

## تحلیل نرخ خطای بیت در لینک مخابراتی زیرآبی امن لیزری در تنگه هرمز

اسماعیل کاظمیان<sup>۱</sup>، فاطمه دباغ کاشانی<sup>۲</sup>، امیر کهرزی<sup>۳</sup>

f\_dk@iust.ac.ir

- ۱- مربی، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)  
 ۲- استادیار دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران  
 ۳- دانشگاه علم و صنعت ایران

### چکیده

در مقاله حاضر در ابتدا مزایای استفاده از لینک مخابراتی لیزری از دیدگاه پدافند غیرعامل - ضد شنود بودن، عدم تداخل فرکانسی، ارسال نرخ داده بالا و عدم ردیابی منبع مخابره اطلاعات - مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. سپس سیستم فرستنده و گیرنده لینک مخابرات لیزری که توسط نرم‌افزار ZEMAX طراحی گردیده، تحلیل می‌شود. با در نظر گرفتن تأثیرات محیطی و با استفاده از رابطه توزیع شدت یک باریکه گوسی بر روی دهانه اجزای نوری گیرنده، توان اپتیکی دریافتی توسط آشکارساز محاسبه گردیده و مقادیر نرخ خطای بیت به صورت عددی محاسبه شده است. در نهایت با استفاده از روابط تحلیلی میانگین شدت، تابع عبوردهی آب و مقدار عددی توان در سطح مشخص، پارامترهای لینک مخابراتی در طی سال ۱۳۹۰ در نقاط مختلف در تنگه هرمز بررسی شده و با پارامترهای لینک مشابه در چابهار مقایسه گردیده است. نتایج بدست آمده به صورت نمودارهای حاصل از محاسبات ارائه شده و تحلیل لازم بمنظور بررسی بکارگیری لینک مخابراتی لیزری جهت بهبود اصول آفا و افزایش توانایی نظامی و اقتدار دریایی صورت پذیرفته است.

واژگان کلیدی: پدافند غیرعامل دریایی، تضعیف اپتیکی، تنگه هرمز، مخابرات لیزری زیرآب.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۲/۷/۷  
 تاریخ پذیرش مقاله : ۹۳/۵/۱۰

## ۱- مقدمه

بر روی جذب و پراکندگی نور و کیفیت لینک مخابراتی تأثیر می‌گذارد [۴].

از سوی دیگر استفاده از منابع نوری همچون لیزر امکان کاهش زاویه فضایی ارسال داده‌ها و مخابره اطلاعات در خط دید مستقیم را فراهم می‌نماید. با توجه به این موضوع استفاده از لینک مخابراتی لیزری علاوه بر ایجاد امکان ارسال داده و تصاویر با پهنای باند بالا، دارای مزایای ضدشوند بودن، عدم تداخل فرکانسی و عدم ردیابی منبع مخابره اطلاعات است که از نقطه نظر پدافند غیرعامل امری حائز اهمیت می‌باشد [۵]. با توجه به این مزایا و وجود معایب احتمالی و تنوع شرایط آبی کشور و تأثیر آن بر پارامترهای کیفیت لینک، شناخت فاکتورهای مؤثر در بکارگیری این نوع مخابرات و سنجش عملکرد آن ضروری است. کیفیت لینک‌های مخابرات اپتیکی (با استفاده از کمیت‌هایی همچون اعتبار<sup>۲</sup> و نرخ خطای بیت) با پارامترهای لینک و خصوصیات آماری آب دریا تعیین می‌گردد. فاکتورهای تعیین‌کننده کیفیت لینک اساساً تحت تأثیر دو پدیده، تأثیرات آب (جذب و پراکندگی) و مشکلات ناشی از سیستم‌های فرستنده و گیرنده قرار می‌گیرند [۶].

هدف این مقاله بررسی مزایا و معایب سیستم مخابرات لیزری و بررسی عملکرد آن با استفاده از پارامترهای کیفیت لینک می‌باشد. بمنظور دستیابی به این هدف، مقاله حاضر بصورت زیر ساماندهی شده است: در بخش نخست نحوه عملکرد سیستم مخابرات لیزری با ذکر مزایا و معایب مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در قدم بعد، محیط آبی به عنوان کانال ارتباطی، تحلیل گردیده و تأثیر کانال انتقال به صورت فاکتور عبوردهی آب دریا ناشی از جذب و پراکندگی کمی‌سازی می‌گردد. لازم به ذکر است که بر اساس مطالعات تجربی، تأثیرات تمامی مواد آلی و معدنی داخل آب با استفاده از یک رابطه تک پارامتری مدل‌سازی شده که تابعیت میزان چگالی کلروفیل را دارد. در نهایت، بر پایه رابطه تحلیلی توزیع شدت و مقدار عددی توان دریافتی، رفتار کمیت‌های نسبت سیگنال به نویز و نرخ خطای بیت با استفاده از داده‌های آماری مقادیر چگالی کلروفیل در دریای عمان (چابهار) و تنگه هرمز در سال ۱۳۹۰ بررسی و مقایسه می‌گردد. نتایج بررسی‌ها و

