

# بررسی میزان دقت داده‌های حاصل از عمق‌یاب چندپرتوی و تک‌پرتوی به همراه مدلسازی اختلاف داده‌ها (مورد مطالعه: بندر بوشهر)

سید مجتبی زارعی<sup>۱</sup>، بهمن تاج فیروز<sup>۲</sup>، سپیده آبادپور<sup>۲\*</sup>، سید شاهد مساوات<sup>۲</sup>

نادر پسنده<sup>۱</sup>، علی کوروش نیا<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> سازمان بنادر و دریانوردی

s.m.zarei@gmail.com

pasandeh@pmo.ir

alikhourshniya@gmail.com

<sup>۲</sup> مهندسین مشاور دریا ترسیم، تهران، ایران

bt\_firooz@yahoo.com

sepidehabadpour@ut.ac.ir

shahed.mosavat64@gmail.com

(دریافت: فروردین ۱۴۰۳، تصویب: تیر ۱۴۰۳)

## چکیده

عمق‌یابی بنادر و دریاها و تهیه نقشه‌های دقیق بستر آبراه‌ها به دلیل نقش آن در ایمنی دریانوردی و شناسایی مناطق دریایی از اهمیت بسزایی برخوردار است. به‌کارگیری عمق‌یاب چندپرتویی به جای عمق‌یاب تک‌پرتویی در عملیات عمق‌یابی باعث ژرفاسنجی سراسری بستر دریا در نقشه‌های آبنگاری، افزایش کیفیت و کاهش زمان برداشت داده می‌شود. در عمق‌یابی چند پرتویی، در لبه‌های هر نوار یا گذر برداشت، عمق‌یابی نهایی از خطاهای ناشی از پیچیدگی سنجنده‌های مورد استفاده، تاثیر می‌پذیرد. از این رو، مدل‌سازی و مقایسه برداشت‌های عمق‌یابی با سنجنده‌های متفاوت به بهبود کیفیت و دقت داده‌ها و بهینه‌سازی حجم داده‌ها منجر می‌گردد. در این پژوهش، به منظور بررسی میزان اختلاف داده حاصل از سنجنده‌های تک‌پرتوی در مقایسه با داده حاصل از سنجنده چند پرتوی، در مرحله اول داده‌های عمق‌یابی حاصل از عمق‌یاب چند پرتویی بندر بوشهر پس از پردازش، اعمال تصحیحات لازم و رفع خطاهای شناخته شده از جمله خطای انکسار صوت در آب و خطاهای ناشی از دوران شناور و عدم تطابق محورها، به وسیله‌ی روش مرتب‌سازی میانگین، در مدل‌سازی ریاضیاتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در مرحله دوم عمق نقاط کنترلی موجود که داده‌های حاصل از عمق‌یاب تک‌پرتویی هستند، بر روی این صفحات مدل، درونیابی شده و مقادیری برای این اعماق برآورد شده‌است. در مرحله سوم این برآوردها با استفاده از معیارهای آماری با یکدیگر مقایسه شده‌است و اختلافات عمق‌یابی دو سنجنده تک‌پرتویی و چند پرتویی مقایسه شده‌است. نتیجه حاصل نشان داد که بطور میانگین اختلاف عمق بین دو سنجنده تک‌پرتویی و چند پرتویی برابر با ۰٫۰۳ متر، انحراف معیار ۰٫۰۸ متر با فاصله اطمینان ۹۸ درصد و جذر میانگین مربع خطاهای ۰٫۲۱ متر است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که دقت عملیات عمق‌یابی چند پرتویی با توجه به تجهیزات بکار رفته در چارچوب استانداردهای ملی و استاندارد S-۴۴ سازمان بین‌المللی هیدروگرافی با مرتبه ویژه قرار گرفته‌است. از طرف دیگر با توجه به این‌که زمان انجام عملیات میدانی در به‌کارگیری سنجنده چندپرتویی بسیار کم‌تر از سنجنده تک‌پرتویی است، در نهایت به‌کارگیری سنجنده چند پرتویی به کاهش هزینه‌های عمرانی، پوشش بیشتر هیدروگرافی از بستر و دستیابی به دقت بالاتر می‌انجامد.

**واژگان کلیدی:** عمق‌یاب تک‌پرتویی، عمق‌یاب چند پرتویی، استاندارد هیدروگرافی، سازمان بین‌المللی هیدروگرافی

\* نویسنده رابط (sepidehabadpour@ut.ac.ir)

## ۱- مقدمه

نگهداری از بنادر به عنوان یکی از حلقه‌های کلیدی زنجیره‌ی انتقال کالا و اصلی‌ترین درگاه حمل و نقل مسافر، بسیار حائز اهمیت است [۱] و جایگاه ویژه‌ای در حمل و نقل دریایی به عنوان محور اقتصاد آبی<sup>۱</sup> دارد [۲]. در این میان، حصول اطمینان از تامین عمق مناسب دریانوردی در بنادر و آبراه‌ها با هدف تردد ایمن شناورها، به عنوان یکی از اهداف پایه، همواره مد نظر مسئولین ذیربط قرار دارد. بنابراین، پایش ادواری تغییرات بستر دریا در بنادر و گذرگاه‌های دریایی مورد توجه برنامه‌ریزان مدیریت بنادر و دریانوردی کشور قرار گرفته‌است. بر این اساس، مکان‌یابی دقیق آبراه‌ها و اندازه‌گیری عمق بستر دریا و تغییرات آن (عمق‌یابی<sup>۲</sup> یا آبنگاری<sup>۳</sup>) به وسیله دستگاه‌ها و ابزارهای پیشرفته، جهت به‌روز رسانی نقشه‌های بستر دریا، امری متداول در جهان است [۳]. فراوانی ابزارهای سنجش از دور نوری و تصاویر ماهواره‌ای امکان تخمین عمق آب‌ها را فراهم کرده‌است، اما استفاده از این تکنولوژی وابسته به شرایط جوی و عدم حضور ابر در تصاویر و محدود به آب‌های کم عمق و شفاف (غیرگل‌آلود) است [۴]. از سوی دیگر، با وجود پیشرفت‌های صورت گرفته در دانش سنجش از دور و معرفی الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری ماشین و تصاویر ماهواره‌ای برای تولید نقشه‌های هیدروگرافی، همچنان دقت عمق‌یابی نتایج این روش‌ها در مقایسه با تجهیزات صوتی<sup>۴</sup> کم‌تر است [۳، ۵]. از جمله تجهیزات مورد استفاده در عمق‌یابی با کمک صوت، می‌توان به عمق‌یاب‌های صوتی چندپرتوی<sup>۵</sup> اشاره نمود که در یک دهه اخیر در بنادر کشور، مورد توجه جدی قرار گرفته‌اند. در حقیقت، حجم داده‌های ثبت شده از طریق عمق‌یاب چند پرتوی چندین برابر داده‌های حاصل از عمق‌یاب تک پرتوی<sup>۶</sup> است و در نتیجه یک پوشش پیوسته از بستر دریا حاصل می‌شود. همین امر باعث افزایش سرعت عمق‌یابی و کاهش عملیات میدانی می‌شود [۶]. لیکن همه‌ی نقاط عمق‌یابی شده حاصل از عمق‌یاب چندپرتوی دقت یکسان و یکنواختی ندارند و بسته به برخی عوامل، دقت این داده‌ها متفاوت است. به ویژه در لبه‌های گذرهای برداشت، خطای انکسار و خطاهای حاصل از دوران پرتو، بیشتر در

دقت عمق‌های برداشتی اثرگذار است. در مقابل، در داده‌های حاصل از عمق‌یاب تک پرتوی به دلیل عمودی بودن زاویه‌ی تابش و بازتابش پرتو، تاثیر خطاهای انکسار کمتر و اندازه‌گیری عمق دقیق‌تر است. از آنجایی که داده‌های عمق‌یابی داده‌های گران قیمت و کم‌یاب و تکرار ناپذیر در بازه‌های زمانی کوتاه می‌باشد و بستر دریا همواره در حال تغییر است، بررسی دقیق و مقایسه چنین داده‌های ارزشمندی در مناطق موجود، به درک وسیعی از خطاهای موجود در عمق‌یابی چند پرتویی می‌انجامد. به طور عملی، در رابطه با مقایسه اطلاعات حاصل از عمق‌یاب تک پرتویی و عمق‌یاب چند پرتویی تحقیقات گسترده‌ای صورت نگرفته‌است. از دلایل این امر می‌توان به گران بودن و غیرقابل دسترس بودن چنین داده‌هایی در یک بازه زمانی مناسب با دو سنجنده‌ی مختلف اشاره کرد.

