دوفصلنامهٔ هیدروفیزیک

دورهٔ دهم، شمارهٔ دوم (پاییز و زمستان ۱۴۰۳)؛ صفحات ۱۴۵-۱۲۹

مقالهٔ پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1403.10.2.9.3

درصد همانندی: ۱٪

شبیه‌سازی کارکرد سونار با بهره‌گیری از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره AHP

رضا خواجوی[*۱]، محمد واحدیان[۲]، آزاد وطن‌دوست[۳]، جلیل طوسی‌فر[۴]

[*۱] نویسنده مسئول، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران. rezakhajavi@um.ac.ir

[۲] گروه برق، دانشگاه صنعتی سجاد مشهد، ایران. vahedianhamed@gmail.com

[۳] دانشکده مهندسی مکانیک و هوا فضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران. azad.vatandoust@yahoo.com

[۴] گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران. jalil.toosifar@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۰۸/۲۲ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۰۸/۲۷

چکیده

سامانه‌های سونار (فعال و غیرفعال) با بهره‌گیری از امواج صوتی انتشار یافته از سوی شناورهای سطحی و زیرسطحی، وظیفه آشکارسازی، شناسایی، و مکان‌یابی آنها را عهده‌دارند. شبیه‌ساز سونار، نرم‌افزاری است که عملکرد سونار واقعی را بازسازی می‌کند، و علاوه بر کارکردهای آموزشی، در فرآیندهای تحقیق و توسعه سامانه‌های دفاعی، سبب کاهش هزینه‌ها شده و همچنین در طراحی عملیات و بازنمایی سناریوهای نبرد به کار می‌آید. در فرآیند پیاده‌سازی مدل شبیه‌ساز سونار، می‌بایست دو مرحله بازسازی سیگنال مشاهداتی و وارون‌سازی (جهت بازنمایی هدف) منظور گردد. مدلسازی این دو مرحله به صورت جداگانه و یا یکپارچه، با روش‌های مختلف شدنی است. در این پژوهش، با توجه به نبود پایگاه داده‌های سیگنال‌های مشاهداتی برای انواع شناورها از سویی، و نیاز به انجام شبیه‌سازی در لحظه و بلادرنگ، روشی جدید در شبیه‌سازی عملکرد سونار غیرفعال با الهام‌گیری از شیوه بهینه‌یابی و تصمیم‌گیری AHP، که در دانش مدیریت توسعه یافته، پیشنهاد شده است، که با نگاشت نظر و تجربه خبرگان عملیات سوناری بر روی شبکه‌ای از معیارها و گزینه‌های تأثیرگذار بر روی یکدیگر، فرآیند شبیه‌سازی را پیاده‌سازی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: روش AHP، روش تصمیم‌گیری چندمعیاره، سونار، شبیه‌سازی

۱. مقدمه

طراحی و پیاده‌سازی شبیه‌ساز نرم‌افزاری سیگنال سونار، کاربردهای مختلفی همانند موارد زیر را در حوزه صنعت دفاعی دارد، و ضمن صرفه‌جویی فراوان در زمان و هزینه اجرای پروژه‌های دفاعی، امکان به‌کارگیری در کاربردهای غیرنظامی را نیز فراهم می‌آورد:

۱. ارزیابی تأثیرات چشمه و محیط بر کارکرد سونار: تحلیل اثرات محیط غیرخطی و غیرهمگن دریا بر پدیده انتشار امواج، و بررسی نحوه کارکرد تجهیزات در شرایط مختلف محیطی و زمان‌ها و مکان‌های مختلف (مخصوصاً در آب‌های کم عمق مانند خلیج فارس) از نیازهای راهبردی صنایع دفاعی به شمار می‌آیند [۱].

۲. ارزیابی سامانه‌های سونار: ارزیابی سیستم‌های مختلف سونار مانند سیستم آرایه فازی، MIMO [۱]، سیستم‌های سونار شناختی [۲] و ...، بررسی عملکرد سامانه‌های سونار در شرایط مختلف و سناریوهای گوناگون عملیاتی، شناسایی نواحی قابل آشکارسازی، تخمین فاصله کارکرد سونارها، بررسی میزان تاثیر خطاهای انسانی، دستگاهی و ... بر عملکرد پایدار سامانه‌های سونار، و کاربردهای مختلف دیگر با بهره‌گیری از شبیه‌ساز حسگر سونار امکان‌پذیر است. به کمک چنین ارزیابی می‌توان درباره کاستی‌ها و نیازمندی‌های کارکردی حسگرها، سامانه‌ها و آرایش‌های سونار اظهارنظر، و جهت بهبود آنها، تصمیم‌گیری و اقدام مناسب نمود.

۳. طراحی حسگرها و سامانه‌های سونار: بهبود عملکرد سیستم‌های سونار نیازمند انجام فرآیند طراحی است؛ این فرآیند در روندی تکراری و با انجام آزمون و خطاهای پی‌درپی صورت می‌گیرد. انجام چنین آزمون‌های تکراری با بهره‌گیری از شبیه‌ساز سونار انجام‌پذیر است.

۴. زیرساخت برای طراحی و بهبود روش‌ها و الگوریتم‌های عملیات زیرآبی: آشکارسازی، مکان‌یابی و ردگیری شناورها و زیرشناورها، همچنان از چالش‌های مهم دانش اکتشاف زیرسطحی است و رویه‌ها و الگوریتم‌های این حوزه پژوهشی، پیوسته در حال نو به نو شدن و به‌روزآوری می‌باشند. توسعه این فناوری‌های نرم‌افزاری اکتشافی نیازمند بررسی‌ها و ارزیابی‌های عددی مکرر به کمک ابزارهای شبیه‌سازی است.

۵. زیرساخت جهت به‌کارگیری در شبیه‌سازهای نبرد زیرآبی: طراحی و پیاده‌سازی شبیه‌ساز سیگنال سونار، پیش‌نیاز اساسی برای سامانه‌های آموزشی، پژوهشی و عملیاتی شبیه‌ساز نبرد دریایی و زیردریایی است.

این مقاله صرفاً به شبیه‌سازی عملیات آشکارسازی چشمه می‌پردازد و روشی را در شبیه‌سازی معرفی می‌کند که با توجه به مقادیر پارامترهای چشمه، محیط، سونار و حامل، احتمال حضور شناور هدف را تعیین نماید.

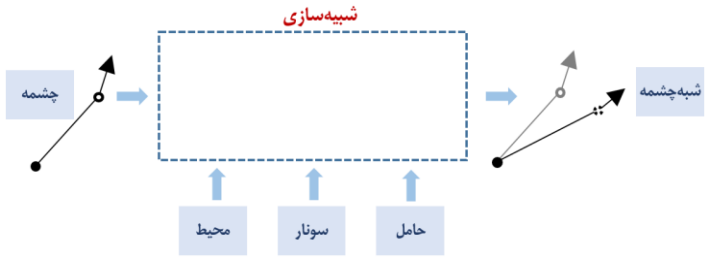
۲. مواد و روش‌ها

در شکل ۱-الف، روند کلی فرآیند عملیات سونار نمایش داده شده است. مطابق این روند، شناور هدف (در این مقاله از آن به عنوان چشمه نام برده می‌شود) که در فاصله و راستای مشخصی از شناور خودی (*حامل*) قرار دارد و با سرعتی مشخص در مسیری معلوم در حال حرکت است، سیگنالی را به عنوان *سیگنال چشمه* [۳] تولید می‌کند. این سیگنال با گذر از محیط بین چشمه و حامل، دچار تغییر شده و دامنه آن کاهش می‌یابد؛ بدین ترتیب، در محل حامل، *سیگنال کاهیده* [۴] دریافت می‌شود. این سیگنال توسط سامانه حسگر سونار دریافت شده، و بسته به ویژگی‌های سامانه سونار، *سیگنال مشاهداتی* را در اختیار کاربر سونار (به عنوان حامل) قرار می‌دهد. اکنون، کاربر سونار، پس از دریافت این سیگنال مشاهداتی (به عنوان معلول)، بر آن است تا ویژگی‌های چشمه (یعنی علت این سیگنال صوتی) را بازیابی کند و برآوردی از پارامترهای چشمه (شبه‌چشمه) را به دست آورد. بدین ترتیب، کاربر سونار (حامل) با یک مسأله وارون [۵] (در چنین مسایلی، بر خلاف مسایل مستقیم [۶]، علت مجهول و معلول معلوم است) روبروست، و برای حل این مسأله وارون، از عملیات وارون‌سازی (که به صورت

مسأله بهینه‌سازی/ بهینه‌یابی[۷] رابطه‌سازی می‌شود) بهره می‌جوید [۲].

در فرآیند شبیه‌سازی عملیات سونار، علاوه بر پیاده‌سازی عملیات وارون‌سازی، می‌بایست نحوه شکل‌گیری سیگنال مشاهداتی (و یا تأثیر آن بر عملیات وارون‌سازی) هم بر مبنای پارامترهای چشمه، محیط و سونار منظور شود. کل این فرآیند، مطابق آن چه در شکل ۱-ب نشان داده شده است، شبیه‌سازی نام دارد.

(الف)



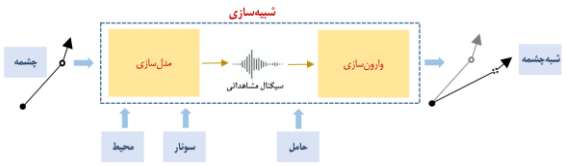
(ب)

شکل ۱. (الف) فرآیند عملیات سونار؛ (ب) فرآیند شبیه‌سازی که ورودی‌های آن پارامترهای چشمه، محیط، سونار و حامل، و خروجی آن، برآوردی از چشمه (شبه‌چشمه) است.

