

مروری بر حسگرهای کرنشی پیشرفته مبتنی بر هیدروژل‌های رسانای یونی و الکترونی: مبانی اولیه تا فناوری‌های پوشیدنی و چشم‌انداز آینده

لیلا قدیری^۱، لیلا ناجی^{۲*}

۱ دکترای شیمی کاربردی دانشکده شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک)، تهران، ایران

۲ دانشیار گروه شیمی تجزیه دانشکده شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک)، تهران، ایران

* نویسنده مسئول که تمام مکاتبات باید به او ارسال شود. تلفن: ۶۴۵۴۵۸۰۷ (۲۱) ۹۸ + ؛ ایمیل: leilanaji@aut.ac.ir

* تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده شیمی، گروه شیمی تجزیه

A Review of Advanced Ionically and Electronically Resistive Hydrogel-Based Flexible Strain Sensors: Fundamental Principles to Wearable Technologies and Future Prospects

Leila Ghadiri¹, Leila Naji^{2*}

¹ PhD in Applied Chemistry, Chemistry Department, AmirKabir University of Technology (Polytechnic), Tehran, Iran

² Associate Professor of Analytical Chemistry Group, Chemistry Department, AmirKabir University of Technology (Polytechnic), Tehran, Iran

***Corresponding author to whom all correspondence should be directed. Tel: +98 (21) 64545807; e-mail: leilanaji@aut.ac.ir**

* Tehran, Amirkabir University of Technology, , Chemistry Department, Analytical Chemistry Group

۱ چکیده

۲ این مقاله مروری، به بررسی و مقایسه حسگرهای کرنشی مقاومتی مبتنی بر هیدروژل‌های رسانا با تمرکز بر تحلیل
۳ تفاوت‌های میان هیدروژل‌های رسانای یونی و الکترونی می‌پردازد. هیدروژل‌ها به خاطر ساختار شبکه‌ای،
۴ زیست‌سازگاری و خواص مکانیکی مشابه بافت‌های بدن، گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهایی مانند پوست الکترونیکی و
۵ رباتیک نرم هستند. در این پژوهش، مبانی عملکرد و سازوکارهای حسگری این دو دسته تحلیل می‌شود.
۶ هیدروژل‌های یونی بر انتقال یون‌ها متکی هستند، در حالی که نوع الکترونی با افزودن پرکننده‌های رسانا مسیر
۷ هدایت الکترونی ایجاد می‌کنند. این تفاوت بنیادی، به‌طور مستقیم بر مشخصه‌های کلیدی مانند حساسیت،
۸ کشش‌پذیری و پایداری مکانیکی آن‌ها تأثیر می‌گذارد. کاربردهای عملی این فناوری با چالش‌هایی چون دوام مکانیکی،
۹ ثبات سیگنال و ادغام در سامانه‌های پوشیدنی روبرو است. مقاله ضمن بررسی این موانع، چشم‌انداز آینده را در قالب
۱۰ یکپارچه‌سازی با مواد هوشمند ترسیم کرده و مسیر را برای توسعه نسل نوینی از سامانه‌های پایش سلامت و رابط‌های
۱۱ لمسی هموار می‌سازد.

۱۲ واژه‌های کلیدی: حسگر مبتنی بر هیدروژل، مشخصه‌های حسگری، پوست الکترونیکی (E-skin)،
۱۳ الکترونیک پوشیدنی، پایش سلامت.

۱۴ Abstract

۱۵ This review article examines and compares strain-resistive sensors based on conductive
۱۶ hydrogels, with a focus on analyzing the differences between ionically conductive and
۱۷ electronically conductive hydrogels. Hydrogels are an ideal choice for applications such as
۱۸ electronic skin and soft robotics due to their networked structure, biocompatibility, and
۱۹ mechanical properties similar to those of body tissues. This study analyzes the operating
۲۰ principles and sensing mechanisms of these two categories. Ionic hydrogels rely on ion
۲۱ transport, while the electronic type creates electron conduction pathways by incorporating
۲۲ conductive fillers. This fundamental difference directly impacts key performance
۲۳ parameters such as sensitivity, stretchability, and mechanical stability. Practical applications
۲۴ of this technology encounter challenges including mechanical durability, signal stability, and

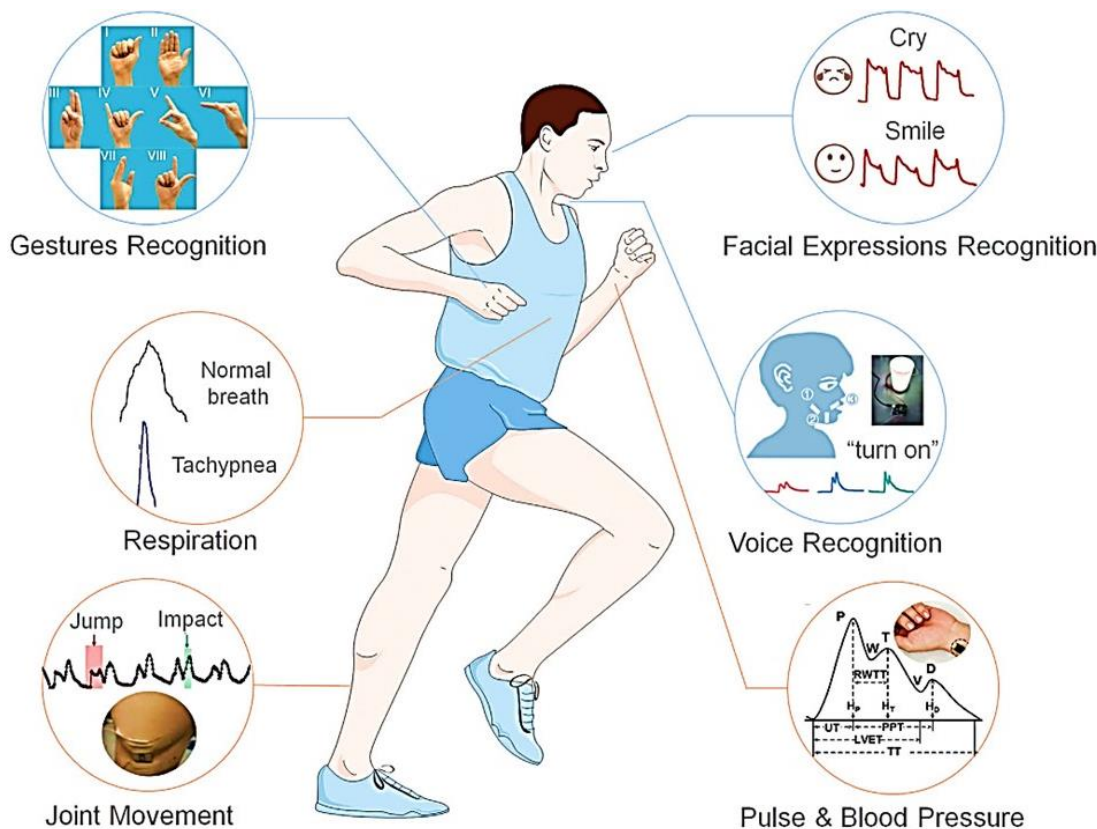
integration into wearable system. By addressing these obstacles, the article outlines a future vision based on integration with smart materials, paving the way for developing a new generation of health monitoring systems and tactile interfaces.

Keywords: Hydrogel-based sensor, Sensing parameters, Electronic skin (E-skin), wearable electronics, health monitoring.

۱ مقدمه

حسگرها، تجهیزاتی هستند که تغییر شکل ناشی یک محرک فیزیکی خارجی (مانند گرما، فشار، نور، حرکت یا صدا) را تشخیص داده و آن را به یک سیگنال الکتریکی قابل اندازه‌گیری تبدیل می‌کنند [۱]. در این میان، حسگرهای کرنشی میزان تغییر شکل (کشش یا فشردگی) یک جسم تحت نیروی خارجی را اندازه می‌گیرد [۱]. حسگرهای کرنش سنتی، که عمدتاً از مواد فلزی یا نیمه‌هادی غیرآلی ساخته می‌شوند، معمولاً محدوده کرنش بسیار کمی (کمتر از ۰.۵٪) دارند. این ویژگی آن‌ها را برای کاربردهای مبتنی بر کرنش‌های بزرگ نامناسب می‌سازد. علاوه بر این، فرآیندهای ساخت پیچیده و هزینه تولید بالای این حسگرها، مانعی جدی در مسیر توسعه و کاربرد گسترده آن‌ها محسوب می‌شود [۲،۳]. پیشرفت‌های حوزه الکترونیک انعطاف‌پذیر، تقاضا برای توسعه حسگرهایی با حساسیت و دوام بالا که در عین حال انعطاف‌پذیر و زیست‌سازگار باشند را برای کاربردهای نوظهوری مانند ربانیک نرم، پوست الکترونیکی، رابط‌های انسان-ماشین و پایش سلامت به طور چشمگیری افزایش داده است [۴-۶]. حسگرهای انعطاف‌پذیر با وزن کم و قابلیت تطبیق‌پذیری بالا، می‌توانند بر روی سطوح دینامیک و تغییرشکل‌پذیر قرار گیرند. این مزیت، قابلیت حمل و نقل آن‌ها را افزایش داده و استفاده از آن‌ها را در کاربردهایی که نیازمند تحرک هستند، تسهیل می‌کند [۷]. حرکات مختلف اعضای بدن انسان، همراه با رویدادهای فیزیولوژیکی کلیدی مانند ضربان قلب، تنفس، تولید صدا، و حرکات عضلانی و مفصلی، اطلاعات حیاتی درباره وضعیت سلامت فرد ارائه می‌دهند. به طور مشخص، تغییرات در عروق خونی، که با انقباض و انقبساط آن‌ها همراه است، از طریق ارزیابی تغییر شکل پوست در نواحی میچ دست یا گردن قابل رصد است. تحلیل داده‌های حاصل از مقاومت الکتریکی ناشی از این تغییرات می‌تواند به ارزیابی فشار خون کمک نماید و سبب تشخیص و مدیریت بیماری‌های قلبی-عروقی، از جمله فشار خون بالا و اختلالات ریتم قلب شود. در نتیجه، این رویکرد مبتنی بر پایش تغییر شکل، هدایت دقیق‌تر و توصیه‌های مؤثرتری را برای درمان‌های بالینی و برنامه‌های توانبخشی میسر می‌سازد. فراتر از کاربردهای بالینی، پایش تغییر شکل در توسعه رابط‌های انسان و ماشین نیز نقش دارد؛ جایی که تحلیل تغییر شکل نواحی مختلف بدن، به ماشین‌ها اجازه می‌دهد تا حالات چهره، حرکات بدنی و صداها را درک کرده و امکان تعامل را فراهم آورند. به عنوان نمونه، با اتصال حسگرها بر روی انگشتان و یک بازو، می‌توان تغییر شکل انگشتان و عضلات بازو را تشخیص داد و از این طریق، حرکات دست و تغییرات پیوسته آن را پیش‌بینی، ردیابی و دسته‌بندی نمود. مجموع این کاربردها، اهمیت

۱ حیاتی پایش تغییر شکل‌های بدن انسان را در حوزه‌های مختلف پزشکی و فناوری آشکار می‌سازد [۸] شکل ۱
 ۲ برخی از کاربردهای حسگرهای کرنش پوشیدنی در تشخیص حرکت و پایش پارامترهای فیزیولوژیکی انسان را
 ۳ نشان می‌دهد.



۴
 ۵ شکل ۱. کاربردهای حسگرهای کرنش پوشیدنی در تشخیص حرکت و پایش پارامترهای فیزیولوژیکی مانند حرکت
 ۶ مفاصل، نبض و فشار خون، و همچنین در تشخیص رابط انسان و ماشین، نظیر حرکات دست و صورت و بازشناسی
 ۷ گفتار [۸].

