

## Nanomaterial-Based Sensors

Bashir Ahmad Karimi<sup>1\*</sup>, Wahidullah Enayat<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Faculty of Education, Samangan Higher Education Institute.

\*Corresponding Author: [b.karimi07@yahoo.com](mailto:b.karimi07@yahoo.com)

Cite this study:

Karimi, B. A. & Enayat, W. (2024). Nanomaterial-Based Sensors, Samangan Academic and Research Journal, 1(1), 109-121.

### Keywords

Sensor, Biosensor, Nanomaterial, Detection, Treatment, Cellulose

Research

Received:

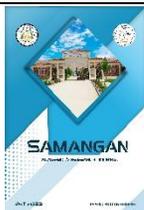
Revised:

Accepted:

Published:

### Abstract

Advancements in new materials have revolutionized the field of sensors for biological and chemical applications. This review article aims to explore sensors made from nanomaterials for detection, treatment, and industrial purposes. Nano-carbons and cellulose nanomaterials (CNMs) and CNM-based nanocomposites are utilized in the design of sensors and optical, electrical, electrochemical, and piezoelectric biosensors. Nanomaterials, due to their extraordinary electrical and physical properties arising from their one-dimensional and two-dimensional structures, continue to be attractive for the development of high-performance sensors. One-dimensional nanomaterials include nanowires, nanorods, and nanotubes. Two-dimensional nanomaterials with prominent features such as strength, lightness, and flexibility have been extensively used in various types of biological and chemical sensors. Studies indicate that sensors for the detection of SARS-CoV-2 with antibodies, especially field-effect transistor (FET) nanotube arrays, can effectively identify metal ions, biomolecules (hormones), viruses, and complete cells. Detection of SARS-CoV-2 without the need for antibodies often relies on molecular detection methods and biosensor-based approaches. These methods typically use specific molecules or biological structures, such as nucleotides, proteins, or other viral antigens, for virus identification and detection.



## حسگرهای ساخته شده از نانومواد

پوهنمل بیشراحمد کریمی<sup>1\*</sup>، پوهنمل وحیدالله عنایت<sup>2</sup>

دبپارتمنت فزیک، پوهنځی تعلیم و تربیه، مؤسسه تحصیلات عالی سمنگان

\* نویسنده مسؤل: [b.karimi07@yahoo.com](mailto:b.karimi07@yahoo.com)

تقریظ دهنده: پوهندوی عبدالبصیر دلجوی

مرجع دهی:

کریمی ب. ا. و عنایت و. (۱۴۰۲). حسگرهای ساخته شده از نانومواد، (۱)، ۱۰۹-۱۲۱.

### کلمات کلیدی

حسگر، بیوحسگر، نانومواد، تشخیص، درمان و سلولوز.

### چکیده

پیشرفت در مواد جدید برای کاربردهای سنجش، حوزه حسگرهای بیولوژیکی و کیمیاوی را متحول کرده است. هدف مقاله مرور به حسگرهای ساخته از نانومواد برای تشخیص و درمان و صنعت است. نانو کاربنی و نانومواد سلولز (CNM) و نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر CNM که در طراحی حسگرها و بیوحسگرهای نوری، الکتریکی، الکتروکیمیایی و پیزوالکتریک به کار می‌روند. نانومواد به دلیل خواص الکتریکی و فیزیکی خارق‌العاده‌یی از ساختارهای یک‌بعدی و دوبعدی آن‌ها ناشی می‌شود و همچنان برای توسعه حسگرهای با کارایی بالا جذاب هستند. مواد نانوی یک‌بعدی مانند نانوسیم‌ها، نانوکمرها و نانواستوانه‌ها می‌باشد. مواد نانوی دوبعدی ویژه‌گی‌های برجسته‌یی از جمله استحکام، سبکی و انعطاف‌پذیری به‌طور گسترده در انواع مختلفی از حسگرهای زیستی و کیمیاوی استفاده شده‌اند. مطالعات نشان می‌دهد حسگرهای تشخیص SARS-CoV-2 با آنتی بادی، حسگرهای زیستی الکترونیکی به‌ویژه آرایه‌های نانولوله‌یی ترانزیستور اثر میدانی (FET) می‌توانند به‌طور مؤثر یون‌های فلزی، بیومالیکیول‌ها (هورمون‌ها)، ویروس‌ها و سلول‌های کامل را شناسایی کنند. تشخیص SARS-CoV-2 بدون نیاز به آنتی‌بادی اغلب از روش‌های مبتنی بر تشخیص مالیکولی و روش‌های بیوحسگری استفاده می‌کند. این روش‌ها معمولاً از مالیکول‌های خاص یا ساختارهای بیولوژیکی از جمله رونوکلئوتیدها، پروتین‌ها یا دیگر آنتی‌ژن‌های ویروسی برای شناسایی و تشخیص ویروس استفاده می‌کنند.

