مقاله

تخمین میزان بُرد در سونارهای غیرعامل

هادی امیری*
استادیار دانشکدهٔ علوم مهندسی
پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
hadi.amiri@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۶/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۶/۲۸

چکیده

آشکارسازی برد در سونارها[۱]، از جمله مشخصات کارکردی این دسته از سیستم‌هاست و طراحان همواره برآنند تا تخمینی از میزان آن به‌دست آورند. این مشخصه به عواملی چون پارامترهای متنوع محیطی و مشخصات گیرندهٔ سونار بستگی دارد. در این مقاله، با در نظر گرفتن این پارامترها، چگونگی تخمین برد در سیستم‌های سونای غیرعامل[۲] تحلیل و بررسی می‌شود. از جمله این پارامترها می‌توان به نوفهٔ منتشره از شناورها، نوفهٔ محیطی[۳] زمینه، میزان تلفات انتشاری، بهرهٔ آرایه[۴] و همچنین میزان آستانهٔ آشکارسازی[۵] اشاره کرد. در این مقاله، به‌کمک معادلهٔ سونار، علاوه بر بررسی میزان نقش منابع نوفهٔ شناورهای گوناگون اعم از سطحی و زیرسطحی و تأثیر محیط بر میزان تلفات انتشاری و نوفهٔ زمینه، مشخصات فنی سیستم‌های گیرنده نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: سونار غیرعامل، برد آشکارسازی، معادلهٔ سونار، تلفات انتشاری، بهرهٔ آرایه

۱. مقدمه

از جمله مهم‌ترین پارامترهای یک سونار غیرعامل، برد[۶] و یا حداکثر فاصله‌ای است که سیستم سونار می‌تواند اهداف مورد نظر خود را در محدودهٔ پوشش، کشف و آشکار سازد. این پارامتر براساس سایر مشخصات سیستم و همچنین منطقهٔ نصب تعیین می‌شود. همان‌گونه که در این مقاله خواهد آمد، در تخمین برد یک سونار غیرعامل علاوه بر مشخصات فنی سیستم، پارامترهای محیطی منطقهٔ موردنظر نیز مؤثر خواهد بود. به‌منظور دسترسی به برد یک سونار غیرعامل از معادلهٔ اساسی سونار استفاده می‌شود. در این رابطه مشخصات آرایه (ضریب تقویت آرایه)، سیستم پردازش (آستانهٔ آشکارسازی)، مشخصات منطقه (تلفات انتشاری)، نوفهٔ محیطی و مشخصات منبع (سطح توان) تأثیرگذار می‌باشد. در این مقاله، این پارامترها معرفی و در ادامه چگونگی به‌دست آوردن آنها و در نهایت نقش آنها در تخمین میزان برد بررسی می‌شود.

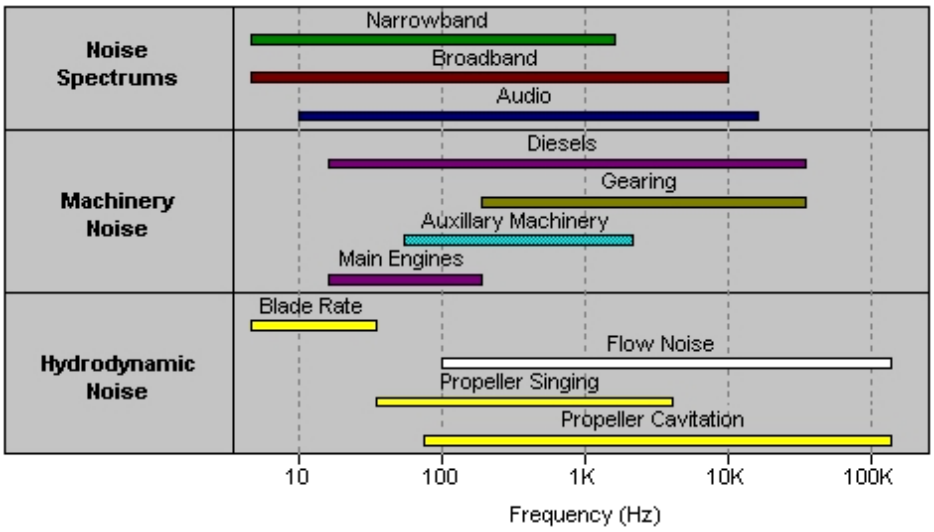
۲. نوفهٔ انتشاری اهداف

با توجه به روابط سونار غیرعامل، از جمله پارامترهای اساسی در محاسبات آن، به‌ویژه در تعیین مشخصات فنی و عملکردی سیستم سونار، سطح نوفهٔ اکوستیکی[۷] ناشی از

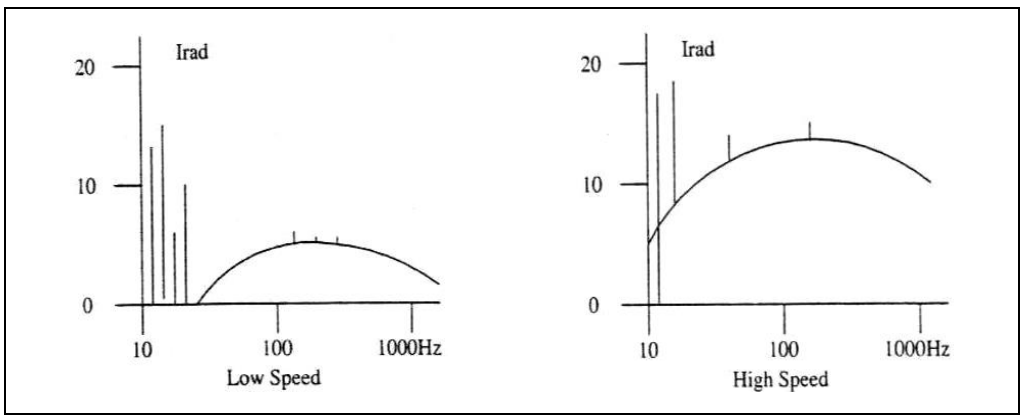
شناورهای هدف می‌باشد. بنابر تعریف، تراز منبع نوفهٔ اکوستیکی یا SL [۸] به شدت صوت در یک باند فرکانس مفروض در فاصلهٔ یک متری از شناور اطلاق و معمولاً در واحد لگاریتمی یا دسیبل نسبت به یک شدت صوت استاندارد اندازه‌گیری می‌شود. البته عموماً آن را برحسب فرکانس بیان می‌کنند که در این‌صورت تراز طیف[۹] نامیده خواهد شد. میزان تراز طیف منبع در فرکانس‌های مختلف، منابع مولد و تأثیرگذار بر آن، تفاوت مقادیر آن برای اهداف و شناورهای گوناگون، از جمله مهم‌ترین موارد قابل ذکر دربارهٔ این نوفه است؛ که در ادامه در حد نیاز به آنها پرداخته می‌شود.

