

## تحلیل لینکهای مخابرات لیزری در فصلهای مختلف در سواحل مکران، چابهار

<sup>۱</sup> اسماعیل کاظمیان، <sup>۲</sup> فاطمه دباغ کاشانی<sup>۱</sup> دانشکده علوم، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی(ره)، نوشهر، مازندران،<sup>۲</sup> آزمایشگاه فوتونیک و اپتوالکترونیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده- بمنظور تحلیل لینکهای مخابرات لیزری زیر آب در سواحل مکران، خصوصیات انتشاری باریکههای لیزری گوسی در میان یک مسیر اپتیکی کامل، شامل آب دریا، فرستنده و گیرنده اپتیکی، بررسی شده است. با استفاده از انتگرال کولینز، روابط تحلیلی توزیع شدت و توان دریافتی استخراج گردیده است. سپس با استفاده از رابطه تحلیلی توان دریافتی و معادله تضعیف آب دریا، مقادیر عددی نسبت سیگنال به نویز و نرخ خطای بیت محاسبه شده است. تأثیر چگالی کلروفیل دریای عمان در دو سال متوالی بر پارامترهای لینک- نسبت سیگنال به نویز و نرخ خطای بیت- بررسی گردیده است. نتایج بدست آمده بصورت نمودارهای حاصل از محاسبات ارائه شده است. نتایج عملی حاصل از این شبیه سازیها می تواند منجر به افزایش امکان برقراری ارتباطات امن زیر آبی و در نتیجه ایجاد برتری و اقتدار بیشتر در نیروی دریایی گردد.

واژه های کلیدی- دریای عمان، چابهار، سواحل مکران، باریکه گوسی واگرا، تضعیف آب دریا، مخابرات لیزری زیر آب

## مقدمه

در دهه های اخیر حضور بشر در دریاها و اقیانوسها به دلایل نظامی، اکتشافی و تجاری افزایش چشم گیری یافته است. اغلب کشورهای جهان تحقیقات اکتشافی و شناسایی زیر آبی بسیاری را در آبهای منطقه ای و بین المللی انجام داده اند. لازمه حضور ایمن برقراری ارتباط و مخابره اطلاعات بصورت بی سیم می باشد. مخابرات بی سیم زیر دریا کاربردهای بسیار زیادی همچون ارتباط بین غواصان، شناورهای زیر سطحی بدون سرنشین، زیردریاییها و ناوها دارد. ارسال اطلاعات کنترل از راه دور این شناورها و زیردریاییها بر پایه ارتباط بی سیم بنا شده اند. مخابرات بی سیم زیر آب موضوعی بحث برانگیز است زیرا اغلب روشهای معمول که برای مخابرات دیجیتال در اتمسفر بکار می رود، در آب کارایی ندارند. فرکانسهای رادیویی به شدت در آب تضعیف می گردند و مخابرات آکوستیکی پهنای باند کمی را تأمین می نماید. بنابراین، برای انتقال داده های با حجم زیاد با کمترین تأخیر زمانی ممکن در زیر آب روشهای مخابراتی بسیار سریع و کارآمدی مورد نیاز است (R. Zimmer, Schill, 2004, Trumf). یکی از روشهای ارتباطی در اتمسفر که در آب نیز قابل بکارگیری است، مخابرات نوری می باشد (Brizzolara, Anguita, 2009, Parodi). بکارگیری دیودهای نوری و دیودهای لیزری، بدلیل توان مصرفی کم، ولتاژ عملکرد پایین، طول عمر زیاد، ابعاد کوچک و قیمت مناسب آنها و همچنین امکان برقراری ارتباط با پهنای باند زیاد بین نودها، ضروری و مفید می باشد. در مخابرات لیزری زیر آب، طول موج مادون قرمز اتمسفر با طول موج سبز (۵۳۲ نانومتر) جایگزین می شود. بمنظور بهره برداری از مزایای بالقوه مخابرات اپتیکی زیر آب، شناخت تأثیرات آب بر انتشار نور در آن در مطالعات تجربی و کاربردی حائز اهمیت است. آب دریا شامل مواد آلی و معدنی می باشد که در نقاط مختلف و در زمانهای گوناگون متغیر بوده و بر روی جذب و پراکندگی نور تأثیر می گذارد.