شماعی قهفرخی در پایان نامه خود با در نظر گرفتن روش‌های مختلف مرتب‌سازی<sup>۷</sup> داده‌های عمق‌یاب چندپرتوی و روش‌های مختلف درونیایی ارتفاع نقاط روی سطح، به مدلی بهینه جهت انطباق داده‌های این دو نوع عمق‌یاب و بهبود دقت لبه‌های برداشت دست یافته است [۷]. در تحقیقی که در سال ۲۰۲۱ در اندونزی انجام شد، کیفیت و تفاوت داده‌های عمق‌یابی چند پرتوی و تک‌پرتوی از جهت انطباق با استاندارد IHO S-44 مورد بررسی قرار گرفت [۸]. در تحقیقی دیگر در استرالیا [۹]، با استفاده از انرژی بازگشتی<sup>۸</sup> حاصل از عمق‌یاب چند پرتوی و تک پرتوی، نقشه پهنه‌های زیستی بستر دریا ترسیم شده است و به مساله عمق‌یابی و دقت آن پرداخته نشده‌است. در تحقیقی مشابه [۱۰]، طبقه‌بندی جنس بستر دریا با استفاده از انرژی بازگشتی حاصل از دستگاه عمق‌یاب چند پرتوی صورت گرفت. اما همچنان تحقیق کامل و جامعی از حیث تفاوت‌های آماری، هم‌بستگی و اطلاعات رویه‌های سه بعدی حاصل از عمق‌یابی چند پرتوی و تک پرتوی در بنادر صورت نگرفته‌است. به همین علت در تحقیق حاضر، داده‌های عمق‌یابی چند پرتوی و تک پرتوی در بندر بوشهر مقایسه گردیدند.

۵ Multi-beam Echosounder

۶ Single-beam Echo Sounder

۷ Sort

۸ Backscatter Pulse

۱ Blue Economy

۲ Bathymetry

۳ Hydrography

۴ Sonar

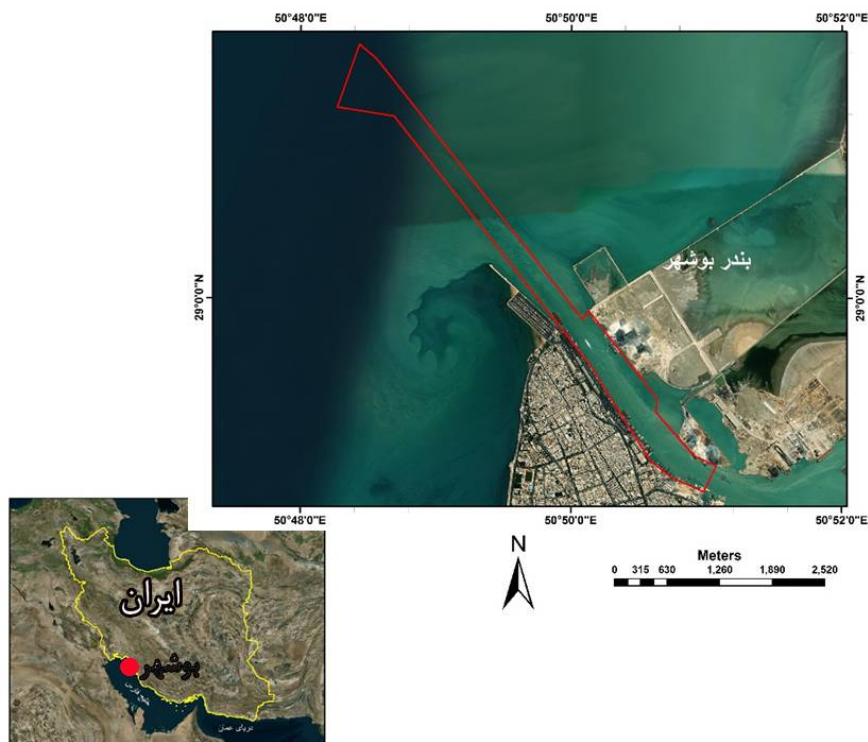
اهداف اصلی تحقیق حاضر را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

۱. بررسی دقت داده‌های پردازش شده‌ی عمق‌یاب چند پرتویی در بندر بوشهر از جهت انطباق با استاندارد IHO S-44
  ۲. مقایسه داده‌های پردازش شده‌ی عمق‌یاب تک پرتویی و چند پرتویی در بندر بوشهر از جهت انطباق با استاندارد IHO S-44
  ۳. مقایسه مدل رقومی ارتفاعی<sup>۱</sup> حاصل از عمق‌یابی تک‌پرتویی و چندپرتویی در بندر بوشهر
  ۴. آرایه مدل برازش و هم‌بستگی اختلاف بین داده‌های عمق‌یاب چندپرتویی و تک پرتویی در بندر بوشهر
  ۵. مقایسه اختلاف حجمی دو رویه به‌دست آمده از عمق‌یاب چند پرتویی و تک پرتویی در بندر بوشهر
- از آنجایی که کار با عمق‌یاب‌های چند پرتویی در مناطق نزدیک به ساحل در ایران به تازگی آغاز شده و تا به امروز اغلب فعالیت‌های هیدروگرافی در ایران با استفاده از عمق‌یاب‌های تک پرتویی انجام گرفته‌است، لذا این تحقیق

می‌تواند گامی موثر در راستای بهینه نمودن هزینه و زمان انجام عملیات هیدروگرافی تلقی شود. همچنین پردازش و تست‌های مربوط به عملکرد عمق‌یاب چند پرتویی و زوایای پرتو آن و تاثیر آن در دقت اعماق، راه‌گشای سایر پژوهش‌گران و سازمان‌های ذیربط در انتخاب و به کارگیری این نوع تجهیزات در پروژه‌های هیدروگرافی خواهد بود.

## ۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد بررسی در این تحقیق، بندر بوشهر واقع در خلیج فارس، جنوب ایران است. متوسط دمای این منطقه ۲۵ درجه‌ی سانتیگراد و دارای اقلیم گرم و مرطوب می‌باشد. میانگین سالانه بارش در این منطقه ۲۰۶ میلیمتر است [۱۱]. کانال و گذرگاه دسترسی بندر بوشهر به‌طول تقریبی ۱۶ کیلومتر، محل عبور کشتی‌ها را فراهم می‌کند و لایروبی و عمق‌یابی این کانال به‌طور مستمر و ادواری صورت می‌پذیرد. مختصات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه بین  $28^{\circ} 57' 30''$  و  $29^{\circ} 11' 30''$  شمالی و  $50^{\circ} 44' 30''$  و  $50^{\circ} 51' 30''$  شرقی قرار دارد (شکل ۱).



شکل ۱: بندر بوشهر، ایران

<sup>۱</sup> Digital Elevation Model

### ۳- داده‌های مورد استفاده

با توجه به گستره حوضچه و کانال دسترسی بندر بوشهر، در این پژوهش به دلیل حجم بالا و مساحت زیاد منطقه و همچنین به علت لایروبی مداوم بخش خارجی کانال دسترسی بندر، محدوده کانال داخلی از برداشت‌های عمق‌یابی حاصل از دو سنجنده و عمق‌یاب تک پرتویی و چندپرتویی در آب‌های منطقه بندر بوشهر به عنوان محدوده مطالعاتی انتخاب شده‌است. داده‌های مذکور پس از پردازش، اعمال سرعت صوت، جزر و مد و رفع خطاها مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق سطح مبنای ارتفاعی در عمق‌یابی، چارت دیتوم<sup>۱</sup> می‌باشد.

