

## حسگر تار نوری سنجش گلوکز در محلول آبی

محمدرضا امانی پور، آذر دخت مظاهری و بهزاد نظری

مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۱۵؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۱۱/۱۵)

### چکیده

در این مقاله، چیدمان یک حسگر تار نوری چند مود به منظور سنجش گلوکز در محلول آبی معرفی و عملکرد آن بررسی خواهد شد. اساس کار این حسگر مبتنی بر بازتاب فرنل است. در این چیدمان از لیزر گازی هلیوم-نئون به عنوان منبع نور، سنجه تار نوری، فوتوسل به عنوان آشکارساز نوری و دستگاه مولتی متر دیجیتالی استفاده شده است. تحلیل آماری داده‌های ثبت شده، رفتار بسیار خطی این حسگر تار نوری را در محدوده غلظت‌های ۲ تا ۲۵ میلی‌مولار از محلول گلوکز نشان می‌دهد. حساسیت و حد تشخیص این حسگر تار نوری به ترتیب  $11.4 \frac{mV}{mM}$  و  $2.5 mM$  است.

واژه‌های کلیدی: حسگر تار نوری چند مودی، محلول گلوکز، بازتاب فرنل

### ۱. مقدمه

دستیابی به ابزارهای اندازه‌گیری حساس و قابل اعتماد به منظور سنجش انواع کمیت‌های فیزیکی، شیمیایی و زیست پزشکی، مهم‌ترین مسوولیت صنعت اپتوالکترونیک است. حسگرهای تار نوری به عنوان ابزارهای نوین اندازه‌گیری، مزایای فراوانی نسبت به حسگرهای الکتریکی کنونی دارند که از جمله می‌توان به قابلیت به کارگیری در محیط‌های قابل انفجار و خطرناک، نارسانایی الکتریکی، اندازه کوچک و وزن کم، مصنویت در برابر امواج الکترومغناطیسی، حساسیت بالا و غیره، اشاره کرد که موجب تمایل به آنها در زمینه‌های گوناگونی شده است. از این

حسگرها می‌توان به منظور اندازه‌گیری کمیت‌های گوناگونی نظیر ضریب شکست، pH، فشار، دما، ارتعاش، غلظت محلول‌ها و بزرگی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در صنایع مختلفی همچون پتروشیمی، داروسازی، صنایع دفاعی و دیگر صنایع استفاده کرد [۱]. با توجه به اهمیت سنجش گلوکز در علوم پزشکی و صنایع غذایی، پژوهشگران بسیاری مطالعات خود را بر یافتن روش‌های غیرتهاجمی<sup>۱</sup> نوری به منظور سنجش گلوکز معطوف کرده‌اند. گلوکز اصلی‌ترین حامل انرژی در اندام‌های انسان است که مقدار مطلوب آن در خون برای افراد غیر دیابتی

۱. Non invasive

بازتاب تغییر می‌کند. تغییرات ضریب بازتاب، در واقع بیانگر تغییرات شدت نور رسیده به آشکارساز است که این نکته اساس کار حسگر تار نوری مورد استفاده است. شدت نور غیرقطبیده رسیده به آشکارساز، از رابطه (۴) به دست می‌آید [۴].

$$I = RI_0 = \frac{1}{2} I_0 (R_s + R_p) = \frac{1}{2} I_0 \left[ \left( \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \right)^2 + \left( \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \right)^2 \right] \quad (4)$$

در این رابطه  $R$  ضریب بازتاب فرنل،  $I_0$  شدت نور فرودی،  $R_s$  و  $R_p$  ضرایب بازتاب مربوط به قطبش‌های  $s$  و  $p$  ضریب شکست هسته تار نوری،  $n_2$  ضریب شکست محلول،  $\theta_1$  زاویه فرود نور و  $\theta_2$  زاویه شکست نور هستند. با توجه به رابطه (۴) مشاهده می‌شود که با تغییر ضریب شکست محلول و با توجه به ثابت بودن ضریب شکست تار نوری، شدت نور رسیده به آشکارساز تغییر می‌کند.

