نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال سیزدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۴

Vol.13, No.4, Winter 2026

۴۲ -۲۵

مقاله پژوهشی

ارزیابی دقت هیدروگرافی سونار چندپرتوی با استفاده از الگوریتم *CUBE* _ مطالعه موردی کانال دسترسی بندر بوشهر

نگار زاهدی[1*]، نادر پسنده [2]، علی کوروش نیا[3]، سید مجتبی زارعی[4]، بهمن تاج فیروز [5]، سیدشاهد مساوات[6]

۱- کارشناسی ارشد سنجش از دور، مهندسین مشاور دریا ترسیم، تهران، ایران

۲- دکتری مدیریت، سازمان بنادر و دریانوردی، تهران، ایران

۳- دکتری امور دریایی، سازمان بنادر و دریانوردی، تهران، ایران

۴- کارشناسی ارشد علوم دریایی، سازمان بنادر و دریانوردی، تهران، ایران

۵- دکتری اقیانوس شناسی، مهندسین مشاور دریا ترسیم، تهران، ایران

۶- دانشجوی دکتری *RS-GIS*، مهندسین مشاور دریا ترسیم، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۰۷

چکیده

اندازه‌گیری‌های بستر دریا در عملیات هیدروگرافی مدرن، متکی بر سیستم‌های سونار چندپرتوی (*Multi-Beam Echo Sounder* (*MBES*)) و روش‌های موقعیت‌یابی دقیق است. با این وجود، داده‌های خام حاوی نقاط نادرست (نویز و داده‌های پرت) هستند که لازم است پیش از استفاده پاک‌سازی شوند. الگوریتم برآوردگر ترکیبی عدم قطعیت و عمق‌یابی (*Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator* (*CUBE*))، یک روش سریع و آماری برای شبکه‌بندی داده‌های متراکم *MBES* و شناسایی این نقاط نادرست محسوب می‌شود. این پژوهش به ارزیابی دقت داده‌های هیدروگرافی چندپرتوی در کانال دسترسی بندر بوشهر با بهره‌گیری از الگوریتم *CUBE* می‌پردازد. داده‌های میدانی با استفاده از یک شناور مجهز به سیستم *MBES* جمع‌آوری و با نرم‌افزار *HYPACK* پردازش شدند. خروجی الگوریتم *CUBE* مورد تحلیل قرار گرفت و با نتایج حاصل از روش پردازش متعارف (دستی) مقایسه شد. نتایج نشان داد که ۹۹٫۸۸٪ از عمق‌های برآوردشده توسط *CUBE*، الزامات استاندارد مرتبه ویژه سازمان بین‌المللی هیدروگرافی (*IHO Special Order*) را برآورده می‌کنند. همچنین بیش از ۹۴٪ از داده‌ها دارای عدم قطعیت عمودی (*Total Vertical Uncertainty*) بهتر از ۱۰ سانتی‌متر بودند. مقایسه سطوح حاصل از دو روش، میانگین اختلافی در حدود ۳ سانتی‌متر را نشان داد که حاکی از سازگاری قابل قبول بین آن‌ها است. این مطالعه، اثربخشی الگوریتم *CUBE* را به‌عنوان ابزاری قدرتمند، سریع و قابل اعتماد برای پردازش خودکار داده‌های هیدروگرافی چندپرتوی در محیط‌های ساحلی کم‌عمق تأیید می‌کند.

کلیدواژه‌ها : بندر بوشهر، عمق‌یابی چندپرتوی، فیلتر کردن، عدم قطعیت، الگوریتم *CUBE*.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: شرکت مهندسین مشاور دریا ترسیم، واحد ۲، پلاک ۶۵، خیابان خوش شمالی، تهران، ایران.

تلفن: ۰۲۱۶۶۹۱۴۲۸۳

Email: negarzahedi545@gmail.com

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-17]

۱- مقدمه

نقشه‌برداری هیدروگرافی با استفاده از عمق‌یاب چندپرتوی *(MBES)*[1] یک عملیات هیدروگرافی پیشرفته است که ناوبری دریایی را با ژئودزی مرتبط می‌کند. دینامیک اندازه‌گیری‌ها (اختلال حرکتی هر اندازه‌گیری) و محیط آب دریا که انتشار امواج صوتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، باعث بروز خطاهای جدی در ثبت داده‌های مکانی می‌شود [۱]. از این رو، پردازش داده‌های عمق‌یاب چندپرتوی از دیدگاه‌های هیدروگرافی و فناوری، کاری چالش‌برانگیز است [۲].

در گذشته، تمرکز اصلی بر بهبود روش‌ها و فناوری‌های جمع‌آوری داده‌ها بوده است، در حالی‌که به توسعه روش‌های نوین پردازش داده‌ها توجه کمتری شده بود. اما اکنون با وضعیتی مواجه هستیم که داده‌ها را بسیار سریع‌تر از آنچه که تصور می‌شد می‌توان به راحتی جمع‌آوری و پردازش کرد. بنابراین، پردازش داده‌های چندپرتوی نسبت به داده‌های تک‌پرتوی پیچیده‌تر و زمانبرتر است. یکی از مراحل اصلی این فرآیند، پاک‌سازی و حذف داده‌های ناخواسته و نویز است. این داده‌ها خارج از دامنه و رواداری مشخص قرار دارند. به‌طور معمول، حذف داده‌های چندپرتوی در فرایند ویرایش به کاهش تعداد نقاط تشکیل‌دهنده مدل رقومی سطح زمین *(DTM)*[2] و دشوارتر شدن ارزیابی داده‌ها منجر می‌شود [۱].

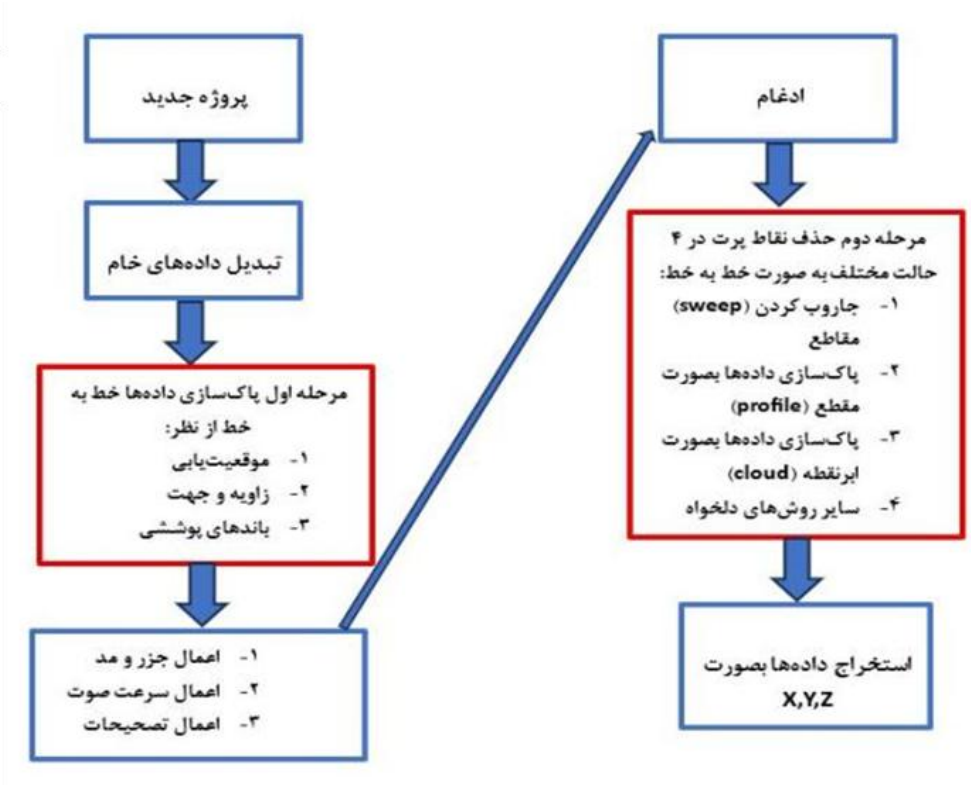
در روش‌های مرسوم دستی، که روندنمای آن در شکل(۱) نشان داده شده است، پاک‌سازی داده‌ها در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله نخست، داده‌ها بصورت خط‌به‌خط و با استفاده از ابزارهای مربوط به موقعیت مکانی[3]، زاویه و جهت[4] و باندهای پوششی[5] پاک‌سازی می‌شوند. پس از ادغام تصحیحات، در مرحله دوم، هر مقطع بصورت جداگانه[6] مورد ویرایش قرار می‌گیرد [۳]. در نهایت پس از ویرایش نهایی، از داده‌ها میتوان به فرمت مناسب خروجی گرفت.

در کل می‌توان گفت که انجام این دو مرحله برای پاک‌سازی داده‌های چندپرتوی در هنگام پردازش آن‌ها بسیار زمان‌بر است. با توجه به اینکه این روش‌ها به تجربه و سلیقه هیدروگراف بسیار وابسته هستند، نتایج نهایی دو نفر می‌تواند با یکدیگر متفاوت باشد. همچنین تغییر بزرگ‌نمایی[7] یا سرعت انجام کار نیز در نتیجه نهایی بسیار تأثیرگذار است. پاک‌سازی مرحله اول، قدیمی‌ترین روش و مشابه ابزارهای پردازش داده‌های تک‌پرتوی است. مرحله دوم پاک‌سازی پیشرفته‌تر است و امکان مقایسه خطوط مجاور را نیز دارد [۳].

