



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر  
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال چهاردهم، شماره‌ی ۵۴  
تابستان ۱۴۰۲، صفحات ۵۵-۳۷

## "مقاله مروری"

# مروری بر نانو کامپوزیت‌های پلیمری هوشمند و کاربردهای آن‌ها

آیدا آدینه اصل

گروه مهندسی شیمی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

فرزانه غفاری

گروه مهندسی شیمی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

محراب فلاحی سامبران \*

گروه مهندسی شیمی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

Email: Mehrab.fallahi@aut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۱

## چکیده

مواد پلیمری که ظرفیت پاسخگویی به محرک‌های بیرونی را دارند به عنوان پلیمرهای پاسخگو به محرک یا پلیمرهای هوشمند نامیده می‌شوند. پلیمرهای هوشمند می‌توانند تغییرات برگشت پذیر بزرگی چه در خواص شیمیایی و چه در خواص فیزیکی را در برابر تفاوت‌های جزئی محیطی تجربه کنند. آن‌ها می‌توانند به یک محرک یا محرک دوگانه یا چندگانه مانند میدان الکتریکی، دما، میدان مغناطیسی، pH، شدت نور، مولکول‌های زنده و غیره پاسخ دهند. در هدف اصلی این مقاله، تشریح اهمیت پلیمرهای هوشمند و مواد کامپوزیتی آن‌ها در مقیاس نانو است. طبقه بندی پلیمرهای هوشمند همراه با آشناترین روش‌های سنتز و برخی از رایج ترین کاربردها به طور خلاصه در این مقاله بحث و بررسی شده است. برخی از کاربردهای رایج پلیمرهای هوشمند مانند حسگر/ حسگر زیستی، تصفیه پساب، دستگاه‌های ذخیره سازی داده‌ها، درمان سرطان و دستگاه‌های جراحی، سیستم‌های دارو و غیره در مقاله حاضر مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. کاوش چند رشته‌ای برای پیشرفت و توسعه نانو کامپوزیت‌های پلیمری هوشمند و کاربردهای آن‌ها بسیار ضروری است. دانشمندان پلیمر، شیمی‌دانان آلی / معدنی، دانشمندان مواد، اکولوژیست‌ها، فارماکولوژیست‌ها و متخصصان علوم پزشکی باید برای تحقق مواد نوآورانه جهت فراهم شدن الزامات تمدن مدرن در حال ظهور با یکدیگر همکاری کنند.

**کلیدواژه:** نانو کامپوزیت‌های پلیمری هوشمند، پلیمرهای پاسخگو به محرک، پلیمرهای هوشمند، نانو فناوری.

## مقدمه

مواد هوشمند معمولاً به آن دسته از مواد اطلاق می‌شود که با تغییر محرک‌های محیطی توانایی تغییر عملکرد یا خواص خود دارند. بنابراین، این نوع مواد معمولاً به پارامترهای محیطی از جمله pH، شدت نور، دما، میدان مغناطیسی، فشار، میدان الکتریکی و غیره حساس هستند. این مواد در برابر محرک‌ها می‌توانند پاسخ‌های متعددی از خود نشان دهند: از جمله تغییر رنگ، تغییر رسانایی، ثابت دی‌الکتریک تجمعی و قابلیت خود ترمیمی [۱]. در عصر مدرن نانو کامپوزیت‌های پلیمری هوشمند به دلیل خواص عملکردی بهتر در کاربردهای مختلف روز به روز توجهات زیادی را به خود جلب می‌کنند.

با این حال، پلیمر یک ترکیبی با وزن مولکولی بالاست که از واحدهای تکراری به نام مونومر تشکیل شده است. چندین دهه است که پلیمر مورد توجه محققان قرار گرفته است [۲]. پرمصرف‌ترین پلیمرهای طبیعی لاستیک و چوب هستند. این‌ها به طور گسترده به عنوان مواد پلیمری طبیعی استفاده می‌شوند. اما برخی ضعف‌های ساختاری و عملکردی، کاربرد گسترده آنها در صنایع نوظهور را محدود می‌کند. با این حال، دانشمندان از روش‌های مختلفی برای اصلاح پلیمرهای طبیعی استفاده کردند تا آن‌ها را به مواد با خواص عملکردی بهتر تبدیل کنند. به عنوان مثال، سلولز به عنوان یک پلیمر طبیعی از طریق واکنش شیمیایی با اسید نیتریک تبدیل به نیتروسولز شده و سپس با پخت حرارتی توسط گوگرد، تبدیل به یک لاستیک ولکانیزه می‌شود [۳]. این نوع پلیمرهای طبیعی با خواص بهبود یافته حتی در زمان حاضر نیز به طور گسترده به صورت تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرند.

با این حال، پلیمرهای طبیعی بهبود یافته نیز در مقایسه با تقاضاهای روز افزون و مدرن کافی نبوده و نیستند. بنابراین، در علم مواد یک دگرگونی اساسی به وجود آمده که مبتنی

بر پلیمرهای مصنوعی است. در صنایع پلیمری، انواع پلیمرهای هوشمند و دارای عامل شیمیایی به طور گسترده در قرن بیستم مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۴-۵]. ایده کامپوزیت-های پلیمری هوشمند چندین کاربرد خلاقانه فراتر از پلیمرهای سنتی ارائه می‌دهد. پرکاربردترین پلیمرهای هوشمند عبارتند از: پلیمرهای الکتروفعال (EAPs)؛ پلیمرهای قابل ترمیم<sup>۳</sup> و پلیمرهای فروالکتریک<sup>۴</sup>. پلیمرهای الکتروفعال مجموعه‌ای از مواد پلیمری هوشمند هستند که اندازه، شکل و مورفولوژی آن می‌تواند تحت تأثیر یک میدان الکتریکی تغییر کند. پلیمرهای قابل ترمیم نوعی پلیمر هوشمندی هستند که می‌توانند آسیب خود را از طریق محرکهای خارجی از جمله حرارت یا به صورت خود ترمیمی جبران کنند [۶].

به طور مشابه، پلیمرهای فروالکتریک یک قطبش الکتریکی دائمی را حفظ می‌کنند و تحت تأثیر میدان الکتریکی قرار می‌گیرند. پلی وینیلیدین فلوراید (PVDFs) پلیمری است که به دلیل داشتن خواصی مانند بازخورد پیزوالکتریک ذاتی و به عنوان حسگر حرارتی به طور گسترده در مبدل‌های الکترومکانیکی و صوتی استفاده می‌شود [۷]. به طور کلی، مزایای آنها ناشی از مواد کامپوزیتی و از پیشرفت قابل توجه مواد پلیمری هوشمند حاصل شده است.

با این حال، یکی دیگر از جنبه‌های مهمی که امروزه باید در نظر گرفته شود، ظهور فناوری نانو است. این فناوری نوظهور به عنوان توانمندترین فناوری روز به عملیات و مهندسی ماده در سطح مولکولی و استفاده از ساختارها و مواد در مقیاس اندازه‌گیری نانو - عمدتاً از محدوده ۱ تا ۱۰۰ نانومتر - اشاره دارد. ذرات در محدوده اندازه نانو، خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فردی از جمله نسبت سطح به حجم بسیار بزرگ یا واکنش پذیری بین سطحی خیلی بالاتری نسبت به محدوده اندازه میکرو دارند.

<sup>2</sup> Electroactive polymers (EAPs)

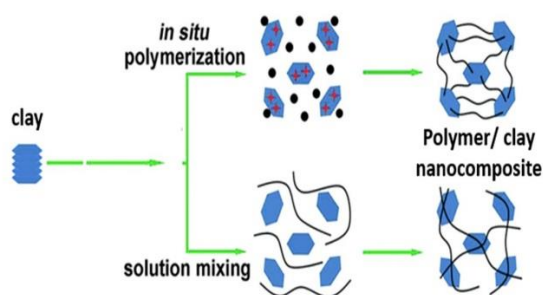
<sup>3</sup> Re-mendable polymers (or healable polymers)

<sup>4</sup> Ferroelectric polymers

<sup>5</sup> Polyvinylidene fluorides (PVDFs)

<sup>1</sup> Vulcanized rubber

نانو با نانومواد تقویت شده‌اند [۸]. در چند دهه اخیر نانوکامپوزیت‌ها، توجهات بسیاری را به خود جلب نموده‌اند و این امر به علت بهبود چشمگیر خواص حرارتی و مکانیکی است که با افزودن مقادیر بسیار کم خاک رس کنترل جرم مولکولی پلیمرهایی که با روش پلیمریزاسیون درجا شکل می‌گیرند، بسیار مشکل است.

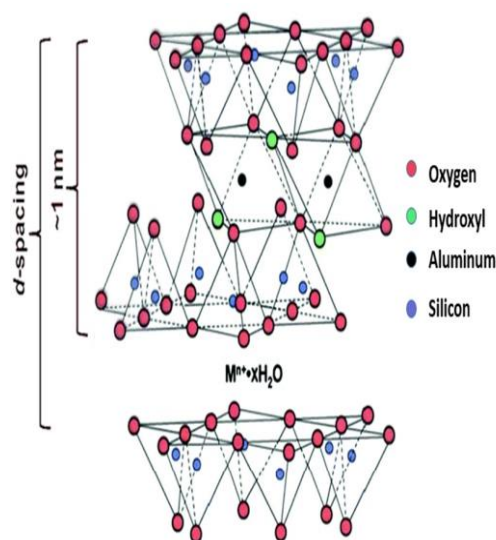


شکل ۲: روش‌های تهیه نانو کامپوزیت پلیمر/خاک رس

محصولات نفوذ پلیمرها در مواد لایه‌ای معدنی خواص ویژه‌ای دارند از جمله: از ترکیب انواع مختلف و متنوعی از پلیمرها و مواد میزبان به دست می‌آیند. پلیمرها می‌توانند با حفظ ساختار لایه‌ای خاک رس، در فواصل بین لایه‌ای آن نفوذ کنند و این امر باعث حضور غیرایزوتروپیک پلیمر در دو بعد نانومتری خواهد شد. فاصله بین لایه‌ای خاک رس با اندازه مولکول‌های پلیمر مورد نظر، قابل تغییر است. واضح است که پراکنش موثر ذرات غیرایزوتروپیک با ضریب منظر<sup>۳</sup> بالا، مثل الیاف کوتاه، پولکی و غیره داخل یک ماتریس پلیمری پیوسته همراه با چسبندگی مناسب بین سطح فیلر<sup>۴</sup> و ماتریس، عامل اصلی تقویت مناسب یک ماتریس پلیمری است.

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده، خاک رس ماده‌ای است معدنی، که شامل لایه‌های سیلیکاتی و یون‌های قابل انتقال در بین لایه‌های خود می‌باشد. جاذبه قوی الکترواستاتیکی بین کاتیون‌های بین لایه‌ای و لایه‌های

خواص و عملکرد ممتاز نانوذرات، افق بسیار روشنی برای فناوری‌های نوآورانه و ارتقاء فناوری‌های موجود ارائه می‌دهد. نانوکامپوزیت‌های پلیمری هوشمند شامل الاستومرها، ترموست‌ها و ترموپلاستیک‌هاست که در مقیاس اندازه گیری حاصل می‌شود. زمانی که ذرات به صورت لایه‌ای متناوب در ماتریس پلیمر پراکنده شوند، افزایش و بهبود خواص به ماکزیمم مقدار ممکن خود می‌رسد. نفوذ پلیمرها در مواد معدنی با حفظ طبیعت لایه‌ای آن نیز روش فوق العاده‌ای جهت تهیه ترکیبات پلیمر با مواد معدنی می‌باشد.



