

بسپارش

فصلنامه علمی- ترویجی

سال دوم، شماره ۳

صفحه ۱۷-۱۰، ۱۳۹۱

ISSN: 2252-0449

## پلیمرهای هوشمند: ۱- معرفی و کاربرد

### Smart Polymers: 1-Introduction and Application

فهیمة خاکزاد اسفهلان، زینب علی نژاد، عباس رضائی شیرین آبادی، علیرضا مهدویان\*

تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۱۵-۱۴۹۶۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۸/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۰/۱۳

متخصصان پلیمر با الهام از سازوکارهای هوشمند موجود در طبیعت و همگام با سایر زمینه‌ها سعی در سنتز و تولید پلیمرهای هوشمندی داشته‌اند که قابلیت پاسخ‌گویی به یک محرک خارجی معین را برای کاربردهای ویژه و نوظهور و رفع نیازهای تخصصی دارا باشد. این محرک‌ها به سه دسته عمومی فیزیکی مانند نور، دما و میدان الکتریکی، شیمیایی مانند pH و حلال و زیستی مانند آنزیم‌ها تقسیم می‌شوند. طبق یک دسته‌بندی، پلیمرهای هوشمند نیز بر اساس حالت فیزیکی به سه حالت زنجیر آزاد در حالت محلول، ژل‌های سه‌بعدی و زنجیرهای سطحی تفکیک شده‌اند. بسته به نوع پاسخ به محرک همچون تغییر شکل یا حجم، ظهور تغییرات فیزیکی مانند تغییر رنگ یا انحلال‌پذیری و تغییرات ساختاری در زنجیر پلیمر، هر یک از این پلیمرهای هوشمند در صنایع مختلف همچون پزشکی، نساجی، الکترونیک، مکانیک، هوا فضا و یا سایر صنایع کاربرد یافته‌اند. این کاربردها امروزه به‌طور چشمگیری در حال پیشرفت هستند.

### چکیده



فهیمة خاکزاد اسفهلان



زینب علی نژاد



عباس رضائی شیرین آبادی



علیرضا مهدویان

### واژگان کلیدی

مواد پاسخ‌گو به محرک،  
پلیمرهای هوشمند،  
محرک فیزیکی،  
محرک شیمیایی،  
محرک زیستی

## مقدمه

امروزه بشر همان‌طور که در صدد تخصصی‌تر کردن کارها و به‌کارگیری نیروی کار متخصص برای انجام امور است، به دنبال اختراع و تولید دستگاه‌ها و موادی است که قابلیت انجام کاری را به‌طور تخصصی و هوشمندانه داشته باشند. هم‌زمان با پیشرفت سایر شاخه‌های علم در این زمینه، دانشمندان پلیمر نیز به پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در زمینه پلیمرهای هوشمند با قابلیت‌ها و کاربردهای ویژه دست یافته‌اند.

در طبیعت موارد متعددی از مواد پاسخ‌گو به محرک دیده می‌شود که طی سال‌ها الهام‌بخش پژوهشگران در زمینه‌های مختلف بوده است. نمونه‌های موجود در سامانه‌های طبیعی مانند برگ نوعی گیاه (*Mimosa Pudica*) که در اثر لمس کردن برگ آن جمع می‌شود، گل آفتابگردان که به طرف خورشید می‌چرخد، میوه درخت کاج که پره‌های آن در اثر رطوبت محیط باز و در محیط‌های خشک جمع می‌شود، پوست آفتاب‌پرست که با تغییر محیط اطراف تغییر رنگ می‌دهد، بسته و باز شدن مردمک چشم با نور و نبود آن، خودترمیمی پوست بدن انسان یا قسمت‌های مختلف گیاهان و موارد مشابه دیگر، دانشمندان را به تلاش برای سنتز پلیمرهای هوشمند با کاربردهای گسترده، نوظهور و راه‌گشا در جهت شبیه‌سازی عملکرد این ارگانیسم‌ها واداشته است [۱]. اگرچه طبیعت، ایده‌های پایان ناپذیر برای طراحی و تولید مواد جدید پیش رو گذاشته است، اما ایجاد سامانه‌های مصنوعی با قابلیت پاسخ‌گویی کنترل شده و روندی از پیش معین شده، خود چالش عظیمی برای دانشمندان است [۲].

پلیمرهای هوشمند دسته‌ای از پلیمرهای سنتزی با خواص منحصر به فرد فیزیکی-شیمیایی هستند که از زمان پیدایش، کاربردهای بسیاری را در زمینه‌های تخصصی و تجاری پیدا کرده‌اند. پلیمر پاسخ‌گو به محرک (*stimuli-responsive*)، پلیمر حساس به محیط (*environmentally-sensitive*) و پلیمرهای هوشمند (*intelligent*) نام‌های دیگری از این دسته مواد است. ویژگی منحصر به فرد این پلیمرها در ایجاد تغییرات ساختاری ماکروسکوپی سریع، ابعادی یا فیزیکی اغلب برگشت‌پذیر در رنگ، نفوذپذیری، شکل و امثال آن در اثر قرارگیری در معرض کوچکترین اثر یک محرک معین در آنهاست. [۳-۴]

پژوهشگران دانشگاه میشیگان آمریکا اولین گروهی بودند که در سال ۱۹۸۸ با استفاده از سیالات الکترورنولوژیک، پلیمر هوشمند ساختند. گرانبوی این پلیمر هوشمند با اعمال کوچکترین جریان الکتریسیته، تقریباً ناگهانی تغییر می‌کرد. این اولین بار بود که واژه هوشمند برای یک پلیمر به‌کار رفت. مواد حساس به محیط به تدریج کاربرد یافتند

[۴]. امروزه اهمیت این دسته از مواد به حدی رسیده است که برخی مجلات، شماره‌ای را به‌طور ویژه به این موضوع اختصاص داده‌اند. مجله *Advanced Materials* در سال ۲۰۱۰، جلد ۲۲، شماره ۳۱ خود را پلیمرهای پاسخگو به محرک نام‌گذاری کرد. مجله *Journal of Materials Chemistry* نیز جلد ۲۰، شماره ۱۷ خود را در همین سال به پلیمرهای متحرک فعال (*actively moving*) اختصاص داده است. مقالات مروری چاپ شده در سال ۲۰۱۰ در مجله *Prog-ress in Polymer Science* جلد ۳۵، شماره‌های ۱-۲ نیز به مواد پاسخ‌گو به محرک اختصاص یافته است.

