Journal of Recent Advancements in Material Science and Biomedical Engineering
Vol. 1, Issue 4, Spring 2026, 78-85
ram.apadana.ac.ir
Apadana Institute of Higher Education

Smart Dressings Based on Wearable Sensors, A New Approach to Monitoring and Managing Chronic Wounds

Amir Hossein Moadeli* PhD in Electrical. Telecommunication Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran.

Marzieh Moadeli Master of Science in Electrical, Telecommunication Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.

Abstract

Chronic wounds, like diabetic foot and venous leg ulcers, pose major healthcare challenges due to high costs and risks of infection or amputation. Current assessment methods rely on subjective visual inspection and require frequent dressing changes, which can disrupt healing. The emergence of smart dressings with integrated wearable sensors represents a transformative advance. These interdisciplinary systems enable continuous, non-invasive monitoring of key wound parameters (e.g., pH, temperature, biomarkers). This review covers their design, materials, and benefits for early detection and treatment evaluation. We also discuss challenges like biocompatibility and integration with drug delivery systems, and future directions involving multimodal sensing, artificial intelligence data interpretation, and closed-loop automation.

Keywords: smart dressing, wearable sensor, chronic wound, biomaterial(s), biomedical engineering, personalized medicine

Received: 23/December/2026 Accepted: 19/February/2026 eISSN: 3115-7610 ISSN: 3115-7572

* Corresponding Author: a.moadeli@sutech.ac.ir

فصلنامه پیشرفت‌های مهندسی در حوزه‌ی پزشکی و مواد
دوره ۱، شماره ۴، بهار ۱۴۰۵، ۷۸-۸۵
ram.apadana.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۰ eISSN: 3115-7610 ISSN: 3115-7572

پانسمان‌های هوشمند مبتنی بر حسگرهای پوشیدنی، رویکردی نوین در پایش و مدیریت زخم‌های مزمن

امیرحسین معدلی* | دکتری مهندسی برق مخابرات، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران.

مرضیه معدلی | کارشناسی ارشد مهندسی برق مخابرات، دانشکاه شیراز، شیراز، ایران.

چکیده

زخم‌های مزمن، به‌ویژه زخم پای دیابتی و زخم ناشی از نارسایی وریدی، از چالش‌های بزرگ نظام‌های سلامت هستند که هزینه‌های درمانی بالا و عوارض جدی مانند عفونت و قطع عضو را به‌دنبال دارند. ارزیابی متداول این زخم‌ها مبتنی بر معاینه بصری و کیفی است که نیازمند برداشتن مکرر پانسمان و متکی به قضاوت شخصی پزشک می‌باشد. این روش‌ها نه‌تنها می‌توانند فرایند ترمیم را مختل کنند، بلکه قادر به تشخیص به‌موقع تغییرات حیاتی در محیط زخم نیستند. در سال‌های اخیر، ظهور فناوری پانسمان‌های هوشمند مجهز به حسگرهای پوشیدنی، تحولی اساسی در عرصه مراقبت از زخم ایجاد کرده است. این سیستم‌های میان‌رشته‌ای، که حاصل هم‌گرایی علوم مهندسی مواد، الکترونیک و پزشکی هستند، امکان پایش پیوسته، غیرتهاجمی و عینی پارامترهای بیوشیمیایی و فیزیکی زخم را فراهم می‌سازند. این مقاله به مرور اصول طراحی، مکانیسم عملکرد و مواد پیشرفته مورد استفاده در نسل جدید حسگرهای زیستی یکپارچه در پانسمان‌ها می‌پردازد. پارامترهای کلیدی از قبیل pH، دما، رطوبت و نشانگرهای زیستی خاص مانند اسید اوریک و سیتوکین‌ها بررسی شده و مزایای پایش آن‌ها در تشخیص زودهنگام عفونت و ارزیابی پاسخ به درمان تشریح می‌شود. همچنین، چالش‌های پیش روی توسعه این فناوری‌ها، از قبیل نیاز به زیست‌سازگاری کامل، پایداری طولانی‌مدت و یکپارچه‌سازی با سامانه‌های رهایش هوشمند دارو مورد بحث قرار می‌گیرد. در پایان، چشم‌انداز آینده با تمرکز بر توسعه سامانه‌های چندحسگری (مالتی‌مدال)، بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای تفسیر داده‌های پیچیده و حرکت به‌سمت فناوری‌های کاملاً یکپارچه و خودکار (Closed-loop Systems) ترسیم می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: پانسمان هوشمند، حسگر پوشیدنی، زخم مزمن، زیست‌مواد، مهندسی پزشکی، پزشکی شخصی‌شده