۸ **Figure 1. Applications of wearable strain sensors for detecting motion and monitoring physiological**
 ۹ **parameters such as joint movement, pulse, and blood pressure, and for human-machine interface**
 ۱۰ **recognition, such as gestures, facial expressions, and voice recognition [8].**

۱۱ نیاز به چنین فناوری‌های همه‌کاره و قابل حملی، به‌ویژه در حوزه سلامت و مراقبت‌های پزشکی که در آن‌ها
 ۱۲ یکپارچگی بی‌دردسر و آسایش کاربر اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد، کاملاً محسوس است. حسگرهای انعطاف‌پذیر را
 ۱۳ می‌توان به سهولت و بدون افت عملکرد، درون اشیاء روزمره مانند البسه یا تجهیزات پزشکی ادغام کرد [۹].
 ۱۴ هیدروژل‌ها [۱۱] به عنوان شبکه‌های پلیمری سه‌بعدی دارای محتوای رطوبتی بالا و زیست‌سازگاری هستند که
 ۱۵ به‌طور ذاتی عایق الکتریکی می‌باشند [۱۰]، اما با ادغام اجزای رسانا در شبکه پلیمری می‌توان آن‌ها را به
 ۱۶ هیدروژل‌های رسانا تبدیل کرد. این فرآیند با روش‌هایی مانند ترکیب فیزیکی، تشکیل شبکه‌های مشترک، اتصال

۱ عرضی با یون‌های فلزی چندظرفیتی یا اسیدها و خودآرایی صورت می‌گیرد [۴،۱۲]. هیدروژل‌های رسانا با
 ۲ داشتن معماری زیست‌تقلید، خواص مکانیکی مناسب و زیست‌سازگاری عالی، به موادی امیدبخش برای
 ۳ الکترونیک انعطاف‌پذیر تبدیل شده‌اند [۱۵-۱۳]. تغییر در مسیرهای هیدروژل‌های رسانای مورد استفاده به
 ۴ عنوان حسگرهای کرنشی تحت تنش مکانیکی (کرنش)، منجر به تغییر قابل اندازه‌گیری در مقاومت و رسانایی
 ۵ الکتریکی ماده می‌شود. از این طریق، تغییر شکل به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌گردد. با تنظیم دقیق نوع و
 ۶ غلظت فیلرهای رسانا، عوامل اتصال‌دهنده عرضی و برهمکنش‌های بین‌مولکولی، می‌توان ساختار شبکه، عملکرد
 ۷ الکتریکی و خواص مکانیکی این هیدروژل‌ها را در گستره وسیعی مهندسی کرد [۷،۱۶]. هیدروژل‌های رسانا
 ۸ اساساً بر اساس سازوکار انتقال بار به دو دسته متمایز شامل هیدروژل‌های رسانای یونی و هیدروژل‌های رسانای
 ۹ الکترونی تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۷]. هیدروژل‌های رسانای یونی (مانند یون‌های نمکی، مایعات یونی و
 ۱۰ پلی‌الکترولیت‌ها) انتقال بار را از طریق حرکت یون‌ها تسهیل می‌کنند [۱۸]، هیدروژل رسانای الکترونی
 ۱۱ مسیرهای متعددی برای انتقال الکترون از طریق تماس مستقیم یا تونل‌زنی کوانتومی بین عناصر رسانا ایجاد
 ۱۲ می‌کند [۱۹]. با این حال، انواع هیدروژل‌های رسانای الکترونی که شامل سامانه‌های مبتنی بر فلز، کربن و
 ۱۳ پلیمرهای رسانا هستند [۲۰]، عموماً برای پایش دقیق حرکت و سلامت بدن انسان در نظر گرفته می‌شوند [۱۷].
 ۱۴ این ترجیح ناشی از توانایی آن‌ها در ارائه پاسخ‌های الکتریکی سریع، با وضوح بالا و پایدار به محرک‌های مکانیکی
 ۱۵ (کرنش) است [۲۱]. هیدروژل‌های یونی معمولاً ضریب حساسیت پایینی دارند. این یعنی با اعمال کشش، تغییر
 ۱۶ قابل توجهی در مقاومت الکتریکی آن‌ها ایجاد نمی‌شود. در نتیجه، سیگنال مفید تولید شده بسیار ضعیف خواهد
 ۱۷ بود و این ویژگی، توانایی حسگر را در تشخیص کشش‌ها و حرکات ظریف به شدت کاهش می‌دهد [۲۲]. در
 ۱۸ مقابل، هیدروژل‌های رسانای الکترونی حساسیت بالا و خروجی سیگنال قابل اعتماد و سریعی را تضمین می‌کند
 ۱۹ که برای ثبت تغییرشکل‌های پیچیده، ایستا و پویا مرتبط با خمش مفاصل، تحلیل راه‌رفتن و سیگنال‌های
 ۲۰ فیزیولوژیکی بسیار حیاتی است [۱۲،۲۳].

۲ طراحی، ساخت و طبقه‌بندی هیدروژل‌ها برای حسگرهای کرنشی پوشیدنی:

۲۳ انواع، کاربردها، مزایا و چالش‌ها

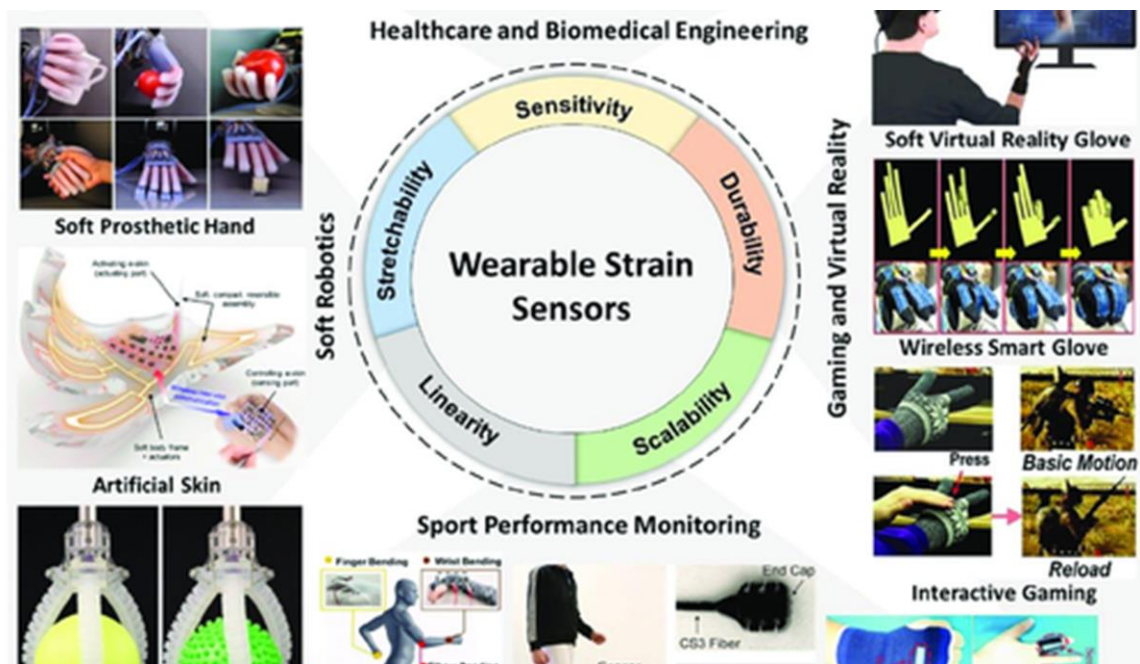
۲۴ هیدروژل‌ها شبکه‌های پلیمری سه‌بعدی و آبدوست هستند که به دلیل ساختار شبکه‌ای متقاطع و قابلیت بالای
 ۲۵ جذب آب و تورم، می‌توانند تا حدی رفتار بافت‌های طبیعی را تقلید کنند [۱۰]. در صورت طراحی مناسب
 ۲۶ مورفولوژی (مثلاً به صورت ساختارهای متخلخل، نانو/میکروذرات یا فوم‌ها)، سطح تماس مؤثر و سطح ویژه آن‌ها
 ۲۷ نیز افزایش یافته و این ویژگی‌ها در کنار زیست‌سازگاری، آن‌ها را برای کاربردهای زیستی مناسب
 ۲۸ می‌سازد [۱۰،۲۴]. همین ویژگی‌ها موجب کاربرد گسترده آن‌ها در حوزه‌هایی چون ذخیره‌سازی انرژی [۲۵]،

۱ رباتیک نرم [۲۶]، مهندسی بافت [۲۷]، رهایش دارو [۱۰]، الکترونیک پوشیدنی [۲۸] و به‌ویژه حسگرهای
 ۲ کرنشی و پوست الکترونیکی شده است [۲۹]. از نظر ترکیب پلیمری، هیدروژل‌ها به دو دسته اصلی طبیعی و
 ۳ مصنوعی تقسیم می‌شوند که هر کدام مزایا و محدودیت‌های خاص خود را در کاربردهای حسگری کششی دارند
 ۴ [۳۰]. هیدروژل‌های طبیعی (مانند آلژینات، کیتوزان، ژلاتین) عموماً زیست سازگار، زیست تخریب پذیر و مقرون
 ۵ به صرفه هستند، اما از نظر استحکام مکانیکی و پایداری شیمیایی در مقایسه با انواع مصنوعی اغلب ضعیف‌تر
 ۶ عمل می‌کنند [۳۱، ۳۲]. در مقابل، هیدروژل‌های مصنوعی (مانند PEG، PAA، PVA) امکان تنظیم دقیق‌تر
 ۷ خواص مکانیکی و شیمیایی را فراهم می‌کنند و برای حسگرهای با کارایی بالا مناسب‌تر هستند [۳۰].
 ۸ هیدروژل‌ها همچنین بر اساس ساختار پلیمری خود به سامانه‌های تک شبکه‌ای (SN)^۱ یا چند شبکه‌ای
 ۹ طبقه‌بندی می‌شوند که شامل معماری‌های دو شبکه‌ای (DN)^۲ و سه شبکه‌ای (TN)^۳ می‌شوند. هیدروژل‌های
 ۱۰ SN از طریق اتصال عرضی یک پلیمر آبدوست واحد، مانند پکتین، سلولز، پلی آکریل آمید (PAAm) یا پلی اتیلن
 ۱۱ اکسید، با یک عامل اتصال عرضی تشکیل می‌شوند و یک شبکه همگن ایجاد می‌کنند. این یکنواختی منجر به
 ۱۲ خواص مکانیکی ثابت می‌شود، اما هیدروژل‌های SN را نرم، شکننده و مستعد پارگی تحت نیروهای کششی کم
 ۱۳ و تورم زیاد می‌کند [۳۳، ۳۴]، که مناسب بودن آنها را برای کاربردهای با کارایی بالا محدود می‌کند [۳۵، ۳۶].
 ۱۴ هیدروژل‌های چند شبکه‌ای، از جمله سامانه‌های DN و TN، از دو یا چند شبکه پلیمری در هم تنیده تشکیل
 ۱۵ شده‌اند که معمولاً یک پلی‌الکترولیت سفت و سخت با اتصالات عرضی متراکم را با یک پلیمر خنثی انعطاف‌پذیر
 ۱۶ و با اتصالات عرضی سست ترکیب می‌کنند. این طراحی ناهمگن، استحکام مکانیکی، انعطاف‌پذیری و خواص قابل
 ۱۷ تنظیم را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد و از دوام هیدروژل‌های SN پیشی می‌گیرد [۳۶]. به طور خاص،
 ۱۸ هیدروژل‌های چند شبکه‌ای، قابلیت کشش قابل توجه، کرنش بالاتر، همراه با رسانایی الکتریکی بالا، مقاومت
 ۱۹ عالی در برابر خستگی و بازیابی موثر آسیب را نشان می‌دهند. این ویژگی‌ها، هیدروژل‌های چند شبکه‌ای را برای
 ۲۰ حسگرهای کرنش در دستگاه‌های پوشیدنی بسیار مناسب می‌کند و امکان تشخیص حساس حرکات انسان را
 ۲۱ فراهم می‌کند [۳۶]. هیدروژل‌های چند شبکه‌ای همچنین عملکرد مکانیکی برتر را در مقایسه با هیدروژل‌های
 ۲۲ SN نشان می‌دهند که پتانسیل آنها را در کاربردهای حسگری برجسته‌تر می‌کند [۳۷]. شکل ۲ برخی از
 ۲۳ کاربردهای حسگرهای کرنشی قابل پوشیدن جهت نظارت لحظه‌ای در مراقبت‌های بهداشتی، پایش سلامت
 ۲۴ انسان و رباتیک نرم را نشان می‌دهد.

¹ Single network (SN)

² Double network (DN)

³ Triple network (TN)



شکل ۲. فناوری حسگر کرنشی قابل پوشیدن نظارت لحظه‌ای را در مراقبت‌های بهداشتی و مهندسی زیست-پزشکی، علوم ورزشی، رباتیک نرم و توسعه بازی‌ها و واقعیت مجازی، پروتزهای منعطف تسهیل می‌کند [۳۸].

Figure 2. Wearable strain sensor technology facilitates real-time monitoring in healthcare and biomedical engineering, sports science, soft robotics, and the development of gaming and virtual reality, soft prosthetic hand [38].

روش ساخت هیدروژل‌ها نیز تأثیر عمیقی بر ویژگی‌های نهایی آن‌ها دارد. روش‌های اتصال عرضی شیمیایی (با پیوندهای کووالانسی) شبکه‌های پایدار و با استحکام بالا ایجاد می‌کنند [۳۹-۴۱]. در مقابل، روش‌های اتصال فیزیکی (مانند پیوند هیدروژنی، شبکه‌سازی یونی یا انجماد-ذوب) برگشت‌پذیر بوده و غالباً نیاز به مواد شیمیایی سمی ندارند، اما استحکام مکانیکی کمتری ارائه می‌دهند [۴۲، ۴۳]. راهکارهای نوین مانند استفاده از شبکه‌های دوگانه (ترکیب شیمیایی و فیزیکی) برای دستیابی به تعادل بهینه بین استحکام و رسانایی توسعه یافته‌اند [۴۴، ۴۵]. با این حال، یک چالش عمده، تولید زباله الکترونیکی ناشی از غیرقابل بازیافت بودن حسگرهای مبتنی بر هیدروژل‌های شیمیایی پایدار است [۴۶]. جدول ۱ خلاصه‌ای از مطالعات اخیر در زمینه فناوری حسگر کرنش مقاومتی بر پایه هیدروژل را ارائه می‌دهد. این جدول چهار روش اصلی ساخت (ریخته‌گری ساده^۱، قالب‌گیری^۲، چاپ^۳ و غوطه‌وری^۴) را با ترکیب مواد مشخص، نوع هدایت (یونی، الکترونی یا بر پایه نانوماده)، همچنین ساختار داخلی شبکه هیدروژل (مثلاً SN، DN، TN) نشان می‌دهد.