### ۳. چیدمان

طرح‌واره چیدمان در شکل ۱ نشان داده شده است. در این چیدمان از لیزر گازی هلیوم-نئون با طول موج ۶۳۳ نانومتر به عنوان منبع نور، فوتوسل<sup>۳</sup> به عنوان آشکارساز نوری، مولتی‌متر دیجیتالی به منظور نمایش مقدار علامت الکتریکی و سنجه تار نوری<sup>۴</sup> استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده، نور از لیزر (الف) به تار نوری فرستنده (ب)، هدایت می‌شود و وارد قسمت مخروطی شکل (ج) سنجه تار نوری می‌شود. کسری از شدت نور فرودی با توجه به غلظت محلول (ضریب شکست محلول)، درون محلول انتشار می‌یابد و باقیمانده توسط این قسمت مخروطی شکل به تار نوری گیرنده (د) که به آشکارساز نوری (ه) متصل شده هدایت می‌شود. علامت نوری بازتابیده توسط این آشکارساز به علامت الکتریکی تبدیل می‌شود که بزرگی این علامت الکتریکی توسط دستگاه مولتی‌متر دیجیتالی (و) اندازه‌گیری می‌شود. در تمامی مراحل آزمایش، سنجه تار نوری در عمق مشخصی از محلول

به میزان ۴٫۹ تا ۶٫۹ میلی‌مولار گزارش می‌شود. اندازه‌گیری گلوکز بسیار حائز اهمیت است چرا که هر نوع از بیماری دیابت می‌تواند در نوع خود خطرناک باشد. افزایش گلوکز در خون (هایپرگلیسمیا<sup>۱</sup>) می‌تواند موجب نابینایی، ازکار افتادن کلیه‌ها، بیماری‌های قلبی، سکته و تولدهای ناقص شود. از طرف دیگر کاهش سطح گلوکز خون (هایپوگلیسمیا<sup>۲</sup>) می‌تواند باعث سرگیجه، کما و حتی مرگ شود [۲]. در این مقاله، به معرفی یک حسگر تار نوری مبتنی بر بازتاب فرنل به منظور سنجش گلوکز در محلول آبی پرداخته شده است.

### ۲. نظریه

ضریب شکست یک محلول تابعی از غلظت آن محلول  $C$ ، دمای محلول  $T$  و طول‌موج نور فرودی  $\lambda$  است

$$n = n(C, T, \lambda), \quad (1)$$

با توجه به رابطه (۱)، تغییرات ضریب شکست در محلول به صورت رابطه (۲) خواهد بود

$$\Delta n \cong \frac{\partial n}{\partial C} \Delta C + \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial n}{\partial \lambda} \Delta \lambda. \quad (2)$$

اگر منبع نور تکفام باشد ( $\Delta \lambda \approx 0$ )، آنگاه سومین جمله در طرف راست معادله قابل صرف نظر کردن است. با توجه به این که برای بسیاری از مایعات، بزرگی مقدار  $\frac{\partial n}{\partial T}$  از مرتبه  $10^{-4} C^{-1}$  است، بنابراین اگر تغییرات دمایی در حین اندازه‌گیری کمتر از ۱ تا ۲ درجه سانتی‌گراد باشد، می‌توان از دومین جمله نیز در رابطه (۲) صرف نظر کرد. با چشمپوشی از جملات دوم و سوم در رابطه (۲)، معادله (۳) به دست می‌آید

$$\Delta n \cong \frac{\partial n}{\partial C} \Delta C. \quad (3)$$

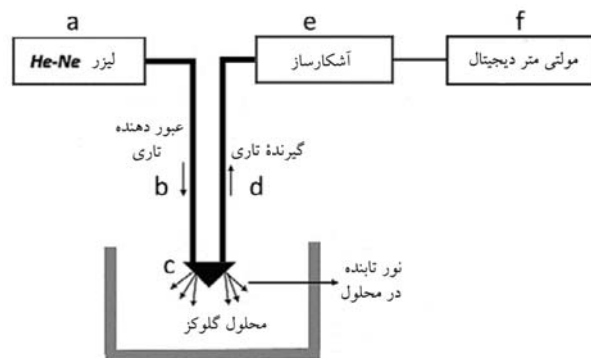
رابطه (۳) بیانگر آن است که تغییرات غلظت محلول، تغییر ضریب شکست محلول را در پی دارد [۳]. تغییر ضریب شکست محلول نیز بر ضریب بازتاب تأثیر گذاشته و در نهایت با توجه به خطی بودن رابطه تغییرات ضریب شکست نسبت به تغییرات غلظت محلول، نتیجه گرفته می‌شود که با تغییر غلظت محلول، ضریب