* نویسندهٔ مسئول: a.moadeli@sutech.ac.ir

۱- مقدمه

زخم زمانی به‌عنوان «مزمن» طبقه‌بندی می‌شود که روند ترمیم آن در چارچوب زمانی منطقی (معمولاً بیش از ۱۲ هفته) متوقف شده یا به کندی پیش رود. دو نوع شایع زخم‌های مزمن، زخم پای دیابتی[1] و زخم وریدی[2] هستند که مدیریت آن‌ها بار سنگینی بر دوش سیستم بهداشتی می‌گذارد. زخم پای دیابتی عمدتاً به‌دلیل نوروپاتی و اختلال در خون‌رسانی در بیماران دیابتی ایجاد شده و درصورت عدم درمان مناسب، خطر عفونت و قطع عضو را به‌دنبال دارد [۱]. زخم وریدی نیز ناشی از نارسایی دریچه‌های وریدی و افزایش فشار وریدی است [۲]. روش استاندارد کنونی برای ارزیابی این زخم‌ها، معاینه بالینی و استفاده از ابزارهای کیفی مانند معیار TIMERS[3] می‌باشد [۳]. اگرچه این روش کاربردی است، اما ذاتاً ذهنی بوده و برای انجام آن نیاز به تعویض مکرر پانسمان و مشاهده مستقیم زخم وجود دارد. این امر نه‌تنها باعث ایجاد درد و ناراحتی برای بیمار می‌شود، بلکه می‌تواند با آسیب به بافت‌های در حال ترمیم، روند بهبودی را به تأخیر اندازد. همچنین، این روش قادر به ثبت تغییرات لحظه‌ای و حیاتی در محیط زخم نیست. بنابراین، توسعه روش‌های عینی، پیوسته و غیرتهاجمی برای پایش وضعیت زخم به نیازی اساسی در حوزه مراقبت‌های پزشکی تبدیل شده است. در این راستا، پانسمان‌های هوشمند مجهز به حسگرهای پیشرفته به‌عنوان راه‌حلی امیدبخش مطرح شده‌اند. این فناوری در مرز مشترک مهندسی مواد، الکترونیک انعطاف‌پذیر، نانوتکنولوژی و پزشکی قرار دارد و هدف نهایی آن تبدیل مدیریت زخم از فرایندبی واکنشی و مبتنی بر حدس، به فرایندی پیش‌گیرانه، داده‌محور و شخصی‌شده است.

زخم‌های مزمن، به‌ویژه زخم‌های پای دیابتی و وریدی، به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی در نظام سلامت شناخته می‌شوند که به‌دلیل نوروپاتی، اختلالات عروقی و فشار وریدی مزمن ایجاد می‌گردند [۱، ۲]. روش‌های استاندارد فعلی برای ارزیابی و مدیریت این زخم‌ها، عمدتاً مبتنی بر معاینات بالینی کیفی مانند معیار TIMERS است [۳]. بااین‌حال، ماهیت ذهنی این روش‌ها و نیاز به تعویض مکرر پانسمان، نه‌تنها باعث بروز درد و آسیب به بافت‌های در حال ترمیم می‌شود، بلکه مانع از پایش پیوسته و دقیق وضعیت محیط زخم می‌گردد [۳، ۴].

در سال‌های اخیر، فناوری‌های نوین با تکیه بر مهندسی مواد و نانوتکنولوژی، دریچه‌ای نو به‌سوی مدیریت زخم‌های مزمن گشوده‌اند. ازآنجاکه تغییرات بیوشیمیایی و فیزیکی در محیط زخم (مانند pH، دما و رطوبت) شاخص‌های حیاتی برای پایش عفونت و روند بهبودی محسوب می‌شوند [۵]، محققان موفق به توسعه حسگرهای هوشمند و انعطاف‌پذیری شده‌اند که قادر به اندازه‌گیری دقیق این پارامترها هستند. به‌عنوان مثال، حسگرهای pH رنگ‌سنجی و فلورسنت [۶] و همچنین آرایه‌های حسگر pH ارزان‌قیمت و منعطف [۷]، گام‌های مؤثری در جهت نظارت غیرتهاجمی بر شرایط زخم برداشته‌اند. علاوه‌بر این، پانسمان‌های هوشمند بی‌سیم با قابلیت تحریک الکتریکی [۸] و غشاهای ترموکرومیک یا حسگرهای زیست‌تخریب‌پذیر برای پایش دمای موضعی [۹، ۱۰]، پتانسیل بالایی در پیش‌بینی زودهنگام ناهنجاری‌های محیط زخم از خود نشان داده‌اند.