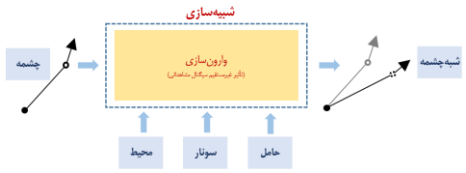
تا کنون، روش‌های بسیار متنوعی برای شبیه‌سازی عملکرد سونار آزموده شده است [۳-۶]؛ در یک دسته‌بندی کلی، این روش‌ها از دو راهکار مختلف، همانند شکل ۲، بهره می‌جویند:

۱. پیاده‌سازی دومرحله‌ای: در این راهکار، دو کارویژه، به طور جداگانه و به صورت سری و پشت سر هم پیاده‌سازی می‌شوند. بازسازی سیگنال مشاهداتی به صورت یک مسأله مستقیم (علت (چشمه) معلوم و معلولِ (سیگنال مشاهداتی) مجهول) و با بهره‌جویی از انواع روش‌های مدل‌سازی صورت می‌گیرد. معمولاً در این روش‌ها، با حل معادله دیفرانسیل انتشار موج، سیگنال کاهیده به دست می‌آید و سپس با اعمال فیلتر معادل سونار بر روی آن، سیگنال مشاهداتی بازسازی می‌شود. گفتنی است حل معادله دیفرانسیل می‌تواند در حوزه زمان یا بسامد انجام گیرد. معادله معروف سونار [۷]، شکل ساده‌شده‌ای از حل معادله دیفرانسیل در حوزه بسامد است که صرفاً دامنه بسامد غالب را در نظر می‌گیرد. پس از بازسازی سیگنال مشاهداتی، در مرحله دوم، وارون‌سازی با بهره‌گیری از انواع روش‌های بهینه‌سازی/ بهینه‌یابی انجام پذیرفته و هدف شناسایی می‌شود.

۲. پیاده‌سازی ترکیبی: در این راهکار، پیاده‌سازی دو کارویژه، با در نظر گرفتن ساختار ریاضیاتی مناسب، به صورت ترکیبی انجام می‌پذیرد. از آن جا که هسته اصلی فرآیند شبیه‌سازی، وارون‌سازی است، و سیگنال مشاهداتی هم عملاً در فرآیند بهینه‌سازی به کار می‌آید، می‌توان هسته اصلی پیاده‌سازی ترکیبی شبیه‌سازی را عملیات وارون‌سازی (بهینه‌سازی/ بهینه‌یابی) دانست. در این راهکار، به جای در نظر گرفتن مستقیم سیگنال مشاهداتی از طریق بازسازی آن بر پایه پارامترهای چشمه و محیط و سونار، اثر آن به صورت غیرمستقیم در فرآیند وارون‌سازی لحاظ می‌گردد.



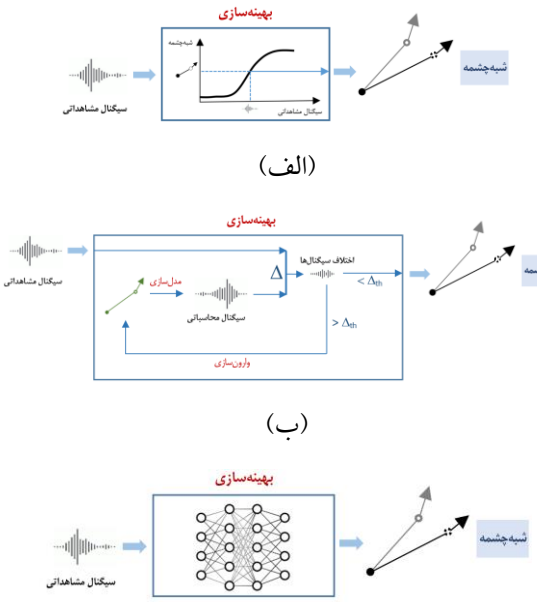
(الف)



(ب)

شکل ۲. پیاده‌سازی شبیه‌سازی: (الف) روش دومرحله‌ای، و (ب) روش ترکیبی

روش دومرحله‌ای، از آن رو که اثر چشمه و محیط و سونار را به صورت مستقیم و از طریق بازآفرینی سیگنال مشاهداتی منظور می‌کند، در مقایسه با روش‌های ترکیبی از دقت بیشتری برخوردار است؛ اما از آن جا که این روش مستلزم حل مسأله مستقیم جهت مدل‌سازی سیگنال مشاهداتی، و به دنبال آن، انجام عملیات وارون‌سازی است، بسیار زمان‌بر می‌باشد. مدل‌سازی دقیق سیگنال مشاهداتی، نیازمند حل عددی معادله دیفرانسیل انتشار موج است که فرآیندی پرهزینه است، مگر آن که از روش‌های تقریبی استفاده شود. از این رو، در این مقاله، دو بخش اساسی فرآیند شبیه‌سازی (یعنی: ۱- بازسازی سیگنال مشاهداتی، و ۲- وارون‌سازی) با روش ترکیبی پیاده‌سازی می‌شود، بدین صورت که بخش نخست در دل بخش دوم به صورت ضمنی گنجانده می‌شود. بدین ترتیب، روش ترکیبی شبیه‌سازی در واقع یک مسأله بهینه‌سازی است که تأثیر سیگنال مشاهداتی در آن با توجه به پارامترهای چشمه، محیط و سونار لحاظ می‌شود. برای حل این مسأله بهینه‌سازی (وارون‌سازی)، سه نوع ساختار ریاضیاتی، مطابق شکل ۳، پیشنهاد شده است، که در ادامه به اختصار معرفی می‌شوند:



شکل ۳. بهینه‌سازی بر مبنای (الف) تابع؛ (ب) بهینه‌سازی؛ (ج) شبکه

الف. تابع: در مسأله وارون‌سازی، ورودی، سیگنال مشاهداتی و خروجی پارامترهای چشمه است. می‌توان ارتباط بین این ورودی و خروجی را با استفاده از یک تابع برقرار کرد. به عنوان نمونه، در فرآیند آشکارسازی چشمه، کاربر سونار عملاً از یک تابع برازش دودویی[۸]، با توجه به آستانه آشکارسازی DT [۹]، بهره می‌جوید (از منظر ریاضیاتی، این تابع برازش، پیشتر بر مبنای حل یک مسأله بهینه‌سازی، و با پیدا کردن شکل تابع به منظور پوشش‌دهی بهینه داده‌های آزمون، آماده شده است). البته می‌توان به جای این تابع دودویی، تابع احتمال آشکارسازی (به صورت عددی بین صفر و یک) را تعیین کرد و به کار برد. بدین ترتیب، با استفاده از تابع دسته‌یاب[۱۰] بر مبنای ورودی سیگنال مشاهداتی، احتمال آشکارسازی چشمه (و تعلق آن به یکی از دو دسته وجود یا عدم وجود) مشخص می‌شود.

ب. بهینه‌سازی کلاسیک: در روش بهینه‌سازی، کمینه مقدار تابع هدف با شروع از یک حدس اولیه x_0، و طی فرآیندی تکراری (مانند روش نیوتن) پیدا می‌شود. در مسأله وارون‌سازی، تابع هدف، برابر اختلاف پاسخ محاسباتی با پاسخ مشاهداتی است. با شروع از یک حدس اولیه برای پارامتر چشمه، مدل‌سازی (حل مسأله مستقیم) انجام می‌گیرد تا پاسخ محاسباتی به دست آید. سپس اختلاف پاسخ‌های

محاسباتی و مشاهداتی تعیین شده، و در صورتی که این اختلاف بیش از حد مجاز باشد، مقدار پارامتر اولیه چشمه تغییر می‌کند و مدل‌سازی مجدداً تکرار می‌شود تا پاسخ محاسباتی جدید به دست آید؛ این فرآیند تا دستیابی به کمترین اختلاف، تکرار و دنبال می‌شود. بنابراین، مطابق شکل ۳-ب، بهینه‌سازی در این شیوه طی یک فرآیند تکراری حل مستقیم- وارون انجام می‌پذیرد.

می‌توان گفت که بیشتر عملیات انجام گرفته توسط کاربر سونار، در واقع و عملاً از نوع حل کلاسیک مسأله بهینه‌سازی محلی است؛ برای نمونه، سمت چشمه معمولاً با بهره‌گیری از آرایه‌ای از هیدروفن‌ها و بر پایه زمان رسید موج صوتی به آنها (به عنوان ورودی یا همان سیگنال مشاهداتی) در چارچوب یک مسأله بهینه‌سازی محلی تعیین می‌شود [۸]. همچنین، کاربر سونار، با بهره‌گیری از تحلیل Demon [۱۱] و طی یک فرآیند تکراری آزمون و خطا، به دنبال شمار میل‌چرخان‌ها [۱۲] و بسامد دورانی مناسب می‌گردد به طوری که طیف‌نمای سیگنال محاسباتی بر پایه این پارامترها، کمترین اختلاف را با طیف‌نمای سیگنال مشاهداتی داشته باشد، و بدین ترتیب، سرعت شناور هدف را تعیین می‌نماید. برای یافتن فاصله و مسیر چشمه نیز، کاربر سونار، با بهره‌گیری از روش TMA [۱۳]، یک مسأله بهینه‌سازی را با کمینه کردن تابع خطا (اختلاف بردار حرکتی مشاهداتی و محاسباتی)، طی یک فرآیند تکراری آزمون و خطا، به صورت تصویری و چشمی حل می‌کند. همچنین، کاربر سونار جهت شناسایی و دسته‌یابی [۱۴] شناور هدف، معمولاً با بهره‌گیری از تحلیل بسامدی و پردازش Demon، طیف یا نشانگان [۱۵] چشمه را به دست آورده، با نشانگان شناورهای موجود در بانک اطلاعاتی مقایسه می‌کند، و شناور با کمترین اختلاف نشانگانی با طیف چشمه را به عنوان پاسخ شناسایی گزارش می‌دهد. بدین ترتیب، در این‌جا نیز بر پایه کمینه‌یابی چشمی توسط کاربر سونار، عملاً یک مسأله بهینه‌یابی حل شده است. از آن جا که پاسخ مناسب از میان فهرست محدودی از گزینه‌ها انتخاب می‌شود، مسأله از گونه بهینه‌یابی و نه بهینه‌سازی است.

ج. شبکه: ساختار مناسب دیگر که ارتباط‌دهنده ورودی سیگنال مشاهداتی و خروجی شبه‌چشمه است، ساختار شبکه می‌باشد (شکل ۳-ج). شبکه متشکل از گره‌ها و یال‌های پیونددهنده میان آنهاست. شبکه، در واقع، مدلی از مغز انسان است که بر پایه تجربه (یعنی خوراندن مجموعه‌ای از ورودی‌ها و خروجی‌ها)، ارتباطات میان گره‌ها وزن‌دهی می‌شوند. می‌توان گفت که در این جا، عملاً به جای یک تابع، یک شبکه برازش شده است، و به جای تعیین ضرایب تابع، وزن یال‌های شبکه مشخص می‌گردد. ساختاردهی شبکه، از منظر گفتمان بهینه‌سازی کلاسیک، معادل ساماندهی شکل یا ساختار تابع هدف است. به عبارت دیگر، هر ساختاری از شبکه، معادل یک تابع هدف پنهان غیرصریح G می‌باشد. استفاده از ساختار شبکه، به جای تابع، برای مسایل پیچیده‌تر مناسب‌تر است.