## معرفی و عملکرد مواد هوشمند

طبق دسته‌بندی Cabane و همکاران، محرک‌ها به سه دسته فیزیکی، شیمیایی و زیستی زیر تقسیم می‌شوند [۵]:

- محرک‌های فیزیکی (نور، دما، فراصوت، مغناطیس، محرک‌های مکانیکی و الکتریکی و فشار) که اغلب دینامیک زنجیرها، برای مثال سطح انرژی یک سامانه پلیمر-حلال را دست‌خوش تغییر می‌کنند.

- محرک‌های شیمیایی (حلال، قدرت یونی و الکتروشیمی یا pH) که برهم‌کنش‌های بین مولکولی، برای مثال میان پلیمر با حلال یا بین زنجیرهای پلیمر را کم و زیاد می‌کنند.

- محرک‌های زیستی (آنزیم‌ها یا گیرنده‌ها) که عملکرد واقعی مولکول‌ها، مانند واکنش‌های آنزیمی یا تشخیص گیرنده‌های مولکول‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهند.

افزون بر این، پلیمرهایی نیز وجود دارند که هم‌زمان به بیش از یکی از این محرک‌ها پاسخ می‌دهند. پلیمرهای پاسخ‌گو به محرک می‌توانند در منسوجات هوشمند، وسایل پزشکی هوشمند، دستگاه‌های الکتروشیمیایی، ماهیچه‌های مصنوعی و روباتیک، ابزارهای شبیه‌ساز زیستی (*biomimetic devices*)، مواد جمع‌شونده در گرما در صنایع بسته‌بندی، ایجاد عملگرهای ویژه در فضاپیماها (تغییر شکل در اثر تغییرات فشار هوا، دما یا رطوبت در فضا)، بازوهای عملگر و حسگرها، مواد جاذب صوت یا بلندگوهای انعطاف‌پذیر به‌کار گرفته شوند.

در حقیقت، محرک‌ها مانند دما، میدان مغناطیسی یا الکتریکی یا نیروی مکانیکی روی منابع مختلف انرژی درون ساختار پلیمر اثر می‌گذارند و برهم‌کنش‌های مولکولی را در نقاط بحرانی یا نقطه انتقال تغییر می‌دهند. مثلاً در یک نقطه بحرانی، این پلیمرها با یک تغییر ریزساختاری سریع و برگشت‌پذیر از حالت آبدوست به آبگریز تبدیل می‌شوند. این موضوع می‌تواند منجر به تشکیل رسوب یا تغییر

جزئی جذب می‌شود. اما با جمع شدن بازتاب این پاسخ‌ها از هر بخش، پاسخ موردنظر شدت می‌یابد و به شکل یک سیگنال قوی مشاهده می‌شود [۲-۳]. انتقال بین این دو حالت که در حالت اعمال انرژی مناسب اتفاق می‌افتد، می‌تواند نوآرایی بین دو حالت سیس-ترانس یا سایر تغییرات صورت‌بندی باشد. نوآرایی‌های القاشده با پیوند هیدروژنی، تجمع و تفکیک، نفوذ-جدایش، نظم-بی‌نظمی یا پروتون‌دار شدن-پروتون‌زدایی نیز از این قبیل هستند. در مجموع، اساس عملکرد یک پلیمر هوشمند شامل دریافت، پردازش و پاسخ به محرک (actuation) براساس ترمودینامیک انتقالات استوار است [۷].

### دسته‌بندی پلیمرهای هوشمند و کاربرد آنها

از بارزترین و شناخته‌شده‌ترین شاخه پلیمرهای هوشمند، که برخی کاربرد گسترده تجاری نیز پیدا کرده‌اند، می‌توان به عنوان نمونه به پلیمرهای حافظه شکلی، پلیمرهای الکتروفعال، پلیمرهای خودترمیم، یون مولکول‌ها، مواد تغییردهنده رنگ، ریزژل‌ها و پلیمرهای حامل مواد تغییر فاز اشاره کرد. در ادامه، انواع این پلیمرها بر اساس نوع محرک به سه دسته پلیمرهای پاسخ‌گو به محرک‌های فیزیکی، پلیمرهای پاسخ‌گو به محرک‌های شیمیایی و پلیمرهای پاسخ‌گو به محرک‌های زیستی تقسیم‌بندی می‌شوند. در هر دسته، کاربرد و مثال‌هایی از این پلیمرها آورده شده است. لازم به ذکر است، برخی از این پلیمرهای هوشمند بسته به نوع پلیمر تشکیل‌دهنده آنها ممکن است در بیش از یکی از این دسته‌ها قرار گیرند. مثلاً، پلیمری ممکن است گرمانگ‌پذیر (thermochromic)، نوررنگ‌پذیر (photochromic) یا الکترورنگ‌پذیر (electrochromic) باشد. در حالی که پلیمر دیگری با همین ویژگی ممکن است رنگ‌پذیر با حلال (solvatochromic) باشد. نمونه دیگر درجه تورم ریزژل‌هاست که ممکن است در اثر محرک‌های فیزیکی مانند نور، دما، میدان‌های الکتریکی یا مغناطیسی و محرک‌های شیمیایی مانند pH قرار گیرند. بنابر این، هم‌پوشانی بین این دسته‌بندی‌ها قابل انتظار است.