توسعه روزافزون ارتباطات در کاربردهای موبایل و سیستم‌های بدون سرنشین (اعم از کنترل از دور و خودکار) موجب رشد سیستم‌های بی‌سیم در عرصه‌های مختلف گردیده است. از جمله حوزه‌های مذکور محیط‌های اقیانوسی و دریایی می‌باشند. ارتباطات زیر دریا بسیار چالش‌برانگیز است [۱]. بر خلاف لینک‌های مخابرات زمینی، بدلیل رسانایی بالای آب دریا، فرکانس‌های رادیویی و مایکروویو در آب به شدت دچار تضعیف گردیده و انتشار نمی‌یابند. بدلیل آن‌که انتشار امواج صوتی و آلتراسونیک<sup>۱</sup> در آب دارای تلفات نسبتاً کمی است، برد مخابرات صوتی و فراصوتی بسیار بلندتر می‌باشد [۲]. ولی درعین حال این دسته از ارتباطات اشکالاتی نیز دارند، که مهمترین آنها عبارتند از:

الف) از پهنای باند کوچکی برخوردار می‌باشند، بنابراین نرخ انتقال داده‌ی کمی را فراهم می‌کنند.

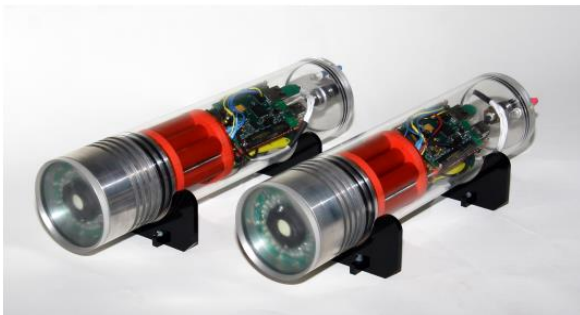
ب) سرعت امواج صوتی و فراصوتی در آب نسبت به امواج الکترومغناطیسی کم می‌باشد (حدود ۱۵۰۰ متر بر ثانیه) که سبب تأخیر در ارتباط می‌گردد.

ج) انتشار این امواج در آب با پراکندگی زیاد صورت پذیرفته و به همین دلیل امکان شنود و موقعیت‌یابی منبع موج وجود دارد. این امر از لحاظ امنیتی در کاربردهای نظامی از معایب بزرگ بشمار می‌آید.

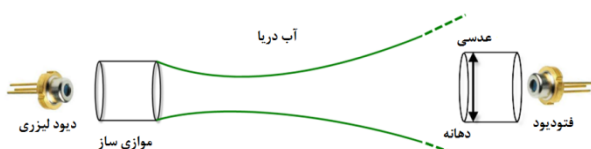
برای رفع محدودیت‌های ارتباطی و دسترسی به پهنای باند وسیع‌تر و فراهم نمودن سرعت انتقال داده‌ی بیشتر، باید فرکانس‌های بالاتر در گروه امواج الکترومغناطیسی (بازه طیفی فرکانس اپتیکی) مورد استفاده قرار گیرد. مخابرات اپتیکی بی‌سیم زیرآبی بدلیل تضعیف انتشاری کمتر طول‌موج‌های آبی/سبز، می‌تواند در این فرکانس‌ها صورت پذیرد [۳]. سرعت انتشار نور در آب در مقایسه با امواج صوتی، بسیار بیشتر (۱۰۸×۵۵۵/۲ متر بر ثانیه) بوده و پهنای باند ارتباطی گسترده‌تری را نیز فراهم می‌نماید. آب دریاها و اقیانوس‌ها محیط جدیدی برای ارتباط و مخابرات اپتیکی است و بنابراین شناخت طبیعت انتشار نور در درون آب، به صورت کمی و کیفی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. آب دریا شامل مواد آلی و معدنی می‌باشد که در نقاط مختلف و در زمان‌های گوناگون متغیر بوده و

<sup>2</sup> Reliability

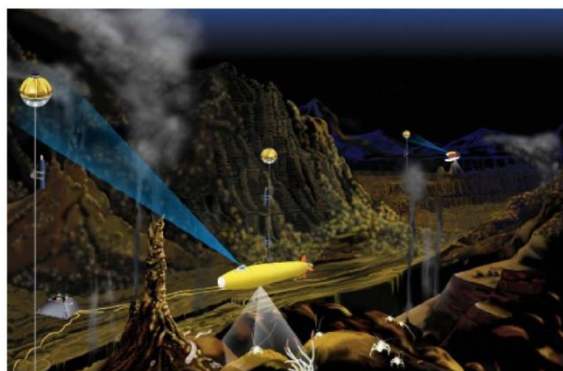
<sup>1</sup> Ultrasonic



شکل (۱) دو مودم (فرستنده-گیرنده اپتیکی) Aquaoptical II [۸].