### ۴- روش انجام کار

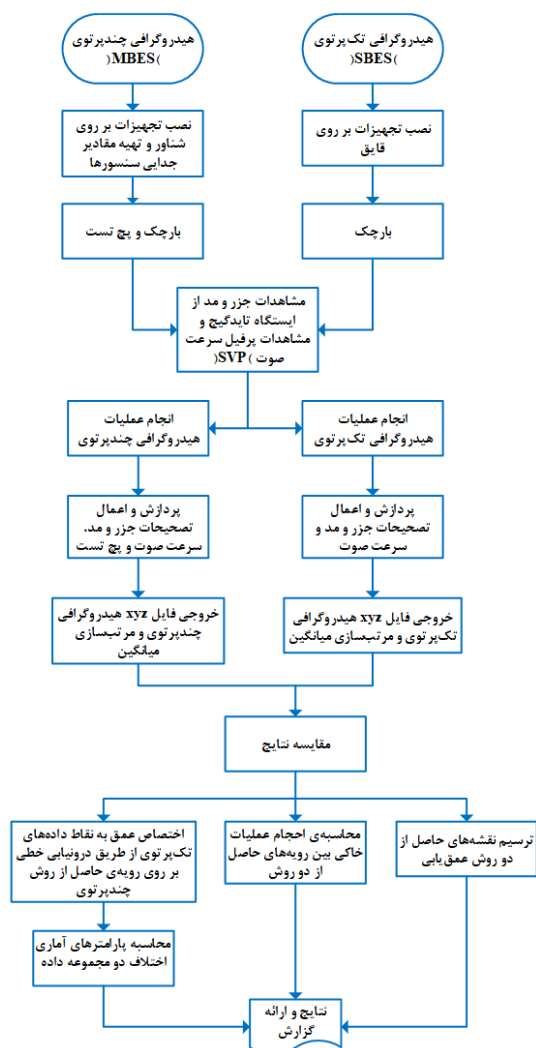
داده‌های عمق‌یابی چندپرتویی به روش مرتب‌سازی میانگین، به صورت رویه‌های ریاضیاتی مدل شدند. سپس عمق نقاط داده‌های تک‌پرتویی روی این صفحات درونیابی خطی شده و مقادیری برای این اعماق به دست آمد. در مرحله‌ی بعد این برآوردها با استفاده از معیارهای آماری با یکدیگر مقایسه شدند که اختلاف مقادیر ارتفاعی به صورت مدلی برآورد و مشخص شود. در پایان این مدل منتخب بر روی داده‌های عمق‌یابی تک پرتویی آزمایش شده و میزان تطابق آن با دقت اسمی تعریف شده توسط استانداردهای جهانی هیدروگرافی بررسی شده‌است. در نهایت، داده‌های عمق‌یابی حاصل از عمق‌یاب تک پرتویی و چندپرتویی بندر بوشهر با یکدیگر مقایسه شده و نقشه‌های منطقه مورد نظر با هر دو داده ترسیم و ارزیابی شد. همچنین اختلاف حجم دو مدل رقومی محاسبه و با یکدیگر مقایسه شد. شکل ۲ فرآیند انجام تحقیق حاضر را به صورت روندنما نشان می‌دهد.

#### ۴-۱-۴- اعمال تصحیحات و واسنجی<sup>۲</sup> ابزارها

##### ۴-۱-۱-۴- تصحیحات جزر و مد

در هر دو روش عمق‌یابی تک پرتویی و چندپرتویی نیاز است که همزمان با عملیات هیدروگرافی، ارتفاع سطح آب

نسبت به چارت دیتوم قرائت شود تا با استفاده از عمق‌های برداشت شده، ارتفاع نقاط روی بستر نسبت به چارت دیتوم



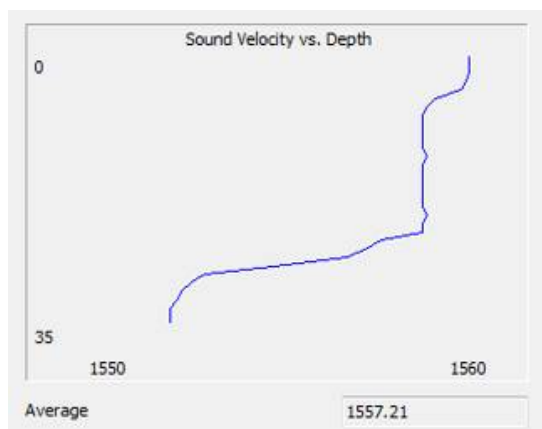
شکل ۲: روندنمای روش تحقیق

مشخص شود. بدین منظور از ترازسنج خودکار<sup>۳</sup> سازمان بنادر و دریانوردی مستقر در بندر بوشهر استفاده شد و جهت اتصال به شبکه ترازیابی دقیق، صفر تیرک کشند<sup>۴</sup> به پنج‌مارک BM-CYDS1014 که ارتفاع آن از چارت دیتوم معلوم است، تراز‌یابی شد. ارتفاع پنج‌مارک مذکور نسبت به چارت دیتوم ۴,۱۴۱ متر می‌باشد و لذا ارتفاع صفر تیرک کشند نسبت به چارت دیتوم برابر ۰,۷۵ متر بدست آمد. ترازهای جزر و مدی در فاصله هر ۱۰ دقیقه توسط دستگاه ترازسنج خودکار ثبت می‌شدند و در مرحله پس پردازش به ارتفاع نسبت به چارت دیتوم تبدیل شدند.

<sup>۳</sup> Tide Gauge  
<sup>۴</sup> Tide Pole

<sup>۱</sup> Chart Datum (CD)  
<sup>۲</sup> Calibration

صوت نسبت به عمق در روزهای مختلف، تصحیح تغییرات سرعت صوت نسبت به مقدار معرفی شده به صورت پس پردازش به عمق‌ها اعمال می‌گردد.



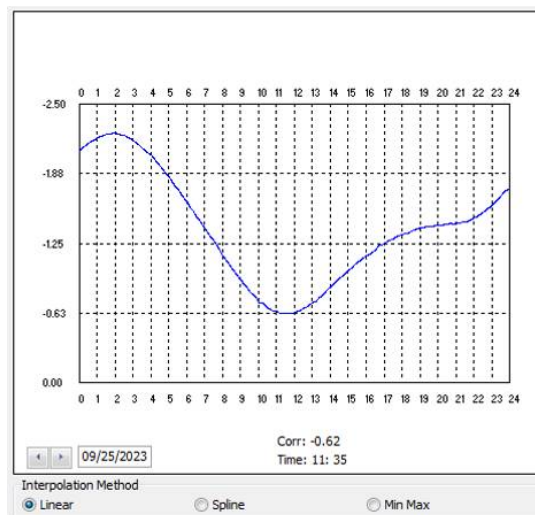
شکل ۴: مشاهدات پروفیل سرعت صوت در آب

#### ۴-۱-۳- پیچ تست

در روش عمقی‌یابی چندپرتوی جهت پرهیز از خطای اربیبی<sup>۴</sup> در مختصات سه بعدی حقیقی هر پرتو نیاز است که تنظیمات استاتیک عمقی‌یاب در سه محور برداشتی (دوران‌های roll, pitch و yaw) و خطای تاخیر دریافت داده موقعیت از دستگاه تعیین موقعیت ماهواره‌ای<sup>۵</sup> توسط عمقی‌یاب، به دقت محاسبه شوند [۱۲]. جهت محاسبه‌ی هریک از دوران‌های ذکر شده بایستی برداشت داده به روش مشخصی که در ادامه ذکر خواهد شد صورت پذیرد و سپس با استفاده از مازول پیچ تست نرم‌افزار هایپیک، محاسبه دوران مربوط انجام گیرد.

- دوران roll نشانگر عدم تطابق محور عمودی شناور در راستای چپ و راست شناور<sup>۶</sup> بین ترانسدیوسر و آشکارساز حرکت<sup>۷</sup> می‌باشد. جهت محاسبه این دوران بایستی در مسیری عاری از توپوگرافی (موازی منحنی میزان) سه خط به طول حداقل ۱۰۰ متر و با سه بار تکرار قرائت شود. خطوط مذکور بایستی با سرعت متوسط شناور و در جهت مخالف یکدیگر برداشت شوند.

- دوران pitch نشانگر عدم تطابق عمودی شناور در راستای جلو و عقب شناور<sup>۸</sup> بین ترانسدیوسر و آشکارساز



شکل ۳: مشاهدات سطح آب

#### ۴-۱-۲- اندازه‌گیری سرعت صوت در آب

هر دو نوع دستگاه عمقی‌یابی تک پرتوی و چند پرتوی از اصول فیزیکی یکسانی برای اندازه‌گیری عمق آب بهره می‌برند. دستگاه عمقی‌یاب با تولید امواج الکتریکی و سپس تبدیل آن به وسیله مبدل الکتریکی (ترانسدیوسر<sup>۱</sup>) به امواج صوتی و ارسال امواج به داخل آب، پس از برخورد امواج به بستر دریا، بازتاب آن را ثبت می‌کند. سپس با محاسبه زمان رفت و برگشت امواج، عمق (d) یا فاصله دستگاه تا بستر دریا با استفاده از رابطه (۱) اندازه‌گیری می‌شود.

$$d = v \times t/2 \quad (1)$$

در رابطه بالا، زمان t یا زمان در واحد ثانیه توسط دستگاه عمقی‌یاب ثبت می‌شود، v نشان دهنده سرعت صوت در آب در واحد متر بر ثانیه است که بر اساس سه پارامتر رسانایی الکتریکی آب (شوری)، درجه حرارت، و فشارهیدرواستاتیک ستون آب (عمق) متغیر است. لذا نیاز است که در هر دو روش به طور روزانه دستگاه عمقی‌یاب بر اساس سرعت صوت با دستگاه اندازه‌گیری پارامترهای آب<sup>۲</sup> و بارچک<sup>۳</sup> واسنجی گردد. روش کار بدین صورت است که یک سرعت صوت دلخواه در هنگام انجام عملیات هیدروگرافی به دستگاه معرفی می‌گردد. سپس با بدست آوردن پروفیل سرعت

۶ Port, Starboard  
۷ Motion Sensor  
۸ Aft, Forward

۱ Transducer  
۲ CTD, HOBO, and CastAway  
۳ Bar Check  
۴ Bias  
۵ Latency

دستگاه‌های عمق‌یابی مورد استفاده سیدیوسر پرو<sup>۸</sup> ساخت کشور استرالیا و آدوم، با فرکانس ۲۰۰ کیلوهرتز، زاویه پرتو ۸ درجه، و قدرت تفکیک ۱ سانتی‌متر می‌باشد.