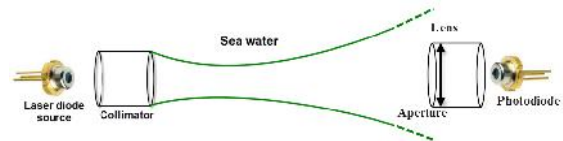
سیستم های مخابرات اپتیکی شامل سه زیر مجموعه اصلی می باشند: فرستنده، کانال انتقال (آب دریا) و گیرنده (Andrews و Phillips, 1998). فرستنده و گیرنده شامل تعدادی المان اپتیکی می باشند که با بهینه نمودن پارامترهای واگرایی در فرستنده و متمرکزسازی در گیرنده نسبت سیگنال به نویز را افزایش می دهند. بنابراین، انتشار باریکه های لیزری درون سیستم های اپتیکی یکی از موضوعات مورد توجه در تحقیقات تئوری و کاربردی می باشد (Lü و Ji, Zhao, 2003). و تعدادی جواب دقیق برای معادله موج در برخی شرایط اولیه و تقارنهای خاص بدست آمده است (Hu و Fu, Guo, Yu, 2002). در تقریب پاراکسیال، انتشار باریکه در میان یک سیستم پاراکسیال ABCD با فرمول کولینز (Cai, Baykal و Eyyubo lu, Lü, 2008, Collins, 1970, Siegman, 1986) مشخص سازی می گردد. از آنجاکه سیستم های مخابرات لیزری در گروه لینک های مخابراتی خط دید مستقیم می باشند، طراحی اپتیکی آنها و نگهداری و نصب سیستم هد فرستنده-گیرنده باید با دقت بسیار بالا صورت پذیرد. در عمل باریکه لیزری سیستم های مخابرات لیزری دارای مقداری واگرایی می باشند که نشانه گیری و ردیابی هد گیرنده-فرستنده را در مسیر ساده تر می سازد. این واگرایی می تواند سبب اتلاف انرژی گردد. میزان اتلاف انرژی وابسته به طراحی فرستنده-گیرنده، واگرایی حاصله، و قطر دهانه گیرنده می باشد که می تواند بر روی کیفیت لینکهای مخابرات اپتیکی تأثیر بگذارد.

کیفیت لینکهای مخابرات اپتیکی (با استفاده از کمیت هایی همچون اعتبار و نرخ خطای بیت) با پارامترهای لینک و خصوصیات آماری آب دریا تعیین می گردند (Fiser و Grabner, Kvicera, Kvicala, 2007). فاکتورهای تعیین کننده کیفیت لینک اساساً تحت تأثیر دو پدیده، تأثیرات آب (جذب و پراکندگی) و مشکلات ناشی از سیستم های فرستنده و گیرنده، قرار می گیرند.

هدف این مقاله مطالعه تأثیرات چگالی کلروفیل در فصول مختلف در دوسال متوالی در دریای عمان، سواحل مکران، بر کیفیت لینک می‌باشد. لازم به ذکر است که بر اساس مطالعات تجربی تأثیرات تمامی مواد آلی و معدنی داخل آب با استفاده از رابطه تک پارامتری کمی‌سازی می‌گردد که تابعیت میزان چگالی کلروفیل را دارد. بمنظور دستیابی به این هدف، مقاله حاضر بصورت زیر ساماندهی شده‌است: در ابتدا، روابط تحلیلی انتشار باریکه گوسی دایره‌ای در یک مسیر کامل در آب دریا، متشکل از موازی‌ساز بدون دهانه اپتیکی، مسیر انتشاری در آب، یک عدسی نازک با دهانه و یک مسیر انتشاری از عدسی تا صفحه کانونی (محل استقرار آشکارساز)، استخراج می‌گردند. در قدم دوم، عبوردهی آب دریا ناشی از جذب و پراکندگی و توان دریافتی بر پایه رابطه‌ای تحلیلی محاسبه می‌شود. در نهایت، رفتار کمیت‌های نسبت سیگنال به نویز و نرخ خطای بیت با استفاده از داده‌های آماری مقادیر چگالی کلروفیل در دریای عمان، سواحل مکران- چابهار، در سالهای ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ تحلیل می‌گردد.

۲- معادله انتشار باریکه گوسی در میان یک مسیر اپتیکی کامل در آب دریا

طرح شماتیک انتشار باریکه لیزری در یک مسیر اپتیکی کامل در آب دریا در شکل (۱) نشان داده شده‌است.



شکل (۱): طرح شماتیک انتشار باریکه لیزری گوسی در میان یک مسیر اپتیکی کامل شامل موازی‌ساز بدون دهانه و گیرنده با دهانه اپتیکی

لینک مخابراتی شامل سیستم اپتیکی بدون دهانه (ماتریس ABCD)، یک مسیر اپتیکی،  $L_2$ ، یک عدسی نازک با دهانه و یک مسیر انتشاری از عدسی تا صفحه کانونی ( $A_1 B_1 C_1 D_1$ ) می‌باشد. توزیع میدان گوسی منتشرشونده از صفحه  $z=0$  به نیم‌صفحه  $z>0$ ، که سیستم اپتیکی موجود می‌باشد (شکل (۱))، بصورت زیر تعریف می‌شود (Saleh و Teich، ۲۰۰۷):

$$U_0(\vec{r}, 0) = A_0 \frac{w_0}{w(z')} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2(z')}\right) \times \exp\left(-jk_0 z' - \frac{jk_0 r^2}{2F_0(z')} + j\psi(z')\right) \quad (1)$$

که در آن  $w_0$ ،  $w(z')$  و  $F_0(z')$  به ترتیب اندازه کمره باریکه، عرض باریکه و شعاع انحنای جبهه‌موج می‌باشند.  $k_0$  عدد موج در خلاء است.  $\psi(z')$  فاز طولی باریکه لیزری می‌باشد. انتشار میدان الکتریکی بر پایه انتگرال کولینز بصورت زیر تحلیل می‌گردد (Andrews و Phillips، ۱۹۹۸):

$$U(\vec{r}, z) = \frac{-jk_0}{2fB} \exp(jk_0 z) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \dots U(\vec{r}', 0) \times \exp\left[\frac{jk_0}{2B} (A \dots^2 - 2 \dots \vec{r} + D r^2)\right] \quad (2)$$