#### پلیمرهای پاسخ‌گو به محرک‌های فیزیکی

پلیمرهای حافظه شکلی، تغییردهنده رنگ، الکتروفعال و برخی ریزژل‌ها از جمله پلیمرهایی هستند که در این دسته‌بندی قرار می‌گیرند. پلیمرهای حافظه شکلی قابلیت به‌خاطر سپردن شکل اولیه و بازگشت به آن را حتی پس از تغییر شکل‌های نسبتاً زیاد دارند. در ابتدا این پلیمرها به‌طور معمول فراورش می‌شوند تا شکل دائمی آنها

حجم آب در هیدروژل‌های پاسخ‌گو به محرک شوند. پلیمرهای رسانا با پایه پلی‌استیرن پلی‌تیوفن‌دار شده یا پلی‌سولفون‌دار شده در اثر اعمال میدان الکتریکی یا مغناطیسی خارجی خم می‌شوند. کوپلیمرهای متیل متاکریلات و متاکریلیک اسید با تغییرات جزئی در pH (حدود ۰/۲ تا ۰/۳)، تحت انتقالات صورت‌بندی سریع قرار می‌گیرند و در pHهای کم (حدود ۵) ساختار فرومی‌پاشد. در حالی که کوپلیمر متیل متاکریلات با دی‌آمینواتیل آکریلات در pHهای کم محلول است، ولی در شرایط بازی ضعیف دچار فروپاشی در ساختار شده و توده‌ای می‌شود [۲].

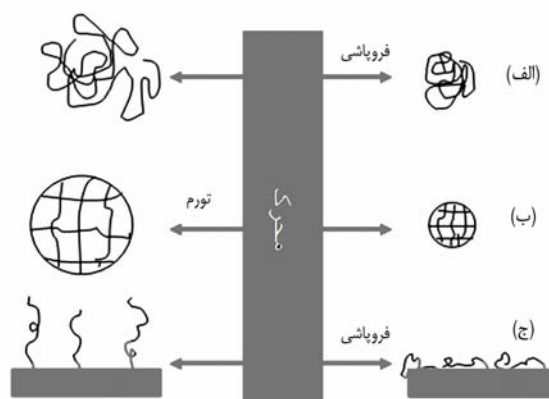
پلیمرهای هوشمند طبق دسته‌بندی Kumar بر اساس حالت فیزیکی خود به سه دسته تقسیم می‌شوند [۶]:

۱- زنجیرهای آزاد در محلول، که پلیمر در اثر محرک می‌تواند به‌طور برگشت‌پذیر دچار فروپاشی ساختار شود.

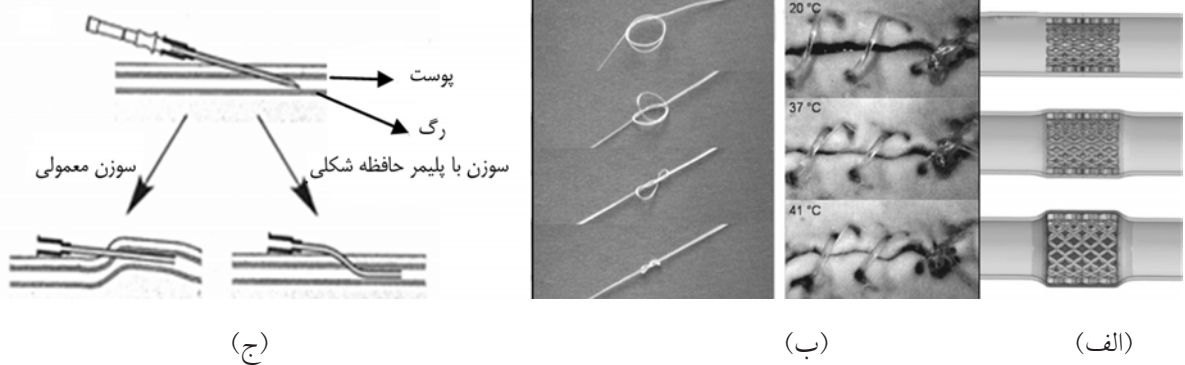
۲- ژل‌های دارای پیوند عرضی کووالانسی و ژل‌های برگشت‌پذیر یا فیزیکی با شبکه‌های میکروسکوپی یا ماکروسکوپی که رفتار تورم آنها تحت تاثیر محیط اطراف آنها قرار می‌گیرد و

۳- حالت جذب سطحی زنجیر یا پیوندزنی به سطح، که پلیمرهای روی سطح به‌طور برگشت‌پذیر متورم شده یا فرومی‌پاشند و می‌توانند سطح مشترک را از حالت آبدوست به آبگریز و برعکس تبدیل کنند (شکل ۱).

ذکر این نکته ضروری است، این تغییرات اغلب برگشت‌پذیر به سطوح انرژی در حالت‌های انتقالی مد نظر بستگی دارد. در حقیقت، تغییرات مزبور به‌طور ضمنی با حفظ ساختار اصلی شبکه در سطوح انرژی پایین‌تر از حالت تعادل اتفاق می‌افتد. با توجه به ماهیت ماده، محرک تنها به‌وسیله بخشی از ساختار مولکولی یا ابرمولکولی به‌طور



شکل ۱- سه حالت فیزیکی پلیمرهای هوشمند: (الف) زنجیر محلول، (ب) شبکه‌های میکرو یا ماکروسکوپی و (ج) زنجیرهای سطحی [۶].



شکل ۲- (الف) استنت پلیمری با سازوکار افزایش حجم در محل گرفتگی عروق، (ب) نخ بخیه خودگره‌خور و (ج) سوزن تزریق با استفاده از پلیمر حافظه شکلی [۸].

