

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

نگار زاهدی^{۱*}، نادر پسند^۲، علی کوروش نیا^۳، سید مجتبی زارعی^۴، بهمن تاج فیروز^۵، سیدشاهد مساوات^۶

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

۶- دانشجوی دکتری RS-GIS، مهندسين 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 مهندسين مشاور دریا ترسیم، واحد ۲، پلاک ۶۵، خیابان خوش شمالی، تهران، ایران.

تلفن: ۰۲۱۶۶۹۱۴۲۸۳

۱- مقدمه

نقشه برداری هیدروگرافی با استفاده از عمق یاب چندپرتوی (MBES)^۱ یک عملیات هیدروگرافی پیشرفته است که ناوبری دریایی را با ژئودزی مرتبط می کند. دینامیک اندازه گیری ها (اختلال حرکتی هر اندازه گیری) و محیط آب دریا که انتشار امواج صوتی را تحت تأثیر قرار می دهد، باعث بروز خطاهای جدی در ثبت داده های مکانی می شود [۱]. از این رو، پردازش داده های عمق یاب چندپرتوی از دیدگاه های هیدروگرافی و فناوری، کاری چالش برانگیز است [۲]. در گذشته، تمرکز اصلی بر بهبود روش ها و فناوری های جمع آوری داده ها بوده است، در حالی که به توسعه روش های نوین پردازش داده ها توجه کمتری شده بود. اما اکنون با وضعیتی مواجه هستیم که داده ها را بسیار سریع تر از آنچه که تصور می شد می توان به راحتی جمع آوری و پردازش کرد. بنابراین، پردازش داده های چندپرتوی نسبت به داده های تک پرتوی پیچیده تر و زمانبرتر است. یکی از مراحل اصلی این فرآیند، پاک سازی و حذف داده های ناخواسته و نویز است. این داده ها خارج از دامنه و رواداری مشخص قرار دارند. به طور معمول، حذف داده های چندپرتوی در فرایند ویرایش به کاهش تعداد نقاط تشکیل دهنده مدل رقومی سطح زمین (DTM)^۲ و دشوارتر شدن ارزیابی داده ها منجر می شود [۱].

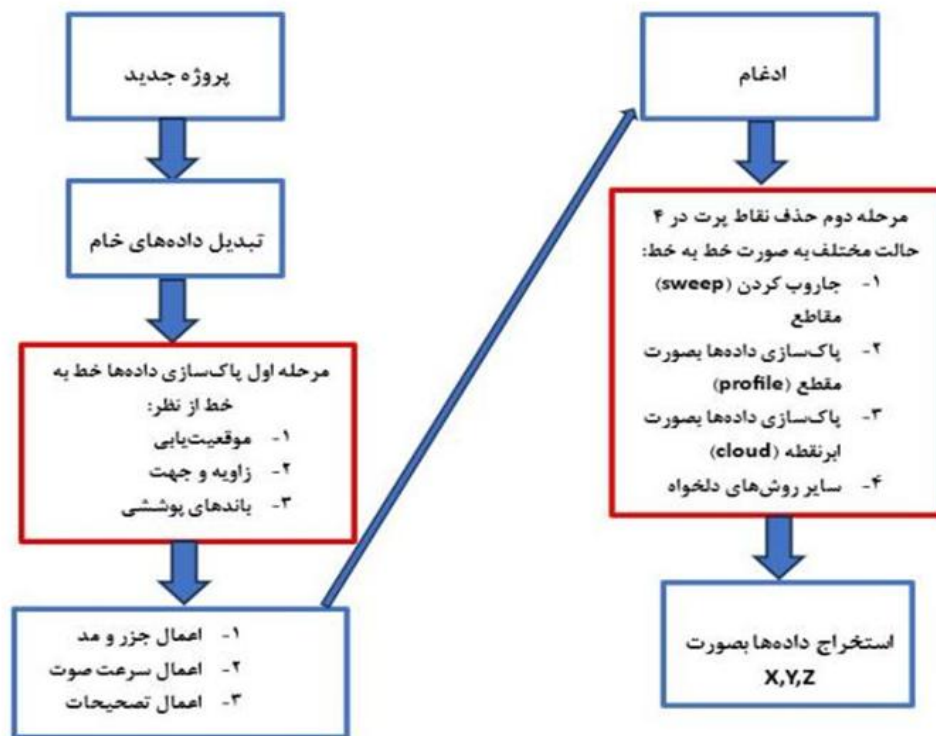
در روش های مرسوم دستی، که روندنمای آن در شکل (۱) نشان داده شده است، پاک سازی داده ها در دو مرحله انجام می شود. در مرحله نخست، داده ها بصورت خط به خط و با استفاده از ابزارهای مربوط به موقعیت مکانی^۳، زاویه و جهت^۴ و باندهای پوششی پاک سازی می شوند. پس از ادغام تصحیحات، در مرحله دوم، هر

مقطع بصورت جداگانه^۵ مورد ویرایش قرار می گیرد [۳]. در نهایت پس از ویرایش نهایی، از داده ها میتوان به فرمت مناسب خروجی گرفت.