به‌منظور کاهش این محدودیت‌ها، روش‌های خودکار و نیمه‌خودکار مختلفی معرفی شده‌اند که یکی از مهم‌ترین آن‌ها الگوریتم برآوردگر ترکیبی عدم قطعیت و عمق‌یابی *(CUBE)*[8] است. این الگوریتم از پارامترهای ناوبری و محیطی مانند توزیع قائم سرعت صوت، انکسار پرتو صوتی در آب، نوسانات سطح آب و مختصات افقی اعماق و سایر پارامترهای مورد لزوم برای مجموعه خطاهای قابل انتظار، برای فیلتر کردن و پاک‌سازی داده‌های مکانی استفاده می‌کند. این الگوریتم براساس تحقیقات انجام‌شده در دانشگاه نیوهَمپشایر[9] توسط آقای برایان کالدر[10] و همکاران (۲۰۰۷)، برای پاسخ‌گویی به نیاز مؤسسات و ادارات هیدروگرافی در زمینه الگوریتم‌های عمومی و اختصاصی عمق‌یاب چندپرتوی توسعه یافته است [۴]. علاقه‌مندان برای مطالعه بیشتر چگونگی عملکرد *CUBE* و مشاهده روابط و مدل‌های ریاضی این روش می‌توانند به مقاله کالدر و همکاران (۲۰۰۷) مراجعه کنند [۴].

[1] *Multi Beam Echo Sounder*
[2] *Digital Terrain Model*
[3] *Navigation editors*
[4] *Attitude editors*
[5] *Swath editors*
[6] *Subset editor*
[7] *Zoom*
[8] *Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator*
[9] *University of New Hampshire*
[10] *Brian R. Calder*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-17]



شکل ۱: روندنمای پردازش داده‌های چند پرتوی به روش دستی

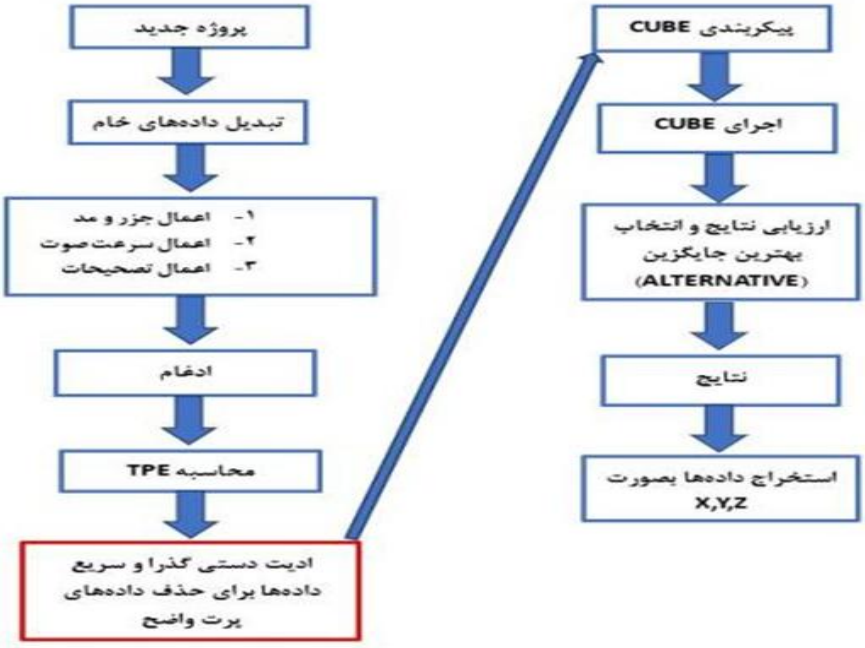
در این‌جا، برای جلوگیری از پیچیدگی و طولانی‌تر شدن مقاله، از آوردن جزئیات چشم‌پوشی شده است. الگوریتم *CUBE* یک روش آماری کلیدی است که در پردازش داده‌های سونار چندپرتوی برای تولید نقشه‌های عمق‌سنجی با وضوح بالا استفاده می‌شود. *CUBE* منابع مختلف عدم قطعیت را در اندازه‌گیری‌های عمق ترکیب می‌کند و راهی برای تخمین دقیق‌تر عمق‌سنجی ارائه می‌دهد. از آنجا که *CUBE* یک روش شبکه‌بندی است، برای زمانی که نیاز به نتایجی با جزئیات بالا باشد مناسب نیست و بیشتر برای شبکه‌بندی مناطق وسیع در مدت‌زمان کوتاه کاربرد دارد. در صورتی که جزئیات بیشتری مورد نیاز باشد، استفاده از ویرایش دستی داده‌های عمق‌یابی چندپرتوی توصیه می‌شود [۲].

الگوریتم *CUBE* یک روش سریع برای شبکه‌بندی است که از مقادیر خطای انتشار کل *(TPE)*[1] استفاده می‌کند؛ این مقادیر در حین برداشت داده‌ها و براساس انحراف معیارهای پیشین محاسبه می‌شوند [۵].

از مزایای استفاده از الگوریتم *CUBE* که در نرم‌افزارهای متداول هیدروگرافی به‌کار می‌رود، می‌توان به انتخاب بهترین نقطه ارتفاعی (عمق) و ارزیابی دقت از طریق برآورد عدم قطعیت ارتفاعی کل *(TVU)*[2] در یک گره[3] از شبکه انتخابی اشاره کرد. از آنجا که انتخاب گره‌های یک شبکه منظم توسط نرم‌افزار در فواصل مساوی انجام می‌شود، نیازی به ارزیابی دقت یا عدم قطعیت موقعیت افقی *(THU)*[4] نیست [۱].

[1] *Total Propagated Error*
[2] *Total Vertical Uncertainty*
[3] *Node*
[4] *Total Horizontal Uncertainty*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-17]



شکل ۲: روندنمای پردازش داده‌های چند پرتوی به روش *CUBE*

روندنمای شکل (۲)، یکی از روش‌های مؤثر نیمه اتوماتیک برای دستیابی به نتایج قابل قبول پس از استفاده از الگوریتم *CUBE* و اعمال تصمیمات هیدروگراف را نشان می‌دهد. علت نیمه‌اتوماتیک بودن این روش آن است که در نهایت متخصص هیدروگرافی تنها یک‌بار نظر نهایی خود را اعمال می‌کند؛ در نتیجه، میزان ویرایش دستی کاهش می‌یابد و سرعت پردازش افزایش پیدا می‌کند. از مزیت‌های این روش دستیابی به نتایج مشابه با پردازش‌های هیدروگراف‌های مختلف، می باشد [۳]. در این مقاله سعی شده است با استفاده از داده‌های میدانی برداشت‌شده به روش چندپرتوی در کانال دسترسی بندر بوشهر و با بهره‌گیری از الگوریتم *CUBE*، دقت داده‌های جمع‌آوری‌شده با روش‌های متداول دستی و نیز مقادیر استاندارد سازمان بین‌المللی هیدروگرافی مقایسه و ارزیابی شود.

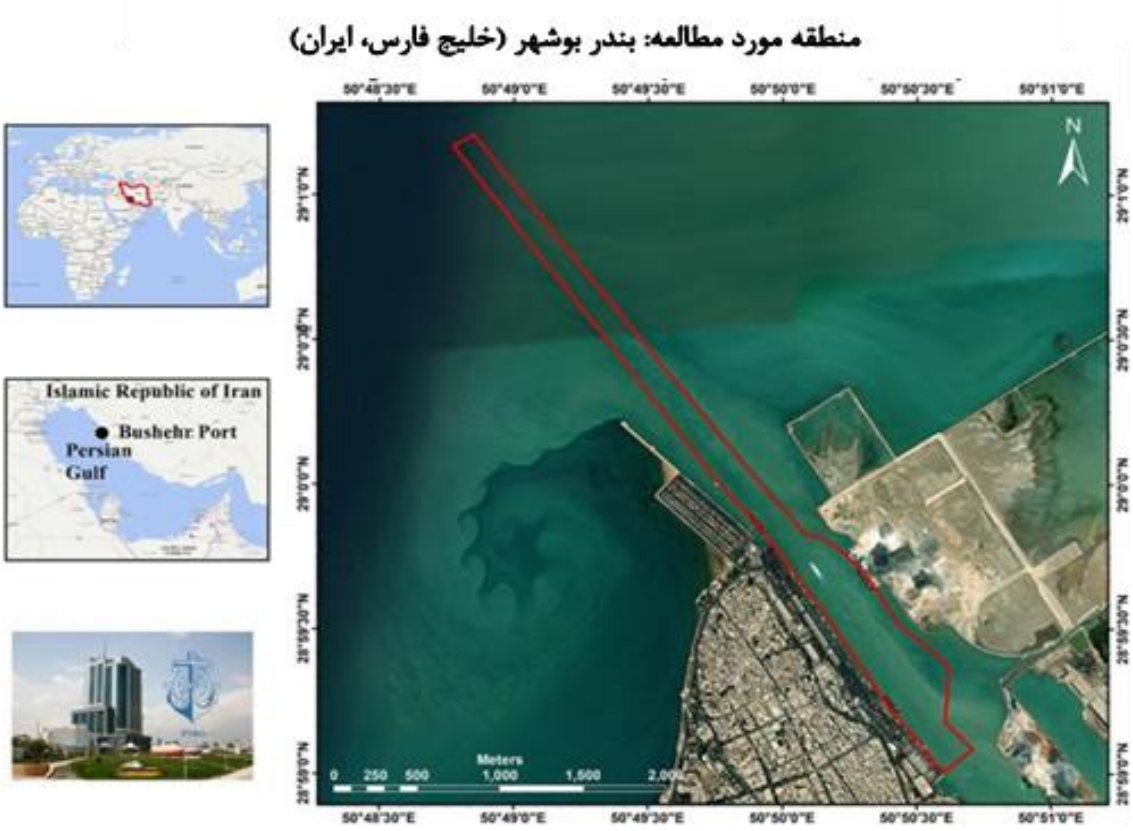
بخش‌های مختلف مقاله در ادامه به این شرح هستند: بخش دوم نقشه‌برداری هیدروگرافی و جمع‌آوری داده‌ها، بخش سوم تئوری روش، بخش چهارم پردازش‌ها و نتایج و در بخش پنجم نتیجه‌گیری، به ترتیب ارائه شده است.

