

## واژه‌های کلیدی:

پلیمر حافظه شکلی،  
دما،  
سازوکار،  
برهم‌کنش،  
شکل موقت

# مروری بر سازوکار، ساختار و کاربرد پلیمرهای حافظه شکلی

حمیدرضا حیدری\*

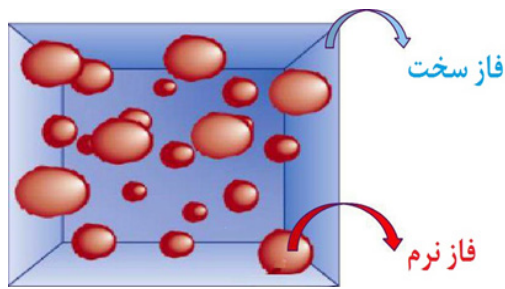
تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران

## چکیده ...

پلیمرهای حافظه شکلی (SMPS)، جایگاهی ویژه از مواد را تشکیل می‌دهند و به‌عنوان یکی از نمایندگان سامانه‌های پلیمری هوشمند، در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. پلیمرهای حافظه شکلی، پلیمرهای پاسخگو به محرک هستند. عوامل تحریک‌کننده ورودی می‌تواند به‌صورت نور، دما، تغییر pH، تغییر حلال، میدان‌های الکتریکی یا مغناطیسی باشد که خروجی آن‌ها کرنش است. امروزه این پلیمرها، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌است و علاوه‌براین تحقیقات بنیادی و نوآوری‌های بسیاری روی این مواد انجام می‌شود. بررسی حاضر، مروری کوتاه با توجه ویژه بر ساختار، سازوکارها و کاربردهای SMPها، اثر حافظه شکلی و همچنین پیشرفت‌ها و مفاهیم حال حاضر را که برای این پلیمرها انجام شده‌است، ارائه می‌کند. از جمله کاربردهای پلیمرهای حافظه شکلی می‌توان در صنایع پزشکی، صنایع تجاری، صنایع هوافضا، پلیمرهای خودترمیم‌شونده و غیره اشاره کرد.

\*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

h.heidari@ippi.ac.ir



شکل ۲ تصویری از فاز نرم و سخت در شبکه‌ی پلیمری [۲].

## ۱ مقدمه

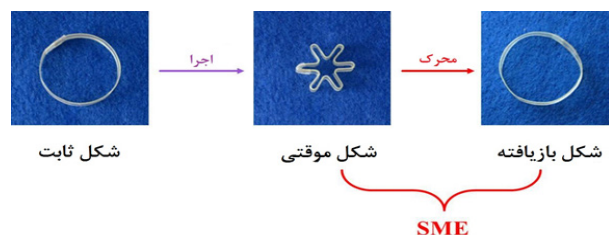
مواد پاسخگو به محرک یا به اصطلاح مواد هوشمند، موادی هستند که می‌توانند محیط اطراف خود را حس کنند و به صورت مستقیم پاسخ دهند [۱]. پلیمر حافظه شکلی (Shape-Memory Polymer) یا به اختصار SMP، پلیمری هوشمند است که توانایی به‌خاطر سپردن شکل اصلی خود را دارد. این شکل اصلی طی مراحل تهیه و قالب‌گیری در حافظه‌ی پلیمر ثبت و با قراردادن پلیمر در شرایط مناسب و اعمال نیروی خارجی، شکل موقت در آن ایجاد می‌شود و تا زمانی که در معرض محرک قرار نگیرد، شکل موقت بدون تغییر باقی خواهد ماند. هنگامی که پلیمر با شکل موقت در معرض محرک مناسب قرار بگیرد، شکل اولیه‌ی خود را بدون اعمال هرگونه نیروی خارجی بازیابی می‌کند که بازگشت پلیمر را از شکل موقت به شکل اصلی، اثر حافظه شکلی (Shape Memory Effect) یا به اختصار SME می‌گویند. این پلیمرها حتی پس از تغییر شکل‌های نسبتاً زیاد، دوباره شکل اولیه‌ی خود را بازیابی می‌کنند و قادرند این چرخه را بارها تکرار کنند (شکل ۱) [۲].

تاکنون از محرک‌های گوناگونی برای طراحی پلیمرهای حافظه شکلی از جمله حرارت، الکتریسته، نور، میدان مغناطیسی، ماکروویو، آب و سایر محیط‌های خارجی استفاده شده است. این توانایی حس کردن تغییرات محیط خارجی باعث می‌شود که SMPها به‌طور گسترده‌ای در صنایع هوافضا، زیست‌پزشکی، پارچه‌های هوشمند، ربات‌های هوشمند، ابزارهای چشمی هوشمند و غیره مورد استفاده قرار گیرند [۶-۲]. در مقایسه با آلیاژها و سرامیک‌های حافظه شکلی، SMPها دارای وزن کمتر، شکل‌پذیری بهتر و فرایندپذیری آسان‌تری هستند و از این رو مورد توجه دانشمندان سراسر جهان قرار گرفته‌اند [۱۰-۷].

برای طراحی پلیمرهای حافظه شکلی باید حداقل دو جزء را درون شبکه‌ی پلیمری قرار داد:

۱- حداقل یک فاز سخت

۲- حداقل یک فاز نرم



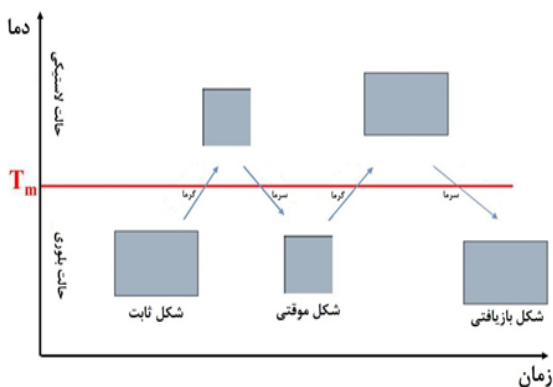
شکل ۱ اثر حافظه شکلی در پلیمرها [۱].