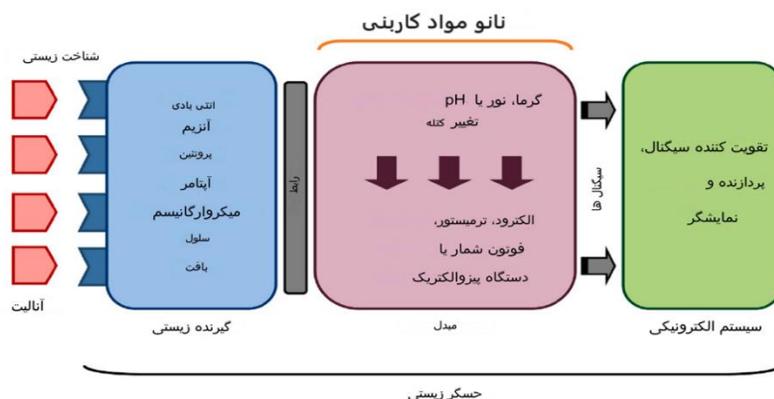
## مقدمه

پیشرفت فناوری نانو منجر به بهبود در به‌کارگیری نانومواد با خواص منحصر به فرد گردیده است [1]، [2]. در این میان حوزه تشخیص یکی از حوزه‌هایی است که به‌طور قطع علم نانو تا کنون تأثیرات شگرفی در آن داشته است [3] و در آینده نزدیک موجب تحولات عظیمی در حوزه پیش‌گیری و درمان بیماری‌ها خواهد شد [4]، [5]. ردیابی داروهای بیولوژیکی یا واکنش‌های بیوکیمیایی در کاربردهای پزشکی و بیولوژیکی مهم است [6]، [8]. توسعه حسگرهای زیستی بسیار حساس [9]، [10] خاص و مقرون به صرفه در سال‌های گذشته توجه قابل توجهی را به خود جلب کرده است [11]، [12]. از زمان اختراع اولین حسگر زیستی توسط کلارک در اوایل دهه 1960 م. حسگرهای زیستی مختلفی برای نظارت بر آنالیت‌های خاص طراحی [13] تهیه و به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است [14]. با توجه به تعریف شورای ملی تحقیقات حسگر زیستی «دستگاه تشخیصی است که یک موجود زنده یا محصول مشتق‌شده از سیستم‌های زنده و یک مبدل را برای ارائه نشانه [15]، سیگنال یا سایر اشکال تشخیص وجود یک ماده خاص در آن ترکیب می‌کند.» [16] بر این اساس، بیوحسگرها از سه بخش تشکیل شده‌اند [17]: یک جزء شناسایی زیستی که آنالیت را تشخیص می‌دهد، یک حسگرها و بیوحسگرها نقش کلیدی به‌عنوان ابزار تجزیه و تحلیلی در تشخیص سریع [18]، قابل اعتماد و زود هنگام بیماری‌های انسانی ایفا می‌کنند [19]. تا به امروز روش‌های تشخیص مختلفی در حال حاضر وجود دارد [20]. و بسیاری از تکنیک‌های دیگر نیز برای تشخیص سریع و بلادرنگ عفونت COVID-19 در پی این همه‌گیری در حال توسعه هستند [21]، [22]. از این‌رو، این بررسی ویژه مروری بر COVID-19، نشانگرهای زیستی آن [23]، تکنیک‌های تشخیصی کنونی و رویکردهای حسگر زیستی مبتنی بر نانومواد هوشمند در حال ظهور ارائه می‌دهد. جدای از این [24]، همچنین چشم‌اندازهای آینده فناوری‌های حسگر زیستی برای تشخیص SARS-CoV-2 را گسترش خواهد داد [20]، [25]. این‌گونه دستگاه‌ها همچنین می‌توانند برای نظارت بر آلاینده‌های محیطی در هوا و آب به‌صورت سریع مورد استفاده قرار گیرند [26]، [27]. در آینده اخیر نانومواد به‌عنوان گزینه‌ی در ساخت حسگرها مطرح شده، تا در عمل کرد حسگرها افزایش حساسیت [28]، انتخاب‌پذیری و قابلیت حمل‌ونقل را به دست آورند [15]، [29]، [30]. نانومواد همچنان برای توسعه حسگرهای با عمل‌کرد بالا جذاب‌اند. به دلیل ویژه‌گی‌های الکتریکی و فیزیکی بی‌نظیر آن‌ها که از ساختارهای یک‌بعدی و دوبعدی آن‌ها مشتق می‌شود [31]. مواد نانوی یک‌بعدی دارای دو ویژه‌گی برجسته‌اند: اندازه کوچک و نسبت ابعاد بالا [32]. این‌ها می‌توانند به اشکال مختلفی مانند نانوسیم‌ها، نانوکمرها و نانواستوانه‌ها سنتز و اصلاح شوند [33]. مواد دوبعدی می‌توانند به‌عنوان مواد نانوی با دو بعد تعریف شوند که خارج از مقیاس نانو هستند و تنها یک

بعد آن‌ها با ضخامت لایه تک یا اتمی است [34]. گرافن اولین مواد نانوی دوبعدی به صورت طبیعی است که توسط گروه گیم در دانشگاه منچستر در سال 2004 به عنوان یک لایه تک‌ایزوله شد و ضخامت یک اتم دارد [35]. گرچه گرافن یک میلیون برابر نازک‌تر از یک کاغذ معمولی است [36]، اما به عنوان مقاوم‌ترین ماده روی زمین محسوب می‌شود [37]. در این مقاله حسگرهایی که جهت تشخیص و درمان کاربرد دارد، مورد بحث قرار داده شده. در نخست روش‌های ساخت نانوحسگر مانند نانوکاربنی و نانومواد سلولز مورد مطالعه قرار داده شده و در آخر به چند مورد از کاربردهای این حسگر اشاره گردیده است.

### مواد و روش تحقیق

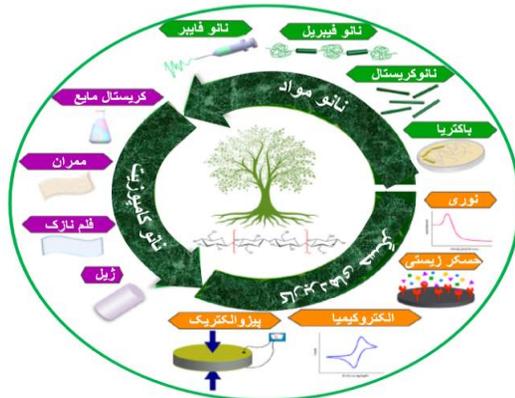
در این جا دو موادی که از آن برای ساخت حسگرها استفاده شده، مورد بحث قرار گرفته است. یکی نانومواد کربنی (شکل 1) و دیگری نانومواد سلولز در حسگرها (شکل 2) نشان داده شده است [17]. همان‌طور از شکل (1) دیده می‌شود، بیوحسگرها از سه بخش تشکیل شده‌اند: یک جزء شناخت زیستی که آنالیت را تشخیص می‌دهد، یک جزء مبدل سیگنال برای تبدیل روی‌داد اتصال به سیگنال‌های الکتریکی [18]، نوری یا حرارتی و یک دستگاه الکترونیکی می‌باشند.



