Journal of Ilam University of Medical Sciences

P-ISSN: 1563-4728
E-ISSN: 2588-3135

The Role of Biosensors and Artificial Intelligence in Smart Drug Delivery Systems

Hajar Danesh [1*], **Atefeh Abedi** [1]

[1] Dept of Electrical and Biomedical Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Shahid Ashrafi Esfahani University, Isfahan, Iran

Article Info

Article type:
Review Article

Article History:
Received: Jan. 12, 2026
Received in revised form: Jun. 03, 2026
Accepted: Jun. 23, 2026
Published Online: Nov. 26, 2026

**** Correspondence to:***
Hajar Danesh
Dept of Electrical and Biomedical Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Shahid Ashrafi Esfahani University, Isfahan, Iran

Email:
hajardanesh@yahoo.com

A B S T R A C T

Introduction: Conventional pharmacotherapies are limited by non-specific systemic drug distribution, which compromises therapeutic efficacy and induces systemic adverse effects. This structured narrative review aims to evaluate the role of core components, including stimuli-responsive nanocarriers, implantable biosensors, and artificial intelligence (AI) algorithms, in the development of closed-loop smart drugs.

Materials & Methods: A structured literature search was performed across PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, Embase, and IEEE Xplore databases for publications from 2019 to 2026. Following screening and eligibility assessment based on predefined inclusion criteria, drug release mechanisms, biosensor performance metrics, and data-driven decision-making architectures were critically appraised and synthesized from 36 eligible studies.

Results: Stimuli-responsive nanocarriers provide for spatiotemporal drug delivery and implantable biosensors, especially organic electrochemical transistors (OECTs), allow for real-time monitoring of biomarkers. These signals are combined with artificial intelligence (AI) for adaptive, on demand dosing. Deep learning models predicted therapeutic interventions with 95-98% accuracy, and preclinical closed-loop systems reduced fluctuations in plasma drug concentrations to <5%. Advanced sensors have also attained femtomolar detection limits for biomarkers. These technologies together offer the possibility of improving the accuracy of dosing and therapeutic efficacy while at the same time reducing systemic toxicity in complex diseases such as diabetes and cancer. However, these performance results are mainly based on in vitro and preclinical evidence and require further clinical validation.

Conclusion: The integration of smart nanocarriers, real-time biosensing and AI-driven decision-making algorithms has established a novel framework for precision drug delivery. However, clinical translation is still hampered by challenges related to long-term biocompatibility, algorithmic interpretability and stringent regulations. Future research should be directed toward rigorous clinical validation and toward engineering self-sustaining, energy-autonomous, long-term implantable systems, capable of performing autonomous diagnostic-therapeutic cycles, thus translating the promise of personalized healthcare into clinical practice.

Keywords: Smart Drug Delivery; Biosensors; Optical Sensors; Piezoelectric Sensors; Implantable Biosensors; Stimuli-Responsive Biosensors; Artificial Intelligence

Cite this paper: Danesh D, Abedi A. The Role of Biosensors and Artificial Intelligence in Smart Drug Delivery Systems. *Journal of Ilam University of Medical Sciences*. 2026;34(5):22-39.

Introduction

Stimuli-responsive nanocarriers, organic electrochemical transistor (OECT)-based biosensors, and artificial intelligence (AI)-based systems for drug delivery have achieved great progress but have not been properly integrated into one closed-loop therapeutic system (1–3). Previous reviews have focused on the individual components, with limited systematic analysis of the relationship between sensor accuracy and stability, physiological variability, AI-based decision-making, and drug-release mechanisms on the overall system performance (2–4). The links between real-time biomarker monitoring, adaptive dosing decisions, and reliable therapeutic responses are not adequately

© The Author(s)

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

characterized (3, 4). Moreover, the technological, physiological, and translational barriers to the implementation of these systems in clinical practice have not been sufficiently synthesized (4, 5). This review fills these gaps by providing a critical analysis of how these components are integrated, highlighting the major engineering and clinical challenges, and prioritizing the translation of intelligent systems for drug delivery into clinically viable applications.

Methods

This study was conducted as a narrative review in a structured manner. A synthetic approach, both analytical and critical, was adopted to review recent advances in closed-loop smart systems for drug delivery, with a focus on three interrelated components: nanocarriers, biosensors, and artificial intelligence (AI). A systematic literature search was performed in PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, Embase and IEEE Xplore. Searches were also carried out on Google Scholar, SpringerLink and ScienceDirect to extend the literature coverage. Only articles published between 2019 and 2026 were considered. The search strategy was based on keywords related to smart and stimuli-responsive nanocarriers (e.g., pH-responsive and ROS-responsive systems), biosensors (e.g., implantable, wearable, electrochemical, and organic electrochemical transistor-based sensors) and AI-driven closed-loop delivery systems for drugs. Search terms were linked together using Boolean operators (AND/OR). The selection of studies was done in two steps. In the first step titles and abstracts were screened and in the second step full texts were assessed. Initially 100 records were identified and 22 duplicates were removed. We subsequently screened 78 records and excluded 42 as they were not relevant to the objectives of this review, not available in full text or did not contain primary research data. Finally, 36 studies were included in the qualitative synthesis. Two researchers independently screened the selected studies and extracted relevant information, and resolved discrepancies through discussion and consensus. Data extraction included study characteristics, type of nanocarrier and biosensor, analytical performance, artificial intelligence algorithms, and preclinical or clinical outcomes. For each of the three main domains qualitative content analysis and structured narrative synthesis were used.

Results

The combination of stimuli-responsive nanocarriers, advanced biosensors and AI-based decision-making algorithms has resulted in the significant improvement of the development of smart drug delivery platforms. The 36 studies included in the analysis included 12 studies on stimuli-responsive nanocarriers, 12 studies on implantable and wearable biosensors, nine studies on machine learning and artificial intelligence applications, and three studies on experimentally integrated closed-loop systems. Stimuli-responsive nanocarriers may be a breakthrough in targeted drug delivery. As they respond to the pathological conditions in a controlled manner. Such as pH, reactive oxygen species (ROS), temperature and light. They can reduce off-target toxicity, improve therapeutic targeting and reduce premature drug release. Electrochemical sensors and organic electrochemical transistors (OECTs) are the most commonly used biosensors and their importance is increasing for the continuous, real-time monitoring of physiological biomarkers. They allow us to transduce biochemical changes into electrical signals that can be detected. This means that we can dynamically modulate the dose of drugs. OECT-based platforms are particularly promising because of their potential integration into flexible and implantable devices, compatibility with aqueous environments, low operating voltage, and high sensitivity. However, there are still important limitations, such as signal drift, biofouling, and long-term material degradation. Artificial intelligence and machine learning techniques improve the system performance by the sophisticated analysis of biosensor data, prediction of physiological changes and optimization of personalized drug delivery. Algorithms including long short-term memory networks, support vector machines and reinforcement learning have shown potential in the areas of glucose prediction, movement-related symptom detection and adaptive dose optimization. The reported findings are: over 95% prediction accuracy in some applications; and reduction in the glucose-control prediction errors compared to traditional proportional-integral-derivative controllers. Integrated platforms also enable closed-loop regulation of therapeutics, such as glucose-responsive insulin delivery systems and electrochemical feedback-based chemotherapy pumps (e.g., CLAUDIA). But most emerging integrated platforms are still in the laboratory or preclinical stage, whereas established glucose monitoring and insulin delivery systems are at a more advanced level of clinical maturity.

Conclusion

The results emphasize the need for successful

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

integration of nanotechnology, biosensing and artificial intelligence into coherent closed-loop therapeutic architectures to secure the future of smart drug delivery. The biosensors enable real-time monitoring of physiological parameters. The stimuli-responsive nanocarriers enable targeted and controlled drug delivery. The conventional artificial intelligence algorithms enable adaptive and personalized therapeutic decisions. Taken together, these technologies could increase the precision of therapeutics, reduce systemic toxicity and maintain drugs within the desired therapeutic window. While these advances are promising, there are some barriers that restrict the degree of clinical translation. These include long-term biocompatibility, biosensor stability, signal reliability, algorithm interpretability, data security, and regulatory requirements for integrated drug-device-software systems. Future research will focus on the development of biocompatible, self-sustaining, and minimally invasive platforms, explainable artificial intelligence frameworks, standardized performance assessment, and multicenter clinical validation. Overall, the combination of intelligent computational frameworks, advanced biosensors and responsive nanocarriers is a promising approach for patient-specific drug delivery and precision medicine.

Authors' Contribution

Conceptualization, Methodology, Validation, Formal Analysis, Investigation, Resources, Software, Data Curation, Writing–Original Draft Preparation, Writing–Review & Editing, Visualization, Supervision, Project Administration: AA, HD.

Ethical Statement

Given the review nature of this study and the use of publicly available data, obtaining an ethics code was not required. The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest regarding the publication of this article.

Funding

This study did not get any particular financial support from public, commercial, or nonprofit organizations.

Acknowledgment

The authors want to convey their appreciation to those scholars whose academic contributions have informed the theoretical and empirical basis of this research.

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

مجله دانشگاه علوم پزشکی ایلام

JIUMS

شاپای چاپی : ۱۵۶۳-۴۷۲۸

شاپای الکترونیک : ۲۵۸۸-۳۱۳۵

بررسی نقش بایوسنسورها و هوش مصنوعی در سامانه‌های دارورسانی هوشمند

هاجر دانش [1*] ، **عاطفه عابدی** [1]

[1] گروه برق و مهندسی پزشکی، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی، اصفهان، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مروری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲۳

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۹/۰۵

نویسنده مسئول:
هاجر دانش
گروه برق و مهندسی پزشکی، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی، اصفهان، ایران

Email:
hajardanesh@yahoo.com

چکیده

مقدمه: درمان‌های دارویی متداول به علت توزیع غیراختصاصی دارو، با کاهش اثربخشی و عوارض سیستمیک همراه هستند. هدف این مطالعه بررسی نقش مؤلفه‌های اصلی این سامانه‌ها شامل نانوحامل‌های پاسخ‌گرا، بایوسنسورهای قابل کاشت و الگوریتم‌های هوش مصنوعی در توسعهٔ سامانه‌های دارورسانی هوشمند حلقه‌بسته و تحلیل پتانسیل بالینی آن‌هاست.