فاز سخت، بخشی از پلیمر است که ساختار کلی پلیمر را پایدار می‌کند و نسبت به محرک کاملاً پایدار است و به عبارتی می‌توان گفت که نسبت به محرک انعطاف‌پذیر نیست. از جمله فازهای سخت که تاکنون از آنها استفاده شده است می‌توان به شبکه‌های پلیمری دارای اتصالات عرضی، فاز بلورین و شبکه‌های پلیمری درهم تنیده‌شده اشاره کرد [۱۱، ۱۲].

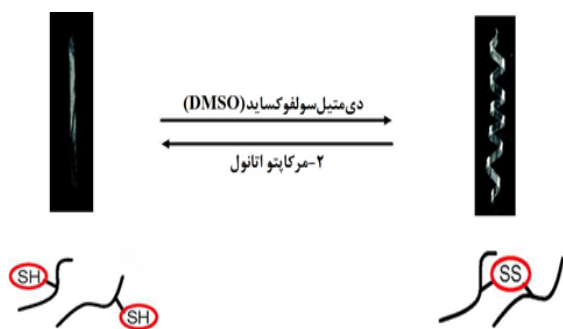
فاز نرم، بخشی از پلیمر است که نسبت به محرک از خود واکنش نشان می‌دهد؛ به عبارتی می‌توان گفت که نسبت به محرک انعطاف‌پذیر است. این فاز وظیفه‌ی ایجاد و پایدارکردن شکل موقت را بر عهده دارد. فاز نرم شکل موقت را به روش تبلور، شیشه‌ای شدن، پیوند هیدروژنی، برهم‌کنش یونی، برهم‌کنش فلز-لیگاند و پیوندهای کووالانسی برگشت‌پذیر پایدار می‌کند (شکل ۲) [۱۲].

## ۲ بررسی سازوکارهای عملی SMP

سازوکارهای وابسته به دما، مهم‌ترین و پرکاربردترین سازوکار برای SMPها است که در آن دمایی را که پلیمر شکل اصلی خود را بازیابی می‌کند (شکل موقت به شکل اصلی تبدیل می‌شود)، دمای انتقال نام‌گذاری کرده‌اند. این دما معمولاً دمای ذوب فاز نرم یا دمای انتقال فاز نرم است (شکل ۳) [۱۳].



شکل ۳ دمای انتقال یا دمای ذوب فاز نرم [۱۳].

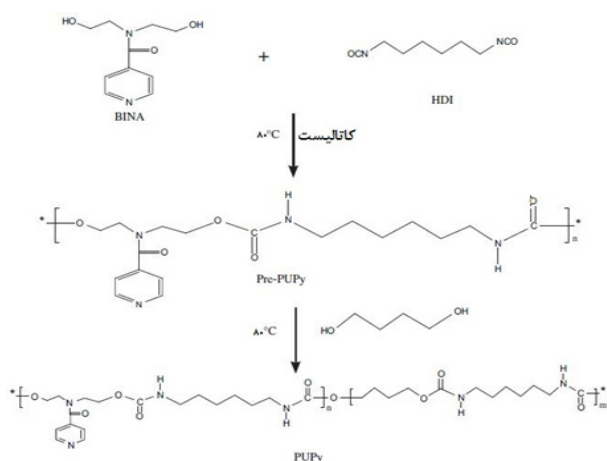


شکل ۴ رفتار حافظه شکلی برگشت پذیر سلولز استات [۱۵].

در شرایط معمولی گروه‌های مرکاپتو از هم جدا بوده، بین زنجیرها هیچ گونه اتصال عرضی برقرار نیست. برای ایجاد شکل موقت، ابتدا باید با اعمال نیرو این تغییر شکل در نمونه ایجاد و با حفظ تنش اعمالی، در حلال DMSO قرار داده شود. در نتیجه اتصالات عرضی برقرار می‌شوند و نمونه شکل موقت به خود می‌گیرد. برای بازیابی شکل اولیه باید در ۲-مرکاپتو اتانول قرار گیرد تا در اثر احیا، اتصالات عرضی شکسته شده و پلیمر دوباره به حالت اولیه خود باز گردد. در واقع این پلیمر شیمی-پاسخ (Chemo-Responsive) است [۱۵].

## ۲-۲ SMP بر پایه پیوند هیدروژنی

چم و همکارانش [۱۶]، پلی‌یورتانی طراحی کردند که دارای واحدهای تکراری (N,N-بیس(هیدروکسیسیل اتیل) ایزونیکوتین آمین) یا BINA بود (شکل ۵). در این پلیمر بین نیتروژن پیریدین و هیدروژن گروه عاملی یورتان در دمای معمولی، پیوند هیدروژنی برقرار است و پلیمر



شکل ۵ سنتز پلی‌یورتان/پیریدین با مقدا‌های متفاوت از BINA [۱۶].