¹ Simple casting

² Molding

³ Printing

۱ بر اساس نتایج، هیدروژل‌های رسانای الکترونی حاوی ساختار کامپوزیتی، به‌ویژه انواع حاوی نانومواد، متداول‌ترین
 ۲ روش ساخت در میان انواع حسگرهای کرنش مقاومتی برای کاربردهای پایش سلامت انسان هستند.
 ۳ نانوپرکننده‌ها، رسانایی الکترونی را به‌طور قابل توجهی افزایش داده، موجب افزایش حساسیت و بهبود استحکام
 ۴ مکانیکی می‌شوند [۴۷]، در حالی که ماتریس پلیمری هیدروژل، انعطاف‌پذیری، کشسانی و زیست‌سازگاری لازم
 ۵ را فراهم می‌کند. این ترکیب باعث می‌شود هیدروژل‌های رسانا گزینه‌ای ایده‌آل برای حسگرهای پوشیدنی
 ۶ باشند.

۷ جدول ۱. مروری بر روش‌های رایج ساخت، طبقه‌بندی‌ها و کاربردهای حسگرهای کرنشی مقاومتی بر پایه‌ی هیدروژل.

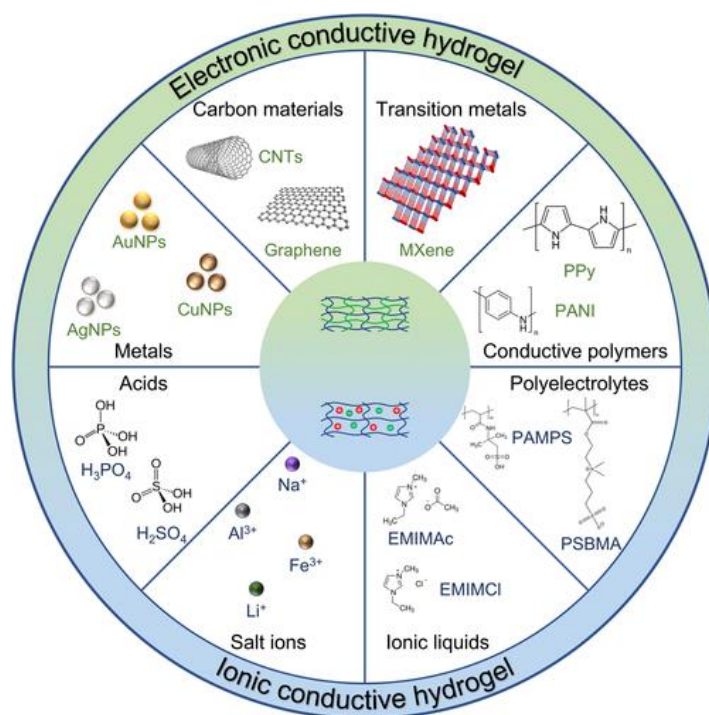
۸ **Table 1. An overview of common fabrication methods, classifications, and applications of hydrogel-based**
 ۹ **resistive strain sensors.**

Fabrication Technique	Sample	Application	Hydrogel network	Ref.
simple casting	PPy/phytic acid/isopropanol	Electronic systems (piezoresistive)	SN	[48]
	PU/gold nanoparticle	Monitoring physiological signals (resistive)	SN	[49]
	Natural rubber/ acetylene black	Human motion detection (resistive)	SN	[50]
	PVA-CNF-phytic acid	Wearable devices, smart robotics, and healthcare monitoring systems (resistive)	DN	[51]
	PVA/PAA/ ChCl/urea	Flexible electronics (resistive)	DN	[52]
Molding	PAAm/sodium alginate/ MoS ₂ /PEDOT:PSS	Wearable sensors in healthcare monitoring (resistive)	DN	[53]
	PEDOT:PSS/PDMS	Human movement (resistive)	DN	[54]
	PAM/BA- Ag@PDA	Wearable sensors for healthcare (resistive)	DN	[55]
	Poly(AA-co-SMA)/c-CNF/Fe ³⁺	Body monitoring (resistive)	TN	[56]
	PAM-gelatin/LiCl	Human-machine interaction control system (resistive)	DN	[57]
	LMNPs@rGO/PAA	Wearable devices (resistive)	SN	[58]
Printing	Natural rubber coated photosensitive elastomer resin /graphene nanoplatelet	Wearable sensor in health care monitoring (piezoresistive)	DN	[59]
	PAAm/agar/calcium alginate	Wearable soft resistive strain sensor (resistive)	DN	[60]
	Silkfibroin/PAAm/ PAAc	Wearable electronics (resistive)	TN	[61]

Dip coating	PEDOT:PSS/PVA	Bioflexible Electronics (resistive)	DN	[62]
	Oxidized guar gum/MWCNTs-SH	Wireless human-machine interfaces (resistive)	SN	[63]
	PDMS/graphene	Human motion detection (piezoresistive)	SN	[64]
	PDMS/carbon black /CNTs	Wearable Electronics (resistive)	SN	[65]
	PSKF@rGO/SiO ₂ -PDMS	Wearable resistive strain sensors (resistive)	DN	[66]
	P:P@p-PSF	Electronic skin (piezoresistive)	>TN	[67]

۳ انواع ساختارهای هیدروژل رسانا برای حسگرهای کرنشی مقاومتی

سازوکار انتقال بار حسگرهای مقاومتی کرنشی ساخته شده از هیدروژل‌های رسانا عمدتاً در دو گروه اصلی قابل دسته‌بندی هستند: حسگرهای مبتنی بر رسانایی یونی و حسگرهای مبتنی بر رسانایی الکترونیکی (شکل ۳).



شکل ۳. طبقه‌بندی هیدروژل‌های رسانا به دو دسته رساناهای یونی و رساناهای الکترونیکی [۷۰].

Figure 3. Classification of conductive hydrogels into two categories: ionic conductors and electronic conductors [70].

- ۱ در دسته اول، هیدروژل به عنوان بستری نرم با رسانایی یونی عمل می‌کند که در آن هدایت الکتریکی از طریق
- ۲ جابه‌جایی یون‌های آزاد (مانند Na^+ ، Cl^- ، Li^+ یا یون‌های همراه با زنجیره‌های پلی‌الکترولیت در شبکه
- ۳ هیدراته پلیمری صورت می‌پذیرد [۶۹]. در حالی که در دسته دوم، با ادغام نانومواد رسانا) نظیر نانولوله‌های
- ۴ کربنی [۷۱]، گرافن [۷۲]، MXene ها [۷۳]، ذرات کربنی [۷۴]، نانوذرات فلزی [۷۵] یا پلیمرهای رسانا
- ۵ مانند PEDOT:PSS [۷۶] در ماتریس هیدروژل، یک شبکه رسانای الکترونی سه‌بعدی و پیوسته شکل می‌گیرد.
- ۶ عملکرد حسگری در این کامپوزیت‌ها عمدتاً وابسته به تغییر در اتصالات این شبکه تحت تأثیر کرنش است؛ به
- ۷ طوری که اعمال کشش باعث تغییر فاصله بین پرکننده‌ها، افزایش فاصله تونل‌زنی الکترونی، تغییر جهت‌گیری
- ۸ ذرات یا ایجاد گسست‌های ریز در شبکه شده و در نهایت منجر به تغییر مقاومت الکتریکی قابل اندازه‌گیری
- ۹ می‌شود [۷۷]. به دلیل وابستگی شدید شبکه رسانا به تغییرات ریز ساختاری، حسگرهای مبتنی بر سازوکار
- ۱۰ الکترونی عموماً از حساسیت بسیار بالاتری نسبت به حسگرهای یونی برخوردارند.
- ۱۱ پاسخ الکترومکانیکی حسگرهای کرنش مقاومتی توسط سازوکارهای عملیاتی گوناگونی کنترل می‌شود که به‌طور
- ۱۲ ذاتی به ترکیب ماده، ساختارهای میکرو/نانومقیاس و روش ساخت مرتبط هستند. در حالی که حسگرهای کرنش
- ۱۳ متداول عمدتاً دارای سازوکار تغییر شکل هندسی^۱ هستند، حسگرهای کرنش مقاومتی نوظهور از پدیده‌های
- ۱۴ جایگزین، از جمله گسست شبکه‌ی هادی مانند ایجاد ناپیوستگی^۲، انتشار کنترل‌شده‌ی ریزترک‌ها^۳، و اثرات
- ۱۵ تونل‌زنی^۴ کوانتومی، برای دستیابی به حساسیت و کشسانی بالا بهره می‌برند [۲]. شکل ۴ سازوکارهای مختلف
- ۱۶ پاسخ‌دهی در حسگرهای کرنش مقاومتی مبتنی بر هیدروژل را نشان می‌دهد. در ادامه به بررسی هر یک از
- ۱۷ سازوکارها پرداخته شده است.
- ۱۸ • اثر هندسی: تغییر مقاومت الکتریکی در حسگرهای کرنش مقاومتی بر پایه‌ی هیدروژل، تنها ناشی از تغییرات
- ۱۹ ابعادی ماکروسکوپی نمونه تحت کرنش است.
- ۲۰ • سازوکار گسست: این سازوکار که در مواد کامپوزیتی (مثلاً پرکننده‌های رسانا در ماتریس پلیمری) غالب است،
- ۲۱ شامل جدایش فیزیکی ذرات یا مسیرهای هدایتی شبکه هنگام کشش ماده است. این اختلال باعث افزایش
- ۲۲ شدید مقاومت الکتریکی و تغییر پاسخ حسگر می‌شود.
- ۲۳ • انتشار ترک: ریزترک‌های طراحی‌شده یا ذاتی در یک لایه یا فیلم رسانا می‌توانند ضریب حساسیت حسگر را
- ۲۴ به‌طور چشمگیری افزایش دهند. کرنش جزئی باعث بازشدگی ترک‌ها شده و با قطع مسیرهای عبوری جریان،
- ۲۵ مقاومت الکتریکی را افزایش می‌دهد.

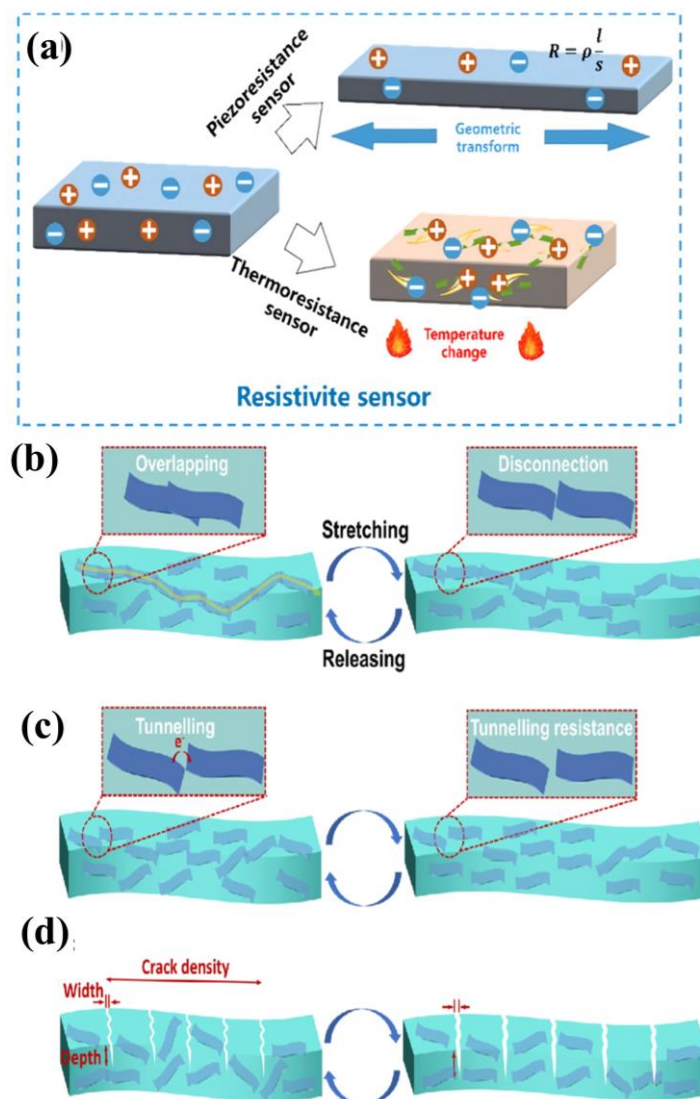
¹ Geometrical effect

² disconnection

³ crack propagation

⁴ tunneling effect

- ۱ • اثر تونل زنی: انتقال بار در نانوکامپوزیت‌هایی با فاصله‌ی نانومقیاس میان ذرات رسانا صرفاً توسط تونل زنی
- ۲ کوانتومی کنترل می‌شود؛ پدیده‌ای که طی آن الکترون‌ها از سد پتانسیل بین ذرات مجاور عبور می‌کنند.
- ۳ افزایش فاصله بین ذره‌ای تحت کشش موجب کاهش جریان تونلی شده و افزایش غیرخطی در مقاومت
- ۴ الکتریکی ایجاد می‌کند.



شکل ۴. مکانیزم پاسخ حسگرهای کرنش مقاومتی بر پایه‌ی هیدروژل، (الف) اثر هندسی [۷۸]، (ب) قطع ارتباط [۷۹]، (ج) اثر تونل زنی [۷۹] و (د) گسترش ترک. [۷۹].

Figure 4. Response mechanism hydrogel-based resistive strain sensor, (a) geometrical effect [78], (b) disconnection [79], (c) tunneling effect [79] and (d) crack propagation. Reused with permission from reference [79].