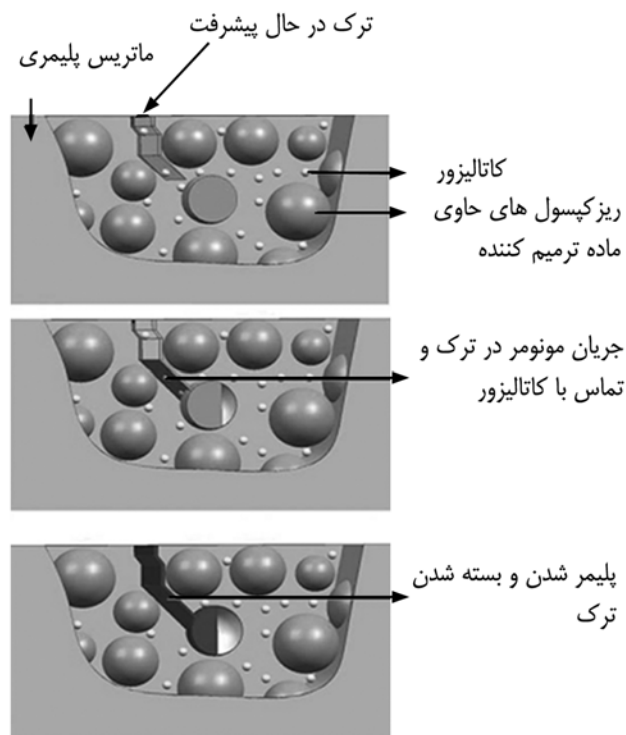
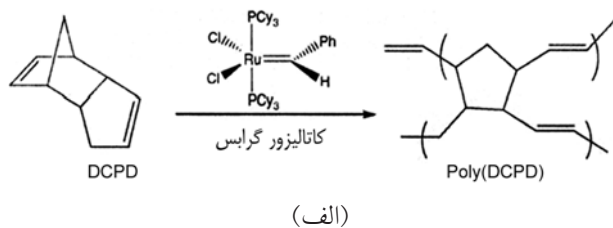
گرمایی، پلیمرهای الکترورننگ‌پذیر با تحریک جریان الکتریکی، پلیمرهای پیزورنگ‌پذیر (piezochromic) با فشار، حلال رنگ‌پذیر با حلال تغییر رنگ می‌دهند [۱۰]. کاربردهای این دسته در عینک‌های طبی-آفتابی یا کاربردهای تزئینی در لباس، پوشاک یا اسباب‌بازی‌های تغییررنگ دهنده است. رنگدانه‌های پایه پلیمری حساس به دما نیز می‌توانند به‌طور مرئی و برگشت‌پذیر در محدوده دمایی از پیش معین شده (برای مثال ۱۵ تا ۳۵°C) تغییررنگ دهند. این دما می‌تواند با توجه به ساختار رنگدانه و اصلاحات شیمیایی انجام شده روی آن تنظیم شود و در ساخت فیلم و رنگ در پوشش‌ها یا نشانگرهای امنیتی حساس به دما به کار روند [۱۰].

مؤسسه سوئدی Interactive Institute پرده‌ای طراحی کرده است که از مواد تغییررنگ دهنده حساس به نور فرابنفش در آن بهره گرفته شده است. یک لامپ UV کنترل شونده با کامپیوتر به طور دینامیک، بخش‌های مختلفی از پرده را نورپردازی می‌کند و الگوی بافتی دینامیک را بسته به اطلاعات داده شده در آن ایجاد می‌کند. در نتیجه، این پرده می‌تواند به عنوان یک نمایشگر هوشمند به کامپیوتر متصل شود [۱۱].

امروزه، پلیمرهای بلورمابع به‌دلیل مقاومت مکانیکی زیاد در دماهای بالا، مقاومت شیمیایی بسیار زیاد، دیراشته‌الی، مقاومت جوی زیاد، ثابت دی‌الکتریک زیاد و سایر خواص منحصر به فرد کاربردهای زیادی یافته‌اند. بلورها در اثر محرک اعمالی با تغییر در نظم و شیوه قرارگیری در کنار یکدیگر می‌توانند ساختاری انعطاف‌پذیر یا صلب و جامد پیدا کنند. کلاه ایمنی یا جلیقه‌های ضدگلوله تهیه شده از الیاف کولار (Kevlar) بلورمابع، نمونه‌ای از کاربرد اثر محرک مکانیکی روی این ساختارهاست. افزون بر این اثر، پلیمرهای بلورمابع می‌توانند با تحریک دمایی به‌وسیله منبعی مانند لیزر به طور موضعی ذوب، جهت‌دهی و سرد شوند و طی این مسیر، تغییر رنگ را به

مشخص شود. آنگاه با گرم کردن آنها تا بیش از دمای انتقال (Tm یا Tg) در اثر کار مکانیکی، شکل جدید دلخواهی می‌یابند که با کاهش دما به زیر دمای انتقال، این شکل جدید یا موقت می‌تواند حفظ شود. در این حالت، شکل دائمی در نمونه بالقوه ذخیره می‌شود، در حالی که شکل موقت نمونه به نمایش گذاشته شده است که این فرایند را برنامه‌ریزی می‌خوانند. گرم کردن مجدد پلیمر تا بیش از دمای انتقال باعث بازگشت آن به شکل دائمی ذخیره و از بین رفتن شکل موقت می‌شود. این سازوکار می‌تواند با توجه به دمای انتقال پلیمر استفاده شده، کاربردهای اختصاصی داشته باشد. از جمله کاربردهای آن، صنایع پزشکی است. مثال‌هایی در این باره، سوزن‌های تزریق انعطاف‌پذیر در دمای بدن برای جلوگیری از تخریب بافت محل تزریق یا پروتزها، کاشتنی‌ها و استنت‌های زیست‌تخریب‌پذیر هستند که به عنوان مثال، برای رفع گرفتگی عروق به کار می‌روند (شکل ۲-الف). برای وارد کردن کمترین آسیب به بدن، استنت با رسیدن به محل مورد نظر افزایش حجم می‌دهد. تهیه نخ بخیه خودگره‌خور نیز دستاورد دیگری در صنایع پزشکی است (شکل ۲-ب) [۸].