فرایند حافظه شکلی شامل چهار مرحله‌ی تغییر شکل، تثبیت شکل، رهایش تنش خارجی و بازیابی شکل است. قبل از فرایند حافظه شکلی، پلیمرها نیاز به تغییر شکل تحت تنش خارجی همراه با گرمایش دارند. دمای بالا باعث افزایش آنتروپی پلیمرها، کاهش سد انرژی، افزایش تحرک زنجیر مولکولی و در نتیجه عکس‌العمل راحت آن‌ها می‌شود. پس از این که پلیمر در اندازه‌ی مطلوب تغییر شکل موقت یافت، شکل آن با اعمال سرما تثبیت می‌شود و با رهایش تنش خارجی، تغییری نخواهد کرد. البته شرایط فیزیکی و شیمیایی می‌تواند منجر به انسداد تحرک زنجیرهای پلیمر شود [۱۴].

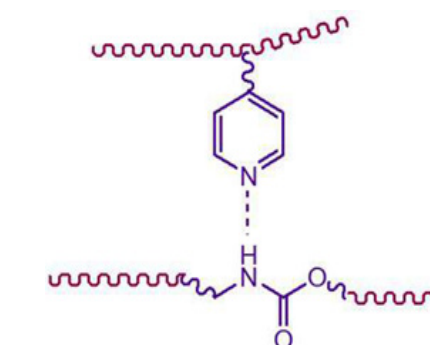
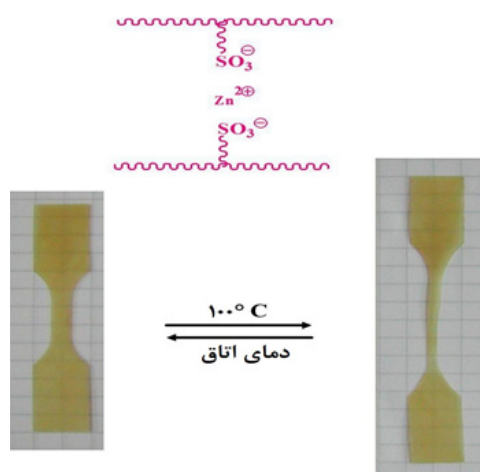
تغییر شکل موقت می‌تواند برای مدت زیادی بدون محرک خارجی نگه داشته شود. تنش و انرژی در پلیمر در طول فرایند حافظه شکلی با افزایش آنتروپی ذخیره می‌شوند؛ بنابراین شکل موقت بسیار ناپایدارتر از شکل اصلی است. وقتی ماده در معرض محرک خارجی قرار گیرد تنش و انرژی خارجی به دلیل تحرک زنجیرها، آزاد خواهند شد. سپس پلیمر پس از تحریک، دوباره به شکل اصلی خود باز می‌گردد (شکل ۳). فرایند حافظه شکلی می‌تواند چندین بار تکرار شود؛ بنابراین SMPها می‌توانند چندین شکل موقت و فقط یک شکل دائمی داشته باشند [۱۴].

مطابق شکل (۳) زمانی که دما کمتر از دمای ذوب باشد و هیچ گونه تنش فشاری به نمونه اعمال نشود، پلیمر شکل اصلی خود را دارد. در این پلیمر نیمه‌بلورین، با افزایش دما بلورها ذوب شده و ماده منعطف می‌شود و در نتیجه با اعمال نیرو شکل موقت ایجاد می‌شود. در ادامه برای تثبیت شکل موقت با حفظ تنش فشاری، باید نمونه تا زیر دمای انتقال سرد شود. بدین ترتیب بلورها مجدداً تشکیل شده و شکل موقت پایدار می‌شود. البته فاز نرم باید خاصیت تبلور را تحت فشار داشته باشد [۱۳، ۱۴].

پلیمر با شکل موقت تثبیت شده تا زمانی که در معرض دمای انتقال خود قرار نگیرد، شکل موقتش را حفظ می‌کند. وقتی پلیمر با شکل موقت در معرض دمای انتقال قرار بگیرد، دوباره بلورها ذوب شده و پلیمر به حالت اولیه خود باز می‌گردد و با سرد کردن تا زیر دمای انتقال، شکل اصلی بازیابی و تثبیت می‌شود [۱۳، ۱۴].

## ۲-۱ SMP بر پایه پیوندهای کووالانسی برگشت پذیر

آوکی و همکارانش [۱۵]، از مشتقات سلولز استات، پلیمری را طراحی کردند که دارای گروه‌های آویزان مرکاپتو بود (شکل ۴).



شکل ۶ برهم‌کنش یونی بین پیریدین و عامل یورتان [۱۶].

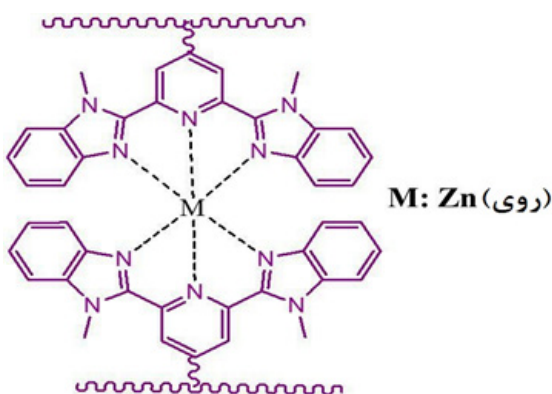
شکل ۷ برهم‌کنش یونی سولفونات با کاتیون روی و ایجاد شبکه فیزیکی [۱۹].

دارای واحدهایی به نام اُکسی-۲،۶-بیس (n-متیل بنزیمیدازولیل) پیریدین بود که این گروه در دمای اتاق با فلز روی برهم‌کنش می‌دهد و شکل اصلی در پلیمر پایدار می‌ماند (شکل ۸). وقتی که پلیمر تا دمای  $60^{\circ}\text{C}$  حرارت داده شود، این برهم‌کنش تضعیف شده و شکل موقت ایجاد می‌شود و بدین ترتیب پلیمر اثر حافظه شکلی خود را به نمایش می‌گذارد [۲۰].