مواد و روش‌ها: این مرور روایتی ساختاریافته با جستجو در پایگاه‌های PubMed/MEDLINE، Scopus، Web of Science، Embase و IEEE Xplore در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۶ انجام شد. پس از فرایند غربالگری و گزینش منابع بر اساس معیارهای ورود، سازوکارهای رهایش دارو، عملکرد انواع بایوسنسورها و ساختار تصمیم‌گیری مبتنی بر داده با استفاده از ۳۶ مقاله نهایی بررسی و سنتز گردید.

یافته‌های پژوهش: نتایج نشان داد، نانوحامل‌های پاسخ‌گرا امکان رهایش هدفمند دارو را فراهم می‌سازند. بایوسنسورهای قابل کاشت، به‌ویژه ترانزیستورهای الکتروشیمیایی ارگانیک، با پایش بلادرنگ بیومارکرهایی نظیر گلوکز، pH و نشانگرهای التهابی، سیگنال‌های ورودی لازم برای سیستم‌های حلقه‌بسته را تأمین می‌کنند. ادغام این داده‌ها با الگوریتم‌های هوش مصنوعی به تعیین دقیق دوز بهینه در زمان مناسب منجر می‌شود. در مطالعات منتخب، الگوریتم‌های یادگیری عمیق در پیش‌بینی نیاز به دارو (مانند حملات پارکینسون) دقتی بین ۹۵ تا ۹۸ درصد نشان دادند و مدل‌های کنترل حلقه‌بسته در شرایط آزمایشگاهی و پیش‌بالینی، نوسانات غلظت پلاسمایی دارو را به زیر ۵ درصد کاهش دادند. علاوه بر این، پردازش سیگنال در حسگر های بسیار حساس، حد تشخیص بیومارکرها را به سطح فمتومولار رسانده است. این فناوری‌ها در مدیریت بیماری‌های پیچیده نظیر دیابت و شیمی‌درمانی سرطان، با کاهش سمیت سیستمیک و افزایش دقت دوزبندی، کارایی درمانی را به‌طور چشمگیری بهبود داده‌اند.

بحث و نتیجه‌گیری: هم‌افزایی نانوحامل‌های هوشمند، پایش بلادرنگ بایوسنسورها و الگوریتم‌های تصمیم‌گیری مبتنی بر هوش مصنوعی چارچوب عملیاتی جدیدی برای دارورسانی شخصی‌سازی‌شده ایجاد کرده است. چالش‌های موجود ازجمله زیست‌سازگاری بلندمدت، تفسیرپذیری الگوریتم‌ها و الزامات تنظیم‌گری مانع از ترجمهٔ سریع بالینی شده‌اند؛ به همین علت، آیندهٔ این حوزه باید بر اعتبارسنجی‌های بالینی و توسعهٔ سیستم‌های خودپایدار، انرژی خودکفا و بلندمدت درون‌بدنی متمرکز شوند تا بتوانند چرخهٔ تشخیص درمان را بدون مداخلهٔ خارجی انجام دهند و پزشکی شخصی‌سازی‌شده را از نظریه به واقعیت تبدیل کنند.

واژه‌های کلیدی: دارورسانی هوشمند، حسگرهای زیستی، حسگرهای نوری، حسگرهای پیزوالکتریک، بایوسنسورهای قابل کاشت، بایوسنسورهای پاسخ‌دهنده به محرک، هوش مصنوعی

استناد: عابدی عاطفه، دانش هاجر. بررسی نقش بایوسنسورها و هوش مصنوعی در سامانه‌های دارورسانی هوشمند. *مجله دانشگاه علوم پزشکی ایلام*، آذر ۱۴۰۵؛ ۳۴(۵) : ۳۹-۲۲.

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

CC BY NC

حق‌مؤلف © نویسندگان

مقدمه

در سیستم‌های متداول، توزیع دارو به‌صورت غیرانتخابی در فضای سیستمیک صورت می‌گیرد. این الگوی توزیع علاوه بر کاهش شاخص درمانی، به‌واسطهٔ برهم‌کنش‌های ناخواسته با بافت‌های فیزیولوژیک سالم، به سمیت سیستمیک و بروز عوارض جانبی پایدار منجر می‌گردد. چالش بنیادین در این حوزه بهینه‌سازی پروفایل فارماکوکینتیک دارو به‌منظور دستیابی به غلظت درمانی مؤثر در موضع هدف و حفظ آن در بازه زمانی تعیین‌شده است (۱). برای غلبه بر این محدودیت‌ها، گذار از درمان‌های ایستا به سامانه‌های پویا و بلادرنگ ضروری به‌نظر می‌رسد. در این مسیر، بایوسنسورها و حامل‌های پاسخ‌گو نقش محوری دارند (۲). در دهه‌های گذشته، توسعهٔ نانوحامل‌ها عمدتاً بر سیستم‌های غیرفعال متکی بر ویژگی‌های فیزیکی بافت مانند اثر EPR متمرکز بود؛ اما با تکامل تدریجی، نسل جدید حامل‌های پاسخ‌گو به محرک‌های درون‌زاد نظیر pH، ROS و دما معرفی شدند. ظهور بایوسنسورهای قابل‌کاشت و پلتفرم‌های نسل جدید مبتنی بر ترانزیستورهای الکتروشیمیایی ارگانیک (OECT) امکان پایش پیوستهٔ بیومارکرها را فراهم کرده است.

بااین‌حال، اغلب مطالعات فعلی محدودیت‌های ذاتی سخت‌افزاری این حس‌گرها (مانند پایداری بلندمدت و حساسیت محیطی) را نادیده گرفته‌اند و الگوریتم‌های هوش مصنوعی را بدون در نظر گرفتن پیچیدگی‌های فیزیولوژیک بدن به‌کار گرفته‌اند (۳، ۲). با توجه به پراکندگی پژوهش‌ها در این سه حوزه، بازخوانی و سنتز ساختاریافتهٔ آن‌ها برای ترسیم نقشهٔ راه ترجمهٔ بالینی ضروری به‌نظر می‌رسد. این مطالعه مرور روایتی ساختاریافته با هدف تحلیل پیشرفت‌های اخیر در سه محور اصلی دارورسانی هوشمند شامل نانوحامل‌های پاسخ‌گو، بایوسنسورهای پیشرفته (با تأکید بر پلتفرم‌هایی نظیر OECT) و الگوریتم‌های هوش مصنوعی در چارچوب سیستم‌های حلقه‌بسته تدوین‌شده است. بدین‌منظور، پتانسیل‌های بالینی این سامانه‌ها در مدیریت بیماری‌های مزمن و درمان هدفمند تومورها ارزیابی می‌شود. برخلاف مرورهای پیشین که هر مؤلفه را به‌صورت جزیره‌ای بررسی کرده‌اند، این پژوهش در قالب یک چارچوب تحلیلی منسجم، به‌طور ویژه بر سازوکارهای ادغام سیستمیک این اجزا، موانع ترجمهٔ بالینی و چشم‌انداز توسعهٔ پلتفرم‌های خودپایدار متمرکز است.

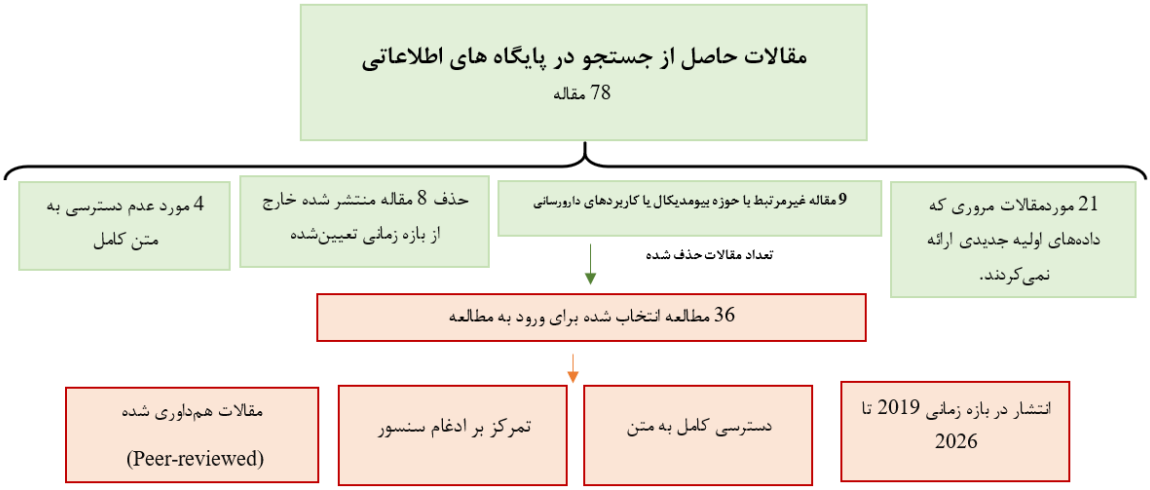
مواد و روش‌ها

این مطالعه به‌صورت مرور روایتی ساختاریافته با رویکردی تحلیلی-انتقادی انجام شد. هدف از این مرور سنتز و ارزیابی پیشرفت‌های اخیر در حوزهٔ سیستم‌های دارورسانی هوشمند حلقه‌بسته با تمرکز بر سه مؤلفهٔ اصلی نانوحامل‌ها، بایوسنسورها و هوش مصنوعی بود. جستجوی جامع ادبیات با هدف پوشش مفاهیم کلیدی و پیشرفت‌های نوین، در پایگاه‌های نمایه‌ساز اصلی شامل PubMed/MEDLINE، Scopus، Web of Science، Embase و IEEE Xplore انجام گرفت. جستجوی تکمیلی در پایگاه‌های ScienceDirect، SpringerLink و موتور جستجوی Google Scholar برای اطمینان از پوشش جامع متون علمی در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۶ صورت پذیرفت. راهبرد جستجو با ترکیب سه دسته کلمات کلیدی اصلی شامل «نانوحامل‌های هوشمند و پاسخ‌گرا» (مانند stimuli-responsive، nanocarrier، pH-responsive، ROS-responsive)، «بایوسنسورها» (مانند biosensor، implantable biosensor، OECT، wearable biosensor) و «هوش مصنوعی و سیستم‌های حلقه‌بسته» (مانند artificial intelligence، machine learning، closed-loop drug delivery، precision medicine) با عملگرهای Boolean (AND/OR) طراحی شد. فرایند غربالگری در دو مرحلهٔ بررسی عنوان و چکیده (screening) و مرحلهٔ دوم، بررسی متن کامل (eligibility) انجام گردید.