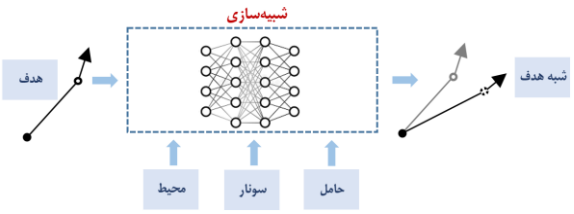
ساختار شبکه، به عنوان مدلی از مغز انسان را به دو صورت می‌توان پیاده‌سازی کرد، که در ادامه مختصراً معرفی می‌شوند.

ج-۱. شبکه عصبی مصنوعی: در این روش، ساختاری از سلول‌های عصبی مصنوعی سازمان می‌یابد؛ سپس شبکه مصنوعی با خوراندن مجموعه‌ای از داده‌های آزمون به آن، طی فرآیند آموزش شبکه، وزن‌دهی می‌شود [۹-۱۳]. لازم به ذکر است که انواع مختلفی از سلول‌های عصبی مصنوعی و آرایش‌های مختلفی از ارتباط آنها با یکدیگر (معماری‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی) پیشنهاد شده است که می‌توان از آنها بهره جست.

ج-۲. شبکه خبرگانی [۱۶]: در این روش، تلاش می‌شود که ساختار شبکه مغزی یک (یا چند) خبره در حل مسأله، تصویر و نگاشت شود، و وزن‌دهی آن (که طی سالیان دراز و بر مبنای تجربه خبره صورت گرفته است) استخراج گردد.

با توجه به پیچیدگی هر دو فرآیند مدل‌سازی و وارون‌سازی، به نظر می‌رسد که ساختار مناسب برای پیاده‌سازی ترکیبی فرآیند شبیه‌سازی، ساختار شبکه باشد (شکل ۴). از آن جا که داده‌های آزمون به شمار کافی برای آموزش شبکه عصبی در

دسترس نیست، ساختار مناسب برای پیاده‌سازی روش ترکیبی، شبکه خبرگانی می‌باشد.



شکل ۴. شبیه‌سازی بر مبنای شبکه

شبکه‌های خبرگانی در دانش تصمیم‌گیری[۱۷] توسعه یافته‌اند. تصمیم‌گیری فرآیندی است که براساس قضاوت خبرگانی، مقایسه و تجزیه و تحلیل صورت می‌گیرد. در تصمیم‌گیری‌های پیچیده، نیازمند روشی هستیم که بتواند با در نظر گرفتن اهمیت نسبی معیارها، هر گزینه را بر اساس معیارهای مختلف ارزش‌گذاری کند. روش به کار گرفته شده برای این کار، که طی دهه‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته و در تصمیم‌گیری‌های پیچیده، جایگزین شیوه کلاسیک بهینه‌سازی شده است، روش تصمیم‌گیری چندمعیاره[۱۸] می‌باشد. در شیوه‌های مختلف پیشنهاد شده برای این روش، معیارهای برآورده شدن هدف شناسایی و وزن‌دهی، و سپس بر اساس آنها، گزینه‌های مختلف ارزیابی و اولویت‌بندی می‌شوند. لازم به ذکر است که معیار، آن چیزی است که بر اساس آن انتخاب صورت می‌گیرد؛ مثلاً در انتخاب یک مدیر برای سازمان، معیارهای تصمیم‌گیری عبارت از تحصیلات، پیشینه، شخصیت و ... می‌باشند. گزینه، آن چیزی است که از میان آن انتخاب انجام می‌پذیرد؛ مثلاً در انتخاب یک مدیر، نامزدهای موجود همان گزینه‌ها هستند.

بر این اساس، می‌توان برای شبیه‌سازی، از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و شبکه‌های خبرگانی، که گونه‌ای بهینه‌یابی هستند، بهره جست. حل مسأله شبیه‌سازی بر پایه شبکه خبرگانی شامل سه مرحله: (۱) ساختاردهی شبکه، (۲) وزن‌یابی شبکه، و (۳) بهینه‌یابی است، که در ادامه معرفی می‌شوند.

الف. ساختاردهی شبکه: شبکه متشکل از گره‌ها و یال‌های پیونددهنده آنهاست. در شبکه خبرگانی، گره‌ها عبارت از معیارها و گزینه‌ها هستند.

معیارها همان پارامترهای ورودی موثر بر هدف می‌باشند. در واقع، تابع هدف، ترکیب وزن‌داری از معیارهاست. برای نمونه، درمسأله شبیه‌سازی این مقاله، معیارها می‌توانند: شدت چشمه، بسامد غالب چشمه، شوری، دما، فاصله، و ... تعریف شوند که در فرامعیارهای: چشمه، محیط، سونار، و حامل قابل جایابی و دسته‌بندی‌اند. این معیارها در فرآیند پرسش از خبرگان تعیین می‌شوند.

هر گزینه، مقادیر مشخصی از معیارهاست. در روش‌های تصمیم‌گیری و شبکه خبرگانی، شمار گزینه‌ها معدود است، و هدف آن است که گزینه بهینه از میان آنها یافته شود؛ از این رو، روش‌های *شبکه خبره – پایه* از گونه بهینه‌یابی و نه بهینه‌سازی هستند. لذا باید فهرستی از گزینه‌ها تهیه گردد، تا طی فرآیند بهینه‌یابی، اولویت آنها مشخص گردد. با توجه به این که هر گزینه عبارت از مقادیری برای معیارهاست، مقدارهای ممکن مربوط به هر معیار باید محدود و معدود باشند. بر این اساس، مناسب است که مقادیر هر معیار به صورت کیفی و نه کمّی (عددی) تعیین شوند. برای نمونه، برای معیار فاصله که عملاً می‌تواند بیشمار مقدار عددی را در بازه از صفر تا چند ده کیلومتر بپذیرد، تنها تعداد معدودی مقدار کیفی (مثلاً سه مقدار کیفی کم، متوسط و زیاد) تعریف می‌شود. استفاده از مقادیر کیفی، ضمن معدود کردن شمار گزینه‌ها و تبدیل مسأله بهینه‌سازی به یک مسأله بهینه‌یابی و تصمیم‌گیری، از منظر فهم ذهنی خبره نیز بهتر و مناسب‌تر است.

یال‌ها ارتباط‌دهنده میان گره‌ها و شامل سه نوع ارتباط: (۱) معیارها با هم، (۲) گزینه‌ها با هم، و (۳) معیارها با گزینه‌ها، هستند.

ارتباطات میان معیارها در دو دسته: (۱) سلسله‌مراتبی[۱۹]، و (۲) اندرکنشی[۲۰] جای می‌گیرند. بر اساس ارتباطات سلسله‌مراتبی، معیارها در چند خوشه[۲۱] یا فرامعیار (معیار اصلی) دسته‌بندی

می‌شوند. این خوشه‌بندی از آن رو انجام می‌گیرد که با ساختار ذهنی خبره هماهنگ‌تر است و مقایسه میان فرامعیارها و معیارهای درون هر خوشه، برای خبره بسیار آسان‌تر از مقایسه یکجای همه معیارها با یکدیگر است. گاه از معیارهای درون هر خوشه با عنوان زیرمعیار یاد می‌شود. البته در واقع باید گفت که ارتباط سلسله‌مراتبی را نمی‌توان عملاً به عنوان پیوند شبکه‌ای و یال در نظر گرفت؛ بلکه این نوع از ارتباط، بیشتر یک دسته‌بندی به حساب می‌آید تا ارتباطی حاکی از وابستگی و تأثیر متقابل. در نوع دوم ارتباطات، یعنی ارتباطات اندرکنشی، تأثیرگذاری و وابستگی معیارها به یکدیگر در نظر گرفته می‌شود.

ارتباط معیارها با گزینه‌ها، نشان‌دهنده تأثیرگذاری گزینه‌ها (یعنی مقدار و اندازه معیارها) بر معیارهاست. در نظر گرفتن این نوع ارتباط، عملاً وزن معیارها را وابسته به مقدار گزینه‌ها می‌کند؛ به عبارت دیگر، با در نظر گرفتن این نوع ارتباط، تابع هدف پنهان شبکه غیرخطی خواهد شد. همچنین، در نظر گرفتن رابطه میان گزینه‌ها بدان معناست که ارزیابی یک گزینه تحت تاثیر انتخاب یا عدم انتخاب گزینه‌های دیگر قرار می‌گیرد.

در دانش تصمیم‌گیری، بسته به نحوه منظور کردن ارتباطات فوق‌الذکر، دو ساختار عمده معروف برای شبکه خبرگانی پیشنهاد شده است [۱۴]:

۱. ساختار شبکه سلسله‌مراتبی، که در روش AHP [۲۲] مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۵-الف).

۲. ساختار شبکه اندرکنشی، که در روش ANP [۲۳] مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۵-ب).