۴ مشخصه‌های کلیدی حسگری در هیدروژل‌های حسگر کرنش

- ۲ عملکرد حسگرهای کرنشی مبتنی بر هیدروژل‌های رسانا با مجموعه‌ای از مشخصه‌های کلیدی سنجش شامل
- ۳ ضریب حساسیت، کشش پذیری، شفافیت، و زمان پاسخ و بازیابی ارزیابی می‌شود که پاسخ‌دهی الکترومکانیکی،
- ۴ قابلیت اطمینان و مناسب بودن آن‌ها برای کاربردهای عملی را تعریف می‌کنند. در این میان، ضریب حساسیت
- ۵ (GF) تغییر نسبی مقاومت یا رسانایی الکتریکی به ازای واحد کرنش را نشان می‌دهد [۸۰]. مقدار GF بالا
- ۶ (معمولاً بیش از ۵۰) برای تشخیص سیگنال‌های فیزیولوژیک ظریف مانند نبض یا لرزش تارهای صوتی ضروری
- ۷ است، در حالی که GF پایین‌تر (۱ تا ۵) اغلب برای حرکات بزرگ مقیاس مانند خمش مفاصل کافی است [۳۸].
- ۸ • حساسیت (GF): حسگرهای مبتنی بر هیدروژل‌های رسانای الکترونی عموماً GF بسیار بالاتری را نسبت به
- ۹ انواع یونی نشان می‌دهند. این برتری ناشی از سازوکارهای مبتنی بر شبکه‌های نفوذ الکترون در این مواد
- ۱۰ است که تغییرات ساختاری نانومتری ناشی از کرنش را به‌طور مؤثری به تغییر مقاومت الکتریکی تبدیل
- ۱۱ می‌کند [۸۱]. در مقابل، در هیدروژل‌های رسانای یونی، انتقال بار عمدتاً به حرکت یون‌ها وابسته است که
- ۱۲ ارتباط ضعیف‌تری با کرنش دارد و حساسیت آن‌ها عمدتاً محدود به اثرات هندسی است [۸۱].
- ۱۳ • کشش‌پذیری: هیدروژل‌های یونی معمولاً از کشش‌پذیری بسیار بالاتری (اغلب بیش از ۱۰۰۰٪) برخوردارند.
- ۱۴ نمونه‌های بارز شامل شبکه‌های پلی‌آکریل‌آمید (PAAm) با اتصال عرضی فیزیکی با نمک‌های مختلف (تا
- ۱۵ ۲۱۶۰٪) و کامپوزیت‌هایی مانند PAAm / آلژینات / CaCl_2 (تا ۱۷۰۰٪) است [۸۲]. در مقابل، هیدروژل‌های
- ۱۶ رسانای الکتریکی که از افزودن مواد رسانا مانند پلیمرهای رسانا، نانومواد، فلزات یا نانولوله‌های کربنی تشکیل
- ۱۷ شده‌اند، اغلب از کشش‌پذیری محدودتری برخوردارند (معمولاً کمتر از ۳۰۰٪). به‌عنوان نمونه،
- ۱۸ هیدروژل‌های PVA-PPy و PEDOT:PSS/PVA/GL به‌ترتیب کشش‌پذیری حدود ۳۶٪ و ۳۰۰٪ را نشان
- ۱۹ دادند [۸۳، ۸۴].
- ۲۰ هیدروژل‌های رسانای یونی از تحرک یون‌ها در شبکه پلیمری هیدراته بهره می‌برند و امکان کشش‌پذیری ذاتی را
- ۲۱ فراهم می‌کنند که اغلب بدون شکست مکانیکی تا ۱۰۰۰٪ کرنش فراتر می‌روند. در مقابل، هیدروژل‌های رسانای
- ۲۲ الکترونی حاوی نانومواد سفت و سختی هستند که ضمن افزایش قابل توجه ضریب اندازه‌گیری حساسیت (GF)
- ۲۳ از طریق سازوکار نفوذ، تمایل به محدود کردن تغییر شکل الاستیک ماتریس دارند و در نتیجه محدوده
- ۲۴ کشش‌پذیری باریک‌تری ایجاد می‌کنند [۱۸].
- ۲۵ • شفافیت نوری: هیدروژل‌های یونی می‌توانند شفافیت نوری بسیار بالاتری داشته باشند، زیرا فاقد
- ۲۶ افزودنی‌های رسانای تیره‌رنگ (مانند نانولوله کربنی یا گرافن) هستند. رسانایی یونی در این سامانه‌ها عمدتاً
- ۲۷ توسط غلظت یون و تحرک مولکولی در فاز آبی شبکه تعیین می‌شود [۸۵].

- زمان پاسخ و بازیابی: یک عامل حیاتی برای حسگرهای کرنش با عملکرد بالا، که در لوازم الکترونیکی پوشیدنی و نظارت بر حرکت انسان استفاده می‌شوند، پاسخ گذرای آن‌ها است که با زمان پاسخ و بازیابی مشخص می‌شود [۸۶]. معمولاً یک کرنش خاص با استفاده از سامانه‌های جمع‌آوری داده با سرعت بالا اعمال می‌شود و برای یک دوره حفظ می‌شود تا پایداری حسگر تحت کرنش اعمال شده ارزیابی شود. متعاقباً، کرنش آزاد می‌شود و سیگنال بازیابی نظارت می‌شود. سپس پاسخ زمانی حسگر برای ارزیابی عملکرد آن در طول این فرآیند توصیف رسم می‌شود [۸۷].

جدول ۲. مقایسه مشخصه‌های کلیدی حسگری برای هیدروژل‌های رسانای یونی در مقابل هیدروژل‌های رسانای الکترونیکی در حسگرهای کرنش مقاومتی.

Table 2. Comparison of key sensing parameters for ionic conductive hydrogels vs. electronic conductive hydrogels in resistive strain sensors.

Hydrogel-based sensor category	Composition of material	Stretchability (%)	Gauge Factor	Response Time (ms)	Ref.
Electronically conductive hydrogel-based resistive strain sensor	CNTs, LM, and micron-scale iron powders with Ecofle	350	19.8	83	[88]
	MXene-AgNW	60	224	30	[89]
	Polyurethane/ Ag NWs/ Thiolated Graphene	60	11.8	40	[90]
	Au/PDMS	1	5000	137	[91]
	SR/ carbon black (CB) SWCNT	120	1.25	60	[92]
	TPU/ CNT/ rGO	400	150	57	[93]
	(CNT)/ Ecoflex	200	43.8	100	[94]
	Graphene nanoplatelets /PDMS	97	6.3	-	[95]
	Gelatin/PAAM/PEDOT:PSS	2850	1.58	200	[96]
	sodiumalginate/PAM/Ca ²⁺ /PANI	500	3.82	192	[97]
	PVA/PAM polyaniline	700	2.37	-	[98]
	PPyNT/PAA/PVA	500	1.38	-	[99]
	PVA- MXene hydrogel	200	2.3	-	[100]
	SiO ₂ /CNT/Na ⁺	426	3.1	100	[101]
Electronically conductive hydrogel-based resistive strain	PVA/ phytic acid/ amino-polyhedral oligomeric silsesquioxane	125	3.44	220	[102]
	CNFs-Fe ³⁺ /Gly organohydrogel	1032	4.86	427	[103]
	LMs-GO-PPPK	2300	9.59	190	[104]
	PVA/polyacrylic amide-acrylic acid /Gly/Na	1000	8.303	160	[105]
	Cellulose ionic hydrogels (CIHs)	126	0.3	-	[106]
	Gelatin hydrogel/genipin	>500	0.6	280	[107]

۲ داده‌های جدول ۲ نشان می‌دهد یک رابطه معنا داری بین کشش‌پذیری و ضریب حساسیت و زمان پاسخ در
 ۳ حسگرهای کرنشی بر پایه‌ی هیدروژل‌های رسانای یونی و الکترونی را نشان می‌دهد. هیدروژل‌های رسانای یونی
 ۴ به مهاجرت یون‌های متحرک در ماتریس پلیمری آبی متکی هستند. این فرآیند ذاتاً توسط نرخ انتشار یونی
 ۵ محدود می‌شود، که اغلب منجر به تأخیر قابل توجه در پاسخ سیگنال، به ویژه تحت محرک‌های مکانیکی یا
 ۶ الکتریکی با فرکانس بالا می‌شود [۱۰۸]. در مقابل، هیدروژل‌های رسانای الکترونی سینتیک پاسخ بهتری را نشان
 ۷ می‌دهند [۱۰۹].

۸ جدول ۳. مروری مقایسه‌ای بر تفاوت‌های کلیدی بین هیدروژل‌های رسانای یونی و الکترونیکی در حسگرهای کرنش
 ۹ مقاومتی.

۱۰ Table 3. A comparative overview of the key differences between ionic and electronic conductive hydrogels in
 ۱۱ resistive strain sensors.

Feature	Ion Conductive Hydrogels	Electron Conductive Hydrogels
Charge Carriers	Ions (e.g., Na^+ , Cl^- , Li^+) [69]	Electrons (e.g., CNTs, Graphene, PEDOT:PSS) [68]
Stretchability	Ultra-high (typically >1000%)[110]	Moderate to Low (typically <500%)[111]
Sensitivity (GF)	Relatively Lower [112]	High to Very High [112]
Transparency	Highly Transparent (Optical clarity)[85]	Opaque (Black or Dark colored)[85]
Sensing Mechanism	Ion migration within the polymer matrix[113]	Disruption of the percolation network[114]
Key Limitation	Dehydration (water loss) over time[115]	Rigidity of fillers limits deformation[116]

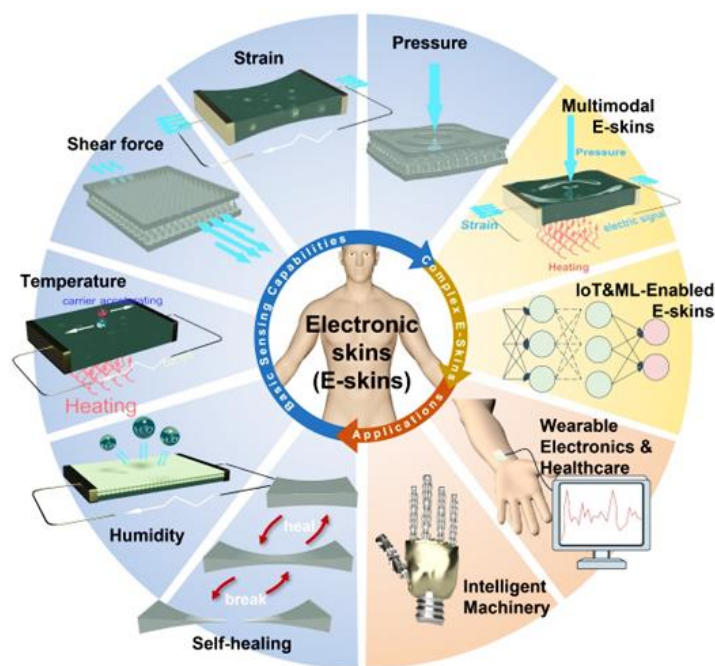
Best Application	Large-scale body movements (Joints)[117]	Subtle physiological signals (Pulse, Voice)[118]
-------------------------	---	---

برخلاف سامانه‌های وابسته به یون، این مواد انتقال سریع حامل بار را از طریق مسیرهای الکترونی غیر مستقر تسهیل می‌کنند. در نتیجه، هیدروژل‌های رسانای الکترونی تأخیر بسیار کمتری و زمان بازیابی سریع‌تری ارائه می‌دهند که آن‌ها را برای کاربردهای با حساسیت بالا که در آنها بازخورد فوری سیگنال بسیار مهم است، ایده‌آل می‌کند. همان‌طور که در جدول ۳ نیز ارائه شده است، هیدروژل‌های یونی و الکترونی هر کدام ویژگی‌های متمایزی دارند. انتخاب بین آن‌ها به نیازمندی‌های خاص کاربرد بستگی دارد: هیدروژل‌های یونی برای کاربردهای نیازمند کشش‌پذیری فوق‌العاده و شفافیت مناسب‌ترند، در حالی که هیدروژل‌های الکترونیکی برای حسگری با حساسیت بسیار بالا ارجحیت دارند.