در جستجوی اولیه ۱۰۰ رکورد شناسایی شد. پس از حذف ۲۲ رکورد تکراری با استفاده از نرم‌افزار مدیریت منابع، ۷۸ مقاله وارد مرحلهٔ غربالگری عنوان و چکیده گردیدند. در این مرحله، ۴۲ مطالعه به علت انطباق نداشتن با اهداف پژوهش، ماهیت مروری بدون داده‌های اصیل یا دسترسی نداشتن به متن کامل حذف شدند. درنهایت، ۳۶ مقاله وارد

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

ارزیابی نهایی و سنتز گردیدند. از این تعداد، ۱۲ مقاله به بررسی نانوحامل‌های پاسخ‌گرا (pH، ROS، دما و نور) پرداختند، ۱۲ مقاله به بررسی بایوسنسورهای قابل کاشت و پوشیدنی (به‌ویژه OECT و حسگرهای الکتروشیمیایی) اختصاص داشتند، ۹ مقاله کاربرد هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین را در بهینه‌سازی دوز و پایش بیومارکرها بررسی کردند و ۳ مطالعه نیز به پیاده‌سازی تجربی سیستم‌های حلقه‌بستهٔ یکپارچه پرداختند. روند شناسایی و انتخاب مقالات در شکل شمارهٔ ۱ نمایش داده‌شده است. دو پژوهشگر به‌صورت موازی صحت‌سنجی و استخراج داده‌ها را انجام دادند و موارد اختلاف با بحث و اجماع نهایی گردید. داده‌های استخراج‌شده شامل ویژگی‌های طراحی مطالعه، نوع نانوحامل یا حس‌گر، مؤلفه‌های عملکردی (حساسیت، حد تشخیص و پایداری)، الگوریتم‌های به‌کاررفته و پیامدهای بالینی/پیش‌بالینی بود. سنتز داده‌ها به‌روش روایی ساختاریافته انجام پذیرفت. داده‌های استخراج‌شده بر اساس سه محور اصلی مطالعه (نانوحامل‌ها، بایوسنسورها و هوش مصنوعی) کدگذاری و تحلیل محتوای کیفی روی آن‌ها صورت گرفت.



شکل شمارهٔ ۱. نمودار جریان فرایند شناسایی، غربالگری و انتخاب منابع بررسی‌شده در این مطالعه

نانوحامل‌های هوشمند در دارورسانی: سامانه‌های نانومقیاس به سبب نسبت سطح به حجم بالا و قابلیت مهندسی سطح، امکان بارگیری کارآمد دارو، عبور انتخابی از موانع بیولوژیک و کنترل سینتیک رهایش را فراهم می‌سازند. این ویژگی‌ها در مقایسه با فرمولاسیون‌های متداول، نسبت درمانی را بهبود می‌بخشند و تجمع دارو در بافت‌های غیرهدف را به‌طور معناداری کاهش می‌دهند (۳، ۱).

نانوحامل‌های پاسخ‌دهنده به محرک: نانوحامل‌های پاسخ‌گو نسل تکاملی‌تری از حامل‌های غیرفعال هستند که رهایش دارو را منوط به حضور محرک‌های محیطی یا درون‌زاد می‌سازند. این رویکرد با کاهش رهایش زودهنگام در گردش خون سیستمیک، دقت توزیع دارو در بافت هدف را بهبود می‌بخشد (۶، ۵). در محیط‌های پاتولوژیک نظیر بافت تومور یا کانون‌های التهابی، افت pH و افزایش گونه‌های فعال اکسیژن به‌عنوان محرک‌های درون‌زاد عمل می‌کنند. ساختارهای مبتنی بر پلیمرهای هوشمند یا نانوذرات هیبریدی حاوی پیوندهای حساس به این محرک‌ها، در شرایط فیزیولوژیک پایدار می‌مانند و تنها در مواجهه با آستانه‌های پاتولوژیک دچار تغییر فاز یا تخریب می‌شوند. این سازوکارها امکان رهایش مکان‌مند و کاهش سمیت خارج از هدف را فراهم می‌سازند (۸، ۷).

بایوسنسورها در دارورسانی هوشمند: بایوسنسورها مؤلفه‌های کلیدی سیستم‌های دارورسانی هوشمند هستند که با پایش بلادرنگ بیومارکرهای فیزیولوژیکی، اطلاعات لازم برای تصمیم‌گیری هوشمند فراهم می‌کنند (۹، ۶). هر بایوسنسور از دو بخش اصلی تشکیل‌شده است: ۱. عنصر

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

شناسایی زیستی (بیورسپتور) که می‌تواند آنتی‌بادی، آنزیم یا قطعه‌ای از DNA باشد و به‌طور اختصاصی به مولکول هدف (مانند گلوکز، پروتئین سرطانی یا آنزیم‌های التهابی) متصل می‌شود؛ ۲. مبدل (ترانسدیوسر) که واکنش بیوشیمیایی ناشی از اتصال را به سیگنال قابل‌اندازه‌گیری (الکتریکی، نوری یا حرارتی) تبدیل می‌کند؛ سپس این سیگنال توسط یک ریزپردازنده تفسیر می‌شود (۱۰، ۹).

انواع و سازوکار عملکرد بایوسنسورها در دارورسانی هوشمند؛

بایوسنسورهای الکتروشیمیایی: بایوسنسورهای الکتروشیمیایی با اندازه‌گیری تغییرات جریان (آمپرومتری)، پتانسیل (پتانسیومتری) یا امپدانس، حضور مولکول هدف را تشخیص می‌دهند؛ به‌عنوان‌مثال، در مدیریت دیابت، حسگرهای مبتنی بر آنزیم گلوکز اکسیداز سطح گلوکز را با اندازه‌گیری جریان ناشی از اکسیداسیون آن، به‌صورت مداوم پایش می‌کنند. این داده‌ها به سیستم کنترل ارسال می‌گردد و در صورت لزوم، انسولین آزاد می‌شود (۱۱). کاربرد گستردهٔ این حسگرها در پلتفرم‌های پوشیدنی و قابل‌کاشت، امکان پایش پیوستهٔ غلظت دارو و تنظیم پویای دوز را در درمان‌هایی با پنجرهٔ درمانی باریک (مانند شیمی‌درمانی) فراهم می‌سازد (۱۳، ۱۲). این ویژگی‌ها ازجمله هزینهٔ پایین، سرعت پاسخ‌دهی بالا و کارایی در محیط‌های پیچیدهٔ بیولوژیک، آن‌ها را به ابزاری ایدئال برای پایش بلادرنگ غلظت دارو و تنظیم پویای دوز در درمان‌هایی با پنجرهٔ درمانی باریک (مانند شیمی‌درمانی) تبدیل کرده است (۱۴، ۱۳). ادغام این حسگرها در معماری حلقه‌بسته امکان حفظ غلظت پلاسمایی دارو در محدودهٔ درمانی و کاهش عوارض جانبی را فراهم می‌سازد (۱۵–۱۷).

بایوسنسورهای نوری: این حسگرها تغییرات در ویژگی‌های نوری مانند جذب، انتشار یا بازتاب نور را اندازه‌گیری می‌کنند. یک مثال پیشرفته از این نوع، استفاده از نانوذرات طلا یا نقاط کوانتومی است که به‌عنوان گزارشگر عمل می‌نمایند. این بایوسنسورها می‌توانند با شناسایی تغییرات نوری ناشی از اتصال یک مولکول بیولوژیکی، وجود یک مارکر سرطانی خاص را به‌دقت بالا تشخیص دهند (۱۸). حسگرهای نوری به‌ویژه آن‌هایی که از نانوذرات طلا استفاده می‌کنند، به سبب خواص نوری منحصربه‌فردشان در تحقیقات پزشکی اهمیت بسیاری پیدا کرده‌اند (۱۸). بایوسنسورهای نوری از پدیده‌های نوری مانند رزونانس پلاسمون سطحی موضعی، طیف‌سنجی رامان تقویت‌شدهٔ سطحی و لومینسانس برای تشخیص استفاده می‌کنند. این حسگرها با فراهم‌سازی داده‌های نوری دقیق از بیومارکرهای سرطان در بیوپسی مایع (مانند خون)، اطلاعات لازم را برای واحد کنترل سیستم‌های دارورسانی فراهم می‌سازند که جایگزینی غیرتهاجمی برای روش‌های سنتی نمونه‌برداری بافتی است (۱۸). بااین‌حال، این حسگرها معمولاً به دستگاه‌های خارجی مانند طیف‌سنج یا دوربین برای جمع‌آوری سیگنال نیاز دارند. این وابستگی ادغام آن‌ها در سیستم‌های پوشیدنی یا قابل کاشت را دشوار می‌کند و نظارت بلادرنگ را محدود می‌سازد. در مقابل، حسگرهای الکتروشیمیایی به‌راحتی با ماژول‌های انتقال بی‌سیم ادغام می‌شوند و نظارت بلادرنگ را ممکن می‌سازند (۱۹).