کاربرد دیگر این سازوکار در رهایش کنترل شده دارو در بدن از راه عملکرد غشایی در شرایط محیطی قسمت آسیب دیده است یا به‌طور مشابه در بانداژهای هوشمند رهاساز آنتی‌بیوتیک در محل زخم نیز کاربرد دارند [۹]. این شاخه از پلیمرها، در منسوجات هوشمند نیز برای تولید پارچه‌های تنفس‌پذیر، ضدچروک و غیره استفاده می‌شوند. دسته دیگر، پلیمرهای تغییررنگ‌دهنده هستند که رنگ، شدت رنگ یا شفافیت خود را تغییر می‌دهند. به دلیل خواص تغییر رنگ، این پلیمرها مواد آفتاب پرست (Chameleon) نیز نامیده می‌شوند. پلیمرهای مزبور بسته به نوع محرک خارجی که تغییر رنگ را در آن القا می‌کند، به چند دسته تقسیم‌بندی می‌شوند. از جمله پلیمرهای نوررنگ‌پذیر که با تحریک نوری، پلیمرهای گرم‌رنگ‌پذیر با تحریک



شکل ۳- (الف) واکنش پلیمر شدن جابه‌جایی حلقه‌گشای مونومر دی‌سیکلوپنتادی ان و (ب) سازوکار عملکرد پلیمرهای خودترمیم شونده [۱۴].

از پلیمر-پلیمر باشد، زنجیرهای PNIPAAm، ساختار کلاف تصادفی تشکیل می‌دهند.

حال اگر در اثر افزایش دما این پیوندهای هیدروژنی با آب شکسته شوند، آب حبس شده در ساختار آزاد می‌شود. در این حالت، برهم‌کنش‌های پلیمر-پلیمر غالب می‌شوند که منجر به انتقال ساختاری کلاف-گویچه (coil-globule) می‌شود. دمایی که در آن جدایی فاز مزبور رخ می‌دهد، دمای انحلال بحرانی کمتر (lower critical solution temperature) یا LCST نام دارد. در نتیجه، ریزژل PNIPAAm در دماهای کمتر از حدود LCST متورم و در بیش از این دما جمع می‌شوند. مشابه همین عملکرد در سایر ریزژل‌های پلیمری اتفاق می‌افتد که بر اساس تعادل بین برهم‌کنش‌های پلیمر-پلیمر، حلال-حلال یا پلیمر-حلال در اثر

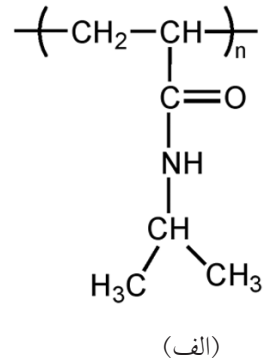
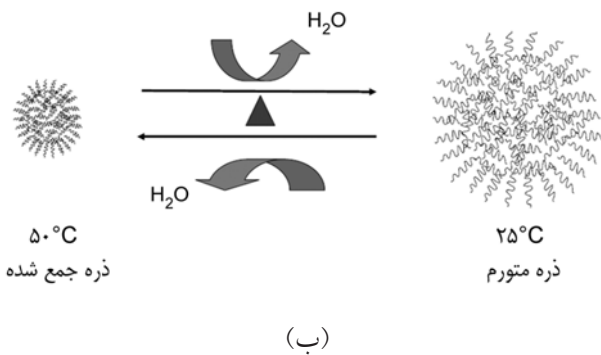
نمایش بگذارند. البته به دلیل آن که این تغییرات ساختاری در پلیمرها نسبت به مواد بلورم‌های موجود بسیار کندتر اتفاق می‌افتد، استفاده از آنها در نمایشگرهای تجاری چالشی عظیم است. اما در کاربردهایی که پاسخ نوری سریعی انتظار نمی‌رود، پلیمرها بسیار مناسب‌اند [۱۲]. تغییر رنگ پلیمرهایی مانند پلی‌تیوفن در اثر مجاورت با گرما تاکنون به ثبت رسیده است [۱۳].

پلیمرهای خودترمیم شونده، دسته دیگری از این پلیمرها هستند. هنگامی که مواد پلیمری تحت انواع آسیب‌های احتمالی در اثر عواملی مانند فشار، ضربه، خستگی، خراش‌های سطحی یا ضربات گلوله قرار گیرند، ممکن است تخریب شوند. ایجاد ترک‌های ریز از رایج‌ترین انواع تخریب است که با پیشرفت آنها، پلیمر به تدریج بسیاری از ویژگی‌های خود را از جمله خواص مکانیکی و گرمایی از دست می‌دهد و طول عمر آن کاهش می‌یابد. اما از آنجا که دسترسی به منطقه آسیب دیده در بسیاری از مواد پلیمری به منظور تشخیص و ترمیم غیرممکن است، نیاز به ایجاد قابلیت خودترمیمی (self healing) در مواد پلیمری به وجود آمده است. این خاصیت ممکن است به طور ذاتی (با اعمال گرما یا حلال) یا به وسیله عوامل افزوده شده خارجی (توزیع ریزکپسول‌ها، الیاف توخالی یا ساختارهای شبکه‌ای حاوی آغازگر و کاتالیزور در ساختار ماتریس) در ماده وجود داشته باشد.

بیشترین مطالعات روی ایجاد این خاصیت در پلیمرهای گرماسخت انجام گرفته است. مثالی از این نوع، ایجاد قابلیت خودترمیمی در ماتریس اپوکسی به کمک ریزکپسول‌هایی از جنس رزین اوره-فرمالدهید حاوی مونومر دی‌سیکلوپنتادی ان (DCPD) به عنوان عامل ترمیم، در مجاورت کاتالیزور گرابس (Grubbs) است که در شکل ۳-الف نشان داده شده است [۱۴].