شکل 1. تصویر شماتیک اجزای حسگر زیستی [17]

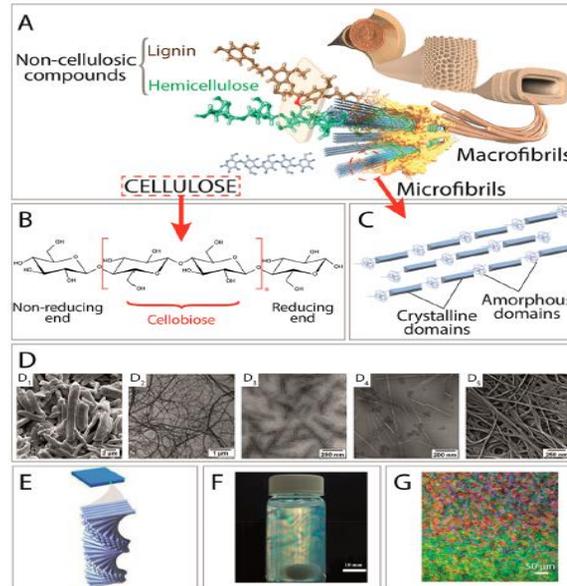
آنالیت به صورت انتخابی به مالیکول‌های شناخت زیستی در فرآیند تشخیص زیستی متصل می‌شود. این بیومالیکول‌ها باید به سطح حسگر به صورت فیزیکی یا شیمیایی متصل شوند [33]. در اتصال شیمیایی، اتصالات کووالانته بین سطح ترانسدیوسر و بایورسپتور با استفاده از ترکیبات شیمیایی مناسب شکل می‌گیرد [10]. ترانسدیوسر باید قابلیت تبدیل روی‌دادهای تشخیص زیستی به یک سیگنال قابل اندازه‌گیری از طریق تکنیک‌های الکتروکیمیایی یا فلورسانس را داشته باشند [9]. بنابراین، بهبود فرایندهای تشخیص زیستی و ترانسدوکشن گام کلیدی در طراحی و تهیه مواد بیوحسگر است.

در میان مواد فراوانی که برای ساخت حسگرها در دسترس است، اخیراً تلاش‌ها به سمت پلیمرهای طبیعی به‌عنوان زیرساخت یا حتی به‌عنوان جزء لایهٔ فعال حسگر انجام شده است [34]. این گونه مواد می‌توانند به پایداری کمک کنند. با کاهش استفاده از مؤلفه‌های غیر قابل تجدید و سمی/خطرناک و در برخی موارد، به حسگرهای نهایی سازگار با زیستی تبدیل شوند [31]. این اتفاق در مورد سلولز مؤلفهٔ اسکلتی اساسی در پلانت‌ها و پراکنده‌ترین بیوپلیمر در زمین است، رخ داده است [15]. به عبارت دقیق‌تر، تعداد تحقیقات مرتبط با نانومواد سلولز<sup>1</sup> (CNM) در دو دههٔ گذشته به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است [11] و پیش‌رفت‌های قابل توجه برخی از اولین صنایع را قادر به تولید CNM به مقیاس تجاری در اندازهٔ بزرگ کرده است (شکل 2) [32].



شکل 2. توضیحات نمایی از نانومواد سلولز (CNM) و نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر CNM که در طراحی حسگرها و بیوحسگرهای نوری، الکترونیکی، الکتروکیمیایی و پیزوالکترونیک به کار می‌روند [32]. طبق تعریف سازمان بین‌المللی استانداردسازی (ISO) اصطلاح نانومواد سلولزی (یا نانوسلولوزها) شامل موادی است که عمدتاً از سلولز تشکیل شده‌اند که حد اقل یک بعد آن در مقیاس نانو است [33] و شامل سه دسته است: سلولز باکتریایی (BC)، همچنین به‌عنوان سلولز میکروبی یا بیوسلولوز شناخته می‌شود [34]، نانوفیبریل‌های سلولزی (CNF)، همچنین به‌عنوان سلولز نانو/میکروفیبریل شده نامیده می‌شود) و نانوکریستال‌های سلولزی (CNC)، که قبلاً به‌عنوان سلولز نانوکریستالی و ویسکرهای سلولزی نیز شناخته می‌شدند [31]. جنبه‌های مورفولوژیکی همهٔ این CNMها و همچنین جنبه‌های سلولز میکروکریستالی تجاری (MCC) و CNC از حیوانات دریایی (تونیکات) در شکل (3) قابل مشاهده است [32].

<sup>1</sup> Cellulose Nanomaterials



شکل 3. (A) ساختار ابرمالیکولی سلولز در یک الیاف گیاهی، (B) نمایش یک مالیکول سلولز با شکل مطلوب چهارمالیکولی با اشاره به سلوبیوز به عنوان واحد تکرار و زنجیره‌های پایانی کاهنده و غیر کاهنده، (C) نمایش فازهای بی‌نظم و بلوری سلولز در یک میکروفیبریل، (D) میکروگراف‌های (D1) کریستال سلولزی میکروکریستالین (MCC) و انواع مختلف (D2) CNM: نانوفیبرهای سلولزی (CNF)، (D3) CNC، چوب، (D4) CNC تونیکات و (D5) سلولز باکتریایی (BC). (E) بلورهای سلولز به‌عنوان بسته‌های ماریپیچ به ترتیب چیده شده و پیچ‌خورده‌گی ماریپیچی عمود بر محور بلند چوب، (F) شکل ظاهری آبی/ مرواریدی بین قطب‌نوری‌های متقاطع با نمایش‌دهنده دامنه‌های دو شکست و (G) الگوی اثر انگشت در فاز نماتیک شایل از یک محلول آبی CNC هیدرولیز شده با اسید سولفوریک [32].