بایوسنسورهای مکانیکی / پیزوالکتریک: حسگرهای مکانیکی و پیزوالکتریک با اندازه‌گیری تغییرات جرم یا فشار (مانند اتصال مولکول به سطح کریستال کوارتز)، تغییری در فرکانس رزونانس ایجاد می‌کنند که قابل‌اندازه‌گیری است. این سازوکار برای تشخیص مولکول‌های با وزن مولکولی بالا و ارزیابی پاسخ به درمان کاربرد دارد (۲۰). در سیستم‌های دارورسانی قابل کاشت، این حسگرها می‌توانند به‌عنوان محرک‌هایی برای کنترل رهایش دارو عمل کنند. حس‌گرهای مکانیکی و پیزوالکتریک با قابلیت اندازه‌گیری دقیق و پاسخ‌دهی به محرک‌های فیزیکی، نقش مهمی در تکمیل سیستم‌های دارورسانی هوشمند ایفا می‌نمایند. حس‌گرهای مکانیکی با ارائهٔ داده‌های بلادرنگ از مؤلفه‌های فیزیکی بدن، زمینه را برای تصمیم‌گیری‌های هوشمند در سیستم‌های دارورسانی حلقه‌بسته فراهم می‌کنند (۲۲، ۲۱). این داده‌ها می‌توانند برای تنظیم دوز دارو بلادرنگ و با دقت بالا استفاده گردند. از سوی دیگر، حسگرهای پیزوالکتریک دو قابلیت کلیدی سنجش و تحریک را هم‌زمان دارند. این دو

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

مورد به آن‌ها اجازه می‌دهد نه‌تنها داده‌های فیزیولوژیکی را جمع‌آوری نمایند، بلکه به‌عنوان محرک برای آزادسازی فعال و کنترل‌شدهٔ دارو نیز عمل کنند. علاوه بر این، توانایی آن‌ها در تولید انرژی از حرکات بدن، پتانسیلی برای کاهش وابستگی به منابع توان خارجی و افزایش عمر عملیاتی ایمپلنت‌ها ایجاد می‌سازد (۲۴، ۲۳).

بایوسنسورهای حرارتی: این نوع حسگرها تغییرات دمای ناشی از واکنش‌های بیوشیمیایی (مانند فعالیت آنزیمی) را اندازه‌گیری می‌کنند و این سیگنال حرارتی می‌تواند مبنای تشخیص مولکول هدف قرار گیرد. ادغام این حسگرها با مواد حساس به دما مانند نانوذرات یا پلیمرهای ترمورسپانسیو، به ایجاد سیستم‌های دارورسانی حلقه‌بسته منجر می‌شود که در پاسخ به افزایش دمای بافت یا رسیدن به آستانه‌های پاتولوژیک، دارو را به‌صورت کنترل‌شده آزاد می‌سازند و از آسیب به بافت‌های سالم جلوگیری می‌کنند. در پلتفرم‌های تراتنوستیک، از نانوساختارهایی مانند نانولوله‌های کربنی هم‌زمان به‌عنوان حسگر دما و عامل تولید گرما برای هایپرترمی موضعی استفاده می‌شود. این نانوساختارها به سبب توانایی بالا در جذب نور مادون‌قرمز قادرند گرماهای کنترل‌شده‌ای تولید کنند که به‌طور انتخابی سلول‌های تومور را هدف قرار دهند، درحالی‌که بافت‌های سالم اطراف آسیب نمی‌بینند (۲۵).

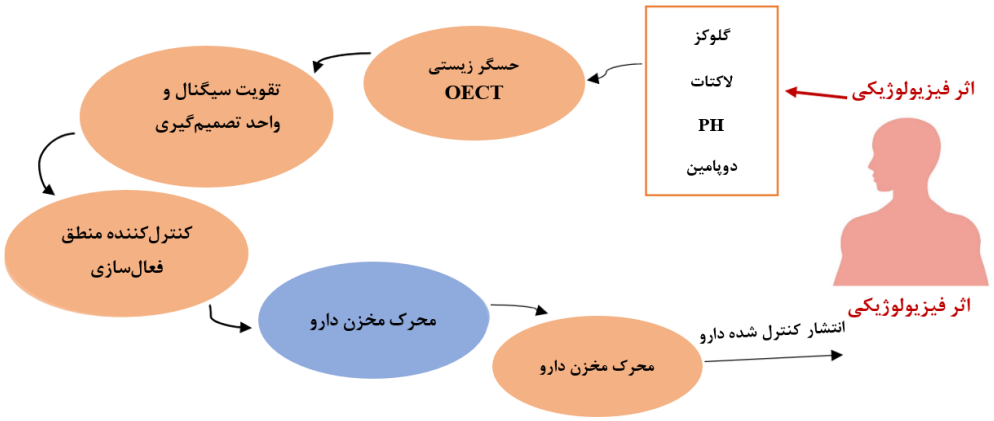
بایوسنسورهای قابل کاشت: در سال‌های اخیر، تمرکز اصلی بر توسعهٔ بایوسنسورهای قابل کاشت بوده است که به‌صورت بلندمدت در بدن بیمار قرار می‌گیرند و داده‌های لحظه‌ای را منتقل می‌کنند. این دستگاه‌ها با هدف پایش بلندمدت و تنظیم دوز دارو در بیماری‌های مزمن مانند دیابت، بیماری‌های قلبی عروقی و سرطان توسعه یافته‌اند (۲۱). برخی از این سیستم‌ها می‌توانند تا ۵ سال ماندگاری داشته باشند و نیاز به تزریقات مکرر روزانه یا هفتگی را از بین می‌برند که این مسئله پایبندی بیمار به درمان را افزایش می‌دهد. این روش‌ها می‌توانند از داروهایی محافظت کنند که در بدن ناپایدار هستند یا توسط آنزیم‌های کبدی تجزیه می‌شوند (۲۱، ۱۰). پمپ‌های قابل کاشت از فناوری میکروالکترونیک برای کنترل دقیق سرعت جریان دارو استفاده می‌کنند (۲۶).

پیشرفت‌های اخیر به سوی سیستم‌های دارورسانی حلقه‌بستهٔ هوشمند است که حسگرهایی را با دستگاه‌های دارورسانی ترکیب می‌سازند (۲۱).

ترانزیستورهای الکتروشیمیایی ارگانیک: در این زمینه، استفاده از بایوسنسورهای مبتنی بر ترانزیستورهای الکتروشیمیایی ارگانیک (OECT) امکان پایش بلادرنگ وضعیت فیزیولوژیکی بیمار را فراهم می‌کند. این حسگرها قادرند تغییرات نشانگرهای زیستی نظیر سطح گلوکز را تشخیص دهند و سیگنال لازم برای تنظیم دوز دارو را ارسال کنند. ادغام این حسگرها با سیستم‌های دارورسانی قابل‌کاشت چارچوبی برای پایش پیوسته و رهایش دارو بر اساس نیاز واقعی بیمار ایجاد می‌سازد. در این معماری حلقه‌بسته، افزایش غلظت بیومارکر هدف (مانند گلوکز) به‌طور خودکار فرمان آزادسازی دارو را صادر می‌نماید که به بهبود کارایی درمانی و کاهش عوارض سیستمیک منجر می‌شود. همان‌طور که در شکل شمارهٔ ۲ مشاهده می‌گردد، این پلتفرم‌ها از یک چرخهٔ بستهٔ تشخیص–پردازش–رهایش بهره می‌برند، به‌طوری‌که سیگنال الکتریکی حاصل از شناسایی بیومارکر، پس از تقویت و تحلیل در واحد تصمیم‌گیری، فرمان فعال‌سازی مخزن دارویی را صادر می‌کند و درنهایت، تعادل فیزیولوژیک (هومئوستازی) را بازمی‌گرداند. ترانزیستورهای الکتروشیمیایی ارگانیک به علت عملکرد پایدار در محیط‌های آبی، کار در ولتاژهای پایین (معمولاً زیر ۱ ولت) و حساسیت بالا در تشخیص غلظت‌های پایین بیومارکرها، گزینه‌ای کارآمد برای کاربردهای زیست‌سازگار و پایش بلادرنگ به‌شمار می‌روند. این ویژگی‌ها همراه با سازگاری ذاتی با بسترهای انعطاف‌پذیر و سیستم‌های میکروفلوئیدیک، یکپارچه‌سازی آن‌ها را در ایمپلنت‌های تشخیصی و درمانی تسهیل می‌کند (۲۱). مبنای عملکرد OECTتغییرات در هدایت الکتریکی مواد ارگانیک (معمولاً پلیمرهای هادی) به سبب تزریق یون‌ها از الکترولیت به داخل لایهٔ فعال است که این پدیده به‌صورت پیوسته و با پاسخ سریع در محیط‌های آبی اتفاق می‌افتد. ساختار فیزیکی و سازوکار مدولاسیون این حسگرها در شکل شمارهٔ ۳ به‌تفصیل نمایش داده‌شده است.

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

همان‌طور که در این شکل مشخص است، یک OECT از چهار جزء اصلی گیت، سورس، درین و لایهٔ نیمه‌رسانای آلی تشکیل‌شده است. در این سیستم، یون‌های موجود در محیط الکترولیت وارد لایهٔ نیمه‌رسانا می‌شوند و باعث تغییر در میزان دوپینگ یا دی‌دوپینگ (Dedoping) حامل‌های بار می‌گردند. این فرایند به مدولاسیون مستقیم رسانایی کانال و تقویت جریان سورس–درین منجر می‌شود؛ به‌عبارت‌دیگر، تبدیل سیگنال شیمیایی به سیگنال الکتریکی با بهره‌گیری از جفت شدن یونی–الکترونی (Ion-electron coupling) درون لایهٔ آلی انجام می‌پذیرد که این سازگاری ذاتی OECTها را به بستری کارآمد برای سیستم‌های تشخیصی و بالینی تبدیل کرده است (۲۱).