شکل (۲) اجزاء لینک مخابرات لیزری.



شکل (۳) نمایشی از شبکه مخابرات اپتیکی زیر آب [۹].

- ۲- ارتباط مخابراتی شناورهای زیرآبی خودکار با دیگر شناورها.
- ۳- مخابره اطلاعات و داده بین غواصان یا از غواص به شناور.
- ۴- ارسال اطلاعات علمی ثبت شده در ایستگاههای ثابت کف دریا و یا شناورهای بدون سرنشین زیرآب به سطح آب.
- ۵- مشاهده و تصویربرداری از زیر آب.
- ۶- جمع آوری دادههای اقیانوس شناسی و محیطی.
- ۷- بررسی بدنه ناوها، شناورها و ... و شناسایی عیوب.
- ۸- نقشه برداری کف اقیانوس برای آشکارسازی اجسام. برخی از کاربردهای لینکهای مخابراتی در شکل (۴) نمایش داده شده است. همان گونه که ذکر شد، یک لینک اپتیکی می تواند حجم زیادی از دادهها را به سرعت و با قابلیت اعتماد بسیار بالا بین سطح و زیر آب منتقل نماید.

شبهه سازیهای حاصل از محاسبات به صورت جداول و نمودارهایی بمنظور تحلیل عملکرد لینک مخابرات لیزری جهت بهبود اصول استتار، فریب و اختفا (آفا) و افزایش توانایی نظامی و اقتدار دریایی ارائه می گردد.

## ۲- عملکرد سیستمهای مخابرات لیزری

مخابرات لیزری که اغلب به عنوان "بی سیم اپتیکی" شناخته می شود، شامل ارسال اپتیکی صدا، تصویر و دادهها در هوا (اتمسفیر) و آب به عنوان کانال انتقال می باشد. ارسال و دریافت با استفاده از تکنولوژی مخابرات لیزری نسبتاً آسان است. این فناوری شامل دو سیستم می باشد که هر کدام شامل دو سامانه اپتیکی گیرنده فرستنده می باشند که قابلیت ارتباط دو طرفه کامل را فراهم می نمایند [۷].

هر سیستم مخابرات لیزری یک منبع اپتیکی توان بالا (لیزر) و یک تلسکوپ را به منظور ارسال نور در میان آب به سوی تلسکوپی دیگر در سمت گیرنده بکار می گیرد (مطابق شکل (۱)). همان گونه که ذکر شد، مخابرات لیزری بر پایه استفاده از یک فرستنده لیزری نشانه گیری شده بر روی یک گیرنده فوتودیود، طراحی گردیده است.

شکل (۲) فرستنده اپتیکی یک باریکه نوری مدوله شده را نشان می دهد. در اغلب حالات، هر واحدی دارای یک سامانه فرستنده و یک سامانه گیرنده است که واحد فرستنده-گیرنده را تشکیل می دهند که توانایی برقراری لینک در هر دو سمت را دارا می باشند. از آن جا که اطلاعات باید در یک لینک شبکه ای در دو جهت منتقل شود، پشتیبانی دو طرفه حائز اهمیت می باشد. با توجه به شکل (۳) ارسال اطلاعات توسط این نوع سیستم مخابراتی فقط بر روی زاویه فضایی کوچکی صورت می پذیرد که این موضوع امکان شنود و ردیابی مبدأ ارسال را به شدت کاهش می دهد.

از سوی دیگر، امواج اپتیکی بدلیل تضعیف توسط آب و مواد محلول و ذرات معلق در آن در مخابرات برد کوتاه و متوسط به کار گرفته می شوند.

لینکهای مخابرات اپتیکی زیرآبی در بسیاری از کاربردها از جمله موارد زیر مناسب می باشند:

- ۱- لینکهای ارتباطی ناوها با شناورهای زیرآب.

پیشنهاد گردیده است. از آنجاکه تضعیف اپتیکی آب دریاها ناشی از ضریب جذب طیفی،  $a(\lambda)$  و ضریب پراکندگی طیفی،  $b(\lambda)$  می‌باشد، در این مدل ضریب تضعیف کل بصورت ترکیب خطی از ضریب جذب و پراکندگی،  $\alpha(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) m^{-1}$ ، در نظر گرفته می‌شود. ضریب جذب،  $a(\lambda)$ ، بصورت زیر محاسبه می‌شود [۲]:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_c^0(\lambda) \left( \frac{C_c}{C_c^0} \right)^{0.602} + 35.959 \times 1.74098 C_c \exp\left(0.12327 \left( \frac{C_c}{C_c^0} \right)\right) \times \exp(-0.0189 \times 10^{-9} \lambda) + 18.825 \times 0.19334 C_c \exp\left(0.12343 \left( \frac{C_c}{C_c^0} \right)\right) \times \exp(-0.01105 \times 10^{-9} \lambda) \quad (1)$$