توسعه در این حوزه فراتر از اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی-شیمیایی اولیه رفته و به‌سمت شناسایی بیومارکرهای خاص در ترشحات زخم حرکت کرده است. پژوهش‌ها نشان‌دهنده اثربخشی روش‌های ابداعی برای پایش لحظه‌ای سطح رطوبت [۱۱]، شناسایی اسید اوریک [۱۲] و توسعه حسگرهای ایمنی[4] چندگانه برای تشخیص‌های نقطه‌ای[5] هستند [۱۳]. این پانسمان‌های هوشمند پیشرفته که برخی از آن‌ها بدون نیاز به باتری و با قابلیت آزادسازی هدفمند دارو طراحی شده‌اند [۱۴]، نویدبخش تغییر پارادایم از درمان‌های واکنشی به مراقبت‌های شخصی‌سازی‌شده هستند. در

1. diabetic foot ulcers
2. venous leg ulcer
3. tissue infection/inflammation moisture edge regeneration social factors
4. immunosensors
5. point-of-care

نهایت، تلفیق این داده‌های چندوجهی با مدل‌های یادگیری ماشین، رویکردی نوظهور در پزشکی دقیق است که می‌تواند دقت پیش‌بینی و کیفیت تصمیم‌گیری‌های درمانی را به‌طرز چشمگیری ارتقا دهد [۱۵].

۲- پارامترهای حیاتی در پایش زخم و فناوری‌های حسگری نوین

۲-۱- پایش pH شاخصی کلیدی برای شناسایی عفونت

pH پوست سالم به‌دلیل حضور اسیدهای چرب آزاد در سطح، در محدوده اسیدی ۴-۶ قرار دارد که برای عملکرد سد پوستی و مهار رشد باکتری‌ها ضروری است. در مقابل، محیط زخم‌های مزمن به‌دلیل از دست دادن دی‌اکسید کربن و فعالیت باکتری‌های تولیدکننده اوره‌آز، تمایل به قلیایی‌شدن (اغلب بین ۷/۵ تا ۸/۵) دارد [۵]. بنابراین، پایش تغییرات pH می‌تواند نشانه‌ای زودهنگام از بروز عفونت باشد. در پانسمان‌های هوشمند، دو رویکرد اصلی برای سنجش pH وجود دارد:

- حسگرهای نوری (اپتیکال): این حسگرها معمولاً مبتنی بر تغییر رنگ[1] هستند. در یک طراحی متداول، رنگ‌دانه‌های حساس به pH مانند بریلیانت یلو یا نانوبلورهای کربنی فلورسانت درون الیاف هیدروژل پانسمان قرار می‌گیرند. تغییر رنگ ایجاد شده می‌تواند به‌صورت بصری یا با استفاده از دوربین تلفن همراه هوشمند تحلیل شود [۶]. با وجود سادگی و عدم نیاز به اتصالات الکتریکی پیچیده، این حسگرها اغلب از محدوده پایش باریک و مشکل نشت مواد رنگینه به درون زخم رنج می‌برند.
- حسگرهای الکتروشیمیایی: این حسگرها از مواد رسانای پلیمری مانند پلی‌آنیلین (PANI) یا پلی‌اتیلن‌دی‌اکسی‌تیوفن و پلی‌استایرن سولفونات (PEDOT:PSS) استفاده می‌کنند. هدایت الکتریکی یا پتانسیل الکترود این مواد به‌شدت تحت‌تأثیر pH محیط قرار می‌گیرد. برای مثال، حسگرهای مبتنی بر PANI می‌توانند در محدوده pH بین ۴ تا ۱۰ با حساسیتی در حدود ۵۰ میلی‌ولت بر واحد pH عمل کنند [۷]. اگرچه این حسگرها از دقت و حساسیت بالاتری برخوردارند، چالش‌هایی مانند نیاز به کالیبراسیون مجدد در محیط بیولوژیک پویای زخم و تأثیر احتمالی گونه‌های الکترواکتیو دیگر موجود در اگزودا بر سیگنال، هنوز نیاز به تحقیق و توسعه بیشتر دارد.