۲- نقشه‌برداری هیدروگرافی و جمع‌آوری داده‌ها

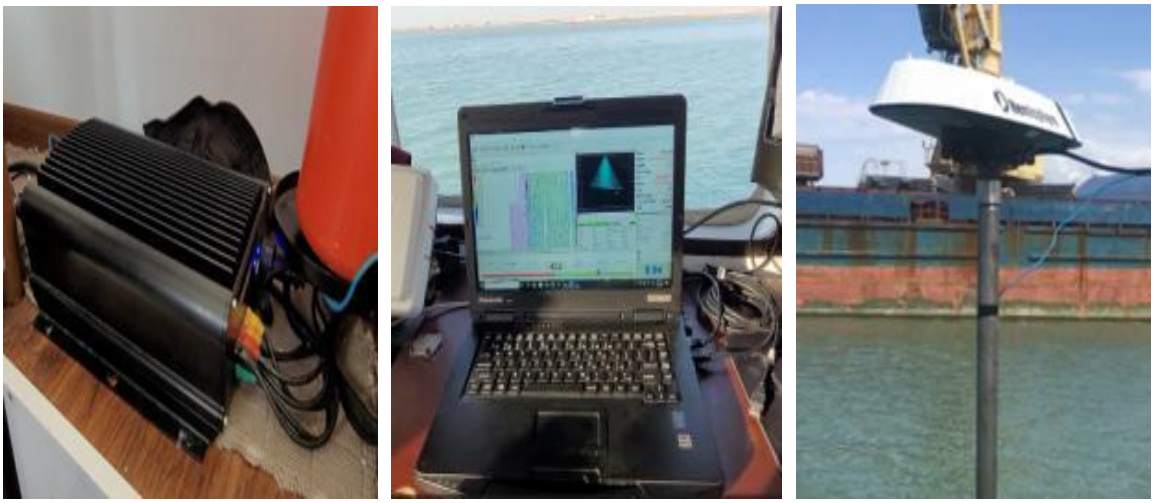
عملیات میدانی هیدروگرافی در شهریور سال ۱۴۰۲ (۲۰۲۳ میلادی) در کانال داخلی بندر بوشهر (عرض جغرافیایی ۲۸ درجه و ۵۹ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۰ دقیقه شرقی)، طبق شکل(۳) انجام شد. ناحیه مورد مطالعه به طول ۶۷۰۰ متر و عرض متوسط ۳۰۰ متر توسط یک فروند شناور راهنما (پایلوت) نقشه‌برداری شد. داده‌ها در سیستم تصویر *UTM Zone 39N* و بیضوی *WGS-84* تهیه و محاسبه شدند. تجهیزات اندازه‌گیری شامل سامانه‌های موقعیت‌یابی *RTK*، سونار چندپرتویی مدل *WASSP-S3i*، واحد مرجع حرکتی (*MRU*) مدل *Spatial*، سامانه تعیین جهت *Hemisphere* و دستگاه اندازه‌گیری سرعت صوت در ستون آب دریا *(SVP)*[1] مدل *Odom-Digibar Poro* بود (شکل (۴)).

[1] *Sound Velocity Profile*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-17]



شکل ۳: منطقه مورد هیدروگرافی بندر بوشهر



الف **ب** **ج**

شکل ۴: (الف) سامانه تعیین جهت، (ب) سامانه ناوبری و جمع‌آوری داده‌های عمق‌یابی، (ج) سامانه عمق یاب چندپرتوی *DRX*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-17]

برای طراحی خطوط عمق‌یابی، ناوبری، جمع‌آوری داده‌ها، پس‌پردازش اولیه و در نهایت پالایش داده‌ها از نرم‌افزار *Hypack* استفاده شد [۶]. لاین‌های هیدروگرافی در فواصل هر ۲۰ متر طراحی شدند. زاویه پرتو سامانه عمق‌یابی ۱۲۰ درجه بود، اما برای دستیابی به دقت‌های بالاتر، از بازه ۹۰ درجه آن برای پردازش‌ها و استخراج نتایج استفاده شد. داده‌های استخراج‌شده از نظر انطباق با استاندارد مرتبه ویژه سازمان بین‌المللی هیدروگرافی مورد ارزیابی قرار گرفتند [۷].

طراحی خطوط هیدروگرافی، ناوبری و جمع‌آوری داده‌های عمق‌یابی و پردازش داده‌ها توسط نرم‌افزار هیدروگرافی به همراه رایانه‌های صنعتی انجام شد. جدایی سنسورها به‌طور دقیق از طریق دستگاه توتال‌استیشن مشاهده و در نرم‌افزار هیدروگرافی برای اعمال تصحیحات لازم وارد شد. آبخور ترانسدیوسر نیز به‌طور مستقیم اندازه‌گیری و به عمق‌یاب اعمال شد. با انجام بارچک، نتایج مشاهدات عمق از نظر خطاهای سیستماتیک و سرعت صوت در نرم‌افزار هیدروگرافی مورد ارزیابی قرار گرفت. عملیات آزمون تصحیح خطاهای نصب سامانه چندپرتوی موسوم به «پچ تست[1]» نیز حداقل در سه دوره انجام شد و نتایج آن پیش از ویرایش داده‌های عمق‌یابی چندپرتوی به نرم‌افزار هیدروگرافی اعمال شد. برای ویرایش و پاک‌سازی داده‌های عمق‌یابی چندپرتوی از نرم‌افزار *HYSWEEP EDITOR* و *HYSWEEP CUBE* استفاده شد [۶]. در این پژوهش از داده‌های عمق‌یابی چندپرتوی کانال داخلی بندر بوشهر به طول ۶ کیلومتر برای ارزیابی دقت هیدروگرافی با استفاده از الگوریتم *CUBE* بهره گرفته شد. برای ارزیابی دقت داده‌های عمق‌یابی چندپرتوی، ابتدا در نرم‌افزار هیدروگرافی مقادیر عدم قطعیت انتشار کل *(TPU)*[2] برای تعیین عدم قطعیت‌های عمق، موقعیت و آشکارسازی عوارض، با توجه به دقت‌های قابل دستیابی سامانه چندپرتوی مورد استفاده آماده شد. با توجه به اینکه عمق کانال کمتر از ۱۵ متر بود، نتیجه این برآورد به‌منظور انطباق با استاندارد مرتبه ویژه[3] سازمان بین‌المللی هیدروگرافی مورد استفاده قرار گرفت.

۳- تئوری روش

در ادامه، به بررسی تئوری الگوریتم *CUBE*، چالش‌های پردازش داده‌های چندپرتوی و همچنین مدل خطا و مدل پایش می‌پردازیم.

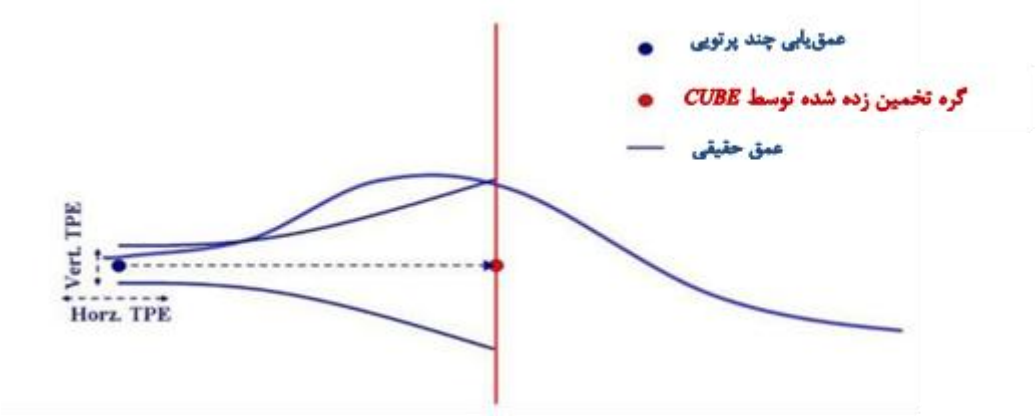
۳- ۱- الگوریتم *CUBE*

الگوریتم *CUBE* مجموعه‌ای از عمق‌های حقیقی[4] را بر روی یک شبکه از داده‌های تمیز نشده حاصل از نقشه‌برداری عمق‌یابی چندپرتوی برآورد می‌کند. این شبکه بصورت سلول‌های قابل تعریف ایجاد شده و برای هر سلول یک گره برآورد تشکیل می‌شود. در هر گره از این شبکه، یک تخمین از عمق حقیقی و واریانس پسینی[5] آن برآورد می‌گردد. این الگوریتم به‌منظور مقابله با نویز و داده‌های پرت از یک طرحواره پایشی استفاده می‌کند. در نهایت، هر گره توسط مجموعه‌ای از تخمین‌های ممکن عمق یا فرضیات، که هرکدام دارای تخمین عمق و واریانس پسینی خود هستند، معرفی می‌شود.

گره برآورد نماینده یک نقطه حقیقی در فضا با موقعیت مکانی مشخص است و تنها مؤلفه نامشخص آن، ارتفاع می‌باشد. ارتفاع گره برآورد با استفاده از اندازه‌گیری‌های عمق‌یابی چندپرتوی در اطراف گره تعیین می‌شود. این برآورد عمق به مرزهای سلول محدود نیست، بلکه برای تعیین ارتفاع هر گره، همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است، اعماق سامانهٔ چندپرتوی اطراف آن به گره برآورد انتشار می‌یابند. عدم قطعیت ارتفاع هر گره براساس قانون انتشار خطا تعیین می‌شود [۴].