### نانولوله‌های کاربونی (CNTs)

نانولوله‌های کاربونی (CNTs) ساختارهای نانومتری است که از اتصالات کربن به شکل استوانه‌یی تشکیل شده‌اند [23]. فرایند ساخت CNTs به چند روش اصلی می‌تواند بسته‌گی داشته باشد؛ از جمله: روش ترکیبی (Combustion)، روش تأثیرگذاری با لیزر (Laser Ablation) و ترکیب واپور (Chemical Vapor Deposition - CVD) می‌باشد [38]. در روش ترکیبی، نانولوله‌های کاربونی از ترکیبی از گازها و هیدروکربن‌ها به دماهای بسیار بالا ساخته می‌شوند. ترکیب این گازها در دماهای بسیار بالا (بین 1200-1500 درجه سانتی‌گراد) باعث تبدیل گازها به کربن جامد و ساخت CNTs می‌شود [39]. در روش تأثیرگذاری با لیزر، لیزر به یک گرافیت نازک تابانده می‌شود که باعث تشکیل

بخار کربنی می‌شود [40]. این بخار سپس در دمای بالا به تشکیل CNTs منجر می‌شود [27]. در روش ترکیب واپور، شامل یک گاز کربنی (مانند متان یا اتیلن) است که با گذاشتن آن در معرض یک سطح کاتالیزوری (معمولاً نیکل یا آهن) در دماهای بالا (حدود 700-1000 درجه سانتی‌گراد) باعث تشکیل نانولوله‌های کربنی می‌شود. در هریک از این روش‌ها شرایط دما، فشار، گازها و مواد کاتالیزوری به تشکیل ویژه‌گی‌های خاص و کنترل‌شده‌یی از CNTs منجر می‌شوند. اندازه، شکل و خصوصیات CNTs متناسب با پارامترهای فرایند ساخت می‌توانند تغییر کنند و این خصوصیات می‌توانند برای کاربردهای مختلف بهینه‌سازی شوند. همچنین برای تولید نانولوله‌های کربنی به دو شکل صورت می‌گیرد: نانولوله‌های کربنی تک‌جداره با ضخامت یک‌اتمی (SWCNTs) و دوم نانولوله‌های کربنی چندجداره با لایه‌های گرافن متعدد (MWCNTs) [15]، [27]، [28]، [36].

### تشخیص SARS-CoV-2 بدون آنتی‌بادی

یکی از روش‌های تشخیص SARS-CoV-2 بدون آنتی‌بادی استفاده از بیوحسگرهای مبتنی بر نانومواد مثل نانولوله‌های کربنی (CNTs) است. این بیوحسگرها می‌توانند به‌صورت دقیق و حساس به مالیکول‌های ویروسی یا سایر آنتی‌ژن‌های ویروسی واکنش نشان دهند. یکی دیگر از روش‌های تشخیص SARS-CoV-2 بدون نیاز به آنتی‌بادی استفاده از تکنولوژی‌های مختلف بر پایه DNA یا RNA است [41].

### تشخیص SARS-CoV-2 با آنتی‌بادی

به تازگی دانشمندان یک بیوحسگر الکتروکیمیایی جدید بر اساس ترانزیستورهای اثر میدانی نانولوله کربنی (CNT-FET) برای شناسایی ویروس COVID-19 ساخته‌اند. CNT-FET تشخیص دیجیتالی آنتی‌ژن SARS-CoV-2 S1 را در نمونه‌های بزاق امکان‌پذیر می‌کند [20]، [21].

### بحث و نتایج

برخی از مواد مانند فلزها (مانند طلا)، اکسیدهای فلزی (مانند تین‌دی‌اکسید (SnO<sub>2</sub>))، دی‌اکسید و انادیم (VO<sub>2</sub>)، اکسید مس (ZnO)، اکسید ولفرام (WO<sub>3</sub>) و اکسید تیتانیوم (TiO<sub>2</sub>) و فلزایان (مانند سیلیسیم Si)، قابلیت بزرگی را برای سنتز به ساختارهای نانویی دارند. اندازه کوچک و شکل منحصر به فرد آن‌ها ایده‌آل برای متقاضیان مختلف از جمله حسگرهای گاز کیمیایی و حسگرهای زیستی می‌سازد [1]–[3]، [8]، [30]، [38]. به علاوه، حسگرهای الکتروکیمیایی بسیار حساس که بر پایه تلاقی مواد سازگار با زیستی مانند آنتی‌بادی‌ها، دی.ان.ای و آنزیم‌ها با مواد الکترو نوآور مانند نانوساختارها و نانوکامپوزیت‌های فلز/کربن/اکسید فلز/پلیمرهای هادی و نانوکامپوزیت‌های ذرات نانوی طلا، نانوتیوب‌های کربن، گرافن، نانوتیوب‌های کربن/طلا، نانوتیوب‌های کربن/ZnO توانسته‌اند [5].

[20]–[22]، [25]، [39]، [41]. این ویژه‌گی‌ها می‌توانند از طریق آزمایش بهینه‌سازی شوند تا ویژه‌گی‌ها و عمل کرد حسگر مطلوب به دست آید. مواد نانویی دوبعدی ویژه‌گی‌های برجسته‌یی از جمله استحکام، سبکی، انعطاف‌پذیری و گستردگی ویژه‌گی‌های الکترونیکی ارائه می‌دهند. این ویژه‌گی‌های الکترونیکی شامل هدایت عالی حرارت و الکتریسیته (مانند گرافن)، نیمه‌هادی (مانند دی‌کالکوژنیدهای فلزی انتقالی (TMDS) و اکسیدهای فلز انتقالی (TMOs)) و عایقی (مانند بورن نیتريد هگزائگونال دیاتومیک HBN) می‌باشند [23]، [26]، [37].