### ۳ کاربرد SMPها

به‌طور کلی کاربردهای این پلیمرهای هوشمند را می‌توان در چهار دسته زیر قرار داد:

- ۱- تجاری
- ۲- پزشکی
- ۳- هوافضا



شکل ۸ برهم‌کنش روی با واحدهای اُکسی-۲،۶-بیس (n-متیل بنزیمیدازولیل) پیریدین متصل به پلیمر [۲۰].

در این حالت شکل اصلی خود را به‌دست می‌آورد (شکل ۶) [۱۸-۱۶].

وقتی این پلیمر تا دمای  $60^{\circ}\text{C}$  حرارت داده شود، پیوندهای هیدروژنی شکسته شده و در نتیجه تحرک زنجیرهای پلیمری افزایش می‌یابد که این منجر به انعطاف‌پذیری پلیمر و ایجاد شکل موقت در آن می‌شود. با سرد شدن پلیمر تا دمای  $20^{\circ}\text{C}$  (البته با حفظ تنش)، مجدداً پیوندها تشکیل شده و شکل موقت تثبیت می‌شود. برای مشاهده‌ی اثر حافظه شکلی یا به‌عبارتی بازبازی شکل اولیه پلیمر، تا دمای  $60^{\circ}\text{C}$  حرارت داده می‌شود و در نهایت پیوندها شکسته شده و شکل اولیه بازبازی می‌شود [۱۶].

نکته بسیار جالب در این پلیمر طراحی شده این است که علاوه بر دما، به آب و متانول نیز حساس است. در واقع با افزایش آب یا متانول بین پیریدین و آب (متانول) پیوند هیدروژنی برقرار می‌شود در نتیجه پیوند بین زنجیرها شکسته می‌شود [۱۶].

### ۲-۳ SMP بر پایه‌ی پیوند یونی

در سال ۲۰۱۳ پلیمری طراحی شد که دارای گروه‌های سولفونات است و با کاتیون روی ( $\text{Zn}^{2+}$ ) برهم‌کنش یونی برقرار می‌کند و شبکه‌ای فیزیکی تشکیل می‌دهد. این برهم‌کنش در دمای اتاق انجام می‌شود و پلیمر شکل اصلی را به خود می‌گیرد (شکل ۷) [۱۹]. با گرمایش تا دمای  $100^{\circ}\text{C}$ ، برهم‌کنش‌ها از بین رفته و شکل موقت ایجاد و با سرمایش تا دمای اتاق شکل موقت تثبیت می‌شود. به‌عبارتی دیگر برای مشاهده اثر حافظه شکلی لازم است که پلیمر تا دمای  $100^{\circ}\text{C}$  حرارت داده شود و بدین گونه شکل اصلی بازبازی می‌شود [۱۹].

### ۲-۴ SMP بر پایه‌ی برهم‌کنش فلز-لیگاند

ویتل و همکارانش [۲۰]، پلی‌بوتادیانی طراحی کردند که

۲- خط اتو مشخص تر و با دوام بیشتر: چون تغییر شکل در این پلیمرها در بالای دمای انتقال به راحتی انجام می گیرد، خط اتوی بارزتری در پارچه ایجاد می شود و فقط زمانی خط اتو از بین می رود که دما مجدداً به بالای دمای انتقال برسد؛ بنابراین در اثر شست و شو خط اتو از بین نمی رود. تصاویری که در زیر مشاهده می کنید نشان دهنده این امر است (شکل ۱۰-ب).

همچنین این مواد به عنوان اسفنج های حافظه شکلی در کفی کفش و وسایل خواب استفاده می شود که با دمای بدن فعال می شوند و فرم بدن (پا، کتف، گردن و ...) را به خود می گیرند و فرد احساس راحتی بیشتر می کند. برای مثال با استفاده از این اسفنج ها در کفش های پاشنه دار، مشکل پیچش ستون فقرات را تا حدی می توان کاهش داد [۲۱].

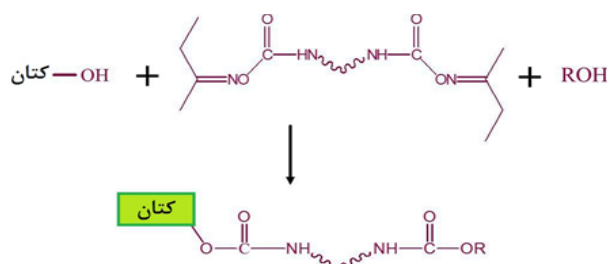
الیاف پلیمری حافظه شکلی دارای مزایایی از جمله ساختارهای گوناگون، مساحت سطح ویژه بالا و تخلخل قابل تنظیم است که می تواند به طور گسترده ای در زمینه های مختلف به خصوص در زیست پزشکی مورد استفاده قرار گیرد. امروزه این مواد به طور موفقیت آمیزی در رهایش دارو، کشت سلولی و داربست های بافت به کار می روند [۲۳، ۲۴].

مواردی که به آن اشاره شد همگی نمونه هایی از کاربردهای تجاری این پلیمرها بودند. از کاربردهای پزشکی این پلیمر نیز می توان به موارد زیر اشاره کرد:

### ۳-۲ پزشکی

#### • خارج کردن لخته ی خون در رگ مغزی

شکل (۱۱) نشان می دهد که با استفاده از پلی یورتان حافظه شکلی، وسیله ای تهیه شده که وارد رگ شده بعد از عبور از



شکل ۹ واکنش SMP با هیدروکسیل پنبه [۲۲].