۵ کاربردهای پوشیدنی پیشرفته‌ی حسگرهای کرنش مقاوم‌تی مبتنی بر هیدروژل رسانای یونی و الکترونی

حسگرهای کرنشی مقاوم‌تی بر پایه هیدروژل‌های رسانا به فناوری پیشرو در حوزه پوشیدنی‌های نظارت بر حرکت و سلامت انسان تبدیل شده‌اند. این جایگاه مرهون ترکیبی از مزایای منحصربه‌فرد آنهاست: انعطاف‌پذیری مکانیکی استثنایی، تحمل تغییر شکل‌های بزرگ، طراحی ساختاری ساده و نیز قابلیت‌های حسگری پایدار ایستا و پویا که توسط سازوکارهای حسگری دیگر قابل دستیابی نیست [۱۱۹، ۱۲۰]. حرکات مفاصل انسان معمولاً شامل کرنش‌های غیرخطی و با دامنه بالا می‌شود که از ۲۰ تا ۴۰ درصد برای چرخش مچ دست تا بیش از ۱۰۰ درصد در هنگام خم شدن انگشت یا زانو متغیر است. این امر مستلزم موادی است که بتوانند این کشش‌های قابل توجه را بدون شکست مکانیکی یا افت سیگنال تحمل کنند [۱۲۱]. هیدروژل‌های رسانای یونی که از شبکه‌های پلیمری حاوی نمک‌ها، یا گروه‌های عامل‌دار تشکیل شده‌اند، حتی تحت کرنش شدید نیز مسیرهای انتقال یونی برگشت‌پذیر خود را حفظ می‌کنند [۱۲۲]. در مقابل، هیدروژل‌های نانوکامپوزیتی رسانای الکترونی حاوی نانولوله‌های کربنی، MXene، گرافن یا پلیمرهای رسانا، مدولاسیون وابسته به کرنش در شبکه‌های پیوندی (percolation) خود را نشان می‌دهند که امکان دستیابی به فاکتور حساسیت بالا در محدوده‌های وسیعی از کرنش را فراهم می‌سازد [۱۲۳]. این ویژگی‌ها به هیدروژل‌های مقاوم‌تی امکان می‌دهد تا هم حرکات بزرگ مقیاس بدن و هم تغییر شکل‌های ظریف میکرونی مانند انقباض عضله، عمل بلع یا امواج نبض را تشخیص دهند [۱۲۴]. پیشرفت‌های اخیر در خواص خودترمیمی [۱۲۵]، ضدیخ زدگی [۱۲۶] و مقاوم در برابر خشک‌شدن [۱۲۷] هیدروژل‌ها، دوام آن‌ها را بیشتر افزایش داده و عملکرد قابل اطمینانی را در سناریوهای حرکتی روزمره و

۱ پایش زیست‌پزشکی ممکن ساخته است. در نتیجه، در گستره پژوهش‌های اخیر و نمونه‌های اولیه پوشیدنی از
 ۲ سامانه‌های تحلیل راه‌رفتن و بازتوانی مفاصل تا نظارت بر حالات چهره، رباتیک نرم و پلتفرم‌های تشخیص
 ۳ زود هنگام بیماری حسگرهای کرنشی مقاومتی بر پایه هیدروژل به‌طور قاطعی عملکرد بهتری داشته و نسبت به
 ۴ حسگرهای هیدروژلی خازنی، پیزوالکتریک، تریوالکتریک و نوری، به عنوان سازوکار اصلی حسگری برای پایش
 ۵ عملی سلامت انسان، ترجیح داده می‌شوند.



۵. کاربردهای برجسته اخیر حسگرهای کرنش مقاومتی مبتنی بر هیدروژل با رسانایی یونی و الکترونیکی
 [۱۲۸].

Figure 5. Prominent recent applications of ionically and electronically conductive hydrogel-based resistive strain sensors [128].

۱۳ بر این اساس همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است [۸۷]، برجسته‌ترین کاربردهای اخیر حسگرهای
 ۱۴ کششی مقاومتی هیدروژلی رسانا در سه حوزه الکترونیک پوشیدنی [۳۸]، پایش حرکت انسان [۱۲۹] و پوست
 ۱۵ الکترونیکی (e-skin) [۱۲۸] می‌باشد.

۶ نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده

- ۱ مقاله مروری حاضر، پیشرفت‌های اخیر در حسگرهای کرنش مقاومتی انعطاف‌پذیر مشتق شده از هیدروژل‌های
- ۲ رسانی یونی و الکترونی را بررسی کرده است. ما ابتدا انواع مختلف هیدروژل رسانی را بررسی کردیم. سپس،
- ۳ سازوکارهای انتقال و قابلیت‌های حسگری حسگرهای کرنش مقاومتی را تجزیه و تحلیل کردیم. حسگرهای
- ۴ هیدروژل رسانی الکترونی به دلیل استحکام مکانیکی برتر، رسانایی الکتریکی بالا و کشش‌پذیری عالی، به عنوان
- ۵ کاندیداهای بسیار امیدوارکننده‌ای برای ردیابی حرکت، لوازم الکترونیکی پوشیدنی و رابط‌های انسان و ماشین
- ۶ ظهور کرده‌اند. با وجود این پیشرفت، چندین چالش مهم در رابطه با ساختار حسگرها باید برطرف شوند:
- ۷ • پایداری محیطی و حفظ رسانایی: محتوای بالای آب ذاتی در هیدروژل‌ها، آن‌ها را مستعد یخ‌زدگی در شرایط
- ۸ دمای زیر صفر و کم‌آبی در محیط‌های خشک می‌کند. این تغییرات فیزیکی، رسانایی الکتریکی و قابلیت
- ۹ اطمینان حسگری را به خطر می‌اندازد و کاربرد آن‌ها را در آب و هوای نامناسب محدود می‌کند. توسعه
- ۱۰ هیدروژل‌هایی که رسانایی بالا و پایداری عملکردی را در طیف وسیعی از دما حفظ می‌کنند، برای نسل
- ۱۱ بعدی الکترونیک انعطاف‌پذیر ضروری است.
- ۱۲ • دوام عملیاتی بلندمدت: در کاربردهای دنیای واقعی، هیدروژل‌های رسانی تحت تنش‌های مکانیکی پیچیده‌ای
- ۱۳ قرار می‌گیرند. بارگذاری چرخه‌ای پایدار اغلب منجر به تخریب برگشت‌ناپذیر شبکه رسانی داخلی می‌شود
- ۱۴ که منجر به کاهش عملکرد مکانیکی و حسگری می‌شود. در نتیجه، نیاز مبرمی به هیدروژل‌های چندمنظوره
- ۱۵ وجود دارد که رسانایی بالا را با چسبندگی قوی، قابلیت انطباق و قابلیت‌های خودترمیمی ادغام کنند.
- ۱۶ در حالی که ترکیب پرکننده‌های رسانی سفت و سخت، عملکرد حسگرهای کرنش مقاومتی مبتنی بر هیدروژل
- ۱۷ الکترونی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد، اغلب خطری برای انعطاف‌پذیری ذاتی و قابلیت‌های حفظ
- ۱۸ رطوبت آن‌ها ایجاد می‌کند. چالش اصلی، پراکندگی ضعیف برخی از عوامل رسانی در محلول است. این امر اغلب
- ۱۹ منجر به تجمع پرکننده و تنش موضعی می‌شود و می‌تواند منجر به شکست ساختاری زودرس یا شکستگی
- ۲۰ ماتریس هیدروژل شود [۱۳۰]. علاوه بر این، هیدروژل‌های رسانی یونی معمولی اغلب محدودیت‌هایی مانند
- ۲۱ چسبندگی سطحی ضعیف، استحکام مکانیکی ناکافی و پایداری حسگری متناقض را نشان می‌دهند که مانع از
- ۲۲ کاربرد عملی آن‌ها در حسگری می‌شود. برای غلبه بر این کاستی‌ها، تحقیقات اخیر بر تقویت شبکه‌های هیدروژل
- ۲۳ با نانوپرکننده‌های رسانی معدنی که هم خواص الکتریکی استثنایی و هم پراکندگی برتر دارند، متمرکز شده
- ۲۴ است. نمونه‌های قابل توجه شامل گرافن، نانولوله‌های کربنی (CNTs) و کاربیدها/نیتrideهای فلزات واسطه
- ۲۵ دوبعدی (MXenes) هستند که برای پر کردن شکاف بین دوام مکانیکی و عملکرد حسگری با عملکرد بالا
- ۲۶ استفاده می‌شوند [۱۳۰].
- ۲۷ • زیست‌سازگاری و ایمنی بین سطحی: هنگامی که این مواد در کاربردهای زیست‌پزشکی - مانند پوست
- ۲۸ مصنوعی یا الکترودهای زیستی - ادغام می‌شوند، باید بدون ایجاد پاسخ‌های التهابی یا عوارض جانبی سمی،
- ۲۹ تماس منسجم و یکپارچه‌ای با بافت‌های بیولوژیکی برقرار کنند. تضمین زیست‌سازگاری بلندمدت و به

۱	حداقل رساندن واکنش‌های ایمنی، پیش‌نیاز استقرار ایمن دستگاه‌های پوشیدنی و کاشتنی مبتنی بر
۲	هیدروژل است.
۳	پیش‌بینی‌های بازار نشان‌دهنده رشد قابل توجه است، به طوری که انتظار می‌رود بازار جهانی حسگرهای زیستی
۴	پوشیدنی تا سال ۲۰۳۰ از ارزش چند میلیارد دلاری فراتر رود که این امر با افزایش تقاضا برای نظارت بر
۵	سلامت، افزایش جمعیت سالمندان و افزایش شیوع بیماری‌های مزمن تقویت می‌شود. با بلوغ این فناوری،
۶	حسگرهای زیستی پوشیدنی کاربردهایی در بخش‌های مراقبت‌های بهداشتی، ورزشی، تناسب اندام و تندرستی
۷	پیدا خواهند کرد و صنعت، ارزش نظارت مداوم بر سلامت را به طور فزاینده‌ای به رسمیت می‌شناسد. تقاضا برای
۸	دستگاه‌هایی که علائم حیاتی، فعالیت بدنی، کیفیت خواب و سطح استرس را ردیابی می‌کنند، افزایش خواهد
۹	یافت. ادغام پیشرفته با تلفن‌های هوشمند، ساعت‌های هوشمند و سایر دستگاه‌های متصل، تجربیات کاربر را از
۱۰	طریق تجزیه و تحلیل داده‌های بلادرنگ بهبود می‌بخشد و بینش‌های بهداشتی و سلامتی متناسبی را ارائه
۱۱	می‌دهد [۶].

۱۲ مراجع

[1]	Rajagopalan, S., Chellamuthu, G., Kambhampati, S. B. S., & Chodavarapu, M. N. S. (2025). Understanding the Basics of Sensor Technology. In <i>Biomaterials in Orthopaedics & Trauma</i> . 22. 377–391. Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-3017-2_22	۱۳ ۱۴ ۱۵
[2]	Amjadi, M., Kyung, K. U., Park, I., & Sitti, M. (2016). Stretchable, Skin-Mountable, and Wearable Strain Sensors and Their Potential Applications: A Review. <i>Advanced Functional Materials</i> , 26(11), 1678–1698. https://doi.org/10.1002/adfm.201504755	۱۶ ۱۷ ۱۸
[3]	Yi, H., Wang, S., Mei, S., & Li, Z. (2024). Conductive polymer composites for resistive flexible strain sensors. <i>Polymer</i> , 307. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127286 .	۱۹ ۲۰
[4]	Shin, Y., Lee, H. S., Jeong, H., & Kim, D.-H. (2024). Recent advances in conductive hydrogels for soft biointegrated electronics: Materials, properties, and device applications. <i>Wearable Electronics</i> , 1, 255–280. https://doi.org/10.1016/j.wees.2024.10.004 .	۲۱ ۲۲ ۲۳
[5]	Wang, H., Du, J., & Mao, Y. (2025). Hydrogel-Based Continuum Soft Robots. <i>Gels</i> , 11(4), 1–54. https://doi.org/10.3390/gels11040254 .	۲۴ ۲۵
[6]	Vo, D. K., & Trinh, K. T. L. (2024). Advances in Wearable Biosensors for Healthcare: Current Trends, Applications, and Future Perspectives. <i>Biosensors</i> , 14(11), 560. https://doi.org/10.3390/bios14110560 .	۲۶ ۲۷ ۲۸
[7]	Han, P., Liang, S., Zou, H., & Wang, X. (2024). Structure, principle and performance of flexible conductive polymer strain sensors: a review. <i>Journal of Materials Science: Materials in Electronics</i> , 35(11), 1–23. https://doi.org/10.1007/s10854-024-12474-y	۲۹ ۳۰ ۳۱
[8]	Zhao, S., Liu, D., & Yan, F. (2025). Wearable Resistive-Type Stretchable Strain Sensors: Materials and Applications. <i>Advanced Materials</i> , 37(5), 1–33. https://doi.org/10.1002/adma.202413929 .	۳۲ ۳۳
[9]	Fotohi, P., Ahmadkhani, L., & Baghban, A. (2018). Synthesis and evaluation of a	۳۴