در طی عملیات عمق‌یابی در شرایط آرام جوی، خطای شاخص ترانسدیوسر به دستگاه اعمال گردیده و تصحیحات سرعت صوت و تراز آب به صورت پس پردازش وارد می‌گردد. همچنین سیستم تعیین موقعیت آبی با اتصال به نقاط ساحلی معین در سیستم ژئودیتیک سازمان نقشه برداری کشور تصحیح شده‌است.

#### ۴-۳- عمق‌یابی چند پرتویی

جهت برداشت داده‌های عمق‌یابی چندپرتویی خطوط عمق‌یابی در راستای محور کانال و متناسب با عمق حدودی منطقه طوری طراحی شدند که پوشش ۳۰ تا ۴۰ درصدی بین نوارهای مجاور فراهم باشد. در این عملیات از یک فروند شناور (همیار ۳) برای انجام عملیات هیدروگرافی استفاده شد. تجهیزات سخت افزاری مورد استفاده عبارتند از عمق-یاب چندپرتوی WASSP با زاویه تابش ۱۲۰ درجه، آشکارساز حرکت، جهت یاب ماهواره‌ای، موقعیت‌یاب ماهواره‌ای دقیق، سرعت‌سنج صوت SVP-Digi Bar<sup>۹</sup> و سنسورگر محیطی CTD-CastAway<sup>۱۰</sup>. پس از نصب کلیه تجهیزات بر روی شناور موقعیت آنان نسبت به یکدیگر و نسبت به محور شناور با استفاده از دستگاه توتال استیشن قرائت شده و مقادیر جدایی سنسورها<sup>۱۱</sup> بدست آمد. با انجام عملیات "پیچ تست"<sup>۱۲</sup> خطاهای ناشی از دوران شناور و عدم تطابق محور ترنس‌دیوسر با گیرنده‌های ماهواره آبی و حس‌گر دوران‌ها اندازه‌گیری و به عمق یاب چند پرتویی از طریق نرم افزار مربوطه اعمال شد [۱۳]. همچنین دو آزمایش کنترل کیفیت به نام‌های (۱) آزمایش زاویه پرتو و (۲) مقایسه آماری خطوط چک در پردازش عمق‌یابی چند پرتویی در نرم افزار هایپک Hypack-MBMAX64 در دسترس قرار دارد که در قسمت‌های ۱-۳-۴ و ۲-۳-۴ توضیح داده شده‌است.

حرکت می‌باشد. جهت محاسبه این دوران بایستی در مسیری دارای توپوگرافی (عمود بر منحنی میزان) سه خط به طول حداقل ۱۰۰ متر و با سه بار تکرار قرائت شود. خطوط مذکور بایستی با سرعت متوسط شناور و در جهت مخالف یکدیگر برداشت شوند.

• دوران yaw نشانگر عدم تطابق افقی شناور در راستای برداشت ترانسدیوسر و جهت‌یاب ماهواره‌ای<sup>۱</sup> نسبت به راستای حرکت شناور می‌باشد. جهت محاسبه این دوران بایستی در مسیری دارای توپوگرافی (عمود بر منحنی میزان) دو خط موازی هم و به فاصله عمق متوسط از یکدیگر و در جهت ثابت و با سرعت متوسط قرائت شود. این عملیات باید حداقل در سه منطقه و سه بار تکرار شود و طول هر خط حداقل ۱۰۰ متر باشد.

• Latency بیانگر خطای عدم تطابق مختصات مسلحاتی و عمق برداشت شده توسط ترانسدیوسر می‌باشد که در نتیجه عدم همزمانی بین دریافت اطلاعات متناظر از ترانسدیوسر و موقعیت‌یاب ماهواره‌ای دقیق<sup>۲</sup> توسط واحد محاسبه سامانه چندپرتوی پدید می‌آید. جهت محاسبه این پارامتر بایستی در مسیری دارای توپوگرافی (عمود بر منحنی میزان) حداقل سه خط و با سه بار تکرار برداشت شود. هر خط برداشت بایستی در جهت ثابت یکبار با کمترین سرعت و بار دیگر با بیشترین سرعت برداشت شود. طول هر خط بایستی حداقل ۱۰۰ متر باشد.

#### ۴-۲- عمق‌یابی تک پرتویی

در عمق‌یابی تک‌پرتویی با توجه دستورالعمل‌های همسان نقشه‌برداری، جلد هفتم، آبنگاری کد ۷-۱۱۹، فاصله بین خطوط برداشت در جهت عمود بر ساحل ۱۰ متر در نظر گرفته شده است و فاصله خطوط کنترلی عمود بر خطوط برداشت اصلی ۵۰ متر در نظر گرفته شد. در این روش از چند فروند شناور موتوری مجهز به سیستم رادیویی و تعیین موقعیت تفاضلی<sup>۳</sup> جهت تعیین موقعیت آبی<sup>۴</sup>، دستگاه سرعت‌سنج صوت<sup>۵</sup>، دستگاه عمق‌یاب<sup>۶</sup> و نرم‌افزار برداشت و پردازش داده‌های عمق‌یابی هایپک<sup>۷</sup> استفاده شد.

۷ HYPACK

۸ Ceeducer Pro

۹ Sound Velocity Profiler

۱۰ Conductivity-Temperature-Depth

۱۱ Offset diagram

۱۲ Patch Test

۱ Vector GNSS

۲ RTK GNSS

۳ DGNS

۴ Real-Time Kinematic (RTK)

۵ Sound Velocity Probe (SVP)

۶ Ceeducer and Odom

## ۴-۳-۱- آزمایش زاویه پرتو

آزمایش زاویه پرتو دقت عمق‌یابی چند پرتوی را در محدوده‌های مختلف زاویه تابش (بیم) با استفاده از سطح مرجع تخمین می‌زند. سطح مرجع در اینجا نتایج عمق‌یابی تک پرتویی است که عمود بر یک یا چند خط هیدروگرافی عمق‌یابی تک‌پرتویی می‌باشد. این کار به بهبود کیفیت و دقت داده‌ها و بهینه‌سازی حجم داده‌ها منجر می‌شود. در انجام عملیات چند پرتویی حد داده‌های مورد استفاده برای زوایای کمتر از ۴۵ درجه در نظر گرفته شد. در ادامه نتایج حاصله از این آزمایش در زوایای ۵ تا ۴۵ درجه و با در نظر گرفتن داده‌های حاصل از تک پرتویی به عنوان سطح مرجع استفاده شده‌است.

## ۴-۳-۲- مقایسه آماری خطوط چک

مقایسه آماری داده‌های عمق‌یابی چندپرتویی با عمق‌یابی تک پرتویی (چک لاین) را فراهم می‌کند. در این روش ابتدا چند لاین عمق‌یابی چندپرتویی در یک ناحیه هموار با شیب بسیار کم و نزدیک تاید گیج انتخاب می‌شود. خطوط هیدروگرافی تک پرتویی نیز عمود بر آن طراحی می‌شود و سپس عملیات هیدروگرافی به صورت مجزا با سامانه‌های مربوطه اجرا می‌شود. عملیات پچ تست و اندازه‌گیری پروفایل سرعت هم برای اعمال تصحیحات لازم به اعماق صورت گرفت. این عملیات با یک قایق موتوری و یک یدک کش دیزلی با تجهیزات متفاوت متفاوت استفاده شد.

در ادامه، اطلاعات جمع‌آوری شده توسط دستگاه‌های عمق‌یابی با استفاده از نرم‌افزار هایپک پردازش و در محیط نرم‌افزار مذکور تبدیل به فایل زمان و مختصات شدند. پس از اعمال تصحیحات لازم (حذف داده‌های پرت<sup>۱</sup> و اعمال جزرومد) به عمق‌ها و موقعیت‌های جمع‌آوری شده، کلیه اطلاعات به صورت مختصات نهایی در محیط ArcGIS وارد شده و در سطح مبنای افقی<sup>۲</sup> بیضوی 1984 (WGS84) در سیستم (WORLD GEODETIC SYSTEM) و در سیستم تصویر<sup>۳</sup> UTM تبدیل به نقشه شدند. برای برآورد هر نقطه روی یک صفحه ارتفاع متناظر نقطه را روی صفحه درون‌یابی خطی که صفحه‌ی در برگیرنده‌ی مثلثی شامل

موقعیت مسطحاتی نقطه مورد نظر است با استفاده از یک معادله خطی محاسبه می‌شود.