مواد نانویی دوبعدی به‌طور گسترده در انواع مختلفی از حسگرهای زیستی و کیمیاوی استفاده شده‌اند [38]. و همچنین، استفاده از نانومواد سلولزی (CNM) مانند نانوفیبرهای سلولز (CNF)، نانوکریستال‌های سلولز (CNC) و سلولز باکتریایی (BC) در ساخت انواع مختلف حسگرها تجربه رشد سریعی داشته است [1]، [5]، [29]. خواص مفید این نانومواد ارتباط دارد با ساختارهای ابرمالیکولی که تشکیل CNM‌ها را می‌دهند، بدون دخالت زیستی آن‌ها و گروه‌های عمل‌کردی بسیار واکنش‌پذیر که امکان تاب‌آوری سطحی را فراهم می‌کند. CNM‌ها به‌عنوان هیدروژل و زئروژل، فیلم‌های نازک، نانوکاغذ و ساختارهای دیگر جذاب برای طراحی حسگر مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این، CNM‌ها می‌توانند با سایر مواد (مانند نانوذرات، آنزیم‌ها، نانومواد کربنی و غیره) و انواع مختلف از محیط‌های حسگری ترکیب شده و به ساخت حسگرها و بیوحسگرهای پیش‌رفته منجر شوند [3]، [4]، [7]، [30]. این بررسی پیش‌رفت‌های اخیر در زمینه CNM و ترکیبات آن‌ها در ساخت حسگرهای نوری، الکتریکی، الکتروکیمیاوی و پیزوالکتریک برای تشخیص ترکیبات از آلاینده‌های محیطی تا پارامترهای فیزیولوژیک انسان را بررسی می‌کند [20]، [39]، [41]. تأکید این‌جاست که چگونه نانومواد سلولزی می‌توانند به بهبود عمل‌کرد حسگرهای مختلف کمک کنند و همچنین برنامه‌های جدیدی را در زمینه حسگرها که با استفاده از مواد استاندارد به‌راحتی قابل دست‌یابی نیستند، گسترده کنند [9]، [10]، [32]، [33]. در نهایت، چالش‌ها و روندهای آینده در استفاده از مواد مبتنی بر سلولز در حسگرها و بیوحسگرها نیز مورد بحث قرار گرفته‌اند [24]. در گیاهان، پلی‌ساکاریدها حدود 90٪ از جمله خشک‌دیواره سلولی گیاه را تشکیل می‌دهند که اصولاً از سلولز (از 40٪ تا 90٪) و فراکسیون‌هایی از همی‌سلولز، پکتین‌ها و لیگن تشکیل شده‌اند [33]، [34]. ساختار ابرمالیکولی گیاهان بر اساس شکل (3 a) نشان داده شده است [32]. پایین‌ترین سطح از ساختار سلسله‌مراتبی یک الیاف سلولزی، زنجیره پلیمری سلولز است که پیش از آن شبکه از تعاملات داخلی و بین مالیکولی بین آن‌ها مالیکول‌های سلولز را به واحدهای بزرگ‌تری به نام فیبرهای ابتدایی (پروتوفیبریل) می‌آمیزد. پروتوفیبریل‌ها به نوبه خود به واحدهای بزرگ‌تری به نام میکروفیبریل‌ها تراکم می‌شوند، که ابعاد مقطع آن‌ها معمولاً در بازه 2 تا 20 نانومتر

متغیر است به تبع طبق منبع سلولز؛ در حالی که طول آن‌ها در مقیاس میکرومتر است [19]، [32]، [33]. لازم به ذکر است که سلولزهایی از منابع مختلف ممکن است به شکل‌های مختلفی بسته شوند و این ترتیبات تحت شرایط بایوسنتز اداره می‌شوند [9]، [33]. یک منبع دیگر از سلولز واعظ سلولز باکتریایی<sup>2</sup> (BC) است که ساختار کیمیایی و ابرمالیکولی مشابهی با سلولز حاصل از گیاهان دارد و از فیبرهای سلولزی بسیار نازک با قطر در بازه 80 تا 150 نانومتر تشکیل شده است. با این حال، به عنوان مختلف از سلولز مبتنی بر گیاه، BC بی‌همی سلولز، پکتین و لیگن خالی است که این امر به معنای دستیابی به یک ماده بسیار خالص و ساختار شبکه‌ی نانوفیبری منظم است. جدایش سلولز برای اولین بار توسط شیمی‌دان فرانسوی، انسلم پاین، در سال 1838 گزارش شد. او این ماده الیافی را سلولز نامید و فرمول مالیکولی آن را به عنوان  $(C_6H_{10}O_5)_n$  تعریف کرد؛ همان‌طور که در شکل (B 1) نشان داده شده است. ساختار سلولز شامل زنجیره‌های هموپلیمر خطی است. خواص فیزیکی و کیمیایی آن به‌طور قابل توجهی از اتحادیه ناشی از مقدار زیاد گروه هیدروکسیل موجود و ناشی از پیوندهای هیدروژن داخلی و بین مالیکولی قوی است. خواص حاصل شده شامل حلالیت آب پایین، شاخص بلورینیت بالا و پایداری حرارتی بالا است. درجه پلیمریزاسیون (DP) سلولز طبیعی از منابع مختلف در محدوده 1000 تا 30,000 است، که معادل طول زنجیره‌های 500 تا 15,000 نانومتر است. شیوه ترتیب‌دهی زنجیره‌های سلولز می‌تواند منجر به شش شکل مورفوتیپ اللومورفی قابل تبدیل شود، که به‌عنوان سلولز I تا سلولز VI شناخته می‌شوند؛ با این حال سلولز I یک ساختار ترمودینامیکی متناسب دارد و می‌تواند به سایر آمورف‌ها تبدیل شود. به دلیل ماهیت نیمه‌بلوری یک میکروفیبریل (همانطور که در شکل C 1 نشان داده شده است)، شرایط هیدرولیز اسیدی یا آنزیمی کنترل‌شده منجر به حذف دامنه آمورف و جداسازی تک‌بلورهای بسیار نازک به نام CNC می‌شود. بلورها را در یک پیچ هلیکال در امتداد محور بلند عمود بر تاک استوانه‌یی به یک زاویه که «نخ‌ها» را به هم بافته می‌کند، ترتیب می‌دهند (شکل E 3). به این ترتیب، صفحات انباشته‌شده CNC در امتداد یک محور عمود بر هم قرار می‌گیرند و هر صفحه بسته به غلظت در یک زاویه فاز می‌چرخد. بنابراین، این هم‌ترازی می‌تواند منجر به ایجاد شکاف‌های باند نوری شود که جنبه بصری رنگین‌مانی/ مرواریدی را بین قطبش‌کننده‌های متقاطع (نمایش داده‌شده در شکل F 3) - به دلیل انکسار مضاعف حوزه‌های جداگانه- ایجاد می‌کند که معمولاً الگوهای اثر انگشت را همان‌طور که در شکل G 1 نشان داده شده است، تولید می‌کند. این ویژه‌گی ذاتی CNC در فاز مایع بررسی شده است.