- graphene/polyvinylpyrrolidone/polyaniline nanocomposite paper-based biosensor for determining cholesterol in human blood. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 16(96), 15–26. <https://doi.org/20.1001.1.17355400.1396.16.95.1.6>. (In persian). ۱
۲
۳
- [10] Khan, M. U. A., Aslam, M. A., Abdullah, M. F. Bin, Al-Arjan, W. S., Stojanovic, G. M., & Hasan, A. (2024). Hydrogels: Classifications, fundamental properties, applications, and scopes in recent advances in tissue engineering and regenerative medicine – A comprehensive review. *Arabian Journal of Chemistry*, 17(10), 105968. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105968> ۴
۵
۶
۷
- [11] Rahimi Mamghani, K., Naghib, S. M., & Zahedi, A. (2017). A review of the synthesis and characterization of hydrogels. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 92(16), 66–75. <https://doi.org/20.1001.1.17355400.1396.16.92.6.5>.(In persian). ۸
۹
۱۰
- [12] Kougkolos, G., Golzio, M., Laudebat, L., Valdez-Nava, Z., & Flahaut, E. (2023). Hydrogels with electrically conductive nanomaterials for biomedical applications. *Journal of Materials Chemistry B*, 11(10), 2036–2062. <https://doi.org/10.1039/d2tb02019>. ۱۱
۱۲
۱۳
- [13] Chen, Z., Xu, C., Chen, X., Huang, J., & Guo, Z. (2025). Advances in Electrically Conductive Hydrogels: Performance and Applications. *Small Methods*, 9(4), 1–39. <https://doi.org/10.1002/smtd.202401156>. ۱۴
۱۵
۱۶
- [14] Sun, F. Y., Liu, L. F., Liu, T., Wang, X. Bin, Qi, Q., Hang, Z. S., Chen, K., Xu, J. H., & Fu, J. J. (2023). Vascular smooth muscle-inspired architecture enables soft yet tough self-healing materials for durable capacitive strain-sensor. *Nature Communications*, 14(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35810-y>. ۱۷
۱۸
۱۹
۲۰
- [15] Cheng, Y., Wang, R., Chan, K. H., Lu, X., Sun, J., & Ho, G. W. (2018). A Biomimetic Conductive Tendril for Ultrastretchable and Integratable Electronics, Muscles, and Sensors. *ACS Nano*, 12(4), 3898–3907. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b01372>. ۲۱
۲۲
۲۳
- [16] Zou, Y., Liao, Z., Zhang, R., Song, S., Yang, Y., Xie, D., Liu, X., Wei, L., Liu, Y., & Song, Y. (2025). Cellulose nanofibers/liquid metal hydrogels with high tensile strength, environmental adaptability and electromagnetic shielding for temperature monitoring and strain sensors. *Carbohydrate Polymers*, 348. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122788>. ۲۴
۲۵
۲۶
۲۷
- [17] Yang, Y., Zhong, S., Wang, X., Gao, Y., & Cui, X. (2023). Development and applications of mussel-inspired composite hydrogels for flexible bioelectronics. *Chemical Engineering Journal*, 474. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145891>. ۲۸
۲۹
۳۰
- [18] Wang, J., Yang, B., Jiang, Z., Liu, Y., Zhou, L., Liu, Z., & Tang, L. (2024). Recent Advances of Conductive Hydrogels for Flexible Electronics. *Electronic Materials Review*, 5, 101–131. <https://doi.org/10.3390/electronicmat5030008>. ۳۱
۳۲
۳۳
- [19] Zhu, Y., Chen, B., Liu, Y., Tan, T., Gao, B., Lu, L., Zhu, P., & Mao, Y. (2025). Recent Advances in Conductive Hydrogels for Electronic Skin and Healthcare Monitoring. *Biosensors*, 15(7), 463. <https://doi.org/10.3390/bios15070463>. ۳۴
۳۵
۳۶
- [20] Salimian, F., Hemmati, A., & Ghaemi, A. (2025). Study of the Effect of Various Nanostructures in the Measurement of CO₂ Sensors by Electrical and Thermal Conductivity Methods. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 24(2026), 36–47. <https://doi.org/10.22034/ijche.2025.484217.1456>. (In persian). ۳۷
۳۸
۳۹
۴۰
- [21] Yuan, Y., Zhang, Y., Duan, H., Zhang, Y., Lu, L., Emel, A., Pozdnyakov, A. S., Zhu, P., & Mao, ۴۱

- Y. (2025). Recent Advances in Conductive Composite Hydrogels for Electronic Skin Applications. *Gels*, 11(10), 1–36. <https://doi.org/10.3390/gels11100822>. ١
٢
- [22] Song, J., Mou, C., Balakrishnan, G., Wang, Y., & Rajagopalan, M. (2023). Hysteresis-Free and High-Sensitivity Strain Sensing of Ionically Conductive Hydrogels. *Advanced NanoBiomed Research Published*, 3(2), 2200132. <https://doi.org/10.1002/anbr.202200132>. ٣
٤
٥
- [23] Zhang, Y., Li, M., Han, X., Fan, Z., Zhang, H., & Li, Q. (2021). High-strength and highly electrically conductive hydrogels for wearable strain sensor. *Chemical Physics Letters*, 769(January), 138437. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.138437>. ٦
٧
٨
- [24] Wang, R., Cheng, C., Wang, H., & Wang, D. (2024). Swollen hydrogel nanotechnology: Advanced applications of the rudimentary swelling properties of hydrogels. *ChemPhysMater*, 3(4), 357–375. <https://doi.org/10.1016/j.chphma.2024.07.006>. ٩
١٠
١١
- [25] Zhuang, J., Zhang, X., Jin, W., Mei, F., Xu, Y., He, L., Tan, S., Cai, G., Cheng, D., & Wang, X. (2025). Conductive, self-healing and adhesive cellulose nanofibers-based hydrogels as wearable strain sensors and supercapacitors. *Industrial Crops and Products*, 225, 120547. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120547>. ١٢
١٣
١٤
١٥
- [26] Shen, Z., Zhang, Z., Zhang, N., Li, J., Zhou, P., Hu, F., Rong, Y., Lu, B., & Gu, G. (2022). High-Stretchability, Ultralow-Hysteresis Conducting Polymer Hydrogel Strain Sensors for Soft Machines. *Advanced Materials*, 34(32), 1–8. <https://doi.org/10.1002/adma.202203650>. ١٦
١٧
١٨
- [27] Wang, H., & Zhao, W. (2023). Application of hydrogel for energy storage and conversion. *Next Materials*, 1(4), 100049. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2023.100049>. ١٩
٢٠
- [28] Zhao, Z., Rong, Y., Cui, P., Qin, G., Wang, H., & Huang, X. (2024). High elongation, low hysteresis, fatigue resistant gel electrolyte for supercapacitor and strain sensor. *Journal of Power Sources*, 622, 235307. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235307> ٢١
٢٢
٢٣
- [29] Li, M., Wang, Y., Wei, Q., Zhang, J., An, Y., Chen, X., Liu, Z., & Jiao, D. (2025). A triple-network PVA/cellulose nanofiber composite hydrogel with excellent strength, transparency, conductivity, and antibacterial properties. *Journal of Materials Science and Technology*, 237, 312–322. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2025.03.035> ٢٤
٢٥
٢٦
٢٧
- [30] Zhang, Y., Yuan, Y., Duan, H., Zhu, P., & Mao, Y. (2025). Bionic Hydrogel-based Stretchable Devices for Bioelectronics Applications. In *Journal of Bionic Engineering*, 22, (3). <https://doi.org/10.1007/s42235-025-00670-3> ٢٨
٢٩
٣٠
- [31] Pocurull, E., Fontanals, N., Calull, M., & Aguilar, C. (2024). Natural and Synthetic Polymers for Biomedical and Environmental Applications. *Polymers*, 16, 591–641. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816911-7.00020-7> ٣١
٣٢
٣٣
- [32] Gul, K., Gan, R. Y., Sun, C. X., Jiao, G., Wu, D. T., Li, H. Bin, Kenaan, A., Corke, H., & Fang, Y. P. (2022). Recent advances in the structure, synthesis, and applications of natural polymeric hydrogels. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(14), 3817–3832. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1870034>. ٣٤
٣٥
٣٦
٣٧
- [33] Hou, X., Huang, B., Zhou, L., Liu, S., Kong, J., & He, C. (2023). An Amphiphilic Entangled Network Design Toward Ultratough Hydrogels. *Advanced Materials*, 35, 2301532. <https://doi.org/10.1002/adma.202301532>. ٣٨
٣٩
٤٠

- [34] Huang, Y., Jayathilaka, P. B., Islam, S., Tanaka, C. B., Silberstein, M. N., Kilian, K. A., & Kruzic, J. J. (2022). Structural aspects controlling the mechanical and biological properties of tough , double network hydrogels. *Acta Biomaterialia Journal*, 138, 301–312. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2021.10.044>
- [35] Bhuyan, M. M., Hasan, N., & Jeong, J.-H. (2025). Single- and Multi-Network Hydrogels for Soft Electronics—A Review. *Gels*, 11(7), 480. <https://doi.org/10.3390/gels11070480>
- [36] Xin, H. (2022). Double-Network Tough Hydrogels: A Brief Review on Achievements and Challenges. *Gels*, 8(4), 247. <https://doi.org/10.3390/gels8040247>
- [37] Chen, Q., Chen, H., Zhu, L., & Zheng, J. (2015). Fundamentals of double network hydrogels. *Journal of Materials Chemistry B*, 3(18), 3654–3676. <https://doi.org/10.1039/c5tb00123d>.
- [38] Souri, H., Banerjee, H., Jusufi, A., Radacsi, N., Stokes, A. A., Park, I., Sitti, M., & Amjadi, M. (2020). Wearable and Stretchable Strain Sensors: Materials, Sensing Mechanisms, and Applications. *Advanced Intelligent Systems*, 2(8), 2000039. <https://doi.org/10.1002/aisy.202000039>
- [39] Khan, S., Maryam, L., Gulzar, A., Mansoor, M. A., & Iqbal, M. (2024). Review : smart and active hydrogels in biotechnology — synthetic techniques and applications. *Journal of Materials Science*, 59(35), 16449–16471. <https://doi.org/10.1007/s10853-024-10187-5>.
- [40] Geng, S., Shah, F. U., Liu, P., Antzutkin, O. N., & Oksman, K. (2017). Plasticizing and crosslinking effects of borate additives on the structure and properties of poly(vinyl acetate). *RSC Advances*, 7, 7483. <https://doi.org/10.1039/c6ra28574k>.
- [41] Tran, H. D. N., Dong, K., Chee, Y., Huynh, C., & Hai, D. (2020). Journal of Industrial and Engineering Chemistry A comprehensive review on polymeric hydrogel and its composite : Matrices of choice for bone and cartilage tissue engineering. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 89, 58–82. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.06.017>.
- [42] Ciolacu, D. E. (2025). Hydrogels from Renewable Resources : Advances in 3D Networks Based on Cellulose and Hemicellulose. *Polymer*, 17, 2760. <https://doi.org/10.3390/polym17202760>
- [43] Zhang, J., Wang, Y., Liu, Y., Odent, J., & Takeoka, Y. (2025). Covalent design of ionogels: bridging with hydrogels and covalent adaptable networks. *Polym. Chem*, 16, 2327–2357. <https://doi.org/10.1039/d5py00217f>
- [44] Zhu, J., Tao, J., Yan, W., & Song, W. (2023). Pathways toward wearable and high-performance sensors based on hydrogels: Toughening networks and conductive networks. *National Science Review*, 10(9), 180. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwad180>.
- [45] Yao, K., Shen, Y., Chen, C., Qin, F., Song, S., Dong, X., & Liu, W. (2025). Physically and chemically crosslinked rare-earth-doped hydrogels with dual fluorescence / conductive sensing abilities. *Chinese Chemical Letters*, 111531. <https://doi.org/10.1016/j.cclet.2025.111531>.
- [46] Ren, H., Zou, S., He, S., & Rong, Q. (2024). Dual physical cross-linking supramolecular hydrogel with self-healing, recyclable and stretchable capabilities as wearable strain sensor for human motion monitoring. *European Polymer Journal*, 221, 113572. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.113572>.
- [47] Sony, A., Radhakrishnan, S., Rinku, E. J. J., Thomas, M. T., & Honey, K. (2025). Filler □ enhanced conductive elastomers for next □ generation electronics applications : a short review. *Discover*

- Applied Sciences*, 7, 1330. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07290-w>. 1
- [48] Pan, L., Chortos, A., Yu, G., Wang, Y., Isaacson, S., Allen, R., Shi, Y., Dauskardt, R., & Bao, Z. (2014). An ultra-sensitive resistive pressure sensor based on hollow-sphere microstructure induced elasticity in conducting polymer film. *Nature Communications*, 5, 1–8. 2
<https://doi.org/10.1038/ncomms4002>. 3
 4
 5
- [49] Wu, S.-D., Hsu, S., Ketelsen, B., & Bittinger, S. (2023). Fabrication of Eco-Friendly Wearable Strain Sensor Arrays via Facile Contact Printing for Healthcare Applications. *Small Methods*, 7(9), 2300170. 6
<https://doi.org/10.1002/smt.202300170>. 7
 8
- [50] Keawmaungkom, S., Wiroonpochit, P., Srisawadi, S., Srimongkol, S., Wong-ekkabut, J., Phongphanphanee, S., Phibanchon, S., Chisti, Y., & Hansupalak, N. (2025). Flexible Thin-Layer Strain Sensors Made of Natural Rubber. *ACS Applied Polymer Materials*, 7(18), 12468–12479. 9
<https://doi.org/10.1021/acsapm.5c02305>. 10
 11
 12
- [51] Feng, S., Tan, J., Li, Y., Yuan, W., Yu, W., Li, G., Meng, C., & Guo, S. (2025). Cellulose nanofibril-enhanced strong ionic gel with dynamic hydrogen bonds for cryogenic and dehydration-resistant tactile sensing. *Carbohydrate Polymers*, 370, 124454. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.124454> 13
 14
 15
- [52] Che, W., He, X., Zheng, X., Wang, K., Shi, J., Song, Z., Liu, B., Zeng, X., & Zuo, M. (2025). Rational design of anti-freezing dual-network hydrogels with superior mechanical and self-healing properties for advanced flexible electronics. *Chemical Engineering Journal*, 515, 163607. 16
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.163607>. 17
 18
 19
- [53] Shinde, S., & Lee, H. E. (2025). Wearable Strain Sensors via Tough and Conductive Hydrogel-Based MoS₂ Composites for Real-Time Motion Tracking. *ACS Omega*, 10(23), 25102–25110. 20
<https://doi.org/10.1021/acsomega.5c03752>. 21
 22
- [54] Bhattacharjee, M., Soni, M., Escobedo, P., & Dahiya, R. (2020). PEDOT:PSS Microchannel-Based Highly Sensitive Stretchable Strain Sensor. *Advanced Electronic Materials*, 6(8), 2000445. 23
<https://doi.org/10.1002/aelm.202000445>. 24
 25
- [55] Shi, W., Li, H., Chen, J., & Chee Ching, Y. (2024). Stretchable, Self-Healing, and Bioactive Hydrogel with High-Functionality N,N'-bis(acryloyl)cystamine Dynamically Bonded Ag@polydopamine Crosslinkers for Wearable Sensors. *Advanced Science*, 19(11), 2404451. 26
<https://doi.org/10.1002/advs.202404451>. 27
 28
 29
- [56] Zhou, H., Jin, Z., Yuan, Y., Zhang, G., Zhao, W., Jin, X., Ma, A., Liu, H., & Chen, W. (2020). Self-repairing flexible strain sensors based on nanocomposite hydrogels for whole-body monitoring. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 592, 124587. 30
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124587>. 31
 32
 33
- [57] Liu, R., Wang, Y., Chu, H., Li, Y., Li, Y., Zhao, Y., Tian, Y., & Xia, Z. (2024). High-performance gelatin-based hydrogel flexible sensor for respiratory monitoring and human – machine interaction. *Chemical Engineering Journal*, 502, 157975. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.157975>. 34
 35
 36
- [58] Su, Y., Zhao, J., Zhan, W., Yuan, H., Wu, L., & Sui, G. (2022). A multifunctional hydrogel fabricated via ultra-fast polymerization by graphene oxide-adsorbed liquid metal nanodroplets. *Chemical Engineering Journal*, 435, 135018. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135018>. 37
 38
 39
- [59] Zhang, X., Sinha, T. K., Kim, J. K., Oh, J. S., & Lee, J. (2022). Fabrication of graphene reinforced silicone-based 3D printed tactile sensor: An approach towards an applicable piezo-sensor. *Journal of* 40
 41

