مرور سیستماتیک پیشرفت‌های اخیر سنسورهای شیمیایی قابل کاشت مبتنی بر مواد انعطاف‌پذیر و زیست‌تخریب‌پذیر برای کاربردهای زیست‌پزشکی

Systematic Review of Recent Advances in Implantable Chemical Sensors Based on Flexible and Biodegradable Materials for Biomedical Applications

آروین عزتی[1] · تینا حضرتی صومعه[2*]

[1] گروه مهندسی پزشکی (بیوالکتریک)، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز

[2] گروه مهندسی پزشکی (بیوالکتریک)، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال

* نویسنده مسئول: hazrati.tina@gmail.com

A چکیده

مقدمه: حسگرهای شیمیایی کاشته‌شدنی ساخته‌شده از مواد انعطاف‌پذیر و زیست‌تخریب‌پذیر، پایش دقیق و مداوم بیومارکرهای حیاتی را با کاهش نیاز به روش‌های تهاجمی ممکن می‌کنند. **روش‌ها:** مرور نظام‌مند و فراترکیب بیش از 200 مقاله و گزارش علمی تا نوامبر 2023 با کدگذاری باز، محوری و گزینشی. **یافته‌ها:** پیشرفت در مواد زیست‌تخریب‌پذیر، طراحی انعطاف‌پذیر و روش‌های حسگری نوین عملکرد حسگرها را بهبود داده است؛ پایداری سیگنال، ناسازگاری زیستی و نیاز به سامانه‌های بی‌سیم پیشرفته از چالش‌هاست. **نتیجه‌گیری:** این فناوری برای محیط‌های غیربیمارستانی و بهبود کیفیت زندگی بیماران نویدبخش است.

واژگان کلیدی: سنسورهای شیمیایی، زیست‌تخریب‌پذیر، مهندسی پزشکی، سیستم‌های بی‌سیم پیشرفته، روش‌های حسگری نوین

1 مقدمه و بیان مسئله

پایش پیوسته بیومارکرهای مایعات بدن (عرق، ادرار، پلاسما، لنف، اشک و مایع مغزی‌ـنخاعی) برای تشخیص وضعیت سلامت، پیگیری بیماری و تنظیم درمان‌های پس از جراحی حیاتی است [1]. آزمایش خون و نمونه‌برداری تهاجمی نیازمند مراجعه مکرر است، پایبندی بیمار را کاهش می‌دهد و داده را با تأخیر به پزشک می‌رساند [2].

حسگرهای کاشتنی انعطاف‌پذیر و زیست‌تخریب‌پذیر با تطابق مکانیکی با بافت نرم، از جراحی برداشت دستگاه بی‌نیازند [3] و می‌توانند به‌طور مداوم اندازه‌گیری کنند [4]:

- **یون‌ها:** Na^+, K^+, Ca^{2+}, H^+
- **گازهای خونی:** O_2, CO_2
- **متابولیت‌ها:** گلوکز، لاکتات
- **ماکرومولکول‌ها:** پروتئین‌ها و نوکلئیک‌اسیدها

برای نمونه، پایش pH نشانگر تعادل اسید–باز، متاستاز تومور یا بهبود زخم است و پایش گلوکز در مدیریت دیابت کاربرد دارد [5].

هدف: شناسایی، بررسی و تحلیل مؤلفه‌های کلیدی حسگرهای شیمیایی کاشته‌شدنی در مهندسی پزشکی و ارائه مدل مفهومی توسعه آن‌ها.

2 روش‌ها

نوع مطالعه: مرور نظام‌مند با رویکرد فراترکیب، بدون اجرای آزمایش مستقیم؛ الگوی مرور بر پایه دیدگاه سندلوفسکی و باروسو.

2-1. جامعه و منابع داده

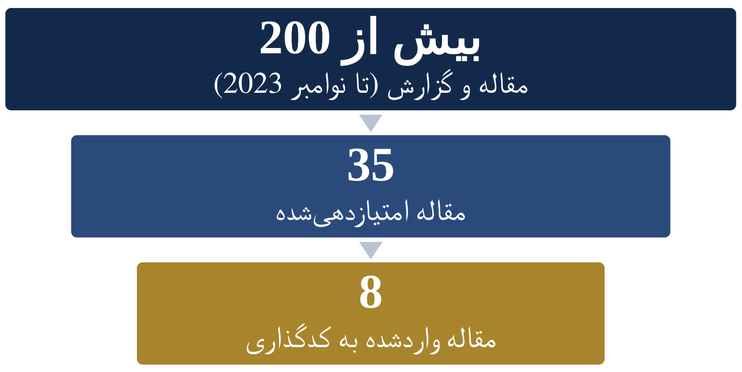
مقالات علمی‌ـپژوهشی، مرورهای سیستماتیک و گزارش‌های آزمایشگاهی در PubMed, ScienceDirect, IEEE Xplore, Springer تا نوامبر 2023.