شکل ۱: ساختار لایه‌ای خاک رس

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، دو راه اصلی برای تهیه سیستم‌های لایه‌ای پلیمر با مواد معدنی وجود دارد. برخی پلیمرها به صورت مستقیم و بقیه با پلیمریزاسیون در جای آمونومرهایی که قبلاً در فضاها بین لایه‌های خاک رس نفوذ کرده‌اند، ساختار لایه‌ای متناوب را شکل می‌دهند. از آنجا که پلیمرهایی که بصورت مستقیم در ساختار لایه‌ای نفوذ می‌کنند، محدود است، روش دوم یعنی پلیمریزاسیون مونومرهایی که از قبل در فواصل بین لایه‌ای ساختار خاک رس نفوذ کرده‌اند، حائز اهمیت بیش‌تری خواهد بود. گرچه

<sup>3</sup> Aspect ratio

<sup>4</sup> Filler

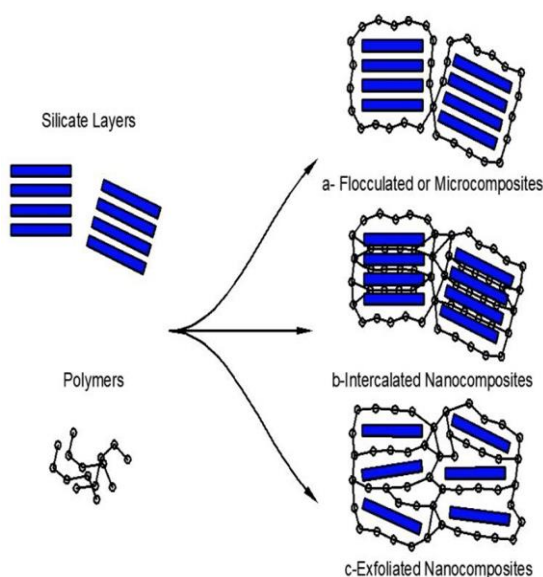
<sup>1</sup> Clay

<sup>2</sup> Insitu polymerization

۲) ساختار پراکنشی لایه‌ای<sup>۳</sup>: لایه‌های مجزای سیلیکات یا توده‌های کوچک برخی از لایه‌ها بطور هموزن در ماتریس پلیمری پراکنده می‌شوند. فاصله این لایه‌ها در حدی نیست که اثرات متقابلی بین آن‌ها وجود داشته باشد، این فاصله فقط به میزان خاک رس موجود در ماتریس بستگی دارد. با توجه به خواص مشاهده شده، این ساختار باعث حداکثر تقویت در ماتریس پلیمری می‌شود.

۳) ساختار بینایی<sup>۴</sup>: در این حالت یا میکرو کامپوزیت بدست می‌آید یا بعلاوه اثرات متقابل لایه‌های هیدروکسیله شده سیلیکات، هر دو ساختار فوق بطور همزمان ولی با نسبت‌های مختلف در نانو کامپوزیت حاصله دیده می‌شوند.

هریک از این ساختارها به طور شماتیک در شکل ۳ قابل مشاهده است. معمولاً میزان خاک رس در نانو کامپوزیت‌های پراکنده لایه‌ای، بسیار کم‌تر از نانو کامپوزیت‌های لایه‌ای متناوب است.



شکل ۳: ساختارهای مختلف نانو کامپوزیت‌ها

مواد نانو کامپوزیت پلیمری دارای مدول ذخیره سازی بالا، خواص کششی بهبود یافته و فعالیت‌های خمشی بالا، تغییر شکل حرارتی کم‌تر و نفوذپذیری گازی پایینی هستند و

سیلیکات، رسیدن به پراکنش لایه‌ای مطلوب را با مشکل مواجه می‌سازد. مواد فعال سطحی آلی که شامل گروه‌های قابل پلیمریزه شدن باشند، باعث ایجاد محرکه سیستیکی برای جدایی لایه‌های خاک رس و سرانجام پراکنش لایه‌ای مناسب می‌شود. در واقع اصلاح آلی خاک رس باعث تشکیل یک بانده دوگانه قابل پلیمریزه شدن می‌شود که احتمال تشکیل نانو کامپوزیت را افزایش می‌دهد. کاتیون‌های معدنی بین لایه‌های خاک رس وارد می‌شوند، قطبیت سطحی (آبدوستی) لایه‌های سیلیکات را کاهش داده و تمایل بین ماتریس و سیلیکات را افزایش می‌دهند.

در واقع نمک‌های آمونیوم مورد استفاده شاخه‌های بلند بازی دارند که هرچه طول این شاخه‌ها بلندتر باشد، تورم خاک رس یا به عبارت دیگر فاصله بین سطوح داخلی لایه‌های سیلیکات بیش‌تر افزایش می‌یابد. علاوه بر نمک‌های آمونیوم چهار ظرفیتی، نمک‌های فسفونیوم (ترجیحاً با زنجیرهای بلند آلکیل) نیز برای اصلاح سطحی، لایه‌های آبدوست خاک رس و آلی دوست کردن آن‌ها کاربرد دارند.

کاهش انرژی سطحی، خواص چسبندگی سطح خاک رس را با پلیمرها و مونومرها بهبود می‌بخشد. پس از تورم سیلیکات‌های لایه‌ای، پلیمریزاسیون درجا انجام می‌شود. به این ترتیب که اگر توده‌های سیلیکاتی لایه‌ای که در خاک رس وجود دارند، تخریب و پراکنده شوند، نانو کامپوزیت مطلوب به دست خواهد آمد. همانطور که بالاتر هم ذکر شد و در شکل ۲ نشان داده شده، ساختار این نانو کامپوزیت‌ها به یکی از سه حالت زیر است:

۱) ساختار لایه‌ای متناوب: فاصله بین لایه‌ای در این ساختار، افزایش یافته و زنجیرهای پلیمر بدون جدا سازی کامل لایه‌ها بین آنها نفوذ می‌کنند و یک حالت منظم کریستالی با فواصل تکراری در حد چند نانومتر، بدون توجه به نسبت پلیمر به خاک رس ایجاد می‌شود. خواص این نانو کامپوزیت مشابه مواد سرامیک است.

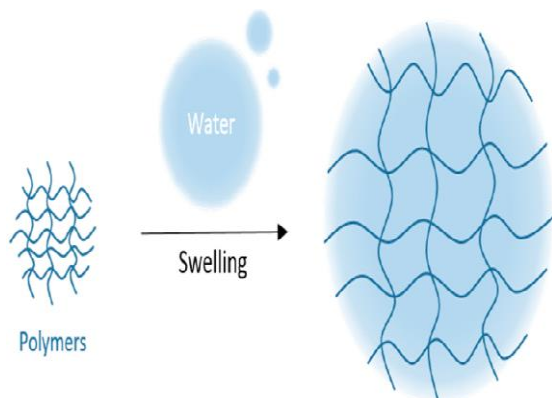
<sup>3</sup> Exfoliated  
<sup>4</sup> Flocculated

<sup>1</sup> Surfactant  
<sup>2</sup> Intercalated

عامل دار شوند و همانند گیرنده های زنده از مجموعه ای از قطعات عامل دار مجتمع و مونتاژ شوند.

از این رو، پتانسیل های گسترده ای در ساختار شیمیایی پلیمرها و پلیمرهای اصلاح شده برای پیشرفت مواد هوشمند وجود دارد [۱۳]. با این حال، مواد مبتنی بر پلیمر هوشمند قبلا به طور گسترده در علوم زیستی و شیمیایی به طرق مختلف استفاده شده است.

مواد پلیمری هوشمند به تغییرات جزئی در اتمسفر خود از طریق ایجاد تغییرات در خواص فیزیکی و شیمیایی خود پاسخ می دهند. به طور خلاصه، پلیمر هوشمند به صورت برگشت پذیر محلول در محلول (SIS) در محیط آبی یا به شکل هیدروژل دارای پیوندهای عرضی در نظر گرفته می شود [۱۴]. هیدروژل ها ابرجاذب های پلیمری با ساختار شبکه ای هستند که به دلیل داشتن گروه های عاملی آب دوست مانند  $-OH$ ،  $-NH_2$ ،  $-SO_3OH$ ،  $-COOH$  در ساختار خود قابلیت جذب و نگهداری آب و محلول های آبی را دارند. اتصالات و پیوندهای عرضی، سبب می شود که این دسته از پلیمرها در محیط های آبی ضمن جذب آب متورم شده اما حل نشوند. در شکل ۴ تورم یک هیدروژل و جذب آب توسط آن به طور شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۴: شماتیک تورم هیدروژل و جذب آب توسط آن

این مواد شبکه ای از پلیمرهای پایه آبدوست هستند و به دو شکل هیدروژل های فیزیکی و شیمیایی وجود دارند.

همچنین ویژگی های منحصر به فرد آنها مانند قابلیت تخریب پذیری زیستی و خود خاموش شوندگی مورد توجه و مطالعه فراوانی قرار گرفته اند [۹].

به علاوه، سیستم های هوشمند همانند سیستم های زنده به شرایط اکولوژیکی نوسانی پاسخ منطقی می دهند و عملکرد و ساختار خود را به خوبی تنظیم می کنند تا این نوسانات را از طریق استفاده از مکانیسم های حسگری کامپوزیتی کنترل کنند. طبیعت می تواند یک مثال مهمی برای توسعه و فرمولاسیون یک ماده جدید و استفاده از آنها در انواع مختلفی از کاربردهای هوشمند باشد. مواد پلیمری که ظرفیت پاسخگویی به محرک های بیرونی را دارند به عنوان پلیمرهای پاسخگو به محرک<sup>۱</sup> یا پلیمرهای هوشمند<sup>۲</sup> نامیده می شوند. پلیمرهای هوشمند می توانند تغییرات برگشت پذیر قابل توجهی چه در خواص شیمیایی و چه در خواص فیزیکی را در برابر تفاوت های جزئی محیطی تجربه کنند.

آنها می توانند به یک محرک یا محرک دوگانه یا چندگانه مانند میدان الکتریکی، دما، میدان مغناطیسی، pH، شدت نور، مولکول های زنده و غیره پاسخ دهند. این پاسخ ها دارای نمودهای ماکروسکوپی نیز می باشد. به عنوان مثال، جمع شدگی / تورم یا انتقال محلول / ژل که به طور بالقوه به حالت فیزیکی و شیمیایی پاسخ زنجیرها بستگی دارد [۱۰].

سیستم های هوشمند دارای پیوند عرضی، بازیابی زنجیره ای در شرایط انتقالی را تجربه می کنند که سیستم از حالت فرو ریختگی به حالت پایداری طولانی مدت می رسد. تغییر در سطوح هوشمندی، آب دوستی محرک و فصل مشترک پاسخگو را تغییر می دهد [۱۱].

همه این تغییرات می تواند راهبرد این پلیمرها برای چندین کاربرد مختلف باشد. به عنوان مثال ساختارهای قابل تزریقی که می تواند در روش های جدید دارورسانی یا بسترهای نوین برای کشت بافت سلولی یا مهندسی سلولی به کار گرفته شوند [۱۲]. به همین ترتیب، پلیمرها به راحتی می توانند از طریق روش های پلیمریزاسیون اولیه یا پلیمریزاسیون ثانویه

<sup>3</sup> Soluble-in-soluble (SIS)

<sup>1</sup> Stimuli-responsive polymers

<sup>2</sup> Smart polymers

آنها در مقیاس نانو است. طبقه بندی پلیمرهای هوشمند همراهِ با آشنا ترین روش های سنتز و برخی از رایج ترین کاربردها به طور خلاصه در این مقاله بحث و بررسی شده است.

جدول ۱- فهرست انواع مختلف محرک ها و مواد پلیمری هوشمند پاسخگو

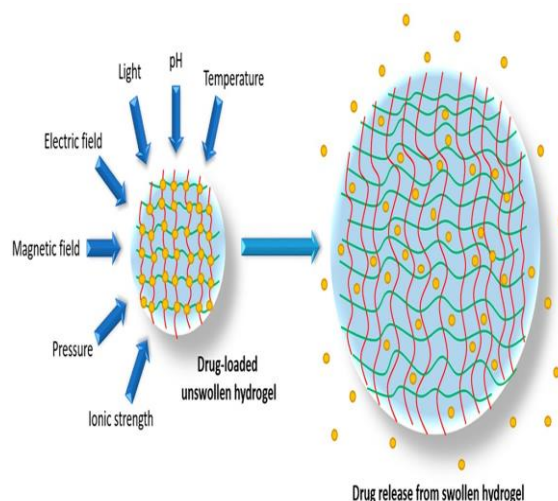
Smart polymer material	Type of stimuli	Reference
Polyacrylamide-triphenylmethane leuco derivatives	Ultrasound	[17]
Dodecyl isocyanate-modified PEG-grafted poly (HEMA)	Light and temperature	[18]
Poly(vinyl alcohol)- <i>graft</i> -poly-acrylamide-triphenylmethane leucocyanide derivatives	Light and temperature	[18]
Poly(N-vinyl carbazole) composite	IR radiation	[19]
Carboxymethyl cellulose	Ca <sup>2+</sup>	[20]
Polythiophen gel	Electric potential	[21]
Polyacrylamide cross-linked with 4-(methacryloylamino) azobenzene	UV radiation	[22]
Poly(N-acryloyl-N-propyl piperazine)	pH and temperature	[23]
Eudragit S-100	Ca <sup>2+</sup> and temperature	[24]
Pnipaam hydrogels containing ferromagnetic material pnpaam- <i>α</i> -acrylamide	Magnetic field	[25]
Eudragit S-100	Ca <sup>2+</sup> and acetonitrile	[26]
Poloxamers	Temperature (sol-gel transition)	[27]
Chitosan-glycerol phosphate-water	Temperature	[28]
Prolastin	Temperature	[29]
Hybrid hydrogels of polymer and protein domains	Temperature	[30]
Eudragit S-100	Organic solvent	[31]
Eudragit L-100	pH	[32]
Poly(t-lysine) ester	pH	[33]
Poly(t-lysine)-G-poly(histidine)	pH	[34]
Eudragit L-100	pH	[35]
Chitosan	pH	[36]
Polysilamine	pH	[37]

- طبقه بندی نانو کامپوزیت های پلیمری هوشمند

پلیمری که توانایی پاسخ و واکنش به محرک های خارجی را دارد به عنوان پلیمرهای پاسخگو به محرک یا به عنوان پلیمرهای هوشمند شناخته می شود. پلیمرهای هوشمند می توانند به روش های متعددی مانند تغییر رسانایی، شکل، رنگ، ترشوندگی و عبور پذیری نوری به محرک ها پاسخ دهند. نسبت پاسخ پلیمرهای هوشمند می تواند از طریق شدت محرک های عامل دار تنظیم و کنترل شود. دانشمندان،

هیدروژل های فیزیکی از طریق پیوندهای غیر کووالانسی در کنار هم نگه داشته می شوند، در حالی که هیدروژل شیمیایی از طریق پیوندهای شیمیایی با هم اتصال دارند. اما هر دو نوع هیدروژل از نظر رفتاری مشابه هم هستند.