[1] *Patch Test*
[2] *Total Propagated Uncertainty*
[3] *Special Order*
[4] *True Depths*
[5] *Posterior Variance*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-17]



شکل ۵: نحوه انتشار اعماق سامانه چند پرتویی به گره براورد شده

الگوریتم *CUBE* می‌تواند فرضیات جایگزین را برای عمق بستر دریا تولید کند. برای هر فرضیه، تعداد، قدرت و عدم قطعیت آن محاسبه و ارائه خواهد شد. این سه مورد نشان‌دهندهٔ میزان اعتبار هر فرضیه است. در نهایت *CUBE* سه عملکرد اصلی دارد: گوارد داده[1]، مداخله[2] و رفع ابهام[3].

گُوارد داده شامل ایجاد تخمین عمق و عدم قطعیت هر گره بصورت آماری، با استفاده از ساندینگ‌های ورودی و برآوردهای عدم قطعیت سه‌بعدی آن‌ها است. سه مرحله گوارد داده در *CUBE* عبارتند از: مداخله[4]، ابهام‌زدایی[5] و بازآرایی[6].

مداخله، تصمیمی برای قطع فرآیند گُوارد مستقیم است، زمانی که یک ساندینگ ورودی از نظر آماری با هیچ یک از تخمین‌های موجود در عمق گره سازگار نباشد. ابهام‌زدایی عبارتست از فرآیند تصمیم‌گیری اینکه کدام یک از فرضیه‌های متعدد در مورد عمق یک گره خاص (ابهام در عمق گره) بهترین تخمین از عمق «حقیقی» است. در *CUBE* الگوریتمی به نام «موتور ابهام‌زدایی» این تصمیم‌گیری را انجام می‌دهد.

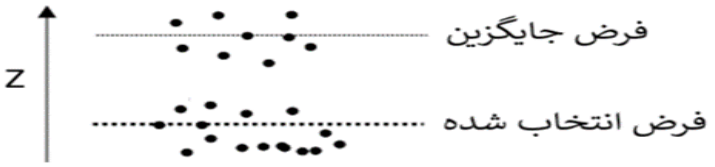
بازآرایی نیز برای تعیین اینکه کدام یک از ساندینگ‌های اطراف برای به‌روزرسانی تخمین عمق یک گره پذیرفته می‌شوند، تعریف می‌شود [۴]. پس از پردازش (گوارد) تمام داده‌های جمع‌آوری‌شده در هر گره، فرضیه‌ای که احتمال بیشتری دارد بر اساس یک معیار مناسب انتخاب می‌شود. هدف، تعیین عمق حقیقی با انتخاب فرضیه‌ای است که به نظر می‌رسد در مقایسه با دیگر فرضیه‌ها - برای مثال تعداد ساندینگ-هایی (عمق‌های اندازه‌گیری‌شده‌ای) که بر عمق حقیقی توافق دارند، نزدیکی به عمق‌های همسایه، یا سازگاری داده‌ها - محتمل‌تر است. بدین ترتیب، مجموعه‌ای از برآوردهای نقطه‌ای در ناحیه نقشه‌برداری ایجاد می‌شود که هر کدام به‌طور نظری بهترین برآورد قابل حمایت آماری از عمق در محل خود را نمایندگی می‌کنند. این برآوردهای نقطه‌ای سپس می‌توانند به توصیف رویه‌ای از ناحیه مربوط شوند که به راحتی قابل آزمایش و پردازش هستند. عمق‌های چندپرتوی بصورت تصادفی به گره برآوردشده انتشار می‌یابند. برای هر عمق، یک عدم قطعیت ارتفاعی کل در نظر گرفته می‌شود. عدم قطعیت عمق‌های نزدیک به گره نسبت به عمق‌های دورتر کمتر خواهند بود. عدم قطعیت بصورت مربعی افزایش می‌یابد. عمق‌های با عدم قطعیت کمتر (نزدیک‌تر) وزن بیشتری نسبت به عمق‌های با عدم قطعیت بیشتر (دورتر) در تعیین ارتفاع گره تخمین

[1] *Assimilation*
[2] *Intervention*
[3] *Disambiguation*
[4] *Reordering*
[5] *Scattering*
[6] *Gathering*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-17]

خواهند داشت [۴].

در الگوریتم *CUBE* کاربر ممکن است با تنوعی از انتخاب عمق‌های برآوردشده که بصورت فرض صفر و یا فرض‌های جایگزین، روبه‌رو باشد. این انتخاب می‌تواند طبق شکل (۶) توسط کاربر صورت گیرد. در حالت طبیعی بهتر است انتخاب را به عهدهٔ نرم‌افزار بسپاریم.



شکل ۶: فرض های *CUBE*

روش‌های استخراج به شرح زیر است [۴].

• اولویت[1]: محتمل‌ترین رُویه را بر اساس بالاترین تعداد ساندینگ‌های گُواردشده در هر فرضیه ایجاد می‌کند.

• تحقق‌پذیری[2]: ممکن است در فرآیند پردازش چندین فرضیه رقیب وجود داشته باشند. در این صورت، الگوریتم گره‌هایی را با کمترین مقادیر عدم قطعیت معرفی می‌کند. بسته به قضاوت کاربر مخّیر به انتخاب یکی از بهترین فرضیه‌ها می‌باشد.

• پسینی[3]: این روش با تحقق‌پذیری قابل مقایسه است، همچنین واریانس گره راهنما و تعداد ساندینگ-های گواردشده برای فرضیه فعلی را در نظر می‌گیرد.

۳-۱-۱- برآورد در یک نقطه

هدف اصلی *CUBE*، برآورد عمق‌ها در یک شبکه از گره‌ها در یک سیستم مختصات است. مکان یک گره به‌طور مطلق تعریف می‌شود، بنابراین گره نمایانگر یک نقطه حقیقی در فضا است. در نتیجه هر گره تنها معرف یک عمق است، زیرا در یک موقعیت نقطه‌ای تنها یک عمق از بستر دریا وجود دارد. بنابراین گره نیازی به معرفی عدم قطعیت افقی ندارد (مکان آن به‌طور دقیق شناخته شده است)، بلکه تنها عدم قطعیت قائم در عمق حقیقی در آن مکان مورد نظر است. هر عمق معرفی‌شده، تحت فرض صفر شناخته می‌شود. در صورت لزوم ممکن است الگوریتم فرض‌های جایگزین دیگری را هم برای عمق گره معرفی کند. نتیجه نهایی این است که تحت فرض صفر تمام ساندینگ‌ها در منطقه بدون اریبی [4] هستند (یعنی به‌طور میانگین، عمق حقیقی را گزارش می‌دهند). برآوردگر بهترین برآورد از عمق حقیقی را از مجموعه عمق‌های اطراف هر گره از منظر برآورد سری‌های زمانی بررسی می‌کند [۸].

۳-۲- چالش پردازش داده‌های چندپرتوی

در نقشه‌برداری هیدروگرافی بندر بوشهر، سامانه چندپرتوی ظرف ۳۵ ساعت بیش از ۳۵ میلیون داده عمق را جمع‌آوری کرد. پردازش سریع این داده‌ها با استفاده از روش‌های متعارف(دستی) بسیار دشوار است. الگوریتم *CUBE* قادر است داده‌های متراکم عمق‌یاب چندپرتوی را با تخمین‌های آماری، مورد پردازش قرار دهد. البته روش خودکار پردازش داده‌های چندپرتوی همچنین یک رویکرد عینی از این مسئله است. در این رابطه هر کارشناس ویرایش داده‌های عمق‌یابی، ممکن است با یک تصمیم ذهنی هر عمق منفرد را به عنوان "غیرقابل استفاده" حذف کند، که این امر بسیار زمان‌بر و خسته‌کننده به نظر می‌رسد و البته نگرانی‌هایی هم در رابطه با تضمین کنترل کیفیت[5] به همراه دارد.

[1] *Priority*
[2] *Likelihood*
[3] *Posterior*
[4] *Bias*
[5] *Quality Assurance*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-17]

صرف‌نظر از آموزش، تجربه و تعهد، این موضوع در نهایت به اشتباهاتی منجر خواهد شد که ممکن است غیرقابل پیگیری باشند [۹]. در روش *CUBE* داده‌هایی باید مورد بررسی قرار بگیرند که با معیارهای نرمال مطابقت ندارند. به این ترتیب، تعداد تصمیمات ذهنی که باید گرفته شود کاهش می‌یابد، خستگی و فرسودگی اپراتورها کاهش می‌یابد و پردازش داده‌ها سریع‌تر انجام می‌شود. در ضمن در روش خودکار ویرایش داده‌ها، کیفیت مؤلفه عمق‌ها در نقشه‌های هیدروگرافی مورد توجه قرار گیرند.

کالدر و همکاران معتقد هستند که هدف این الگوریتم پردازش تعیین عمق در منطقه نقشه‌برداری است، نه انتخاب عمق از میان ابرنقطه. لذا برای تعیین عمق حقیقی نیاز به پردازش‌های ریاضی و آماری دسته زیادی از اعماق اندازه‌گیری‌شده خواهیم داشت [۲].

برای رسیدن به این هدف می‌بایست با استفاده از ابزارهای آماری نقاط پرت را تشخیص دهیم. در این روش، برآورد عمق حقیقی با استفاده از پردازش خودکار، از مجموعه اطلاعات اعماق همسایه‌ها انجام می‌شود. همان‌طورکه می‌دانیم هر عمق اندازه‌گیری‌شده دارای خطایی است که از انتشار مجموعه خطاهای سامانه‌های مختلف عمق‌یابی چندپرتوی حاصل می‌شود. بنابراین، صحبت کردن از اندازه‌گیری عمق حقیقی، منطقی نیست. از طرف دیگر، همه اندازه‌گیری‌ها دارای مقداری خطا هستند و این خطا در سرتاسر ردیف اندازه‌گیری سامانه عمق‌یاب چندپرتوی[1] بین سامانه‌ها یا در تمام محیط‌های نقشه‌برداری یکسان نیست. اگر به این خطاها توجه نکنیم، ممکن است در مورد عمق یک ناحیه به دلیل نویز در سامانه عمق‌یاب چندپرتوی، در حسگرهای حرکتی یا در *GPS* دچار اشتباه شویم. درحال حاضر، ما با داده‌ها بر اساس تجربه و قضاوت خودمان برخورد می‌کنیم. بنابراین انتخاب عمق حقیقی از میان حجم داده‌های بزرگ، یک امر چالش‌برانگیز است. بنابراین تخمین عمق حقیقی از نظر آماری روش منطقی و ضروری است [۹].