در کل می توان گفت که انجام این دو مرحله برای پاک سازی داده های چندپرتوی در هنگام پردازش آن ها بسیار زمان بر است. با توجه به اینکه این روش ها به تجربه و سلیقه هیدروگراف بسیار وابسته هستند، نتایج نهایی دو نفر می تواند با یکدیگر متفاوت باشد. همچنین تغییر بزرگ نمایی^۶ یا سرعت انجام کار نیز در نتیجه نهایی بسیار تأثیرگذار است. پاک سازی مرحله اول، قدیمی ترین روش و مشابه ابزارهای پردازش داده های تک پرتوی است. مرحله دوم پاک سازی پیشرفته تر است و امکان مقایسه خطوط مجاور را نیز دارد [۳].

به منظور کاهش این محدودیت ها، روش های خودکار و نیمه خودکار مختلفی معرفی شده اند که یکی از مهم ترین آن ها الگوریتم برآوردگر ترکیبی عدم قطعیت و عمق یابی (CUBE)^۸ 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 پاک سازی داده های مکانی استفاده می کند. این الگوریتم براساس تحقیقات انجام شده در دانشگاه نیوهمپشایر^۹ توسط آقای برایان کالدر^{۱۰} و همکاران (۲۰۰۷)، برای پاسخ گویی به نیاز مؤسسات و ادارات هیدروگرافی در زمینه الگوریتم های عمومی و اختصاصی عمق یاب چندپرتوی توسعه یافته است [۴]. علاقه مندان برای مطالعه بیشتر چگونگی عملکرد CUBE و مشاهده روابط و مدل های ریاضی این روش می توانند به مقاله کالدر و همکاران (۲۰۰۷) مراجعه کنند [۴].

^۶ Subset editor^۷ Zoom^۸ Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator^۹ University of New Hampshire^{۱۰} Brian R. Calder^۱ Multi Beam Echo Sounder^۲ Digital Terrain Model^۳ Navigation editors^۴ Attitude editors^۵ Swath editors



شکل ۱: روندنمای پردازش داده‌های چند پرتوی به روش دستی

که از مقادیر خطای انتشار کل (TPE)^۱ 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 به کار می‌رود، می‌توان به انتخاب بهترین نقطه ارتفاعی (عمق) و ارزیابی دقت از طریق برآورد عدم قطعیت ارتفاعی کل (TVU)^۲ در یک گره^۳ 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)^۴ نیست [۱].

