مقاله مروری

فناوری پلیمر ایران

فصلنامه علمی
سال هفتم، شماره ۲، شماره پیاپی ۲۶، تابستان ۱۴۰۱
Vol. 7, No. 2, Issue No. 26
Summer 2022, Quarterly
صفحه ۳۵-۲۷

Iran Polymer Technology: Research and Development

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 شده است، ارائه می‌کند. از جمله کاربردهای پلیمرهای حافظه شکلی می‌توان در صنایع پزشکی، صنایع تجاری، صنایع هوافضا، پلیمرهای خودترمیم‌شونده و غیره اشاره کرد.

واژه‌های کلیدی:

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

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
h.heidari@ippi.ac.ir

۱ مقدمه

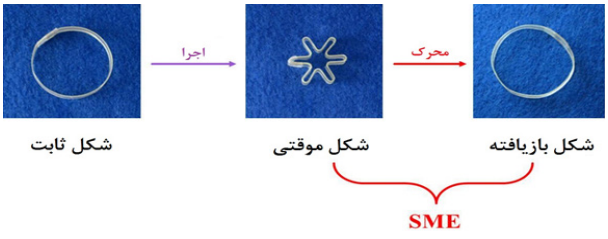
مواد پاسخگو به محرک یا به اصطلاح مواد هوشمند، موادی هستند که می‌توانند محیط اطراف خود را حس کنند و به‌صورت مستقیم پاسخ دهند [۱]. پلیمر حافظه شکلی (Shape-Memory Polymer) یا به اختصار SMP، پلیمری هوشمند است که توانایی به‌خاطر سپردن شکل اصلی خود را دارد. این شکل اصلی طی مراحل تهیه و قالب‌گیری در حافظه‌ی پلیمر ثبت و با قراردادن پلیمر در شرایط مناسب و اعمال نیروی خارجی، شکل موقت در آن ایجاد می‌شود و تا زمانی‌که در معرض محرک قرار نگیرد، شکل موقت بدون تغییر باقی خواهد ماند. هنگامی‌که 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، الکتریسیته، نور، میدان مغناطیسی، ماکروویو، آب و سایر محیط‌های خارجی استفاده شده است. این توانایی حس‌کردن 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 این‌رو مورد توجه دانشمندان سراسر جهان قرار گرفته‌اند [۱۰-۷].

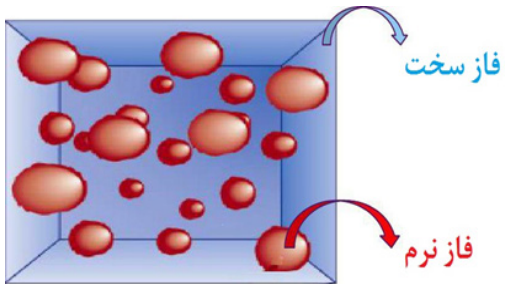
برای طراحی پلیمرهای حافظه شکلی باید حداقل دو جزء را درون شبکه‌ی پلیمری قرار داد:

۱- حداقل یک فاز سخت

۲- حداقل یک فاز نرم



شکل ۱ اثر حافظه شکلی در پلیمرها [۱].



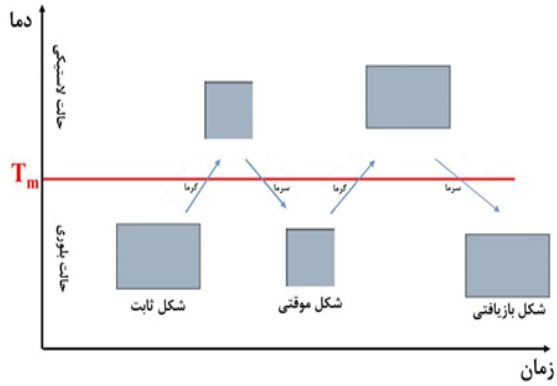
شکل ۲ تصویری از فاز نرم و سخت در شبکه‌ی پلیمری [۲].

فاز سخت، بخشی از پلیمر است که ساختار کلی پلیمر را پایدار می‌کند و نسبت به محرک کاملاً پایدار است و به‌عبارتی 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؛ به‌عبارتی 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، شیشه‌ای‌شدن، 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].

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 تغییرشکل 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 این‌که پلیمر در اندازه‌ی مطلوب تغییرشکل موقت یافت، شکل آن با اعمال سرمایش تثبیت می‌شود و با رهایش تنش خارجی، تغییری نخواهد کرد. البته شرایط فیزیکی و شیمیایی می‌تواند منجر به انسداد تحرک زنجیرهای پلیمر شود [۱۴].