در کنار تشخیص سریع عفونت، یکی از اهداف راهبردی فناوری‌های نوین، پیشگیری از شکل‌گیری زخم‌های مزمن است. در بیماران دیابتی، تغییر تدریجی در دما، رطوبت یا pH پوست پیش از آنکه زخم ایجاد شود، می‌تواند نشانه‌ای از اختلال گردش خون یا استرس مکانیکی باشد. حسگرهای منعطف و پارچه‌ای، که درون جوراب یا بانداژهای سبک جای‌گذاری می‌شوند، قادرند این تغییرات را ثبت کرده و هشدار پیشگیرانه برای مراقبت زودهنگام ارائه دهند. با این رویکرد، مدیریت زخم از مرحله «درمان پس از شکل‌گیری» به‌سمت «پایش پیش‌گیرانه و خودمراقبتی مستمر» تغییر می‌یابد و بار درمانی سیستم سلامت به‌طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند.

۲-۲- پایش دمای موضعی: شناسایی التهاب

افزایش دمای ناحیه زخم در مقایسه با پوست سالم اطراف (معمولاً بیش از ۲/۲ درجه سانتی‌گراد) یکی از نخستین نشانه‌های التهاب و عفونت است [۸]. در مقابل، کاهش دما می‌تواند نشان‌دهنده کاهش خون‌رسانی (ایسکمی) باشد. فناوری‌های مختلفی برای یکپارچه‌سازی حسگر دما در پانسمان توسعه یافته‌اند:

1. colorimetric

- حسگرهای مقاومتی (RTD): این حسگرها که اغلب از لایه‌های نازک فلزی مانند پلاتین ساخته می‌شوند و براساس تغییر مقاومت الکتریکی با دما کار می‌کنند.
- حسگرهای ترموکرمیک: در این حسگرها، مواد تغییرفاز دهنده[1] درون بسترهای پلیمری انعطاف‌پذیر کپسوله می‌شوند. تغییر رنگ این مواد در دمای مشخص، امکان پایش کیفی دما را بدون نیاز به الکترونیک پیچیده فراهم می‌کند [۹].
- حسگرهای بی‌سیم: این نسل نوین از حسگرها از مواد زیست‌تخریب‌پذیر مانند منیزیم و پلی‌لاکتیک اسید ساخته شده و به‌صورت موقت در بافت کاشته می‌شوند. این حسگرها که نیازی به باتری ندارند و از طریق القای الکترومغناطیسی تغذیه می‌شوند، امکان پایش دمای بافت‌های عمقی را با دقت بالا فراهم می‌کنند [۱۰].

۲-۳- پایش سایر نشانگرهای زیستی و فیزیولوژیک

- رطوبت: حفظ تعادل رطوبتی[2] در بستر زخم برای تسهیل مهاجرت سلول‌ها و ترمیم بافت امری حیاتی است. حسگرهای رطوبت معمولاً براساس سنجش تغییرات ظرفیت خازنی یا مقاومت الکتریکی بین دو الکترود کار می‌کنند. زمانی که اگزودای زخم بافت بین الکترودها را اشباع می‌کند، ظرفیت خازنی افزایش یا مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد. این تغییرات به‌صورت کمی اندازه‌گیری شده و می‌توانند زمان بهینه تعویض پانسمان را مشخص کنند [۱۱].
- اسید اوریک (UA): غلظت اسید اوریک در اگزودای زخم می‌تواند اطلاعات ارزشمندی ارائه دهد. سطوح پایین UA (کمتر از ۲۲۰ میکرومولار) ممکن است نشان‌دهنده فعالیت متابولیک باکتری‌ها باشد، درحالی‌که سطوح بالا می‌تواند حاکی از مرگ سلولی و نکروز بافت باشد. حسگرهای پیشرفته مبتنی بر ترانزیستورهای الکتروشیمیایی آلی (OECT) با بهره‌گیری از پلیمرهای رسانا مانند PEDOT:PSS، امکان تشخیص انتخابی و حساس UA را در محدوده فیزیولوژیک فراهم کرده‌اند [۱۲].
- نشانگرهای پروتئینی: پروتئین‌های خاصی مانند سیتوکین‌های التهابی مثلاً (IL-6, TNF-α) و آنزیم‌های ماتریکس متالوپروتئیناز مانند (MMP-9) در فرآیند ترمیم زخم نقش کلیدی دارند و سطح غیرطبیعی آن‌ها با عدم بهبودی مرتبط است. توسعه حسگرهای ایمنی[3] یا حسگرهای مبتنی بر آپتامر که قابلیت اتصال انتخابی به این پروتئین‌ها را دارند، امکان پایش چندین نشانگر به‌طور هم‌زمان (مالتی‌پلکسینگ) در بستر زخم را فراهم ساخته است [۱۳].