۳. Photocell

۴. Fiber optic probe

۱. Hyperglycemia

۲. Hypoglycemia

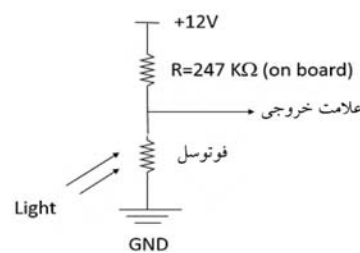


شکل ۱. طرح‌واره چیدمان آزمایشگاهی.

است، بنابراین این نوع از آشکارسازها مناسب برای کار در ناحیه مرئی هستند. مدار فوتوسل طراحی شده، در شکل ۲ نشان داده شده است. در این مدار از مجموعه مقاومت‌هایی با مقدار مقاومت معادل ۲۴۷ کیلو اهم به منظور سری کردن با فوتوسل استفاده شده است. در این مدار نیازی به طراحی مدار پیش تقویت کننده نیست، چرا که شدت علامت نوری فرودی به اندازه‌ای است که مدار به آن پاسخ مناسب را بدهد. ولتاژ ورودی این مدار، مقدار ثابت ۱۲ ولت است که توسط منبع تغذیه به مدار اعمال شده است. علامت الکتریکی خروجی نیز از اندازه‌گیری مقدار ولتاژ حاصل شده در فوتوسل به دست می‌آید. این مقدار توسط یک مولتی متر دیجیتالی اندازه‌گیری شده است.

سنجۀ تار نوری مورد استفاده، از دو تار نوری همسان که هسته آنها از جنس پلیمر پلی متیل متا آکریلات (PMMA) است و منشوری از جنس InP که هدایت نور از تار نوری فرستنده به گیرنده را به عهده دارد، تشکیل شده است. در شکل ۳، انتهای مخروطی شکل این سنجۀ تار نوری نشان داده شده است.

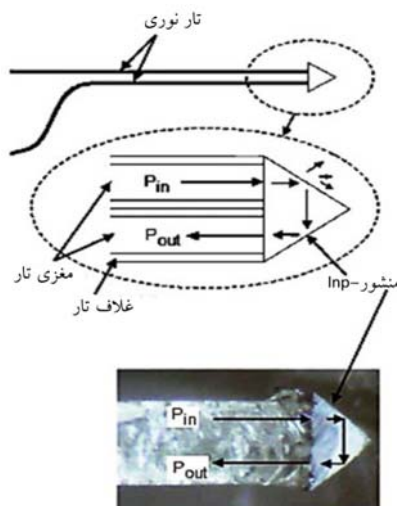
این جنس از تارهای نوری چند مود بسیار سخت و با دوام بوده و پنجره اپتیکی وسیعی در ناحیه مرئی دارند. آب، اسیدها و بازها روی آن بی تأثیرند و در شرایط جوی بسیار بد، مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهند. این تارهای نوری در دمای ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد شروع به نرم شدن می‌کنند و به همین خاطر برای مصارف در دماهای بالا توانایی حسگری خود را از



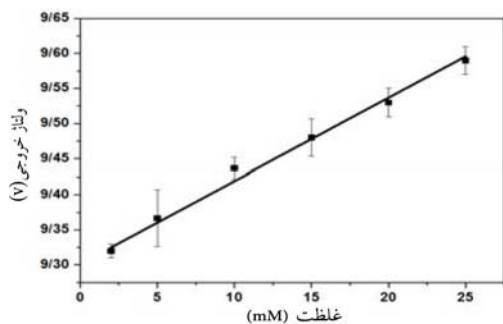
شکل ۲. مدار فوتوسل طراحی شده.

قرار دارد و این فاصله ثابت و بدون تغییر است. برای کاهش اثرات نوفه‌های نوری محیط، تمامی آزمایشات در محیطی کاملاً تاریک صورت پذیرفته است. همچنین برای اجتناب از اثرات نور بازتابی از محیط ظرف مورد استفاده در نتایج آزمایشات، از ظرفی با کمترین بازتاب از سطوح جانبی استفاده شده است.