<sup>2</sup> Bacterial Cellulose

مطالعات حسگرهای تشخیص SARS-CoV-2 با آنتی‌بادی نشان داده‌اند که حسگرهای زیستی الکترونیکی [41]، به‌ویژه آرایه‌های نانولوله‌یی ترانزیستور اثر میدانی (FET) [20]، می‌توانند به‌طور مؤثر یون‌های فلزی، بیومالیکول‌ها (هورمون‌ها)، ویروس‌ها و سلول‌های کامل را شناسایی کنند [21]. در توسعه این حسگر، SWCNTها آنتی‌بادی‌های ضد SARS-CoV-2 S1 را روی سطح SiO<sub>2</sub> بین کانال‌های S-D (منبع- تخلیه) با استفاده از یک پیوند کووالانسی از طریق 1- پیرنوتانوئیک‌اسید سوکسینیمیدیل استر (PBASE) تثبیت می‌کنند [22]. محققان از هیبریداسیون RNA به‌عنوان مولد سیگنال اولیه و یک شبکه ترانزیستوری اثر میدانی نانولوله با درجهٔ مایع به‌عنوان مبدل سیگنال استفاده کردند [25]. برای توسعه این حسگر دانشمندان از آنتی‌ژن SARS-CoV-2 S1 تجاری موجود برای تجزیه و تحلیل خروجی الکتریکی حسگر زیستی CNT-FET استفاده کردند [39]. این فناوری می‌تواند به‌طور مؤثر SARS-CoV-2 را از سایر کروناویروس‌های حاوی آنتی‌ژن SARS-CoV-1 S1 یا MERS-CoV S1 متمایز کند [5]. علاوه بر این، ثابت شده است که بسیار حساس است و به سرعت عفونت COVID-19 را با استفاده از نمونه‌های بزاق تشخیص می‌دهد [4].

تشخیص SARS-CoV-2 بدون نیاز به آنتی‌بادی اغلب از روش‌های مبتنی بر تشخیص مالیکولی و روش‌های بیوحسگری استفاده می‌کند [6]. این روش‌ها معمولاً از مالیکول‌های خاص یا ساختارهای بیولوژیکی از جمله رونوکلوتیدها، پروتئین‌ها یا دیگر آنتی‌ژن‌های ویروسی برای شناسایی و تشخیص ویروس استفاده می‌کنند [5]؛ به‌عنوان مثال: روش (PCR (Polymerase Chain Reaction و روش‌های مبتنی بر تشخیص RNA و DNA می‌توانند تشخیص دقیق و سریعی از وجود ویروس در نمونه‌های بیولوژیکی مانند بزاق، مدفوع یا دیگر نمونه‌های بدنی ارائه دهند [39]. مایکل استرانو در MIT تأکید کرد که تشخیص سریع می‌تواند محدودیت‌های سفر را کاهش دهد. افراد می‌توانند قبل از سوارشدن به پرواز تحت بررسی قرار گیرند و این امر به جلوگیری از گسترش بیشتر ویروس کمک می‌کند [22]، [25]. پیش از این، محققان در آزمایشگاه Strano ادعا کردند که حسگرها را می‌توان با اصلاح پیچیده CNTها در پلیمرهای مختلف که به مالیکول‌های هدف خاص (بیومارکرها) پاسخ می‌دهند، توسعه داد. یک حسگر جدید COVID-19 همچنین به‌عنوان شناسایی مالیکولی فاز کرونا (CoPhMoRe) بر اساس این روی‌کرد ساخته شده است [21]، [41]. CoPhMoRe از پلیمرهای آمفی‌فیلیک تشکیل شده است که بر روی نانولوله‌ها نواحی ضد آب ایجاد می‌کنند که شبیه لنگرها و نواحی جذب آب‌اند که مجموعه‌یی از حلقه‌ها را در فاصلهٔ دور از لوله‌ها تشکیل می‌دهند [21]، [22]، [25]. آرایش حلقه‌ها نقش مهمی ایفا می‌کند؛ زیرا فقط انواع خاصی از مالیکول‌های هدف می‌توانند

فضاهای بین حلقه‌ها را اشغال کنند. این آرایش مکانیکی شدت طول موج تولیدشده توسط نانولوله‌های کربنی را تغییر می‌دهد [8]، [39].

### نتیجه‌گیری

نانوحسگرها انقلابی در زمینه تحلیل و تجزیه مواد و عوامل کیمیاوی و یا بیولوژیکی ایجاد کرده‌اند. ابعاد بسیار کوچک این حسگرها با گونه‌های کیمیاوی و حیاتی مقایسه می‌شوند؛ ولی سگنال‌های ارسالی توسط آن‌ها را می‌توان توسط آلات و تجهیزات میکروسکوپی دریافت نمود. در آینده این نوع حسگرها جایگاه ویژه‌ی در میکروالکترونیک خواهند داشت و تغییرات و تحولات غیر قابل تصور را در روند تکنالوژی و سایر عوامل مؤثر در زنده‌گی انسان ایجاد خواهد نمود. نانومواد به دلیل خواص الکتریکی و فیزیکی خارق‌العاده‌ی که از ساختارهای یک‌بعدی و دوبعدی آن‌ها ناشی می‌شود. مواد نانوی یک‌بعدی دارای ویژه‌گی‌هایی مانند اندازه کوچک و نسبت ابعاد بالاینده؛ مانند نانوسیم‌ها، نانوکمرها و نانواستوان‌ها. مواد نانوی دوبعدی ویژه‌گی‌های برجسته‌ی از جمله استحکام، سبکی و انعطاف‌پذیری به‌طور گسترده در انواع مختلفی از حسگرهای زیستی و کیمیاوی استفاده شده‌اند. مزیت اصلی حسگر تشخیص SARS-CoV-2 بدون آنتی‌بادی در توانایی آن برای دورزدن بسیاری از مراحل وقت‌گیر مانند تولید آنتی‌بادی و خالص‌سازی نمونه نهفته است. محققان مطمئن‌اند که این حسگر جدید می‌تواند نه تنها کووید-19 بلکه سایر ویروس‌هایی را که پتانسیل ابتلا به بیماری‌های همه‌گیر آینده را دارند، به دقت شناسایی کند. آزمایشگاه Strano و InnoTech Precision Medicine، یک شرکت ابزار تشخیصی در بوستون، حمایت مالی از مؤسسه ملی بهداشت برای توسعه حسگر زیستی CoPhMoRe برای شناسایی پروتئین‌های SARS-CoV-2 دریافت کردند. نکته مهم این است که این حسگر می‌تواند هم نوکلئوکسپید و هم پروتئین‌اسپایک SARS-CoV-2 را شناسایی کند. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، این دستگاه بسیار دقیق و حساس است و قادر است 2.4 پیکوگرام پروتئین ویروسی در هر میلی‌لیتر نمونه را در عرض پنج دقیقه تشخیص دهد. در نتیجه، تحقیقات مرتبط با بیوحسگر در دامنه‌های مختلف علمی و فناوریانه قرار دارد؛ از جمله الکتروکیمیایی، کیمیای سطح، کیمیای حیاتی و فیزیک جامد. بیوحسگرها به‌طور کلی با هشت ویژه‌گی مشخص می‌شوند.