ریزژل‌ها نیز می‌توانند هوشمند باشند. همان‌طور که گفته شد، هر دو گروه محرک‌های فیزیکی و شیمیایی می‌توانند آنها را تحت تاثیر قرار دهند. بدین معنی که درجه تورم آنها بسته به ساختار پلیمر می‌تواند تحت تاثیر عوامل محیطی مانند دما، میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی، نور و همچنین pH تغییراتی را از خود نشان دهد. از انواع این ریزژل‌ها که بیشترین مطالعات روی آن انجام گرفته است، پلی (N-ایزوپروپیل آکریل‌امید) یا PNIPAAm است. این پلیمر قابلیت تشکیل پیوند هیدروژنی را از راه گروه‌های جانبی آمیدی خود دارد، در حالی که گروه‌های ایزوپروپیل موجود در ساختار آن نیز خصلت آبگریزی در آن القا می‌کنند (شکل ۴-الف). این دو ویژگی در کنار هم یک برهم‌کنش پلیمر-پلیمر وابسته به انتروپی را ایجاد می‌کند. به این معنی که اگر برهم‌کنش‌های پلیمر-حلال قوی‌تر





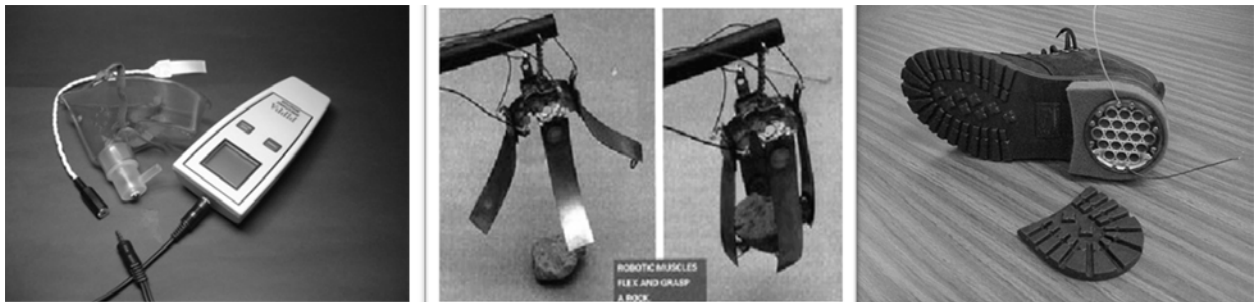
شکل ۴- (الف) ساختار شیمیایی PNIPAAm و (ب) نمایی از رفتار پاسخ‌گویی ذره ریزژل PNIPAAm در برابر دما [۱۵].

شده‌اند. در واقع، هر زمان نام پلیمر الکتروفعال به عنوان پلیمر هوشمند به میان می‌آید، پلیمرهای رسانا و پیزوالکتریک در صدر قرار دارند. پلیمرهای پیزوالکتریک زیرمجموعه پلیمرهای فروالکتریک هستند. هر ماده‌ای که قابلیت تولید کار مکانیکی را در اثر عبور جریان الکتریکی داشته باشد و برعکس در اثر اعمال کار مکانیکی، جریان الکتریکی تولید کند، پیزوالکتریک به‌شمار می‌رود [۱۷]. این ویژگی به دلیل ساختار شبکه‌ای نامتقارن و قطبش‌پذیری خود به خود در اثر چرخش ساختارهاست. بنابراین، هوشمندی این مواد در تبدیل پیوسته و برگشت‌پذیر نیروی مکانیکی به الکتریکی و برعکس است [۱۸]. معروف‌ترین پلیمر پیزوالکتریک که کاربرد تجاری زیادی هم دارد، پلی (وینیلیدن فلئورید) است. نمونه کاربردهای این پلیمر در صفحه کلید لوازم الکترونیکی، باتری‌های شارژ شونده، مبدل‌های انرژی، حسگرهای تنفسی، حسگرهای تماسی، ربات‌ها و ماهیچه‌های مصنوعی است [۱۹].

پلیمرهای رسانا که اغلب با فرایند دوپه شدن رسانایی الکتریکی آنها افزایش می‌یابد، دسته دیگری هستند. معروف‌ترین آنها با کاربردهای تجاری، پلی استیلن، پلی پیرول، پلی آنیلین و پلی تیوفن هستند. اغلب

تغییر دما، pH، قدرت یونی، ترکیب درصد حلال و غیره انجام می‌گیرد [۱۵]. در شکل ۴-ب، نمونه‌ای از تغییرات رفتار تورم PNIPAAm در برابر دما نشان داده شده است.

پلیمرهای الکتروفعال پلیمرهایی هستند که نسبت به قرارگرفتن در میدان الکتریکی حساسیت نشان می‌دهند. به این معنی که هنگام قرارگرفتن در میدان الکتریکی یکی از خواص فیزیکی یا اندازه و شکل آنها تغییر می‌کند. این خاصیت در اغلب این‌گونه پلیمرها برگشت‌پذیر است. یعنی با تغییر بعضی از خواص فیزیکی آنها، یک اختلاف پتانسیل الکتریکی و در نتیجه یک جریان الکتریکی در آنها ایجاد می‌شود [۱۶]. با توجه به سازوکار عملکردی و نوع تغییر ماهیت منجر به ایجاد جریان الکتریکی، این پلیمرها به دو گروه عمده پلیمرهای الکترونی و یونی تقسیم می‌شوند. پلیمرهای الکترونی خود به دو گروه عمده الاستومرهای دی‌الکتریک و پلیمرهای فروالکتریک و پلیمرهای یونی نیز به چند زیرگروه پلیمرهای رسانا، پلیمرهای یونی، کامپوزیت‌های پلیمر یونی- فلز و پلیمر-کربن تقسیم می‌شوند. پلیمرهای پیزوالکتریک و پلیمرهای رسانا دو گروه از این پلیمرها هستند که از حیث کاربرد و مطالعات به عنوان هوشمند شناخته