که در آن  $\vec{r}$  و  $\vec{r}'$  به ترتیب بردارهای مختصات عرضی در صفحه فرستنده و گیرنده می‌باشند.  $A$ ،  $B$ ،  $C$  و  $D$  عناصر ماتریس ABCD معرفی‌کننده سیستم اپتیکی هستند. با جایگذاری توزیع میدان الکتریکی در رابطه (۲) و حل انتگرال‌های مربوطه، توزیع میدان الکتریکی بر روی صفحه گیرنده محاسبه می‌شود. سپس، بمنظور محاسبه میدان الکتریکی و توزیع شدت بعد از اپتیک گیرنده، از رابطه میدان الکتریکی بر روی اپتیک گیرنده به عنوان تابع توزیع میدان اولیه در انتگرال تعمیم‌یافته کولینز با حدود انتگرال‌گیری محدود (رابطه (۳)) استفاده می‌شود (Lü، Cai، Baykal و Eyyubo lu، ۲۰۰۸ و Cai و Hu، ۲۰۰۶ و Lin و Cai، ۲۰۰۲):

$$U(\vec{r}', z) = \frac{-jk_0}{2fB_1} \exp(jk_0 z) \iint_S d^2 r \times U(\vec{r}, L_2) \exp\left[\frac{jk_0}{2B_1} (A r^2 - 2 \dots \vec{r} + D \dots'^2)\right] \quad (3)$$

که در آن  $S$  دایره‌ای با شعاع  $a$  با مرکز  $(0,0)$  ( $2a$  دلالت بر عرض دهانه گیرنده دارد) می‌باشد.  $A_1$ ،  $B_1$ ،  $C_1$  و  $D_1$  عناصر ماتریس انتقال سیستم اپتیکی تنظیم‌شده هستند. انتگرال فوق جواب تحلیلی نداشته و بمنظور حل این مسئله، روشی توسط Wen و Breazeale ارائه شده-

است. طبق این روش، تابع دهانه بر حسب جمع توابع گوسی مختلط برهم‌نهاده شده به شکل زیر تقریب زده می‌شود (Eyyubo lu, Lü, Cai) و Baykal, ۲۰۰۸ و Cai و Hu, ۲۰۰۶ و Lin و Cai, ۲۰۰۲ و Mei و Zhao, Gu و ۲۰۰۶ و Wang و Zhang, Mao, Zhao و ۲۰۰۳):

$$T_M(r) = \sum_{m=1}^M A_m \exp\left(\frac{-B_m}{a^2} r^2\right) \quad (۴)$$

که در آن  $A_m$  و  $B_m$  دلالت بر ضرایب بسط و ضرایب گوسی دارند (Wen و Breazeale و ۱۹۸۸). نتایج عددی نشان می‌دهد که دقت شبیه‌سازی با افزایش  $M$  افزایش می‌یابد. و تقریب دهانه در مقدار  $M=10$  توصیف خیلی خوبی از باریکه پراشیده شده در بازه حدود  $0.12$  فاصله فرنل تا بی‌نهایت می‌دهد، در حالیکه ناهمخوانی‌هایی تنها در حد میدان نزدیک دارد (Wen و Breazeale و ۱۹۸۸ و Wang و Zhang, ۲۰۰۳). همه مولفه‌های آرایه  $A_m$  و  $B_m$  در مرجع [۱۹] ارائه شده‌اند. با جایگذاری رابطه (۴) در رابطه (۳)، حدود انتگرال طبق رابطه (۵) به  $(-\infty, \infty)$  تغییر می‌یابد.

$$(۵) \quad U(\dots, z) = \frac{-jk_0}{2f B_1} \exp(jk_0 z) \sum_{m=1}^M A_m \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(\vec{r}, L_2) \exp\left[\frac{jk_0}{2B_1} (A_1 r^2 - 2\dots' \vec{r} + D_1 \dots'^2)\right] \times \exp\left(-\frac{B_m}{a^2} r^2\right) d^2 r$$

با جایگذاری رابطه توزیع میدان بر روی صفحه گیرنده،  $U(\vec{r}, L_2)$ ، در معادله (۵) و انتگرال‌گیری بر روی  $\vec{r}$ ، رابطه توزیع میدان الکتریکی بعد از اپتیک گیرنده بر روی آشکارساز استخراج می‌گردد. لازم به ذکر می‌باشد که برای بررسی و تحلیل کیفیت لینک، محاسبه توان دریافتی ضروری است. بمنظور محاسبه توان و تحلیل رفتار انتشاری باریکه گوسی در میان آب دریا، توزیع شدت طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود (Phillips و Andrews, ۱۹۹۸):

$$I(\vec{r}, z) = \langle U(\vec{r}, z) U^*(\vec{r}, z) \rangle \quad (۶)$$

با استفاده از رابطه (۶) و توزیع میدان بر روی صفحه گیرنده و پس از اپتیک گیرنده، توزیع شدت آنها به ترتیب طبق رابطه (۷-الف) و (۷-ب) محاسبه می‌گردد:

$$(۷-الف) \quad I(\vec{r}, z) = \frac{k_0^2 A_0^2 w_0^2}{4r r^* B^2 w^2(z')} \times \exp\left(\frac{-k_0^2 r^2}{2B^2 w^2(z') r r^*}\right)$$