در روش AHP، تنها ارتباطات سلسله‌مراتبی معیارها در نظر گرفته می‌شود؛ اما در روش ANP ، افزون بر ارتباطات سلسله‌مراتبی معیارها، ارتباطات اندرکنشی معیارها و گزینه‌ها با هم، و نیز معیارها و گزینه‌ها (پیکان‌های قرمزرنگ در شکل ۵-ب)، منظور می‌گردد. بنابراین، تابع هدفِ پنهان G در AHP از نوع خطی:

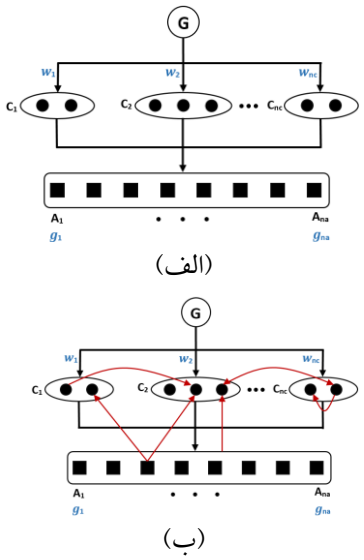
$$G = G_L(\boldsymbol{C}.\boldsymbol{w}) = \boldsymbol{w}\,\boldsymbol{C} = \boldsymbol{w}_1\boldsymbol{C}_1 + \cdots + \boldsymbol{w}_{nc}\boldsymbol{C}_{nc}$$

$$= [w_{11} \quad w_{12} \quad \cdots] \begin{Bmatrix} c_{11} \\ c_{12} \\ \vdots \end{Bmatrix} + \cdots + [w_{nc\,1} \quad w_{nc\,2} \quad \cdots] \begin{Bmatrix} c_{nc\,1} \\ c_{nc\,2} \\ \vdots \end{Bmatrix}$$

و در ANP، غیرخطی:

$$G = G_{NL}(\boldsymbol{C}.\boldsymbol{w})$$

است، که c و w به ترتیب معیارها و وزن آنها را مشخص می‌کنند. در مسأله شبیه‌سازی سامانه سونار، هر چند به نظر می‌رسد که دست کم فرامعیارها (چشمه، محیط، سونار و حامل) بر یکدیگر اثری ندارند، و تنها رابطه سلسله‌مراتبی میان فرامعیارها و معیارها برقرار است، اما باید توجه داشت که گزینه‌ها تا اندازه‌ای بر معیارها و وزن آنها اثرگذارند. از این رو تابع هدف پنهانِ مسأله شبیه‌سازی غیرخطی است، و لذا، در واقع، باید از روش ANP بهره جست. با این حال، از آن جا که روش AHP ساده‌تر است، با پذیرش تقریب آن، مسأله شبیه‌سازی با AHP پیاده‌سازی می‌گردد و به‌کارگیری روش ANP به پژوهش‌های آتی واگذار می‌گردد.



شکل ۵. نمای تصویری روش (الف) AHP و (ب) ANP

ب. وزن‌یابی شبکه: پس از تعیین معیارهای **c** و ساختاریابی شبکه، می‌بایست وزن ***w*** معیارها مشخص گردد. در روش‌های بر پایه شبکه خبرگانی، وزن‌یابی معیارها بر مبنای مقایسه دوبه‌دوی (زوجی) میان معیارها و گزینه‌ها و طی فرآیندی که در آینده معرفی خواهد شد، انجام می‌پذیرد. در واقع با انجام مجموعه‌ای از مقایسه‌های دوبه‌دو، که انجام آن برای ذهن انسان آسان‌تر از مقایسه همزمان چند معیار است، و

از ترکیب این مقایسه‌های زوجی و اهمیت‌های نسبی، وزن همه معیارها در کل مشخص شده، و بدین ترتیب، تابع هدف پنهان شبکه شکل می‌گیرد. این مقایسه‌های زوجی به منظور تخمین و برآورد:

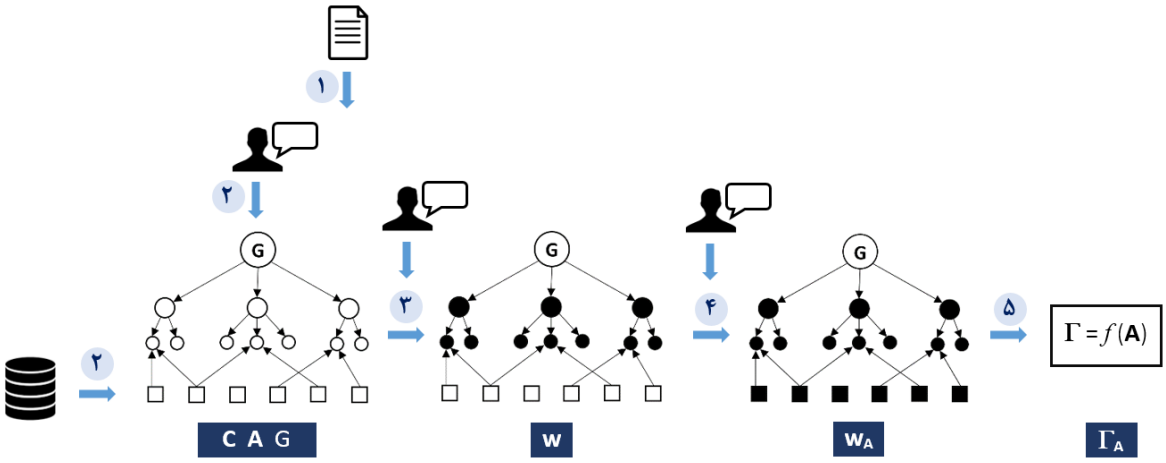
۱. اهمیت و تأثیرگذاری نسبی معیارها (فرامعیارها) در برآوردن هدف ($\mathbf{C}_i$ها نسبت به G)،
۲. اهمیت و تأثیرگذاری نسبی زیرمعیارها در معیارهای بالادستی (c_{ij}ها نسبت به $\mathbf{C}_i$)،
۳. اهمیت و تأثیرگذاری نسبی معیارهای وابسته به هم (c_{ij}ها نسبت به c_k وابسته به c_{ij}ها)، و
۴. تأثیرپذیری نسبی معیارها از گزینه‌ها (مقادیر معیارها (c_{ij}ها نسبت به A_k تأثیرگذار بر c_{ij}ها)

انجام می‌پذیرد. در روش AHP، تنها دو مورد نخست، و در روش ANP همه موارد انجام می‌پذیرد. این مقایسه‌ها می‌بایست توسط خبره به صورت دوبه‌دو انجام پذیرد؛ از آن جا که این کار ممکن است برای خبره دشوار باشد، می‌توان پرسش‌نامه‌های مناسبی را طراحی کرد که خبره با سهولت بیشتری به پاسخ‌گویی بپردازد، و سپس، پاسخ‌های خبره به مقایسه‌های زوجی بازگردانی و تبدیل شود.

ج. بهینه‌یابی: در مرحله قبل، وزن معیارها (و در نتیجه، تابع هدف پنهان مسأله) پیدا شدند. اکنون و در این مرحله، بهینه‌یابی صورت می‌گیرد. به سخن دیگر، هر گزینه (یعنی مقادیر معیارهای مربوط به آن گزینه) در تابع هدف پنهان جایگذاری می‌شود، و مقدار تابع هدف پنهان به ازای آن گزینه مشخص می‌گردد:

$$\forall A_i \in \boldsymbol{A} \quad g_i = G(A_i)$$

بر مبنای مقادیر g_i گزینه‌ها، وزن آنها w_{Ai} معلوم می‌گردد. از آن جا که تابع هدف، غیرصریح و پنهان است، این فرآیند جایگذاری و بهینه‌یابی و وزن‌یابی گزینه‌ها نیز در روش‌های برپایه شبکه خبرگانی، با مقایسه زوجی و پردازش‌های بعدی انجام می‌پذیرد؛ به این ترتیب که برتری یک گزینه نسبت به گزینه دیگر در برآوردن یک معیار از سوی خبره ارزیابی و نمره‌دهی می‌شود. این کار، دوبه‌دو برای همه گزینه‌ها و نسبت به همه معیارها انجام می‌پذیرد. سپس، وزن گزینه‌ها طی پردازش‌های بعدی، که در شیوه AHP و ANP متفاوت است، به دست می‌آید. گزینه‌های با وزن بیشتر اولویت بیشتری در برآوردن هدف دارند.



شکل ۶. فرآیند پیشنهادی ساخت هسته شبیه سازی بر مبنای شبکه خبرگانی

۳. تئوری و محاسبات

شکل ۶ فرآیند پیشنهادی ساخت هسته شبیه‌سازی عملیات سوناری را بر مبنای سامان‌دهی شبکه خبرگانی نمایش می‌دهد. این فرآیند شامل مراحل زیر است:

۱. نظرخواهی از خبره: پرسش‌نامه مناسب تهیه و جهت پاسخ‌گویی در اختیار خبره قرار می‌گیرد. فرآیند تهیه پرسش‌نامه مناسب، خود یک روند رفت و برگشتی میان خبره و تحلیل‌گر است. خبره پاسخ‌ها و نظرات خود را در اختیار تحلیل‌گر قرار می‌دهد.

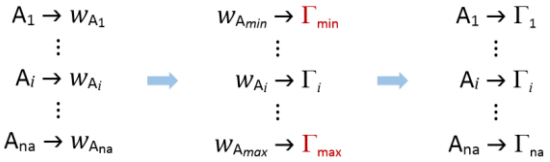
۲. ساختاریابی شبکه: با بهره‌گیری از پاسخ‌های خبره، معیارها و ارتباطات سلسله‌مراتبی آنها مشخص می‌شود. به دنبال آن، کیفی‌سازی مقادیر معیارها انجام گرفته، و بر اساس آن، گزینه‌ها تعریف می‌شوند. بدین ترتیب، تا این مرحله، معیارها C و گزینه‌ها A و ساختار شبکه (و ساختار تابع هدف پنهان G) مشخص شده است.

۳. وزن‌دهی شبکه خبره: پاسخ‌های خبره به پرسش‌نامه، به صورت مقایسات زوجی بازتعریف و برگردان می‌شود. سپس با انجام پردازش‌های مناسب بر روی ماتریس مقایسات زوجی، وزن معیارها w مشخص می‌گردد.

۴. بهینه‌یابی و وزن‌یابی گزینه‌ها: پاسخ‌های خبره به پرسش‌نامه، به صورت مقایسات زوجی برتری گزینه‌ها در برآوردن معیارها بازتعریف و برگردان می‌شود. سپس با انجام پردازش‌های مناسب بر روی ماتریس مقایسات زوجی، وزن گزینه‌ها w_A مشخص می‌گردد.

۵. بهنجارش[۲۴]: در این مرحله، مقادیر *همسانی* پارامترهای شبه‌چشمه □ برای همه گزینه‌ها **A** به دست می‌آید. همسانی پارامتر شبه‌چشمه میزان نزدیکی و همسانی پارامتر شبه‌چشمه با نظیرش را در چشمه نشان می‌دهد. مقادیر بالای همسانی نشان‌دهنده نزدیکی زیاد شبه‌چشمه با چشمه، به دلیل مساعد بودن شرایط چشمه، محیط، سونار و حامل می‌باشد.