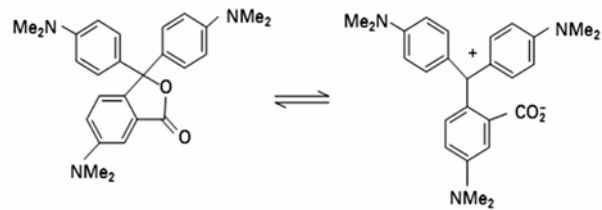
شکل ۵- نمونه کاربردهای پلیمرهای الکتروفعال: (الف) پاشنه کفش مولد انرژی الکتریکی از پلیمر پیزوالکتریک، (ب) بازوی مکانیکی از جنس پلیمر رسانا و (ج) حسگر تنفسی از جنس پلیمر پیزوالکتریک.

تعادل اسید-باز به معنای آن است که حساسیت به pH منجر به رفتارهای گرم‌رنگ‌پذیری می‌شود (شکل ۶).

در برخی محلول‌های پلیمری حساس به pH، ساختار شیمیایی گروه‌های عاملی با قابلیت یونش و گرفتن یا از دست دادن پروتون و حجم آبگریز در طول زنجیر پلیمر تحت تاثیر قرار می‌گیرد و ساختار منبسط شده یا فرومی‌پاشد. نمونه‌هایی از این پلیمرها در شکل ۷ آورده شده است [۲]. ریزژل‌ها با کاربردهایی نظیر دارورسانی یا ذخیره و آزادسازی دارو در بدن یا به عنوان بستر کاتالیزور برای واکنش‌هایی همچون اکسایش هوازی الکل‌ها استفاده می‌شوند. آنها باعث بهبود چشمگیر در عملکرد به دلیل کنترل نفوذ و گزینش‌پذیری آن برای محل مورد نظر می‌شود [۱۵].

### پلیمرهای پاسخ‌گو به محرک‌های زیستی

پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر در زیست‌پزشکی از جمله مهندسی بافت و سامانه‌های دارورسانی مورد توجه قرار گرفته‌اند. هیدروژل‌های حساس به آنزیم از جمله این پلیمرهاست که می‌توانند به وسیله آنزیم‌های خاصی در بدن هضم شوند. این حساسیت آنزیمی برای تشخیص تغییرات فیزیولوژیکی یا دارورسانی محل‌گزین کاربرد پیدا کرده است. برای مثال، آنزیم‌های میکروبی غالبی که در کولون وجود دارند، مانند دکستراناز که می‌توانند منجر به تخریب ساختار پلی‌ساکاریدی هیدروژل‌های دکستران حامل دارو شود. Miyata و همکاران، تخریب این هیدروژل و دارورسانی آن را در محل روی موش آزمایش کرده‌اند. با وجود دکستراناز، سرعت نفوذ دارو وابسته به مقدار آنزیم میکروبی است و در نبود آن پدیده نفوذ، کنترل‌کننده سرعت دارورسانی است [۲۱].



pH > 4 بی‌رنگ

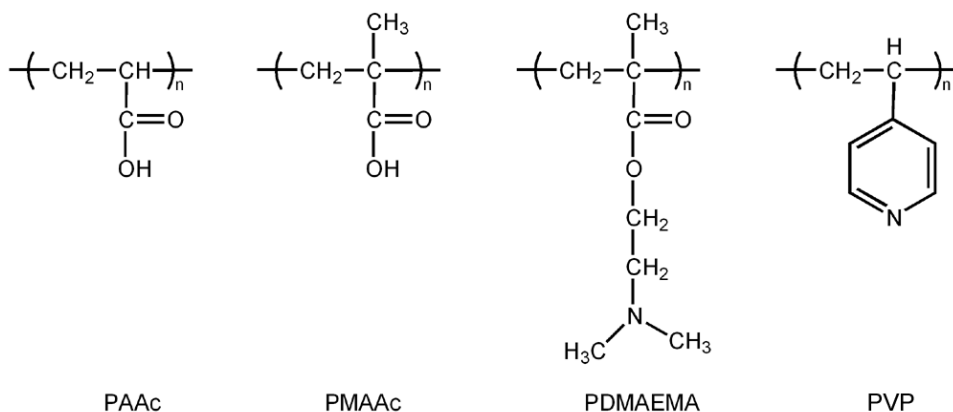
pH < 4 بنفش

شکل ۶- اثر رنگ وابسته به pH لاکتون بنفش بلور [۱۰].

پس از دوپه شدن، در این پلیمرها یک زوج یون روی زنجیر وجود دارد. یک یون ثابت روی زنجیر و یک زوج یون مخالف متحرک که با جاذبه الکتروستاتیکی کنار یون قرار گرفته است. در اثر اعمال جریان الکتریکی، زوج یون مخالف حرکت می‌کنند و زنجیر تغییر شکل می‌دهد [۲۰]. کاربرد این پلیمرها در تهیه ربات‌ها، سلول‌های الکتروشیمیایی، خازن‌ها، باتری‌ها و حسگرهاست (شکل ۵).