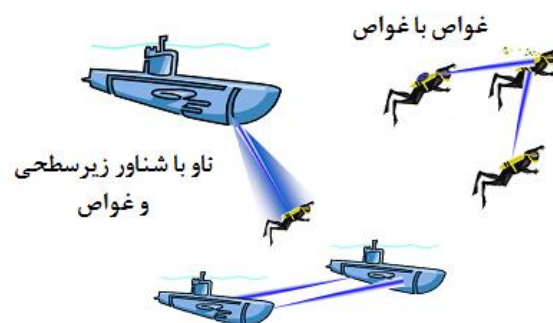
در آن  $a_w(\lambda)$  ضریب جذب آب خالص بر حسب  $\frac{1}{m}$ ،  $C_c$  چگالی کلروفیل بر حسب  $mg/m^3$  و  $a_c^0(\lambda)$  ضریب جذب ویژه کلروفیل بصورت تابعی از طول موج می‌باشند.  $C_c^0$  برابر ۱ میلی‌گرم بر متر مکعب می‌باشد. از سوی دیگر،  $b(\lambda)$  تلفات شار ناشی از تغییر جهت فوتون‌های حاصل از پراکندگی را توصیف می‌کند. ضریب پراکندگی کل،  $b(\lambda)$ ، بصورت تابعی از طول موج و چگالی کلروفیل طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$b(\lambda) = b_w(\lambda) + 1.151302 C_c \left( \frac{400}{\lambda} \right)^{1.7} \exp\left(0.11631 \left( \frac{C_c}{C_c^0} \right)\right) + 0.3411 C_c \left( \frac{400}{\lambda} \right)^{0.3} 0.76284 \exp\left(0.03092 \left( \frac{C_c}{C_c^0} \right)\right) \quad (2)$$

که در آن  $b_w(\lambda)$  ضریب پراکندگی آب خالص است. همان‌گونه که ذکر شد، تلفات ناشی از جذب و پراکندگی بصورت ضریب تضعیف کل  $\alpha(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) m^{-1}$  محاسبه می‌شود. با افزایش  $\alpha(\lambda)$  فاصله‌ای که در آن کمترین توان قابل آشکارسازی دریافت می‌شود، کاهش می‌یابد. میزان تضعیف توان یک لینک مخابراتی با استفاده از قانون بی‌یر که در آن میزان عبوردهی بصورت تابع نمایی با افزایش فاصله انتشاری کاهش می‌یابد، توصیف می‌گردد [۶]:

$$P_R(z) = P_0 e^{-\alpha(\lambda)z} \quad (3)$$

که در آن  $P_R(z)$  توان دریافتی پس از عبور نور در مسیری به طول  $z$  در میان محیطی دارای تلفات،  $P_0$  توان دریافتی بدون در نظر گرفتن تلفات و  $\alpha(\lambda)$  ضریب تضعیف کل محیط می‌باشند.



شناور زیر سطحی با شناور زیر سطحی

شکل (۴) مثال‌هایی از بکارگیری لینک ارتباطی اپتیکی در زیر آب [۱۰].

بکارگیری لینک‌های ارتباطی اپتیکی با پهنای باند وسیع، علاوه بر تبادل سریع و امن اطلاعات بین شناورها، می‌تواند در مسیریابی آن‌ها نیز بکار گرفته شود. سیستم‌های اپتیکی می‌توانند در کاربردهای نظامی، همچون برقراری ارتباط بین زیردریایی‌ها و ناوهای جنگی (زیرسطح - زیرسطح و زیرسطح - سطح)، موقعیت‌یابی و یافتن زیردریایی‌های دشمن استفاده شوند.

با توجه به مزایای مذکور استفاده از لینک‌های مخابراتی لیزری زیرآبی امری ضروری و مفید بنظر می‌رسد. کشورهایی همچون آمریکا، استرالیا، سنگاپور و ... از حدود یک دهه پیش تحقیقات مرتبط با تجاری‌سازی این نوع مخابرات را آغاز نموده و برخی از این کشورها نمونه تجاری لینک‌های مخابراتی لیزری زیرآبی را تولید کرده‌اند. این کشورها در دانشگاه‌های بزرگ خود تحقیقات گسترده‌ای را جهت اصلاح و افزایش کارایی این نوع لینک‌ها در حال انجام دارند.

