریتم‌های پرت‌کاوی کاهش یافته و درصد کمتری از نقاط پرت را به درستی به‌عنوان پرت شناسایی می‌کنند.

۲- در مورد پارامتر نرخ خطا (FAR)، و در روش سه‌بعدی روسیو-فضای فازی تا ۲۵٪ حضور نقاط پرت در سیگنال، با افزایش درصد حضور نقاط پرت پارامتر نرخ خطا افزایش می‌یابد؛ به عبارت دیگر تعداد نقاط نرمال بیشتری به خطا به‌عنوان پرت شناسایی می‌شوند؛ این در حالی است که در درصدهای ۴۰ و ۵۰ درصد مقدار این پارامتر کاهش پیدا می‌کند. در روش فضای فازی اصلاح‌شده اما، به جز چند مورد محدود، با افزایش درصد حضور نقاط پرت در سیگنال مقدار پارامتر نرخ خطا افزایش یافته است.

۳- نکته حائز اهمیت بعدی این است که در تمام درصدهای مختلف نقاط پرت، بیشترین درصد نرخ تشخیص نقاط پرت در هر دو روش پرت‌کاوی، مربوط به روش جایگزینی "آخرین داده معتبر پیش از نقطه پرت کشف شده (LGV)" می‌باشد. البته همین روش به جز در موارد محدود، بیشترین درصد نرخ خطا در مقایسه با سایر روش‌های جایگزینی را دارا می‌باشد.

۴- کمترین میزان نرخ خطا در روش سه‌بعدی روسیو-فضای فازی و بین روش‌های مختلف جایگزینی مربوط به روش درونیایی چندجمله‌ای درجه اول ۲۴ نقطه‌ای می‌باشد. کمترین مقدار همین پارامتر در روش فضای فازی اصلاح‌شده، مربوط به دو روش درونیایی چندجمله‌ای درجه اول ۸ و ۲۴ نقطه‌ای می‌باشد.

۵- به طور کلی با مقایسه نتایج دو روش سه‌بعدی روسیو-فضای فازی و فضای فازی اصلاح‌شده مشخص می‌شود که مقادیر پارامتر نرخ تشخیص برای تمامی حالات در روش فضای فازی اصلاح‌شده بیشتر از روش سه‌بعدی روسیو-فضای فازی می‌باشد و می‌توان نتیجه‌گیری نمود که روش اصلاح‌شده، در تشخیص نقاط پرت دقت بالاتری نسبت به روش سه‌بعدی دارد.

۶- با مقایسه مقادیر پارامتر نرخ خطا برای دو روش پرت‌کاوی اعمال شده مشخص شد که تا ۲۵ درصد شدت حضور نقاط پرت در سیگنال، مقدار پارامتر نرخ خطا در تمام حالات جایگزینی و در روش فضای فازی اصلاح‌شده کمتر از روش سه‌بعدی روسیو-فضای فازی می‌باشد؛ در حالی که در درصدهای ۴۰ و ۵۰ درصد مقدار نرخ خطا در روش سه‌بعدی روسیو-فضای فازی کمتر مشاهده می‌شود.

۷- اگر چه نمی‌شود به صورت مطلق نظر داد اما به نظر می‌رسد که برای پرت‌کاوی با دو روش استفاده شده در این تحقیق بهترین روش‌ها جهت جایگزینی نقاط پرت، روش‌های استفاده از میانگین کلی سیگنال و روش آخرین داده معتبر پیش از داده پرت کشف شده می‌باشد. در این حال که پارامتر نرخ تشخیص برای این

نکته بعد در مورد این جدول، عملکرد روش‌های درونیایی ۸ و ۲۴ نقطه‌ای می‌باشد. همان‌طور که گفته شد برای داده‌های سرعت سنج صوتی ADV، روش درونیایی چندجمله‌ای درجه سوم ۲۴ نقطه‌ای به‌عنوان یک روش مناسب عنوان شده بود [18]؛ این در حالی است که با بررسی‌های به عمل آمده در این تحقیق مشخص شد که برای داده‌های سیستم تیکه‌نگاری صوتی روش درونیایی درجه سوم عملکرد مناسبی نداشته بلکه درونیایی درجه اول نتیجه بهتری داشت. همچنین برای بررسی بیشتر تصمیم گرفته شد تا علاوه بر استفاده از ۲۴ نقطه در طرفین داده پرت کشف شده از ۸ نقطه در طرفین استفاده شود تا نتایج این دو روش مقایسه گردد؛ با بررسی نتایج مشخص شد که استفاده از ۸ یا ۲۴ نقطه تأثیر آن‌چنانی در نتایج خروجی نداشته است.