برای بررسی دقت نیاز به داده‌ای داریم که نماینده‌ی مقادیر حقیقی باشد که بتوان معیارهای مقایسه را با توجه به آن تعریف کرد و دقت بهینه را پیدا کرد. بدین منظور باید نقاط چک تعریف بشوند. اطلاعات عمق‌یابی تک پرتویی که در شرایط مشابه در منطقه مشابه با عقیاب مالتی بیم بدست آمده، می‌تواند نماینده‌ی عمق واقعی باشد. فرض می‌کنیم که خروجی این دستگاه کاملاً قابل اعتماد باشد و عمق بدست آمده برای هر موقعیت در این روش همان عمق واقعی باشد، این مختصات‌ها را به عنوان نقطه چک در نظر می‌گیریم. از آنجایی که پرتو در عمق‌یابی با اکوساندر سینگل بیم با زاویه‌ی نزدیک به عمود به بستر دریا تابیده می‌شود، در یک حالت ایده آل اگر کاملاً عمود باشد، تحت تاثیر شکست قرار نمی‌گیرد و خطای انکسار ندارد. در آب کم عمق در شرایطی که دریا موج نیست و نسبتاً آرام و به ایده آل بسیار نزدیک است، این فرض که داده‌ی حاصل از عمق‌یابی با اکوساندر سینگل بیم کاملاً قابل اعتماد باشد برای هدف این تحقیق مورد قبول است.

## ۴-۳-۳- ارزیابی کیفیت داده‌ها

برای ارزیابی کیفیت داده‌های بدست آمده از نقشه‌برداری چندپرتویی کانال بندر بوشهر براساس معیارهای سازمان بین‌المللی هیدروگرافی و نشریه S-44 از ابزارهای موجود در نرم‌افزار هایپک استفاده شد.

برای ارزیابی دقت از معیار عدم قطعیت<sup>۴</sup> استفاده می‌گردد. عدم قطعیت، مقداری غیرمنفی است که دامنه‌ی مقادیری را که مقدار صحیح پارامتر برآورد شده در آن قرار می‌گیرد در یک سطح اطمینان مشخص، معین می‌کند [۱۴].

عدم قطعیت‌های موقعیت باید در سطح اطمینان ۹۵٪ بیان شود. عدم قطعیت کل (اعم از تصادفی و سیستماتیک) عملیات عمقیابی توسط عدم قطعیت انتشار کل (TPU<sup>۵</sup>) بیان می‌شود که خود دارای دو مولفه مسطحاتی (THU<sup>۶</sup>) و ارتفاعی (TVU<sup>۷</sup>) است. مولفه‌ی مسطحاتی کمیتی دو بعدی بوده که بیانگر تمامی عدم قطعیت‌های مربوط به

۵ Total Propagated Uncertainty

۶ Total Horizontal Uncertainty

۷ Total Vertical Uncertainty

۱ Outliers

۲ Horizontal Datum

۳ Universal Transverse Mercator (UTM), Zone 39

۴ Uncertainty

- عدم همزمانی / تاخیر

مدلسازی ریاضی هریک از خطاهای بالا و اثر آن در خطای کلی، توسط راب هیر انجام شده است [۱۶]. سازمان بین المللی هیدروگرافی پنج مرتبه دقت برای هیدروگرافی در ویرایش ۶،۱،۰ از استاندارد S-۴۴ در نظر می‌گیرد و برای هر مرتبه بیشترین مقدار مجاز TVU، THU، به همراه قابلیت آشکارسازی عوارض بیان می‌شود که در جدول ۱ نمایش داده شده‌است. بیشترین مقدار TVU از رابطه ۲ بدست می‌آید.

$$TVU_{max}(d) = \sqrt{a^2 + (b \times d)^2} \quad (2)$$

در این رابطه:

- a: بیانگر بخشی از عدم قطعیت ارتفاعی است که به عمق بستگی ندارد و  
 b: ضریبی که بیانگر بخشی از عدم قطعیت ارتفاعی است که با عمق تغییر می‌یابد  
 d: عمق

در مناطق نزدیک ساحل از مرتبه ویژه مذکور در جدول ۱ استفاده می‌شود.

#### ۴-۴- جذر میانگین مربع خطاها

جذر میانگین مربع خطاها<sup>۷</sup> که به انحصار با RMSE نمایش داده می‌شود، تفاوت میان مقدار پیش بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی می‌باشد و در حقیقت میزان خطای میان دو مجموعه داده را محاسبه می‌کند. از آنجایی که عدد RMSE بیانگر میانگینی از خطاهای موجود است، هنگامی که هدف ارزیابی دقت کل داده‌ها باشد، می‌توان از این عدد بعنوان یک شاخص مهم استفاده نمود. مقدار RMSE برای ارتفاع طبق معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$RMSE(z, \bar{z}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z}_i)^2}{n}} \quad (3)$$

اندازه‌گیری‌ها در صفحه افقی است و مولفه‌ی ارتفاعی کمیتی یک بعدی است که بیانگر تمامی عدم قطعیت‌های مربوط به اندازه‌گیری‌ها در راستای ارتفاعی است [۱۴]. خطاهایی را که باعث افزایش عدم قطعیت مسطحاتی (THU) می‌شوند، می‌توان به شرح زیر برشمرد [۱۵]:

- خطاهای سیستم تعیین موقعیت
- خطای فاصله و زوایای پرتو صوتی
- خطای مرتبط با مدل مسیر پرتو (ناشی از خطای موجود در اندازه‌گیری پروفیل سرعت صوت) و زاویه تابش هر پرتو
- خطای زاویه سمت<sup>۱</sup> شناور هیدروگرافی
- خطای نشانه‌روی ناشی از عمود نبودن دقیق

ترانسدیوسر

- خطای تعیین محل سنسور
  - خطاهای حسگر حرکتی شناور (به عنوان مثال عدم اندازه‌گیری دقیق roll و pitch)
  - خطای ترسیم افست دیاگرام<sup>۲</sup> و تعیین موقعیت دستگاه‌ها نسبت به هم
  - عدم همزمانی / تاخیر
- همچنین عواملی را که موجب افزایش عدم قطعیت ارتفاعی (TVU) می‌شوند، می‌توان به صورت زیر برشمرد [۱۵]:

- خطای تعیین سطح مبنای قائم
- خطای سیستم تعیین موقعیت ارتفاعی
- خطای اندازه‌گیری جزر و مد (شامل خطای مدل‌های کشندی در صورت لزوم)
- خطاهای دستگاهی
- خطای اندازه‌گیری سرعت صوت
- خطای مثل جدایی دیتوم‌های بیضوی و سطح مبنای عمق‌یابی
- خطای حرکت شناور (به عنوان مثال زوایای roll و pitch و حرکت عمودی شناور<sup>۳</sup>)
- خطای اندازه‌گیری آب‌خور<sup>۴</sup> شناور
- خطای ناشی از اثر اسکوات<sup>۵</sup>
- شیب بستر دریا

۵ Squat

۶ Special order

۷ Root Mean Square Error

۱ Heading

۲ Offset diagram

۳ Heave

۴ Vessel draught



در معادله ی (۳)،  $z$  مقدار ارتفاع واقعی،  $\bar{z}$  مقدار ارتفاع برآورد شده و  $n$  تعداد کل مدل‌ها است. در پایان، دقت بدست آمده با استاندارد جهانی IHO برای دقت اسمی مورد نیاز در کارهای هیدروگرافی به منظور حصول اطمینان از

تطابق با مرتبه درخواستی و ناوبری ایمن شناورها مقایسه شد. سپس اختلاف دو رویه درون‌یابی شده و اختلاف دو مدل رقومی حاصل از عمق‌یابی چندپرتوی و تک‌پرتوی اندازه‌گیری شد.