نوفهٔ انتشاری اکوستیکی شناورها عملاً از حرکت پروانه و سیستم پیشرانش، ارتعاشات بدنه، نوفهٔ ماشین‌آلات، مولدهای برق و نوفهٔ شاری[۱۰] به‌وجود می‌آید. از نظر ماهیت، با توجه به منابع مولد، می‌توان طیف نوفه را به دو بخش باندباریک[۱۱] یا مؤلفه‌های گسستهٔ فرکانسی (ناشی از نوفهٔ پروانه و هارمونیک‌های آن) و باندپهن[۱۲] یا پیوستهٔ فرکانسی (ناشی از نوفهٔ ماشین‌آلات و نوفهٔ شاری) تقسیم کرد. عموماً از این دو بخش طیف برای عملیات آشکارسازی[۱۳] (تشخیص وجود هدف) و شناسایی[۱۴] (دسته‌بندی اهداف و شناورها) استفاده می‌شود. در شکل ۱ نمایی کلی از منابع مولد نوفه و همچنین باند فرکانسی آنها نمایش داده شده است [۱]. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، طیف نوفهٔ منتشره در دو قالب باندباریک و باندپهن، و ناشی از نوفهٔ هیدرواکوستیکی[۱۵] (شامل چرخش پروانه، کاویتاسیون[۱۶] آن و نوفهٔ جریانی) و نوفهٔ ماشین‌آلات شامل موتور، دیزل، چرخ‌دنده و ماشین‌آلات کمکی) می‌باشد. در این میان، مؤلفه‌های باندباریک از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. در مورد زیردریایی‌ها، عموماً بخش پیوستهٔ طیف، دارای یک حداکثر در ناحیهٔ ۵۰ تا ۱۰۰ هرتزی می‌باشد و در فرکانس‌های بزرگتر از ۲۰۰ هرتز طیف با دوبرابر شدن فرکانس، ۶ دسیبل افت می‌کند. معنای این مطلب این است که طیف با مربع فرکانس نسبت عکس دارد. در کنار بخش پیوسته، مؤلفه‌های گسسته قابل مشاهده‌ترین نشانهٔ طیف زیردریایی‌ها می‌باشند. چون حتی در سرعت‌های پایین (حداقل نوفهٔ تولیدی زیردریایی) هم آشکار می‌شوند. در ضمن، مجموعهٔ مؤلفه‌های گسسته طیف نوفه برای هر زیردریایی یکتاست که ممکن است برای شناسایی منبع استفاده شود [۲]. خطهای گسسته در ناحیهٔ فرکانسی ۰/۱ تا ۱۰ هرتزی در طیف ناشی از چرخش پروانه می‌باشد که ممکن است در اقیانوس تا فاصلهٔ چند صد کیلومتری نیز شنیده شود، چون جذب در آب اقیانوس در فرکانس‌های پایین قابل اغماض است. خطوط گسسته در محدودهٔ فرکانسی چند هرتزی تا چند صد هرتزی متعلق به ارتعاشات بدنهٔ زیردریایی و اجزای نیروگاه برق آن می‌باشد. مشخص‌ترین خط در طیف منبع در فرکانس‌های ۵۰ و ۶۰ هرتزی به‌ترتیب برای زیردریایی‌های روسی و امریکایی می‌باشد؛ یعنی خطوط معادل فرکانس‌های پایه مولدهای الکتریکی زیر دریایی [۲].

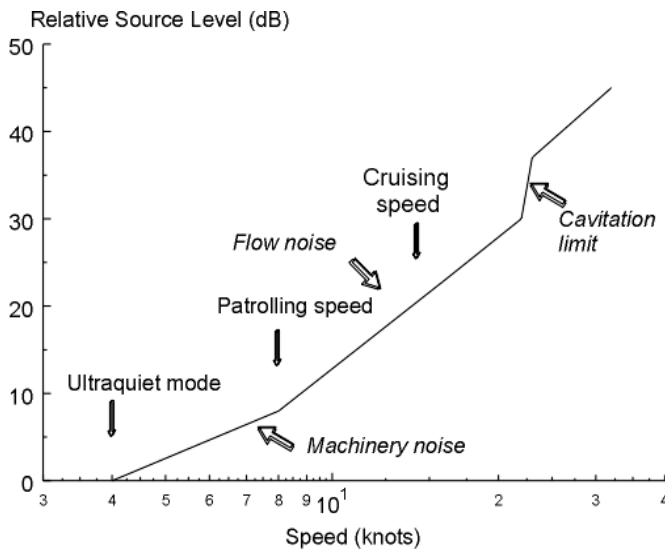
از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر شکل طیف و شدت توان منبع، سرعت شناور است. در شکل ۲ تغییر شکل طیف منبع برای دو حالت سرعت کم و زیاد نمایش داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت سطح بخش پیوستهٔ طیف افزایش و به فرکانس‌های پایین‌تر توسعه می‌یابد. شکل ۳ نیز به‌عنوان نمونه، تغییر نسبی سطح طیف شناورهای زیرسطحی را برحسب سرعت برای حالت‌های گوناگون نمایش می‌دهد. در این شکل، نوفهٔ غالب برای سرعت‌ها و وضعیت‌های گوناگون زیردریایی نمایش داده شده است. عموماً سطح منبع نوفهٔ شناورهای زیرسطحی در حالت حداقل نوفه عنوان می‌شود، در حالت گشت‌های جنگی عموماً سرعت در حدود ۸ نات[۱۷] (۴ متر بر ثانیه) است، که نسبت به حالت ساکت، ۵ تا ۱۰ دسیبل افزایش در طیف خواهیم داشت. در ضمن، زیردریایی‌ها برای طی مسیر تا نواحی گشت‌زنی چند صد مایل می‌پیمایند. برای افزایش کارایی و تضمین پوشش با سرعت حداکثر حرکت می‌کنند.