۳-۳- مدل‌های خطا، انتشار اطلاعات و برآورد بهینه

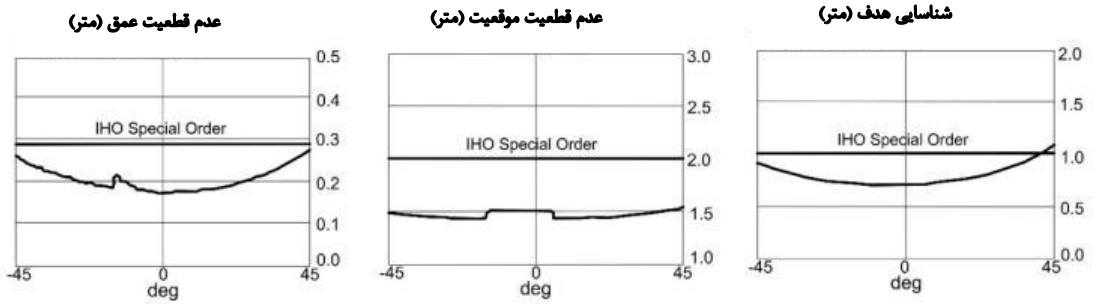
برآوردگر *CUBE* با یک برآورد کمی از خطاهای مرتبط با هر ساندینگ آغاز می‌شود. برای عمق هر گره، خطای افقی و عمودی پیش‌بینی‌شده با استفاده از مدل هیر و همکاران (۱۹۹۵) تعیین می‌شود؛ به‌طوریکه از انتشار آرگومان واریانس برای تبدیل خطاها در خود *MBES* و همچنین خطاهای حسگرهای جانبی آن (*IMU*)[2] به یک خطای پیش‌بینی‌شده برای هر ساندینگ استفاده می‌کند [۱۰]. کارکرد این مدل به دانستن بسیاری از ویژگی‌های سیستم‌های مورد استفاده مانند نرخ نمونه‌برداری، دقت اندازه‌گیری رفتار حرکتی شناور، پچ تست و غیره نیاز دارد. پیکربندی سامانه‌های موجود در هر شناور مختص همان شناور نقشه‌برداری است زیرا به فاصله‌های بین سنجشگرهای مختلف بستگی دارد. عدم قطعیت‌های معمول در یک سیستم *MBES* آب کم‌عمق یعنی *TPU* در شکل (۷) نشان داده شده است. این نمودارها عملکرد یک سیستم *MBES* را در یک قایق هیدروگرافی کوچک با استفاده از سامانه تعیین موقعیت *RTK* و یک سنجشگر حرکتی و سرعت صوت در آب را نشان می‌دهند.

مدل خطای *TPU* عملیات هیدروگرافی چندپرتوی، خطاهای اندازه‌گیری‌های بنیادی مورد نیاز الگوریتم *CUBE* را فراهم می‌کند. این خطاها در واقع خطا در مکان اسمی هر ساندینگ است که شامل هر دو مؤلفه افقی و قائم هستند. از آنجایی‌که این الگوریتم از مجموعه‌ای از گره‌های ثابت استفاده می‌کند که هیچ خطای افقی ندارند، بنابراین باید اطلاعات ضمنی در اندازه‌گیری‌ها را به هر مکان گره برآورد منتقل کرد. به همین دلیل خطاهای عمودی و افقی ترکیب می‌شوند.

[1] *Swath*

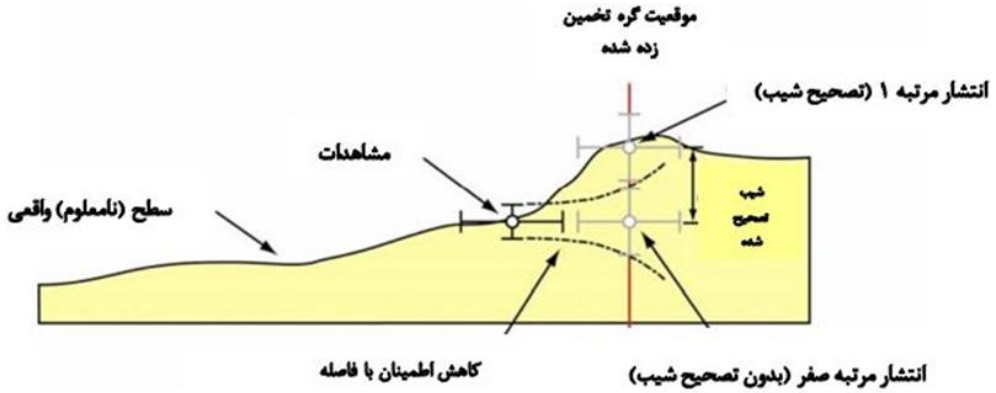
[2] *Inertial Motion Unit*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-17]



شکل ۷: عدم قطعیت سامانه چندپرتوی درعملیات هیدروگرافی بندر بوشهر

روش انتشار اطلاعات بر اساس مدلی بنا شده است که فرض می‌کند رویه محلی در بدترین حالت دارای شیب ثابتی است. البته در این مورد از ساندینگ‌هایی استفاده می‌شود که به اندازه کافی به گره نزدیک هستند (شکل(۸)). در این حالت عدم قطعیت هر ساندینگ به نسبت دوری از گره افزایش می‌یابد [۲].



شکل ۸: نحوه انتشار اطلاعات

برآورد در یک نقطه دلالت بر این دارد که ما باید عمق یا ساندینگ آن را که اساساً بصورت تصادفی رخ می‌دهد، بدانیم. بنابراین، اطلاعات به محل گره‌های برآوردشده انتشار می‌یابد و افزایش عدم قطعیت ساندینگ‌های دور از گره باید مدل‌سازی شوند. این کار با مقیاس‌بندی عدم قطعیت قائم ساندینگ‌ها با یک ضریب افزایشی مربعی فاصله انجام می‌شود. الگوریتم *CUBE* از یک برآوردگر بیزی[1] بهینه استفاده می‌کند که توسط یک مدل خطی پویا *(DLM)* [2] توصیف شده است [۲]. این تخمین‌زننده، علّی و بازگشتی است به‌طوریکه به محض ورود داده‌ها، می‌تواند پیش‌بینی‌ها را آغاز کند و تنها به تخمین داده‌های جاری برای گوارد نقطه داده بعدی نیاز دارد. این اساس پیاده‌سازی بلادرنگ *CUBE* است. هر ساندینگ معرفی‌شده در فرآیند پردازش با توجه به عدم قطعیت نسبت داده‌شده به آن، وزن‌دارخواهد شد [۲].

[1] *Bayesian*

[2] *Dynamic Linear Model*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-17]

۳-۴- مدل پایش و مداخله

در *CUBE*، مدل بصورت صریح طوری تنظیم می‌شود که عمق را ثابت نشان دهد. در عمل مشاهده می‌شود که بسیاری از ساندینگ‌ها با این فرضیه سازگار نیستند. در واقع، نقاط پرت[1] این فرضیه را نقض می‌کنند. لذا وجود عمق‌های جایگزین چندگانه در همان مکان ارائه می‌شوند. انتخاب فرضیه‌های جایگزین درست به روند بهبود مدل کمک می‌کند [۴].

۳-۴-۱- حل فرضیه

اجازه دادن به چندین فرضیه استحکام مدل را فراهم می‌کند، اما همچنان درباره اینکه کدام عمق باید معرفی شود ابهام وجود دارد. *CUBE* یک موتور بدون ابهام قابل پیکربندی را پیاده‌سازی می‌کند تا به‌طور درخواستی «بهترین» فرضیه را با استفاده از معیارهای از پیش تعیین‌شده برای آنچه که بازسازی «بهترین» محسوب می‌شود، انتخاب کند. ساده‌ترین روش، فرضیه‌ای را انتخاب می‌کند که بیشترین نقاط داده را گوارد کرده است (یعنی، فرضیه‌ای که بهترین پشتیبانی از داده‌ها را دارد). این روش در اکثر موارد کار می‌کند. از آنجایی‌که هیچ اطلاعاتی جز داده نقاط وجود ندارد، در شرایط نویز قابل توجه، این مدل چندان کارایی ندارد. روش دیگر، گره همسایه‌هایی که تنها دارای یک فرضیه هستند را پیدا می‌کند و از این بازسازی قطعی به عنوان راهنما برای عمق درست محتمل استفاده می‌کند. سپس، فرضیه نزدیکترین عمق به عمق گره راهنما برای بازسازی استفاده می‌شود [۴].

برای تهیه نقشه‌های عمق‌یابی با استفاده از داده‌های چندپرتوی از دو روش ویرایش دستی *HYSWEEP EDITOR*و ویراش اتوماتیک با الگوریتم *CUBE* استفاده کردیم و نتایج دو ویرایش با هم مقایسه شدند. یکی از روش‌های پاکسازی نویزها در داده‌های جمع‌آوری شده از عمق‌یاب چندپرتوی، مدل *CUBE* *HYSWEEP* در نرم افزار هیدروگرافی است [۶].

نتایج نشان می‌دهند که اختلاف معنی‌داری بین دو روش وجود نداشت.