شکل شمارهٔ ۲. شماتیک معماری یکپارچهٔ بایوسنسور OECT و سیستم دارورسانی قابل‌کاشت (IDDS). این شکل چرخهٔ بستهٔ تشخیص بیومارکر، پردازش سیگنال و رهایش خودکار دارو را نمایش می‌دهد

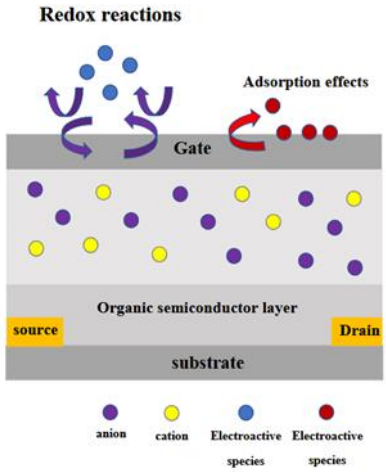
در حال حاضر، تحقیقات متمرکز بر بهبود پایداری طولانی‌مدت، کاهش تأخیر زمانی و افزایش تراکم سیستم‌ها برای ساخت مدارهای چندلایه و یکپارچه است. استفاده از الکترولیت‌های نانوساختار مانند گلیکول‌های پلیمری یا نانولوله‌های کربنی یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌ها است که به بهبود انتقال یونی، کاهش مقاومت الکترولیت و جلوگیری از تخریب مواد ارگانیک کمک می‌کنند؛ همچنین توسعهٔ OECTهای دوطرفه و OECTهای دوگانه امکان پیاده‌سازی مدارهای منطقی، حافظه‌های نرم و سیستم‌های پردازش سیگنال داخلی را فراهم کرده است. این ویژگی‌ها OECT را به یک پلتفرم چندکاره برای سیستم‌های الکترونیکی هوشمند و زیست‌سازگار تبدیل می‌کند. با وجود پتانسیل بالا، پیاده‌سازی OECTها در محیط‌های درون‌بدنی با چالش‌های جدی روبروست که شامل ناپایداری سیگنال ناشی از رانش (Drift)، تجمع پروتئینی یا زیست‌آلودگی (Biofouling) و تخریب شیمیایی پلیمرها در محیط‌های اکسیداتیو است. استفاده از پوشش‌های هیدروژلی زیست‌سازگار برای کاهش زیست‌آلودگی و ایجاد محیطی شبیه به بافت، بهره‌گیری از پلیمرهای خود–خنثی‌کننده برای افزایش پایداری شیمیایی و به‌کارگیری الگوریتم‌های کالیبراسیون تطبیقی برای جبران رانش سیگنال در طولانی‌مدت به‌عنوان راهکارهای نوین پیشنهاد شده‌اند. این پیشرفت‌ها گام‌های اساسی برای ترجمهٔ بالینی این فناوری و تضمین دقت و پایداری آن در شرایط واقعی فیزیولوژیک به‌شمار می‌روند (۲۱، ۲). مقایسهٔ عملکردی این پلتفرم با سایر فناوری‌های نوین دارورسانی در جدول شمارهٔ ۱ ارائه‌شده است.

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

جدول شمارهٔ ۱. مقایسهٔ عملکردی پلتفرم‌های نوین دارورسانی هوشمند

پلتفرم / فناوری	هدف درمانی	دوز و کنترل غلظت	زمان‌بندی و پاسخ‌دهی
Aptamer-based Sensors(۱۱)	پایش غلظت دارو (TDM)	کنترل دوز با دقت بالا در سطح پلاسمای خون	پاسخ‌دهی فیدبک‌محور (Feedback-controlled)
Closed-loop Regulator(۲۷)	تزریق خودکار دارو	دوزبندی شخصی‌سازی‌شدهٔ بالینی (Personalized)	اتوماسیون کامل رهایش (Automated Infusion)
Wearable Electrochemical(۱۵)	غربالگری و پایش دارو	پایش دوزهای تجمعی در مایعات بدن	پایش مداوم و بلادرنگ (Real-time)
OECT (ترانزیستورهای الکتروشیمیایی ارگانیک) (۲۱)	سیستم‌های کاشتنی (Implantable)	دوزبندی بیوشیمیایی دقیق در بافت هدف	همگام‌سازی تشخیص و رهایش (Integrated)
سیستم‌های محرک‌محور تقاضامحور (۲۵)	مدیریت آرتریت (Arthritis)	آزادسازی دوز تنها در صورت وجود محرک	رهایش برنامه‌ریزی‌شده (Programmable)
فناوری‌های پوشیدنی (۱۷)	بیماری پارکینسون	تنظیم دوز بر اساس نیاز حرکتی بیمار	مدیریت بلندمدت و روزانه (Management)

همان‌طور که مشاهده می‌شود، OECTها در دوزبندی دقیق بافتی نسبت به حسگرهای آپتامری برتری دارند؛ اما حسگرهای پوشیدنی در پایش غیرتهاجمی عملکرد مطلوب‌تری از خود نشان می‌دهند. این مقایسه نشان‌دهندهٔ نیاز به اعتبارسنجی سخت‌گیرانه‌تر الگوریتم‌های هوشمند پیش از ورود به کارآزمایی‌های انسانی است. انتخاب فناوری باید بر اساس تعادل میان غیرتهاجمی بودن، دقت دوزبندی و قابلیت یکپارچه‌سازی با سیستم‌های کنترل هوشمند صورت پذیرد.



شکل شمارهٔ ۳. شماتیک ساختار چهار لایهٔ ترانزیستور الکتروشیمیایی ارگانیک (OECT) و سازوکار مدولاسیون کانال از طریق تزریق یونی(۲۱)

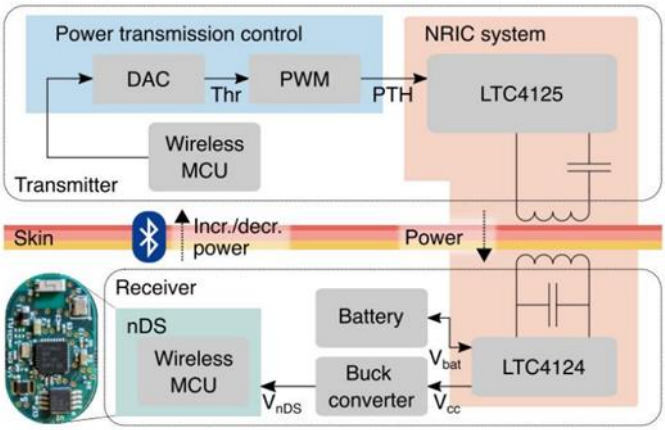
سیستم‌های دارورسانی حلقه‌بسته: سیستم‌های دارورسانی حلقه‌بسته با ادغام حسگرهای زیستی، واحد پردازشگر و عملگر رهایش، یک چرخهٔ بازخورد خودکار ایجاد می‌کنند که بر اساس پایش بلادرنگ مؤلفه‌های

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

فیزیولوژیک (نظیر گلوکز، فشارخون یا دما)، دوز و زمان‌بندی دارو را به‌صورت پویا تنظیم می‌نماید (۲۸، ۲۷). این معماری با حذف نوسانات غلظت پلاسمایی ناشی از دستورالعمل‌های دوزبندی ثابت، ایمنی درمان‌های با پنجرهٔ درمانی باریک را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد. اجزای اصلی این پلتفرم‌ها شامل واحد کنترل (متشکل از الگوریتم‌های پردازش سیگنال و تصمیم‌گیری) و دستگاه رهایش (پمپ‌های قابل‌کاشت یا سیستم‌های نانومقیاس) است؛ به‌عنوان‌مثال، سکوی CLAUDIA با پایش آمپرومتری غلظت FU-۵ و اعمال منطق کنترل پیش‌بینی‌کننده، سرعت تزریق را برای حفظ غلظت مطلوب در پلاسما تنظیم می‌کند (۲۸).

انواع سیستم‌های حلقه بسته؛ سیستم‌های خودکفا: این سیستم‌ها از مواد پاسخ‌دهنده به محرک استفاده می‌نمایند که بدون نیاز به مداخلهٔ خارجی، در پاسخ به محرک‌های فیزیولوژیکی (مانند تغییرات pH یا دما) دارو را آزاد می‌کنند (۲۸).

سیستم‌های فعال با محرک خارجی: این پلتفرم‌ها از طریق بیوالکترونیک یکپارچه عمل می‌نمایند و با بهره‌گیری از الگوریتم‌های کنترلی پیشرفته، درمان را بر اساس داده‌های بلادرنگ حسگرها تنظیم می‌کنند. برای تأمین انرژی پایدار در این پلتفرم‌های کاشتنی، فناوری انتقال توان بی‌سیم (WPT) به‌کار می‌رود که با حذف نیاز به تعویض باتری‌های فیزیکی، پایداری بلندمدت ایمپلنت را تضمین می‌نماید (۲۸). همان‌طور که در شکل شمارهٔ ۴ مشاهده می‌شود، این معماری با بهره‌گیری از القای الکترومغناطیسی، فرایند مدولاسیون دوز را بهینه‌سازی می‌کند و عملکرد پایدار سامانه را در بلندمدت تضمین می‌نماید (۲۸). بررسی مقایسه‌ای جدول شمارهٔ ۲ نشان می‌دهد که انتخاب میان این دو پلتفرم باید مبتنی بر تعادل میان استقلال عملیاتی و دقت درمانی باشد، به‌طوری‌که سیستم‌های خودپایدار برای پروفایل‌های دارویی پایدار و بیماری‌های مزمن ساده مناسب‌ترند؛ اما سیستم‌های فعال خارجی برای مدیریت بیماری‌های پیچیده با نوسانات فارماکوکینتیک بالا ضروری هستند.