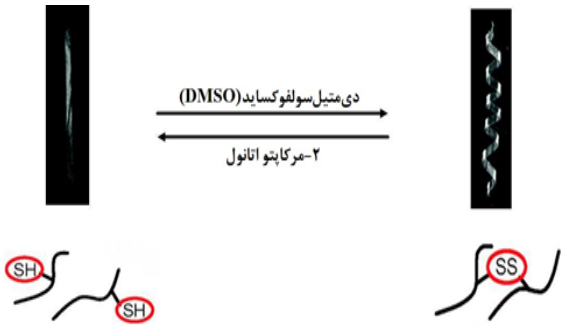
تغییرشکل موقت می‌تواند برای مدت زیادی بدون محرک خارجی نگه داشته شود. تنش و انرژی در پلیمر در طول فرایند حافظه شکلی با افزایش آنتروپی ذخیره می‌شوند؛ بنابراین شکل موقت بسیار ناپایدارتر از شکل اصلی است. وقتی ماده در معرض محرک خارجی قرار گیرد تنش و انرژی خارجی به‌دلیل تحرک زنجیرها، آزاد خواهند شد. سپس پلیمر 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) زمانی‌که دما کمتر از دمای ذوب باشد و هیچ‌گونه 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 تشکیل‌شده و شکل موقت پایدار می‌شود. البته فاز نرم باید خاصیت تبلور را تحت فشار داشته باشد [۱۳،۱۴].

پلیمر با شکل موقت تثبیت‌شده تا زمانی‌که 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 اولیه‌ی خود بازمی‌گردد و با سردکردن تا زیر دمای انتقال، شکل اصلی بازیابی و تثبیت می‌شود [۱۳،۱۴].

۲–۱ SMP برپایه‌ی پیوندهای کووالانسی برگشت‌پذیر

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



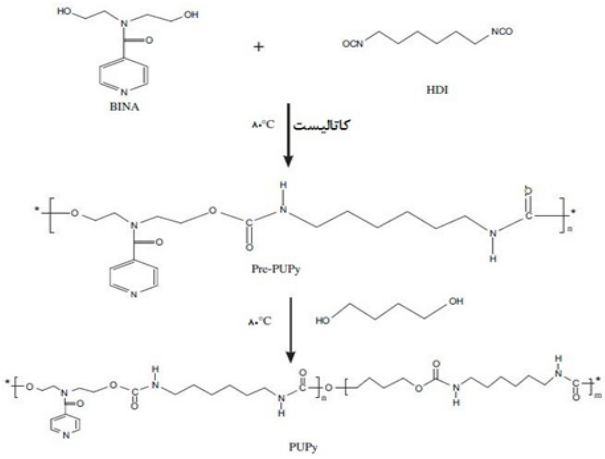
شکل ۴ رفتار حافظه شکلی برگشت‌پذیر سلولز استات [۱۵].

در شرایط معمولی گروه‌های مرکاپتو از هم جدا بوده، بین زنجیرها هیچ‌گونه 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 اولیه‌ی خود باز گردد. در واقع این پلیمر شیمی–پاسخ (Chemo-Responsive) است [۱۵].

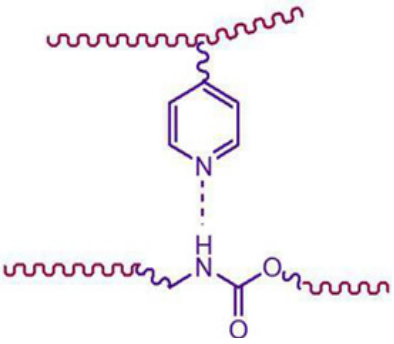
۲–۲ SMP برپایه‌ی پیوند هیدروژنی

چم و همکارانش [۱۶]، پلی‌یورتانی طراحی کردند که دارای واحدهای تکراری (N,N–بیس(هیدروکسیل‌اتیل) ایزونیکوتین‌آمین) 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 مقدارهای متفاوت از BINA [۱۶].



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

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

وقتی این پلیمر تا دمای ۶۰ °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 سردشدن پلیمر تا دمای ۲۰ °C (البته با حفظ تنش)، مجدداً پیوندها تشکیل شده و شکل موقت تثبیت می‌شود. برای مشاهده‌ی اثر حافظه شکلی یا به‌عبارتی بازیابی شکل اولیه پلیمر، تا دمای ۶۰ °C حرارت داده می‌شود و در نهایت پیوندها شکسته شده و شکل اولیه بازیابی می‌شود [۱۶].

نکته بسیار جالب در این پلیمر طراحی‌شده این است که علاوه بر دما، به آب و متانول نیز حساس است. درواقع با افزایش آب یا متانول بین پریدین و آب (متانول) پیوند هیدروژنی برقرار می‌شود درنتیجه پیوند بین زنجیرها شکسته می‌شود [۱۶].