شکل ۱. نمایی کلی نوفهٔ انتشاری شناورها [۱]



شکل ۲. نمایی از تأثیر سرعت شناور بر طیف نوفهٔ آن. در این نمودارها، محور عمودی شدت انتشاری را نشان می‌دهد [٤]

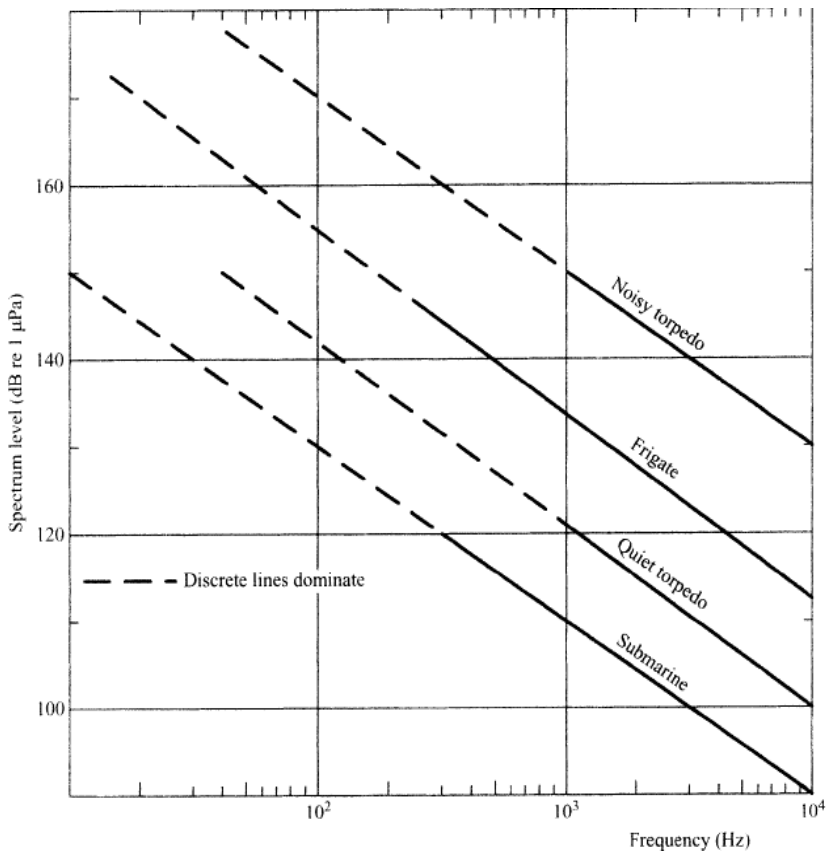


شکل ۳. تغییر نسبی سطح طیف منبع نوفه در سرعت‌های مختلف شناورهای زیرسطحی [۲]

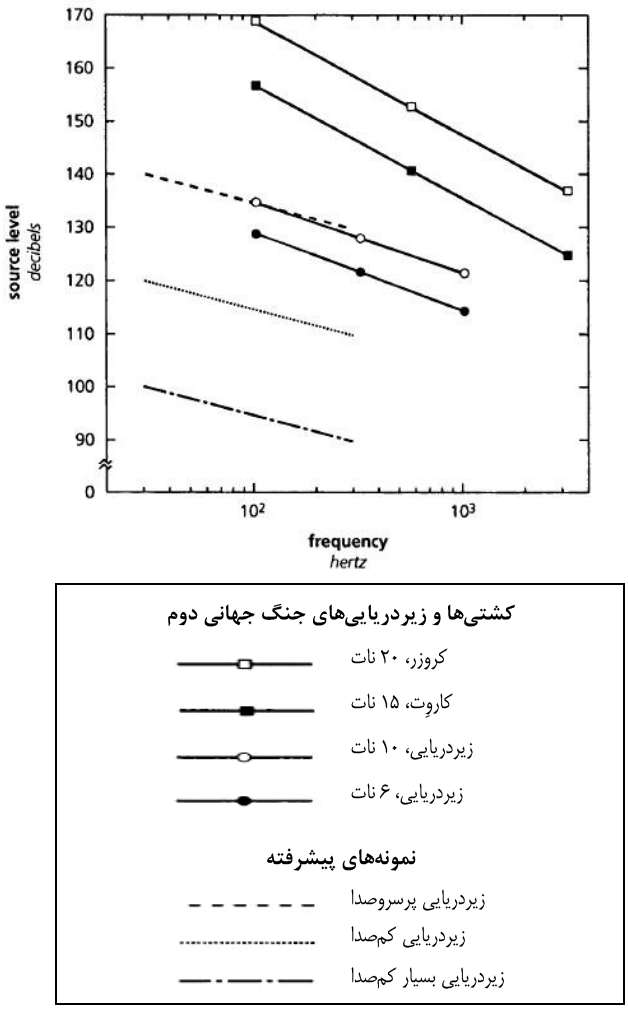
عموماً این سرعت بیشتر از ۱۵ نات (۷/۵ متر بر ثانیه) نیست. در این سرعت نوفهٔ شار[۱۸] یا نوفهٔ هیدرودینامیک، نوفهٔ غالب می‌شود. در این حالت دو برابر شدن سرعت سبب افزایش ۱۸ دسیبل به سطح منبع خواهد بود. در این حالت زیردریایی ۱۵ تا ۲۰ دسیبل از حالت ساکت پرسروصداتر است.