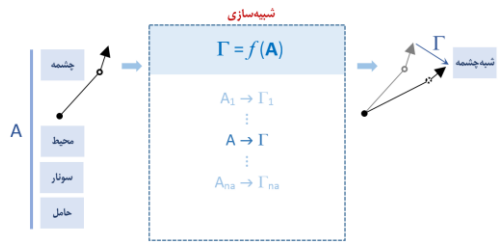
توزیع مقادیر همسانی مطابق توزیع وزن گزینه‌ها در نظر گرفته می‌شود که بر مبنای بیشینه و کمینه همسانی، بهنجار شده‌اند. بدین ترتیب، همان گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است، در این مرحله، وزن گزینه‌ها (به دست آمده از مرحله قبل) به صورت صعودی مرتب شده و مقادیر وزن‌ها با توجه به بیشینه و کمینه مقدار همسانی پارامتر چشمه (که بر مبنای نظر خواهی از خبره تعیین می‌شوند)، مقیاس و اصطلاحاً بهنجار می‌شوند.



شکل ۷. روند بهنجارش در فرآیند ساخت هسته شبیه‌سازی

پارامتر همسانی در مساله آشکارسازی می‌تواند برابر احتمال آشکارسازی تعبیر گردد. برای دیگر پارامترهای خروجی شبه‌چشمه مانند سمت، فاصله، مسیر و سرعت(که در این مقاله به آنها پرداخته نمی‌شود) برابر دقت آنها قابل تفسیر است.

بدین ترتیب، با انجام فرآیند پنج‌مرحله‌ای توضیح داده شده، هسته شبیه‌سازی برپایه شبکه خبرگانی، به صورت یک بانک اطلاعاتی که مقادیر همسانی همه گزینه‌های ممکن را دربردارد، ساخته می‌شود. اکنون فرآیند شبیه‌سازی به ازای هر ورودی دلخواه A به آسانی و به سرعت و بلادرنگ قابل انجام است؛ به این ترتیب که در روند شبیه‌سازی، مقدار همسانی نظیر ورودی A از بانک اطلاعتی تهیه شده برداشت شده (□)، و چشمه واقعی به اندازه □ منحرف می‌شود تا شبه‌چشمه (یعنی چشمه شبیه‌سازی شده) بازسازی گردد (شکل ۸).



شکل ۸. بازسازی شبه‌چشمه بر مبنای هسته شبیه‌سازی شبکه خبرگانی

۴. یافته‌ها

در این بخش، با استفاده از روش پیشنهادی، تجربه یک خبره در انجام عملیات آشکارسازی سونار به ازای شرایط گوناگون به صورت کمّی در می‌آید. خروجی این کار، تعیین احتمال تشخیص هدف در شرایط مختلف از وضعیت چشمه، محیط و سامانه سونار است.

۱. ساختاردهی شبکه

الف. شناسایی معیارها

۴ معیار اصلی: منبع (چشمه)، سونار، حامل و محیط به همراه ۲۲ زیرمعیار ذیل معیارهای اصلی، مطابق جدول ۱، تعریف گردیدند.

جدول ۱. معیارها و زیرمعیارها

منبع	محیط	حامل	سونار
دامنه نویز هدف	تراکیک دریایی	دقت سنسورهای تاویری	نوع سونار
فرکانس نویز هدف	کیفیت بستر	نویز حامل	دقت سمت
	تیپ هیدرولوژی منطقه	مهارت و تجربه کاربر سونار	فرکانس سونار
	عمق منطقه		برد گیرندگی
	دما (ماه و فصل سال)		مد عملکرد
	نوع منطقه (موقعیت مکانی)		پوشش زاویه‌ای
			کیفیت صوت دریافتی
			قابلیت نرم افزاری و نمایشگر سامانه
			احتمال آشکارسازی درست
			احتمال هشدار غلط
			پایگاه داده سامانه (انواع هدف)

ب. شناسایی گزینه‌ها

برای تعیین گزینه‌ها باید مقادیر کیفی برای معیارها معرفی کرد. به منظور ساده‌سازی پاسخ کارشناسی، تنها دو گزینه کیفی برای هر معیار در نظر گرفته شد (جدول ۲).

۲. وزن‌دهی شبکه

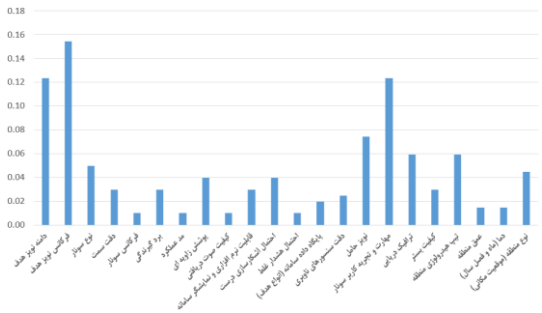
الف. مقایسه زوجی و وزن‌دهی معیارها

مقایسه زوجی معیارها با استفاده از پرسش‌نامه‌ای پنج گزینه‌ای به مانند شکل ۹ انجام می‌شود، که پاسخ‌گویی به آن برای خبره آسان‌تر است. مقایسه‌های زوجی بر مبنای مقادیر نسبی انتخاب‌های خبره به زوج معیارها تعیین می‌شود.

معیارها و زیرمعیارها	بی اهمیت ۱	کم اهمیت ۲	بی نظر ۳	با اهمیت ۴	بسیار با اهمیت ۵	وزن معیارها
منبع	○	○	○	○	◉	۰.۲۷۸
دامنه نویز هدف	○	○	○	◉	○	۰.۱۲۳
فرکانس نویز هدف	○	○	○	○	◉	۰.۱۵٤
سونار	○	○	○	○	◉	۰.۲۷۸
نوع سونار	○	○	○	○	◉	۰.۰۵۰
دقت سمت	○	○	◉	○	○	۰.۰۲۰
فرکانس سونار	◉	○	○	○	○	۰.۰۱۰
برد گیرندگی	○	○	◉	○	○	۰.۰۲۰
مد عملکرد	◉	○	○	○	○	۰.۰۱۰
پوشش زاویه ای	○	○	○	◉	○	۰.۰٤۰
کیفیت صوت دریافتی	◉	○	○	○	○	۰.۰۱۰
قابلیت نرم افزاری و نمایشگر سامانه	○	○	◉	○	○	۰.۰۲۰
احتمال آشکارسازی درست	○	○	○	◉	○	۰.۰٤۰
احتمال هشدار غلط	◉	○	○	○	○	۰.۰۱۰
پایگاه داده سامانه (انواع هدف)	○	◉	○	○	○	۰.۰۲۰
حامل	○	○	○	◉	○	۰.۲۲۲
دقت سنسورهای تاویری	◉	○	○	○	○	۰.۰۲۵
نویز حامل	○	○	◉	○	○	۰.۰۷٤
مهارت و تجربه کاربر سونار	○	○	○	○	◉	۰.۱۲۳
محیط	○	○	○	◉	○	۰.۲۲۲
تراکیک دریایی	◉	○	○	○	○	۰.۰۵۹
کیفیت بستر	○	◉	○	○	○	۰.۰۲۰
تیپ هیدرولوژی منطقه	○	○	○	◉	○	۰.۰۵۹
عمق منطقه	◉	○	○	○	○	۰.۰۱۵
دما (ماه و فصل سال)	◉	○	○	○	○	۰.۰۱۵
نوع منطقه (موقعیت مکانی)	○	○	◉	○	○	۰.۰٤٤

شکل ۹. پرسش‌نامه تعیین اهمیت معیارها

پس از تعیین مقادیر عددی مقایسه‌های زوجی بر مبنای پرسش‌نامه شکل ۹ و انجام تحلیل‌های مربوطه، وزن‌های معیارها به دست می‌آید (ستون آخر از جدول شکل ۹). نمودار وزن‌های معیارها در شکل ۱۰ آمده است.



شکل ۱۰. نمودار وزن معیارهای ۲۲گانه در عملیات آشکارسازی سوناری

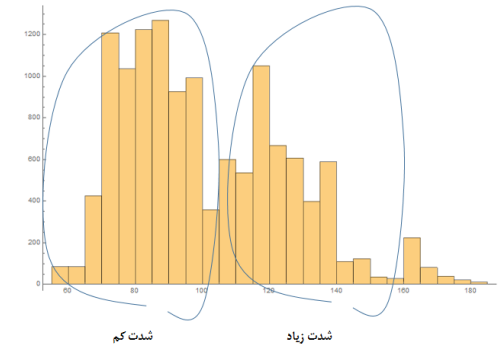
ب. مقایسه زوجی مقادیر کیفی معیارها

کارشناس خبره در هر مورد، برآورد خود را از میزان برتری عملکرد مناسب معیار نسبت به عملکرد نامناسب آن ارائه داد (جدول ۲). برای بیشتر معیارها مانند خبرگی، مانور، توانمندی سونار و ... ارزش‌گذاری نسبی مقادیر کیفی دو گزینه مناسب و نامناسب، مستقیماً توسط شخص خبره انجام شدند. در موارد معدودی از معیارها، مقادیر کیفی با توجه به توزیع آماری مقادیر عددی آن معیار، که از بانک اطلاعاتی در دسترس بازی COMMAND [۱۵] استخراج

شده است، تعیین گردید. شکل ۱۱، یک نمونه توزیع مقادیر عددی برای معیار شدت را، که بر مبنای بانک اطلاعاتی این بازی به دست آمده است، به همراه تعریف کیفی دو مقدار کم و زیاد نشان می‌دهد.