### منابع

- G. Maduraiveeran and W. Jin, "Nanomaterials based electrochemical sensor and biosensor platforms for environmental applications," *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, vol. 13, pp. 10–23, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.TEAC.2017.02.001.

- X. Teng, L. Qi, T. Liu, L. Li, and C. Lu, "Nanomaterial-based chemiluminescence systems for tracing of reactive oxygen species in biosensors," *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 162, p. 117020, May 2023, doi: 10.1016/J.TRAC.2023.117020.
- R. Ahmad, N. Griffete, A. Lamouri, N. Felidj, M. M. Chehimi, and C. Mangeney, "Nanocomposites of Gold Nanoparticles@Molecularly Imprinted Polymers: Chemistry, Processing, and Applications in Sensors," *Chemistry of Materials*, vol. 27, no. 16, pp. 5464–5478, Aug. 2015, doi: 10.1021/ACS.CHEMMATER.5B00138.
- S. Mishra, B. Aamna, S. Parida, and A. K. Dan, "Carbon-based biosensors: Next-generation diagnostic tool for target-specific detection of SARS-CoV-2 (COVID-19)," *Talanta Open*, vol. 7, p. 100218, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.TALO.2023.100218.
- B. M. Szydłowska, Z. Cai, and M. C. Hersam, "Printed nanomaterial sensor platforms for COVID-19 and future pandemics," *Curr Opin Solid State Mater Sci*, vol. 27, no. 6, p. 101121, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.COSSMS.2023.101121.
- M. Srivastava, N. Srivastava, P. K. Mishra, and B. D. Malhotra, "Prospects of nanomaterials-enabled biosensors for COVID-19 detection," *Science of The Total Environment*, vol. 754, p. 142363, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.142363.
- A. Gowri, N. Ashwin Kumar, and B. S. Suresh Anand, "Recent advances in nanomaterials based biosensors for point of care (PoC) diagnosis of Covid-19 – A minireview," *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 137, p. 116205, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.TRAC.2021.116205.
- R. Zhou, Q. Zhou, X. Li, G. Ling, and P. Zhang, "Applications of Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-based nanomaterials in photoelectric chemical sensors and biosensors," *FlatChem*, vol. 36, p. 100440, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.FLATC.2022.100440.
- C. D. Usurelu, S. Badila, A. N. Frone, and D. M. Panaitescu, "Poly(3-hydroxybutyrate) Nanocomposites with Cellulose Nanocrystals," *Polymers*, vol. 14, no. 10. 2022. doi: 10.3390/polym14101974.
- R. J. B. Leote, M. Beregoi, I. Enculescu, and V. C. Diculescu, "Metallized electrospun polymeric fibers for electrochemical sensors and actuators," *Curr Opin Electrochem*, vol. 34, p. 101024, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.COEELEC.2022.101024.
- D. Rohilla, S. Chaudhary, and A. Umar, "An Overview of Advanced Nanomaterials for Sensor Applications," *Engineered Science*, vol. 16, pp. 47–70, 2021, doi: 10.30919/es8d552.

- A. Shruti, N. Bage, and P. Kar, "Nanomaterials based sensors for analysis of food safety," *Food Chem*, vol. 433, p. 137284, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.FOODCHEM.2023.137284.
- A. V. Bounegru and C. Apetrei, "Carbonaceous Nanomaterials Employed in the Development of Electrochemical Sensors Based on Screen-Printing Technique—A Review," *Catalysts*, vol. 10, no. 6, p. 680, Jun. 2020, doi: 10.3390/catal10060680.
- V. M. Aroutiounian, "Use of Semiconductor Gas Sensors Made from Nanomaterials in Medicine," *Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences)*, vol. 57, no. 3, pp. 263–273, Sep. 2022, doi: 10.1134/S1068337222030045.
- M. Ramya *et al.*, "A recent advancement on the applications of nanomaterials in electrochemical sensors and biosensors," *Chemosphere*, vol. 308, p. 136416, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.136416.
- F. Arduini, S. Cinti, V. Scognamiglio, and D. Moscone, "Nanomaterial-based sensors," in *Handbook of Nanomaterials in Analytical Chemistry*, Elsevier, 2020, pp. 329–359. doi: 10.1016/B978-0-12-816699-4.00013-X.
- R. Eivazzadeh-Keihan *et al.*, "Applications of carbon-based conductive nanomaterials in biosensors," *Chemical Engineering Journal*, vol. 442, p. 136183, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.cej.2022.136183.
- A. Sharma, A. Ahmed, A. Singh, S. K. Oruganti, A. Khosla, and S. Arya, "Review—Recent Advances in Tin Oxide Nanomaterials as Electrochemical/Chemiresistive Sensors," *J Electrochem Soc*, vol. 168, no. 2, p. 027505, Feb. 2021, doi: 10.1149/1945-7111/abdee8.
- W. P. Flauzino Neto, H. A. Silvério, N. O. Dantas, and D. Pasquini, "Extraction and characterization of cellulose nanocrystals from agro-industrial residue – Soy hulls," *Ind Crops Prod*, vol. 42, no. 1, pp. 480–488, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.indcrop.2012.06.041.
- S. A. Muhsin *et al.*, "A microfluidic biosensor architecture for the rapid detection of COVID-19," *Anal Chim Acta*, vol. 1275, p. 341378, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.ACA.2023.341378.
- F. W. S. Fendi, W. M. Mukhtar, and M. Abdullah, "Surface plasmon resonance sensor for Covid-19 detection: A review on plasmonic materials," *Sens Actuators A Phys*, vol. 362, p. 114617, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.SNA.2023.114617.
- S. Yasri and V. Wiwanitkit, "Sustainable materials and COVID-19 detection biosensor: A brief review," *Sensors International*, vol. 3, p. 100171, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.SINTL.2022.100171.
- R. Eivazzadeh-Keihan *et al.*, "Applications of carbon-based conductive nanomaterials in biosensors," *Chemical Engineering Journal*, vol. 442, p. 136183, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.CEJ.2022.136183.