علاوه بر این، هیدروژل های فیزیکی حاوی بخش های آبگریز و آب دوست هستند. هیدروژل های مبتنی بر اتصالات شیمیایی حاوی خوشه ها یا مناطقی هستند که دارای چگالی اتصال عرضی بالا هستند و این ساختارها از قایلت تورم کمتری برخوردار هستند. در حالی که در ساختارهای با قابلیت تورم بالا شبکه پلیمری از چگالی پیوند کمتری برخوردار است [۱۶-۱۵]. هم پلیمرهای محلول در محلول و هم پلیمرهای هیدروژلی هر دو در معرض تغییرات کوچکی از محرک ها مانند تغییر در نور، دما، میدان الکتریکی، pH، قدرت یونی و میدان مغناطیسی قرار گرفته و پاسخ آنها ثبت شده است. به عنوان مثل در شکل ۵ نحوه رهایش دارو از یک هیدروژل هوشمند در پاسخ به محرک های بیرونی مختلف به طور شماتیک نشان داده شده است.

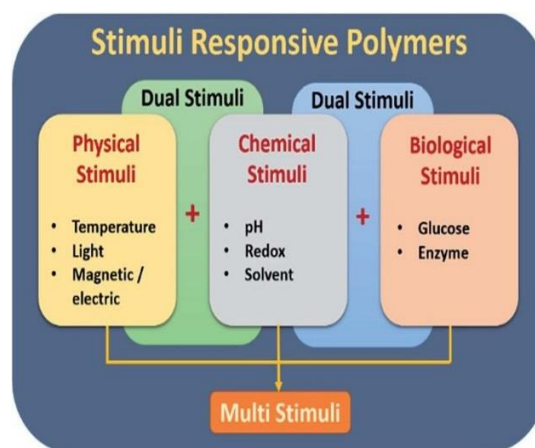


شکل ۵: شماتیک رهایش داروی یک هیدروژل هوشمند در پاسخ به انواع محرک های بیرونی

برخی از رایج ترین محرک ها و مواد پلیمری هوشمند پاسخگو در جدول ۱-۱ ارائه شده است. هدف اصلی این مقاله، تشریح اهمیت پلیمرهای هوشمند و مواد کامپوزیتی

عملکرد مشخص مولکول ها اشاره دارد، به عنوان مثال، تشخیص گیرنده و واکنش های آنریمی و غیره. محرک های شیمیایی اتصالات مولکولی بین مولکول های حلال و پلیمر یا بین زنجیرهای پلیمری را تعدیل می کند تا تغییراتی در سیستم پلیمرها ایجاد شود. سیستم های پلیمری پاسخگو به حرارت با یک تغییر دمای جزئی در یک محدوده خاص دچار تغییر فاز می شوند. این پدیده به دلیل ایجاد اختلال در روابط درون مولکولی و بین مولکولی است که به دنبال توسعه یا کاهش ابعاد زنجیرهای پلیمری رخ می دهد. یک محلول پلیمری پاسخگو به دما دارای یک حد بالای دمای انحلال بحرانی (UCST)<sup>۱</sup> است که در بالای این دما اجزای محلول در همه نسبت ها قابل حل هستند و محلول تک فازی است و در دمای پایین تر محلول دچار جدایی فازی شده و زنجیرهای پلیمری رسوب می کنند. همچنین برخی محلول پلیمری پاسخگو به دما دارای یک حد پایین دمای انحلال بحرانی (LCST)<sup>۲</sup> است که در دمای کم تر از این دما بحرانی سیستم همگن و تک فاز است و بالاتر از این دما سیستم ناپایدار شده و زنجیرها رسوب می کنند [۴۰]. برخی از پلیمرهای حساس به دما عبارت اند از: پلی (N-وینیل آلکیل آمید)<sup>۳</sup>، پلی (N-ایزو پروپیل آکریل آمید) (PNIPAAm)<sup>۴</sup>، پلی (N-وینیل کاپرولاکتام)<sup>۵</sup> و پلی لاکتیک اسید [۴۱-۴۲]. در پژوهشی سیستم های کامپوزیت پلیمری هوشمند کروموزنیک ساخته شد که نسبت به تغییرات دما حساس بود [۴۳]. در پژوهش مذکور یک شبکه پلیمری هوشمند بر پایه یک ژل نانوکامپوزیت تهیه شد که در حضور رنگ های ترموکرومیک کار می کرد. رنگ دانه های آلی مورد استفاده عبارت بودند از betaine (2,6-diphenyl-4-(2,4,6-triphenylpyridinio) phenolate (DPPT) و cresol red که به طور کامل در محیط ژلی ساخته شده از ماده پلیمری شناخته شده ای به نام پلی وینیل

چندین پلیمر پاسخگو را صنعتی کرده و در برابر بسیاری از محرک ها مانند شدت نور، pH، دما، میدان الکتریکی، رطوبت و میدان مغناطیسی استفاده کرده اند. تغییر و کنترل خواص فیزیکی و شیمیایی پلیمرهای هوشمند برای چندین کاربرد خانگی و تجاری بسیار مناسب ارزیابی شده است. کامپوزیت های پلیمری هوشمند را می توان به طور کلی به سه گروه طبقه بندی کرد: (الف) محرک تک گانه، (ب) محرک دو گانه، و (ج) پلیمرهای پاسخگو به چند محرک که در شکل ۶ طبقه بندی آنها نشان داده شده است [۳۹-۳۸].



شکل ۶: طبقه بندی پلیمرهای پاسخگو به محرک.

- پلیمرهای پاسخگو به محرک تک گانه

محرک هایی که باعث تغییراتی در پلیمرهای هوشمند می شوند، می توانند به طبقه های فرعی بیش تری مانند محرک های فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی تقسیم شوند. پلیمرهای هوشمند به محرک های فیزیکی مانند میدان مغناطیسی، نور، میدان الکتریکی و دما به دلیل اصلاح و تغییر در نرمیت و ظرافت های زنجیری، یعنی سطح انرژی پلیمری و سیستم حلال پاسخ می دهند. در حالی که محرک های بیولوژیکی به

<sup>1</sup> Upper critical solution temperature (UCST)

<sup>2</sup> Lower critical solution temperature (LCST)

<sup>3</sup> Poly(N-vinylalkylamides)

<sup>4</sup> Poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPAAm)

<sup>5</sup> Poly(N-vinylcaprolactam)

[۴۷]. GOX مولکول‌های گلوکز را اکسید و تبدیل به مولکول‌های اسید گلوکونیک می‌کند که باعث ایجاد تغییر pH در فضای اطراف می‌شوند. در پاسخ به تغییر pH، پلیمر یک انتقال حجمی نشان می‌دهد. این تغییر شدید در فاز پلیمری که از طریق گلوکز که فعالیت آنزیم را مختل می‌کند، کنترل می‌شود. در حال حاضر توجهات زیادی به این زمینه جهت توسعه پلیمرهای حساس به گلوکز و زیست تخریب پذیر جلب شده است. یکی دیگر از پلیمر هوشمند پاسخگو به آنزیم یک باکتری طبیعی واقع در ناحیه روده بزرگ است که آنزیم‌های مشخصی مانند گلیکوزیداز<sup>۷</sup> و آزوردوکتاز<sup>۸</sup> ترشح می‌کند که در تجزیه چندین پلی ساکارید با دکستروزین، کیتوزان، پکتین و غیره تخصص دارند [۴۸]. از این پس، یک پلیمر پاسخگو به آنزیم مشخص برای تجزیه خود، نیازی به فعال سازی خارجی ندارد. با این حال، یک محرک شیمیایی مانند محرک pH می‌تواند شامل بخش‌هایی از کامپوزیت‌های پلیمری باشد که با تغییر pH محیط، پروتون آزاد یا دریافت کند [۴۹]. هر گونه تغییری در pH که باعث شروع پیوندها و ارتباطات یونی و در نتیجه منجر به شکست یا رشد زنجیرهای پلیمری در محلول می‌شود، از طریق نیروها و کنترل‌های دافعه الکترواستاتیکی ترغیب می‌شوند.

مواد پاسخگو به pH از پلی بازها و پلی اسیدها تشکیل شده‌اند. پلی اسیدها، به عنوان مثال، اسیدهای پلی اکریلیک در محیط‌های بازی پروتون آزاد می‌کنند، در حالی که پلی بازها شامل پلی (N، N- دی متیل آمینو اتیل متاکریلات) هستند که در حضور محیط‌های اسیدی پروتون دریافت می‌کند و نیروهای دافعه کولنی افزایش می‌یابد [۵۰]. پلیمرهای پاسخگو به pH از جمله آلومین، پلی اکریلیک اسید، کیتوسان، پلی لیزین، پلی اتیلن ایمین و پلی (N، N- دی

الکل - بوراکس - سورفکتانت<sup>۱</sup> در pH = 8.5 پخش شده بودند. به دلیل وجود DTPP رنگ کامپوزیت از بی رنگ در دمای معمولی به بنفش تیره به آرامی تغییر کرده است. در مقابل، کامپوزیت‌های پلی وینیل اکریل دوپ شده با کروزل قرمز برای یک سری دمای مشابه تغییرات رنگی از مایل به زرد تا مایل به قرمز نشان دادند. تغییرات رنگ قابل تنظیم ناشی از اختلاف دما بوده است. به عنوان مثال، DTPP در pH = 8.5 در دمای کمتر از اتاق هیچ رنگی از خود نشان نداد، در حالی که با افزایش دما به بنفش تیره تغییر کردند. به طور مشابه، محرک نور چندین نوع انعطاف پذیری مانند کاربرد فوری و دقت بالا را با کنترل کننده طول موج تماسی فراهم می‌کند. شروع محرک نور از مارورا بنفش (UV) تا مادون قرمز (IR) اجازه تنوع در بسیاری از انواع کاربردها را می‌دهد، که ممکن است از طریق محرک‌های دیگر قابل دسترس نباشند. علاوه بر این، نور می‌تواند برای فعال کردن پاسخ به طور مستقیم بر روی سطح پلیمرها عامل سازی شود. پلیمرهای هوشمند پاسخگو به نور که زیاد مورد مطالعه قرار گرفته‌اند عبارت‌اند از: مشتقات اسپروکامین<sup>۲</sup>، اسپروپیران<sup>۳</sup>، آزوبنزن (ایزومریزاسیون ترانس/سیس)<sup>۴</sup> [۴۴]. نمونه‌ای از کامپوزیت پلیمری هوشمند پاسخگو به نور در پژوهشی [۴۵] توضیح داده شده است که در آن یک نانو کامپوزیت انعطاف پذیر و با دوام بر پایه ZnS و پلی دی متیل سیلوکسان (PDMS) سنتز شده است. به طور مشابه، در محرک‌های بیولوژیکی، چندین عوامل دخیل هستند و مهم‌ترین آنها توسط گلوکز و آنزیم نشان داده می‌شود [۴۶]. پلیمرهای هوشمند حساس به گلوکز امروز به طور گسترده به دلیل داشتن کاربردهای قابل توجه در دارورسانی مانند تحویل انسولین مورد مطالعه و توجه خاصی قرار می‌گیرند. پلیمرهای هوشمند مبتنی بر گلوکز از طریق در هم آمیختن گلوکز اکسیداز (GOX)<sup>۵</sup> با یک پلیمر حساس به pH تهیه می‌شوند