2-2. معیارهای انتخاب

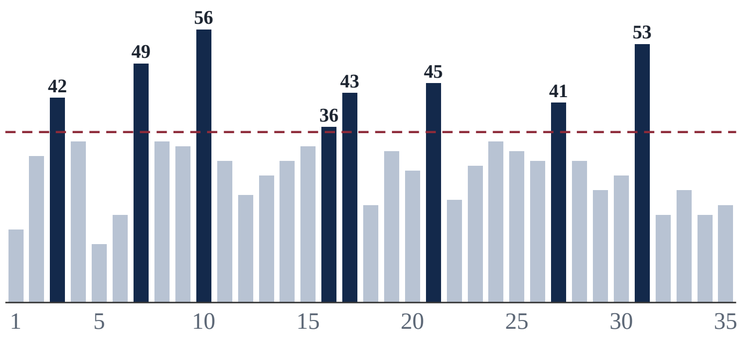
- تمرکز بر مواد و ساختارها (فلزی، نیمه‌هادی، دی‌الکتریک، پلیمر طبیعی و سنتزی)
- روش‌های حسگری متداول (الکتروشیمیایی، جرمی، نوری)
- طراحی‌های نوین انعطاف‌پذیر و زیست‌تخریب‌پذیر
- گزارش آزمون عملکردی in vitro یا in vivo
- انتشار در مجلات معتبر دارای شاخص استناد

2-3. غربالگری و امتیازدهی

جست‌وجوی کلیدواژه‌ها، انتخاب اولیه بر پایه عنوان، چکیده و کیفیت محل انتشار، غربالگری ثانویه و امتیازدهی با پروتکلی مشابه CASP بر پایه هفت شاخص (اهداف، شفافیت مسئله، منطق نمونه‌برداری، جامعه آزمایشگاهی، ابزار گردآوری، منابع معتبر، دقت تحلیل).



شکل 1. مراحل گزینش مقالات



شکل 2. امتیاز نهایی 35 مقاله (محور افقی: شماره مقاله)؛ 8 مقاله واجد شرایط ورود به کدگذاری

2-4. کدگذاری، روایی و پایایی

کدگذاری باز، محوری و گزینشی بر پایه سالدانا (2016) و اشتراوس و کوربین (1998).



شکل 3. کاهش تدریجی داده‌ها از کد اولیه تا بُعد مدل

روایی: شفافیت پروتکل، انتخاب مقالات معتبر و مقایسه یافته‌ها با نظر خبرگان مهندسی پزشکی و مواد زیستی. **پایایی:** بازکدگذاری ۱۰٪ مقالات منتخب توسط پژوهشگر دوم و برآورد توافق با شاخص کاپا (κ).