در نسل‌های جدید پانسمان‌های هوشمند، جهت‌گیری پژوهش‌ها از طراحی حسگرهای منفرد به‌سوی سامانه‌های چندمنظوره تغییر یافته است. این پانسمان‌ها قادر به اندازه‌گیری هم‌زمان پارامترهایی چون pH، دما، رطوبت و غلظت بیومارکرهای اختصاصی هستند و سیگنال‌های دریافت‌شده را از طریق مدارات مجتمع[4] یا ماژول‌های بی‌سیم به تلفن همراه یا سرور بالینی ارسال می‌کنند. برای نمونه، پانسمان بی‌سیم معرفی‌شده توسط جیانگ و همکاران[5]، با ترکیب حسگرهای pH، دما و جریان، ضمن پایش لحظه‌ای التهاب، توانایی تحریک الکتریکی کنترل‌شده را نیز برای تسریع ترمیم نشان داده است [۸]. چنین ادغام‌هایی نه‌تنها باعث افزایش دقت تشخیص عفونت و واکنش‌های التهابی می‌شود، بلکه امکان تنظیم درمان متناسب با الگوی واقعی فیزیولوژی بیمار را فراهم می‌سازد.

---
1. phase change materials
2. moisture balance
3. immunosensors
4. integrated circuits
5. Jiang et al.

با توجه به حجم زیاد داده‌های تولیدشده توسط حسگرهای متعدد، به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی نقش حیاتی در تحلیل هوشمند این اطلاعات دارد. مدل‌های چندوجهی[1]، مشابه آنچه کلاین و همکاران[2] [۱۵] مطرح کرده‌اند، قادرند داده‌های زیستی، تصویری و الکترونیکی را تلفیق کرده و الگوهای پنهان مرتبط با وضعیت زخم یا خطر عفونت را استخراج کنند. چنین رویکردی امکان پیش‌بینی روند بهبود، پیشنهاد بهترین زمان تعویض پانسمان یا حتی انتخاب نوع درمان موضعی را فراهم می‌سازد. در آینده، ترکیب این داده‌ها با پرونده سلامت دیجیتال بیمار، می‌تواند مراقبت از زخم را به فرایندی کاملاً شخصی‌سازی‌شده و پیش‌گیرانه تبدیل کند.

۳- ملاحظات مهندسی مواد و طراحی

مواد به‌کاررفته در ساخت پانسمان‌های هوشمند باید مجموعه‌ای از خواص متناقض‌نما را به‌طور هم‌زمان دارا باشند: انعطاف‌پذیری و کشسانی برای انطباق با حرکات پوست، نفوذپذیری به بخار آب برای تبادل گازی، زیست‌سازگاری کامل برای جلوگیری از پاسخ التهابی، و پایداری مکانیکی و شیمیایی در محیط مرطوب و خورنده زخم.