جدول ۲. تعریف مقادیر کیفی معیارها

دامنه نویز هدف	زیاد	۲	برابر	دامنه نویز هدف	کم	است.
فرکانس نویز هدف	زیاد	۳	برابر	فرکانس نویز هدف	کم	است.
نوع سونار	خوب	۲.۵	برابر	نوع سونار	بد	است.
دقت سمت	زیاد	۲	برابر	دقت سمت	کم	است.
فرکانس سونار	زیاد	۵	برابر	فرکانس سونار	کم	است.
برد گیرندگی	زیاد	۳.۵	برابر	برد گیرندگی	کم	است.
مد عملکرد	مناسب	۲	برابر	مد عملکرد	نامناسب	است.
پوشش زاویه ای	زیاد	۳	برابر	پوشش زاویه ای	کم	است.
کیفیت صوت دریاقتی	زیاد	۲	برابر	کیفیت صوت دریاقتی	کم	است.
قابلیت نرم افزاری و نمایشگر سامانه	بالا	۱.۵	برابر	لیت نرم افزاری و نمایشگر ساه	پایین	است.
احتمال آشکارسازی درست	بالا	۲	برابر	احتمال آشکارسازی درست	پایین	است.
احتمال هشدار غلط	بالا	۵	برابر	احتمال هشدار غلط	پایین	است.
پایگاه داده سامانه (انواع هدف)	خوب	۲	برابر	پایگاه داده سامانه (انواع هدف)	بد	است.
دقت سنسورهای ناوبری	زیاد	۱.۵	برابر	دقت سنسورهای ناوبری	کم	است.
نویز حامل	زیاد	۲	برابر	نویز حامل	کم	است.
مهارت و تجربه کاربر سونار	بالا	۵	برابر	مهارت و تجربه کاربر سونار	پایین	است.
تراقیک دریایی	زیاد	۲	برابر	تراقیک دریایی	کم	است.
کیفیت بستر	خوب	۱.۵	برابر	کیفیت بستر	بد	است.
تیپ هیدرولوژی منطقه	مناسب	۱.۵	برابر	تیپ هیدرولوژی منطقه	نامناسب	است.
عمق منطقه	زیاد	۳	برابر	عمق منطقه	کم	است.
دما (ماه و فصل سال)	بالا	۴	برابر	دما (ماه و فصل سال)	پایین	است.
نوع منطقه (موقعیت مکانی)	مناسب	۱.۵	برابر	نوع منطقه (موقعیت مکانی)	نامناسب	است.



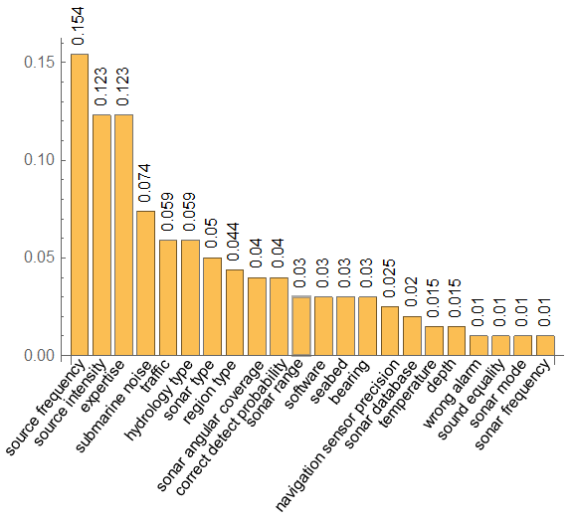
شکل ۱۱. تعریف کیفی مقدار معیار شدت بر اساس توزیع عددی مقادیر آن (برداشت شده از بانک اطلاعاتی بازی COMMAND) – محور قائم فراوانی شدت‌های کمی (محور افقی) شناورهای سطحی و زیرسطحی بانک اطلاعاتی این بازی است (یکای شدت، یکای اختصاصی بازی COMMAND است و در اینجا تنها برای دسته بندی کیفی استفاده شده است).

۳. بهینه‌یابی (تعیین وزن گزینه‌ها)

همان طور که گذشت، شمار معیارها ۲۲، و تعداد گزینه‌ها برابر ۴۱۹۴۳۰۴ = $۲^{۲۲}$ است. به دلیل شمار بالای گزینه‌ها، محاسبات مربوط به تعیین وزن آنها جز با دسترسی به یک پردازشگر قوی بسیار دشوار است. در با توجه به محدودیت منابع پردازشی، مطابق آن چه در بخش بعد گزارش می‌شود، تنها شمار معدودی از مهمترین معیارها در فرآیند بهینه‌یابی به کار می‌روند. خروجی فرآیند بهینه‌یابی سامان‌یابی بانک اطلاعاتی است که احتمال آشکارسازی هدف را به صورت عددی بین صفر و یک، برای گزینه‌های مختلف به دست می‌دهد.

۵. بحث

در این بخش، به منظور ارزیابی توان و کارآمدی روش، و با توجه به محدودیت توان پردازشی در پرداختن به همه ۲۲ معیار و گزینه‌های مربوطه، مقایسه‌ای میان مقادیر احتمال آشکارسازی هدف بر مبنای گزینش ۵، ۶، و ۷ معیار مهم‌تر، از میان ۲۲ معیار مرتب شده مطابق نمودار شکل ۱۲، انجام می‌پذیرد.



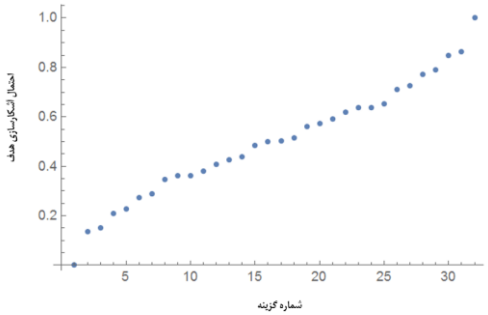
شکل ۱۲. نمودار مرتب شده وزن معیارها

مقادیر ۳۲ = 2^5 گزینه‌های مربوط به حالت ۵ معیاره و مقادیر احتمال آشکارسازی هدف برای آنها به قرار زیر به دست می‌آیند:

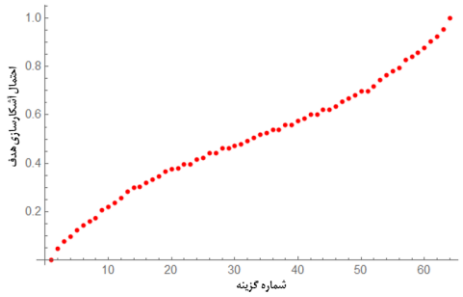
```
{{{low, low, low, high, high}, 0.}, {{low, low, low, high, low}, 0.0804911},
 {{low, low, low, low, high}, 0.100955}, {{low, high, low, high, high}, 0.167804},
 {{low, low, low, low, low}, 0.181446}, {{low, high, low, high, low}, 0.248295},
 {{low, high, low, low, high}, 0.268759}, {{high, low, low, high, high}, 0.315143},
 {{low, low, high, high, high}, 0.335607}, {{low, high, low, low, low}, 0.34925},
 {{high, low, low, high, low}, 0.395634}, {{high, low, low, low, high}, 0.416098},
 {{low, low, high, high, low}, 0.416098}, {{low, low, high, low, high}, 0.436562},
 {{high, high, low, high, high}, 0.482947}, {{high, low, low, low, low}, 0.496589},

 {{low, high, high, high, high}, 0.503411}, {{low, low, high, low, low}, 0.517053},
 {{high, high, low, high, low}, 0.563438}, {{high, high, low, low, high}, 0.583902},
 {{low, high, high, high, low}, 0.583902}, {{low, high, high, low, high}, 0.604366},
 {{high, low, high, high, high}, 0.65075}, {{high, high, low, low, low}, 0.664393},
 {{low, high, high, low, low}, 0.684857}, {{high, low, high, high, low}, 0.731241},
 {{high, low, high, low, high}, 0.751705}, {{high, high, high, high, high}, 0.818554},
 {{high, low, high, low, low}, 0.832196}, {{high, high, high, high, low}, 0.899045},
 {{high, high, high, low, high}, 0.919509}, {{high, high, high, low, low}, 1.}}
```

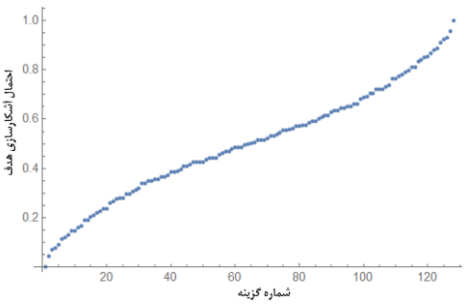
بدین ترتیب، نمودار تابع احتمال آشکارسازی هدف بر حسب گزینه‌های ۵ معیاره مطابق شکل ۱۳-الف است. نمودارهای نظیر برای حالت‌های ۶ و ۷ معیاره، به ترتیب با ۶۴ = 2^6 و ۱۲۸ = 2^7 گزینه، در شکل‌های ۱۳ (ب) و (ج) نمایش داده شده‌اند.



(الف)



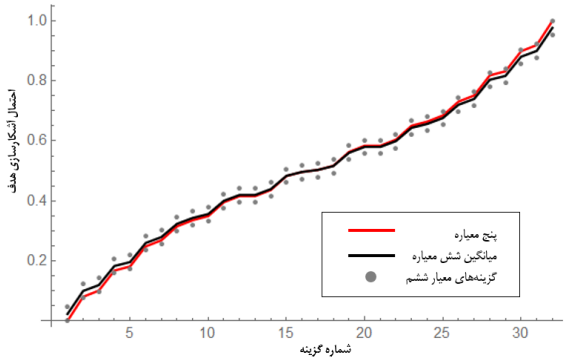
(ب)



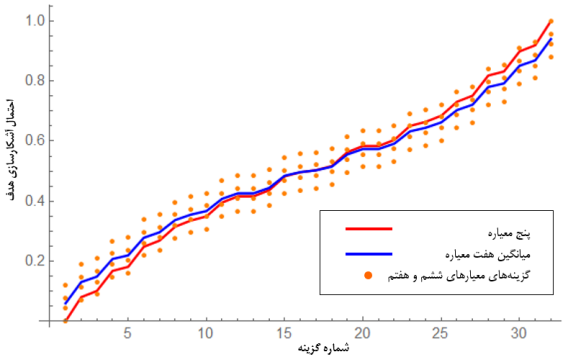
(ج)

شکل ۱۳. توزیع آماری مقادیر احتمال آشکارسازی هدف برای گزینه‌ها بر حسب: (الف) ۵، (ب) ۶، و (ج) ۷ معیار نخست مهم‌تر

در شکل ۱۴، نمودارهای تابع‌های احتمال آشکارسازی هدف ۵ و ۶ معیاره با یکدیگر مقایسه شده‌اند. محور افقی، شماره‌های نظیر گزینه‌های ۳۲گانه مربوط به حالت ۵ معیاره است. تابع احتمال آشکارسازی آن به رنگ قرمز نشان داده شده است. در حالت ۶معیاره، به ازای هر گزینه (که مقادیر مشخصی برای ۵ معیار نخست دارد)، دو مقدار احتمال مربوط به گزینه‌های خوب و بد معیار ششم (گونه هیدرولوژی منطقه) بر روی نمودار دیده می‌شود. میانگین این دو احتمال با نمودار رنگ سیاه نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در گزینه‌های میانی، نمودارهای ۵معیاره و میانگین ۶معیاره به هم نزدیک می‌شوند.