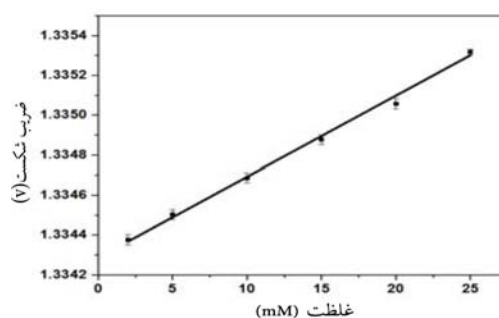
در این چیدمان، از فوتوسل به عنوان آشکارساز نوری جهت تبدیل علامت نوری به علامت الکتریکی استفاده شده است. فوتوسل مقاومت متغیری است که با تغییر شدت نور رسیده به سطح آن، مقدار مقاومت آن تغییر می‌کند. با افزایش شدت نور رسیده به سطح فوتوسل، مقاومت آن کاهش می‌یابد. فوتوسل‌ها به رغم اندازه کوچک و قیمت بسیار پایین، به عنوان یک آشکارساز خطی، دارای حساسیت خیلی خوب و محدوده پویای مناسب شناخته می‌شوند و به طور کلی شاخص عملکرد به هزینه برای فوتوسل‌ها عالی تلقی می‌شود. از عیب فوتوسل‌ها نیز می‌توان به پایداری ضعیف آنها اشاره کرد. طول موج کاری آنها از ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) انتهای مخروطی شکل سنجه تار نوری.



شکل ۵. نمودار کالیبراسیون چیدمان حسگر تار نوری گلوکز.



شکل ۴. تغییرات ضریب شکست نسبت به تغییرات غلظت در محلول گلوکز.

D(+) در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی گراد مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. با توجه به رابطه (۳) رفتاری خطی بین تغییر غلظت و ضریب شکست محلول وجود دارد و در نتیجه مطابق رابطه (۴) با تغییر ضریب شکست محلول، شدت نور بازتابی تغییر خواهد کرد. شکل ۴ خطی بودن تغییرات ضریب شکست نسبت به تغییرات غلظت محلول به ازای غلظت‌های ۲ تا ۲۵ میلی مولار را نشان می‌دهد که توسط دستگاه انکسارسنج اندازه‌گیری شده است. ضریب تعیین چندگانه برای این نمودار مقدار ۰/۹۹۷ به دست آمده است که بیانگر رابطه‌ای بسیار خطی بین ضریب شکست و غلظت محلول است.

در شکل ۵ نمودار کالیبراسیون این چیدمان نشان داده شده است. این نمودار تغییرات علامت خروجی را به ازای تغییر غلظت محلول نشان می‌دهد. ضریب تعیین چندگانه این نمودار

دست می‌دهند. این نوع تارهای نوری به خاطر قطر هسته بزرگ (معمولاً بین ۰/۲۵ تا ۱ میلی متر) در مقایسه با تارهای شیشه‌ای، راحت‌تر به منبع نور و آشکارساز متصل می‌شوند و این به نوبه خود موجب مقرون به صرفه بودن سامانه حسگر می‌شود [۵]. این نوع تارهای نوری دهانه عددی بالایی دارند، عمدتاً در حدود ۰/۵، که به معنای قابلیت انتشار چند ده هزار تا چند ۱۰ میلیون مود در آنهاست و از مهم‌ترین عیب این نوع تارهای نوری می‌توان به پهنای باند پایین آنها اشاره کرد [۵]. گلوکز مورد استفاده در آزمایشات نیز که از نوع گلوکز موجود در پلاسمای خون است، گلوکز D(+) است.

#### ۴. نتایج و بحث در نتایج

در این مطالعه، غلظت‌های ۲ تا ۲۵ میلی مولار از محلول گلوکز

جدول ۱. مشخصات چیدمان طراحی شده.