- M. Gullo, A. Sola, G. Zanichelli, M. Montorsi, M. Messori, and P. Giudici, "Increased production of bacterial cellulose as starting point for scaled-up applications," *Appl Microbiol Biotechnol*, vol. 101, no. 22, pp. 8115–8127, 2017, doi: 10.1007/s00253-017-8539-3.
- F. Mirzadeh-rafi, F. Rahbarizadeh, N. Shoaie, F. Nasiri, M. R. Akbarizadeh, and M. Khatami, "Carbon nanoparticle-based COVID-19 biosensors," *Sensors International*, vol. 4, p. 100246, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.SINTL.2023.100246.
- L. Yang, X. Gu, J. Liu, L. Wu, and Y. Qin, "Functionalized nanomaterials-based electrochemiluminescent biosensors and their application in cancer biomarkers detection," *Talanta*, vol. 267, p. 125237, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.TALANTA.2023.125237.
- R. Wang, J. Sui, and X. Wang, "Natural piezoelectric biomaterials: a biocompatible and sustainable building block for biomedical devices," *ACS Nano*, vol. 16, no. 11, pp. 17708–17728, 2022.
- L. Schiavo, A. Cammarano, G. Carotenuto, A. Longo, M. Palomba, and L. Nicolais, "An overview of the advanced nanomaterials science," *Inorganica Chim Acta*, vol. 559, p. 121802, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.ICA.2023.121802.
- F. Zhao, J. Wu, Y. Ying, Y. She, J. Wang, and J. Ping, "Carbon nanomaterial-enabled pesticide biosensors: Design strategy, biosensing mechanism, and practical application," *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 106, pp. 62–83, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.TRAC.2018.06.017.
- D. W. Kimmel, G. Leblanc, M. E. Meschievitz, and D. E. Cliffel, "Electrochemical sensors and biosensors," *Anal Chem*, vol. 84, no. 2, pp. 685–707, Jan. 2012, doi: 10.1021/AC202878Q.
- T. Tarabi *et al.*, "Ultrasensitive and rapid detection of artemisinin based on bismuth tungstate dressed rGO nanocomposite," *Mater Chem Phys*, vol. 290, p. 126547, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.MATCHEMPHYS.2022.126547.
- K. B. R. Teodoro, R. C. Sanfelice, F. L. Migliorini, A. Pavinatto, M. H. M. Facure, and D. S. Correa, "A Review on the Role and Performance of Cellulose Nanomaterials in Sensors," *ACS Sensors*, vol. 6, no. 7. American Chemical Society, pp. 2473–2496, Jul. 23, 2021. doi: 10.1021/acssensors.1c00473.
- O. M. Vanderfleet and E. D. Cranston, "Production routes to tailor the performance of cellulose nanocrystals," *Nat Rev Mater*, vol. 6, no. 2, pp. 124–144, Oct. 2020, doi: 10.1038/s41578-020-00239-y.
- F. Li *et al.*, "Natural Biodegradable Poly(3-hydroxybutyrate- co-3-hydroxyvalerate) Nanocomposites with Multifunctional Cellulose Nanocrystals/Graphene Oxide Hybrids for High-Performance Food Packaging," *J Agric Food Chem*, vol. 67, no. 39, pp. 10954–10967, Oct. 2019, doi: 10.1021/acs.jafc.9b03110.

- M. Saleh Mohammadnia, H. Roghani-Mamaqani, H. Mardani, A. Rezvani-Moghaddam, S. Hemmati, and M. Salami-Kalajahi, "Fluorescent cellulosic composites based on carbon dots: Recent advances, developments, and applications," *Carbohydr Polym*, vol. 294, p. 119768, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.CARBPOL.2022.119768.
- H. Achmad *et al.*, "Recent advances of amino acid-based biosensors for the efficient food and water contamination detection in food samples and environmental resources: A technical and analytical overview towards advanced nanomaterials and biological receptor," *Microchemical Journal*, vol. 189, p. 108552, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.MICROC.2023.108552.
- A. Jędrzak, M. Kuznowicz, T. Rębiś, and T. Jesionowski, "Portable glucose biosensor based on polynorepinephrine@magnetite nanomaterial integrated with a smartphone analyzer for point-of-care application," *Bioelectrochemistry*, vol. 145, p. 108071, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.BIOELECTHEM.2022.108071.
- A. Zhang and C. M. Lieber, "Nano-Bioelectronics," *Chem Rev*, vol. 116, no. 1, pp. 215–257, Jan. 2016, doi: 10.1021/ACS.CHEMREV.5B00608.
- R. Khan, A. S. Deshpande, G. Proteasa, and S. Andreescu, "Aptamer-based electrochemical biosensor with S protein binding affinity for COVID-19 detection: Integrating computational design with experimental validation of S protein binding affinity," *Sens Actuators B Chem*, vol. 399, p. 134775, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.SNB.2023.134775.
- S. Mishra, S. Sahoo, P. Kumar Sahoo, and N. Kumar Sahoo, "Recent advancements in the plant and microbial assisted green synthesis of nanomaterials," *Mater Today Proc*, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.MATPR.2023.10.144.
- K. R. B. Singh, S. Rathee, G. Nagpure, J. Singh, and R. P. Singh, "Smart and emerging nanomaterials-based biosensor for SARS-CoV-2 detection," *Mater Lett*, vol. 307, p. 131092, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATLET.2021.131092.