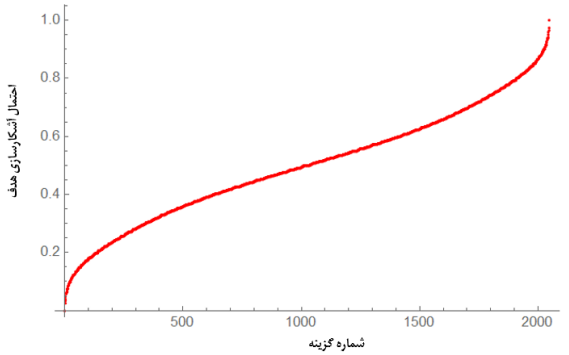
شکل ۱۴. مقایسه تابع‌های احتمال آشکارسازی هدف برای گزینه‌های ۵ و ۶ معیاره



شکل ۱۵. مقایسه تابع‌های احتمال آشکارسازی برای حالات ۵ و ۷ معیاره

در شکل ۱۵، نمودارهای تابع‌های احتمال آشکارسازی هدف ۵ و ۷ معیاره با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنان محور افقی، شماره‌های نظیر گزینه‌های ۳۲گانه مربوط به حالت ۵ معیاره است و تابع احتمال آشکارسازی آن به رنگ قرمز می‌باشد. در حالت ۷معیاره، به ازای هر گزینه ۵ معیاره، ۴ مقدار احتمال مربوط به حالت‌های ضربدری گزینه‌های خوب و بد معیار ششم (گونه هیدرولوژی منطقه) و خوب و بد معیار هفتم (گونه سونار) بر روی نمودار دیده می‌شود. میانگین این احتمال‌ها با نمودار رنگ آبی نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود پاسخ ۵معیاره ممکن است در حدود ۷ درصد احتمال را نسبت به پاسخ ۷معیاره اشتباه گزارش کند. این در حالی است که این مقدار برای حالت ۶معیاره، حدود ۳ درصد بود. آشکار است که مقدار این درصد برای پاسخ‌های حالت ۲۲معیاره، که به دلیل حجم بالای پردازش نتوانستیم به دست آوریم، بسیار بیشتر خواهد بود. از این رو، ضروری است که برای دستیابی به پایگاه داده قابل اطمینان و نزدیک شدن به تابع درست احتمال آشکارسازی هدف، شمار بیشتری از معیارها منظور گردند.

در نهایت، و با توجه به توان پردازشگر در دسترس، ۱۱ معیار نخست از شکل ۱۲ انتخاب گردید. پیاده‌سازی روش پیشنهادی، مقادیر احتمال آشکارسازی را برای گزینه‌های این حالت، که ۲۰۴۸ = 2^{11} عدد می‌باشند، مطابق شکل ۱۶ به دست می‌دهد.



شکل ۱۶. تابع احتمال آشکارسازی هدف برای حالت ۱۱ معیاره

در ادامه، یک مدل شبه-تجربی برای محاسبه احتمال آشکارسازی (Probability of Detection - Pd) شناور هدف توسط سونار غیرفعال بر پایه اصول فیزیک انتشار صوت و مدل‌های شناخته‌شده آشکارسازی (مانند معادله سونار) برپا می‌شود، تا نتایج آن با پاسخ‌های مدل پیشنهادی بر پایه شبکه خبرگانی مقایسه گردد. برای این مقایسه، از مدل ۷ معیاره استفاده شده که شامل مهم‌ترین و تأثیرگذارترین متغیرهای مربوط به همه عوامل دخیل در فرآیند سوناری، یعنی چشمه، محیط، سونار و حامل می‌شود.

این مدل تجربی – فیزیکی به صورت تابع احتمال آشکارسازی:

$$P_d = \frac{1}{1 + e^{-k\times(SNR-T)}}$$

و وابسته به نسبت سیگنال به نوفه (SNR) و آستانه آشکارسازی (T) تعریف می‌شود. T معمولاً نزدیک به DT (Detection Threshold ، که در ادامه معرفی خواهد شد) در نظر گرفته شده، و در اینجا برای سادگی برابر ۱۵ فرض می‌گردد. همچنین k تندی گذار از حالت عدم آشکارسازی به آشکارسازی قطعی را کنترل می‌کند، و معمولاً برابر ۰/۵ انتخاب می‌شود. SNR بر اساس متغیرهای مدل ۷ معیاره برابر زیر تعریف می‌شود [۱۶]:

$$SNR = SL - TL - NL + DI - DT$$

که در آن:

SL شدت صوت تولید شده توسط هدف (شناور) در فاصله ۱ متری از آن (که برای شناورهای سطحی و زیرسطحی معمولاً بین ۱۱۰ تا ۱۸۰ دسی‌بل متغیر است).

TL تلفات انتقال، که در واقع تیپ هیدرولوژی محیط را مدل می‌کند. برای این منظور، از مدل شناخته‌شده گسترش کروی (Spreading Loss) همراه با جذب (Absorption) به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$TL = 20\,log_{10}R + \alpha R \times 10^{-3}$$

که R (برد) فاصله بین هدف و سونار بر حسب متر (در این مثال، برای سادگی، یک برد ثابت ۵ کیلومتری در نظر گرفته می‌شود)، و α (ضریب جذب) تابعی از f (بسامد غالب تولید شده توسط هدف: معمولاً بین ۱۰ Hz تا ۱۰ kHz – صدای پره‌های کشتی در بسامدهای پایین (۱۰–۱۰۰ Hz) و صدای ماشین‌آلات در بسامدهای بالاتر (۱۰۰ Hz – ۱ kHz)) بوده و به تیپ هیدرولوژی (شامل دما، شوری، و عمق) وابسته است. در این مثال، از تقریب تجربی زیر برای آب شیرین استفاده می‌شود [۱۷]:

$$\alpha \approx \frac{0.1f^2}{1+f^2} + \frac{40f^2}{4100+f^2}$$

NL (سطح نوفه) شامل: (الف) نوفه محیطی (برای سادگی، یک مقدار ثابت برای حالت دریای آرام: حدود ۷۰ تا ۹۰ دسی‌بل در بسامد ۱۰۰ Hz – در این مثال برابر ۸۰ دسی‌بل فرض می‌گردد) در نظر گرفته می‌شود [۱۸]، (ب) نوفه ترافیک دریایی از 0 dB (بدون ترافیک) تا ۱۵ dB (ترافیک بسیار شلوغ)، و نوفه شناور حامل که برای یک شناور معمولی بین ۸۰ تا ۱۱۰ دسی‌بل در فرکانس ۱۰۰ هرتز مقدار دارد (برای شناورهای پیشرفته و بی‌صدا مقدار آن پایین‌تر است).

DI (شاخص جهت‌داری) که نماینده نوع و کیفیت سونار (آرایه سونار) است. یک آرایه بزرگتر و با طراحی بهتر، DI بالاتری دارد و نوفه را بهتر فیلتر می‌کند. مقدار این شاخص برای یک سونار غیرفعال معمولی بین ۵ دسی‌بل برای آرایه ساده تا ۲۵ دسی‌بل برای آرایه پیشرفته و بزرگ است.

DT (آستانه آشکارسازی) به دقت و حساسیت سنسورها و الگوریتم‌های پردازش سیگنال وابسته است، و مقدار آن معمولاً بین ۱۰ دسی‌بل برای سیستم سونار بسیار حساس تا ۲۵ دسی‌بل برای سیستم معمولی متغیر می‌باشد. متغیرهای DT و DI به نوعی می‌توانند در ارزیابی مدل پیشنهادی، تجربه کاربر سونار را معادل‌یابی کنند.

اکنون، مقادیر احتمال آشکارسازی مدل ارزیاب تجربی – فیزیکی با پاسخ‌های مدل پیشنهادی (بر پایه شبکه خبرگانی) برای ۱۰ سناریوی مختلف، با مقادیر پیش‌فرض برای برخی پارامترها (که در بالا گزارش شد)، محاسبه می‌شود. نمونه‌های ۱، ۴، ۷، ۸ و ۱۰ احتمال آشکارسازی خوب تا عالی را نشان می‌دهند که معمولاً به دلیل ترکیب SL بالا، NL پایین یا DI بالا است. نمونه‌های ۲، ۶ و ۹ احتمال آشکارسازی نزدیک به صفر دارند که به دلیل SL بسیار پایین، جذب بسیار بالا (به دلیل بسامد بالا) یا NL بسیار بالا است. نمونه‌های۳ و ۵ حالت‌های مرزی و میانی هستند که در آن‌ها احتمال آشکارسازی به شدت به مقادیر پارامترها وابسته است. نمونه ۵ نشان می‌دهد که حتی یک هدف کم‌صدا نیز با یک سونار پیشرفته و یک محیط آرام، شانس آشکارسازی قابل توجهی (۴۴٪) دارد. نتایج مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با مدل ارزیاب تجربی – فیزیکی در جدول ۳ آمده است. در این جدول، هم متغیرهای مدل تجربی – فیزیکی و هم متغیرهای کیفی مدل پیشنهادی نمایش یافته‌اند و تلاش شده است که به منظور ارزیابی و مقایسه، متغیرهای معادل در یک ستون نمایش یابند.