جدول ۱: دقت‌های هیدروگرافی سازمان بین‌المللی هیدروگرافی، استاندارد S-44، ویرایش ۶، ۱، ۰، سپتامبر ۲۰۲۲

معیار	مرتبه ۲	مرتبه ۱ ب	مرتبه ۱ الف	مرتبه ویژه	مرتبه منحصرًا ویژه
توصیف کلی مناطق مناسب	مناطق که هدف از برداشت هیدروگرافی اطلاع کلی از شکل بستر دریا است	مناطق که در آن فاصله مازه شناورها تا بستر برای نوع حمل و نقل سطحی مورد انتظار برای عبور، چندان مهم نیست	مناطق که در آن فاصله مازه شناورها تا بستر برای نوع حمل و نقل سطحی مورد انتظار برای عبور، چندان حیاتی نیست اما وجود عوارضی روی بستر نگرانی‌هایی را در رابطه با حمل و نقل ایجاد می‌کند	مناطق که برداشت دقیق فاصله مازه شناور تا بستر جهت ناوبری ضروری است	مناطق که معیار سختگیرانه‌ای برای حداقل فاصله مازه شناور از بستر و قابلیت مانور دارند
بیشترین مقدار مجاز THU	20 m + 10% of depth	5 m + 5% of depth	5 m + 5% of depth	2 m	1 m
بیشترین مقدار مجاز TVU	a = 1 m b = 0.023	a = 0.5 m b = 0.013	a = 0.5 m b = 0.013	a = 0.25 m b = 0.0075	a = 0.15 m b = 0.0075
قابلیت آشکارسازی عوارض	مشخص نشده	مشخص نشده	قابلیت آشکارسازی عوارض با ابعاد کمتر از ۲ متر در اعماق کمتر از ۴۰ متر، قابلیت آشکارسازی عوارض با ابعاد کمتر از ۱۰ درصد عمق در اعماق بیش از ۴۰ متر	قابلیت آشکارسازی عوارض با ابعاد کمتر از ۱ متر	قابلیت آشکارسازی عوارض با ابعاد کمتر از ۰٫۵ متر
قابلیت جستجوی عوارض	توصیه می‌شود اما الزامی نیست	توصیه می‌شود اما الزامی نیست	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۲۰۰٪
پوشش عمق‌یابی	۵٪	۵٪	≤۱۰۰٪	۱۰۰٪	۲۰۰٪

## ۵- نتایج و بحث

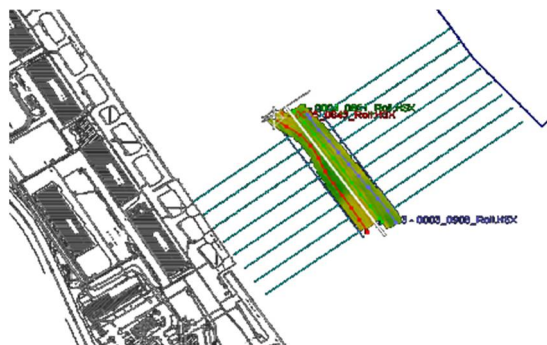
در این بخش، نتایج آزمایش کنترل کیفیت عمق‌یابی، مدل رقومی حاصل از عمق‌یابی تک پرتویی و چند پرتویی و اختلاف دو مدل رقومی حاصل از دو روش عمق‌یابی ارزیابی شده‌است.

### ۵-۱- آزمایش کنترل کیفیت و حذف داده‌هایی با درجه اطمینان کمتر

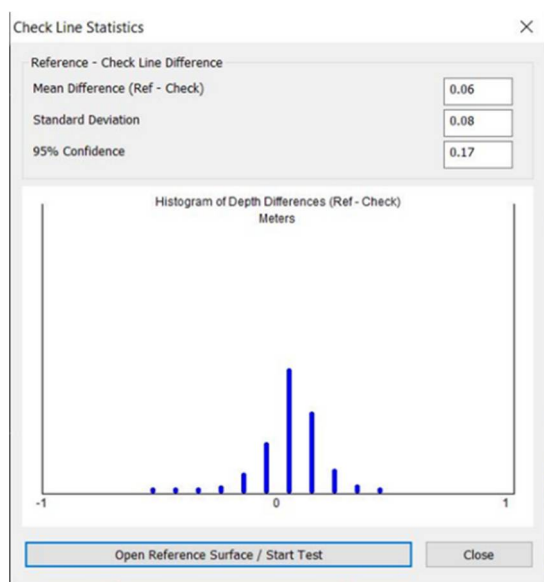
نتایج مربوط به آزمایش زاویه پرتو دقت عمق‌یابی چند پرتوی در محدوده‌های مختلف زاویه تابش (بیم) در بندر بوشهر با استفاده از سطح مرجع در جدول ۲ نمایش داده شده‌است. در این جدول، خروجی تست آماری برای هر بیم

از صفر تا ۴۵ درجه نشان داده شده‌است. اگر بیشترین عمق اندازه‌گیری شده (با احتساب جزرومد) را ۱۵ متر در نظر بگیریم، دقت آماری نتایج در تمام زوایای تابش تا ۴۵ درجه، با احتساب درجه اطمینان ۹۵٪، از ۰٫۱۷ متر تا ۰٫۲۷ متر می‌باشند که در بازه مرتبه ویژه استاندارد هیدروگرافی قرار دارد. بنابراین جهت بهبود کیفیت و کاهش حجم بالای داده، داده‌های مربوط به زوایای بالاتر که حاوی اطلاعات با درجه اطمینان کمتری بودند، حذف شدند. این کار کمک شایانی به حذف داده‌های پرت و افزایش سرعت در تولید نقشه و سایر آنالیزهای مکانی می‌کند. در شکل ۵ مقادیر آزمون آماری داده‌های چندپرتویی با درجه اطمینان ۹۵٪ در مقایسه با داده‌های تک پرتویی ارزیابی شده‌است. همچنین

۸ نتایج حاصله از چندین مقایسه آماری در نرم افزار هایپک و در مناطق مختلف محدوده پروژه آمده‌است.



شکل ۷: خطوط هیدروگرافی تک پرتویی در مقابل عمق یابی چند پرتویی در بندر بوشهر



شکل ۸: مقادیر استخراج شده از آزمایش آماری خطوط چک در نرم‌افزار Hypack (خطوط عمق‌یابی تک‌پرتویی در مقابل عمق‌یابی چندپرتویی)

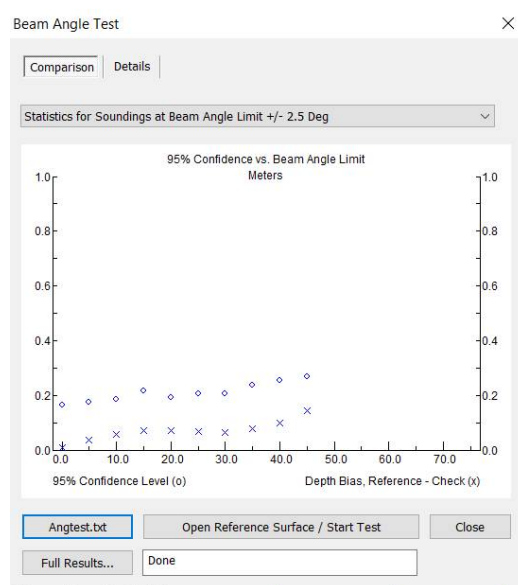
## ۵-۲- عدم قطعیت مسطحاتی، ارتفاعی و قابلیت آشکارسازی عوارض

شکل ۹ نمایشی از مقادیر ترسیمی عدم قطعیت‌های دو بعدی مسطحاتی، یک بعدی ارتفاعی و آشکارسازی عوارض برای هیدروگرافی چندپرتویی کانال بندر بوشهر را نشان می‌دهد. برای دستیابی به دقت‌های بالاتر در بیم‌های کناری داده‌های عمق‌یابی در بازه ۹۰ درجه سامانه چندپرتویی مورد استفاده قرار گرفته‌است. در نهایت با توجه به پارامترهای اولیه معرفی شده به نرم‌افزار هیدروگرافی انتظار می‌رود که نتایج عملیات هیدروگرافی برای عمق‌یابی چندپرتویی در حد دقت مرتبه ویژه شود.

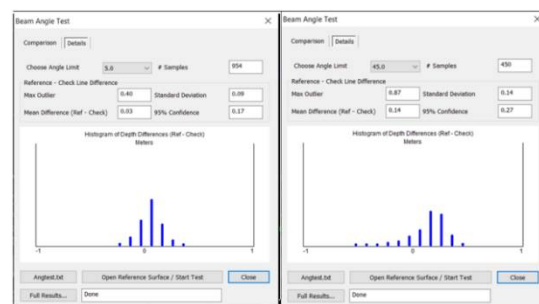
به‌عنوان نمونه، منحنی توزیع نرمال دو زاویه تست ۵ و ۴۵ درجه در شکل ۶ نمایش داده شده‌است.