### ۳- محاسبه تابع عبوردهی آب دریا

همان‌گونه که ذکر شد، آب اقیانوس‌ها شامل مواد آلی و معدنی است که بر روی جذب و پراکندگی نور تأثیر می‌گذارند و پیچیدگی مسئله هنگامی که چگالی مواد آلی و معدنی یکنواخت نبوده و با زمان و مکان تغییر یابد، بیشتر نیز می‌گردد. از آن‌جا که قبل از طراحی لینک مخابراتی یا سیستم تصویربرداری و اکتشافی، شناخت تلفات سیگنال‌های مورد نظر در محیط انتشاری ضروری است، شناخت یک مدل کلی که این تغییرات را در محاسبات وارد نماید، ضروری می‌باشد. بدین منظور مدلی تک پارامتری بر اساس چگالی کلروفیل توسط محققان

## ۴- پارامترهای ارزیابی لینک

کیفیت لینک مخابراتی با استفاده از کمیت‌های سیگنال به نویز، نرخ خطای بیت و اعتبار بر پایه پارامترهای لینک (منبع انرژی، فرستنده و گیرنده) و خصوصیات آب تعیین می‌شود. پارامتر نرخ خطای بیت برای سیگنال مدوله شده On-Off Keying(OOK) بصورت تابعی از نسبت سیگنال به نویز بصورت زیر تعریف می‌گردد [۱۱]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{\text{SNR}} \right) \quad (۴)$$

که در آن نسبت سیگنال به نویز ( $\text{SNR}^1$ ) طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{\text{SNR}} \right) \quad (۵)$$

که در این رابطه،  $P_{n0}$  و  $P_R$  به ترتیب توان دریافتی در آشکارساز و توان برابر نویز آشکارساز می‌باشند. بمنظور محاسبه کیفیت لینک، محاسبه توان و در نتیجه آن شدت، امری ضروری است. توزیع شدت لیزر منتشر شونده در میان آب بر روی صفحه اپتیک گیرنده از رابطه زیر پیروی می‌کند [۱۲]:

$$I(\vec{r}, z) = \frac{k_0^2 A_0^2 w_0^2}{4\alpha\alpha^* B^2 w^2(z')} \exp \left( \frac{-k_0^2 r^2}{2B^2 w^2(z')\alpha\alpha^*} \right) \quad (۶)$$

$$\alpha = \frac{1}{w^2(z')} + \frac{ik_0}{2} \left( \frac{1}{R(z')} - \frac{A}{B} \right)$$

که در آن  $k_0$  عدد موج خلأ،  $A_0$  دامنه میدان الکتریکی،  $w_0$  شعاع کمره باریکه،  $w(z')$  شعاع باریکه در فاصله  $z'$  از محل کمره می‌باشند.  $A$  و  $B$  عناصر ماتریس انتقال موازی‌ساز و  $R(z')$  شعاع انحنای جبهه موج بر روی پنجره لیزر می‌باشند. با توجه به این حقیقت که فقط بخشی از توان تابیده شده به گیرنده توسط آشکارساز جمع‌آوری می‌گردد، توان دریافتی بر روی سطح دایره‌ای به شعاع "a" طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۳]:

$$P_a = \int_0^a \int_0^{2\pi} I(\vec{r}, z) r dr \quad (۷)$$

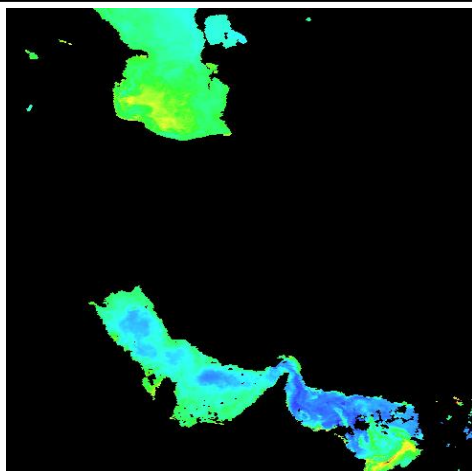
که در آن  $I(\vec{r}, z)$  توزیع شدت در نقطه  $(\vec{r}, z)$  روی صفحه گیرنده می‌باشد. با جایگذاری رابطه (۶) در رابطه (۷) و محاسبه انتگرال، توان در سطح مشخص بدست می‌آید. رابطه فوق بدون در نظر گرفتن تابع عبوردهی آب و تأثیرات جذب و پراکندگی است. تأثیر تابع عبوردهی آب با استفاده از رابطه (۳) اعمال می‌گردد. لازم به ذکر است که روابط (۴)، (۵) و (۷) اساس محاسبات مقاله حاضر می‌باشند.

## ۵- نتایج محاسبات و شبیه‌سازی‌ها

یکی از بخش‌های مهم سیستم فرستنده، موازی‌ساز آن می‌باشد. موازی‌سازی که در شبیه‌سازی‌های این مقاله مورد استفاده قرار گرفته، با نرم‌افزار ZEMAX طراحی شده است. شکل (۵ - الف) طرح موازی‌ساز مذکور را نشان می‌دهد. برای استفاده از ماتریس ABCD، دو عدسی با تقریب عدسی نازک در نظر گرفته شده و موازی‌ساز به طرح شکل (۵ - ب) تقلیل یافته است. پس از دو عدسی موازی‌ساز از شیشه‌ای به قطر ۲ سانتی‌متر از جنس BK7 بمنظور محافظت بخش داخلی در مقابل فشار آب استفاده شده است.