### پلیمرهای پاسخ‌گو به محرک‌های شیمیایی

همان‌طور که گفته شد، محرک‌های شیمیایی مانند تغییر حلال یا تغییر مقدار اسیدی و بازی بودن محیط می‌تواند منجر به واکنشی از طرف یک پلیمر هوشمند شود. برای مثال در یک پلیمر گرم‌رنگ‌پذیر، نوآرایی مولکولی که از توتومری شدن در نتیجه یک تعادل اسید-باز، کتون-انول، لاکتیم-لاکتام یا غیره به وجود می‌آید، می‌تواند منجر به افزایشی در زوج شدن ساختار مولکول و تشکیل شدن یک رنگ‌ساز جدید شود. چنین نوآرایی مولکولی ممکن است با ایجاد تغییرات دمایی یا اعمال تغییرات در قطبیت حلال یا pH سامانه تحت تاثیر قرار گیرد. به دلیل اثر رنگ‌پذیری وابسته به pH، وابستگی دمایی



PAAc پلی(آکریلیک اسید)

PMAAc پلی(متاکریلیک اسید)

PDMAEMA پلی(N, N' دی متیل آمینواتیل متاکریلات)

PVP

شکل ۷- برخی محلول‌های پلیمری حساس به pH.

با برنامه ریزی روی این مسیر و سنتز پلیمرهایی که قابلیت حرکت دقیق بر این اساس را داشته باشند، می توان کاربردهای بسیار تخصصی و راه گشا از آنها انتظار داشت. امروزه پلیمرهای هوشمند به طور گسترده در صنایع پزشکی مانند دارورسانی و مهندسی بافت در حال مطالعه و بهره برداری هستند. افزون بر این، مطالعاتی در سراسر دنیا نیز در صنایع نساجی برای تولید الیاف هوشمند با قابلیت هایی همچون تنفس پذیری یا مثلا خودترمیمی در صنایع بسته بندی و پوشش های هوشمند یا ایجاد احجام ساختمانی در فضا یا تولید شبه روبات های حساس به محیط در صنایع پیشرفته هوافضا در حال انجام است.

پلیمرهای هوشمند متعددی با قابلیت های مختلف در زمینه های تخصصی و تجاری نیازسنجی شده اند. این پلیمرها می توانند با ایجاد تغییر در ساختار خود در اثر یک محرک، پاسخی خاص را به محیط بازگردانند. محرک ها نیز می توانند فیزیکی، شیمیایی یا زیستی باشند. پلیمر هوشمند طی مسیری پیش بینی شده، پاسخی سریع و اغلب برگشت پذیر به محرک مناسب می دهد. این پاسخ می تواند تغییرات سریع ماکروسکوپی ساختاری، ابعادی یا فیزیکی اغلب برگشت پذیر در رنگ، نفوذپذیری، شکل و امثال آن باشد.

## مراجع

- Hu J., Meng H., Guoqiang L., and Ibekwe S., A Review of Stimuli-responsive Polymers for Smart Textile Applications, *Smart Mater. Struct.*, **21**, 2012.
- Liu F. and Urban M., Recent Advances and Challenges in Designing Stimuli-responsive Polymers, *Prog. Polym. Sci.*, **35**, 3-23, 2010.
- Lendlein A. and Shastri P., Stimuli-Sensitive Polymers, *Adv. Mater.*, **22**, 3344-3347, 2010.
- Mahajan A. and Aggarwal G., Smart Polymers: Innovations in Novel Drug Delivery, *Inter. J. Drug Dev. Res.*, **3**, 16-30, 2011.
- Cabane E., Zhang X., Langowska K., Palivan C., and Meier W., Stimuli-Responsive Polymers and Their Applications in Nanomedicine, *Biointerphases*, **7**, 1-4, 2012.
- Kumar A., Srivastava A., Galaev I., and Mattiasson B., Smart Polymers: Physical forms and Bioengineering Applications, *Prog. Polym. Sci.*, **32**, 1205-1237, 2007.
- Reneker D., Mattice W., Quirk R., and Kim S.J., Macromolecular Smart Materials and Structures, *Smart Mater. Struct.*, **1**, 84-90, 1992.
- <http://www.slideserve.com/shadow/smart-polymers-hydrogels-and-shape-memory-polymers>; <http://www2.smptechno.com/tech/pdf/MPMD Maitland SMP talk v4.pdf>.
- Lendlein A., *Shape-Memory Polymers*, Springer, New York, 147-175, 2010.
- Mattila H.R., *Intelligent Textiles and Clothing*, Woodhead, Cambridge, 193-205, 2006.
- Hallnäs L., Melin L., and Redström J., A Design Research Program for Textiles and Computational Technology, <http://www.redstrom.se/johan/abstracts/textile.html>.
- Polymer Liquid Crystals, [http://plc.cwru.edu/tutorial/enhanced/files/plc/plc\\_apps/plc\\_Apps.htm](http://plc.cwru.edu/tutorial/enhanced/files/plc/plc_apps/plc_Apps.htm), 2012.
- Lucht B., Eluer W.B., and Gregory O., Thermochromic Polymers for Rapid Visual Assessment of Temperature, *US Pat. 6706218 B2*, 2004.
- Ghosh S.K., *Self-healing Materials, Fundamentals, Design Strategies and Applications*, Wiley-VCH, Germany, Ch.1, 1-22, 2009, DOI: 10.1002/9783527625376.
- Pich A. and Richtering W., *Chemical Design of Responsive Microgels*, Springer, Germany, Ch.1, 2010.
- Gordon G.W., *Conductive Electroactive Polymers*, 2nd ed., CRC, New York, Ch.1, 2003.
- Ghosh T.K., Kotek R., and Muth J., *Development of Layered Functional Fiber Based Micro-Tubes*, National Textile Center (NTC) Project Report, F02-NS05, 2002.
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Ferroelectricity>.
- Roth S. and Carroll D., *One-Dimensional Metals; Conjugated Polymers, Organic Crystals, Carbon Nanotubes*, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, Ch.1 and 11, 2004.
- Boczkowska A. and Leonowicz M., Intelligent Materials for Intelligent Textiles, *Fibers Text. East. Eur.*, **14**, 59, 2006.
- Miyata T., Uragami T., and Nakamae K., Biomolecule-sensitive Hydrogels, *Adv. Drug Deliver. Rev.*, **54**, 79-98, 2002.