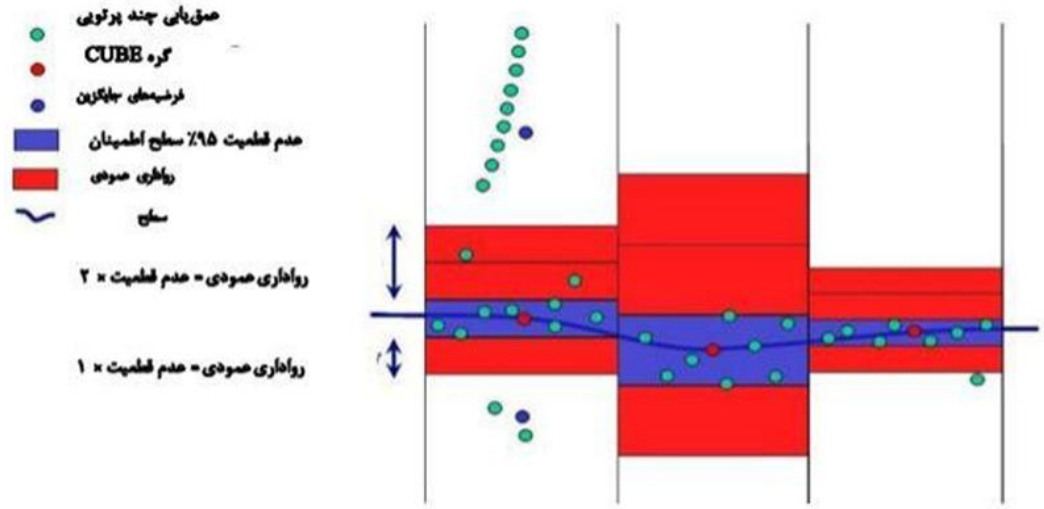
با توجه به مقیاس نقشه‌های مورد نیاز، شبکه‌ایی منظم از اعماق در فواصل معین از همه داده‌ها درنظر گرفته می‌شود. در این مقاله، از سلول‌های ۵×۵ متر استفاده شد. علت انتخاب ابعاد سلول این است که مقیاس نقشه‌های تهیه‌شده ۱:۱۰۰۰ هستند. به همین جهت لازم است که در هر ۵ میلی‌متر یک داده عمق داشته باشیم. در واقع این مقدار، یک انتخاب معمول است.

این روش برای داده‌های با حجم بسیار بزرگ از عمق‌یابی چندپرتوی بسیار کارآمد و سریع می‌باشد. در ضمن می‌توان عدم قطعیت و دقت عمق‌یابی از ابرداده‌ها را مورد ارزیابی قرار داد. هر سلول نماینده یک عمق است که عدم قطعیت آن (۹۵٪ سطح اطمینان) محاسبه خواهد شد. این عدم قطعیت به عنوان رواداری قائم استفاده خواهد شد. داده‌های تمام نقاط که خارج از این رواداری قرار دارند، غیرفعال خواهند شد. کاربر می‌تواند تعداد رواداری‌های قائم در بالا و پایین رویه *CUBE* یافته شده و همچنین اندازه سلول الگوریتم *CUBE* و روش استخراج را تنظیم کند. این روش پاک‌سازی برای حذف اشتباهات و نویزهای تصادفی بسیار مؤثر است. اگرچه برای اینکه این روش پاک‌سازی کار کند، اهمیت دارد که خطای کل انتشار یافته هر اندازه‌گیری منفرد درست برآورد شده باشد. در اغلب موارد اصطلاحات *TPE* و *TPU* یکسان در نظر گرفته می‌شوند. نمونه‌ای از روش پاک‌سازی داده‌ها با استفاده از مدل *CUBE* در شکل (۹) نشان داده شده است [۴].

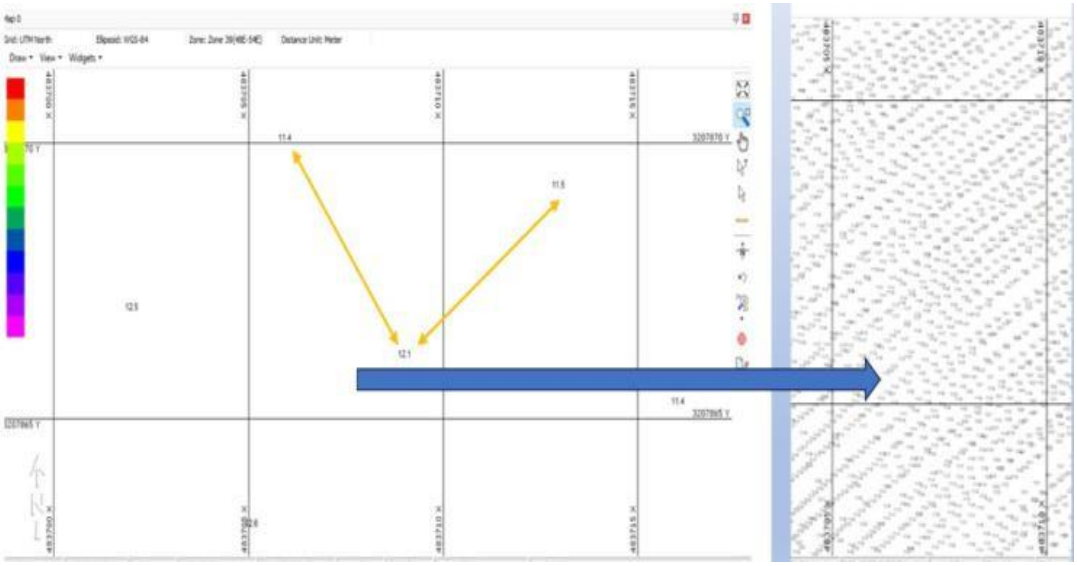
بخشی از ناحیه اندازه‌گیری‌شده با تمام اعماق اندازه‌گیری‌شده و عمق‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم *CUBE* در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

[1] *Outlier*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-17]



شکل ۹: روش پاکسازی داده‌ها با استفاده از رواداری قائم



شکل ۱۰: نمای برش از بستر دریا قبل از پاک‌سازی داده‌ها

۴- پردازش‌ها و نتایج

در ادامه محصولات خروجی و نتایج هریک به تفکیک تشریح شده است:

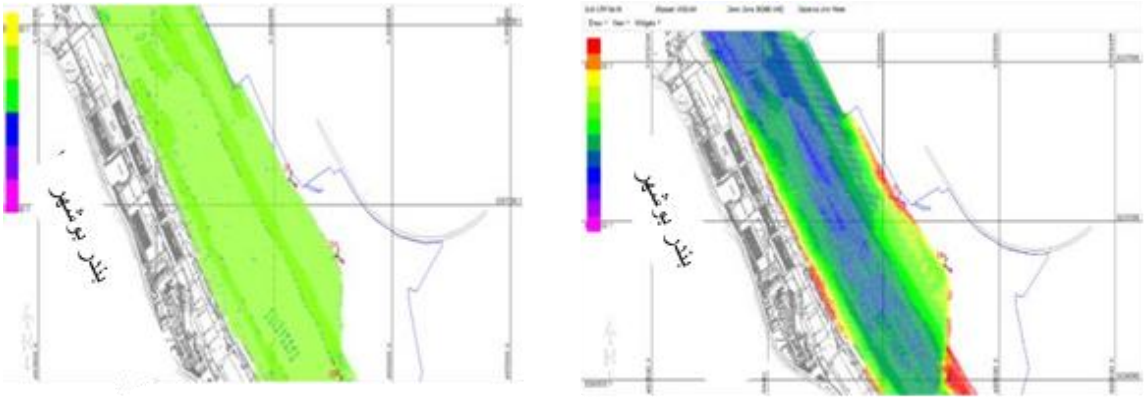
۴-۱- محصولات خروجی

علاوه‌بر عمق، *CUBE* قادر است پارامترهای عددی دیگری را نیز ارائه دهد، به ویژه عدم قطعیت مرتبط با عمق برآوردشده، تعداد فرضیات موجود در گره و مقادیری که نشان می‌دهد الگوریتم چقدر در مورد انتخاب فرضیه‌ای که ساخته شده است، مطمئن است. پارامتر نسبت[1] معیاری است که نشان می‌دهد تخمین انتخابی عمق تا چه حد دقیق است. در نرم‌افزارهای هیدروگرافی هر یک از اینها یک مقدار عددی هستند و

[1] *Ratio*

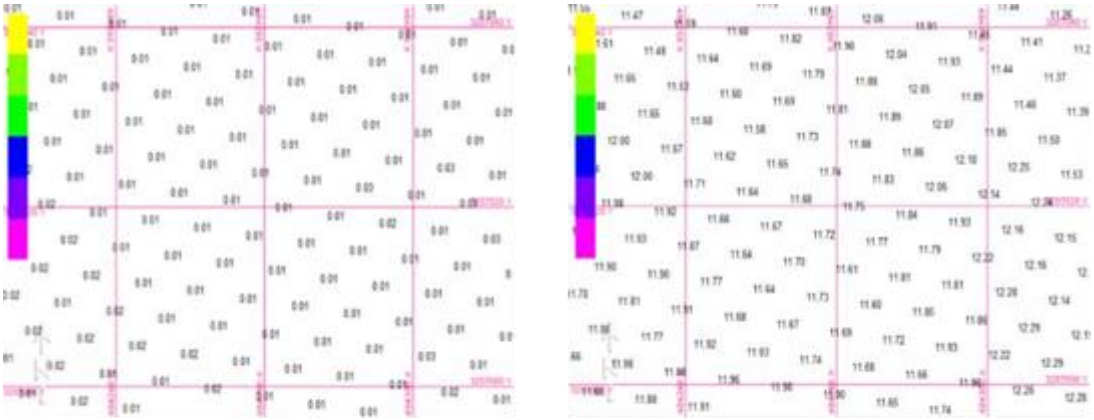
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-17]

بنابراین می‌توانند به‌عنوان یک رویه نمایش داده شوند. خروجی‌های پردازش *CUBE* در نتیجه یک مجموعه از بردارهای داده برای هر گره است. طبیعی است که این مقادیر را می‌توان به عنوان رویه‌های جداگانه نمایش داد و بصورت بصری نسبت به کیفیت داده‌ها قضاوت کرد. در شکل (۱۱) و شکل (۱۲) رویه عمق‌های برآورد شده و عدم قطعیت گره‌های انتخابی نشان داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که تعداد بسیار اندکی از گره‌ها نتوانستند نیاز استاندارد ویژه را برآورده کنند، لذا فاصله خالی (گپ) در نتایج مشاهده نمی‌شود.