شکل شمارهٔ ٤. شماتیک معماری سیستم دارورسانی حلقه‌بستهٔ مبتنی بر انتقال توان بی‌سیم (WPT). این شکل نحوهٔ تأمین انرژی پایدار برای ایمپلنت‌های دارورسانی از طریق القای الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد که با حذف نیاز به تعویض جراحی باتری، امکان عملکرد بلندمدت سیستم‌های هوشمند را فراهم می‌سازد. اختصارات شکل: انتقال توان بی‌سیم WPT: Wireless Power Transfer؛ کوپلینگ القایی رزونانسی میدان نزدیک NRIC: Near-field Resonant Inductive Coupling ؛ سیستم نانومقیاس nDS: nano-Drug Delivery System (۲۸)

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

جدول شمارهٔ ۲. مقایسهٔ ویژگی‌های عملکردی سیستم‌های دارورسانی خودپایدار و فعال با محرک خارجی

ویژگی	سیستم خودپایدار	سیستم محرک خارجی
ساختار کلی	بار دارویی به‌صورت خودکار کنترل می‌شود.	کنترل و درمان به‌صورت خارجی فعال می‌گردد.
نوع محرک	محرک‌های داخلی	محرک‌های خارجی
حسگرها	سیستم‌های پاسخ‌گو به شرایط داخلی	حسگرهای فیزیولوژیکی برای تشخیص شرایط بدن
روش‌های درمان	سیستم‌های مبتنی بر اکسیداز گلوکز سیستم‌های مبتنی بر پروتئین‌های پاسخ‌گو به گلوکز سایر سیستم‌های پاسخ‌گو	درمان دارویی درمان فیزیکی
کنترل	خودکار و مبتنی بر واکنش‌های داخلی	نیاز به کنترل خارجی و تنظیمات دستی
مصرف انرژی	وابسته به شرایط داخلی	نیاز به تأمین قدرت و ارتباطات خارجی

انتخاب نهایی باید بر اساس نوع بیماری، پیچیدگی الگوریتم کنترل و محدودیت‌های زیست‌سازگاری ایمپلنت صورت پذیرد.

ادغام هوش مصنوعی و بایوسنسورها برای پایش دقیق‌تر: هوش مصنوعی قادر است داده‌های پیچیدهٔ حاصل از بایوسنسورها و سیستم‌های دارورسانی حلقه‌بسته را تحلیل کند و تصمیم‌گیری هوشمندانه را ممکن سازد (۲۹). همسو با آن، مطالعات پیشین در حوزه‌های مرتبط نشان داده‌اند که مدل‌های مبتنی بر یادگیری عمیق پتانسیل بالایی در استخراج ویژگی‌های غیرخطی از سیگنال‌های بیولوژیک پیچیده و نویزدار دارند؛ به‌عنوان نمونه می‌توان اشاره کرد که ادغام الگوریتم‌های هوش مصنوعی با پلتفرم‌های تشخیصی نقطهٔ مراقبت (point-of-care) می‌تواند دقت و سرعت پردازش داده‌های بیومارکرها را در بیماری‌های سیستم اعصاب مرکزی (مانند مالتیپل اسکلروزیس) به‌طور چشمگیری ارتقا دهد. ازآنجاکه پلتفرم‌های دارورسانی هوشمند نیز برای تنظیم بهینهٔ دوز به معماری‌های پردازش سیگنال بلادرنگ مشابهی نیاز دارند، بومی‌سازی این مدل‌های عمیق تشخیصی در سیستم‌های درمانی حلقه‌بسته، مسیر ترجمهٔ بالینی آن‌ها را هموارتر می‌سازد (۳۰)؛ به‌عنوان‌مثال، در سیستم‌های حلقه‌بسته برای دیابت، مدل‌های یادگیری تقویتی می‌توانند با یادگیری از واکنش‌های فردی بیمار به انسولین، دوز بهینه را در شرایط مختلف (پس از وعدهٔ غذایی، ورزش و استرس) پیش‌بینی کنند. این امر به کنترل دقیق‌تر قندخون و کاهش خطر هیپوگلیسمی یا هایپرگلیسمی منجر می‌شود. در فاز طراحی پیش‌بالینی، مدل‌های یادگیری عمیق و شبکه‌های عصبی کانولوشنی با بررسی هزاران ترکیب از بیومتریال‌ها و لیگاندها، فرمولاسیون‌های بهینه را از نظر پایداری فیزیولوژیک، فرار از پاسخ ایمنی و رهایش کنترل‌شده پیشنهاد می‌دهند (۳۳-۳۱). در پزشکی شخصی‌سازی‌شده AI با تجزیه‌وتحلیل داده‌های بیمار (شامل ژنوم، سوابق پزشکی و داده‌های لحظه‌ای بایوسنسورها) می‌تواند دوز و زمان‌بندی بهینهٔ دارورسانی را برای هر فرد به‌صورت مجزا تعیین کند. ترجمهٔ بالینی این سیستم‌ها با سه مانع اصلی روبه‌رو است: نخست، نیاز به مجموعه‌داده‌های چندمرکزی و استاندارد برای آموزش مدل‌ها که با ظهور یادگیری فدرال و اشتراک‌گذاری امن داده‌ها در حال رفع است؛ دوم، مسئلهٔ تفسیرپذیری مدل‌های پیچیده (جعبهٔ سیاه) که به سبب ساختار غیرشفاف آن‌ها، فرایند اتخاذ تصمیمات بالینی (مانند تعیین دوز دقیق) را با چالش مواجه می‌سازد. این چالش با توسعهٔ چارچوب‌های هوش مصنوعی توضیح‌پذیر و تولید گزارش‌های شفاف برای پزشکان در حال بهبود است؛ سوم، الزامات نظارتی سخت‌گیرانه برای نرم‌افزارهای پزشکی که نیازمند اعتبارسنجی چندلایه و چارچوب‌های مسئولیت‌پذیری شفاف است (۳۶، ۲۹). در پلتفرم‌های جدید تراتنوستیک، الگوریتم‌های هوش مصنوعی با تحلیل بلادرنگ داده‌های بافتی، فرمان رهایش دارو را با دقت زمانی بالا صادر می‌کند و چرخهٔ خودکار تشخیص-درمان را محقق می‌سازند (۳۵، ۳۴). استفاده از یادگیری ماشین در طراحی نانوحامل‌های هوشمند، امکان پیش‌بینی رفتار حامل در مواجهه با سدهای بیولوژیکی

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

را فراهم کرده است. مدل‌های هوشمند با تحلیل بیومارکرهایی نظیر miRNAs و ctDNA در سیستم‌های نقطهٔ مراقبت، دوز دارو را بر اساس پروفایل منحصربه‌فرد هر بیمار تنظیم می‌کنند. این رویکرد دوزبندی سنتی را به سوی پزشکی دقیق سوق می‌دهد و از سمیت سیستمیک ناشی از دوزهای اضافی جلوگیری می‌نماید (۲۹). هوش مصنوعی با پردازش داده‌های کلان حاصل از حس‌گرهای مبتنی بر آپتامر، نه‌تنها زمان دقیق رهایش را تعیین می‌کند، بلکه قادر است الگوهای مقاومت دارویی را قبل از وقوع پیش‌بینی نماید. در مدیریت بیماری‌های مشترک، این ابزارها با کاهش فرکانس دوزبندی و بهینه‌سازی غلظت دارو در محل هدف، کارایی درمان‌های پیچیده نظیر درمان سرطان و بیماری‌های عفونی را به‌طور معناداری افزایش می‌دهند (۳۶، ۳۵).

سکوی CLAUDIA یک پمپ هوشمند مبتنی بر فیدبک الکتروشیمیایی است که در فاز پیش‌بالینی توانسته است غلظت ۵ FU–را در پلاسما ثابت نگه دارد (۲۷). در سیستم‌های حلقه‌بسته برای مدیریت بیماری‌های مزمن مانند دیابت، داده‌های سری زمانی غلظت گلوکز نوسانات فراوانی دارند. الگوریتم‌های LSTM با غلبه بر مشکل محو شیب گرادیان در RNNهای کلاسیک، توانایی مدل‌سازی وابستگی‌های زمانی بلندمدت در داده‌های سری‌زمانی گلوکز را دارند. این ویژگی در پیش‌بینی نوسانات قندخون با افق ۶۰–۳۰ دقیقه‌ای، خطای میانگین مربعات را نسبت به کنترل‌کننده‌های PID تا ۳۰ درصد کاهش داده است (۳۲، ۳۱). برای تشخیص زودهنگام نیاز به دارو بر اساس داده‌های حس‌گرهای پوشیدنی، الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان اغلب به علت سرعت بالا و دقت خوب در فضاهای چندبعدی استفاده می‌شوند. SVM می‌تواند سیگنال‌های پیچیده بیولوژیکی را به کلاس‌های مختلف (مانند حملهٔ در حال رخ دادن یا وضعیت پایدار) دسته‌بندی کند. در پژوهشی روی بیماران پارکینسون، استفاده از SVM برای تحلیل داده‌های شتاب‌سنج‌های پوشیدنی توانست با دقتی بالای ۹۵ درصد، لحظات لرزش دست را شناسایی کند و سیستم را برای آزادسازی دوز دارو فعال نماید (۲۹، ۱۷). معیارهای ارزیابی الگوریتم‌های هوش مصنوعی در دارورسانی هوشمند بسته به لایهٔ عملکردی متفاوت است. در لایهٔ کنترل حلقه‌بسته، شاخص اصلی کاهش خطای حالت پایدار و حفظ غلظت پلاسمایی در محدودهٔ درمانی است که در پلتفرم‌های پیشرفته به کمتر از ۵ درصد گزارش‌شده است (۲۷). در لایهٔ پیش‌بینی و تشخیص، حساسیت و ویژگی مدل‌ها برای شناسایی زودهنگام رخدادهای بالینی (مانند حملات پارکینسون) ملاک است و مطالعات اخیر مقادیر ۹۵ تا ۹۸ درصد را برای الگوریتم‌های یادگیری عمیق گزارش کرده‌اند (۲۹). در لایهٔ پردازش سیگنال حس‌گر، معیار کلیدی حد تشخیص تحلیلی و نسبت سیگنال به نویز است، به‌طوری‌که روش‌های پیشرفته پردازش، تشخیص بیومارکرها را در سطح فمتومولار (fM) با نرخ مثبت کاذب ناچیز ممکن ساخته‌اند (۱۱). شاخص‌های کمی عملکرد این الگوریتم‌ها در لایه‌های مختلف پردازش، کنترل و پیش‌بینی در جدول شمارهٔ ۳ خلاصه شده‌اند.