با توجه به ماهیت نوفهٔ شناورها، سطح منبع برای انواع اهداف دریایی متفاوت خواهد بود. این مسئله ناشی از منابع مولد آن است. شکل ۴ به‌صورت مقایسه‌ای، طیف منبع را برای منابع گوناگون اعم از یک شناور سطحی نمونه[۱۹]، یک شناور زیرسطحی و اژدر (پُـرنوفه و کم‌نوفه) نشان می‌دهد. برای مقایسهٔ بیشتر شناورهای سطحی و زیرسطحی، شکل ۵ مقایسه‌ای را برای دو شناور مرسوم کروزر[۲۰] و کاروِت[۲۱]، زیرسطحی‌های جنگ جهانی دوم و نیز مدل زیردریایی‌های پیشرفته نمایش می‌دهد.

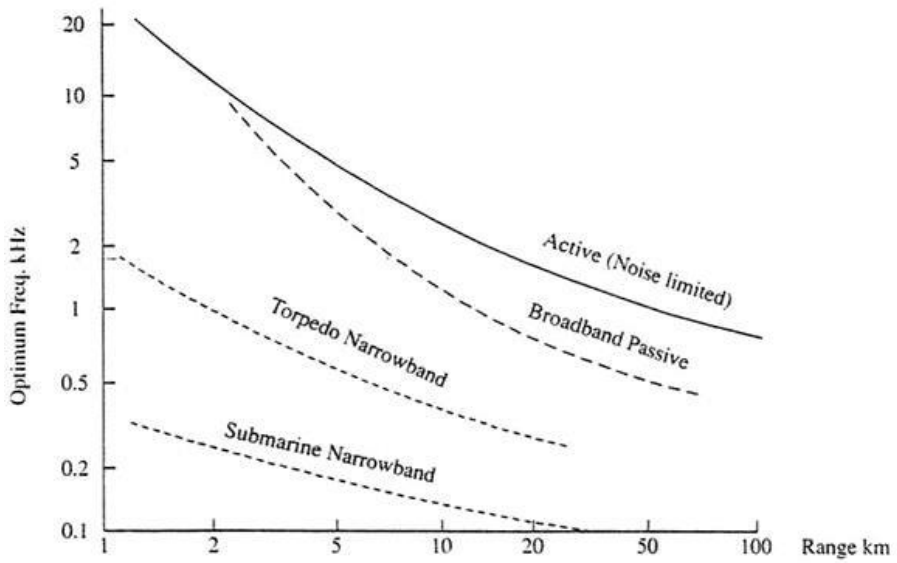
علاوه بر SL مربوط به شناورها، بازهٔ فرکانسی - که بیشترین انرژی مربوط به منبع در آن وجود دارد - نیز در طراحی سیستم‌های سونار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به مراجع [۳] و [۵]، انرژی غالب شناورهای سطحی و زیرسطحی در فرکانس‌های زیر ۱۰۰۰ هرتز نهفته است. البته نوع پردازش نیز اعم از باندباریک و باندپهن در انتخاب فرکانس مناسب تأثیرگذار خواهد بود. عموماً برای پردازش باندباریک سونار غیرعامل شناورهای سطحی و زیرسطحی باند فرکانسی ۱۰۰ تا ۵۰۰ هرتز پیشنهاد می‌شود [۳]. شکل ۶ نمایی از فرکانس مناسب را در چنین سیستم‌هایی نمایش می‌دهد. در این شکل فرکانس بهینه در فواصل مختلف آشکارسازی آمده است. نکتهٔ قابل توجه در حالت باندباریک این است که وجود مؤلفه‌های گسستهٔ فرکانسی در طیف منبع شناور از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد.



شکل ٤. نمایش سطح توان نوفهٔ انتشاری اهداف مختلف [۳]



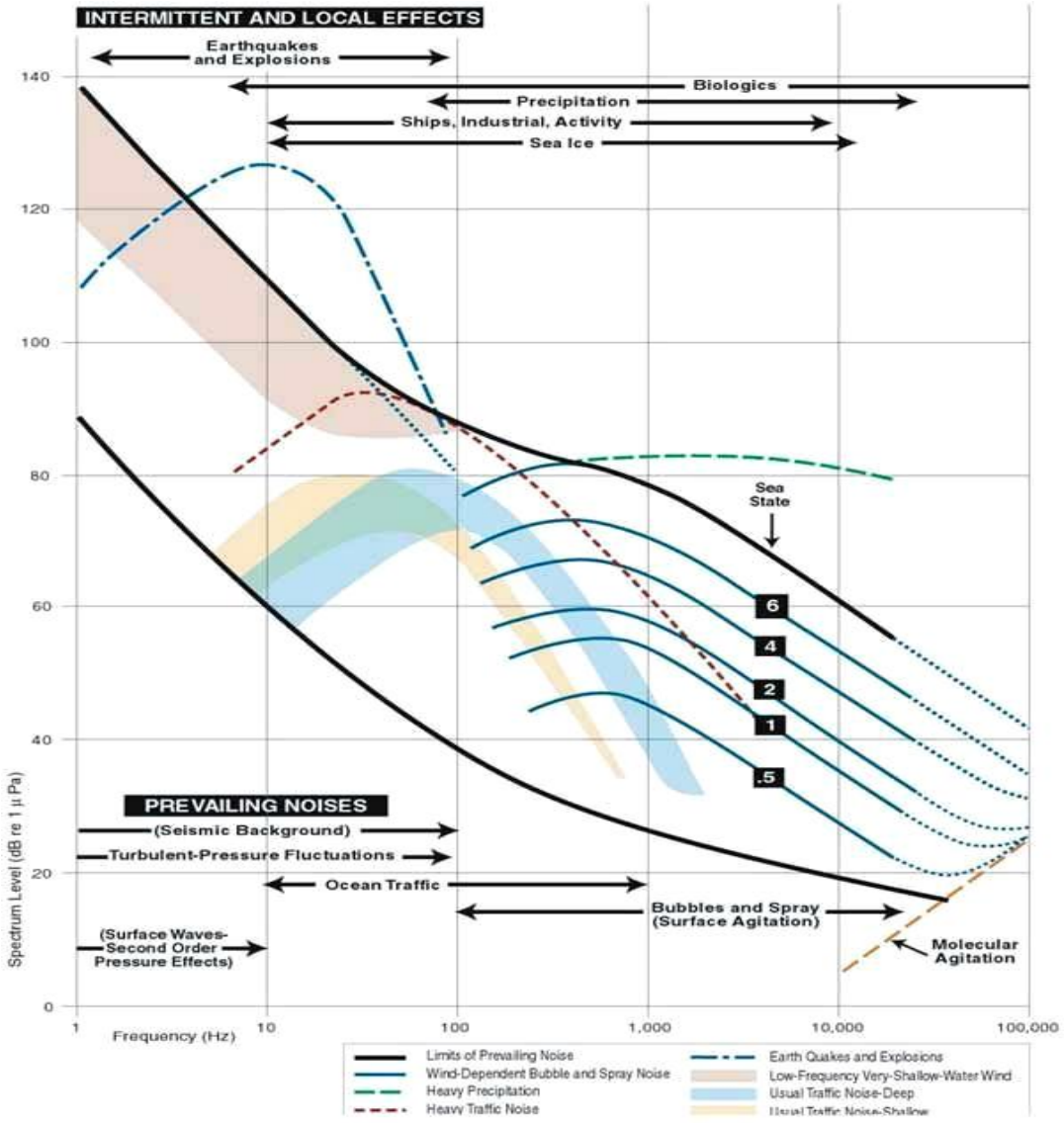
شکل ۵. مقایسهٔ سطح طیف شناورهای سطحی، زیردریایی‌های جنگ جهانی دوم و مدل زیردریایی‌های پیشرفته [٤]