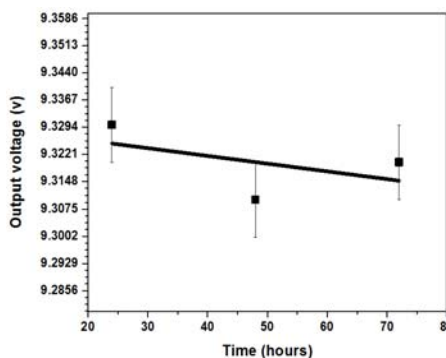
معادله خط نمودار کالیبراسیون	$V = 0.0114 C + 9.31$
محدوده کاری سامانه	۲ - ۲۵ mM
حساسیت	۱۱,۴ mV / mM
حد تشخیص	۲,۵ mM

شده است. برای این منظور، حسگر در سه روز متفاوت و در محلولی با غلظت ۲ mM تحت آزمون قرار گرفته است. این نمودار تغییرات خروجی حسگر را پس از مدت ۷۲ ساعت نشان می‌دهد. در نتیجه تحلیل آماری داده‌های ثبت شده، آهنگ تغییرات خروجی حسگر (تغییرات ولتاژ در طی زمان) از مرتبه  $10^{-4}$  Volt/hour به دست می‌آید که بیانگر آن است که مقادیر خروجی حسگر در طی زمان با شیب بسیار کمی دچار افت می‌شوند و بنابراین حسگر مورد نظر پایداری قابل قبولی دارد.

از منابع خطای این آزمایش می‌توان به ناپایداری و نوسان شدت نور لیزر و همچنین ارتعاشات مکانیکی چیدمان اشاره کرد. برای اجتناب از اثرات منابع خطا در نتایج آزمایش، چیدمان را بر روی یک میز اپتیکی کاملاً پایدار و محکم تعبیه کرده و سنجش‌ها در زمان پایداری لیزر صورت پذیرفتند.

### ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله به معرفی و بررسی نتایج حاصل از یک حسگر تار نوری پایدار با چیدمانی ساده به منظور سنجش گلوکز در محلول آبی پرداخته شد. نتایج به دست آمده، وجود رابطه‌ای خطی بین علامت الکتریکی خروجی به ازای غلظت‌های متفاوتی از محلول را نشان می‌دهند. این نتیجه می‌تواند در ساخت و طراحی انواع حسگرهای تار نوری به منظور کاربردهای شیمیایی، زیست پزشکی و داروسازی، کمک کننده و مفید باشد چرا که از این نوع حسگرها می‌توان در سنجش انواع آنالیت‌ها در محیط‌های گوناگون استفاده کرد.



شکل ۶. نمودار پایداری زمانی حسگر.

مقدار ۰,۹۹۲۵ است که تأثیر تمام متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته را نشان می‌دهد و بیانی از خطی بودن سامانه است. مقدار به دست آمده برای این ضریب نشان دهنده رفتار خطی بسیار خوب حسگر در ناحیه مورد نظر است. معناداری آماری (P-value)، برای نتایج حاصل از این چیدمان مقدار  $2.09 \times 10^{-5}$  را نشان می‌دهد. این کمیت بیانگر میزان اتفاقی بودن و غیرقابل اعتماد بودن نتایج است و برای این حسگر، همان طور که این مقدار نشان می‌دهد، احتمال اتفاقی بودن و شانسی بودن نتایج بسیار کم است و بنابراین نتایج به دست آمده دارای اعتبار بالایی هستند. شیب نمودار کالیبراسیون بیانگر حساسیت حسگر است که این مقدار برای حسگر مورد نظر  $11.4 \frac{mV}{mM}$  است. حد تشخیص سامانه نیز مقدار ۲,۵ mM و به ازای نسبت علامت به نوفه ۳، گزارش می‌شود. در جدول ۱ خلاصه‌ای از مهم‌ترین مشخصات این حسگر تار نوری ارائه شده است.

نمودار پایداری زمانی این حسگر در شکل ۶ نشان داده

### مراجع

1. D A Krohn, T MacDougall, and A Mendez, "Fiber Optic Sensors: Fundamentals and Applications", Bellingham, WA: Spie Press (2000).
2. A Srivastava, M K Chowdhury, S Sharma, and N Sharma, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering* **2** (2013) 20.
3. H Su and X G Huang, *Sensors and Actuators B Chemical* **126** (2007) 579.
4. J R Reitz, F J Milford, and R W Christy, "Foundations of Electromagnetic Theory", Addison-Wesley Publishing Company (2008).
5. L Bilro, N Alberto, J L Pinto, and R Nogueira, *Sensors* **12** (2012) 12184.