¹ Total Propagated Error

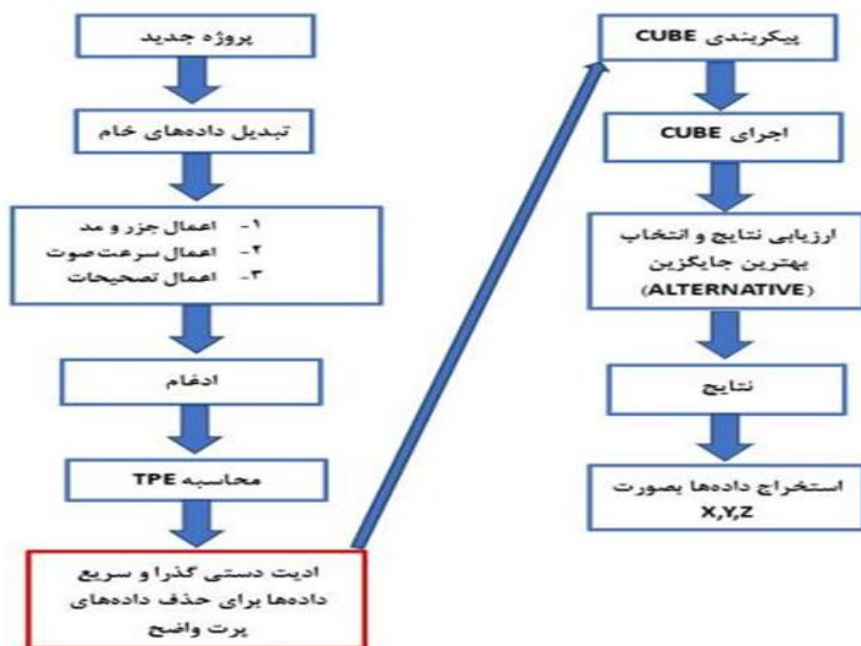
² Total Vertical Uncertainty

³ Node

⁴ Total Horizontal Uncertainty

در این جا، 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



شکل ۲: روندنمای پردازش داده‌های چند پرتوی به روش CUBE

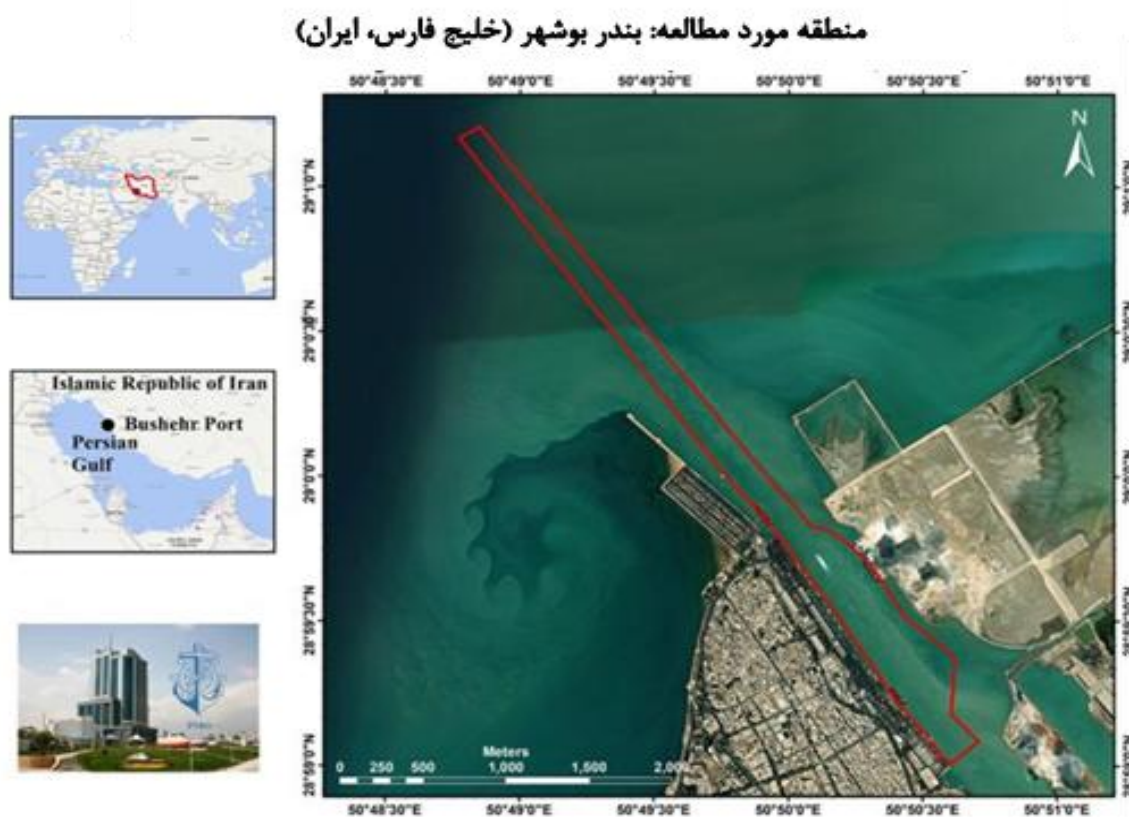
۲- نقشه‌برداری هیدروگرافی و جمع‌آوری داده‌ها

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*)^۱ مدل *Odom-Digibar Poro* بود (شکل (۴)).

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، می‌باشد [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.

^۱ Sound Velocity Profile



شکل ۳: منطقه مورد هیدروگرافی بندر بوشهر



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

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^۳ 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^۴ 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^۵ 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 هر کدام 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 سامانه چندپرتوی اطراف آن به گره برآورد انتشار می‌یابند. عدم قطعیت ارتفاع هر گره براساس قانون انتشار خطا تعیین می‌شود [۴].

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»^۱ 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*)^۲ برای تعیین عدم قطعیت‌های عمق، موقعیت و آشکارسازی عوارض،

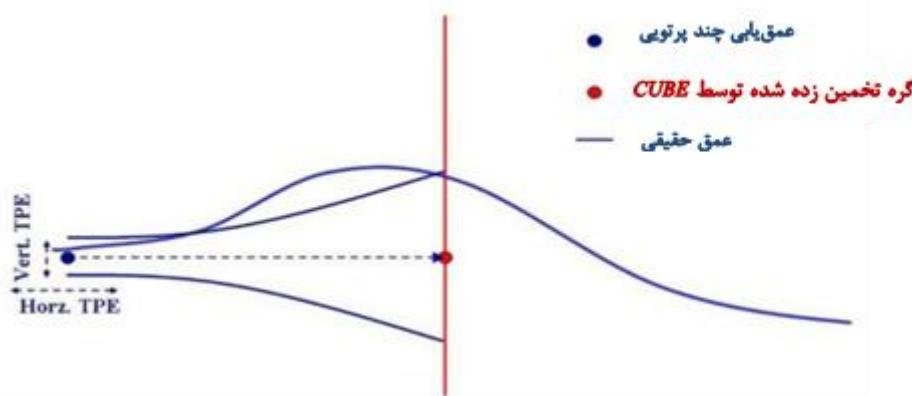
^۳ Special Order

^۴ True Depths

^۵ Posterior Variance

^۱ Patch Test

^۲ Total Propagated Uncertainty



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

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 ساندینگ‌هایی (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

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 نشان‌دهنده میزان اعتبار هر فرضیه است. در نهایت *CUBE* سه عملکرد اصلی دارد: گوارد داده^۱، مداخله^۲ و رفع ابهام^۳.

گوارد 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^۴، ابهام‌زدایی^۵ و بازآرایی^۶.