$$(۷-ب) \quad I(\dots, z) = \frac{k_0^4 A_0^2 w_0^2}{16r r^* B^2 B_1^2 w^2(z')} \sum_{m=1}^{M=10} \sum_{n=1}^{M=10} \frac{A_m A_n^*}{S_1 S_2} \exp\left(\frac{-k_0^2 \dots'^2 (S_1 + S_2)}{4S_1 S_2 B_1^2}\right)$$

$$r = \frac{1}{w^2(z')} + j \frac{k_0}{2} \left( \frac{1}{R(z')} - \frac{n}{z} \right),$$

$$k_0 = \frac{2f}{\lambda_0}, S_1 = \frac{B_m}{a^2} + \frac{k_0^2}{4B^2 r} - \frac{jk_0 D}{2B} - \frac{jk_0 A_1}{2B_1},$$

$$S_2 = \frac{B_n^*}{a^2} + \frac{k_0^2}{4B^2 r^*} + \frac{jk_0 D}{2B} + \frac{jk_0 A_1}{2B_1}$$

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 (Saleh و Teich, ۲۰۰۷):

$$P_a = \int_0^a \int_0^{2f} I(\vec{r}, z) r dW dr \quad (8)$$

که در آن  $I(\vec{r}, z)$  توزیع شدت در نقطه  $(\vec{r}, z)$  بر روی صفحه گیرنده می‌باشد. این انتگرال می‌تواند بصورت تحلیلی با جایگذاری رابطه فوق با رابطه  $P_a = \int_0^a \int_0^{2f} I(\vec{r}', z) \dots' dW d \dots'$  که در آن  $I(\vec{r}', z)$  توزیع شدت بر روی صفحه آشکارساز می‌باشد، محاسبه گردد. با جایگذاری رابطه (۷-ب) در رابطه فوق و انجام محاسبات ریاضی، توان دریافتی توسط آشکارساز طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_a = \frac{k_0^2 A_0^2 w_0^2 f}{4B^2 r r^* w^2(z')} \sum_{m=1}^{M=10} \sum_{n=1}^{M=10} \frac{A_m A_n^*}{S_1 + S_2} \quad (9)$$

رابطه فوق بدون در نظر گرفتن تابع عبوردهی آب و تأثیرات جذب و پراکندگی است. ضریب تضعیف آب ناشی از جذب و پراکندگی به صورت تابعی تحلیلی در بخش (۳) محاسبه می‌شود.

### ۳- محاسبه تابع عبوردهی آب دریا

شناخت خصوصیات اپتیکی محیط برای تخمین میزان تضعیف و عبوردهی نور منتشرشونده در میان آب دریا ضروری می‌باشد. خصوصیات اپتیکی آب دریا متفاوت از خصوصیات آب خالص است. تضعیف اپتیکی آب دریاها ناشی از ضریب جذب طیفی،  $a(\lambda)$  و ضریب پراکندگی طیفی،  $b(\lambda)$  می‌باشد. تضعیف کل ترکیب خطی ضرایب جذب و پراکندگی است. ضریب جذب،  $a(\lambda)$  بصورت زیر محاسبه می‌شود (Chancey, ۲۰۰۵, Haltrin, ۱۹۹۹):

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

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

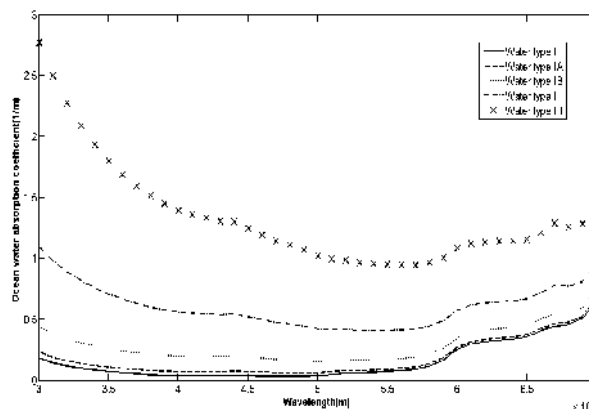
$$\begin{aligned} b(\lambda) = & b_w(\lambda) + 1.151302 C_c \left( \frac{400}{\lambda} \right)^{1.7} \times \\ & \exp \left( 0.11631 \left( \frac{C_c}{C_c^0} \right) \right) + 0.3411 C_c \left( \frac{400}{\lambda} \right)^{0.3} \times \\ & 0.76284 \exp \left( 0.03092 \left( \frac{C_c}{C_c^0} \right) \right) \end{aligned} \quad (11)$$

که در آن  $b_w(\lambda)$  ضریب پراکندگی آب خالص است (Melodia و Pompili, Akyildiz, ۲۰۰۵). شکل (۲) نمودار ضریب تضعیف کل ( $m^{-1}$ ) را بصورت  $\tau(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$  برای انواع مختلف آب Jerlov نشان می‌دهد. چگالی کلروفیل در انواع مختلف آب Jerlov در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): چگالی کلروفیل برای انواع مختلف آب Jerlov (Chancey, ۲۰۰۵ و Haltrin, ۱۹۹۹)

نوع آب	چگالی کلروفیل بر حسب $mg/m^3$
I	۰/۰۳
IA	۰/۱
IB	۰/۴
II	۱/۲۵
III	۳

تلفات ناشی از جذب و پراکندگی سبب ایجاد تغییر در توان دریافتی توسط آشکارساز می‌گردد. با افزایش ( ) فاصله‌ای که در آن کمترین توان قابل آشکارسازی دریافت می‌شود، کاهش می‌یابد.