۴- پلیمرهای خودترمیم شونده

### ۳-۱ تجاری

از کاربردهای تجاری این پلیمر می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- محافظ های حرارتی

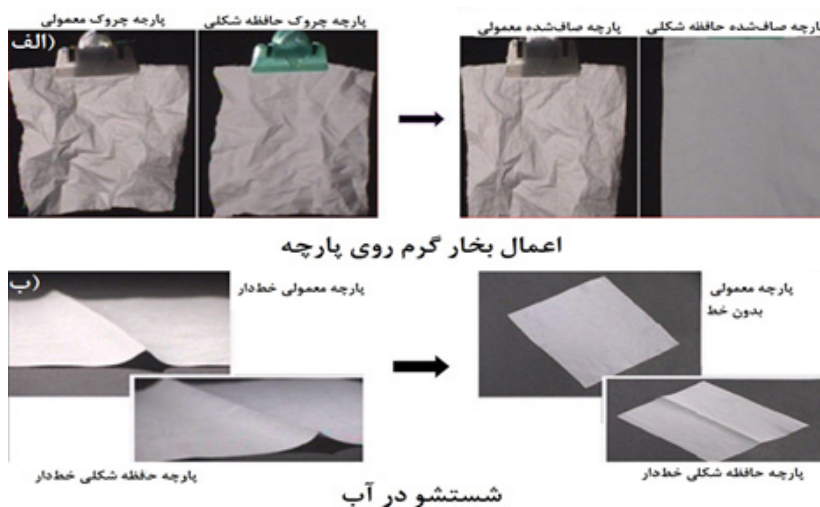
نوعی استوانه ای توخالی پلاستیکی وجود دارد که برای عایق بندی سطوح استفاده می شود و در اثر حرارت، قطر آن ها کم شده و سطح مورد نظر را کاملاً پوشش می دهند [۲۱].

#### • صنعت نساجی

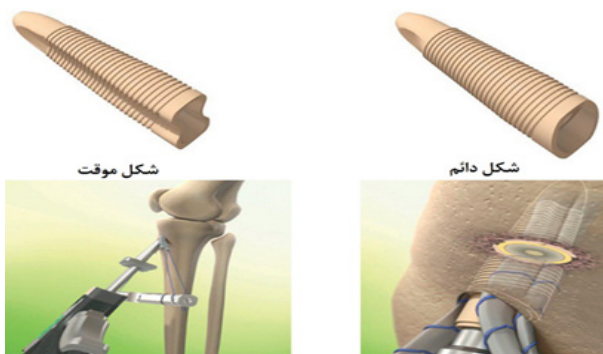
پلیمر حافظه شکلی با گروه هیدروکسیل موجود در پنبه یا پشم واکنش می دهد و بدین ترتیب پارچه هایی که حاصل می شود خاصیت حافظه شکلی دارند (شکل ۹) [۲۱، ۲۲].

این پارچه ها می توانند دارای ویژگی های زیر باشند:

۱- خاصیت ضد چروک: در واقع شکل اصلی صاف و بدون چروک است و در شکل موقت روی پارچه چروک ایجاد شده است. فقط در اثر برخورد بخار گرم، پلیمر (پارچه) دوباره شکل اولیه (صاف و بدون چروک) را بازیابی می کند (شکل ۱۰-الف).



شکل ۱۰ خاصیت ضد چروک و دوام بیشتر خط اتو SMPها به ترتیب پس از اعمال بخار گرم و شستن با آب گرم [۲۱].



شکل ۱۳ SMP به صورت پلاک‌های پیچی شکل و قرار دادن آن در مفصل [۲۹].

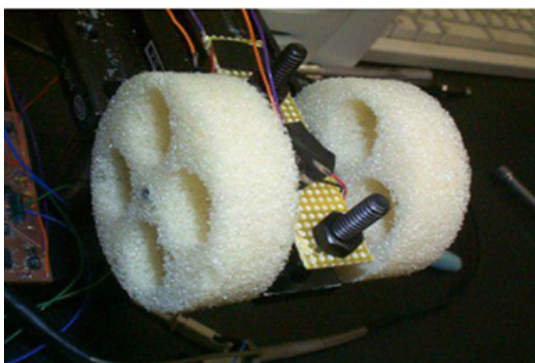
به همین دلیل استفاده از این پلیمرها در ساخت وسایل موجود در سفینه برای رفع این مشکل بسیار مؤثر خواهد بود؛ چون این پلیمرها در حالت فشرده شدن (شکل موقت) حجم کمی را اشغال می‌کنند و در مقایسه با آلایزها جرم کمتری دارند. به این علت محققان در این زمینه بسیار مشغول فعالیت هستند [۳۱].

#### • چرخ مریخ‌نورد

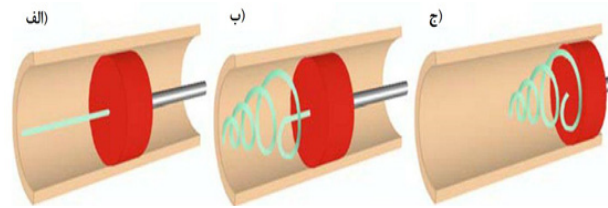
جنس این چرخ‌ها از اسفنج است که تا ۵۰۰ برابر حجم فشرده شده می‌تواند بزرگ‌تر شوند. قطر این چرخ‌ها در حالت فشرده‌گی فقط ۶ سانتی‌متر است (شکل موقت در جو زمین و با سرد کردن تا دمای اتاق ایجاد می‌شود). پس از حرارت دادن تا دمای  $80^{\circ}\text{C}$ ، قطر آن‌ها افزایش می‌یابد (شکل ۱۴) [۳۱، ۳۲].