3 یافته‌ها

3-1. کدگذاری محوری: پنج محور

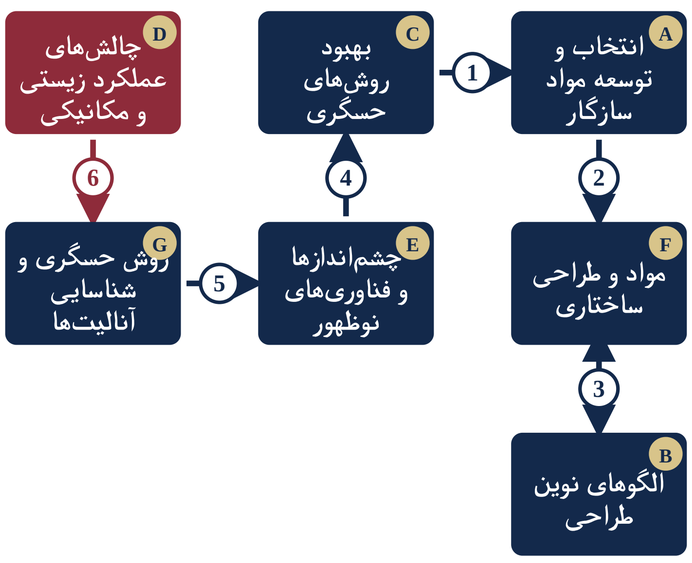
A. انتخاب و توسعه مواد سازگار	فلزات (Mg, Zn, Mo, W)، نیمه‌رساناها (Si, Ge, ZnO)، پلیمرها (PLGA, PCL، ابریشم، کلاژن)
B. الگوهای نوین طراحی	چین‌خورده (Buckling)، اوریگامی و کیریگامی، متخلخل و ترک‌دار، ساختارهای U شکل، مارپیچی و پره‌ای
C. بهبود روش‌های حسگری	الکتروشیمیایی (پتانسیومتری، آمپرمتری، ولتامتری، EIS, OECT)؛ نوری (فلورسانس، شیمی‌تابشی، فوتوالکتروشیمیایی)
D. چالش‌های عملکرد زیستی و مکانیکی	پایداری در محیط زیستی، نرخ نامطلوب تجزیه، میدان مکانیکی بافت–حسگر، جذب غیراختصاصی
E. چشم‌اندازها و فناوری‌های نوظهور	بیورسپتورهای هوشمند، دارورسانی هوشمند، فناوری بی‌سیم، مواد هیبریدی زیست‌سازگار

جدول 1. محورهای کدگذاری و مقوله‌های نمونه

3-2. کدگذاری گزینشی: سه بُعد مدل

1. **مواد – طراحی ساختاری:** پیوند نوع ماده با هندسه برای هم‌خوانی مکانیکی با بافت
2. **روش حسگری – شناسایی آنالیت‌ها:** نقش فناوری حسگری در دقت تشخیص بیومارکرها
3. **پایداری – کاربرد بالینی:** غلبه بر جذب غیراختصاصی، نرخ تجزیه و پاسخ ایمنی

3-3. مدل مفهومی



شکل 4. روابط میان محورهای پژوهش (بازترسیم نمودار 1 مقاله)

1. بهبود روش‌های حسگری بر انتخاب و توسعه مواد اثر می‌گذارد.
2. انتخاب مواد سازگار بر طراحی ساختاری اثر مثبت دارد.
3. مواد و طراحی ساختاری با الگوهای نوین طراحی رابطه دوطرفه دارند.
4. چشم‌اندازهای نوظهور بهبود روش‌های حسگری را تسریع می‌کنند.
5. روش حسگری در تعیین چشم‌اندازهای نوظهور نقش مهمی دارد.
6. چالش‌های زیستی و مکانیکی بر روش حسگری اثر منفی دارند.

4 مفروضات نهایی مدل

1. طراحی انعطاف‌پذیر بدون انتخاب دقیق مواد زیست‌تخریب‌پذیر به موفقیت بالینی نمی‌انجامد.
2. ترکیب روش‌های حسگری (مانند الکتروشیمیایی و نوری) کارایی را بیشینه می‌کند.
3. افزایش پایداری و کاهش جذب غیراختصاصی، کلید ورود به درمان‌های درون‌بدنی پایدار است.
4. آینده در گرو حسگری–دارورسانی هوشمند و اتصال به شبکه‌های بی‌سیم پزشکی است.

5 نتیجه‌گیری

مواد انعطاف‌پذیر و زیست‌تخریب‌پذیر، یکپارچگی بی‌وقفه حسگرهای کاشتنی با بافت و حذف جراحی برداشت را ممکن کرده‌اند. ناسازگاری مکانیکی، پاسخ التهابی و کاهش پایداری همچنان چالش‌اند و توسعه مواد و ساختارهای مهندسی‌شده و روش‌های حسگری الکتروشیمیایی، نوری و جرمی، راهکار کلیدی است. تحقق پایش زیستی در محیط‌های غیربیمارستانی، گامی مهم در بهبود کیفیت زندگی بیماران است.

6. منابع

1. Hu C, Wang L, Liu S, Sheng X, Yin L. Recent development of implantable chemical sensors utilizing flexible and biodegradable materials for biomedical applications. ACS Nano. 2024;18(4):3969-95. doi:10.1021/acsnano.3c11832
2. Kim et al. (2018). Cited in the source article.
3. Wang et al. (2020). Cited in the source article.
4. Ling et al. (2020). Cited in the source article.
5. Li et al. (2023). Cited in the source article.
6. Saldaña J. (2016). Qualitative coding framework applied in this study.
7. Strauss A, Corbin J. (1998). Grounded-theory coding principles applied in this study.