مداخله، تصمیمی برای قطع فرآیند گوارد 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.

¹ Assimilation

² Intervention

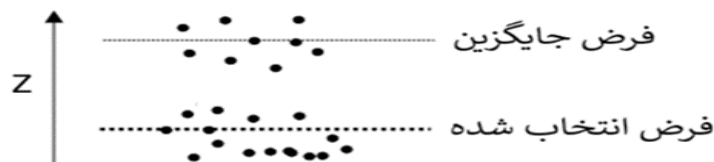
³ Disambiguation

⁴ Reordering

⁵ Scattering

⁶ Gathering

فرض‌های جایگزین، روبه‌رو باشد. این انتخاب می‌تواند طبق شکل (۶) توسط کاربر صورت گیرد. در حالت طبیعی بهتر است انتخاب را به عهده نرم‌افزار بسپاریم.



شکل ۶: فرض‌های CUBE

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^۴ 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^۵ به همراه دارد.

خواهند داشت [۴].
در الگوریتم CUBE کاربر ممکن است با تنوعی از انتخاب عمق‌های برآوردشده که بصورت فرض صفر و یا

روش‌های استخراج به شرح زیر است [۴].
• اولویت^۱: محتمل‌ترین رُویه را بر اساس بالاترین تعداد ساندینگ‌های گواردشده در هر فرضیه ایجاد می‌کند.
• تحقق‌پذیری^۲: 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 مخیر به انتخاب یکی از بهترین فرضیه‌ها می‌باشد.
• پسینی^۳: این روش با تحقق‌پذیری قابل مقایسه است، همچنین واریانس گره راهنما و تعداد ساندینگ‌های 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

¹ Priority

² Likelihood

³ Posterior

⁴ Bias

⁵ Quality Assurance

چالش برانگیز است. بنابراین تخمین عمق حقیقی از نظر آماری روش منطقی و ضروری است [۹].

۳-۳- مدل های خطا، انتشار اطلاعات و برآورد بهینه

برآوردگر *CUBE* با یک برآورد کمی از خطاهای مرتبط با هر ساندینگ آغاز می شود. برای عمق هر گره، خطای افقی و عمودی پیش بینی شده با استفاده از مدل هیر و همکاران (۱۹۹۵) تعیین می شود؛ به طوریکه از انتشار آرگومان واریانس برای تبدیل خطاها در خود *MBES* و همچنین خطاهای حسگرهای جانبی آن (*IMU*)^۲ به یک خطای پیش بینی شده برای هر ساندینگ استفاده می کند [۱۰]. کارکرد این مدل به دانستن بسیاری از ویژگی های سیستم های مورد استفاده مانند نرخ نمونه برداری، دقت اندازه گیری رفتار حرکتی شناور، پیچ تست و غیره نیاز دارد. پیکربندی سامانه های موجود در هر شناور مختص همان شناور نقشه برداری است زیرا به فاصله های بین سنسگرهای مختلف بستگی دارد. عدم قطعیت های معمول در یک سیستم *MBES* آب کم عمق 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 سنسگر حرکتی و سرعت صوت در آب را نشان می دهند.

مدل خطای *TPU* عملیات هیدروگرافی چندپرتوی، خطاهای اندازه گیری های بنیادی مورد نیاز الگوریتم *CUBE* را فراهم می کند. این خطاها در واقع خطا در مکان اسمی هر ساندینگ است که شامل هر دو مؤلفه افقی و قائم هستند. از آنجایی که این الگوریتم از مجموعه ای از گره های ثابت استفاده می کند که هیچ خطای افقی ندارند، بنابراین باید اطلاعات ضمنی در اندازه گیری ها را به هر مکان گره برآورد منتقل کرد. به همین دلیل خطاهای عمودی و افقی ترکیب می شوند.

صرف نظر از آموزش، تجربه و تعهد، این موضوع در نهایت به اشتباهاتی منجر خواهد شد که ممکن است غیرقابل پیگیری باشند [۹]. در روش *CUBE* داده هایی باید مورد بررسی قرار بگیرند که با معیارهای نرمال مطابقت ندارند. به این ترتیب، تعداد تصمیمات ذهنی که باید گرفته شود کاهش می یابد، خستگی و فرسودگی اپراتورها کاهش می یابد و پردازش داده ها سریع تر انجام می شود. در ضمن در روش خودکار ویرایش داده ها، کیفیت مؤلفه عمق ها در نقشه های هیدروگرافی مورد توجه قرار گیرند.