<sup>7</sup> Polydimethylsiloxane (PDMS)

<sup>8</sup> Glucose oxidase (GOX)

<sup>9</sup> Glycosidases

<sup>1</sup> Azoreductase

<sup>1</sup> Poly(N,N-dimethyl aminoethyl methacrylate)

<sup>1</sup> Poly(vinyl alcohol)-borax-surfactant gel

<sup>2</sup> Ultraviolet (UV)

<sup>3</sup> Infrared (IR)

<sup>40</sup> Spiroamine

<sup>51</sup> Spiropyran

<sup>6</sup> Azobenzene (trans/cis isomerization)

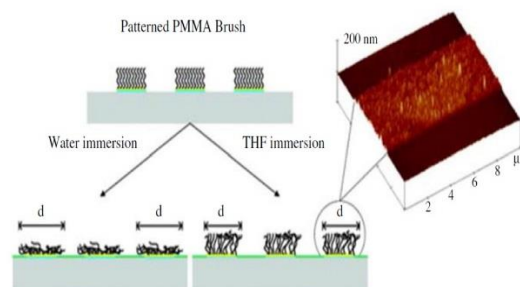


- پلیمرهای پاسخگو به محرک های دو گانه  
محرک های دو گانه شامل دو نوع عمده اند. یکی از آنها پلیمر پاسخگو به دما و نور است، در حالی که دیگری پلیمر پاسخگو به pH و دما است. در اوایل سال ۱۹۸۸ در مقاله ای [۵۵] طبقه بندی پلیمرهای پاسخگوی دو گانه شرح داده شد که به محرک های نور و گرما پاسخ می دادند. پلیمرهای پاسخگو به دما از طریق پلیمریازسیون مونومر آکریل آمید (N-(۴-فنیل آزوفنیل) آکریل آمید)<sup>۴</sup> با N- ایزوپروپیل آکریل آمید تهیه می شوند [۵۶]. آزو بنزن فتوکرومیک به محیط آبی PNIPAAAM وارد می شود و مرحله جداسازی محلول توسط دما از طریق شدت نور مشاهده و اندازه گیری می شود. در طول این فرآیند، یک تغییر دمایی از ۲۱ تا ۲۷ درجه سانتی گراد و پس از تابش نور UV جدایش فازی حاصل می شود. این تغییر قابل تنظیم در LCST متناسب با تغییر گشتاور دوقطبی ۰ تا ۳ دبای است [۵۲]. این پدیده به دلیل ایزومریزاسیون ترانس به سیس آزو بنزن رخ داده است. دمای انتقال فاز اولیه از طریق تماس با نور مرئی مجدداً قابل دستیابی است. مطالعات مختلفی در مورد آزو بنزن عامل دار شده برای تشکیل یک پلیمر با واکنش دو گانه انجام شده است. با این حال، پلیمرهای پاسخگو به pH و دما هر کدام به هر دو آنها حساس هستند که در کاربردهای مختلف بخصوص در رهایش هوشمند دارو از اهمیت بالایی برخوردار هستند و هر دو عامل می توانند بر اساس نیاز تغییر کنند. از این تغییر می توان برای فعال کردن باز خورد مستقل استفاده کرد. قسمت های مفیدی که از طریق ایجاد خوشه های یونی توسط جدا شدن پروتون یا دریافت پروتون انجام می - شود، به زنجیره حمایتی پلیمر LCST اضافه می شود مانند آمین های نوع سوم و کربوکسیلیک اسیدها. علاوه بر این، هموپلیمرهای اصلاح شده مانند پلی (۲-دی متیل آمینو) اتیل متاکریلات (PDMAEMA)<sup>۵</sup> رفتار واکنشی به دما و

اکیل آمینو اتیل متاکریلات (PDAAEMA)<sup>۱</sup> به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته اند [۵۱].

محرک ردوکس همچنین دارای یک پاسخ شیمیایی است که به دلیل تغییرات در حالت اکسیداسیون گروه های هوشمند ایجاد می شود. این محرک ها می توانند به طور معمول در برهمکنش معدنی عمدتاً با فلزات انتقالی قابل درک باشند. علاوه بر این، محرک های حلال نیز یک پلیمر پاسخگو هستند که از پلیمرهای خارج شده از حالت طبیعی به عنوان حلال سنتز شده اند که باعث تورم منابع پلیمری می شود و الاستیسیته زنجیرهای پلیمری توده را افزایش می دهد.

بسیاری از پلیمرها مانند پلی (۲-دی متیل آمینو اتیل متاکریلات)، پلی اتیلن گلیکول و پلی بوتیل آکریات نیز برای تطبیق ساخت یک پلیمر هوشمند حلال مورد مطالعه قرار گرفته اند [۵۲]. برهم زدن برس های پلیمری با عملکرد حلالی چندین پتانسیل نوین و ایده جدیدی را در تولید سطح ارائه کرده است. به عنوان مثال، در پژوهشی [۵۳] برهم زدن برس های پلی متیل متاکریلات (PMMA)<sup>۲</sup> با حلال های متنوع مطالعه شده اند. نسبت تغییر شکل برس های PMMA زمانی که با حلال های مختلف خشک می شوند، می تواند متنوع باشند. شکل ۷ نمودار گرافیکی رفتار قابل تنظیم برس های PMMA را نشان می دهد وقتی که تتراهیدروفوران (THF)<sup>۳</sup> و آب جذب می کند و منجر به تشکیل برس ها و قارچ ها می شود [۵۴].



شکل ۷: شماتیک رفتار برس برگشت پذیر PMMA در حضور حلال خوب و ضعیف

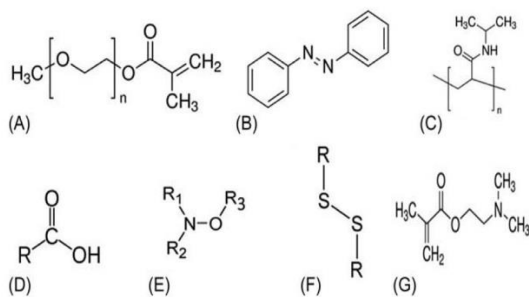
<sup>۴</sup> (N-(4-phenylazophenyl) acrylamide)

<sup>۵</sup> Poly(2-(dimethylamino) ethyl methacrylate) (PDMAEMA)

<sup>۱</sup> Poly(N,N-diakylamino ethylmethacrylates) (PDAAEMA)

<sup>۲</sup> Poly(methyl methacrylate) (PMMA)

<sup>۳</sup> Tetrahydrofuran (THF)



شکل ۸: پلیمرهای پاسخگو به محرک

پلیمرهای پاسخگو به محرک‌های تک گانه: پلی (اتیلن گلیکول) مونو متیل اتر-مونو متاکریلات (A)، آزوبنزن (B)، پلی (N-ایزوپروپی آکریل آمید) (C). پلیمرهای پاسخگو به محرک دو گانه: کربوکسیلیک اسید (D)، نیتراکسید (E)، دی سولفید (F). پلیمر پاسخگو به محرک چند گانه، پلی (۲-دی متیل آمینو) اتیل متاکریلات (G) در پژوهش دیگری [۵۹] با استفاده از پلیمریزاسیون رادیکالی انتقال اتم (ATRP) و آزوبنزن سیستم پلیمری PDMAEMA تهیه شد که به pH، نور و دما حساس بود [۶۰]. با توجه به نتایج چندین مطالعه، جنبه‌های LCST سیستم پلیمری می‌تواند با تغییر در محدوده pH تغییر کند. برای مثال رفتار LCST در  $pH = 4$  مشاهده نمی‌شود به این دلیل که پروتونه شدن گروه‌های عاملی دی متیل آمین باعث بالا رفتن قطبیت می‌شود و زمانی که جذب پروتون کاهش و یا pH افزایش می‌یابد، موجب کاهش جدا شدن پروتون شده و باعث ظهور LCST می‌شود [۶۱]. با استفاده از تابش نور UV، فتو ایزومریزاسیون سیس/ترانس آزوبنزن منجر به LCST بالاتر می‌شود. با این حال، تحت تابش نور مرئی بهبود می‌یابد. این روش کاملاً برگشت پذیر است. مطالعات متعددی وجود دارد که اثر اضافه شدن آزوبنزن به انتهای زنجیر پلیمرهای هوشمند را نشان می‌دهد. نتایج مطالعات نشان داده است که حجم آزوبنزن متناسب با تغییرات در LCST در هر دو مورد، قبل و بعد از تابش نور است [۶۲]. به تازگی، سیستم‌های مبتنی بر پلیمر مانند PNIPAAm همراه با اسپروبنزوپیران، پلی اتیلن

pH را نشان می‌دهد [۵۷]. با این حال، نقاط ابری و کدر شدن به دلیل عاملیت آمینو با افزایش pH جابه جا شده و پیش روی می‌کند که نشان دهنده عملکرد پاسخگویی دو گانه است. لایه‌های حساس به نور و فیلم‌های انعطاف پذیر نانو کامپوزیتی بر پایه اکسید گرافن و پلی (وینیلیدین فلوراید - کو - هگزافلوروپروپیلن) با استفاده از روش ساده ریخته‌گری محلول ساخته شده است. رفتار فوتومکانیکی سریع، پایدار و برگشت پذیر فیلم‌های نانو کامپوزیت پس از تابش نور مرئی بر اساس اثر فوتو ترمال اکسید گرافن و اثر حافظه شکلی ماتریس پلیمری مشاهده شده است. بر اساس اصل دستگاه تعادلی، حرکت لیوانی با نیروی نور در این فیلم‌ها با تقلید از ساختار یک شخص لرزان به دست آمده است. در این نانو کامپوزیت فوتومکانیکی انقباض، انبساط، خمش، پیچش، نوسان محقق شده است و این سطحی از پاسخگویی و هوشمندی تأثیر قابل توجهی بر توسعه مواد فوتومکانیکی و بکارگیری چنین مواد پیشرفته‌ای در کاربردهای مختلف خواهد داشت [۵۸].

#### - پلیمرهای پاسخگو به چند محرک

دستیابی به پلیمرهای پاسخگو به محرک‌های دو گانه و تک گانه، دانشمندان را به کاوش و توسعه بیشتر سیستم‌های پلیمری برانگیخته است که می‌تواند پاسخی برای محرک‌های سه لایه باشد. از تجمع محرک‌های جایگزین با پلیمرهای پاسخگو دو گانه می‌توان دقت باز خورد را بازیابی کرد. علاوه بر این، وجود محرک‌های سه لایه می‌تواند شرایط جایگزینی را به دلیل سطح بالاتر دشواری پلیمرها بهبود بخشد. برخی از ساختارهای پلیمری هوشمند پاسخگو به محرک‌های تک گانه، دو گانه و چند گانه در شکل ۸ نشان داده شده است

<sup>3</sup> Spirobenzopyran

<sup>1</sup> Poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene)

<sup>2</sup> Atom-transfer radical polymerization (ATRP)

خوشه حساس وجود ندارد اما مقادیر LCST میانی مشروط به طبقه بندی محرک مشاهده می شود. وقتی آزو بنزن در ابتدا برانگیخته می شود، تاثیر آن نسبت به زمانی که اول کوپلیمر احیا شده باشد، ۶۰ درصد قوی تر است [۶۶]. این به دلیل اثر قطبیت آزو بنزن در حالت آبگریز در مقایسه با اثر ایزومریزاسیون موجود در داخل کوپلیمر آبدوست اتفاق می افتد. به هر حال، بیش تر سیستم های پلیمری هوشمند پاسخگو به محرک دوگانه و چند گانه شامل pH، اکولوژیکی، سیستم های ردوکس - حرارتی و سیستم های مبتنی بر دما و غیره است که در عمل خاص هستند.

- کاربرد مواد کامپوزیت پلیمری هوشمند  
این بخش شامل اکثر کاربردهای آشنا و اهمیت پلیمرهای هوشمند است. بیش تر پیشرفت های قابل توجه نانو کامپوزیت های پلیمری در زمینه محیط زیست و زیست پزشکی ثبت شده است. استفاده از کامپوزیت های پلیمری هوشمند در پیشرفت درمان های نوآورانه برای چندین نوع بیماری خطرناک یا کشت دستگاه های پزشکی است که به پارامترهای محیط از جمله آنالیت، pH، فشار، دما، غلظت، آنزیم ها و غیره و محرک های خارجی مانند تابش مغناطیسی، نور، و غیره واکنش نشان می دهد. برخی از کاربردهای رایج پلیمرهای هوشمند مانند کاربردهای حسگر، دارورسانی، کاربرد کاتالیزوری و غیره در مقاله مورد بحث قرار گرفته است.