<i>Applied Polymer Science</i> , 139(24), 5–7. https://doi.org/10.1002/app.52341	١
	٢
[60] Wang, J., Liu, Y., Su, S., Wei, J., Rahman, S. E., Ning, F., Christopher, G., Cong, W., & Qiu, J. (2019). Ultrasensitive Wearable Strain Sensors of 3D Printing Tough and Conductive Hydrogels. <i>Polymers</i> , 11(11), 1873. https://doi.org/10.3390/polym11111873 .	٣ ٤ ٥
[61] Wu, K., Li, J., Li, Y., Wang, H., Zhang, Y., Guo, B., Yu, J., & Wang, Y. (2024). 3D Printed Silk Fibroin-Based Hydrogels with Tunable Adhesion and Stretchability for Wearable Sensing. <i>Advanced Functional Materials</i> , 34(46), 2404451. https://doi.org/10.1002/adfm.202404451 .	٦ ٧ ٨
[62] Zhang, X., Lu, C., Zhang, Y., Cai, Z., He, Y., & Liang, X. (2025). In Situ 3D Printing of Conformal Bioflexible Electronics via Annealing PEDOT : PSS / PVA Composite Bio-Ink. <i>Polymers</i> , 17(11), 1479. https://doi.org/10.3390/polym17111479 .	٩ ١٠ ١١
[63] Nezafati, M., Salimiyan, N., Salighehdar, S., & Sedghi, R. (2025). Facile fabrication of biomimetic and conductive hydrogels with robust mechanical properties and 3D printability for wearable strain sensors in wireless human-machine interfaces. <i>Chemical Engineering Journal</i> , 509, 161112. https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.161112 .	١٢ ١٣ ١٤ ١٥
[64] Jung, Y., Jung, K., Park, B., Choi, J., Kim, D., Park, J., Ko, J., & Cho, H. (2019). Wearable piezoresistive strain sensor based on graphene □ coated three □ dimensional micro □ porous PDMS sponge. <i>Micro and Nano Systems Letters</i> , 7. https://doi.org/10.1186/s40486-019-0097-2 .	١٦ ١٧ ١٨
[65] Huang, L., Zhang, Y., Zhang, P., Li, Y., Huang, X., & Guo, C. (2024). Highly Sensitive Flexible Resistive Strain Sensor Based on Swelling-Coating Method for Wearable Electronics. <i>IEEE Sensors Journal</i> , 24(13), 21369–21377. https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3404092 .	١٩ ٢٠ ٢١
[66] Lu, D., Liao, S., Chu, Y., Cai, Y., Wei, Q., Chen, K., & Wang, Q. (2023). Highly Durable and Fast Response Fabric Strain Sensor for Movement Monitoring Under Extreme Conditions. <i>Advanced Fiber Materials</i> , 5(1), 223–234. https://doi.org/10.1007/s42765-022-00211-1 .	٢٢ ٢٣ ٢٤
[67] Nie, F., Gu, Y., Zhao, L., Li, L., Shen, F., Song, J., Liu, J., Zhang, G., Gao, J., Song, P., Shi, Y., & Tang, L. (2024). Construction of Conductive Polymer Coatings onto Flexible PDMS Foam Composites with Exceptional Mechanical Robustness for Sensitive Strain Sensing Applications. <i>Advanced Sensor Research</i> , 3(4), 2300140. https://doi.org/10.1002/adsr.202300140 .	٢٥ ٢٦ ٢٧ ٢٨
[68] Zhang, X., Chen, X., Ye, Z., & Liu, W. (2023). Conductive hydrogels for bioelectronics: molecular structures, design principles, and operation mechanisms. <i>J. Mater. Chem. C</i> , 11, 10785–10808. https://doi.org/10.1039/d3tc01821k	٢٩ ٣٠ ٣١
[69] Yang, J., Liu, Y., Yan, W., Zhou, P., Wang, Z., Wang, Y., Zhang, Y., Zhang, Z., Mo, F., Ji, Z., & Wang, Y. (2025). Conductive hydrogel-based epidermal electrodes for electrophysiological monitoring. <i>J. Mater. Chem. C</i> , 13, 22491–22514. https://doi.org/10.1039/d5tc01896j .	٣٢ ٣٣ ٣٤
[70] Fan, Z., Ji, D., & Kim, J. (2023). Recent Progress in Mechanically Robust and Conductive-Hydrogel-Based Sensors. <i>Advanced Intelligent Systems</i> , 5(10), 2300194. https://doi.org/10.1002/aisy.202300194 .	٣٥ ٣٦ ٣٧
[71] Ren, J., Yang, X., & Xiang, X. (2025). Carboxymethyl cellulose-reinforced sandwich-structured carbon nanotube composite hydrogels for strain sensing and joule heating. <i>Carbohydrate Polymers</i> , 369, 124291. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.124291 .	٣٨ ٣٩ ٤٠

- [72] Zhao, Y., Mu, S., Hu, B., Hao, J., Xia, Y., Zhongling, Y., Han, Z., Kong, X., Zhu, X., & Xu, Z. (2025). Polyvinyl alcohol / silk fibroin / graphene hydrogel-based flexible sensor with self-healing , ultra-stretchable , and eco-friendly properties for advanced wearable electronics and human-machine interaction application. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 445, 138566 Contents. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2025.138566>. ١
٢
٣
٤
٥
- [73] Zhou, J., Yufan, S., Zuqing, S., Chen, T., & Lu, X. (2026). High Performance Polydopamine and Silver Nanoparticles Modified MXene- Based Hydrogel Flexible Strain Sensors for Transfer-Learning Assisted Hand- Written Recognition and Wrist Movement Monitoring Jiaye. *Nanoscale*, 18, 2558–2573. <https://doi.org/10.1039/D5NR04094A>. ٦
٧
٨
٩
- [74] Li, R., Zhang, B., Wang, Y., Kong, L., Zhang, C., Zhang, J., & Qin, Y. (2026). A highly sensitive and stretchable double-layer conductive network structure CB/TPU/CB/MXene strain sensor for human–machine interaction. *Polym. Chem.*, 17, 108–116. <https://doi.org/10.1039/d5py00753d> ١٠
١١
١٢
- [75] Kim, H., Kim, G., Kang, J. H., Oh, M. J., Qaiser, N., & Hwang, B. (2025). Intrinsically conductive and highly stretchable liquid metal/carbon nanotube/elastomer composites for strain sensing and electromagnetic wave absorption. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 8(1), 20–27. <https://doi.org/10.1007/s42114-024-01093-0>. ١٣
١٤
١٥
١٦
- [76] Zhao, R., Yan, X., Lin, H., Zhao, Z., & Song, S. (2025). Mechanical tough , stretchable , and adhesive PEDOT : PSS-based hydrogel flexible electronics towards multi-modal wearable application. *Chemical Engineering Journal*, 510, 161645 Contents. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.161645>. ١٧
١٨
١٩
- [77] Huang, F., Hu, J., & Yan, X. (2022). Review of Fiber- or Yarn-Based Wearable Resistive Strain Sensors : Structural Design , Fabrication Technologies and Applications. *Textiles*, 2, 81–111. <https://doi.org/10.3390/textiles2010005>. ٢٠
٢١
٢٢
- [78] Liu, D., Huyan, C., Wang, Z., Guo, Z., & Zhang, X. (2023). Conductive polymer based hydrogels and their application in wearable sensors : a review. *Mater. Horiz*, 10, 2800–2823. <https://doi.org/10.1039/d3mh00056g>. ٢٣
٢٤
٢٥
- [79] Osman, A., & Lu, J. (2023). 3D printing of polymer composites to fabricate wearable sensors : A comprehensive review. *Materials Science & Engineering R*, 154, 100734. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2023.100734>. ٢٦
٢٧
٢٨
- [80] Park, H., Park, J., Kang, S., & Jeong, S. (2024). Sensors and Actuators : A . Physical Nanoarchstructured MoS 2 -based strain sensor with exceptional gauge factor. *Sensors and Actuators: A. Physical*, 380(February), 116050. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.116050>. ٢٩
٣٠
٣١
- [81] Zhao, W., Lin, Z., Sun, Z., Zhu, Z., & Lin, W. (2023). Road Narrow-Inspired Strain Concentration to Wide-Range-Tunable Gauge Factor of Ionic Hydrogel Strain Sensor. *Advanced Science*, 10(28), 2303338. <https://doi.org/10.1002/advs.202303338>. ٣٢
٣٣
٣٤
- [82] Tang, L., Wu, S., Qu, J., Gong, L., & Tang, J. (2020). A review of conductive hydrogel used in flexible strain sensor. *Materials*, 13(18), 1–17. <https://doi.org/10.3390/ma13183947>. ٣٥
٣٦
- [83] He, H., Li, H., Pu, A., Li, W., Ban, K., & Xu, L. (2023). Hybrid assembly of polymeric nanofiber network for robust and electronically conductive hydrogels. *Nature Communications*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36438-8>. ٣٧
٣٨
٣٩
- [84] Chen, C., Zhu, M., Yu, A., Liu, S., & Zhao, Q. (2025). Annelid Skin Inspired Microstructure Strain Sensor Based on Conductive Polymer Hydrogel for Human Motion Monitoring and Gesture ٤٠
٤١

- Recognition. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 7(13), 615. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.5c00914>. ١
- [85] Yue, Y. (2023). Nanocomposite Hydrogels for Strain Sensing Based on Optical and Electrical Signals : A Review. *Chem. Commun.*, 59, 8894–8910. <https://doi.org/10.1039/D3CC01580G>. ٢
٣
- [86] Shi, J., Wang, D., Sarkodie, B., Wu, D., Mao, Z., Liu, Z., Feng, Q., & Xu, W. (2024). Strain Sensors for Human Movement Detection Based on Fibrous Membranes Comprising Thermoplastic Polyurethane, Ag Nanoparticles, and Carbon Nanotubes. *ACS Applied Nano Materials*, 7(2), 2051–2061. <https://doi.org/10.1021/acsanm.3c05335>. ٤
٥
٦
٧
- [87] Asad, M., Khalid, U., & Chang, S. H. (2022). Flexible strain sensors for wearable applications fabricated using novel functional nanocomposites : A review. *Composite Structures*, 284(January), 115214. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115214>. ٨
٩
١٠
- [88] Hou, Y., Zhang, H., & Zhou, K. (2025). Ultraflexible Sensor Development via 4D Printing: Enhanced Sensitivity to Strain, Temperature, and Magnetic Fields. *Advanced Science*, 12(7), 1–12. <https://doi.org/10.1002/advs.202411584>. ١١
١٢
١٣
- [89] Song, C., Lee, H., Park, C., Lee, B., Kim, J., Park, C., Lai, C. H., & Cho, S. J. (2025). Advances in Crack-Based Strain Sensors on Stretchable Polymeric Substrates: Crack Mechanisms, Geometrical Factors, and Functional Structures. *Polymers*, 17(7), 941. <https://doi.org/10.3390/polym17070941>. ١٤
١٥
١٦
- [90] Zhang, L., Li, H., Lai, X., Gao, T., & Zeng, X. (2020). Three-dimensional binary-conductive-network silver nanowires@thiolated graphene foam-based room-temperature self-healable strain sensor for human motion detection. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 12(39), 44360–44370. <https://doi.org/10.1021/acsaami.0c13442>. ١٧
١٨
١٩
٢٠
- [91] Wang, C., Zhao, J., Ma, C., Sun, J., Tian, L., Li, X., Li, F., Han, X., Liu, C., Shen, C., Dong, L., Yang, J., & Pan, C. (2017). Detection of non-joint areas tiny strain and anti-interference voice recognition by micro-cracked metal thin film. *Nano Energy*, 34, 578–585. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.02.050>. ٢١
٢٢
٢٣
٢٤
- [92] Guo, X., Huang, Y., Zhao, Y., Mao, L., Gao, L., Pan, W., Zhang, Y., & Liu, P. (2017). Highly stretchable strain sensor based on SWCNTs/CB synergistic conductive network for wearable human-activity monitoring and recognition. *Smart Materials and Structures*, 26(9), 095017. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa79c3>. ٢٥
٢٦
٢٧
٢٨
- [93] Zhang, X., Xiang, D., Wu, Y., Harkin-Jones, E., Shen, J., Ye, Y., Tan, W., Wang, J., Wang, P., Zhao, C., & Li, Y. (2021). High-performance flexible strain sensors based on biaxially stretched conductive polymer composites with carbon nanotubes immobilized on reduced graphene oxide. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 151(June), 106665. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106665>. ٢٩
٣٠
٣١
٣٢
٣٣
- [94] Hu, T., & Sheng, B. (2024). A Highly Sensitive Strain Sensor with Wide Linear Sensing Range Prepared on a Hybrid-Structured CNT/Ecoflex Film via Local Regulation of Strain Distribution. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 16, 21061–21072. <https://doi.org/10.1021/acsaami.4c00648>. ٣٤
٣٥
٣٦
- [95] Zhang, J., Gao, K., Weng, S., & Zhu, H. (2024). Graphene Nanoplatelets/Polydimethylsiloxane Flexible Strain Sensor with Improved Sandwich Structure. *Sensors*, 24, 2856. <https://doi.org/10.3390/s24092856>. ٣٧
٣٨
٣٩
- [96] Sun, H., Zhao, Y., Wang, C., Zhou, K., Yan, C., Zheng, G., Huang, J., Dai, K., Liu, C., & Shen, C. (2020). Ultra-Stretchable, durable and conductive hydrogel with hybrid double network as high ٤٠
٤١