شکل (۲): ضریب تضعیف طیفی برای چند نوع آب Jerlov در بازه ۳۰۰-۷۰۰ نانومتر

فرمول اصلی برای محاسبه توان یک لینک مخابراتی- بصورت تابع نمایی کاهشی از طول مسیر انتشار،  $L_2$ - قانون بی‌یر می‌باشد (Kvicala, Grabner, Kvicera, Fiser, ۲۰۰۷):

$$P_R(z) = P_0 e^{-\Gamma(z)z} \quad (12)$$

که در آن  $P(z)$  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 محیط و ( ) ضریب تضعیف کل محیط می‌باشند. 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 (Phillips و Andrews, ۱۹۹۸):

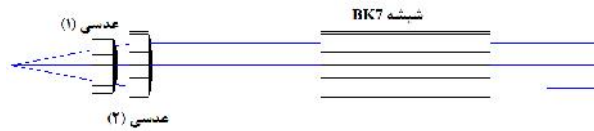
$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{SNR} \right) \quad (13)$$

که در آن  $SNR$  نسبت سیگنال به نویز بوده و طبق رابطه  $SNR = \frac{P_R}{P_{n0}}$  محاسبه می‌شود. که در این رابطه،  $P_R$  و  $P_{n0}$  به ترتیب توان دریافتی

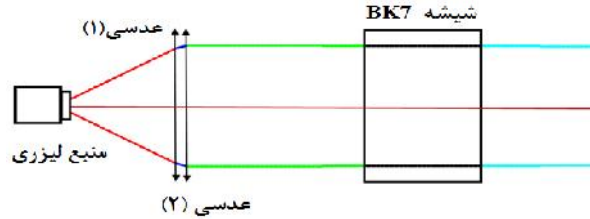
در آشکارساز و توان برابر نویز آشکارساز هستند. روابط (۹) و (۱۳) و رابطه نسبت سیگنال به نویز اساس محاسبات مقاله حاضر می‌باشند.

#### ۴- معرفی موازی‌ساز

پیش از نمایش نتایج تحلیلی حاصل از بخشهای (۲) و (۳)، ضروری است که اپتیک فرستنده (موازی‌ساز) و گیرنده بصورت کامل معرفی گردد. موازی‌سازی که در چیدمان مقاله مورد استفاده قرار گرفته، با برنامه ZEMAX طراحی شده است. شکل (۳-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 (۳-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.



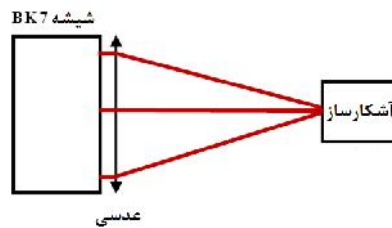
الف



ب

شکل (۳): الف) طرح شماتیک موازی‌ساز طراحی شده با نرم‌افزار ZEMAX، ب) طرح شماتیک موازی‌ساز تقریب زده شده با عدسی نازک،  
 $A = -1/0.902$ ،  $B = 0/0.238$ ،  $C = -42/2757$  و  $D = 0/1161$ .

گیرنده شامل یک قطعه شیشه BK7 بمنظور محافظت از المانهای اپتیکی در مقابل تأثیرات محیطی می‌باشد. همانگونه که در شکل (۴) نشان داده شده‌است، پس از این شیشه محافظ، یک عدسی نازک و یک آشکارساز (در صفحه کانونی عدسی) قرار دارند. عدسی توان دریافتی را بر روی آشکارساز متمرکز می‌سازد.

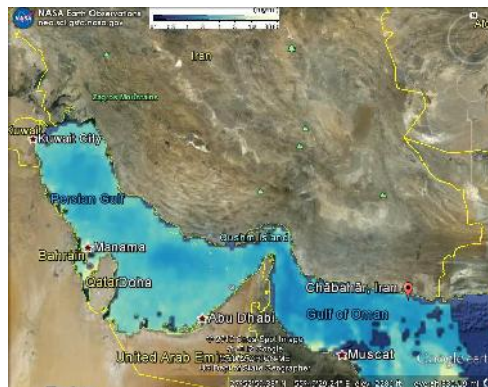


شکل (۴): طرح شماتیک گیرنده اپتیکی

#### ۵- نتایج محاسبات و شبیه‌سازیها

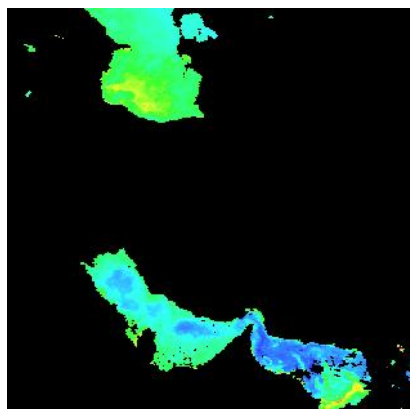
در مقاله حاضر انتشار یک باریکه گوسی سبز (طول موج ۵۳۲ نانومتر) با تقارن دایره‌ای (قطر ۰/۹ میلی‌متر بر روی پنجره خروجی لیزر) دارای واگرایی اولیه ۱۰ درجه مورد مطالعه قرار گرفته‌است. اگر منبع لیزر در فاصله ۱۷/۶۷ میلی‌متری از موازی‌ساز قرار گرفته باشد، واگرایی باریکه خروجی ۱/۵ میلی‌راد بیان بوده و اندازه قطر باریکه بر روی خروجی فرستنده ۷/۰۸۶ میلی‌متر می‌گردد. با تغییر فاصله سیستم موازی‌ساز و منبع (دیود لیزری) مقدار واگرایی باریکه خروجی تغییر می‌نماید.