شکل ٦. فرکانس بهینه در فواصل مختلف [۳]

۳. نوفهٔ محیطی

از دیگر عوامل تأثیرگذار بر مشخصات فنی و کارکردی سیستم‌های سونار، نوفهٔ محیطی یا نوفهٔ اکوستیکی زمینهٔ موجود در اعماق است. همانند نوفهٔ شناورها، شناسایی و بررسی عوامل مؤثر و مولد نوفهٔ محیطی و همچنین سطح طیف توان آن در مناطق مختلف، از جمله نیازهای طراحان سیستم‌های سونار می‌باشد. شکل ۷ یکی از کامل‌ترین نمودارهای نمایش سطح طیف نوفهٔ محیطی یا NL [۲۲] می‌باشد [۶]. همان‌گونه که در این شکل مشخص شده است، عوامل متنوعی چون عمق منطقه (کم‌عمق و عمیق)، ترافیک کشتیرانی (کم‌ترافیک و پرترافیک)، سرعت باد و طول امواج سطح دریا، لرزش زمین و انفجارها، فرایندهای بیولوژیکی دریایی، فعالیت‌های صنعتی، باران، یخبندان بر نوفهٔ محیطی تأثیرگذار است. البته عواملی چون نوفهٔ کشتیرانی و نوفهٔ باد نقش بیشتری در میزان سطح نوفهٔ محیطی ایفا می‌کنند. تلفیق این منابع در یک زمان و مکان خاص، سطح نوفه را تعیین می‌کند. نکتهٔ قابل توجه اینکه این تلفیق با زمان تغییر و در نتیجهٔ آن سطح نوفهٔ موجود نیز در زمان‌ها و مکان‌های مختلف به‌طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند.



شکل ۷. نمودار نوفهٔ محیطی زمینه [٦]

عموماً نوفهٔ کشتیرانی در بازهٔ ۵ تا ۵۰۰ هرتزی وجود دارد. سطح نوفه در فاصلهٔ ۱۰ تا ۲۰۰ هرتزی دارای یک قله (حداکثر) است. این نوفه، که تابعی از حجم رفت‌وآمد کشتی‌ها در فواصل زیاد دریاها و اقیانوس‌هاست، در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰۰ هرتز دچار افت می‌شود. از طرف دیگر نوفهٔ باد عموماً در بازهٔ فرکانسی چند هرتز تا بالاتر از ۵۰ کیلوهرتز می‌باشد و طیف آن دارای قلهٔ پهن بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز است و در فرکانس‌های بالاتر با شیبی در حدود ۶ دسیبل در هر اکتاو افت می‌کند.

سطح این طیف در آب‌های عمیق به‌طور متوسط حدود ۵ دسیبل پایین‌تر از آب‌های کم‌عمق (کمتر از ۱۸۳ متر معادل ۱۰۰ فاتوم[۲۳]) می‌باشد. با دو برابر شدن سرعت باد، سطح طیف نوفه در بازهٔ فرکانسی ۵۰۰ هرتز تا ۵ کیلوهرتز تقریباً حدود ۵ دسیبل افزایش می‌یابد.

به‌عنوان نمونه، سطح طیف نوفه در فرکانس ۱۰۰ هرتز برای آب‌های کم‌عمق با ترافیک معمولی NL در حدود ۷۰ دسیبل است. همان‌گونه که در شکل ۷ نمایش داده شده است، با افزایش فرکانس NL کاهش می‌یابد. با توجه به عوامل مؤثر در سطح نوفه، باید با توجه به شرایط محیطی و شدت ترافیک هر منطقه سطح نوفهٔ منطقه پیش‌بینی شود. البته اندازه‌گیری میدانی نوفه در محیط نیز با توجه به اهمیت و اولویت می‌تواند مدنظر قرار گیرد.