- زیرلایه‌ها[3]: پلی‌مرهای زیست‌سازگاری مانند پلی‌دیمتیل‌سیلوکسان (PDMS)، پلی‌یورتان‌های پزشکی، فیبروئین ابریشم و هیدروژل‌های طبیعی (مانند آلژینات و کیتوزان) به‌عنوان بستری برای چاپ یا قرارگیری حسگرها استفاده می‌شوند.
- مواد فعال الکترونیکی: نانولوله‌های کربنی، گرافن و پلی‌مرهای رسانای intrinsically stretchable امکان ایجاد مسیرهای هدایت‌الکتریکی انعطاف‌پذیر و کشسان را فراهم می‌کنند.
- رهایش هوشمند دارو: بسیاری از پانسمان‌های هوشمند نسل آینده، علاوه‌بر پایش، قابلیت درمان فعال[4] را نیز دارند. این سیستم‌ها معمولاً از هیدروژل‌های پاسخ‌دهنده به محرک[5] به‌عنوان مخزن دارو استفاده می‌کنند. برای مثال، یک هیدروژل می‌تواند در پاسخ به افزایش pH ناشی از عفونت، ساختار خود را تغییر داده و آنتی‌بیوتیک موضعی را در بستر زخم رها کند، یا یک سیستم حاوی نانوذرات در پاسخ به افزایش دمای موضعی، دارو را آزاد نماید [۱۴]. این رویکرد «تشخیص-درمان هم‌زمان» یا ترانوستیک[6]، گامی بلند به‌سمت پزشکی شخصی‌شده است.

۴- چالش‌های جاری و راهکارهای آینده

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، مسیر توسعه و تجاری‌سازی پانسمان‌های هوشمند با چالش‌هایی روبه‌رو است:

- تأمین انرژی و مدیریت داده: اکثر حسگرهای الکترونیکی نیاز به منبع انرژی دارند. توسعه حسگرهای پسیو (غیرفعال) و بدون باتری که از طریق القا یا برداشت انرژی از بدن[7] کار می‌کنند، راه‌حلی امیدبخش است.
- پایداری و کالیبراسیون: عملکرد پایدار حسگرها در محیط بیولوژیک پویا، اسیدی/قلیایی و مملو از پروتئین‌ها و سلول‌ها چالش فنی بزرگی است. مواد با پایداری شیمیایی بالا و الگوریتم‌های نرم‌افزاری برای جبران خطا و کالیبراسیون خودکار ضروری هستند.

1. multimodal ML
2. Kline et al.
3. substrates
4. active therapy
5. stimuli-responsive
6. theranostic
7. energy harvesting

- تولید انبوه و مقرون‌به‌صرفه بودن: تکنیک‌های تولید مانند چاپ الکترونیک[1] بر روی بسترهای انعطاف‌پذیر، می‌توانند امکان ساخت مقیاس‌پذیر و کاهش هزینه را فراهم آورند.
- چشم‌انداز آینده: آینده این حوزه در گرو توسعه سیستم‌های چندحسگری یکپارچه است که بتوانند به‌طور هم‌زمان چندین پارامتر را پایش کنند. الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین می‌توانند با تحلیل مجموعه‌ای پیچیده از داده‌های حسگرها، الگوهای پنهان را شناسایی کرده، پیش‌آگهی از روند بهبودی ارائه دهند و حتی سیستم رهایش دارو را به‌طور خودکار کنترل کنند [۱۵]. نهایتاً، حرکت به‌سمت سامانه‌های حلقه بسته[2] که به‌طور مستقل وضعیت زخم را تحلیل کرده و درمان مناسب را اعمال می‌کنند، آرمان نهایی این حوزه پژوهشی خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

پانسمان‌های هوشمند مجهز به حسگرهای پیشرفته، تجلی موفق همکاری میان‌رشته‌ای و نقطه عطفی در مراقبت از زخم به‌شمار می‌روند. این فناوری با فراهم آوردن امکان پایش عینی و پیوسته پارامترهای حیاتی زخم، نه‌تنها می‌تواند منجر به تشخیص زودهنگام عوارض، کاهش دفعات تعویض پانسمان و تسریع روند بهبودی شود، بلکه با جمع‌آوری داده‌های عینی، بنیان پژوهش‌های بالینی را نیز مستحکم‌تر می‌سازد. اگرچه موانع فنی و عملیاتی قابل توجهی در مسیر بلوغ و گسترش این فناوری وجود دارد، اما سرعت پیشرفت در علوم مواد، نانوفناوری و هوش مصنوعی، نویدبخش آینده‌ای است که در آن، مدیریت زخم به‌صورت کاملاً شخصی، دقیق و مبتنی بر شواهد دیجیتال انجام خواهد پذیرفت. سرمایه‌گذاری و تمرکز تحقیقاتی بر حل چالش‌های مطرح‌شده، می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در تحقق این چشم‌انداز و ارتقای سطح سلامت بیماران داشته باشد.