همانگونه که ذکر شد، داده‌های چگالی کلروفیل که در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند مربوط به سواحل مکران، چابهار بوده که در بازه زمانی ژانویه ۲۰۱۰ تا مارس ۲۰۱۲ نمونه‌برداری شده‌است. شکل (۵) محل استقرار لینک در دریای عمان را نشان می‌دهد.



شکل (۵): محل استقرار لینک در دریای عمان (<http://maps.google.com>)

شکل (۶) تصویری از نقشه چگالی کلروفیل ارائه شده در مرجع (<http://earthobservatory.nasa.gov>) را نمایش می‌دهد.

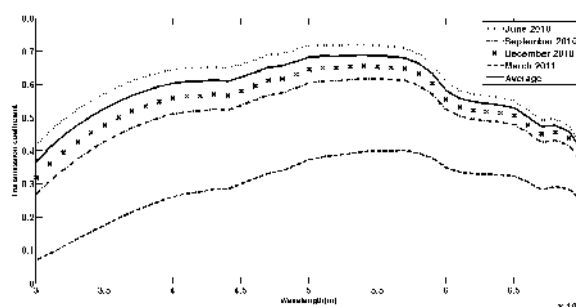


شکل (۶): تصویری از طرح چگالی کلروفیل ارائه شده در مرجع (<http://earthobservatory.nasa.gov>) مربوط به سپتامبر ۲۰۱۱ داده‌های آماری مقادیر چگالی کلروفیل برای ۸ ماه در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۲): مقادیر چگالی کلروفیل چارهار در ماههای آخر هر فصل در دو سال پیاپی (<http://earthobservatory.nasa.gov>)

تاریخ	June 2010	Sep. 2010	Dec. 2010	March 2010	June 2011
چگالی کلروفیل ( $mg/m^3$ )	۰/۹۷	۱/۵	۱/۳	۲/۹	۰
تاریخ	Sep. 2011	Dec. 2011	March 2012	میانگین	انحراف از معیار
چگالی کلروفیل ( $mg/m^3$ )	۰/۳۴	۰/۳۱	۲/۹	۱/۲۷	۱/۱۲

شکل (۷) میزان عبوردهی بر حسب طول موج را برای مقادیر مختلف چگالی کلروفیل نمایش می‌دهد.

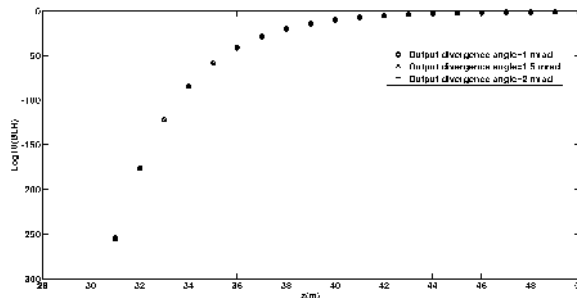


شکل (۷): ضریب عبوردهی آب بر حسب طول موج برای ۵ مقدار مختلف چگالی کلروفیل

همانگونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار چگالی کلروفیل، طول موجی که در آن مقدار عبوردهی بیشینه می‌گردد از طول موج آبی (حدود ۴۵۰ نانومتر) به ناحیه طول موج سبز (حدود ۵۳۲ نانومتر) جابه‌جا می‌شود.

بمنظور بررسی تأثیر پارامترهای محیطی و خصوصیات منبع بر روی کیفیت لینک، توزیع شدت باریکه بر روی آشکارساز، نسبت سیگنال به نویز و نرخ خطای بیت مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

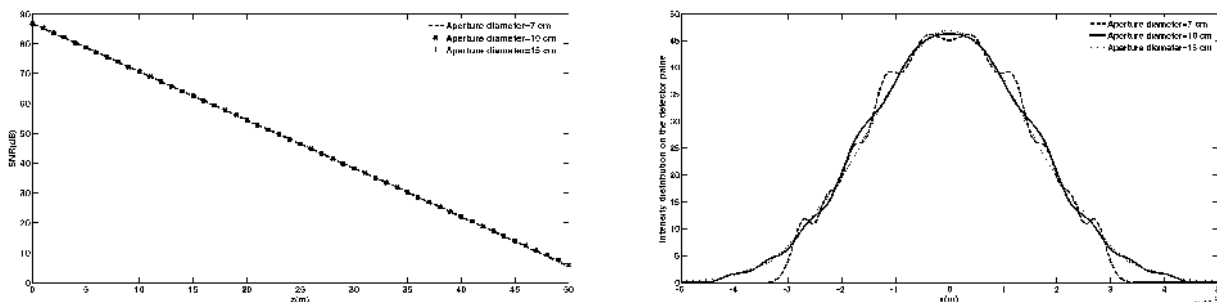
در ابتدا تأثیر زاویه واگرایی اولیه بر روی کیفیت لینک مورد مطالعه قرار گرفته است. مقدار چگالی کلروفیل در محاسبات مربوط به بررسی تأثیر واگرایی برابر مقدار میانگین دو سال یعنی ۱/۲۷ میلی گرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. در ضمن اندازه قطر دهانه اپتیک گیرنده ۱۰ سانتی متر می‌باشد.