جدول شمارهٔ ۳. دقت و کارایی سازوکارهای هوشمند

سازوکار هوشمند	مؤلفهٔ دقت	هدف عملیاتی
کنترل حلقه‌بسته(۲۷)	حداقل‌سازی نوسان دوز(Error<5%)	پایداری غلظت پلاسمایی
شبکه‌های عصبی(۲۹)	دقت پیش‌بینی>95 درصد	پیش‌بینی حملات بیماری
پردازش سیگنال(۱۱)	تفکیک در سطح fM	حذف نویزهای بیولوژیک

بررسی‌ها نشان می‌دهد، پیشرفت‌های کلیدی در دارورسانی هوشمند حول ادغام سه مؤلفهٔ تعاملی شکل‌گرفته است: نخست، نانوحامل‌های پاسخ‌گرا که دارو را به‌صورت هدفمند تنها در حضور محرک‌های محیطی خاص مانند تغییرات pH در بافت‌های توموری، حضور گونه‌های فعال اکسیژن در بافت‌های التهابی یا افزایش دما در نواحی

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

آسیب‌دیده آزاد می‌کنند؛ دوم، بایوسنسورهای قابل کاشت به‌ویژه ترانزیستورهای الکتروشیمیایی ارگانیک که با پایش بلادرنگ بیومارکرهای فیزیولوژیکی مانند گلوکز، لاکتات، pH یا سیتوکین‌های التهابی، سیگنال ورودی لازم برای تصمیم‌گیری هوشمند را فراهم می‌آورند و سوم، الگوریتم‌های تصمیم‌گیری مبتنی بر هوش مصنوعی که این داده‌های پویا را پردازش می‌نمایند و دوز بهینه را در زمان مناسب تعیین می‌کنند. این هم‌افزایی در سکوهای عملیاتی متعددی به‌صورت تجربی پیاده‌سازی شده است که ازجملهٔ آن‌ها می‌توان به سیستم‌های حلقه‌بستهٔ انسولین برای مدیریت دیابت با قابلیت پایش سطح گلوکز و آزادسازی هوشمند، پمپ‌های هوشمند شیمی‌درمانی مبتنی بر بازخورد الکتروشیمیایی و همچنین ایمپلنت‌های ضدعفونی پاسخ‌گرا مبتنی بر هیدروکسی‌آپاتیت سرامیکی اشاره کرد که در پاسخ به pH اسیدی یا آنزیم‌های التهابی اقدام به رهاسازی آنتی‌بیوتیک می‌کنند. همان‌طور که جدول شمارهٔ ۴ نشان می‌دهد، تنها سیستم‌های واردشده به فاز بالینی از الگوریتم‌های یادگیری تطبیقی استفاده می‌کنند، درحالی‌که پلتفرم‌های نوظهور در فازهای پیش‌بالینی همچنان بر منطق ازپیش‌تعریف‌شده یا کنترل خارجی تکیه دارند.

جدول شمارهٔ ٤. مقایسهٔ سیستم‌های پیشرفتهٔ دارورسانی حلقه‌بسته

مرحله توسعه	نوع کنترل	نوع بایوسنسور	نوع نانوحامل / سامانه رهایش	بیومارکر هدف	سیستم
فاز بالینی	الگوریتم یادگیری تقویتی	الکتروشیمیایی (گلوکز اکسیداز)	پلیمرهای ترمورسپانسیو/ میکروپمپ	گلوکز	سیستم حلقه‌بستهٔ انسولین (۱۵–۱۷، ۱۱)
آزمایش حیوانی	PID + کنترل پیش‌بینی‌کننده	الکتروشیمیایی (آمپرمتر یک)	نانوذرات لیپیدی	غلظت FU- 5 در خون	سکوی CLAUDIA (۲۷)
آزمایشگاهی	غیرفعال (بدون الکترونیک)	بدون حس‌گر (پاسخ شیمیایی مستقیم)	هیدروکسی‌آپاتیت سرامیکی	pH + آنزیم‌های التهابی	ایمپلنت استخوانی (۲۶، ۱۰)
آزمایش حیوانی	کنترل لیزر خارجی	پیزوالکتریک/ حرارتی	نانولوله‌های کربنی (CNTs)	دما	سیستم هایپرترمی تومور (۲۵)
آزمایش in vitro	میکروکنترلر+منطق پیش‌فرض	OECT	نانوذرات pH-Responsive	گلوکز / لاکتات	سیستم-OECT IDDS (۲۱)

جدول شمارهٔ ۴ نشان می‌دهد، علت موفقیت و ورود برخی سیستم‌ها (مانند سیستم حلقه‌بستهٔ انسولین) به فاز بالینی، پایداری بالای بیومارکر هدف (گلوکز) و ماهیت غیرتهاجمی یا نیمه‌تهاجمی آن‌ها است. در مقابل، پلتفرم‌های نوظهوری مانند سیستم‌های مبتنی بر OECTو نانوحامل‌های هوشمند تومور به سبب چالش‌های جدی در زیست‌سازگاری بلندمدت، پدیدهٔ زیست‌آلودگی (تجمع پروتئینی روی حس‌گر)، افت شدید سیگنال و تفسیرناپذیری کامل الگوریتم‌های جعبه سیاه دیپ‌لرنینگ در شرایط پویا و زنده فیزیولوژیک بدن، همچنان در فاز آزمایشگاهی و حیوانی باقی‌مانده است.

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این مرور نشان می‌دهد، ارزش‌افزودهٔ اصلی دارورسانی نسل جدید در هم‌افزایی سیستمیک نهفته است. نانوحامل‌ها بستر فیزیکی هدف‌گیری را فراهم می‌کنند، بایوسنسورها حلقه بازخورد بیولوژیک را شکل می‌دهند و هوش مصنوعی به‌عنوان لایهٔ تصمیم‌گیری تطبیقی، این دو را

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

به یک چرخهٔ درمانی خودتنظیم‌گر تبدیل می‌نماید. مطالعاتی که هر سه مؤلفه را به‌طور هم‌زمان یکپارچه نکرده‌اند، عمدتاً در فاز آزمایشگاهی باقی مانده‌اند و بدون پتانسیل ترجمهٔ بالینی فوری هستند. در مقابل، پلتفرم‌های یکپارچه‌شده توانسته‌اند با کاهش نوسانات غلظت پلاسمایی دارو به زیر ۵ درصد و افزایش دقت تشخیص به سطح فمتومولار، کارایی درمانی را در مدیریت بیماری‌های پیچیده نظیر دیابت و سرطان به‌طور چشمگیری بهبود بخشند (۲۷، ۲۱، ۱۱). با وجود این پیشرفت‌ها، ترجمهٔ بالینی گستردهٔ این سیستم‌ها با موانع چندوجهی مواجه است. از دیدگاه فنی، چالش‌هایی نظیر زیست‌سازگاری بلندمدت نانوحامل‌ها و پایداری الگوریتم‌ها در محیط‌های پویای فیزیولوژیک، همچنان نیازمند اعتبارسنجی‌های طولانی‌مدت است. از سوی دیگر، ماهیت ترکیبی این پلتفرم‌ها (دارو–دستگاه–نرم‌افزار) الزامات نظارتی سخت‌گیرانه‌ای را از سوی سازمان‌هایی نظیر FDA و EMA ایجاب می‌کند که شامل ارزیابی هم‌زمان زیست‌سازگاری، امنیت داده‌ها و پایداری الگوریتم است. برآوردها نشان می‌دهد، هزینه‌های توسعه و فازهای I/II بالینی برای این سیستم‌ها می‌تواند ۳۰ تا ۵۰ درصد بالاتر از دارورسانی متداول باشد که سرعت انتقال از آزمایشگاه به بالین را محدود می‌سازد (۲۹، ۳)؛ همچنین جمع‌آوری مستمر داده‌های حساس سلامت و نداشتن شفافیت در تصمیم‌گیری‌های الگوریتمی نگرانی‌های اخلاقی و بالینی چشمگیری ایجاد کرده است که توسعهٔ چارچوب‌های هوش مصنوعی توضیح‌پذیر و دستورالعمل‌های امنیت سایبری را برای آن‌ها ضروری ساخته است. مسیر آیندهٔ این فناوری مستلزم حرکت به سوی پلتفرم‌های خودپایدار و غیرتهاجمی است. در کنار ایمپلنت‌های بلندمدت، توسعهٔ ابزارهای نیمه‌تهاجمی نظیر میکرونیدل‌های هوشمند و پچ‌های الکترونیکی می‌تواند به‌عنوان راهکارهای میانی برای مدیریت بیماری‌های مزمن، پیش از ورود به فاز کاشت کامل عمل کند (۳۵، ۱۷).

این مرور با محدودیت‌هایی همراه بود. تمرکز بر متون منتشرشده به زبان‌های انگلیسی و فارسی ممکن است به سوگیری زبانی منجر شده باشد و ناهمگنی طراحی مطالعات پیش‌بالینی مقایسهٔ کمی مستقیم میان پلتفرم‌ها را دشوار ساخت. همان‌طور که در شکل شمارهٔ ۵ مشاهده می‌شود، این نمودار به‌طور جامع چالش‌های پنج‌گانهٔ فنی، بالینی، آتی، دیجیتال و راهبردی را در مسیر ترجمهٔ بالینی تبیین می‌کند. بر اساس این، گذار موفق از آزمایشگاه به بالین مستلزم همسویی هم‌زمان پیشرفت‌ها در بیومتریال‌ها، الکترونیک زیست‌سازگار و الگوریتم‌های لبه‌ای است. تحقق پزشکی شخصی‌سازی‌شده در گرو طراحی کارآزمایی‌های چندمرکزی، تدوین استانداردهای شفافیت الگوریتمی و ایجاد چارچوب‌های نظارتی چابک برای محصولات ترکیبی خواهد بود.



شکل شمارهٔ ۵. دسته‌بندی ساختاریافتهٔ چالش‌های پیش‌روی ترجمهٔ بالینی سیستم‌های دارورسانی هوشمند حلقه‌بسته

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

سپاس‌گزاری

از همهٔ عزیزانی که در انجام این مطالعه همکاری داشتند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نماییم.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که تضاد منافعی در این مقاله وجود ندارد.