گیرنده شامل یک شیشه محافظ، یک عدسی نازک و یک آشکارساز (در صفحه کانونی عدسی) می‌باشد. عدسی، توان دریافتی را بر روی آشکارساز متمرکز می‌سازد (مطابق شکل (۶)). در مقاله حاضر انتشار یک باریکه گوسی سبز (طول موج ۵۳۲ نانومتر) با تقارن دایره‌ای (قطر ۰/۹ میلی‌متر بر روی پنجره خروجی لیزر) دارای واگرایی اولیه ۱۰ درجه مورد مطالعه قرار گرفته است. اگر منبع لیزر در فاصله ۱۷/۷۲ میلی‌متری از موازی‌ساز قرار گیرد، واگرایی باریکه خروجی ۲ میلی‌رادیان خواهد بود. اندازه دهانه اپتیک گیرنده ۱۵ سانتی‌متر است. داده‌های چگالی کلروفیل که در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، مربوط به چابهار و سه نقطه در تنگه هرمز بوده که در بازه زمانی فروردین تا اسفند ۹۰ نمونه‌برداری شده است. شکل (۷) محل استقرار لینک در تنگه هرمز و دریای عمان را نشان می‌دهد. شکل (۸) تصویری از نقشه چگالی کلروفیل ارائه شده در مرجع [۱۵] را نمایش می‌دهد. داده‌های آماری مقادیر چگالی کلروفیل برای چهار ماه نمونه در جدول (۱) ارائه شده است.

<sup>1</sup>Signal to Noise Ratio<sup>2</sup>Noise Equivalent Power

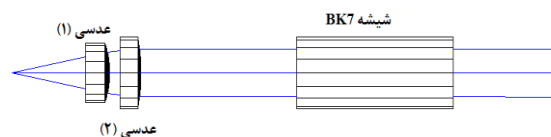


شکل (۸) تصویری از طرح چگالی کلروفیل ارائه شده در مرجع [۱۵] مربوط به شهریور ۱۳۹۰.

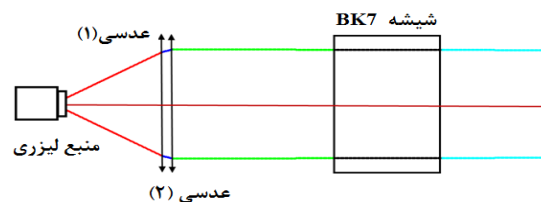
جدول شماره (۱) مقادیر چگالی کلروفیل چابهار و تنگه هرمز در چهار فصل مختلف سال ۱۳۹۰.

تاریخ	اردیبهشت	مرداد	آبان	بهمن
چگالی کلروفیل (میلی گرم بر متر مکعب)، چابهار	0.11	0	0.54	2.37
چگالی کلروفیل (میلی گرم بر متر مکعب)، تنگه هرمز (۲۰'E، ۲۶° ۴۰'N) (۵۶°)	1.29	1.47	0.67	2.27
چگالی کلروفیل (میلی گرم بر متر مکعب)، تنگه هرمز (۳۰'E، ۲۶° ۴۰'N) (۵۶°)	1.19	0	0.52	2.07
چگالی کلروفیل (میلی گرم بر متر مکعب)، تنگه هرمز (۴۰'N) (۲۶° ۵۰'E) (۵۶°)	0.71	0	0.73	1.93

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای محیطی بر روی کیفیت لینک، نسبت سیگنال به نویز و نرخ خطای بیت مطالعه می‌شود. شکل (۱۰-الف) نسبت سیگنال به نویز بر حسب طول مسیر انتشاری را برای چابهار در چهار فصل مختلف نشان می‌دهد. نسبت سیگنال به نویز بر حسب طول مسیر

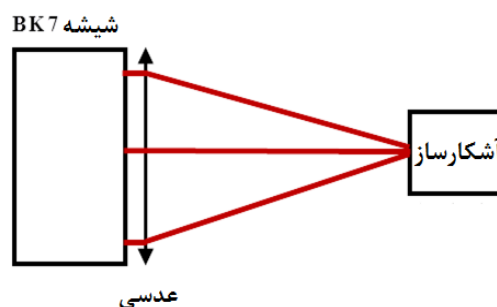


(الف)



(ب)

شکل (۵ - الف) طرح شماتیک موازی‌ساز طراحی شده با نرم‌افزار ZEMAX و (ب) طرح شماتیک موازی‌ساز تقریب زده شده با عدسی نازک،  $A = -1/0.902$ ،  $B = 0/0.238$ ،  $C = 0/1161$  و  $D = 0/1161$ .



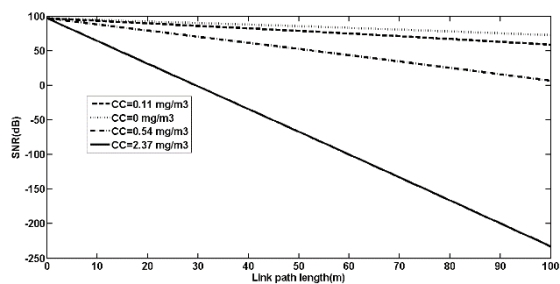
شکل (۶) طرح شماتیک گیرنده اپتیکی.