شکل (۸): نرخ خطای بیت بر حسب طول مسیر انتشار برای سه مقدار مختلف زاویه واگرایی اولیه

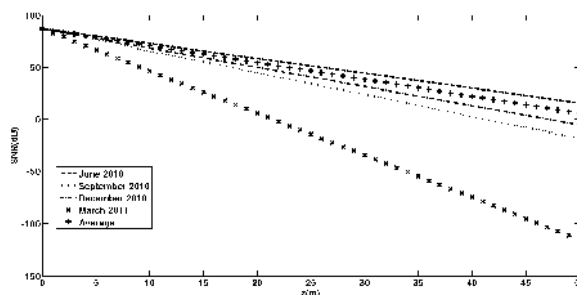
همانگونه که مشاهده می‌شود، تغییر واگرایی در شرایط حاضر (برد لینک مخابراتی تا ۵۰ متر و زاویه واگرایی در مرتبه میلی‌رادیان) تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی نرخ خطای بیت ندارد. از آنجاکه طبق پروتکل‌های مخابرات بی‌سیم، لینک ارتباطی دارای نرخ حداکثر خطای بیت  $10^{-6}$  معتبر است، و از سوی دیگر، طبق محاسبات حاضر واگرایی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی نرخ خطای بیت نمی‌گذارد، اعتبار لینک بر اساس موارد مذکور تغییر چشمگیری ندارد. دلیل رفتار حاضر، طول کوتاه مسیر اپتیکی و زاویه واگرایی کوچک می‌باشد که باعث می‌شود که تقریباً کل باریکه لیزری توسط اپتیک گیرنده جمع‌آوری گردیده و نسبت سیگنال به نویز و در نتیجه آن نرخ خطای بیت تقریباً بدون تغییر باقی بماند. در شرایط دیگر (برد لینک بلندتر، زاویه واگرایی بزرگتر و قطر دهانه کوچکتر) این رفتار می‌تواند متفاوت باشد.

پارامتر دیگری که تأثیر آن بر روی لینک مورد بررسی قرار می‌گیرد قطر دهانه گیرنده می‌باشد. شکل (۹-الف) نمودار توزیع شدت را برای سه قطر دهانه مختلف نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، کاهش قطر دهانه سبب پراشیده شدن نور می‌گردد، اما تأثیر زیادی بر روی میزان توان دریافتی ندارد. در نتیجه تغییر قطر دهانه تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی نرخ خطای بیت و در نتیجه آن اعتبار لینک نمی‌گذارد (شکل ۹-ب)). ممکن است این رفتار در مسیر اپتیکی طولانی‌تر، قطر دهانه کوچکتر و واگرایی بیشتر (بدلیل تأثیرات آنها بر روی قطر باریکه در محل اپتیک گیرنده و در نتیجه آن میزان توان دریافتی توسط آشکارساز) تغییر کند.



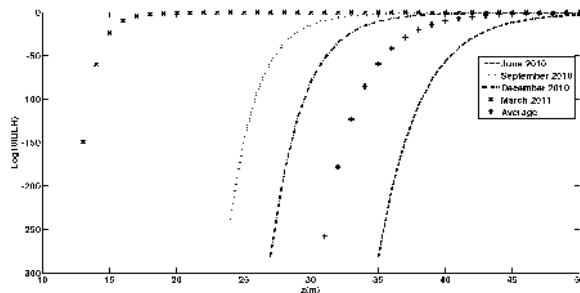
شکل (۹): الف) توزیع شدت بر روی صفحه آشکارساز برای سه مقدار قطر دهانه گیرنده، ب) مقدار نسبت سیگنال به نویز بر حسب طول مسیر برای سه مقدار قطر دهانه گیرنده

در نهایت تأثیر مقدار چگالی کلروفیل به عنوان پارامتر تعیین کننده میزان تأثیرات محیطی (آب خالص دریا به اضافه مواد آلی و معدنی) در فصول مختلف سال ۱۳۸۹ بر روی نسبت سیگنال به نویز و نرخ خطای بیت بررسی شده است. شکل (۱۰-الف) نسبت سیگنال به نویز را بر حسب فاصله انتشار برای ۵ مقدار چگالی کلروفیل نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، با افزایش چگالی کلروفیل مقدار نسبت سیگنال به نویز کاهش یافته و در نتیجه آن، مقدار نرخ خطای بیت افزایش می‌یابد (شکل ۱۰-ب)).