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

برای رسیدن به این هدف می بایست 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 همسایه ها انجام می شود. همان طور که می دانیم هر عمق اندازه گیری شده دارای خطایی است که از انتشار مجموعه خطاهای سامانه های مختلف عمق یابی چندپرتوی حاصل می شود. بنابراین، صحبت کردن از اندازه گیری عمق حقیقی، منطقی نیست. از طرف دیگر، همه اندازه گیری ها دارای مقداری خطا هستند و این خطا در سرتاسر ردیف اندازه گیری سامانه عمق یاب چندپرتوی^۱ بین سامانه ها یا در تمام محیط های نقشه برداری یکسان نیست. اگر به این خطاها توجه نکنیم، ممکن است در مورد عمق یک ناحیه به دلیل نویز در سامانه عمق یاب چندپرتوی، در حسگرهای حرکتی یا در *GPS* دچار اشتباه شویم. در حال حاضر، ما با داده ها بر اساس تجربه و قضاوت خودمان برخورد می کنیم. بنابراین انتخاب عمق حقیقی از میان حجم داده های بزرگ، یک امر

² Inertial Motion Unit

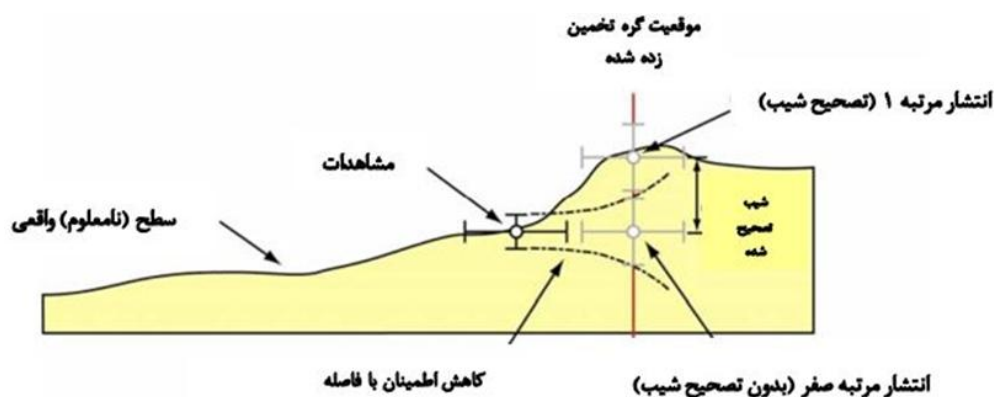
¹ Swath



شکل ۷: عدم قطعیت سامانه چندپرتوی در عملیات هیدروگرافی بندر بوشهر

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].

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



شکل ۸: نحوه انتشار اطلاعات

که توسط یک مدل خطی پویا (DLM) ^۲ توصیف شده است [۲]. این تخمین‌زننده، علی 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، وزن‌دار خواهد شد [۲].

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 ^۱ بهینه استفاده می‌کند

^۲ Dynamic Linear Model

^۱ Bayesian

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

با توجه به مقیاس نقشه‌های مورد نیاز، شبکه‌ای منظم از اعماق در فواصل معین از همه داده‌ها در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله، از سلول‌های 5×5 متر استفاده شد. علت انتخاب ابعاد سلول این است که مقیاس نقشه‌های تهیه‌شده $1:1000$ هستند. به همین جهت لازم است که در هر 5 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 ابر داده‌ها را مورد ارزیابی قرار داد. هر سلول نماینده یک عمق است که عدم قطعیت آن (95% 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.

۳-۴- مدل پایش و مداخله

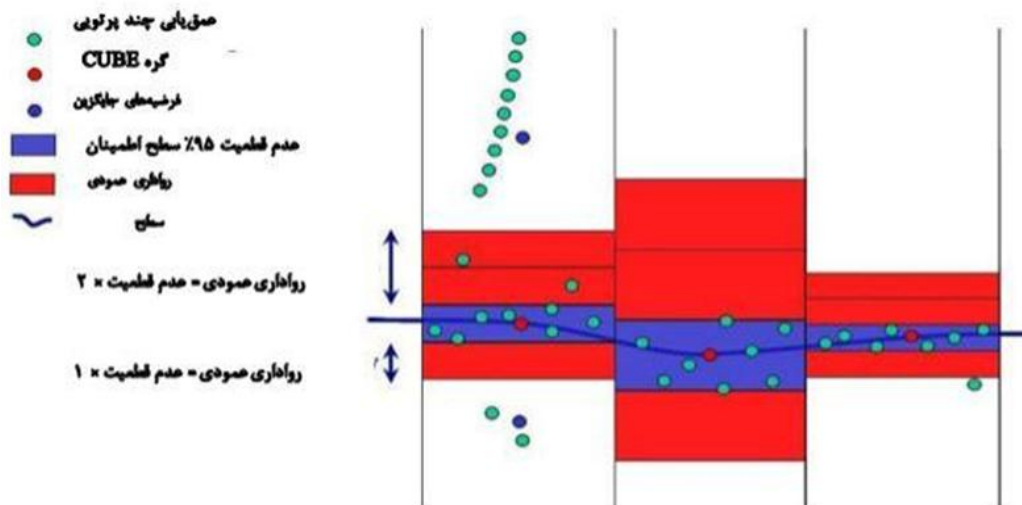
در *CUBE*، مدل بصورت صریح طوری تنظیم می‌شود که عمق را ثابت نشان دهد. در عمل مشاهده می‌شود که بسیاری از ساندینگ‌ها با این فرضیه سازگار نیستند. در واقع، نقاط پرت^۱ این فرضیه را نقض می‌کنند. لذا وجود عمق‌های جایگزین چندگانه در همان مکان ارائه می‌شوند. انتخاب فرضیه‌های جایگزین درست به روند بهبود مدل کمک می‌کند [۴].