جدول ۲: مقادیر پارامترهای آماری مختلف برای روش‌های مختلف ترکیبی پرت‌کاوی-جایگزینی

		RMSE	MAPE (%)	NSC	R ²
3DRPS	4P Mean	3.45	5.32	-0.592	0.486
	8PI	2.7	4.61	0.0251	0.596
	24PI	2.7	4.61	0.0251	0.596
	Signal Mean	<u>2.383</u>	<u>4.057</u>	<u>0.24</u>	<u>0.635</u>
	LGV	3.352	5.736	-0.502	0.44
mPST	4P Mean	2.705	4.66	0.022	0.57
	8PI	2.710	4.665	0.018	0.57
	24PI	2.710	4.665	0.018	0.57
	Signal Mean	<u>2.681</u>	<u>4.629</u>	<u>0.039</u>	<u>0.567</u>
	LGV	<u>2.697</u>	<u>4.636</u>	<u>0.0268</u>	<u>0.572</u>

در جدول ۳ به بررسی عملکرد حالات ترکیبی پرت‌کاوی-جایگزینی بر روی سیگنال مصنوعی ایجادشده با درصدهای مختلف نقاط پرت تصادفی پرداخته شده است. در مورد این جدول ذکر این مورد مهم است که محل وقوع نقاط پرت به صورت تصادفی انتخاب گردیده و پس از ایجاد سیگنال مصنوعی با درصد و محل وقوع خاص نقاط پرت، همان سیگنال به هر یک از ده حالت پرت‌کاوی-جایگزینی جداگانه اعمال گردیده و نتایج آن در این جدول آورده شده است. ممکن است در صورت تغییر محل وقوع نقاط پرت نتایج مقداری دستخوش تغییر شوند، لذا بر اساس نتایج این جدول به صورت نسبی می‌توان نتیجه‌گیری انجام داد و نه مطلق.

در نهایت به منظور انتخاب بهترین حالت ترکیبی از بین این ده حالت ترکیبی پرت‌کاوی-جایگزینی، جهت انجام فرایند پرت‌کاوی، با در نظر گرفتن نتایج مربوط به داده‌های تیکه‌نگاری که در بخش‌های قبل مورد بررسی قرار گرفت، استفاده از روش پرت‌کاوی فضای فازی اصلاح‌شده نسبت به روش سه‌بعدی روسیو-فضای فازی در اولویت قرار گرفته و همچنین در میان روش‌های جایگزینی پیشنهاد می‌شود روش‌های میانگین متوسط سیگنال و آخرین داده معتبر پیش از داده پرت کشف شده، انتخاب و اعمال شوند.

دو روش نسبت به سایر روش‌ها مقدار بالاتری داشته و نقاط پرت بیشتری توسط این روش‌ها شناسایی شده‌اند، اما مقدار نرخ خطای آن‌ها قدری بالاتر از روش‌های دیگر است، که اگر ملاک در انتخاب را دقت بیشتر در شناسایی نقاط پرت در نظر بگیریم، می‌شود تا حدودی از مقدار نرخ بالاتر خطای این دو روش نسبت به سایر روش‌های جایگزینی چشم‌پوشی نمود.

جدول ۳: مقدار پارامترهای نرخ تشخیص (DR) و (FAR)

		5%		10%		15%		25%		40%		50%	
		DR	FAR	DR	FAR	DR	FAR	DR	FAR	DR	FAR	DR	FAR
3DRPS	4PM	78	13.5	71.5	19.83	69	24.71	62.4	24.4	46.63	20.83	34.6	18.8
	8PI	78	13.5	74.5	20.06	68.33	23.77	64.6	29.73	48.75	18.25	35.3	13.7
	24PI	71	12.1	70.5	18.94	70	22.47	64.8	28	47.25	20.42	35.2	12.3
	Signal Mean	81	18.3	77.5	23.83	74.66	29	67.6	29.07	52.63	20.08	42.9	17
	LGV	89	20.4	78.5	25	75.67	28	67.2	28.8	57.63	22.83	43.5	14
mPST	4PM	77	6.26	72	10	76.66	12.94	69.6	23	56.63	32.75	49.2	31.1
	8PI	81	5.42	78.5	9.06	71	11.18	66.2	20	56.13	19.83	46.7	19.1
	24PI	76	8.52	70.5	8.94	72	14.18	68.8	18.27	58.88	25.5	45	17.3

	Signal Mean	81	12.3	78.5	25.5	78.67	25.82	73.42	45.13	52.63	29.92	54.5	45.7
	LGV	93	16.8	87	20.28	80.67	17.06	74.4	32.4	70.12	45.50	56.5	42.5

همچنین شایسته است مراتب قدردانی خود را از سردبیر محترم نشریه اقیانوس‌شناسی جناب آقای دکتر علیزاده کتک لاهیجانی و همکاران ایشان اعلام دارم.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