- performance strain sensor and stretchable triboelectric nanogenerator. *Nano Energy*, 76, 105035. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105035>. 1
2
- [97] Yu, M., Gao, Y., Hong, H., Wang, T., & Peng, Z. (2025). A versatile, highly stretchable, and anti-freezing alginate/polyacrylamide/polyaniline multi-network hydrogel for flexible strain sensors and supercapacitors. *International Journal of Biological Macromolecules*, 288, 138740. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138740>. 3
4
5
6
- [98] Cai, J., Huang, S., Zhou, W., He, X., Liang, H., Zhou, J., Zhao, C., & Xu, T. (2025). A stretchable and self-healing poly(vinyl alcohol)/polyacrylamide/polyaniline multi-network hydrogel for flexible strain sensors. *Materials Today Communications*, 44, 111976. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.111976>. 7
8
9
10
- [99] Wang, S., Yang, H., Chen, Y., Hu, B., Tian, P., Xue, X., Wang, Y., Li, Y., & Jing, X. (2025). Strong and highly conducting PPyNT/PAA/PVA triple network hydrogel: scalable construction and strain sensing. *Materials Chemistry Frontiers*, 9, 2623–2633. <https://doi.org/10.1039/d5qm00349k>. 11
12
13
- [100] Chae, A., Murali, G., Lee, S. Y., Gwak, J., Kim, S. J., Jeong, Y. J., Kang, H., Park, S., Lee, A. S., Koh, D. Y., In, I., & Park, S. J. (2023). Highly Oxidation-Resistant and Self-Healable MXene-Based Hydrogels for Wearable Strain Sensor. *Advanced Functional Materials*, 33(24), 1–11. <https://doi.org/10.1002/adfm.202213382>. 14
15
16
17
- [101] Zhang, X., Zhu, C., Yang, X., Ye, Y., Zhang, G., Yu, F., Chen, P., Zhu, Y., & Kang, Q. (2024). Conductive, sensitivity, flexibility, anti-freezing and anti-drying silica/carbon nanotubes/sodium ions modified sodium alginate hydrogels for wearable strain sensing applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 280(99), 135880. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135880>. 18
19
20
21
- [102] Shao, L., Li, Y., Ma, Z., Bai, Y., Wang, J., Zeng, P., Gong, P., Shi, F., Ji, Z., Qiao, Y., Xu, R., Xu, J., Zhang, G., Wang, C., & Ma, J. (2020). Highly Sensitive Strain Sensor Based on a Stretchable and Conductive Poly(vinyl alcohol)/Phytic Acid/NH₂-POSS Hydrogel with a 3D Microporous Structure. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 12(23), 26496–26508. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c07717>. 22
23
24
25
26
- [103] Fu, D., Xing, L., Xie, Y., Li, P., Yang, F., Sui, X., Liu, J., Chi, J., Huang, B., & Shen, J. (2025). Hybrid crosslinking cellulose nanofibers-reinforced zwitterionic poly (ionic liquid) organohydrogel with high-stretchable, anti-freezing, anti-drying as strain sensor application. *Carbohydrate Polymers*, 353, 123253. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123253>. 27
28
29
30
- [104] Zhou, J., Liu, Y., Zhuo, F., Chen, H., Cao, H., Fu, Y. Q., Xie, J., & Duan, H. (2024). Superior compressive and tensile bi-directional strain sensing capabilities achieved using liquid metal Hybrid-Hydrogels empowered by Machine learning algorithms. *Chemical Engineering Journal*, 479, 147790. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.147790>. 31
32
33
34
- [105] Huang, J., Peng, S., Gu, J., Chen, G., Gao, J., Zhang, J., Hou, L., Yang, X., Jiang, X., & Guan, L. (2020). Self-powered integrated system of a strain sensor and flexible all-solid-state supercapacitor by using a high performance ionic organohydrogel. *Materials Horizons*, 7(8), 2085–2096. <https://doi.org/10.1039/d0mh00100g>. 35
36
37
38
- [106] Tong, R., Chen, G., Pan, D., Qi, H., Li, R., Tian, J., Lu, F., & He, M. (2019). Highly Stretchable and Compressible Cellulose Ionic Hydrogels for Flexible Strain Sensors. *Biomacromolecules*, 20(5), 2096–2104. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.9b00322>. 39
40
41
- [107] Liu, J., Rao, Z., Dong, Y., Zheng, X., & Tang, K. (2025). Strong and conductive gelatin hydrogels 42

- enhanced by Hofmeister effect and genipin crosslinking for sensing applications. *European Polymer Journal*, 222, 113583. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.113583>. ١
٢
٣
- [108] Chen, R., Wang, L., Ji, D., Luo, M., Zhang, Z., Zhao, G., Chang, X., & Zhu, Y. (2025). Highly stretchable , conductive , and self-adhesive starch-based hydrogel for high-performance flexible electronic devices. *Carbohydrate Polymers*, 352, 123220. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123220>. ٤
٥
٦
٧
- [109] Chen, Y., Lu, K., Song, Y., Han, J., Yue, Y., Biswas, S. K., Wu, Q., & Xiao, H. (2019). A Skin-Inspired Stretchable , Self-Healing and Electro- Conductive Hydrogel with a Synergistic Triple Network for Wearable Strain Sensors Applied in Human-Motion Detection. *Nanomaterial*, 9(13), 1737. <https://doi.org/10.3390/nano9121737>. ٨
٩
١٠
١١
- [110] Fu, H., Wang, F., Cao, Z., Liu, L., Zhu, G., & Yao, J. (2023). Super tough , stretchable and transparent ionic conductive hydrogel for flexible sensor with excellent temperature tolerance. *Reactive and Functional Polymers*, 186, 105572. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105572>. ١٢
١٣
١٤
- [111] Luo, Y., Yang, Q., Chen, M., Long, K., Su, C., Li, J., Huang, M., Lu, A., & Guo, S. (2024). Stretchable , adhesive , conductive hydrogel initiated by liquid metal complex for multi-functional sensing. *Chemical Engineering Journal*, 496, 153674. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153674>. ١٥
١٦
١٧
- [112] Wang, Y., Gao, G., & Ren, X. (2021). Graphene assisted ion-conductive hydrogel with super sensitivity for strain sensor. *Polymer*, 215, 123340. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.123340>. ١٨
١٩
- [113] Najafloo, M., & Naji, L. (2024). Binary solvent-reinforced poly (vinyl alcohol)/sodium alginate double network hydrogel as a highly ion-conducting, resilient, and self-healing gel polymer electrolyte for flexible supercapacitors. *International Journal of Biological Macromolecules*, 279, 135008. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135008>. ٢٠
٢١
٢٢
٢٣
- [114] Kong, M., Yang, M., Li, R., Long, Y. Z., Zhang, J., Huang, X., Cui, X., Zhang, Y., Said, Z., & Li, C. (2024). Graphene-based flexible wearable sensors: mechanisms, challenges, and future directions. In *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 131,(6). Springer London. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12007-7>. ٢٤
٢٥
٢٦
٢٧
- [115] Xiao, L., Jiang, H., Zhang, D., Ou, C., Lai, J., Wang, M., Ma, Y., & Huang, Y. (2023). Designing anti-dehydration and ion-conductive tough hydrogels as environment-adaptable strain sensors for e-skin. *Chemical Engineering Journal*, 474, 145944. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145944>. ٢٨
٢٩
٣٠
- [116] Wang, Z., Cong, Y., & Fu, J. (2020). Stretchable and tough conductive hydrogels for flexible pressure and strain sensors. *Journal of Materials Chemistry B*, 8(16), 3437–3459. <https://doi.org/10.1039/c9tb02570g>. ٣١
٣٢
٣٣
- [117] Wu, Z., Zhang, L., Wang, M., Zang, D., Long, H., Weng, L., & Guo, N. (2025). A wearable ionic hydrogel strain sensor with double cross □ linked network for human – machine interface. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 8(17). <https://doi.org/10.1007/s42114-024-01083-2>. ٣٤
٣٥
٣٦
- [118] Ji, C., Wang, Y., Qi, Q., Li, Y., & Cao, L. (2025). Electrically Conductive Hydrogels for Flexible Wearable Devices : Materials , Design , and Applications. *Advanced Materials Technologies*, 10(21), 1–18. <https://doi.org/10.1002/admt.202501044>. ٣٧
٣٨
٣٩
- [119] Zhang, Z., Xu, Y., Zhang, Z., Zhang, S., Liu, J., Zhang, P., Sun, S., Wang, M., Dai, Z., & Qian, K. ٤٠

- (2025). Strain-Sensitive and Strain-Insensitive Flexible Electronics for Healthcare Monitoring. *Advanced Healthcare Material*, 15(5), 1–34. <https://doi.org/10.1002/adhm.202503333>. ١
٢
- [120] Jiao, C., Liu, J., Yan, S., Xu, Z., & Xu, W. (2025). Hydrogel-based soft bioelectronic interfaces and their applications. *J. Mater. Chem. C*, 13, 2620–2645. <https://doi.org/10.1039/d4tc04150j>. ٣
٤
- [121] Skalski, A., Walter, P., Podsiadły, B., Zych, M., & Kami, M. (2022). CNT / Graphite / SBS Conductive Fibers for Strain Sensing in Wearable Telerehabilitation Devices. *Sensors*, 22(3). <https://doi.org/10.3390/s22030800>. ٥
٦
٧
- [122] Rezaei, H., Muhammad, H., Shahab, N., Ghasem, M., Hossein, N., & Khonakdar, A. (2025). Conductive Hydrogels as Next- - Generation Materials for Flexible and Wearable Electronic Systems. *Polymer Engineering & Science*, 66(1), 1–32. <https://doi.org/10.1002/pen.70233>. ٨
٩
١٠
- [123] Uyanga, K. A., & Onyeukwu, E. J. (2025). Advancing Wearable Technologies with Hydrogels : Innovations and Future Perspectives. *Gels*, 11(2), 988. <https://doi.org/10.3390/gels11120988>. ١١
١٢
- [124] Tao, L.-Q., Wang, D.-Y., Tian, H., Ju, Z.-Y., Liu, Y., & Pang, Y. (2017). Self-adapted and Tunable Graphene Strain Sensors for Detecting Both Subtle and Large Human Motions. *Nanoscale*, 9, 8266–8273. <https://doi.org/10.1039/C7NR01862B>. ١٣
١٤
١٥
- [125] Yin, H., Liu, F., Abdiryim, T., & Liu, X. (2023). Self-Healing Hydrogels: From Synthesis to Multiple Applications. *ACS Materials Letters*, 5(7), 1787–1830. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.3c00320>. ١٦
١٧
١٨
- [126] Zhang, X., Qin, M., Ning, G., Zhang, T., Pang, J., Ye, Y., Chen, P., Li, G., & Zeng, X. (2026). An antifreezing and antidehydration interpenetrating polymer network conductive hydrogel for flexible and wearable strain sensors. *Measurement*, 257, 118783. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.118783>. ١٩
٢٠
٢١
٢٢
- [127] Liu, Y., Shen, S., Duan, Z., Deng, J., & Fan, D. (2025). Hydrogels for Long-Term Moisture Retention under Ambient Conditions : Inhibiting the Evaporation of Free Water from Macroscopic to Molecular Scales. *Advanced Functional Materials*, 35(47), 2504356. <https://doi.org/10.1002/adfm.202504356>. ٢٣
٢٤
٢٥
٢٦
- [128] Zhu, P., Li, Z., Pang, J., He, P., & Zhang, S. (2024). Latest developments and trends in electronic skin devices. *Soft Science*, 4(17). <https://doi.org/10.20517/ss.2024.05>. ٢٧
٢٨
- [129] Yao, X., Zhang, S., Qian, L., Wei, N., Nica, V., & Coseri, S. (2022). Super Stretchable , Self-Healing , Adhesive Ionic Conductive Hydrogels Based on Tailor-Made Ionic Liquid for High-Performance Strain Sensors. *Advanced Functional Materials*, 32, 2204565. <https://doi.org/10.1002/adfm.202204565>. ٢٩
٣٠
٣١
٣٢
- [130] Chen, J., Peng, H., He, H., Yan, B., Yang, Q., Gu, Y., Fu, R., & Chen, S. (2025). High-Strength Conductive Hydrogels Reinforced by Tannic Acid- Modified Silk Nanofibers for Wearable Strain Sensors. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 64(33), 16157–16168. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5c01739>. ٣٣
٣٤
٣٥
٣٦