٤. تلفات انتقال امواج صوتی در محیط انتشاری

از دیگر عوامل تأثیرگذار بر سیستم‌های سونار، تلفات انتشاری موج صوتی در محیط انتقال زیر آب می‌باشد. پس از تولید موج صوتی منبع، این موج وارد محیط انتقال می‌شود و پس از طی مسافتی به گیرنده می‌رسد، که در این مسیر سطح توان ارسالی منبع (شدت صوت) کاهش خواهد یافت. گستردگی[۲۴] موج صوتی و جذب[۲۵] آن در آب از جمله دلائل کاهش سطح توان ارسالی منبع در زیر آب است [۵]. پارامتر TL [۲۶] نشان‌دهندهٔ تفاوت شدت صوت در منبع ارسالی و گیرنده است. از جمله مهم‌ترین عوامل تعیین‌کنندهٔ تلفات مسیر عبارت است از عمق آب، تغییرات سرعت صوت در اعماق مختلف (پروفیل سرعت صوت) و جنس بستر. یکی از روش‌های مرسوم بررسی میزان تأثیر محیط بر امواج ارسالی از منابع انتشاری، مدلسازی کانال انتشاری می‌باشد. قابل ذکر است که مدلسازی کانال انتشاری نیازمند آگاهی کامل از پارامترهای مؤثر است و علاوه بر آن، با توجه به ماهیت غیرخطی محیط انتقال، این روش‌ها به‌سادگی امکان‌پذیر نخواهد بود. برای مدلسازی انتشار امواج صوتی در زیر آب روش‌های عددی متنوعی وجود دارد که از آن میان می‌توان به روش‌های عددی Normal Mode، Ray Tracing، Beam Tracing و نهایتاً روش عددی Parabolic Equation اشاره کرد [۷]. در کنار این روش‌ها که می‌توانند برای محاسبهٔ تلفات شدت صوت در مسیر انتشاری مورد استفاده قرار گیرند، می‌توان از روش‌های تخمینی یا تجربی برای محاسبهٔ میزان توان تلف‌شده در مسیر استفاده کرد. در ادامه، یکی از روش‌های تخمین افت مسیر در آب‌های کم‌عمق معرفی می‌شود.

همان‌گونه که ذکر شد، تلفات انتشاری در آب‌های کم‌عمق حساسیت زیادی به پارامترهای محیطی سطح، عمق و بستر منطقه دارد. در صورت نبود اطلاعات منطقه (به‌ویژه سرعت صوت و جنس بستر) محاسبهٔ تقریبی تلفات انتشاری توصیه خواهد شد. در فصل ششم از منبع [۵] رابطه‌ای تقریبی ارائه شده است که براساس آن تلفات به‌صورت سه معادله در فواصل گوناگون H به‌دست می‌آید، که این پارامتر به‌وسیله رابطهٔ ۱ محاسبه می شود:

$$H = \sqrt{\frac{D+L}{8}} \qquad (۱)$$

به‌طوری‌که در این رابطه D عمق آب و L عمق لایه (برحسب فوت) و H برحسب کیلویارد می‌باشد. هر یارد معادل ۰/۹۱۴۴ متر است. در فواصل نزدیک، که فاصلهٔ r کمتر از H است، تلفات مسیر برحسب دسیبل از رابطهٔ ۲ به‌دست می‌آید:

$$TL = 20\log r + \alpha r + 60 - k_L \qquad (۲)$$

به‌طوری‌که در این رابطه r برحسب کیلویارد، α ضریب جذب آب دریا برحسب دسیبل در یک کیلویارد و نهایتاً k_L ضریب تأثیر غیرعادی میدان نزدیک[۲۷] است که به وضعیت دریا و جنس بستر بستگی دارد. در فواصل متوسط مانند $H \le r \le 8H$ تلفات مسیر به‌صورت رابطهٔ ۳ به‌دست می‌آید:

$$TL = 15\log r + \alpha r + a_T\left(\frac{r}{H} - 1\right) + 5\log H + 60 - k_L \qquad (۳)$$

به‌طوری‌که در این رابطه r و H برحسب کیلویارد و a_T ضریب تضعیف آب کم‌عمق می‌باشد. برای فواصل زیاد همچون $r \ge 8H$، تلفات مسیر از رابطهٔ ۴ به‌دست می‌آید:

$$TL = 10\log r + \alpha r + a_T\left(\frac{r}{H} - 1\right) + 10\log H + 64.5 - k_L \qquad (۴)$$

این روابط انتقال بین گستردگی کروی نزدیک منبع و گستردگی استوانه‌ای دور از آن را به‌خوبی نشان می‌دهند. برای آشنایی بیشتر با جداول و نمودارهای لازم برای ضرایب مورد نیاز می‌توان به منبع [۵] مراجعه کرد. قابل ذکر است این محاسبات براساس یکصد هزار اندازه‌گیری در آب‌های کم‌عمق در بازهٔ فرکانسی ۰/۱ تا ۱۰ کیلوهرتز به‌دست آمده است [۵]. با توجه به اینکه روابط فوق تقریبی هستند، لذا امکان خطا نیز در آنها وجود دارد که جدول ۱ خطای احتمالی را برای تخمین تلفات انتشاری بین روابط فوق و اندازه‌گیری‌های جداگانه در فرکانس‌ها و فواصل گوناگون نشان می‌دهد.

در رابطه با تخمین تلفات انتشاری در آب‌های عمیق، در فواصلی که در حدود میزان عمق آب از فرستنده قرار دارد، می‌توان از رابطهٔ ۵ و در فواصل بیشتر از رابطهٔ ۶ استفاده کرد [۳].

$$TL = 20\log r + \alpha r \qquad (۵)$$

$$TL = 10\log r + \alpha r \qquad (۶)$$

جدول ۱. خطای احتمالی برحسب دسیبل برای تخمین پارامتر TL

فاصله (کیلویارد)	**فرکانس** (هرتز) ۱۱۲	۴۴۶	۱۱۲۰	۲۸۲۰
۳	۲	۴	۴	۴
۹	۲	۴	۵	۶
۳۰	۴	۹	۱۱	۱۱
۶۰	۵	۹	۱۱	۱۲
۹۰	۵	۹	۱۱	۱۲

۵. ضریب تقویت آرایه[۲۸]

از دیگر پارامترهای مؤثر در تعیین برد یک سیستم سونار آرایه‌ای[۲۹]، ضریب تقویت آرایه است. در واقع این ضریب، به نسبت تغییر توان سیگنال به نوفه[۳۰] در خروجی آرایه به توان سیگنال به نوفه در ورودی هر حسگر اطلاق می‌شود [۸]. این توانایی ناشی از وجود حسگرهای متعدد در آرایه و بهره‌گیری از روش‌های پردازش آرایه می‌باشد به‌صورت تقریبی حداکثر ضریب تقویت آرایه از رابطهٔ ۷ به‌دست می‌آید:

$$AG = 10\log_{10} N \qquad (۷)$$

قابل ذکر است این رابطه برای یک آرایهٔ خطی و در بهترین فرکانس (فرکانس چیدمان آرایه) به‌دست آمده است. مواردی از جمله زاویهٔ نگاه آرایه، چیدمان آرایه، تعداد حسگرها و نیز طول آرایه از مهم‌ترین عوامل محدودکنندهٔ ضریب تقویت آرایه خواهد بود. به‌عنوان نمونه، در شکل ۸ تغییر این ضریب برای یک آرایهٔ ۲۵ حسگری در زاویهٔ نگاه ۶۰ درجه، برحسب فرکانس‌های مختلف نمایش داده شده است.