کد اخلاق

از آنجا که این مطالعه یک مرور نظام‌مند بر مطالعات منتشرشده پیشین بود، هیچ‌گونه مداخله یا مشارکت مستقیمی از سوی انسان‌ها یا حیوانات در آن صورت نگرفت. بنابراین، دریافت تأییدیه کمیته اخلاق و اخذ رضایت‌نامه آگاهانه ضروری نبود.

حمایت مالی

برای انجام این مطالعه از هیچ سازمانی حمایت مالی دریافت نشده است.

مشارکت نویسندگان

همهٔ نویسندگان در نگارش مقاله مشارکت نموده‌اند.

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

References

1. Elbeltagi S, Al-Zharani M, Nasr FA, Ismail A, El-Tohamy HM, Abdelbased KM, et al. Cancer cell membrane-coated quercetin-MXene-Au nanoparticles for smart drug delivery and enhanced photothermal therapy. Colloids Surf B Biointerfaces. 2025; 255:114940. doi: 10.1016/j.colsurfb.2025.114940.
2. Zheng Z, Zhu R, Peng I, Xu Z, Jiang Y. Wearable and implantable biosensors: mechanisms and applications in closed-loop therapeutic systems. J Mater Chem B. 2024; 12:8577-604. doi: 10.1039/d4tb00782d.
3. Ferrentino N, Behroozi Kohlan T, Mehrtashfar S, Finne-Wistrand A, Pappalardo D. Dual-responsive nanoparticles for smart drug delivery: a NIR light-sensitive and redox-reactive PEG-PCL-based system. Biomacromolecules. 2024; 25:7660-73. doi: 10.1021/acs.biomac.4c01062.
4. Wu C, Huang W, Du F, Zhang M, Qian H. Engineering zeolitic imidazolate framework-8 nanoparticles for smart drug delivery systems. Nano Express. 2024; 5:012003. doi: 10.1088/2632-959X/ad1b2c.
5. Zhang Z, Sui D, Yu D, Hu X, Ji Y, Wang K. Mesoporous manganese dioxide-coated upconversion nanoparticles for smart photoluminescence and drug delivery. Ind Eng Chem Res. 2024; 63:3104-13. doi: 10.1021/acs.iecr.3c03838.
6. Pachauri N, Yadav D, Sharma TK, Verma OP, Ahn CW. Closed loop fractional order drug delivery control scheme for chemotherapy. Results Control Optim. 2022;6:100097. doi: 10.1016/j.rico.2022.100097.
7. Zheng Q, Xu C, Jiang Z, Zhu M, Chen C, Fu F. Smart actuators based on external stimulus response. Front Chem. 2021; 9:650358. doi: 10.3389/fchem.2021.650358.
8. Wells CM, Harris M, Choi L, Murali VP, Guerra FD, Jennings JA. Stimuli-responsive drug release from smart polymers. J Funct Biomater. 2019; 10:34. doi: 10.3390/jfb10030034.
9. Leng Y, Sun R. Multifunctional biomedical devices with closed-loop systems for precision therapy. Adv Healthc Mater. 2025:2500860. doi: 10.1002/adhm.202500860.
10. Aj MZ, Patil SK, Baviskar DT, Jain DK. Implantable drug delivery system: a review. Int J PharmTech Res. 2012; 4:280-92.
11. Dauphin-Ducharme P, Yang K, Arroyo-Currás N, Ploense KL, Zhang Y, Gerson J, et al. Electrochemical aptamer-based sensors for improved therapeutic drug monitoring and high-precision, feedback-controlled drug delivery. ACS Sens. 2019; 4:2832-7. doi: 10.1021/acssensors.9b01616.
12. Pollard TD, Ong JJ, Goyanes A, Orlu M, Gaisford S, Elbadawi M, et al. Electrochemical biosensors: a nexus for precision medicine. Drug Discov Today. 2021; 26:69-79. doi: 10.1016/j.drudis.2020.10.019.
13. Malode SJ, Ali Alshehri M, Shetti NP. Nanomaterial-based electrochemical sensors for the detection of pharmaceutical drugs. Chemosensors. 2024; 12:234. doi: 10.3390/chemosensors12110234.
14. Dorati R, Cosco D, Battaglia L, Cirri M, Conti B, Borghi T, et al. On-body drug delivery systems: state-of-the-art technologies, clinical application, and future perspectives. Drug Discov Today. 2025:104441. doi: 10.1016/j.drudis.2025.104441.
15. Teymourian H, Parrilla M, Sempionatto JR, Montiel NF, Barfidokht A, Van Echelpoel R, et al. Wearable electrochemical sensors for the monitoring and screening of drugs. ACS Sens. 2020; 5:2679-700. doi: 10.1021/acssensors.0c01318.
16. Cicha I, Priefer R, Severino P, Souto EB, Jain S. Biosensor-integrated drug delivery systems as new materials for biomedical applications. Biomolecules. 2022; 12:1198. doi: 10.3390/biom12091198.
17. Danesh H, Shirzadfar H, Abedi A. Advancements in wearable sensor technology for enhanced diagnosis and management of Parkinson's disease. Wearable Technol. 2025; 6:3212. doi: 10.54517/wt3212.
18. Pour S, Calabria D, Emamiamin A, Lazzarini E, Pace A, Guardigli M, et al. Electrochemical vs. optical biosensors for point-of-care applications: a critical review. Chemosensors. 2023; 11:546. doi: 10.3390/chemosensors11110546.
19. Tai J, Fan S, Ding S, Ren L. Gold nanoparticles-based optical biosensors for cancer biomarker proteins: a review of the current practices. Front Bioeng Biotechnol. 2022; 10:877193. doi: 10.3389/fbioe.2022.877193.
20. Pohanka M. Piezoelectric chemosensors and biosensors in medical diagnostics. Biosensors (Basel). 2025; 15:197. doi: 10.3390/bios15030197.
21. Han XL, Zhou T, Xu JM, Zhang SF, Hu YZ, Liu Y. Integrated perspective on functional organic electrochemical transistors and biosensors in implantable drug delivery systems. Chemosensors. 2025; 13:215. doi: 10.3390/chemosensors13060215.
22. Zhang J, Wang Y, Zhang Q, Wang F, Chen S, Zheng Y. The development history of flexible mechanical biosensors: materials, technologies, and medical applications. J

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]

Transl Crit Care Med. 2025;7. doi: 10.1097/JTCCM-D-24-00042.
23. Priya S, Mohan S, Kuppusamy R, Suyambulingam I, Baby B, Ramesh R, et al. Advances in bio-microelectromechanical system-based sensors for next-generation healthcare applications. ACS Omega. 2025. doi: 10.1021/acsomega.5c03258.
24. Villarruel Mendoza LA, Scilletta NA, Bellino MG, Desimone MF, Catalano PN. Recent advances in micro-electro-mechanical devices for controlled drug release applications. Front Bioeng Biotechnol. 2020; 8:827. doi: 10.3389/fbioe.2020.00827.
25. Lim YY, Zaidi AMA, Miskon A. Composing on-program triggers and on-demand stimuli into biosensor drug carriers in drug delivery systems for programmable arthritis therapy. Pharmaceuticals (Basel). 2022; 15:1330. doi: 10.3390/ph15111330.
26. Dash A, Cudworth G 2nd. Therapeutic applications of implantable drug delivery systems. J Pharmacol Toxicol Methods. 1998; 40:1-12. doi: 10.1016/S1056-8719(98)00004-6.
27. DeRidder LB, Hare KA, Lopes A, Jenkins J, Fitzgerald N, MacPherson E, et al. Closed-loop automated drug infusion regulator: a clinically translatable, closed-loop drug delivery system for personalized drug dosing. Med. 2024; 5:780-96. e10. doi: 10.1016/j.medj.2024.03.020.
28. Del Bono F, Bontempi A, Dentis A, Di Trani N, Demarchi D, Grattoni A, et al. Design of a closed-loop wireless power transfer system for an implantable drug delivery device. IEEE Sens J. 2024; 24:7345-54. doi: 10.1109/JSEN.2023.3270521.
29. Jena GK, Patra CN, Jammula S, Rana R, Chand S. Artificial intelligence and machine learning implemented drug delivery systems: a paradigm shift in the pharmaceutical industry. J Bio-X Res. 2024; 7:0016. doi: 10.34133/jbioxresearch.0016.
30. Raisi A, Nasiri M, Danesh H. Diagnostic techniques and artificial intelligence for multiple sclerosis identification. J Ilam Univ Med Sci. 2025; 33:113-48.
31. Vora LK, Gholap AD, Jetha K, Thakur RRS, Solanki HK, Chavda VP. Artificial intelligence in pharmaceutical technology and drug delivery design. Pharmaceutics. 2023; 15:1916. doi: 10.3390/pharmaceutics15071916.
32. Serrano DR, Luciano FC, Anaya BJ, Ongoren B, Kara A, Molina G, et al. Artificial intelligence (AI) applications in drug discovery and drug delivery: revolutionizing personalized medicine. Pharmaceutics. 2024; 16:1328. doi: 10.3390/pharmaceutics16101328.
33. Danesh H, Ghasemi Z. A systematic review of convolutional neural network for brain tumor segmentation in MRI. J Ilam Univ Med Sci. 2025; 33:53-80.
34. Singh S, Rai S, Bandopadhyay A, Das M. From detection to drug delivery: innovations in cancer biosensors from concept to clinical impact. Biotechnol Sustain Mater. 2025; 2:17. doi: 10.1186/s44316-025-00040-3.
35. Okesanya OJ, Adebayo UO, Habeeb LA, Gilbert A, Lamem MFH, Ahmed MM, et al. Nanoenabled smart drug delivery in One Health: advances in targeted therapy and theranostics. One Health Adv. 2026; 4:2. doi: 10.1186/s44280-026-00107-4.
36. Panchpuri M, Painuli R, Kumar C. Artificial intelligence in smart drug delivery systems: a step toward personalized medicine. RSC Pharm. 2025; 2:882-914. doi: 10.1039/d5pm00089k.

[Downloaded from sjimu.medilam.ac.ir on 2026-11-25]