#### • استفاده در خرپا

برای تهیهی خرپا معمولاً از کامپوزیت حافظه‌شکلی (Shape-Memory Composites) یا به اختصار SMCs برپایه‌ی رزین اپوکسی استفاده می‌شود که در اثر حرارت تا دمای  $150^{\circ}\text{C}$  در مدت زمان ۸۰ ثانیه، شکل اولیه‌ی خود را بازیابی می‌کند (شکل ۱۵) [۳۱].



شکل ۱۴ چرخ مریخ‌نورد ساخته‌شده از اسفنج پلیمری حافظه‌شکلی [۳۱].



شکل ۱۱ الف) ورود دستگاه به رگ و عبور از لخته، ب) حرارت دادن و بازیابی شکل اصلی فنر مانند و ج) خروج دستگاه [۲۵].

لخته‌ی خون با استفاده از لیزر حرارت داده می‌شود و شکل اصلی (فنر مانند) در پلی‌یورتان ایجاد می‌شود و با کشیدن این پلیمر، لخته خون هم‌زمان با آن خارج می‌شود [۲۵، ۲۶].

#### • درمان آنوریسم مغزی

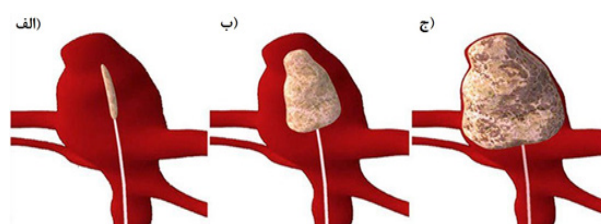
در این بیماری دیواره‌ی رگ مغزی نازک‌شده و حبابی در آن ایجاد می‌شود که در اثر برخورد خون با فشار به این قسمت ممکن است پارگی و خون‌ریزی مغزی ایجاد شود. اسفنج حافظه‌شکلی می‌تواند وارد این قسمت شده و با استفاده از لیزر حرارت داده شود و به شکل اصلی خود برگردد و بدین ترتیب حباب پر و خطر برطرف می‌شود (شکل ۱۲) [۲۷، ۲۸].

#### • استفاده به عنوان عضو مصنوعی کاشتنی (Implant)

از پلیمر حافظه‌شکلی آکریلی پلاک‌های پیچی شکل تهیه شده که در بافت اسفنجی استخوان در محل مفاصل قرار می‌گیرند و سپس حرارت داده می‌شوند و شکل بافت اسفنجی اطراف را به خود می‌گیرند و بدین ترتیب سازگاری آن‌ها با بدن نسبت به سایر اعضای مصنوعی کاشتنی بیشتر است (شکل ۱۳) [۲۹].

#### ۳-۳ هوافضا

SMPها کم‌وزن، کم‌هزینه و دارای خواص ویژه‌ای هستند که در مهندسی هوافضا به‌خصوص در ساختارهای شکل‌پذیر کاربرد دارند [۳۰]. سفینه‌ی فضانوردی که به فضا ارسال می‌شود از نظر میزان حجم و جرمی که می‌تواند تحمل کند محدود است.



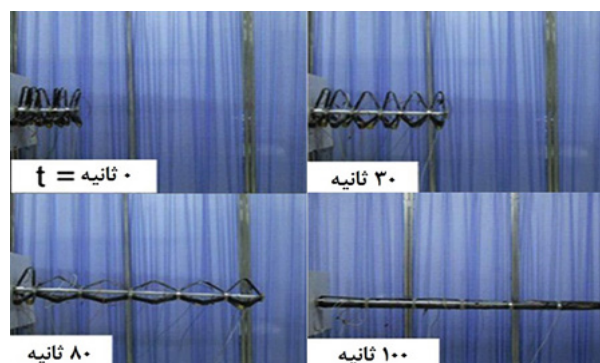
شکل ۱۲ الف) ورود دستگاه به حباب، ب) حرارت دادن، ج) بازیابی شکل اصلی (بزرگ شدن) [۲۷].

مطابق شکل در طول فرایند کشش، ذرات AO-80 (فنول دارای گروه‌های عاملی بسیار زیاد) در امتداد محور بارگیری می‌لغزند و پیوند هیدروژنی بین فنول عامل دار و لاستیک طبیعی اپوکسی دار شده (ENR) باعث می‌شود که زنجیرهای لاستیک در حین تغییر شکل کششی، فشرده‌تر و موازی شوند. با حرارت‌دهی تا دمای بیشتر از دمای انتقال شیشه‌ای، ذرات فنول ذوب می‌شوند و حالت کامپوزیت به تدریج از شیشه‌ای به لاستیکی تغییر میکند. زنجیرهای ENR به دلیل کاهش پیوند هیدروژنی بین ENR و فنول، الاستیک می‌شوند و در نتیجه شبکه کوچک می‌شود و به آرایش تصادفی اولیه‌اش برمی‌گردد [۳۳].

این‌ها نمونه‌هایی از کاربردهای این پلیمرها بودند که البته کاربردهای بیشتری نیز وجود دارد، ولی تقریباً سازوکار همگی مشابه یکدیگر است.