- حسگرها/ حسگرهای زیستی و انواع آنها  
در ۲۰ سال گذشته، حسگرهای پلیمری هوشمند توجه خاص جامعه علمی را به خود جلب کرده اند. به خوبی پذیرفته شده است که معنای رفتار حسگری مربوط به پلیمرهای هوشمند ارائه داده هایی است در مورد محیطی که در شرایط واقعی

ایمین، بوتیر آمید<sup>۱</sup> و سیستم های کوپلیمر تولید شده با استفاده از NIPAAAM، N- هیدروکسی متیل آکریل آمید (NHMA)<sup>۲</sup> و ۲-دیازو-۱،۲-نفتو کینون-۵- سولفونیل متیل آکریل آمید (DNQ)<sup>۳</sup> برای تهیه کامپوزیت های پلیمری هوشمند سه گانه مورد بررسی قرار گرفته است [۶۳]. به عنوان مثال، در پژوهشی [۶۴] نانو کامپوزیت های پلیمری چند گانه از پیوند عرضی شیمیایی نانو کریستال های سلولزی<sup>۴</sup> با استفاده از پلی اتیلن گلیکول<sup>۵</sup> و پلی کاپرولاکتون<sup>۶</sup> تهیه شده اند. نانو کامپوزیت حاصل نشان داده است که PEG/PCL/CNC اثر القای حرارتی فوق العاده ای در دمای ۳۷ درجه سانتی گراد از خود نشان می دهد و بدون شک اضافه کردن CNC خواص مکانیکی کامپوزیت را با وزن مولکولی کم ارتقاء می دهد. بنابراین، نانو کامپوزیت پاسخگو به دما ممکن است به یک ماده جدید زیستی هوشمند صنعتی تبدیل شود. یکی دیگر از آشناترین پلیمرهای حساس به محرک- های چند گانه عبارت اند از پلیمرهای پاسخگو به نور، حرارت و ردوکس. چند نمونه از سیستم های پلیمری پاسخگو سه لایه حساس به نور، دما و ردوکس با بخش های مختلف ردوکس تهیه شده اند. سیستم پلیمری هوشمند سه لایه با استفاده از کوپلیمرهای PNIPAAAM شامل آزو بنزن عامل دار شده با آمینو و ۴-آمینو-۲،۲،۶،۶-تترامیل پیریدین-۱-اکسیل (آمینو-TEMPO)<sup>۷</sup> تهیه شده اند [۶۵]. بخش های مربوط به TEMPO می تواند با استفاده از اسید اسکوربیک که یک عامل کاهنده جزئی است تغلیظ شود و از طریق عامل اکسید کننده مهمی به عنوان مثال، پتاسیم هگزا سیانو فرات<sup>۸</sup> دوباره اکسید شود. برای برانگیختن کروموفور آزو بنزن، پلیمر با نور UV اصلاح سطحی می شود. این عمل بیشتر منجر به افزایش LCST می شود. اگرچه هیچ تغییری در مقادیر LCST غیر مرتبط با ترتیب محرک های عاملی پاسخگو نسبت به دو

<sup>۱</sup> 4-amino-2,2,6,6-tetramethylpiperidine-1-oxyl (TEMPO)

<sup>۸</sup> Potassium hexacyanoferrate(III)

<sup>1</sup> Butyramide

<sup>2</sup> N-hydroxymethylacrylamide (NHMA)

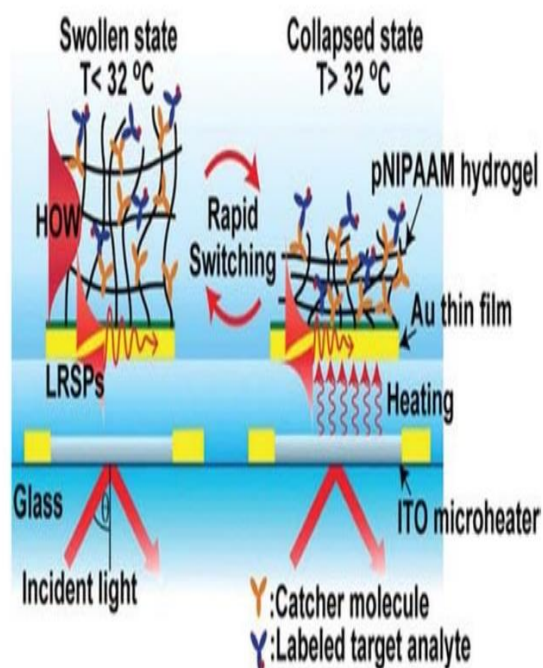
<sup>3</sup> 2-diazo-1,2-naphthoquinone-5-sulfonylmethylacrylamide (DNQ)

<sup>4</sup> Cellulosic nanocrystals (CNCs)

<sup>5</sup> Polyethylene glycol (PEG)

<sup>6</sup> Polycaprolactone (PCL)

قرار دارد. توسعه موثر این زمینه مستلزم رشد تجهیزات برای تنظیم و کنترل پارامترهای مختلفی است که بتواند شرایط خطرناک برای انسان مانند بخارات آلوده و گازهای سمی، پساب ناشی از فعالیت‌های صنعتی یا یا حشره کش‌های مورد استفاده در مزارع را تشخیص دهد [۶۷]. زمینه دیگری که نیازمند رشد و توسعه این مواد هوشمند است، پزشکی است. پلیمر به عنوان ماده مناسبی در نظر گرفته می‌شود که می‌تواند برای کارهای مخصوصی اصلاح و تغییر کند و به همین خاطر کاربردهای وسیعی در توسعه دستگاه‌های سنسور دارد. تجزیه و تحلیل مدرن کارهای پژوهشی نشان می‌دهد که مواد پلیمری هوشمند و کامپوزیت‌های آن‌ها به عنوان پرمصرف ترین منابع ساخت سنسورها با کاربردهای متعدد در نظر گرفته می‌شوند. با این حال، تفاوت بین حسگرها و حسگرهای زیستی این است که یک حسگر اساساً توانایی پذیرش یک ورودی از محیط و تغییر آن به یک شاخص خروجی دارد که بتوان آن را مدیریت و به یک نتیجه قابل رویت تبدیل کرد. در حالی که یک حسگر زیستی ظرفیت تشخیص و کمی کردن گونه‌های زیستی را دارد. به طور کلی، یک حسگر زیستی باید غلظت یک گونه (آنالیت) را از یک مخلوط چندگانه شناسایی و در سریع ترین زمان، یک نتیجه دقیق پیشنهاد کند. با این حال، حسگرهای زیستی باید قادر به حس و تشخیص ماده بیولوژیکی در شرایط محدود جهت تست‌های سریع قابل انجام در بالین بیمار (POC)<sup>۱</sup> باشد تا بازدهی و عملکرد درمان در دنیای مدرن را بهبود ببخشد. حسگرها / حسگرهای زیستی مبتنی بر پلیمر هوشمند به دلیل ظرفیت آنها برای تبدیل و تغییر آنالیت‌ها به پارامتر شیمیایی و فیزیکی توجیهات قابل ملاحظه‌ای را به خود جلب کرده‌اند [۶۸-۷۰]. به عنوان مثال، در پژوهشی [۷۱] استفاده از هیدروژل پاسخگو به حرارت بر پایه پلی (N- ایزوپروپیل آکریل آمید) برای تنظیم سریع رزونانس پلاسمون سطحی (SPR)<sup>۲</sup> گزارش شده است. این روش با استفاده از معماری لایه‌ای SPR با یک میکرو هیتر اکسید قلع تعیبه شده و فیلم



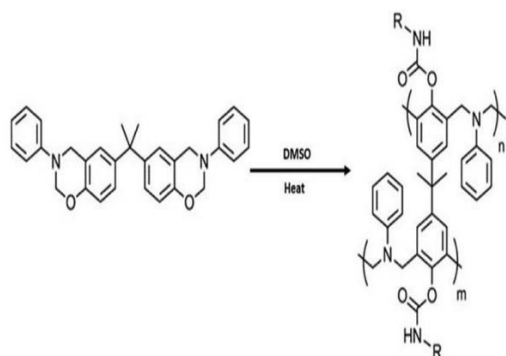
شکل ۹: تصویر شماتیک یک حسگر SPR بهبود یافته با هیدروژل PNIPAAm-co-MAAc مجهز به میکروهیتر

اثرات کوانتومی ذرات در مقیاس نانو موجب ظهور یک سری خواص ظاهری منحصر به فردی می‌شود که می‌تواند کاربردهای ایده آلی در سنسورها داشته باشد. علاوه بر این، اصلاح سطحی مواد پلیمری هوشمند منجر به تغییراتی در خواص حساس به نور مرئی می‌شود که می‌تواند برای شناسایی و حسگری مورد استفاده قرار بگیرد. به عنوان مثال،

<sup>1</sup> Point-of-care (POC)

<sup>2</sup> Surface plasmon resonance (SPR)

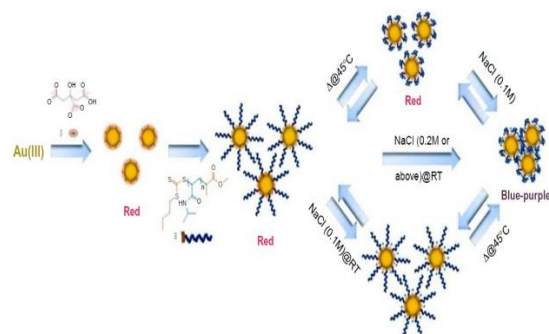
وجود دارند که محل و هدف خوبی برای تشکیل کلات<sup>۵</sup> فلزی است. مونومر بنزوکسازین (B-ala) با استفاده از آلایل آمین، پارافورمالدهید و بیس فنول A به عنوان یک عامل پیش ساز تهیه شده است [۷۳]. بنزوکسازین می تواند برای به دست آوردن پلی بنزوکسازین ها اصلاح شود، همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱: سنتز پلی بنزوکسازین های مبتنی بر B-ala

با این حال، آلایل دارای بیس بنزوکسازین به عنوان واحدهای مونومری دارای عامل بیس انتخاب شده است تا موقعیت های اتصال عرضی بیشتری را برای توسعه شبکه فراهم کند. همچنین، ساختار جاذب از طریق پلیمریزاسیون بنزوکسازین در حلال دی متیل سولفوکسید (DMSO) به دست آمده است. علاوه بر این، پلی بنزوکسازین های بدست آمده از B-ala می تواند با نمک های جیوه به دلیل وجود چندین خواص ساختاری پیوند عرضی تشکیل دهد. در این میان به دلیل سمیت بالای جیوه، توجه خاص به نمک های آن بسیار ضروری هستند. جیوه می تواند اثرات مضر بر روی مغز، کلیه ها، سیستم عصبی محیطی و سیستم عصبی مرکزی ایجاد کند. همانطور که در تحقیقی [۷۳] گزارش شده است، پلی بنزوکسازین های تهیه شده از عملیات B-ala دارای سطح ویژه برابر با ۴۵ مترمربع بر گرم داشته و برای از بین بردن جیوه (II)

مروری بر نانوکامپوزیت های پلیمری هوشمند و کاربردهای آن ها یک حسگر رنگ سنج و نمک از طریق پوشش نانوذرات طلا (Au-NPs)<sup>۱</sup> با پوسته ای از پلیمر حساس به حرارت PNIPAAm ساخته شده است. پلیمر هوشمند PNIPAAm از طریق فرآیند پلیمریزاسیون و با استفاده از متیل ۲-((بوتیل تیو) کربنوتیول) تیو) پروپانوات (MBTTC)<sup>۲</sup> به عنوان عامل انتقال زنجیر (CTA)<sup>۳</sup> تهیه و به سطح نانوذرات طلا از طریق روش تبادل لیگاند متصل شد [۷۲]. زمانی که این پاسخ ها با غلظت های مختلف نمک قابل مشاهده شد، مواد اصلاح شده PNIPAAm-AuNP قادر به تغییر رنگ از بنفش مایل به قرمز به رنگ آبی در دمای بالا بودند. نمایش گرافیکی اصلاح PNIPAAm-AuNPs و رفتار حساس به حرارت آنها در یک محیط آبی به صورت شماتیک در شکل ۱۰ نشان داده شده است. تجمع Au-NP اتصال الکترونیکی SPR را که برای تغییر رنگ قابل مشاهده مهم است، بهبود می بخشد.