۳-۴-۱- حل فرضیه

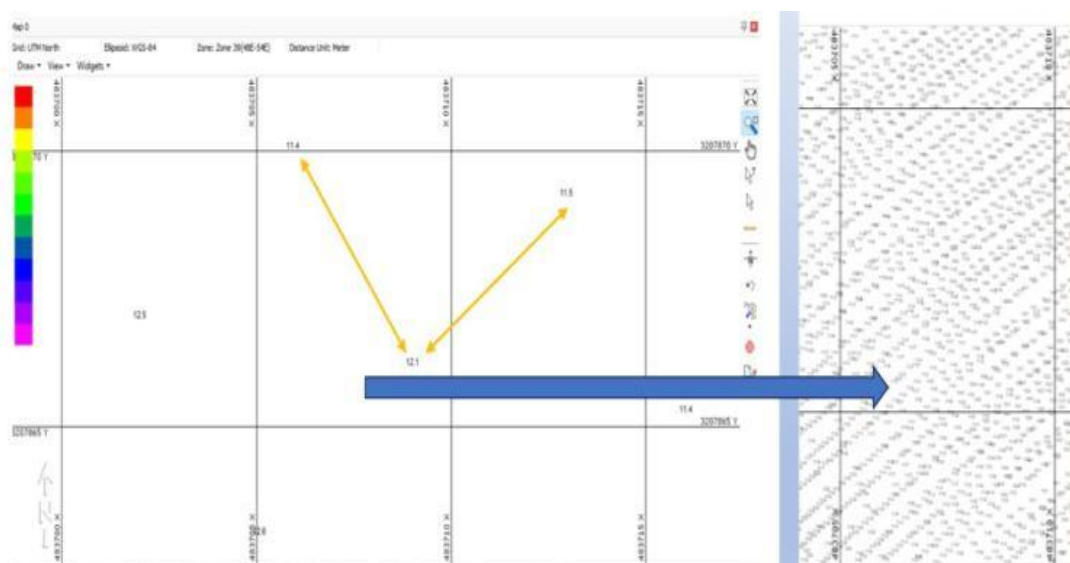
اجازه دادن به چندین فرضیه استحکام مدل را فراهم می‌کند، اما همچنان درباره اینکه کدام عمق باید معرفی شود ابهام وجود دارد. *CUBE* یک موتور بدون ابهام قابل پیکربندی را پیاده‌سازی می‌کند تا به‌طور درخواستی «بهترین» فرضیه را با استفاده از معیارهای از پیش تعیین‌شده برای آنچه که بازسازی «بهترین» محسوب می‌شود، 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 آنجایی که 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* و ویرایش اتوماتیک با الگوریتم *CUBE* *EDITOR* 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].

¹ Outlier



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 هر یک به تفکیک تشریح شده است:

۴-۱- محصولات خروجی

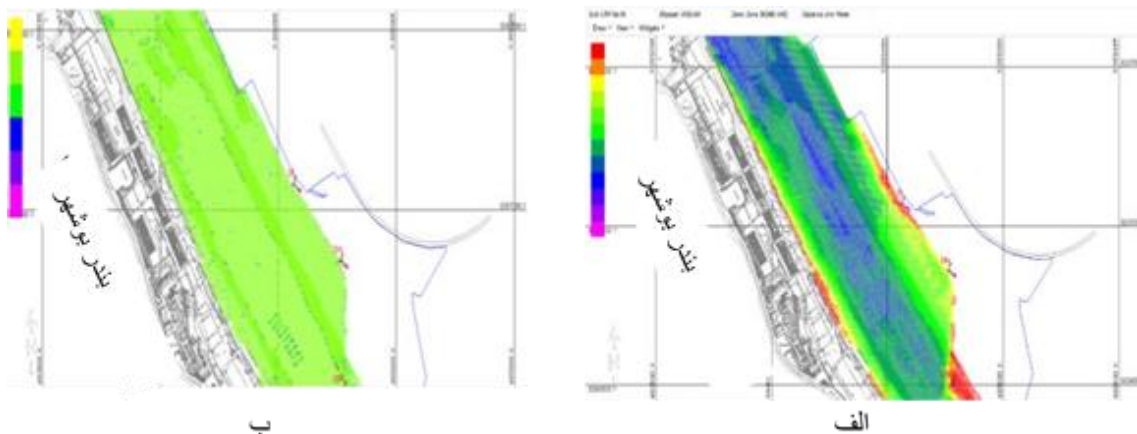
علاوه بر عمق، *CUBE* قادر است پارامترهای عددی دیگری را نیز ارائه دهد، به ویژه عدم قطعیت مرتبط با عمق برآورده شده، تعداد فرضیات موجود در گره و

مقادیری که نشان می‌دهد الگوریتم چقدر در مورد انتخاب فرضیه‌ای که ساخته شده است، مطمئن است. پارامتر نسبت^۱ 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