الف ب

شکل ۱۱: (الف) رُویه اعماق، (ب) عدم قطعیت گره‌ها



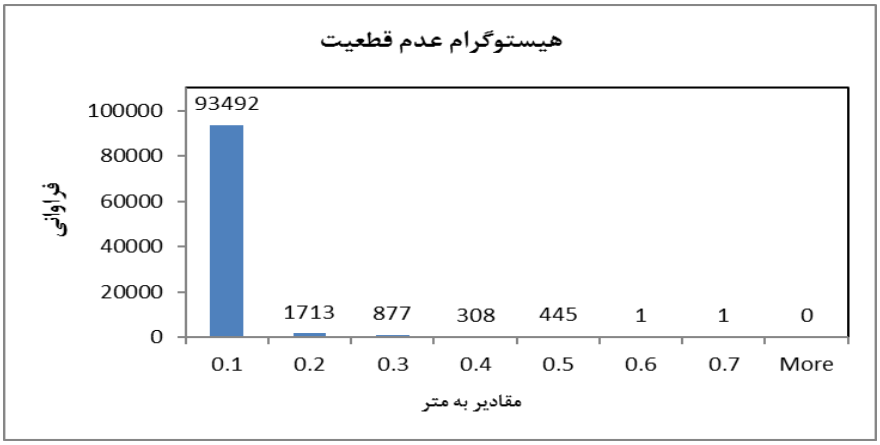
الف ب

شکل ۱۲: (الف) مقادیر عددی عمق، (ب) عدم قطعیت متناظر در گره‌ها

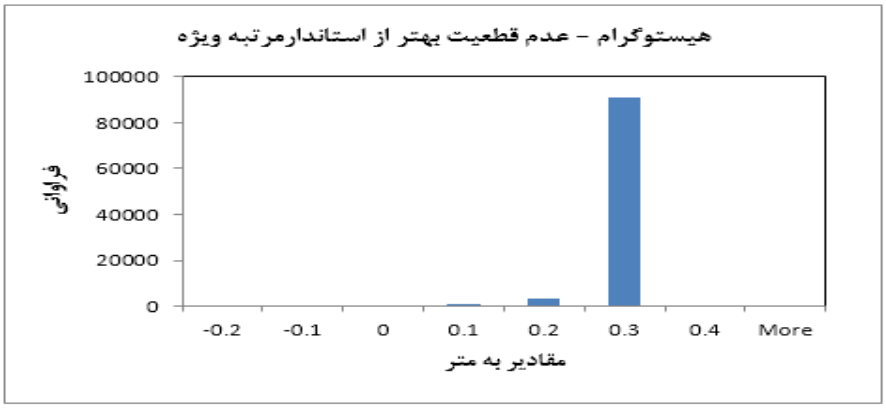
۴-۲- نتایج

پس از انجام حداقلی از ویرایش دستی داده‌های عمق، الگوریتم *CUBE* با استفاده از مقادیر انتشار کل خطاها، به تعداد ۹۶۸۳۶ عمق در هر واحد سلول به همراه مقادیر عدم قطعیت و نسبت استخراج شد. به‌طوریکه به تعداد ۹۵۷۵۴ یعنی ۹۸٫۸۸ ٪ آن از آزمون استاندارد ویژه سازمان بین‌المللی فراتر رفته است. تنها ۱٫۱۲٪ خارج از دامنه مورد قبول قرار گرفتند. نتایج در جدول(۱) و شکل (۱۳) الی شکل (۱۷) آمده‌اند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-17]



شکل ۱۳: هیستوگرام فراوانی اعماق قابل قبول در دامنه استاندارد ویژه از پردازش *CUBE*



شکل ۱۴: هیستوگرام فراوانی دامنه عدم قطعیت در بازه‌های متفاوت حاصل از پردازش *CUBE*

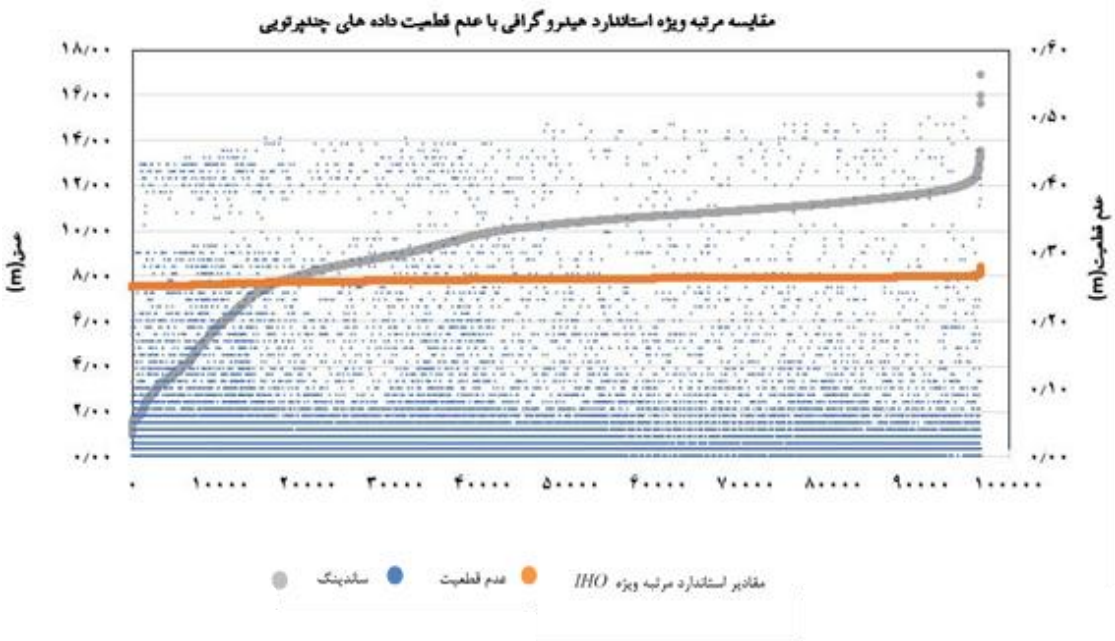
شکل ۱۵: مقادیر قابل قبول اعماق به درصد نسبت به موارد پرت، حاصل از پردازش *CUBE*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-17]

از طرف دیگر، رابطه عمق و مقدار عدم قطعیت از رابطه(۱) به‌دست می‌آید، به‌طوریکه d برابر با عمق می‌باشد و مقادیر a و b به صورت مقادیر درج شده است [۱۱].

رابطه(۱)

$$a=0.25$$
$$b=0.0075$$
$$TVU=\sqrt{a^2+(b\times d)^2}$$



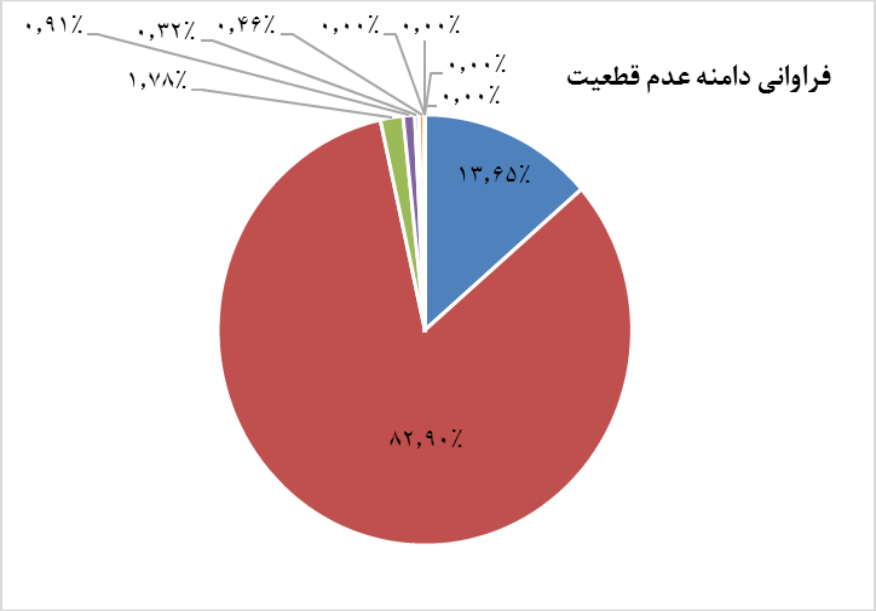
شکل ۱۶: مقایسه عدم قطعیت اعماق حاصل از پردازش *CUBE* با مقادیر استاندارد مرتبه ویژه

از نتایج جدول (۱) مشاهده می‌شود که فراوانی عدم قطعیت حاصل از پردازش بهتر از ۲۰ سانتی‌متر و ۱۰ سانتی‌متر بترتیب ٪۹۸٫۳۱ و ٪۹۶٫۵۵ برآورد شده است. نمودار نتایج نیز در شکل (۱۷) نشان داده شد.