شکل ۱۰: نمایش گرافیکی اصلاح PNIPAAm-AuNPs و رفتار حساس به حرارت آنها در یک محیط آبی

- تصفیه پساب

امروزه پلیمرهای هوشمند و کامپوزیت های آنها نقشی حیاتی در تصفیه پساب دارند. به عنوان مثال، پلی بنزوکسازین ها<sup>۴</sup> دارای اهمیت و ارزش قابل توجهی در این زمینه هستند. به این دلیل که واحدهای تکراری از آمین های نوع سوم و هیدروکسیل فنولیک در ساختار شیمیایی پلی بنزوکسازین

<sup>4</sup> Polybenzoxazines

<sup>5</sup> Chelation

<sup>6</sup> Dimethyl sulfoxide (DMSO)

<sup>1</sup> Gold nanoparticles (Au-NPs)

<sup>2</sup> Methyl 2-(((butylthio)carbonothioyl)thio) propanoate (MBTTC)

<sup>3</sup> Chain transfer agent (CTA)

بر پایه کربن با موفقیت تصفیه شوند. با این حال، جداسازی آلاینده‌ها از آب به کمک جاذب‌ها هنوز یک چالش اساسی است.

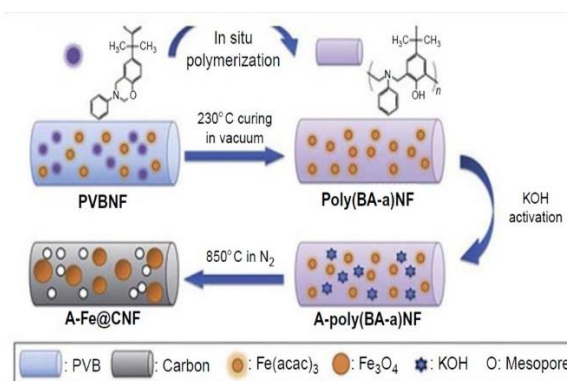
– دستگاه‌های ذخیره سازی داده‌ها

مواد کامپوزیتی پلیمری هوشمند نقش بسزایی در تهیه دستگاه‌های ذخیره سازی داده‌ها دارند. فناوری اطلاعات و ارتباطات و بیشتر استراتژی‌های ذخیره‌سازی دقیق داده‌ها در چند سال گذشته به طرز چشمگیری افزایش یافته است. این روند به ساخت مواد جدید پلیمری هوشمند کمک کرده است مانند تراشه داده، USB و غیره. با این حال، ذخیره سازی داده‌های هولوگرافیک منجر به رشد نسل بعدی دستگاه‌های ذخیره سازی اطلاعات خواهد شد [۷۵]. آنها در مقایسه با دیسک‌های نمایش دو بعدی حجم ذخیره سازی و سرعت انتقال بالایی دارند. با توجه به این نکته، کروموفورهای آروبنزن برای افزودن ویژگی ناهمسانگردی نوری با مواد پلیمری دارای قابلیت آدرس دهی نوری ترکیب شده اند. پلی (بوتیلن سوکسینات) - پلی (e- کاپرولاکتون) / نانولوله های کربنی چند جداره (CNTs)؛ پلی اورتان / گرافن احیا شده با سولفونات / CNT سولفونه شده و پلی (وینیلیدین فلوراید-هگزافلوروپروپیلن) (PVDF-HFP) / اکسید گرافن (GO)<sup>۲</sup> و غیره کامپوزیت‌های رایج مورد استفاده در دستگاه‌های ذخیره انرژی هستند [۷۶].

– درمان سرطان و دستگاه‌های جراحی

مواد پلیمری هوشمند نقش حیاتی در ساخت دستگاه‌های دارویی جدید برای تشخیص و درمان سلول‌های سرطانی دارند. نانوذرات مغناطیسی به طور قابل توجهی در زمینه‌های مختلفی از جمله رفتارهای هایپرترمیاً<sup>۴</sup> برچسب گذاری سلولی، جداسازی مغناطیسی، تصویرسازی زیستی رزونانس مغناطیسی و آزمون سنجش ایمنی<sup>۵</sup> استفاده شده است. حسگرهای زیستی نیز وابسته به کامپوزیت های پلیمری

از آب استفاده شده است. مشخص شده است که جذب نمک جیوه به ۹۸ درصد رسیده که در مقایسه با سایر یون های فلزی خیلی بیشتر است. با این حال، نانوکامپوزیت‌های پلی بنزوکسازین نیز برای تصفیه آب استفاده می شود. در یک کار پژوهشی دیگری [۷۴] از مونومرهای بنزوکسازین بر پایه آئیلین و بیس فنول A (BA-a) به عنوان مونومرهای اولیه جهت تهیه نانوفایبر کربن - Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Fe/CNFs) استفاده شده که در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲: نمایش گرافیکی سنتز در جا پلیمریزاسیون بنزوکسازین برای تهیه کامپوزیت Fe/CNFs

در یک آزمایش دیگر، نانوکامپوزیت حاوی بیسفنول A و پلی وینیل بوتیرال (PVB)<sup>۱</sup> و همچنین استات آهن (Fe(acac)<sub>3</sub>) نیز نسبت به شرایط خاص رفتار پاسخگویی و حساسیت نشان داده است. پلیمریزاسیون در جا بیسفنول A انجام و با پلی وینیل بوتیرال پخت شده است تا نانوکامپوزیت های نانوالیاف پلی بنزوکسازین بدست آید. اخیراً تهیه نانوکامپوزیت‌های نانوالیاف پلی بنزوکسازین بیش تر با استفاده هیدروکسید پتاسیم مورد توجه قرار گرفته‌اند تا این نانوکامپوزیت‌ها را بعداً تحت دمای ۸۵۰ درجه سانتی گراد در محیط نیتروژن به نانوکامپوزیت Fe/CNFs فعال شده تبدیل کنند. با این حال، چند نوع از آلاینده‌ها مانند رنگ‌های آلی در منابع آبی یافت می شوند که می‌توانند با استفاده از نانومواد

<sup>2</sup> Carbon nanotubes (CNTs)

<sup>3</sup> Graphene oxide (GO)

<sup>4</sup> Hyperthermia

<sup>5</sup> Immunoassay

<sup>1</sup> Polyvinyl butyral (PVB)

هوشمند است که در تجزیه و تحلیل های علمی و پزشکی به دلیل اصلاح در جذب آنالیت هایی مانند گلوکز در دیابت ها و برخی از متغیرهای فیزیکی مورد استفاده قرار گرفته است. اکچویتورها<sup>۱</sup> و حسگرهای زیستی در طرح های درمانی انحصاری مانند سنجش گلوکز و تحویل انسولین از طریق چندین نوع دستگاه پزشکی باهم ترکیب شده اند. دستگاه های درمانی مبتنی بر میکروسیالات مانند آزمایشگاه بر روی تراشه<sup>۲</sup> نیز با حسگرهای زیستی برای تشخیص و درمان بهتر تلفیق می شوند [۵۱]. پلیمرهای هوشمند حساس به دما و موارد دیگر پلیمرهای حافظه دار شکل خاص در ساخت چندین نوع تجهیزات پزشکی در زمینه جراحی استفاده شده است. خواص منحصر به فرد حساسیت به دمای پلیمرهای هوشمند اجازه ادغام با وسیله درمانی را به آسانی می دهند. آنها زمانی که در محل مورد نیاز قرار گرفته اند، نتایج امیدوارکننده ای را از خود نشان داده اند. توسعه این نوع از استنت ها<sup>۳</sup> برای عمل - های اورولوژی یا عروق امیدوارکننده گزارش شده است. استنت های پلیمری در مقایسه با استنت های سنتی مبتنی بر فلز قابلیت بیشتری به دلیل خواص منحصر به فرد خود دارند اما در چشم انداز ادغام دارویی به عنوان مثال باید اقداماتی برای کاهش ترومبوز<sup>۴</sup> و ریستنوزیس<sup>۵</sup> پس از استقرار استنت های عروقی و به حداقل رساندن آلودگی در نتیجه گذاشتن استنت های ادراری انجام شود [۴۴-۶۳].

#### - سیستم رهایش دارو

سیستم های زنده به محرک های بیرونی از طریق واکنش و عادت کردن به شرایط خارجی متفاوت پاسخ می دهند. پلیمرهای هوشمند برای کاربردهای زیست پزشکی و همچنین به عنوان سیستم های دارورسانی منتخب، فعال و کنترل شده در مهندسی بافت، زنجیره های کشت سلولی، دستگاه های جداسازی زیستی، حسگرهای زیستی و به عنوان

ماهیچه های مصنوعی پتانسیل آشکاری دارند. مفهوم طرح - های دارورسانی مبتنی بر پلیمر هوشمند در ابتدا در اواخر دهه ۱۹۷۰ با استفاده از لیپوزوم های<sup>۶</sup> حساس به حرارت جهت تخلیه داروها از طریق هایپریمیا توصیف شد. پس از آن، تحقیقات گسترده ای بر روی پلیمرهای هوشمند برای دارورسانی، به ویژه در کاربرد و طراحی آنها انجام شده است [۷۷]. طراحی رویکردهای جدید اساسا با چالش هایی از جمله مدیریت خوب در بدن مواجه می شوند. سیستم ها باید به سادگی مدیریت شده و دارو در محل مورد نظر باید توزیع شوند. همچنین حامل های دارو باید غیر سمی، زیست سازگار و زیست تخریب پذیر باشند. انواعی از مواد پلیمری هوشمند در کاربردهای مختلف، با سیستم های ژلی دارای پیوندهای عرضی و ساختارهای کوپلیمری بدون پیوندهای عرضی استفاده شده اند. یک نوع از این پلیمرهای هوشمند که به طور قابل توجهی در سیستم های دارو رسانی استفاده می شود، پلیمرهای داری اتصالات عرضی میکروژل ها و هیدروژل ها هستند. هیدروژل ها به دلیل ساختار متخلخل و آب دوستی برای طیف وسیعی از کاربردهای زیست دارویی از اهمیت خاصی برخوردار هستند. تخلخل اجازه می دهد تا داروها روی ژل بارگذاری شوند و در نتیجه رهایش دارو با نرخ وابسته به نفوذ ثابت نانو مولکول یا ماکرومولکول در سیستم شبکه ای ژل انجام شود. علاوه بر این، قابلیت، درجه و سرعت تورم هیدروژل ها می تواند اصلاح شود. هیدروژل ها به دلیل خواص منحصر به فرد خود عمدتاً به عنوان سیستم های دارو رسانی موثر مطرح هستند. شکل ۱۳ مکانسیم رهایش دارو از یک هیدروژل را به همراه پروفایل های سینتیکی آن نشان می - دهد.

<sup>6</sup> Liposome

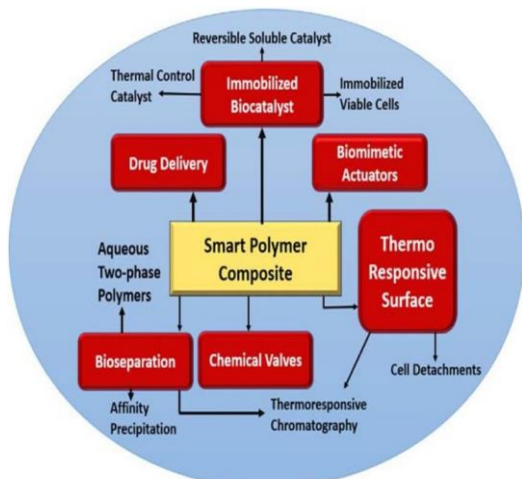
<sup>1</sup> Actuators

<sup>2</sup> lab-on-chip

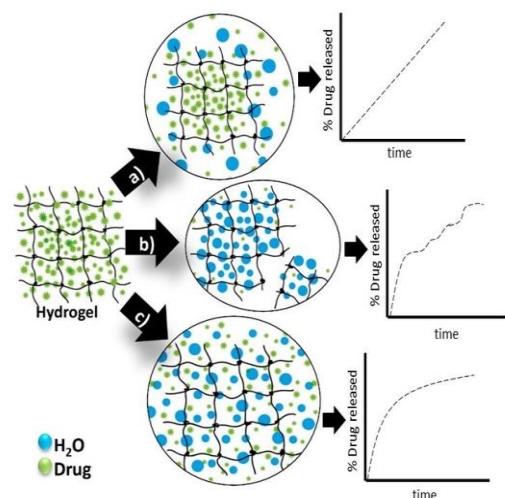
<sup>3</sup> Stents

<sup>4</sup> Thrombosis

<sup>5</sup> Restenosis



شکل ۱۴: کاربرد کامپوزیت پلیمرهای هوشمند در زمینه پزشکی و بیوتکنولوژی



شکل ۱۳: مکانیسم‌های ره‌ایش دارو از یک هیدروژل و پروفایل‌های سنتتیکی مربوطه

#### - چشم اندازهای آینده

کاوش چند رشته‌ای برای پیشرفت و توسعه نانو کامپوزیت-های پلیمری هوشمند و کاربردهای آنها بسیار ضروری است. دانشمندان پلیمر، شیمی‌دانان آلی/ معدنی، دانشمندان مواد، اکولوژیست‌ها، فارماکولوژیست‌ها و متخصصان علوم پزشکی باید برای تحقق مواد نوآورانه جهت فراهم شدن الزامات تمدن مدرن در حال ظهور با یکدیگر همکاری کنند. به همراه پیش روی و برتری‌های به دست آمده در علوم درمانی و پزشکی، پیشرفت در زمینه‌های دیگری مانند ذخیره سازی داده‌ها، صنایع غذایی، معماری و ذخیره انرژی زیستی نیز بسیار قابل توجه است. مواد کامپوزیتی مبتنی بر پلیمر هوشمند مدت‌ها قبل شناخته شده بود اما تا همین اواخر کاوشی کامل در مورد آنها انجام نشده بود. با این حال، کاربردهای بیولوژیکی و زیست محیطی کامپوزیت‌های پلیمری هوشمند بسیار مهیج و بی پایان است. کاربرد مواد پلیمری هوشمند عبارت است از سنجش زیستی، درمان سرطان، دارورسانی، جذب سطحی و تجزیه فوتوکاتالیزوری آلاینده‌ها، تشخیص و شناسایی آلاینده‌های سمی [۸۰]. مهمترین مثال پلیمر هوشمند، پلی بنزوکسازین با کاربردهای متعدد آن است. یکی از چشم‌اندازهای مهم آینده در این زمینه می‌تواند توسعه و سنتز نانو کامپوزیت‌های مبتنی بر پلی بنزوکسازین با مواد دیگری مانند پلیمرهای رسانا، اکسید فلز و