اختصارات (اختیاری)

کلمات اختصاری این مقاله شامل موارد زیر است:

OAT	Ocean Acoustic Tomography
CAT	Coastal Acoustic Tomography
FAT	Fluvial Acoustic Tomography
3DRPS	Three-dimensional (3D) phase space Method
mPST	Modified Phase-Space Thresholding
ADV	Acoustic Doppler Velocimeter

منابع

- [1]. A. Sharma, A.K. Maddirala, B. Kumar, Modified singular spectrum analysis for despiking acoustic Doppler velocimeter (ADV) data, Meas. J. Int. Meas. Confed. 117 (2018) 339–346. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.12.025>.
- [2]. M. Bahreinimotlagh, R. Roozbahani, M. Eftekhari, H. Kardanmoghadam, M. Khoshhali, K. Mohtasham, Feasibility study of 10-kHz Coastal Acoustic Tomography System for current monitoring in the Persian Gulf, J. Mar. Eng. 15 (2020) 131-138 [In Persian].
- [3]. B.D. Dushaw, Surprises in Physical Oceanography:

نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی شد تا به کمک دو روش پرت‌کاوی که در گذشته و بر روی داده‌های خروجی سرعت سنج صوتی ADV مورد بررسی قرار گرفته‌اند، داده‌های خروجی سیستم تیکه‌نگاری مورد پرت‌کاوی قرار گیرد؛ همچنین از پنج روش جایگزینی نقاط پرت به منظور بررسی عملکرد و شناسایی بهترین روش ترکیبی پرت‌کاوی-جایگزینی استفاده شده است. روش‌های پرت‌کاوی استفاده شده شامل: روش سه‌بعدی روسیو-فضای فازی (3DRPS Method) و روش فضای فازی اصلاح‌شده (mPST method) است. همچنین به جهت بررسی دقیق عملکرد این روش‌ها، از پارامترهای آماری RMSE, MAPE, NSC, R2 استفاده گردید و به‌عنوان یک مرجع از داده‌های دبی خروجی روش دبی-اشل برداشت شده از یک ایستگاه هیدرومتری واقع در بالادست سایت داده‌برداری استفاده گردید. نتایج نشان داد روش فضای فازی اصلاح‌شده نسبت به سایر روش‌های مورد استفاده عملکرد بهتری دارد.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله نویسندگان سهم یکسانی داشتند. تمرکز اصلی نویسنده اول (امیرحسین حسن‌آبادی) بر جمع‌آوری داده و تجزیه و تحلیل بوده است. تمرکز نویسنده دوم (مرتضی افتخاری) که نویسنده مسئول مقاله است بیشتر بر ایده‌پردازی و اصلاحات اساسی نسخه اولیه مقاله بوده است. نظارت بر انطباق مقاله با فرمت مجله، نگارش و جمع‌آوری مطالب، ترجمه و ویراستاری مقالات و هماهنگی محتوایی مقاله را نیز بر عهده داشته است. نویسنده سوم (نعمت اله کریمی) و چهارم (رضا روزبهانی) عهده‌دار ایده‌پردازی و نگارش پیش‌نویس مقاله بوده‌اند. نویسنده پنجم (محمد رضایی) و ششم (مسعود بحرینی مطلق) در انجام آزمایش‌ها و جمع‌آوری داده و همچنین نگارش پیش‌نویس مقاله متمرکز بوده‌اند.

تشکر و قدردانی (اختیاری)

مطالعه حاضر حاصل از طرح پژوهشی شماره ۱۴۰۰/۱۳۵۵۴/۱۵۰ موسسه تحقیقات آب است.