جدول ۲- نتایج آماری آزمایش زاویه بیم (تابش) در نرم‌افزار Hypack

زاویه تابش	max outlier	Mean Diff	Std Dev	۹۵% Confidence
۰	۰.۴۰	۰.۰۱	۰.۰۸	۰.۱۷
۵	۰.۴۰	۰.۰۳	۰.۰۹	۰.۱۷
۱۰	۰.۴۰	۰.۰۶	۰.۱۰	۰.۱۹
۱۵	۰.۵۱	۰.۰۷	۰.۱۱	۰.۲۲
۲۰	۰.۶۸	۰.۰۷	۰.۱۰	۰.۱۹
۲۵	۰.۹۴	۰.۰۷	۰.۱۰	۰.۲۱
۳۰	۰.۹۴	۰.۰۷	۰.۱۱	۰.۲۱
۳۵	۰.۸۸	۰.۰۸	۰.۱۲	۰.۲۴
۴۰	۰.۹۴	۰.۱۰	۰.۱۳	۰.۲۵
۴۵	۰.۸۷	۰.۱۴	۰.۱۴	۰.۲۷

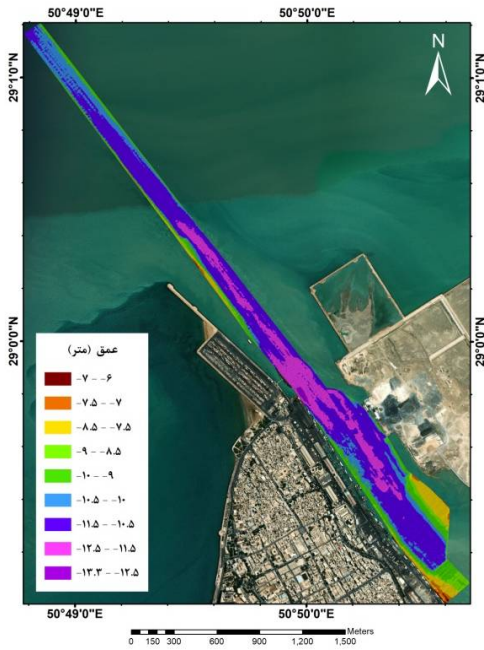


شکل ۵: مقادیر استخراج شده از آزمایش آماری در نرم‌افزار Hypack

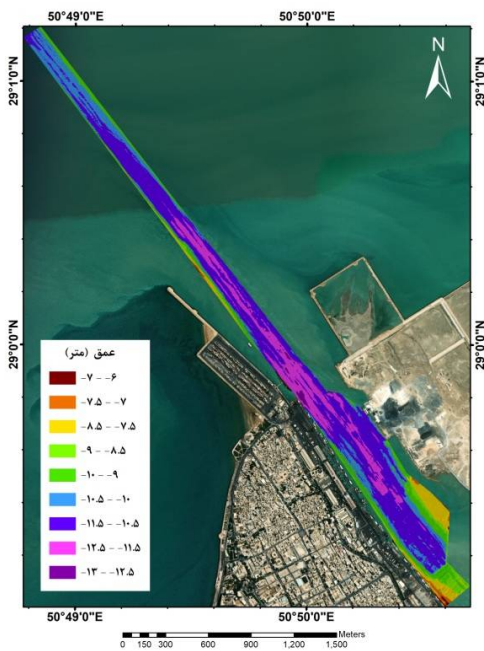


شکل ۶: مقادیر آماری آزمایش زاویه بیم سامانه چندپرتویی به صورت هیستوگرام در نرم‌افزار Hypack

شکل ۷ موقعیت انجام آزمایشات کنترل کیفیت در محدوده‌های از بندر بوشهر را نشان می‌دهد. در ادامه در شکل



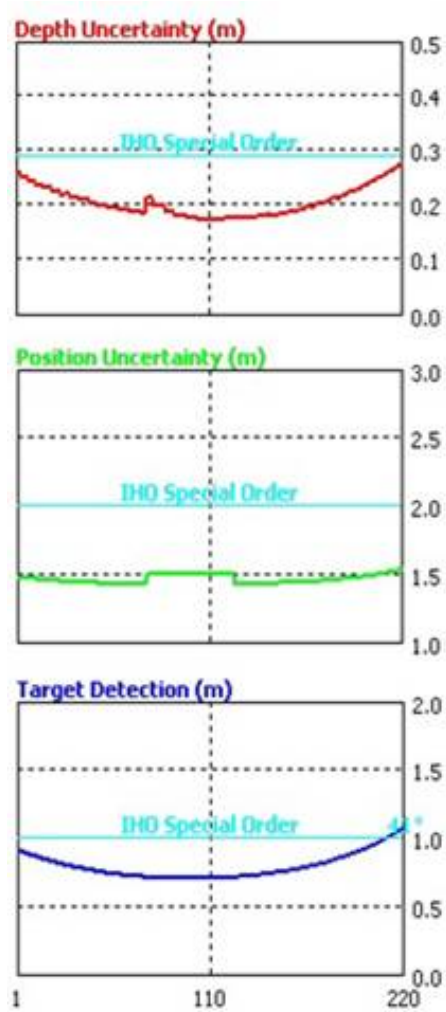
شکل ۱۰: اعماق حاصل از عمق یابی تک پرتویی در بندر بوشهر



شکل ۱۱: اعماق حاصل از عمق یابی چندپرتویی در بندر بوشهر

#### ۴-۵- میانگین اختلافات عمق یابی نقطه‌ای

به منظور محاسبه اختلاف عمق یابی نقطه‌ای در منطقه مذکور، داده‌های حاصل از عمق یابی تک پرتویی و چند پرتویی به روش درون یابی خطی با هم مقایسه شدند. در این روش، اعماق اندازه گیری شده از روش تک پرتویی بر روی سطح متراکم حاصل از روش چند پرتویی درون یابی شد و اختلاف ارتفاع نقاط متناظر با یکدیگر بدست آمد. میانگین



شکل ۹: نمودارهای عدم قطعیت در هیدروگرافی چند پرتویی بندر بوشهر

#### ۳-۵- نقشه مدل‌های رقومی حاصل از دو روش عمق یابی در بندر بوشهر

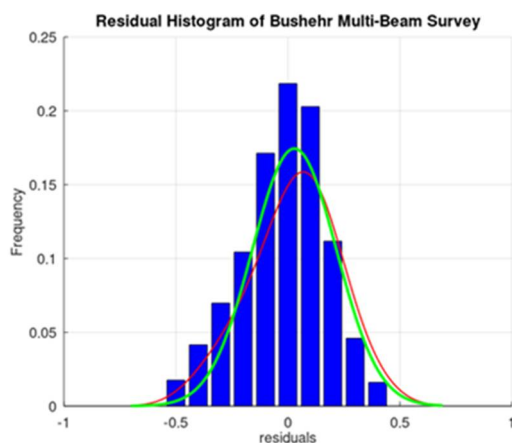
نقشه‌ی حاصل از عمق یابی تک پرتویی در شکل ۱۰ نمایش داده شده‌است. با توجه به شکل، بیشترین و کمترین عمق اندازه‌گیری شده در بندر بوشهر به ترتیب برابر با ۶,۰۵ و ۱۳,۲۷ متر می‌باشد و مرکز کانال عموماً عمق ۱۰,۵ تا ۱۳,۳ متر را نشان می‌دهد.

نقشه‌ی حاصل از عمق یابی چند پرتویی در شکل ۱۱ نمایش داده شده‌است. با توجه به شکل، بیشترین و کمترین عمق اندازه‌گیری شده در بندر بوشهر به ترتیب برابر با ۶,۱۱ و ۱۳ و مرکز کانال عموماً عمق ۱۰,۵ تا ۱۳ متر را نشان می‌دهد.

خلاف این یافته در تحقیق [۸] تایید شده است که به‌طور کلی، مختصات ارتفاعی در عمق‌یابی تک‌پرتویی کم‌عمق‌تر از عمق‌یابی چندپرتویی به‌دست آمده‌است. این مساله نشان می‌دهد که به‌طور قطعی نمی‌توان گفت که کدام روش (عمق‌یابی تک‌پرتویی یا چندپرتویی) عدد عمق را عمیق‌تر را اندازه‌گیری می‌کند و این مساله از یک منطقه به منطقه دیگر تفاوت دارد. با در نظر گرفتن حجم شبکه (اختلاف رسوب گذاری و شسته شده) و تقسیم آن بر مساحت کل منطقه، به اختلاف حجم  $0,04$  مترمکعب در هر متر می‌رسیم که نتایج حاصل از این تحقیق تایید کننده نتایج تحقیق [۸] در ناچیز بودن این اختلاف می‌باشد.

### ۵-۶- ویژگی‌های آماری اختلاف دو داده عمق‌یابی حاصل از عمق‌یابی تک‌پرتویی و چندپرتویی در بندر بوشهر

به منظور بررسی ویژگی‌های آماری اختلاف دو داده عمق‌یابی حاصل از عمق‌یابی تک‌پرتویی و چندپرتویی در بندر بوشهر، پس از حذف داده‌های پرت بهترین تابع توزیع نرمال قابل برازش به این داده‌ها تعیین گردید.