۶. سطح آستانهٔ آشکارسازی[۳۱]

آخرین پارامتر مؤثر در تخمین برد یک سونار غیرعامل سطح آستانهٔ آشکارسازی است که بنابر تعریف، در واحد دسیبل، به‌صورت رابطهٔ ۸ تعریف می‌شود:

$$DT = 10\log_{10}\left(\frac{S}{N_0}\right) \qquad (۸)$$

به‌طوری‌که در این رابطه، S توان سیگنال در پهنای باند گیرنده و N_0 توان نوفه در باند یک هرتز می باشد [۴]. در ادامه با توجه به فرض‌هایی چون استقلال زمانی نوفهٔ زمینه و سیگنال، از رابطهٔ ۹ می‌توان مقدار آستانه را به‌دست آورد:

$$DT = 5\log_{10}\left(\frac{dW}{t}\right) \qquad (۹)$$

به‌طوری‌که در این رابطه، d شاخص آشکارسازی[۳۲]، W پهنای باند فیلترگیرنده و t زمان انتگرال‌گیری است. مقدار d برحسب مقادیر p_D (احتمال آشکارسازی) و p_{FA} (احتمال اخطار اشتباه) به‌دست می‌آید. شکل ۹ چگونگی محاسبهٔ این مقدار را نمایش می‌دهد. در واقع با توجه به مقادیر موردنظر برای این احتمالات، مقدار شاخص آشکارسازی به‌دست می‌آید. همان‌گونه که از این نمودار مشخص می‌شود، برای کاهش سطح آستانهٔ آشکارسازی، می‌باید d و W کاهش و t افزایش یابد. برای کاهش d، اگر احتمال اخطار اشتباه را کنترل کنیم باید احتمال آشکارسازی را کاهش دهیم و یا در صورت ثابت‌ماندن احتمال آشکارسازی، احتمال اخطار اشتباه را افزایش دهیم. هرچه پهنای باند فرکانسی را کاهش دهیم، سطح آستانهٔ آشکارسازی نیز کاهش می‌یابد. عموماً در بازهٔ ۱۰۰ تا ۵۰۰ هرتز از باند یک هرتزی استفاده می‌شود [۳]. در ادامه هرچه زمان انتگرال‌گیری افزایش یابد، سطح آشکارسازی بیشتر خواهد شد. میزان این زمان به تغییرات سرعت هدف و همچنین نیاز کاربران سیستم بستگی دارد.

۷. تخمین برد

همان‌گونه که در بخش‌های قبل ذکر شد، از جمله مهم‌ترین پارامترهای یک سونار، برد عملکردی آن می‌باشد. به‌منظور تخمین این فاصله از رابطهٔ اساسی سونار غیرعامل استفاده می‌شود. رابطهٔ اساسی سونار غیرعامل به‌صورت نامعادلهٔ ۱۰ می‌باشد [۴-۵]:

$$SL - TL - NL + AG > DT \qquad (۱۰)$$

در واقع این رابطه، شرط آشکارسازی را در یک سونار غیرعامل مشخص می‌کند. در این رابطه، مقدار برد در پارامتر TL نهفته شده است. به‌کمک این رابطه می‌توان حداکثر تلفات را برحسب برد سیستم به‌دست آورد؛ یعنی:

$$TL_{max}(r) < SL - NL + AG - DT \qquad (۱۱)$$

به‌طوری‌که در این رابطه r نشان‌دهندهٔ برد سیستم است. با توجه به این روابط می‌توان بیان کرد که علاوه بر شرایط محیطی، به‌کمک پارامترهای سیستمی همچون آستانهٔ آشکارسازی و ضریب تقویت آرایه می‌توان برد مناسب‌تری به‌دست آورد. قابل ذکر است پارامترهای SL و NL مربوط به مشخصات هدف و شرایط محیطی منطقه می‌باشد و طراحان سونار نمی‌توانند آنها را در جهت افزایش برد بهبود دهند. به‌عنوان یک مثال، مسئلهٔ زیر را در نظر می‌گیریم:

یک سونار غیرعامل را با چیدمان آرایهٔ خطی یکنواخت ۴۰ حسگری در نظر می‌گیریم که برای فرکانس حداکثر ۲۰۰ هرتزی آماده شده است. منطقهٔ مورد نظر با عمق متوسط ۸۰ متر با ترافیک کشتیرانی متوسط است. دو منبع شناور فریگیت[۳۳] و زیرسطحی کوآیت[۳۴] را در نظر می‌گیریم. در این‌صورت داریم:

مشخصات هدف (با توجه به نمودارهای شکل ۴):

هدف ۱: $SL = 145\,dB$

هدف ۲: $SL = 125\,dB$

نوفهٔ محیطی: $NL = 75\,dB$

آرایه: $AG = 16\,dB$

آستانهٔ آشکارسازی:

$w = 1\,Hz$

$d = 16$

$Pfa = \%0.5$

$Pd = \%90$

$t = 30\,sec$

$DT = -1.36\,dB$

برد سیستم:

هدف ۱:

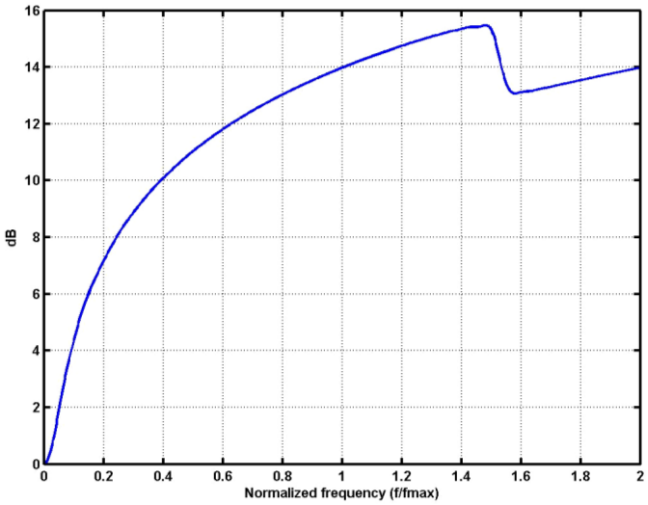
$$TL_{max} = 87.36\ dB$$
$$Range = 28.8 km$$

هدف ۲:

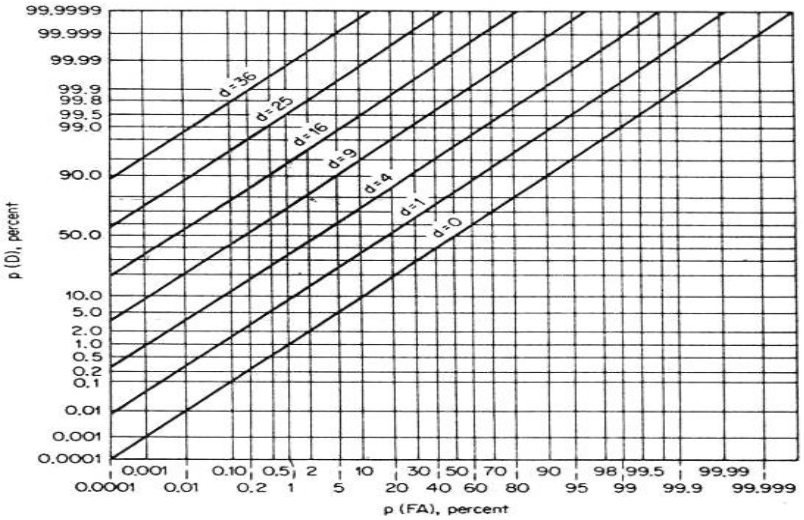
$$TL_{max} = 67.36\ dB$$
$$Range = 4.3 km$$

۸. جمع‌بندی

همان‌گونه که گفته شد، با توجه به مشخصات فنی و کارکردی یک سونار، تخمین برد از اهمیت خاصی برخوردار است. پارامترهای متعددی بر میزان برد تأثیرگذار می‌باشد که شامل مشخصات سیستم سونار (تعداد حسگرها، چیدمان آرایه، فرکانس کاری، مشخصات آشکارسازی سیستم و جز این‌ها) مشخصات منبع صوتی (طیف توان شناورها)، مشخصات محیط انتشاری (پروفیل سرعت صوت، جنس بستر و عمق منطقه) نوفهٔ موجود در منطقه (تردد شناورهای دوردست، سرعت باد و جز این‌ها) هستند. در این مقاله به‌کمک معادلهٔ اصلی سونار، نقش هریک از موارد فوق در تخمین میزان برد سونار غیرعامل بررسی شد. قطعاً دستیابی به تخمین دقیقی از برد یک سونار نیازمند بررسی دقیق هر یک از پارامترهای مؤثر بر آن خواهد بود.



شکل ۸ نمودار ضریب تقویت آرایهٔ خطی یکنواخت ۲۵ حسگری با زاویهٔ نگاه ۶۰ درجه برحسب فرکانس نرمالیزه



شکل ۹. نمودار P_D برحسب P_{FA} با توجه به شاخص‌های آشکارسازی d مختلف [۵]

جدول ۲. خلاصهٔ مشخصات تخمین حداکثر برد

Range (km)	28.8	4.3
TL (dB)	87.36	67.36
DT (dB)	-1.36	-1.36
AG (dB)	16	16
NL (dB)	75	75
SL (dB)	145	125

۹. مآخذ

[1] Sonar Analysis Guide Software (ver. 1.01), Thomson Marconi Sonar Pty. and Jane's Information Group, 1998.

[2] Miasnikov E.V., *The Future of Russia's Strategic Nuclear Forces Discussions and Arguments*, Appendix 1: what is known about the Character of Noise Created by Submarines?, Center for Arms Control, Energy and Environmental Studies, Moscow Institute of Physics and Technology Moscow, 1995.

[3] Waite A.D., *Sonar for Practicing Engineers*, Second Ed., Thomson Marconi Sonar Limited, 1998.

[4] Miasnikov E.V., "Can Russian Strategic Submarines Survive at Sea? The Fundamental Limits of Passive Acoustics", *Science & Global Security*, Vol. 4, pp. 213-251, 1994.

[5] Urick, R.J., *Principles of underwater sound*, McGraw-Hill, 1983.

[6] Wenz, G.M., "Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 34, No. 12, 1962, pp. 1936-56.

[7] Jensen, F.B., Kuperman W.A., Porter M.B. and Schmidt H., *Computational Ocean Acoustics*, Second Edition, Springer, 2011.

[8] Nielsen, R.O., *Sonar signal processing*, Artech House, 1991.

پی‌نوشت

1. Sonar
2. passive
3. ambient noise
4. array gain
5. detection threshold
6. range
7. acoustics noise
8. source level
9. spectrum level
10. flow noise
11. narrow band
12. wide band
13. detection
14. identification
15. hydro-acoustics
16. cavitation
17. Knots
18. flow noise
19. frigate
20. cruiser
21. corvette
22. noise level
23. fathom
24. spreading
25. absorption
26. transmission loss
27. near-field anomaly
28. array gain
29. array-based Sonar
30. signal to noise ratio (SNR)
31. detection threshold
32. detection index
33. Frigate
34. Quiet