- Velocimeter Data in Bubbly Flows, *J. Eng. Mech.* 133 (2007) 122–125. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(2007\)133:1\(122\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2007)133:1(122)).
- [12]. M. Parsheh, F. Sotiropoulos, F. Porté-Agel, Estimation of Power Spectra of Acoustic-Doppler Velocimetry Data Contaminated with Intermittent Spikes, *J. Hydraul. Eng.* 136 (2010) 368–378. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000202](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000202).
- [13]. A. Hasanabadi, M. Bahreinimotlagh, E. Jabbari, K. Kawanisi, H. Alizadeh, Y. Olfatmiri, Improving the accuracy of streamflow data acquired from the acoustic tomography technique using data despiking algorithms, *J. Hydrol.* 608 (2022) 127587. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2022.127587>.
- [14]. Y. Olfatmiri, M. Bahreinimotlagh, E. Jabbari, K. Kawanisi, Application of Acoustic tomographic data to the short-term streamflow forecasting using data-driven methods and discrete wavelet transform, *J. Hydrol.* 609 (2022) 127739. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127739>.
- [15]. S.T. Marine, Reciprocal Sound Transmission Experiment for Current Measurement in the Seto Inland Sea, Japan, 53 (1997) 117–127.
- [16]. C. Zhong, F. Yin, J. Zhang, S. Zhang, R. Wan, D. Kitazawa, Optimized algorithm for processing outlier of water current data measured by acoustic doppler velocimeter, *J. Mar. Sci. Eng.* 8 (2020). <https://doi.org/10.3390/JMSE8090655>.
- [17]. P.J. Rousseeuw, J. Wiley, Robust Regression and Outlier Detection, n.d.
- [18]. D.G. Goring, V.I. Nikora, Despiking acoustic doppler velocimeter data, *J. Hydraul. Eng.* 128 (2002) 117–126. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:1\(117\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:1(117)).
- Contributions from Ocean Acoustic Tomography, *Tellus A Dyn. Meteorol. Oceanogr.* 74 (2022) 33–67. <https://doi.org/10.16993/tellusa.39>.
- [4]. M. Bahreinimotlagh, N. Karimi, S. Sajjadi, J. Ranjbar, M. Golmohammadi Samani, Real-time acoustic tomography system and the experience of Caspian current sea monitoring, *J. Acoust. Eng. Soc. Iran.* 8 (2021) 20-26 [In Persian].
- [5]. M. Bahreinimotlagh, R. Roozbahani, M. Eftekhari, H. Kardan Moghadam, A. Kavousi Heydari, Design, manufacture and the evaluation of Fluvial Acoustic Tomography System (FATS), *J. Acoust. Soc. Iran.* 6 (2018) 1-1 [In Persian].
- [6]. M. Bahreinimotlagh, R. Roozbahani, M. Eftakhari, H. Kardan Moghaddam, S.A. Hassanli, Continuous Monitoring of Tidal Bores Using Acoustic Tomography Technique, *J. Oceanogr.* 9 (2019) 57-64 [in Persian]. <https://doi.org/10.29252/JOC.2019.9.1334>.
- [7]. D.M. Hawkins, Identification of Outliers, 1980. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-3994-4>.
- [8]. D.G. Goring, V.I. Nikora, Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data, *J. Hydraul. Eng.* 128 (2002) 117–126. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2002\)128:1\(117\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2002)128:1(117)).
- [9]. M. Bahreinimotlagh, K. Kawanisi, M.B. Al Sawaf, R. Roozbahani, M. Eftekhari, A.K. Khoshuie, Continuous streamflow monitoring in shared watersheds using advanced underwater acoustic tomography system: a case study on Zayanderud River, *Environ. Monit. Assess.* 191 (2019) 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7830-4>.
- [10]. T.L. Wahl, Discussion of “Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data” by Derek G. Goring and Vladimir I. Nikora, *J. Hydraul. Eng.* 129 (2003) 484–487. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2003\)129:6\(484\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2003)129:6(484)).
- [11]. N. Mori, T. Suzuki, S. Kakuno, Noise of Acoustic Doppler

AUTHOR(S) BIOSKETCHES

Eftekhari, M., Assistant Professor, Department of Water Resources and Studies, Water Research Institute, Tehran, Iran

✉ m.eftekhari@wri.ac.ir

 0000-0002-0521-3609

Hasanabadi, A.H., Researcher at Sanjab Fanavari Khaliye Fars Ltd., and PhD candidate, Department of Water, Soil, Environment, National Institute of Scientific Research, Québec, Canada

✉ amirhosein.hasanabadi@inrs.ca

 0000-0002-4093-8787

Karimi, N., Assistant Professor, Department of Water Resources and Studies, Water Research Institute, Tehran, Iran

✉ n.karimi@wri.ac.ir

 0000-0002-7896-4390

Roozbahani, R., Assistant Professor, Department of Water Resources and Studies, Water Research Institute, Tehran, Iran

✉ r.roozbahani@wri.ac.ir

 0000-0002-1394-1833

Rezaei, M., PhD, Department of Mechanics, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

✉ m.rezaei@iust.ac.ir

 0000-0000-0000-0000

Bahreimotlagh, M., Assistant Professor, Department of Water Resources and Studies, Water Research Institute, Tehran, Iran

✉ m.bahreini@wri.ac.ir

 0000-0001-9009-663X

این قسمت توسط نشریه تکمیل می‌گردد:



HOW TO CITE THIS ARTICLE

 <http://doi.org/10.52547/joc.14.55.1>

 <http://joc.inio.ac.ir/article-1-1744-fa.html>

 <https://orcid.org/0000-0002-0521-3609>

COPYRIGHTS



©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.