در مورد تحویل دارو، میکرو سوزن‌ها، جذب دارو به غشا را با ارائه یک مسیر ورودی مناسب تقویت می‌کنند. این باعث بهبود عملکرد تحویل تلقیحات و عوامل دارویی مانند پروتئین، DNA و مولکول‌های کوچک می‌شود [۷۸]. نانو حامل‌های پلیمر هوشمند برای انواع مختلفی از کاربردهای ره‌ایش دارو، نقش قابل توجهی را در پیشرفت درمان‌های بسیار دقیق و مطمئن ارائه می‌دهند و باعث ره‌ایش اندازه گیری شده دارو در محل واقعی و در زمان دقیق می‌شوند. در پژوهشی [۷۸] نانوحامل چند عاملی با استفاده از نانو کامپوزیت کوپلیمر متاکریلیک اسید/ PNIPAAm و SiO<sub>2</sub> مورد مطالعه قرار گرفته است. این نانو کامپوزیت پلیمری هوشمند می‌تواند به عنوان واسطه‌های تصویربرداری زیستی و مانیتورهای زیستی برای دنبال کردن محدوده ره‌ایش دارو استفاده شود. نانوحامل‌های چند عامله ذکر شده یک نوآوری خلاقانه و دارای گروه‌های مناسب چند منظوره برای تصویربرداری زیستی فوری و ره‌ایش دارو است. کاربردهای متعدد کامپوزیت‌های پلیمری هوشمند در زمینه بیوتکنولوژی و زیست پزشکی در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



طبیعی و موجب پیشرفت بشر نه تنها در علوم درمانی، بلکه در زمینه غذا، حسگرهای زیستی، منسوجات، انتقال اطلاعات، ذخیره داده ها و غیره خواهد شد. پلیمرهای هوشمند با استفاده از روش های مختلف تولید و برای بسیاری از کاربردهای مفید استفاده شده‌اند. در آینده، ادغام پلیمرهای هوشمند با سیستم‌های زنده و منابع نانومقیاس، موجب ظهور خواص جدید و عملکردهای نوآورانه خواهد شد. یک چالش، پیشرفت سیستم‌هایی است که بتواند به محرک‌های بیرونی متعدد در یک سطح هوشمندی بالا و رفتار قابل انتظار پاسخ دهد. این منابع برای حفظ پیشرفت ساختارهای الهام گرفته شده و تقلید شده از طبیعت با پایداری طولانی مدت و ماندگاری عالی ضروری هستند.

### منابع

- [1] Gordijo, CR., Abbasi, AZ., Amini, MA., Lip, HY., Maeda, A., Cai, P., O'Brien, PJ., DaCosta, RS., Rauth, AM., Wu, XY., 2015, Design of hybrid MnO<sub>2</sub>-polymer-lipid nanoparticles with tunable oxygen generation rates and tumor accumulation for cancer treatment. *Adv Funct Mater*;25(12):1858–72.
- [2] Larson, TA., Joshi, PP., Sokolov, K., 2012, Preventing protein adsorption and macrophage uptake of gold nanoparticles via a hydrophobic shield. *ACS Nano*;6(10):9182–90.
- [3] Indelicato, G., Burkhard, P., Twarock, R., 2017, Classification of self-assembling protein nanoparticle architectures for applications in vaccine design. *R Soc Open Sci*;4 (4):161092.
- [4] Baca, M., Kukulka, W., Cendrowski, K., Mijowska, E., Kale\_nczuk, RJ., Zieli\_nska, B., 2019, Graphitic carbon nitride and titanium dioxide modified with 1 D and 2 D carbon structures for photocatalysis. *Chem Sus Chem*;12(3):612–20.
- [5] Raquez, JM., Habibi, Y., Murariu, M., Dubois, P., 2013, Polylactide (PLA)-based nanocomposites. *Prog Polym Sci*;38(10 11):1504–42.
- [6] Peponi, L., Tercjak, A., Martin, L., Mondragon, I., Kenny, JM., 2011, Morphology-properties relationship on nanocomposite films based on poly (styrene-block-diene-block-styrene) copolymers and silver nanoparticles. *Express Polym Lett*;5(2):104–18.
- [7] Yaqoob, AA., Khan, RM., Saddique, A., 2019, Review article on applications and classification of gold nanoparticles. *Inter J Res*;6(3):762–8.
- [8] Yaqoob, AA., Umar, K., Ibrahim, MN., 2020, Silver nanoparticles: various methods of synthesis, size affecting factors and their potential applications—a review. *Appl Nanosci*;13:1.
- [9] Pereira, Jr VA., de Arruda IN, Stefani, R., 2015, Active chitosan/PVA films with anthocyanins from Brassica oleraceae (red cabbage) as time–temperature indicators for application in intelligent food packaging. *Food Hydrocoll*;43:180–8.
- [10] Monti, M., Hoydonckx, H., Stappers, F., Camino, G., 2015, Thermal and combustion behavior of furan resin/silica nanocomposites. *Eur Poly J*;67:561–9.
- [11] Aı\_ssa, B., Therriault, D., Haddad, E., Jamroz, W., 2012, Self-healing materials systems: overview of major approaches and recent developed technologies. *Adv Mater Sci Eng*;2–12.
- [12] Aoshima, S., Kanaoka, S., 2007, Synthesis of stimuli-responsive polymers by living polymerization: poly (N-isopropylacrylamide) and poly (vinyl ether)s. In: Wax crystal control\_ nanocomposites stimuli-responsive polymers. Berlin, Heidelberg: Springer;. p. 169–208.

غیره باشد. در آینده، ادغام مواد پلیمری هوشمند با سیستم‌های زنده و مواد نانومقیاس، تنوعی از خصوصیات و عملکردهای نوآورانه در دسترس خواهد بود. این رشد مستلزم توسعه مفاهیم نوینی است که بتواند رفتارهای جدیدی از مواد را توضیح دهد مانند توسعه مواد هوشمند نوآورانه که بتواند الزامات یک کاربرد دقیق را برآورده کند. چالش بزرگ دیگر این است که ساختار جدیدی طراحی و معرفی شود که به چندین محرک بیرونی با چندین روش پاسخ دهد. این منابع برای حفظ رشد تقلید زیستی با طراحی های با دوام و پایداری زیاد ضروری هستند [۸۱]. با این حال، مواد کامپوزیتی نانومقیاس سیستم های پلیمری هوشمند نیز موجب تغییرات اساسی و بزرگی در توسعه بسیاری از ابزارها و وسایل مفید برای انسان می‌شوند. با این حال تحقیقات در مورد برهمکنش های بین نانوذرات و پلیمرهای میزبان مانند چگونگی اثرگذاری پارامترهای پلیمری بر توزیع و پراکندگی نانوذرات هنوز ضروری هستند. جامعه علمی باید مکانیزم قابل توجهی را برای بهبود مواد نانوکامپوزیتی پلیمرهای هوشمند ارائه دهد.

### نتیجه گیری

مواد پلیمری در کاربردهای خودشان به عنوان بخش‌های فیزیکی ثابت در نظر گرفته می‌شوند. اخیراً، مواد پلیمری پیشرفته عملکردهای فوق‌العاده‌ای را در ارتباط با تغییر محیط‌های خارجی نشان داده‌اند. این پیشرفت ممکن است از زاویه شبیه بودن به هوش زنده موجود در طبیعت، بیش‌تر مورد توجه قرار بگیرد. از این رو، این نوع پلیمرهای منحصر به فرد به نام پلیمرهای پاسخگو به محرک یا پلیمرهای هوشمند شناخته می‌شوند. تحقیقات چند رشته‌ای برای سنتز پلیمرهای هوشمند و توسعه کاربرد آنها در آینده امری ضروری است. در آینده مهندسان پلیمر و مواد، شیمی‌دانان و متخصصان علوم پلیمر، فیزیکدانان، داروسازان، زیست‌شناسان و متخصصان علم پزشکی مجبور خواهند بود که برای توسعه پلیمرهای هوشمند با هم کار کنند. مواد جدید در حال توسعه مانند پلیمرهای هوشمند باعث بهبود زندگی