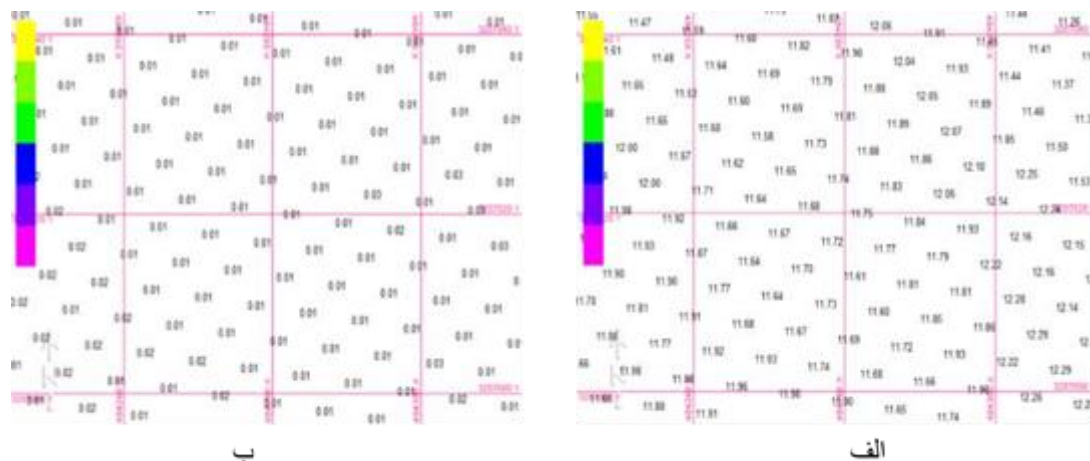
^۱ Ratio

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.

بنابراین می‌توانند به عنوان 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



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

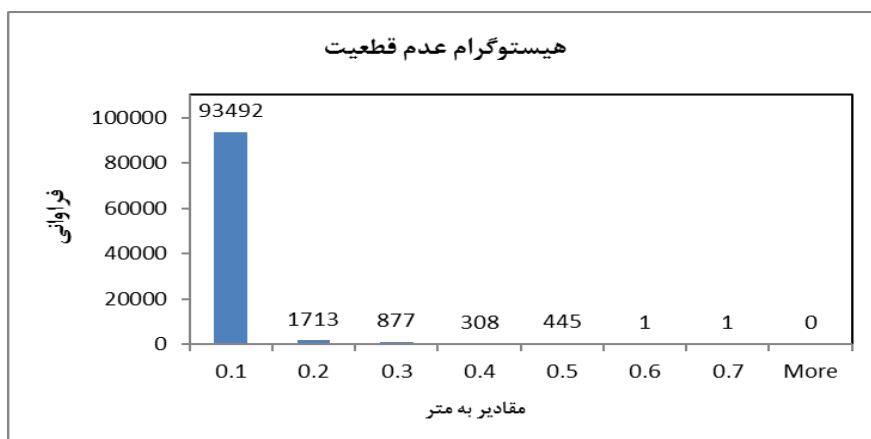


شکل ۱۲: (الف) مقادیر عددی عمق، (ب) عدم قطعیت متناظر در گره‌ها

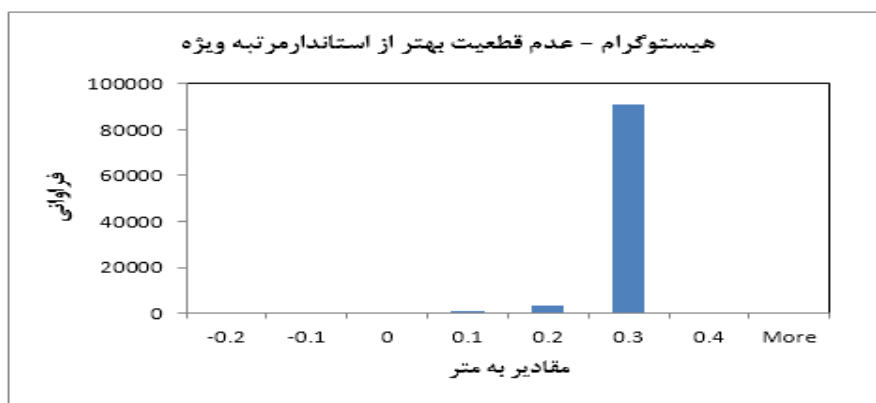
۴-۲- نتایج

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.