جدول ۳. مقایسه نتایج احتمال آشکارسازی توسط مدل تجربی – فیزیکی و مدل پیشنهادی

شماره نمونه	سناریوی نمونه	SL (dB) نماینده معیار: شدت منبع	تطابق بسامدی	f (Hz)	TL (dB) نماینده معیار: گونه هیدرولوژی	$NL_{ترافیک}$ (dB) نماینده معیار: ترافیک	$NL_{حامل}$ (dB) نماینده معیار: نوفه شناور حامل	DI (dB) نماینده معیار: نوع سونار	DT (dB)	تجربه کاربر	P_d
۱	هدف پرسر و صدا، محیط آرام، سوتار خوب	۱۶۰ زیاد	زیاد	۱۰۰	۷۹/۴ مناسب	۰ کم	۸۵ کم	۲۰ خوب	۱۲	بالا	۰/۹۷ ۱
۲	هدف کم‌صدا، محیط آرام، سوتار معمولی	۱۲۰ کم	کم	۵۰	۷۶/۶ مناسب	۰ کم	۹۰ کم	۱۰ بد	۲۰	پایین	۰/۰۱ ۰/۲
۳	هدف پرسر و صدا، ترافیک شلوغ، شناور حامل پرتوفه	۱۷۰ زیاد	کم	۲۰۰	۸۱/۵ مناسب	۱۵ زیاد	۱۰۵ زیاد	۱۵ بد	۱۲	پایین	۰/۱۶ ۰/۱۹
۴	هدف معمولی، ترافیک کم، سوتار پیشرفته	۱۴۰ زیاد	زیاد	۱۰۰	۷۹/۴ مناسب	۵ کم	۸۰ کم	۲۵ خوب	۱۵	بالا	۰/۹۸ ۱
۵	هدف کم‌صدا، محیط آرام، سوتار پیشرفته	۱۱۰ کم	زیاد	۸۰	۷۹ مناسب	۰ کم	۸۰ کم	۲۵ خوب	۱۵	بالا	۰/۴۴ ۰/۵۵
۶	هدف پرسر و صدا در بسامد بالا (جذب زیاد)	۱۶۵ زیاد	کم	۵۰۰۰	۱۲۱ نامناسب	۰ کم	۹۰ کم	۱۵ بد	۲۰	پایین	۰ ۰/۳
۷	ترافیک بسیار شلوغ، شناور حامل بی‌صدا	۱۵۰ زیاد	زیاد	۱۰۰	۷۹/۴ مناسب	۱۵ زیاد	۷۵ کم	۱۵ بد	۱۸	بالا	۰/۷۷ ۰/۸۵
۸	شرایط آرمانی: هدف پرصدا، محیط و سوتار عالی	۱۷۵ زیاد	کم	۱۰۰	۷۹/۴ مناسب	۰ کم	۷۵ کم	۲۵ خوب	۱۵	بالا	۱ ۱
۹	شرایط نامناسب: هدف کم‌صدا، محیط و سوتار ضعیف	۱۱۵ کم	کم	۱۰۰	۷۹/۴ مناسب	۱۰ زیاد	۱۰۰ زیاد	۵ بد	۱۵	پایین	۰ ۰/۰۴
۱۰	حالت مرزی: SNR تزدیک به آستانه	۱۴۵ زیاد	کم	۱۰۰	۷۹/۴ مناسب	۵ کم	۹۰ کم	۱۵ بد	۱۸	بالا	۰/۷۵ ۰/۶۵

همان طور که از جدول بر می‌آید، مدل پیشنهادی در بیشتر سناریوها، و به ویژه در حالت‌های با آشکارسازی بالا، هماهنگی خوبی با مدل تجربی – فیزیکی دارد. در حالت‌های میانی، اختلاف‌هایی در حدود ۱۰ درصد مشاهده می‌شود؛ و البته در برخی موارد آشکارسازی پایین (مانند سناریوهای ۲ و ۶) اختلاف نسبتا قابل توجهی وجود دارد و به نظر می‌رسد مدل پیشنهادی برای این حالت‌ها، نیازمند به بازنگری و بهره‌گیری از مدل‌های پیشرفته‌تری مانند ANP به جای AHP باشد.

۶. نتیجه‌گیری

چالش اصلی این مقاله در سامان‌دهی یک شبیه‌ساز عملیات سونار، نبود پایگاه داده‌های سیگنال‌های مشاهداتی برای انواع شناورها از سویی، و نیاز به انجام شبیه‌سازی در لحظه و بلادرنگ بود. بر این اساس، راهکارهایی همچون حل معادلات دیفرانسیلِ انتشار امواج صوتی در زیر آب، انجام روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی در حل مسأله وارون، و یا بهره‌گیری از تابع‌های برازشی و حتی شبکه‌های عصبی مصنوعی امکان‌پذیر نبود. بر همین اساس، روشی جدید در شبیه‌سازی عملکرد سونار غیرفعال با الهام‌گیری از شیوه بهینه‌یابی و تصمیم‌گیری AHP پیشنهاد شد که با نگاشت نظر و تجربه خبرگان عملیات سونار بر روی شبکه‌ای از معیارها و گزینه‌های تأثیرگذار بر روی یکدیگر، فرآیند شبیه‌سازی را بی نیاز از بانک‌های اطلاعات داده‌های سیگنالی شناورهای سطحی و زیرسطحی (و بر اساس تجربه خبرگان عملیات سونار)، و با امکان انجام عملیات بلادرنگ (و بی‌نیاز از حل معادلات دیفرانسیل انتشار موج و انجام فرآیندهای بهینه‌سازی) پیاده‌سازی کند. بر پایه این روش، با نگاشت نظر خبرگان در ساختار یک شبکه، پایگاه اطلاعاتی به دست خواهد آمد که ویژگی‌های شناور هدف، محیط انتشار، شناور حامل و سونار را به پارامتر موردنظر (در اینجا، احتمال آشکارسازی هدف) پیوند دهد. خاطرنشان می‌کند محاسبات مربوط به ساخت این پایگاه داده، یک بار برای همیشه انجام می‌شود و به دنبال آن، با در دست داشتن پایگاه داده احتمال آشکارسازی هدف به ازای مقادیر کیفی معیارهای مختلف چشمه، سونار، محیط و حامل، امکان پیاده‌سازی شبیه‌سازی بی‌درنگ فراهم خواهد بود. یادآوری می‌کند که این روش

تنها برای احتمال آشکارسازی هدف پیاده‌سازی گردید، و ضروری است با پیروی از روند روش پیشنهادی، پایگاه‌های نظیر دیگر مشخصه‌های شبه‌چشمه (هدف) همچون شناسایی هدف، مقادیر سمت، فاصله و سرعت و ... تهیه شوند. همچنین پیشنهاد می‌شود که با ارائه یک راهکار نوآورانه، امکان تغییر در وزن معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها بر مبنای ارزیابی عملکرد شبیه‌ساز در فرآیند عملیات نبرد فراهم گردد.

سپاسگزاری

از همکاری گروه پژوهشی علوم زلزله دانشگاه فردوسی مشهد سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

[۱] اریک روبرت. مقدمه‌ای بر سیستم سونار. ترجمه محمدرضا سهیلی‌فر. تهران: نشر اتحاد-دانشگاه علوم دریایی امام خمینی؛۱۳۸۶.

[2] Taroudakis MI, Makrakis GN. Inverse Problems in Underwater Acoustics. Springer; 2010.

[3] Sung M, Lee M, Kim J, Song S, Song YW, Yu SC, Convolutional-Neural-Network-based Underwater Object Detection Using Sonar Image Simulator with Randomized Degradation. OCEANS 2019 MTS/IEEE Seattle, WA, USA. 2019; 1-7

[4] Jose, Tessin K, Subhalakshmy AB, Hareesh G. An Efficient Signal and Noise Simulator for Imaging Sonar. OCEANS 2024 – Singapore. 2024; 1-7.

[5] Cerqueira R, Trocoli T, Neves G, Joyeux S, Albiez J, Oliveira L. A novel GPU-based sonar simulator for real-time applications. Computers and Graphics (Pergamon). 2017; 68: 66-76.

[6] Hui-zhi C. Real-time software development for sonar array signal simulator. Technical Acoustics; 2004.

[۷] بهادری مسعود. مقدمه‌ای بر آکوستیک زیر آب و فناوری سونار. تهران: نشر ناقوس برای سازمان فضایی ایران پژوهشکده مهندسی؛ ۱۳۹۲.

[8] Johnson DH, DeGraaf S. Improving Bearing Resolution of Bearing in Passive Sonar Arrays by Eigenvalue Analysis. Technical Report EE-8102: Office of Naval Research; 1981

[9] Niu H, Li X, Zhang Y. Advances and applications of machine learning in underwater acoustics. Intell. Mar. Technol. Syst.2023; 1, 8.

[10] Basha SK, Nambiar A. S3Simulator: A benchmarking Side Scan Sonar Simulator dataset for underwater image analysis Pattern Recognition: 27th International Conference, ICPR, Kolkata, India. 2024; XVI: 219 – 235

[11] Yin Z, Zhang S, Sun R, Ding Y, Guo Y. Sonar Image Target Detection Based on Deep Learning. International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics (ICDCECE), Ballar, India. 2023; 1-9.

[12] Shin J, Chang S, Bays MJ, Weaver J, Wettergren TA, Ferrari S. Synthetic Sonar Image Simulation with Various Seabed Conditions for Automatic Target Recognition, OCEANS, Hampton Roads, Hampton Roads, VA, USA. 2022; 1-8.

[13] Ward MK, Stevenson M. Sonar signal detection and classification using artificial neural networks. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Conference Proceedings. Navigating to a New Era (Cat. No.00TH8492), Halifax, NS, Canada. 2000; 2:717-721.

[۱۴] آذر عادل، خسروانی فرزانه، جلالی رضا. تحقیق در عملیات نرم. تهران: نشر نگاه دانش؛ ۱۳۹۶.

[15] Warfare Sims. Command: Modern Air Naval Operations. Matrix Games; 2013.

[16] Waite AD. Sonar for Practicing Engineers. John Wiley & Sons; 2002

[17] Fisher FH, Simmons VP. Sound absorption in sea water. The Journal of the Acoustical Society of America. 1977; 62(3):558-564.

[18] Wenz GM. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources. The Journal of the Acoustical Society of America. 1962; 34(12), 1936-1956.

پی‌نوشت‌ها

1. Multiple Input – Multiple Output
2. Cognitive sonar
3. Source signal
4. .Attenuated signal
5. Inverse problem
6. Forward problem
7. Optimization
8. Binary regression
9. Detection Threshold

10. classifier
11. Detection Envelope Modulation On Noise
12. Shaft
13. Target Motion Analysis
14. identification
15. signature
16. Expert Network
17. Decision Making
18. Multi-Criteria Decision Making-MCDM
19. Hierarchical
20. Interconnective
21. Cluster
22. Analytic Hierarchy Process
23. Analytic Network Process
24. Normalization