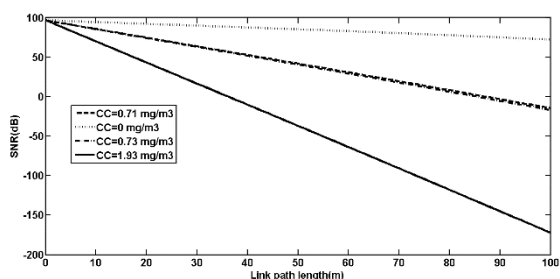
شکل (۷) محل استقرار لینک در دریای عمان و تنگه هرمز [۱۴].

شکل (۹ - الف) میزان عبوردهی بر حسب طول موج را برای مقادیر مختلف چگالی کلروفیل نشان می‌دهد. میزان عبوردهی بر حسب طول موج برای مقادیر مختلف چگالی کلروفیل در تنگه هرمز (۲۶° ۴۰'N، ۵۰'E) در شکل (۹ - ب) نمایش داده شده است. همانگونه که در نمودارها مشاهده می‌شود با افزایش مقدار چگالی کلروفیل، طول موجی که در آن مقدار عبوردهی بیشینه می‌گردد از طول موج آبی (۴۵۰ نانومتر) به ناحیه طول موج سبز (حدود ۵۳۲ نانومتر) جابه‌جا می‌شود.

گردید. نتایج شبیه‌سازی‌ها بدین قرار می‌باشند: (۱) تغییر در موقعیت جغرافیایی با تغییر مقدار کلروفیل همراه بوده و سبب ایجاد تغییرات در نرخ خطای بیت و در نتیجه برد لینک و اعتبار آن می‌شود. (۲) پارامترهای محیطی تأثیرگذار بر روی کیفیت لینک مخابراتی در طول سال متغیر می‌باشد. افزایش مقدار چگالی کلروفیل سبب کاهش میزان عبوردهی و افزایش نرخ خطای بیت می‌گردد.

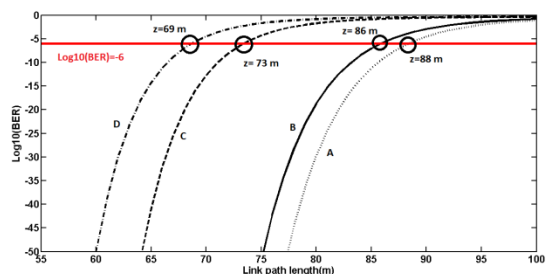


(الف)



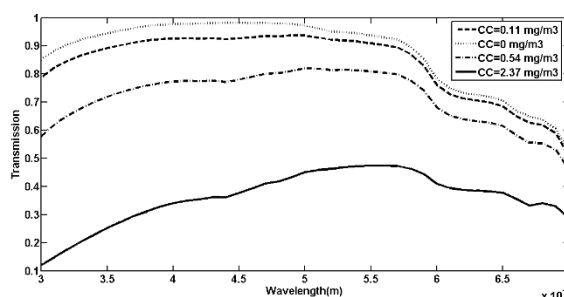
(ب)

شکل (۱۰ - الف) نسبت سیگنال به نویز بر حسب طول مسیر انتشاری برای چهار مقدار چگالی کلروفیل مختلف در چابهار و (ب) نسبت سیگنال به نویز بر حسب طول مسیر انتشاری برای چهار مقدار چگالی کلروفیل مختلف در تنگه هرمز.

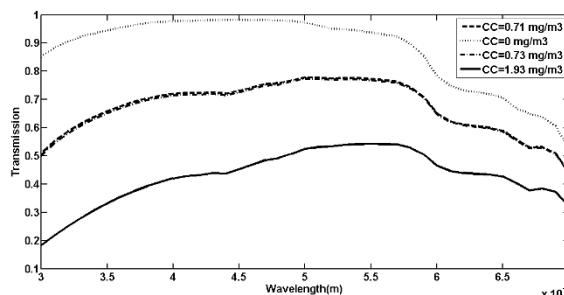


شکل (۱۱) مقدار نرخ خطای بیت بر حسب طول لینک برای چهار موقعیت جغرافیایی مختلف در آبان‌ماه سال ۱۳۹۰: A: تنگه هرمز (۲۶° ۴۰'N، ۵۶° ۳۰'E)، B: چابهار، C: تنگه هرمز (۲۶° ۴۰'N، ۵۶° ۲۰'E)، D: تنگه هرمز (۲۶° ۴۰'N، ۵۰° ۵۶'E).

انتشاری برای تنگه هرمز در چهار فصل مختلف سال ۱۳۹۰ در شکل (۱۰ - ب) نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۹ - الف) میزان عبوردهی بر حسب طول موج برای چهار مقدار چگالی کلروفیل در چهار فصل سال در چابهار در بازه طول موجی ۳۰۰-۷۰۰ نانومتر و (ب) میزان عبوردهی بر حسب طول موج برای چهار مقدار چگالی کلروفیل در چهار فصل سال در تنگه هرمز (۲۶° ۴۰'N، ۵۶° ۵۰'E) در بازه طول موجی ۳۰۰-۷۰۰ نانومتر.