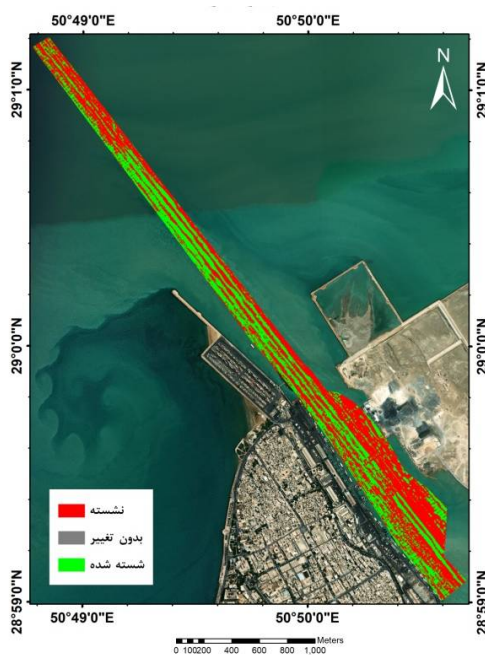
شکل ۱۳: برازش تابع نرمال به اختلاف بین داده‌های چندپرتویی و تک‌پرتویی در منطقه بوشهر

در شکل ۱۳ نمودار قرمز رنگ تابع برازش داده شده به داده‌ها و نمودار سبز رنگ تابع نرمال می‌باشد. مشاهده می‌شود که تابع نرمال با میانگین ۳ سانتی‌متر و انحراف معیار ۸ سانتی‌متر با فاصله اطمینان ۹۸ درصد به بهترین

اختلاف به‌دست آمده در بندر بوشهر برابر با  $0,03$  متر می‌باشد.

### ۵-۵- محاسبه اختلاف دو رویه‌ی رقومی حاصل از دو روش عمق‌یابی در بندر بوشهر

پس از محاسبه اختلاف ارتفاع نقطه‌ای دو روش عمق‌یابی، حال به محاسبه اختلاف سطح سه بعدی حاصل از دو روش عمق‌یابی در بندر بوشهر می‌پردازیم. سطح سه بعدی یا رویه‌ی رقومی از روش درونیابی با نقاط اطراف انجام شد. با توجه به اختلاف دو رویه حاصل از عمق‌یابی تک‌پرتویی و چندپرتویی (شکل ۱۲) در بندر بوشهر  $77835$  متر مکعب اختلاف حجم شسته شده<sup>۱</sup> در مساحت  $464511$  متر مربع داریم، همچنین  $98321$  متر مکعب حجم رسوبات نشسته<sup>۲</sup> در مساحت  $641219$  متر مربع داریم. به عبارتی دیگر یعنی در مساحت  $464511$  متر مربع عدد عمق‌یابی چندپرتویی عمیق‌تر (پایین‌تر) از عمق‌یابی تک‌پرتویی بوده و در مساحت  $641219$  متر مربع عدد عمق‌یابی چندپرتویی کم عمق‌تر (بالا‌تر) بوده‌است.



شکل ۱۲: اختلاف دو رویه حاصل از عمق‌یابی تک‌پرتویی و چندپرتویی در بندر بوشهر

بنابراین در بندر بوشهر به دلیل حجم و مساحت بیشتر رسوب نشسته، عموماً مختصات ارتفاعی در عمق‌یابی تک‌پرتویی عمیق‌تر از عمق‌یابی چندپرتویی به‌دست آمده‌است.

شکل تفاوت بین اعماق برداشت شده توسط سامانه‌های چندپرتوی و تک‌پرتوی را تقریب می‌زند.

## ۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

نگهداری و ایجاد بستر ایمن برای دریانوردی در بنادر و سواحل از مسایل مهم در حمل و نقل دریایی کشور است. به‌کارگیری تجهیزات پیشرفته عمق‌یابی نظیر عمق‌یاب چند پرتویی بسته به شرایط و توپوگرافی بستر دریا می‌تواند تا ۵۰ درصد حجم عملیات میدانی را کاهش دهد. بعلاوه، ایجاد روبه یکپارچه و پیوسته (با جزییات بیشتر) از بستر دریا که از اطلاعات برداشت شده دقیق سنجنده چند پرتویی استفاده می‌کند، بجای استفاده از روش‌های درونیایی و تخمین عمق (بین خطوط عمق‌یابی در برداشت‌های تک پرتویی)، کمک بسیار بزرگی به محاسبات دقیق لایروبی، رسوب‌گذاری و نگهداری مناطق ساحلی می‌نماید. هرچند در این میان، با توجه به حذف خطاها و بازه‌های اطمینان برداشت‌هایی با زاویه تابش وسیع‌تر در سنجنده چند پرتویی، کنترل و بازبینی دستورالعمل‌های

دقیق‌تری را می‌طلبد. در نهایت در منطقه مورد مطالعه، اعماق حاصل از عمق‌یابی تک پرتویی عمیق‌تر از عمق‌یابی چندپرتویی به‌دست آمده‌است با این حال با توجه به تغییرات مداوم بستر دریا و نوسانات جزر و مدی، اختلافات به‌دست آمده در اعماق ناچیز است. با توجه به لزوم ارزیابی ادواری رسوب‌گذاری در بنادر و کانال‌های مهم ایران، تحقیقات آتی می‌تواند در جهت محاسبه نرخ رسوب‌گذاری با استفاده از سنجنده چند پرتویی جهت پوشش حداکثری و پیوسته بستر باشد.

## سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از قرارداد انجام هیدروگرافی بنادر استان بوشهر فیما بین معاونت امور دریایی سازمان بنادر و دریانوردی و شرکت دریا ترسیم می‌باشد. نویسندگان مقاله مراتب قدردانی و تشکر خود را از معاونت دریایی سازمان بنادر و دریانوردی که انجام این پژوهش را میسر نموده‌است، اعلام می‌دارند. همچنین از داوران ارجمند ناشناس که با نظرات تخصصی خود به ارتقا کیفیت این تحقیق کمک کردند، کمال تشکر را دارند.

## مراجع

1. Tajfirouz, B., et al., *Volume and Rate Estimations of Sedimentation in Amirabad Port During Period 2018-2021*. Journal of Geomatics Science and Technology, 2022. **11**(3): p. 115-123.
2. Motallebi Korbekandi, M.A. and A. Zare Zardeyni, *Strategies for the Development of Maritime Economy in line with the Goals of a Resistive Economy*. Defense Economics, 2022. **6**(22): p. 53-81.
3. Saeidi, V., et al., *Water depth estimation from Sentinel-2 imagery using advanced machine learning methods and explainable artificial intelligence*. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2023. **14**(1): p. 2225691.
4. Bandini, F., et al., *Technical note: Bathymetry observations of inland water bodies using a tethered single-beam sonar controlled by an unmanned aerial vehicle*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 2018. **22**(8): p. 4165-4181.
5. Pike, S., et al., *Leveraging Commercial High-Resolution Multispectral Satellite and Multibeam Sonar Data to Estimate Bathymetry: The Case Study of the Caribbean Sea*. Remote Sensing, 2019. **11**(15): p. 1830.
6. Costa, B.M., T.A. Battista, and S.J. Pittman, *Comparative evaluation of airborne LiDAR and ship-based multibeam SoNAR bathymetry and intensity for mapping coral reef ecosystems*. Remote Sensing of Environment, 2009. **113**(5): p. 1082-1100.
7. Ghahfarokhi, S.S., *Studying Methods for Improving the Quality of Multi-Beam Echo Sounder Data*, in *School of Surveying and Geospatial Engineering*. 2020, University of Tehran: Tehran, Iran.
8. Pratomo, D. and I. Saputro. *Comparative analysis of singlebeam and multibeam echosounder bathymetric data*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. IOP Publishing.
9. Parnum, I., et al. *A comparison of single beam and multibeam sonar systems in seafloor habitat mapping*. in *Proc. 3rd Int. Conf. and Exhibition of Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results, Nafplion, Greece*. 2009.
10. Zhi, H., et al., *Predictive mapping of seabed substrata using high-resolution multibeam sonar data: A case study from a shelf with complex geomorphology*. Marine Geology, 2014. **357**: p. 37-52.

۱۱. Sotoudehpour, A., A. Madadi, and S. Asghari Saraskanrood, *Geomorphological Monitoring of Bushehr Port Coastline*. Geographical Researches, 2020. **35**(2): p. 177-187.
۱۲. Gueriot, D., et al. *The patch test: a comprehensive calibration tool for multibeam echosounders*. in *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37158)*. 2000. IEEE.
۱۳. Whittaker, C., S. Sebastian, and D. Fabre, *Multibeam sonar performance analysis value and use of statistical techniques*. The International Hydrographic Review, 2011.
۱۴. Organization, I.H., *International Hydrographic Organization Standards for Hydrographic Surveys*. 2020, International Hydrographic Organization: Monaco.
۱۵. Rob Hare, C., B. Eakins, and C. Chris Amante, *Modeling bathymetric uncertainty*. 2011.
۱۶. Hare, R., *Depth and position error budgets for multibeam echosounding*. The International Hydrographic Review, 1995.