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



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



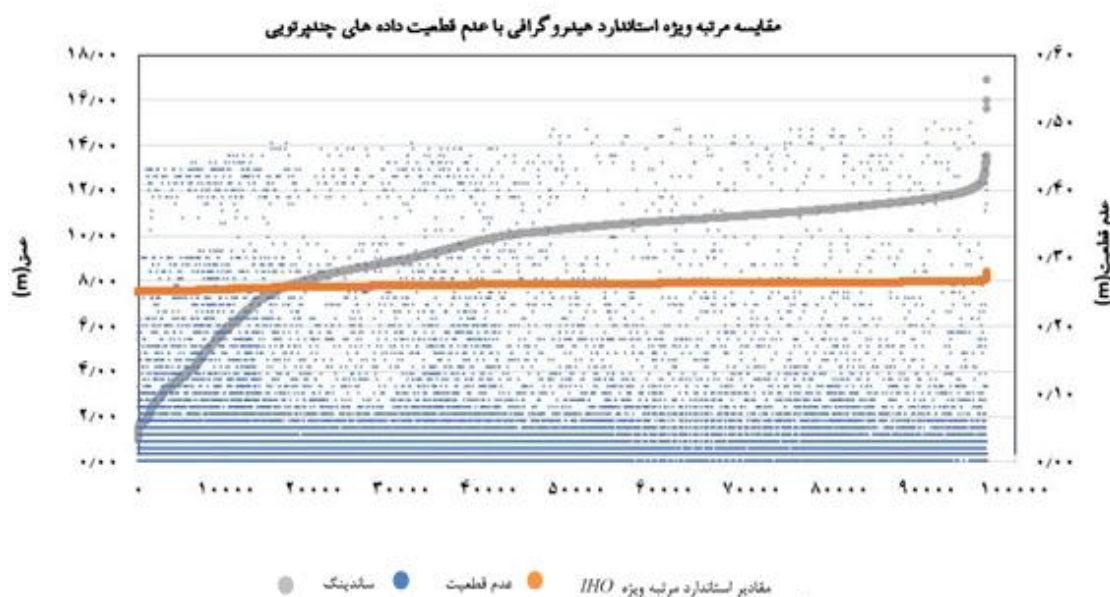
شکل ۱۵: مقادیر قابل قبول اعماق به درصد نسبت به موارد پرت، حاصل از پردازش CUBE

از طرف دیگر، رابطه عمق و مقدار عدم قطعیت از رابطه (۱) به دست می آید، به طوریکه d برابر با عمق می باشد و مقادیر a و b به صورت مقادیر درج شده است [۱۱].

$$a=0.25$$

$$b=0.0075$$

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

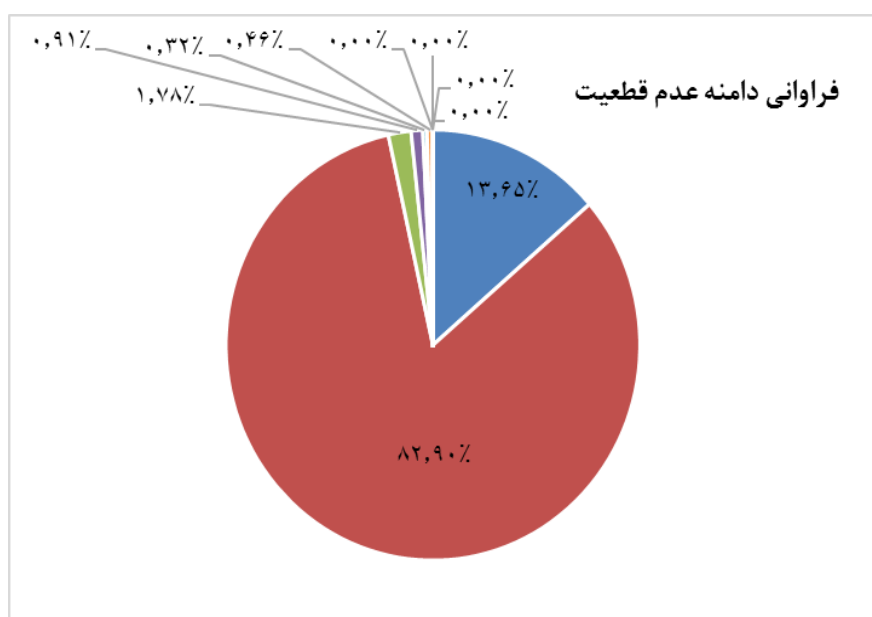


شکل ۱۶: مقایسه عدم قطعیت اعماق حاصل از پردازش CUBE با مقادیر استاندارد مرتبه ویژه

از نتایج جدول (۱) مشاهده می شود که فراوانی عدم قطعیت حاصل از پردازش بهتر از ۲۰ سانتی متر و ۱۰ سانتی متر 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

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



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

شسته شده (cut) و پر شده (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. آریبی جزئی احتمالاً به دلیل ترکیبی از اثر محدود بودن اعداد نمونه ساندینگ‌ها و رویکرد سنتی انتخاب ساندینگ‌های مناطق کم عمق است.

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 اولیه انتخاب شده 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

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

مساحت کل	اختلاف حجم	پر شده	شسته شده
$dS=19590.49$ (m^2)	$dV=66300$ (m^3)	$V=124068$ (m^3)	$V=190368$ (m^3)
میانگین اختلاف ←	۰,۰۳ (cm)	۰,۰۶ (cm)	۰,۱۰ (cm)

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 (عدم قطعیت)،

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/art>
- icle/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

- 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



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 Maritime Organization

3- PhD in Maritime Affairs, Ports and Maritime Organization

4- M. Sc in Marine Science, Ports and Maritime 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.