## ۶- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر نحوه عملکرد لینک مخابرات لیزری زیر آب و مزایا و معایب آن از دیدگاه پدافند غیرعامل مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌های محققان و نتایج شبیه‌سازی‌های این مقاله دلالت بر آن دارد که این نوع از مخابرات به دلیل واگرایی کم باریکه حامل، ضدشنود بوده و ردیابی منبع ارسال اطلاعات در آن دشوار است.

از سوی دیگر فرکانس بالای حامل امکان ارسال داده‌های صوتی، تصویری و ... را با پهنای باند بالا و بصورت آنی فراهم می‌نماید. به‌منظور شبیه‌سازی دقیق‌تر لینک مخابراتی، محیط آبی به عنوان کانال انتقال بر اساس رابطه‌ای تک پارامتری و با فاکتور عبوردهی آب مدل‌سازی گردیده و پارامترهای مخابراتی از جمله نسبت سیگنال به نویز و نرخ خطای بیت با استفاده از رابطه تحلیلی توزیع شدت بر روی اپتیک گیرنده و مقدار توان دریافتی محاسبه

- Optics & Laser Technology, Vol. 42, No. 8, Nov. 2010.
- [6] Kvicala, R., Kvicera, V., Grabner, M. and Fiser, O., "BER and Availability Measured on FSO Link", Radioengineering Journal, Vol. 16, No.7, Sep. 2007.
- [7] Web Site of <http://www.weopedia.com>.
- [8] Doniec, M. and Rus, D., "BiDirectional Optical Communication with Aqua Optical II", IEEE International Conference on Communication Systems, pp. 390-394, Nov. 2010.
- [9] Farr, N., Chave, A. D., Freitag, L., Preisig, J., White, S. N., Yoerger, D. and Sonnichsen, F., "Optical Modem Technology for Seafloor Observatories", IEEE Journal of OCEANS, pp. 1-6, Sep. 2006.
- [10] Cox, W. C. and JR, A., "1 Mbps Underwater Communication System Using a 405 nm Laser Diode and Photomultiplier Tube", M. Sc. Thesis, North Carolina state University, 2007.
- [۱۱] اسماعیل کاظمیان، فاطمه دباغ کاشانی، "تحلیل لینک مخابرات اپتیکی زیر آب در دریای خزر و مقایسه آن با دریای عمان"، نوزدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران به همراه پنجمین کنفرانس مهندسی فوتونیک ایران، ۳ تا ۵ بهمن ۱۳۹۱، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۱۳۹۱.
- [12] Andrews, L. C. and Phillips, R. L., Laser Beam Propagation Through Random Media, The International Society for Optical Engineering Publications; 2<sup>nd</sup> edition, 1998.
- [13] LB. E. A. Saleh and Teich, M. C., Fundamentals of Photonics, 2<sup>nd</sup> Edition, Wiley Series in Pure and Applied, 2007.
- [14] Web Site of <http://maps.google.com>.
- [15] Web Site of <http://earthobservatory.nasa.gov>.
- علیرغم تأثیر تضعیف آب بر روی کیفیت لینک، نتایج حاصل دلالت بر آن دارد که این نوع مخابرات در برد کوتاه و متوسط پاسخگوی برخی از نیازهای نیروی دریایی بوده و با شبکه‌بندی مناسب قابلیت بکارگیری در برد نسبتاً بلند را دارا می‌باشد. امید است شبیه‌سازی این مقاله گامی مؤثر در بومی‌سازی سیستم مخابرات لیزری زیر آب باشد که مورد توجه کشورهای توسعه‌یافته جهان است.

## ۷- مراجع

- [1] Kumar, P. V., Proneeth, S. S. K. and Romarsha, B. N., "Analysis of Optical Wireless Communication for Underwater Wireless Communication", International Journal of Scientific & Engineering Research. Vol. 2, No. 1, 2011.
- [2] Chancey, M. A., "Short Range Underwater Optical Communication Links", M. Sc. Thesis, North Carolina State University, 2005.
- [3] Giles, J. W. and Bankman, I. N., "Underwater Optical Communication Systems, Part 2: Basic Design Consideration", IEEE Military Communications Conference, Vol. 3, pp. 1700-1705, Oct. 2005.
- [4] Jaruwatanadilok, S., "Underwater Wireless Optical Communication Channel Modeling and Performance Evaluation Using Vector Radiative Transfer Theory", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 26, No. 9, Nov. 2008.
- [5] Hedayati Rad, M. Reza, Khashani, F. D., Eftekhari, M. M. and Mahzoun, M. R., "Characterizing the Divergence Properties of the Laser Diode Beams Propagation Through Collimator and Aperture ABCD Optical System",