الف





ب

شکل (۱۰): الف) مقدار نسبت سیگنال به نویز بر حسب فاصله انتشاری برای ۵ مقدار مختلف چگالی کلروفیل، ب) مقدار نرخ خطای بیت بر حسب فاصله انتشاری برای ۵ مقدار مختلف کلروفیل

#### ۶- نتیجه گیری

مطالعه و مشخصه‌سازی تأثیرات پارامترهای منبع و شرایط محیطی از جمله موضوعات بحث برانگیز در مخابرات لیزری می‌باشد. در این مقاله با استفاده از فرمول کولینز، در ابتدا خصوصیات انتشاری باریکه گوسی منتشر شونده در میان یک مسیر اپتیکی کامل در آب دریا مطالعه گردید. تأثیرات آب دریا ناشی از تلفات حاصل از جذب و پراکندگی بر روی اعتبار لینک مخابراتی بررسی شد. مشخص گردید که: ۱- بدلیل کوتاه بودن طول مسیر اپتیکی، واگرایی باریکه و قطر دهانه تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی نسبت سیگنال به نویز و نرخ خطای بیت و در نتیجه آن اعتبار لینک مخابراتی ندارد. ۲- افزایش چگالی کلروفیل و در نتیجه آن تلفات انتشار در میان آب دریا، ناشی از تضعیف توان حاصل از جذب و پراکندگی، سبب افزایش بسیار زیاد نرخ خطای بیت می‌گردد. ۳- پارامترهای کیفیت لینک همچون نسبت سیگنال به نویز، نرخ خطای بیت و اعتبار لینک به شدت تحت تأثیر طول مسیر اپتیکی و فصول سال قرار می‌گیرد. امید است بکارگیری نتایج حاصل از شبیه‌سازیهای مقاله حاضر سبب تولید لینکهای مخابراتی امن‌تر با امکان مخابره داده‌ها با پهنای باند بیشتر گردیده و در نتیجه ایجاد برتری و اقتدار بیشتر در نیروی دریایی می‌نماید.

#### ۷- مراجع:

- [1] Akyildiz, Ian F.; Pompili, Dario; Melodia, Tommaso, Underwater acoustic sensor networks: Research challenges, Ad Hoc Networks, 3, pp. 257-279, 2005.
- [2] Andrews, Larry C.; Phillips, Roland L.; Laser beam propagation through random media, SPIE, the international Society for Optical Engineering: Bellingham, Washington USA, 1998.
- [3] Anguita, David; Brizzolara, David; Parodi, GianCarlo, Optical communication for underwater wireless sensor networks: a VHDL-implementation of a physical layer 802. 15. 4 compatible, In Proc. OCEANS 2009 – EUROPE Conference, 11-14 May 2009, pp. 1-2, 2009.
- [4] Cai, Yangjian; Lü, Xiang; Eyyubo lu, Halil T.; Baykal, Yahya, Paraxial propagation of a partially coherent flattened Gaussian beam through an aperture ABCD optical systems, Opt. Commun., 281, pp. 3229, 2008.
- [5] Cai, Yangjian; Hu, Li, Propagation of partially coherent twisted anisotropic Gaussian-Schell model beams through an aperture astigmatic optical system, Opt. Lett., 31, pp. 685-687, 2006.
- [6] Chancey, Mark Alen, short range underwater optical communication links, M. Sc. Thesis, North Carolina state University, 2005.
- [7] Collins, Stuart A., Lens-System Diffraction Integral Written in Terms of Matrix optics, J. Opt. Soc. Am. A, 60, pp. 1168-1177, 1970.
- [8] Haltrin, Vladimir I., Chlorophyll-based model of seawater optical properties, Appl. Opt., 38, pp. 6826-6832, 1999
- [9] <http://earthobservatory.nasa.gov>.
- [10] <http://maps.google.com>
- [11] Kvicala, Radek; Kvicera, Vaclav; Grabner, Martin; Fiser, Ondrej, BER and availability measured on FSO link, Radioengineering, pp. 7-12, 2007.
- [12] Lin, Qiang; Cai, Yangjian, Tensor ABCD law for partially coherent twisted anisotropic Gaussian-Schell model beams, Opt. Lett., 27, pp. 216-218, 2002.
- [13] Mei, Zhangrong; Zhao Daomu; Gu, Juguan, Comparison of two approximate methods for hard-edged diffracted flat-topped light beam, Opt. Commun., 267, pp. 58-64, 2006.
- [14] Saleh, Bahaa E. A.; Teich, Malvin Carl, Fundamentals of photonics, 2nd ed, Wiley series in pure and applied, 2007.

- [15] Schill, Felix; R. Zimmer, Uwe; Trumpf, Jochen, Visible Spectrum Communication and Distance Sensing for Underwater Application, In Proc. Australasian Conf. Robotics and Automation, Canberra, Australia, Dec., 2004.
- [16] Siegman, Anthony E., Laser, Hill Valley, California; University Science Books, 1986.
- [17] Wen, JJ.; Breazeale, MA., A diffraction beam field expressed as the superposition of Gaussian beams through an apertured ABCD optical system, J. Acoust. Soc. Am., 83, pp. 1752-1756, 1988.
- [18] Yu, Song; Guo, Hong; Fu, Xiquan; Hu, Wei, Propagation properties of elegant Hermite-Cosh-Gaussian laser beams, Opt. Commun., 204, pp. 59-66, 2002.
- [19] Zhao, Daomu; Mao, Haidan; Zhang, Weichun; Wang, Shaomin, Propagation of off-axial Hermite-Cosine-Gaussian beams through an apertured and misaligned ABCD optical system, Opt. Commun., 224, pp. 5-12, 2003.
- [20] Zhao, Guangpu; Ji, Xiaoling; Lü, Baida, Approximate analytical equation of Gaussian beams through hard-aperture optics, Optik, 11 (6), pp. 241-5, 2003.