#### ۴ نتیجه‌گیری

پلیمرهای حافظه شکلی، پلیمرهای هوشمندی هستند که توانایی به‌خاطر سپردن شکل اصلی خود را دارند. در حال حاضر، زمینه‌ی پلیمرهای حافظه شکلی به‌سرعت در حال پیشرفت است. برای طراحی این پلیمرها باید حداقل دو جزء فاز سخت و فاز نرم را درون یک شبکه پلیمری قرار داد که نسبت به محرک به‌ترتیب ثابت و انعطاف‌پذیر هستند. از مهم‌ترین محرک‌های این مواد می‌توان به دما اشاره کرد. از جمله سازوکارهای SMPهای وابسته به دما پیوند کووالانسی، پیوند یونی، برهم‌کنش هیدروژنی و برهم‌کنش فلز-لیگاند هستند که با اعمال حرارت به این پلیمرها، از شکل موقت به شکل اصلی خود می‌رسند. بخش مهمی از کاربردهای SMPها در صنایع تجاری، پزشکی، هوافضا و پلیمرهای خودترمیم‌شونده هستند که هرکدام باعث افزایش ایمنی و راحتی کار شده‌اند.

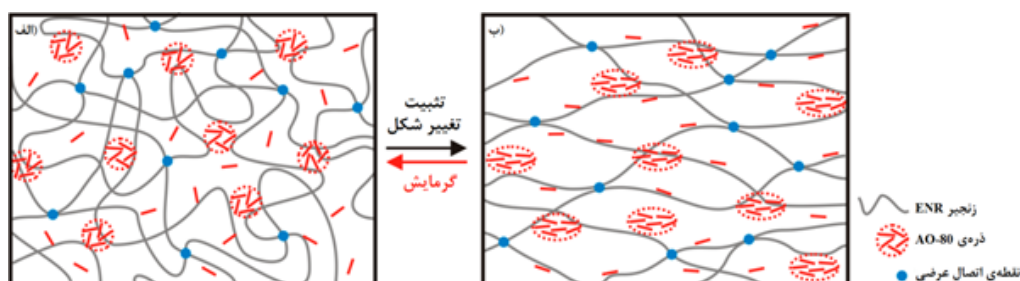


شکل ۱۵ خرابی ساخته‌شده از پلیمر حافظه شکلی و بازیابی آن به شکل اصلی در اثر حرارت در طی زمان [۳۱].

همان‌طور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌کنید، با استفاده از کامپوزیت حافظه شکلی پلی‌یورتان/الیاف کربن آنتن سهمی شکلی تهیه شده است که در دمای  $70^{\circ}\text{C}$  فعال می‌شود. این کامپوزیت در حالت فشرده‌شدن حجم بسیار کمتری را اشغال می‌کند [۳۱، ۳۲].

#### ۳-۴ پلیمرهای خودترمیم‌شونده به کمک اثر حافظه شکلی

مواد خودترمیم‌شونده به کمک حافظه شکلی (Shape Memory Assisted Self-Healing)، در دمای اتاق متحمل تغییر شکل پلاستیک شده، به محض حرارت دیدن بازیابی می‌شوند؛ بنابراین هر دو تغییر شکل موقتی نواحی الاستیک و پلاستیک را بهبود می‌بخشند. این پدیده‌ی جدید به‌عنوان حافظه شکلی پلاستیسیته‌ی برگشت‌پذیر (Reversible Plasticity Shape Memory) شناخته می‌شود که تسهیل فرایند تثبیت شکل، قابلیت بازیابی تنش بالاتر، بهبود تغییر شکل‌پذیری ماده و قابلیت خودترمیم‌شوندگی از جمله فواید این پدیده است. شکل (۱۶) سازوکار عملکرد این نوع مواد را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶ سازوکار حافظه شکلی پلاستیسیته‌ی برگشت‌پذیر لاستیک طبیعی اپوکسی دار شده حاوی فنول با گروه‌های عاملی زیاد: (الف) شکل دائم و (ب) شکل موقت [۳۳].