جدول ۱: مقادیر فراوانی دامنه عدم قطعیت

سلول (متر)	فراوانی	درصد	جمع
۰	۱۳۲۱۶	٪۱۳٫۶۵	
۰٫۱	۸۰۲۷۳	٪۸۲٫۹۰	
۰٫۲	۱۷۱۳	٪۱٫۷۵۵	٪۹۸٫۳۱
۰٫۳	۸۷۷	٪۰٫۹۱	
۰٫۴	۳۰۸	٪۰٫۳۲	
۰٫۵	۴۴۶	٪.۴۶	
۰٫۶	۱	٪۰٫۰۰	
۰٫۷	۱	٪۰٫۰۰	
۰٫۸	۰	٪۰٫۰۰	
بیشتر	۰	٪۰٫۰۰	٪۱٫۶۹

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-17]



شکل ۱۷: فراوانی دامنه عدم قطعیت به درصد در بازه‌های متفاوت حاصل از پردازش *CUBE*

داده‌های عدم قطعیت نشان می‌دهند که در حدود ۹۱۰۸۴ عمق نسبت به تعداد کل (۹۶۸۳۶) یعنی بیش از ٪۹۴ دارای عدم قطعیتی بهتر از ۱۰ سانتی‌متر هستند (شکل (۱۷)). برای مقایسه خروجی *CUBE* با زنجیره پردازش هیدروگرافی متعارف، ساندینگ‌های اولیهٔ انتخاب‌شده برای نقشه‌برداری با سطح *CUBE* مطابقت داده شد. برای این منظور دو رویه حاصل از ساندینگ‌های دو روش پردازش متعارف و *CUBE* را با هم مقایسه کردیم. اختلافات این دو رویه بصورت شسته‌شده (*cut*) و پرشده (*fill*) در سرتاسر نواحی مشترک مورد ارزیابی قرار گرفتند. میانگین اختلافات در حد ۳ سانتی‌متر برآورد شد (جدول (۲)).

نتایج نشان داد که سطح *CUBE* به‌خوبی با رویکرد انتخابی سنتی ساندینگ‌ها در این مورد مطابقت دارد. اُریبی جزئی احتمالاً به دلیل ترکیبی از اثر محدود بودن اعداد نمونه ساندینگ‌ها و رویکرد سنتی انتخاب ساندینگ‌های مناطق کم عمق است.

جدول ۲: تفاوت رُویه‌ها در دو روش پردازش متعارف و *CUBE*

مساحت کل	اختلاف حجم	پرشده	شسته‌شده
dS=۱۹۵۹۰۴۹ (m^2)	dV=۶۶۳۰۰ (m^3)	V=۱۲۴۰۶۸ (m^3)	V=۱۹۰۳۶۸ (m^3)
میانگین اختلاف ←	۰٫۰۳ (cm)	۰٫۰۶ (cm)	۰٫۱۰ (cm)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-17]

۵- نتیجه‌گیری

پردازش سریع و خودکار داده‌های چندپرتوی با الگوریتم‌های ریاضی و آماری بطور چشمگیری رشد کرده است. این روش‌های سریع، هم دقت و هم وضوح کافی برای تهیه نقشه از نواحی بزرگ را به‌دست می‌دهند. در این مقاله روش‌های آماری پردازش داده‌های بندر بوشهر مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند و نشان داده شد که روش *CUBE* یک راه‌حل معتبر در زمینه پردازش اتوماتیک نتایج هیدروگرافی‌های چندپرتوی می‌باشد. این روش سعی می‌کند با تمرکز بر تخمین عمق «حقیقی (*True*) » ، به جای انتخاب «بهترین (*Best*) » ، اکثر ساندینگ‌ها را به‌طور خودکار مدیریت کند. همچنین برآوردهای کمی کیفیت داده‌های تخمینی را نیز بصورت مقادیر عدم قطعیت با توجه به معیارهای دستورالعمل سازمان بین‌المللی هیدروگرافی به‌دست می‌دهد. روش ارائه‌شده به عنوان یک روش جهانی برای استفاده در نرم‌افزارهای هیدروگرافی موجود در بازار است که بر اساس تنظیم پارامترهای مشخصات عمق‌یاب چندپرتوی، محیطی و سنسورهای جانبی برای پاک‌سازی داده‌ها بکار می‌رود. تنظیم پارامترها، به‌ویژه رواداری قائم (عدم‌قطعیت)، امکان دستیابی به نتایج بهتر را به عنوان یک مصالحه بین کاهش تعداد نقاط نادرست و کاهش اعوجاج رویه بستر دریا با حداکثر کردن تعداد نقاط معتبر فراهم می‌کند. همچنین مشاهده شد که الگوریتم *CUBE* برای سامانه‌های هیدروگرافی چندپرتوی کارآمد است و می‌تواند اکثر داده‌ها را به‌طور خودکار مدیریت کند. این الگوریتم همچنین به اندازه کافی سریع است تا بتواند با نقشه‌برداری با نرخ‌های جمع‌آوری بزرگ و یا داده‌های بزرگ را پردازش نماید. تخمین‌های داده‌های عمق حاصل از نتایج این الگوریتم از طریق مقادیر "عدم قطعیت" می‌توانند با معیارهای دستورالعمل‌های هیدروگرافی مورد ارزیابی قرار بگیرند. نتایج هیدروگرافی بندر بوشهر نشان داد که بیش از ۹۸ درصد داده‌ها در دامنه معیار مرتبه ویژه سازمان بین‌الملل هیدروگرافی قرار دارند. همچنین نتایج الگوریتم *CUBE* با روش‌های متعارف پردازش داده‌های عمق‌یابی چندپرتوی سازگار هستند.

در پایان پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی در کنار این نوع پردازش، نسبت به کاربرد یادگیری ماشین در حذف نویز داده‌های عمق چندپرتوی مبتنی بر هوش مصنوعی مورد تحقیق قرار گیرد.

مراجع

[1] A. Makar, "Cleaning of MBES Data Using CUBE Algorithm," Polish Naval Academy, Gdynia, Poland, 2017.

[2] B. R. Calder and L. A. Mayer, "Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data," Geochemistry, Geophysics, Geosystems, vol. 4, no. 6, 2003, doi: https://doi.org/10.1029/2002GC000486.

[3] L. A. M. de Oliveira Junior and C. D. R. I. King Jeck, "Multibeam Processing for Nautical Charts (Using CUBE and "Surface Filter" to enhance multibeam processing)," The International Hydrographic Review, no. 2, 11/11 2009. [Online]. Available: https://journals.lib.unb.ca/index.php/ihr/article/view/20840.

[4] B. Calder and D. Wells, "CUBE user's manual, Center for Coastal and Ocean Mapping,"UNH Joint Hydrographic Center, University of New Hampshire, 2007.

[5] M. E. Vásquez, S. Nichols, and J. Clarke, "Tuning the CARIS implementation of CUBE for Patagonian Waters," Master's Thesis, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, 2007.

[6] "HYPACK User Manual," 2018. [Online]. Available: www.hypack.com

[7] International Hydrographic Organization, " IHO Standards for Hydrographic

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-17]

Surveys, Edition 6.1.0.," International Hydrographic Organization, Monaco, 2022. [Online]. Available: https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-44/S-44_Edition_6.1.0 .pdf

[8] B. Calder, "Automatic Statistical Processing of Multibeam Echosounder Data," vol. 4, 01/01 2003.

[9] S. M. Smith, L. Alexander, and A. A. Armstrong, "The Navigation Surface: A New Database Approach to Creating Multiple Products from High-density Surveys," The International Hydrographic Review, vol. 3, no. 2, 06/18 2002. [Online]. Available: https://journals.lib.unb.ca/index.php/ihr/article/view/20584.

[10] R. Hare, A. Godin, and L. Mayer, "Accuracy estimation of Canadian swath (multibeam) and sweep (multitransducer) sounding systems," Canadian Hydrographic Service Internal Report, 1995.

[11] "HYPACK User Manual," 2022. [Online]. Available: www.hypack.com

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-17]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.13, No.4, Winter 2026

Research Paper

Evaluating Multi Beam Sonar Echo Sounder Hydrography Accuracy with CUBE Algorithm- Case Study: Access Channel of Bushehr Port

Negar Zahedi [1]*, Naser Pasandeh [2], Ali Kouroshnia [3], Seyed Mojtaba Zarei [4], Bahman Tajfirooz [5], Seyed Shahed Mosavat [6]

1- M. Sc in Remote Sensing, Darya-Tarsim Consulting Engineers
2- PhD in Management, Ports and Marititime Organization
3- PhD in Maritime Affairs, Ports and Marititime Organization
4- M. Sc in Marine Science, Ports and Marititime Organization
5- PhD in Physical Oceanography, Darya-Tarsim Consulting Engineers
6- PhD Student in RS-GIS, Darya-Tarsim Consulting Engineers

Abstract

Modern hydrographic surveying relies on Multi Beam Echo Sounder (MBES) systems and high-precision positioning methods. However, the raw data often contain erroneous points (noise and outliers) that must be cleaned before use. The CUBE algorithm (Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator) is a fast and statistical method for gridding dense MBES data and identifying these incorrect points.

This study evaluates the accuracy of multibeam hydrographic data in the access channel of Bushehr Port using the CUBE algorithm. Field data were collected with a vessel equipped with an MBES system and processed using HYPACK software. The output of the CUBE algorithm was analyzed and compared with the results obtained from the conventional (manual) processing methods.

The results showed that 98.88% of the depths estimated by CUBE met the requirements of the International Hydrographic Organization's Special-Order standards. In addition, more than 94% of the data had a Total Vertical Uncertainty (TVU) better than 10 centimeters. A comparison of the surfaces generated by the two methods showed an average difference of about 3 centimeters, indicating acceptable agreement between them.

This study confirms the effectiveness of the CUBE algorithm as a powerful, fast, and reliable tool for automated processing of multibeam hydrographic data in shallow coastal environments.

Key words: *Bushehr Port, multibeam bathymetry, filtering, cleaning, uncertainty, CUBE algorithm.*

Correspondence Address: *Darya-Tarsim Consulting Engineers, Tehran, Iran.*
Tel : *+982166914283*
Email : *neagrzahedi545@gmail.com*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-17]