- [33] Fernandez-Saiz, P., Ocio, MJ., Lagaron, JM., 2010, The use of chitosan in antimicrobial films for food protection. *CAB Rev*;5(024):1.
- [34] Fioretta, ES., Fledderus, JO., Burakowska-Meise, EA., Baaijens FP, Verhaar MC, Bouten, CV., 2012, Polymer-based scaffold designs for in situ vascular tissue engineering: controlling recruitment and differentiation behavior of endothelial colony forming cells. *Macromol Biosci*;12(5):577–90.
- [35] Fleige, E., Quadir, MA., Haag, R., 2012, Stimuli-responsive polymeric nanocarriers for the controlled transport of active compounds: concepts and applications. *Adv Drug Deliv Rev*;64(9):866–84.
- [36] Gautam, S., Dubey P, Varadarajan R, Gupta, MN., 2012, Role of smart polymers in protein purification and refolding. *Bioengineering*;3(5):286–8.
- [37] Haraguchi, Y., Shimizu T, Yamato M, Okano, T., 2012, Scaffold-free tissue engineering using cell sheet technology. *RSC Adv*;2(6):2184–90.
- [38] Zhuang, J., Gordon MR, Ventura J, Li L, Thayumanavan, S., 2013, Multi-stimuli responsive macromolecules and their assemblies. *Chem Soc Rev*;42(17):7421–35.
- [39] Meng, H., Li, G., 2013, A review of stimuli-responsive shape memory polymer composites. *Polymer*;54(9):2199–221.
- [40] Bajpai, AK., Bajpai J, Saini RK, Agrawal P, Tiwari, A., 2016, Smart biomaterial devices: polymers in biomedical sciences. CRC Press; Dec 19.
- [41] Kumar, A., Srivastava A, Galaev IY, Mattiasson, B., 2007, Smart polymers: physical forms and bioengineering applications. *Prog Polym Sci*;32(10):1205–37.
- [42] Moghanjoughi, AA., Khoshnevis D, Zarrabi, A., 2016, A concise review on smart polymers for controlled drug release. *Drug Deliv Translat Res*;6(3):333–40.
- [43] Seeboth, A, Kriwanek J, Vetter, R., 1999, The first example of thermochromism of dyes embedded in transparent polymer gel networks. *J Mater Chem*;9(10):2277–8.
- [44] Chow, WS., Ishak, ZM., 2020, Smart polymer nanocomposites: a review. *Express Polym Lett*;14(5):416–35.
- [45] Chen, L, Wong MC, Bai G, Jie W, Hao, J., 2015, White and green light emissions of flexible polymer composites under electric field and multiple strains. *Nano Energy*;14:372–81.
- [46] Bian, Y., Yang, C., Gu Q, Zhu X, Wang Y, Zhang, X., 2019, Controlled syntheses of polythiophene nanoparticles with plain and hollow nanostructures templated from unimolecular micelles. *J Polym Sci Part A: Polym Chem*;57(14):1550–5.
- [47] Abbasi, AR., Yousefshahi M, Daasbjerg, K., 2020, Non-enzymatic electroanalytical sensing of glucose based on nano nickel-coordination polymers-modified glassy carbon electrode. *J Inorg Organomet Polym Mater*;6:1–2.
- [48] Long, JJ., Benoudjit AM, Arris FA, Ali F, Salim, WW., 2018, Polymers in biosensors. In: *Multifaceted protocol in biotechnology*. Singapore: Springer; p. 151–65.
- [49] Roy, I., Gupta, MN., 2003, Smart polymeric materials: emerging biochemical applications. *Chem Biol*;10(12):1161–71.
- [50] Dong, J., Wang Y, Zhang J, Zhan X, Zhu S, Yang H, Wang G., 2013, Multiple stimuli-responsive polymeric micelles for controlled release. *Soft Matter*;9(2):370–3.
- [51] Bajpai, AK., Shukla SK, Bhanu S, Kankane, S., 2008, Responsive polymers in controlled drug delivery. *Prog Polym Sci*;33(11):1088–118.
- [52] Ganesh, VA., Baji A, Ramakrishna S., 2014, Smart functional polymers—a new route towards creating a sustainable environment. *RSC Adv*;4(95):53352–64.
- [53] Chen, JK., Hsieh CY, Huang CF, Li PM, Kuo SW, Chang FC., 2008, Using solvent immersion to fabricate variably patterned poly (methyl methacrylate) brushes on silicon surfaces. *Macromolecules*;41(22):8729–36.
- [54] Chen, JK., Hsieh CY, Huang CF, Li PM., 2009, Characterization of patterned poly (methyl methacrylate) brushes under various structures upon solvent immersion. *J Colloid Interface Sci*;338(2):428–34.
- [55] Kungwachakun, D., Irie, M., 1988, Photoresponsive polymers. Photocontrol of the phase separation temperature of
- [13] Arnold, RM., Huddleston, NE., Locklin, J., 2012, Utilizing click chemistry to design functional interfaces through post-polymerization modification. *J Mater Chem*;22 (37):19357–65.
- [14] Arora, G., Singh, I., Nagpal, M., Arora, S., 2011, Recent advances in stimuli induced pulsatile drug delivery system: a review. *Res J Pharm Technol*;4(5):691–703.
- [15] Guillerme, B., Monge, S., Lapinte, V., Robin, JJ., 2012, How to modulate the chemical structure of polyoxazolines by appropriate functionalization. *Macromol Rapid Commun*; 33 (19):1600–12.
- [16] Duarte, AR., Mano, JF., 2011, ensional cell culture strategies. *Acta Biomater*; 7(2):526–9.
- [17] Kwok, CS., Mourad, PD., Crum, LA., Ratner, BD., 2001, Self-assembled molecular structures as ultrasonically-responsive barrier membranes for pulsatile drug delivery. *J Biomed Mater Res*;57(2):151–64.
- [18] Kurihara, S., Ueno, Y., Nonaka, T., 1998, Preparation of poly (vinyl alcohol) graft isopropylacrylamide copolymer membranes with triphenylmethane leucocyanide and permeation of solutes through the membranes. *J Appl Polym Sci*;67(11):1931–7.
- [19] Kippelen, B., Marder, SR., Hendrickx, E., Maldonado, JL., Guillemet, G., Volodin BL, Steele DD, Enami Y, Yao YJ, Wang JF, R€ockel, H., 1998, Infrared photorefractive polymers and their applications for imaging. *Science*;279(5347):54–7.
- [20] Lali, A., Aruna, N., John, R., Thakrar, D., 2000, Reversible precipitation of proteins on carboxymethyl cellulose. *Process Biochem*; 35(8):777–85.
- [21] Irvin, DJ., Goods, SH., Whinnery, LL., 2001, Direct measurement of extension and force in conductive polymer gel actuators. *Chem Mater*;13(4):1143–5.
- [22] Irie, M., Kunwachakun, D., 1986, Photoresponsive polymers. 8. Reversible photostimulated dilation of polyacrylamide gels having triphenylmethane leuco derivatives. *Macromolecules*;19(10):2476–80.
- [23] Gan, LH., Gan, YY., Deen, GR., 2000, Poly (N-acryloyl-N'-propylpiperazine): a new stimuli-responsive polymer. *Macromolecules* ;33(21):7893–7.
- [24] Ding, Z., Chen, G., Hoffman, AS., 1998, Unusual properties of thermally sensitive oligomer–enzyme conjugates of poly (N-isopropylacrylamide)–trypsin. *J Biomed Mater Res*;39(3):498–505.
- [25] Devi, N., Hazarika, D., Deka, C., Kakati, DK., 2012, Study of complex coacervation of gelatin A and sodium alginate for microencapsulation of olive oil. *J Macromole Sci Part A*;49(11):936–45.
- [26] Custodio, CA., Frias, AM., del Campo, A., Reis, RL., Mano, JF., 2012, Selective cell recruitment and spatially controlled cell attachment on instructive chitosan surfaces functionalized with antibodies. *Biointerphases*;7(1):65.
- [27] Malmsten, M., Lindman, B., 1992, Self-assembly in aqueous block copolymer solutions. *Macromolecules*;25(20):5440–5.
- [28] Chenite, A., Chaput, C., Wang, D., Combes, C., Buschmann, MD., Hoemann, CD., Leroux, JC., Atkinson, BL., Binette F, Selmani, A., 2000, Novel injectable neutral solutions of chitosan form biodegradable gels in situ. *Biomaterials*;21(21):2155–61.
- [29] Cappello, J., Crissman, JW., Crissman, M., Ferrari, FA., Textor, G., Wallis O, Whitledge JR, Zhou X, Burman D, Aukerman L, Stedronsky, ER., 1998, In-situ self-assembling protein .polymer gel systems for administration, delivery, and release of drugs. *J Control Release*;53(1-3):105–17.
- [30] Goods, SH., Whinnery, LL., Irvin, DJ., Korellis, JS., 2001, Direct measurement of extension and force in conductive polymer gel actuators. *Sandia Report No. SAND2001-8199*. Feb 1; 2(01).
- [31] Sardar, M., Agarwal, R., Kumar, A., Gupta, MN., 1997, Noncovalent immobilization of enzymes on an enteric polymer Eudragit S-100. *Enzym Microb Technol*;20(5):361–7.
- [32] Takahashi, F., Sakai, Y., Mizutani, Y., 1997, Immobilized enzyme reaction controlled by magnetic heating:  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-loaded thermosensitive polymer gels consisting of Nisopropylacrylamide and acrylamide. *J Ferment Bioeng*;83(2):152–6.

- [72] Maji, S., Cesur B, Zhang Z, De Geest BG, Hoogenboom, R., 2016, Poly (Nisopropylacrylamide) coated gold nanoparticles as colourimetric temperature and salt sensors. *Polym Chem*;7(9):1705–10.
- [73] Taskin, OS., Kiskan B, Aksu A, Balkis N, Weber J, Yagci Y., 2014, Polybenzoxazine: a powerful tool for removal of mercury salts from water. *Chem A Eur J*;20(35):10953–8.
- [74] Si, Y, Ren T, Ding B, Yu J, Sun, G., 2012, Synthesis of mesoporous magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@carbon nanofibers utilizing in situ polymerized polybenzoxazine for water purification. *J Mater Chem*;22(11):4619–22.
- [75] Snook, GA., Kao P, Best, AS., 2011, Conducting-polymer-based supercapacitor devices and electrodes. *J Power Sources*;196(1):1–2.
- diagnostics and early cancer screening: a concise review. *Carbohydr Polym*;229. 115463.
- [76] Yaqoob, AA., Ibrahim MN, Rafatullah M, Chua YS, Ahmad A, Umar, K., 2020, Recent advances in anodes for microbial fuel cells: an overview. *Materials*;13(9):2078.
- [77] Mondal, S., Das S, Nandi AK., 2020, A review on recent advances in polymer and peptide hydrogels. *Soft Matter*;16(6):1404–54.
- [78] Yaqoob, AA., Ahmad H, Parveen T, Ahmad A, Oves M, Ismail IM, Qari HA, Umar K, Mohamad Ibrahim, MN., 2020, Recent advances in metal decorated nanomaterials and their various biological applications: a review. *Front Chem*;8:341.
- [79] Zhang, X., Yang P, Dai Y, Ma PA, Li X, Cheng Z, Hou Z, Kang X, Li C, Lin, J., 2013, Multifunctional up-converting nanocomposites with smart polymer brushes gated mesopores for cell imaging and thermo/pH dual-responsive drug-controlled release. *Adv Funct Mater*;23(33):4067–78.
- [80] Roy, D., Cambre JN, Sumerlin, BS., 2010, Future perspectives and recent advances in stimuli-responsive materials. *Prog Polym Sci*;35(1–2):278–301.
- [81] Zhao, C., Jia X, Shu K, Yu C, Wallace GG, Wang, C., 2020, Conducting polymer composites for unconventional solid-state supercapacitors. *J Mater Chem A*;8(9):4677–99.
- aqueous solutions of poly-[N-isopropylacrylamide-co-N-(4-phenylazophenyl) acrylamide]. *Makromol Chem Rapid Comm*;9(4):243–6.
- [56] Jochum, FD, Theato, P., 2009, Temperature and light sensitive copolymers containing azobenzene moieties prepared via a polymer analogous reaction. *Polymer*;50 (14):3079–85.
- [57] Zhang, Q., Hoogenboom, R., 2015, Polymers with upper critical solution temperature behavior in alcohol/water solvent mixtures. *Prog Polym Sci*;48:122–42.
- [58] Yu, L., Yu, H., 2015, Light-powered tumbler movement of graphene oxide/polymer nanocomposites. *ACS Appl Mater Interfaces*;7(6):3834–9.
- [59] Tang, X., Liang X, Gao L, Fan X, Zhou Q., 2010, Water-soluble triply-responsive homopolymers of N, N-dimethylaminoethyl methacrylate with a terminal azobenzene moiety. *J Polym Sci Part A: Polym Chem*;48(12):2564–70.
- [60] Akiyama, H., Tamaoki N., 2007, Synthesis and photoinduced phase transitions of poly (Nisopropylacrylamide) derivative functionalized with terminal azobenzene units. *Macromolecules*;40(14):5129–32.
- [61] Akiyama, H., Tamaoki, N., 2004, Polymers derived from N-isopropylacrylamide and azobenzene-containing acrylamides: photoresponsive affinity to water. *J Polym Sci Part A: Polymer Chem*;42(20):5200–14.
- [62] Schattling, P., Jochum FD, Theato P., 2011, Multi-responsive copolymers: using thermo-, light-and redox stimuli as three independent inputs towards polymeric information processing. *Chem Commun*;47(31):8859–61.
- [63] Chen, JK., Chang CJ., 2014, Fabrications and applications of stimulus-responsive polymer films and patterns on surfaces: a review. *Materials*;7(2):805–75.
- [64] Liu, Y., Li Y, Yang G, Zheng X, Zhou, S., 2015, Multi-stimulus-responsive shape-memory polymer nanocomposite network cross-linked by cellulose nanocrystals. *ACS Appl Mater Interfaces*;7(7):4118–26.
- [65] Chen, JK., Wang JH, Chang CJ, Huang, CF., 2013, Polarity-indicative two-dimensional periodic concave gratings of tethered polystyrene on silicon surfaces for visualization in VOC sensing. *Sensors Actuators B Chem*;188:1123–31.
- [66] Uchiyama, S., Matsumura Y, de Silva AP, Iwai, K., 2003, Fluorescent molecular thermometers based on polymers showing temperature-induced phase transitions and labeled with polarity-responsive benzofurazans. *Anal Chem*;75(21):5926–35.
- [67] An, BW., Shin JH, Kim SY, Kim J, Ji S, Park J, Lee Y, Jang J, Park YG, Cho E, Jo, S., 2017, Smart sensor systems for wearable electronic devices. *Polymer*;9(8):303.
- [68] Ratajczak, K., Stobiecka, M., 2020, High-performance modified cellulose paper-based biosensors for medical
- [69] Dostalek J, \_Ctyroky´ J, Homola J, Brynda E, Skalsky´ M, Nekvindova P, S´ pirkova´ J, S´ kvor J, Schreöfel, J., 2001, Surface plasmon resonance biosensor based on integrated optical waveguide. *Sensors Actuators B Chem*;76(1–3):8–12.
- [70] Wei, M., Gao Y, Li X, Serpe, MJ., 2017, Stimuli-responsive polymers and their applications. *Polym Chem*;8(1):127–43.
- [71] Toma, M., Jonas U, Mateescu A, Knoll W, Dostalek, J., 2013, Active control of SPR by thermoresponsive hydrogels for biosensor applications. *J Phys Chem C*;117 (22):11705–12.