## مراجع

1. Zhang X., Chen L., Lim K.H., Gonuguntla S., Lim K. W., Pranantyo D., Yong W.P., Yam W.J.T., Low Z., Teo W.J., Nien H. P., Loh W Q., Soh S., The Pathway to Intelligence: Using Stimuli-Responsive Materials as Building Blocks for Constructing Smart and Functional Systems, *Adv. Mater.*, 31, 1804540, **2019**.
2. Hager M.D., Bode S., Weber C., Schubert U.S., Shape Memory Polymers: Past, Present and Future Developments, *Prog. Poly. Sci.*, 49, 3-33, **2015**.
3. Hu J., Zhu Y., Huang H., Lu J., Recent Advances in Shape-memory Polymers: Structure, Mechanism, Functionality, Modeling and Applications., *Prog Pol. Sci.*, 37, 1720-1763, **2012**.
4. Liu W., Electroactive Shape Memory Composites with TiO<sub>2</sub> Whiskers for Switching an Electrical Circuit., *Mater. Des.*, 143, 196-203, **2018**.
5. Zhang F., Nano/Microstructures of Shape Memory Polymers: From Materials to Applications., *Nanoscale Horiz.*, 5, 1155-1173, **2020**.
6. Zhang F., Zhao T., Ruiz-Molina D., Liu Y., Roscini C., Leng J., & Smoukov S. K., Shape Memory Polyurethane Microcapsules with Active Deformation, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 12, 47059-47064, **2020**.
7. Lan X., Liu L., Zhang F., Liu Z., Wang L., Li Q., Peng F., Hao S., Dai W., Wan X and Tang Y. World's First Spaceflight on-Orbit Demonstration of a Flexible Solar Array System Based on Shape Memory Polymer Composites, *Sci. China Technol. Sci.*, 63, 1436-1451, **2020**.
8. Xia Y., He Y., Zhang F., Liu Y., Leng J., A Review of Shape Memory Polymers and Composites: Mechanisms, Materials, and Applications, *Adv. Mater.*, 33, 2000713, **2021**.
9. Huang X., Zhang F., Leng J., Metal Mesh Embedded in Colorless Shape Memory Polyimide for Flexible Transparent Electric-heater and Actuators, *Appl. Mater. Today*, 21, 100797, **2020**.
10. Huang X., Zhang F., Liu Y., & Leng J., Active and Deformable Organic Electronic Devices Based on Conductive Shape Memory Polyimide, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 12, 23236-23243, **2020**.
11. Lendlein A., Kelch S., Shape-memory Polymers, *Angew Chem Int Ed*, 41, 2034-2057, **2002**.
12. Leng J., Lan X., Liu Y., Du S., Shape-Memory Polymers and Their Composites: Stimulus Methods and Applications, *Prog. Mater. Sci.*, 56, 1077-1135, **2001**.
13. Zhao Q., Qi H.J., Xie T., Recent Progress in Shape Memory Polymer: New Behavior, Enabling Materials, and Mechanistic Understanding, *Prog. Polym. Sci.*, 79-120, **2015**.
14. Lendlein A., Oliver EC., Gould. Reprogrammable Recovery and Actuation Behavior of Shape-Memory Polymers, *Nat. Rev. Mater.*, 4, 116-133, **2019**.
15. Aoki D., Teramoto Y., Nishio Y., SH-Containing Cellulose Acetate Derivatives: Preparation and Characterization as a Shape Memory-Recovery Material, *Biomacromolecules*, 8, 3749-3757, **2007**.
16. Chen S., Hu J., Zhuo H., Yuen C., Chan L., Study on the Thermal-induced Shape Memory Effect of Pyridine Containing Supramolecular Polyurethane, *Polymer*, 51, 240-248, **2010**.
17. Chen S., Hu J., Yuen C.W., Chan L., Supramolecular Polyurethane Networks Containing Pyridine Moieties for Shape Memory Materials, *Mater. Lett.*, 63, 1462-1464, **2009**.
18. Chen S., Hu J., Yuen C-W., Chan L., Novel Moisture-sensitive Shape Memory Polyurethanes Containing Pyridine Moieties, *Polymer*, 50, 4424-4428, **2009**.
19. Ying S., Yoonessi M., and Weiss R.A., High Temperature Shape Memory Polymers, *Macromolecules*, 46, 4160-4167, **2013**.
20. Whittell G.R., Hager M.D., Schubert U.S., Manners I., Functional Soft Materials from Metallopolymers and Metallo-supramolecular Polymers, *Nat. Mater.*, 10, 176-188, **2011**.
21. Liu C., Qin H., and Mather P. T., Review of Progress in Shape-Memory Polymers, *J. Mater. Chem.*, 17, 1543-1558, **2007**.
22. Liem H., Yeung L. Y., and Hu J. L., A Prerequisite for the Effective Transfer of the Shape-Memory Effect to Cotton Fibers, *Smart Mater. Struct.*, 16, 45-57, **2007**.
23. Wang L., Zhang F., Liu Y., & Leng J., Shape Memory Polymer Fibers: Materials, Structures, and Applications, *Adv. Fib. Mater.*, 1-19, **2021**.
24. Zhao J., & Cui W., Functional Electrospun Fibers for Local Therapy of Cancer, *Adv. Fib. Mater.*, 2, 229-245, **2020**.
25. Maitland D.J., Metzger M.F., Schumann D., Lee A., Wilson T S, Photothermal Properties of Shape Memory Polymer Micro-actuators for Treating Stroke, *Lasers. Surg. Med.*, 30, 1-11, **2002**.
26. Metzger M.F., Wilson T.S., Schumann D., Matthews D L., Maitland D J., Mechanical Properties of Mechanical Actuator



- for Treating Ischemic Stroke, *Bio. Micro.*, 4, 89-96, **2002**.
27. Rolland P.H., Mekkaoui C., Vidal V., Berry J.L., Moore J.E., Moreno M., Amabile P., Bartoli J M., Compliance Matching Stent Placement in the Carotid Artery of the Swine Promotes Optimal Blood Flow and Attenuates Restenosis, *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.*, 28, 431-438, **2004**.
28. Higashida R.T., Meyers P.M., Intracranial Angioplasty and Stenting for Cerebral Atherosclerosis: New Treatments for Stroke are Needed, *Neuroradiology*, 48, 367-372, **2006**.
29. Ajili S H., Ebrahimi N G., Soleimani M., Polyurethane/poly-caprolactane Blend With Shape Memory Effect as a Proposed Material for Cardiovascular Implants, *Acta. Biomater.*, 5, 1519-1530, **2009**.
30. Li F., Yanju L., Leng J., Progress of Shape Memory Polymers and Their Composites in Aerospace Applications, *Smart Mater. Struct.*, 28, 103003, **2019**.
31. Schueler R.M. Self-deploying Trusses Containing Shape-memory Polymers, NASA Tech Briefs, 20-1, 2008.
32. Liu Y., Du H., Liu L., Leng J., Shape Memory Polymers and Their Composites in Aerospace Applications: A Review, *Smart Mater. Struct.*, 23, 1-22, **2014**.
33. Tengfei L., Tang Z., and Guo B., New Design Strategy for Reversible Plasticity Shape Memory Polymers with Deformable Glassy Aggregates, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 6, 21060-21068, **2014**.