منابع

1. London NJ, Donnelly R. Ulcerated lower limb. BMJ. 2000;320(7249):1589-91.
2. Ellis S, Patel M, Koshchak E, Lantis II J. Location of lower-extremity diabetic foot ulcers with concomitant arterial or venous disease. Diabetic Foot. 2021;24(1):37.
3. Lumbers M. TIMERS: undertaking wound assessment in the community. British Journal of Community Nursing. 2019;24(Sup12):S22-5.
4. Gianino E, Miller C, Gilmore J. Smart wound dressings for diabetic chronic wounds. Bioengineering. 2018;5(3):51
5. Jones EM, Cochrane CA, Percival SL. The effect of pH on the extracellular matrix and biofilms. Advances in Wound Care. 2015;4(7):431-9.
6. Yang P, Zhu Z, Zhang T, Zhang W, Chen W, Cao Y, Chen M, Zhou X. Orange-emissive carbon quantum dots: toward application in wound pH monitoring based on colorimetric and fluorescent changing. Small. 2019;15(44):1902823.
7. Rahimi R, Ochoa M, Parupudi T, Zhao X, Yazdi IK, Dokmeci MR, Tamayol A, Khademhosseini A, Ziaie B. A low-cost flexible pH sensor array for wound assessment. Sensors and Actuators B: Chemical. 2016;229:609-17.
8. Jiang Y, Trotsyuk AA, Niu S, Henn D, Chen K, Shih CC, Larson MR, Mermin-Bunnell AM, Mittal S, Lai JC, Saberi A. Wireless, closed-loop, smart bandage with integrated sensors and stimulators for advanced wound care and accelerated healing. Nature Biotechnology. 2023;41(5):652-62.
9. He Y, Li W, Han N, Wang J, Zhang X. Facile flexible reversible thermochromic membranes based on micro/nanoencapsulated phase change materials for wearable temperature sensor. Applied Energy. 2019;247:615-29.

1. printed electronics
2. closed-loop systems

10. Lu D, Yan Y, Avila R, Kandela I, Stepien I, Seo MH, Bai W, Yang Q, Li C, Haney CR, Waters EA. Bioresorbable, wireless, passive sensors as temporary implants for monitoring regional body temperature. Advanced Healthcare Materials. 2020;9(16):2000942.
11. McColl D, Cartlidge B, Connolly P. Real-time monitoring of moisture levels in wound dressings in vitro: An experimental study. International Journal of Surgery. 2007;5(5):316-22.
12. Arcangeli D, Gualandi I, Mariani F, Tessarolo M, Ceccardi F, Decataldo F, Melandri F, Tonelli D, Fraboni B, Scavetta E. Smart bandaid integrated with fully textile OECT for uric acid real-time monitoring in wound exudate. ACS Sensors. 2023;8(4):1593-608.
13. Gao Y, Nguyen DT, Yeo T, Lim SB, Tan WX, Madden LE, Jin L, Long JY, Aloweni FA, Liew YJ, Tan ML. A flexible multiplexed immunosensor for point-of-care in situ wound monitoring. Science Advances. 2021;7(21):eabg9614.
14. Xu G, Lu Y, Cheng C, Li X, Xu J, Liu Z, Liu J, Liu G, Shi Z, Chen Z, Zhang F. Battery-free and wireless smart wound dressing for wound infection monitoring and electrically controlled on-demand drug delivery. Advanced Functional Materials. 2021;31(26):2100852.
15. Kline A, Wang H, Li Y, Dennis S, Hutch M, Xu Z, Wang F, Cheng F, Luo Y. Multimodal machine learning in precision health: A scoping review. NPJ Digital Medicine. 2022;5(1):171.

استناد به این مقاله: معدلی، امیرحسین، و معدلی، مرضیه. (۱۴۰۵). پانسمان‌های هوشمند مبتنی بر حسگرهای پوشیدنی، رویکردی نوین در پایش و مدیریت زخم‌های مزمن. *فصلنامه پیشرفت‌های مهندسی در حوزه‌ی پزشکی و مواد*، ۱(۴)، ۷۸-۸۵.

Journal of Recent Advancements in Material Science and Biomedical Engineering is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.