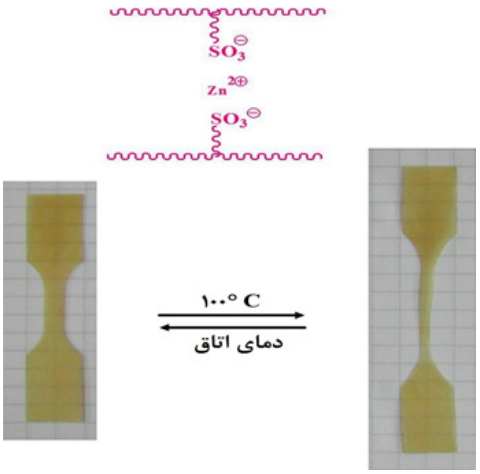
۲-۳ SMP برپایه‌ی پیوند یونی

در سال ۲۰۱۳ پلیمری طراحی شد که دارای گروه‌های سولفونات است و با کاتیونِ روی (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 ۱۰۰ °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 ۱۰۰ °C حرارت داده شود و بدین گونه شکل اصلی بازیابی می‌شود [۱۹].

۲-۴ SMP برپایه‌ی برهم‌کنش فلز-لیگاند

ویتل و همکارانش [۲۰]، پلی‌بوتادی‌انی طراحی کردند که



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

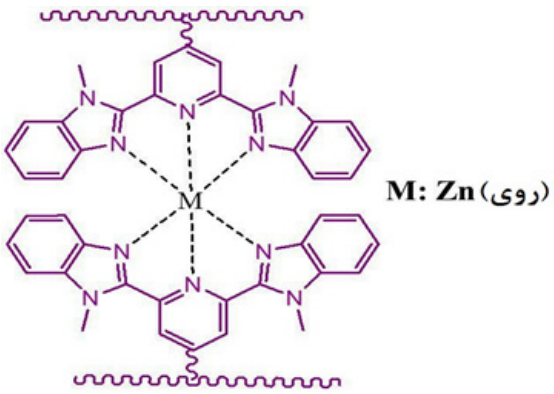
دارای واحدهایی به نام اُکسی-۲،۶-بیس(n-متیل‌بنزیمیدازولیل) پیریدین بود که این گروه در دمای اتاق با فلزِ روی برهم‌کنش می‌دهد و شکل اصلی در پلیمر پایدار می‌ماند (شکل ۸).

وقتی‌که پلیمر تا دمای ۶۰ °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].

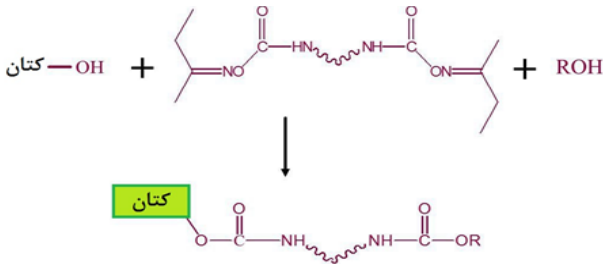
۳ کاربرد SMPها

به‌طورکلی 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-متیل‌بنزیمیدازولیل) پیریدین متصل به پلیمر [۲۰].



شکل ۹ واکنش SMP با هیدروکسیل پنبه [۲۲].

۴- پلیمرهای خودترمیم‌شونده

۳-۱ تجاری

از کاربردهای تجاری این پلیمر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

• محافظ‌های حرارتی

نوعی استوانه‌ی توخالی پلاستیکی وجود دارد که برای عایق‌بندی سطوح استفاده می‌شود و در اثر حرارت، قطر آن‌ها کم شده و سطح مورد نظر را کاملاً پوشش می‌دهند [۲۱].

• صنعت نساجی

پلیمر حافظه شکلی با گروه هیدروکسیل موجود در پنبه یا پشم واکنش می‌دهد و بدین ترتیب پارچه‌هایی که حاصل می‌شود خاصیت حافظه شکلی دارند (شکل ۹) [۲۱،۲۲].

این پارچه‌ها می‌توانند دارای ویژگی‌های 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 می‌کند (شکل ۱۰-الف).

۲- خط اتو مشخص‌تر و با دوام بیشتر: چون تغییر شکل در این پلیمرها در بالای دمای انتقال به‌راحتی انجام می‌گیرد، خط اتوی بارزتری در پارچه ایجاد می‌شود و فقط زمانی خط اتو از بین می‌رود که دما مجدداً به بالای دمای انتقال برسد؛ بنابراین در اثر شست‌وشو خط اتو از بین نمی‌رود. تصاویری که در زیر مشاهده می‌کنید نشان‌دهنده این امر است (شکل ۱۰-ب).

هم‌چنین این مواد به‌عنوان اسفنج‌های حافظه شکلی در کفی کفش و وسایل خواب استفاده می‌شود که با دمای بدن فعال می‌شوند و فرم بدن (پا، کتف، گردن و ...) را به خود می‌گیرند و فرد احساس راحتی بیشتر می‌کند. برای مثال با استفاده از این اسفنج‌ها در کفش‌های پاشنه‌دار، مشکل پیچش ستون فقرات را تا حدی می‌توان کاهش داد [۲۱].

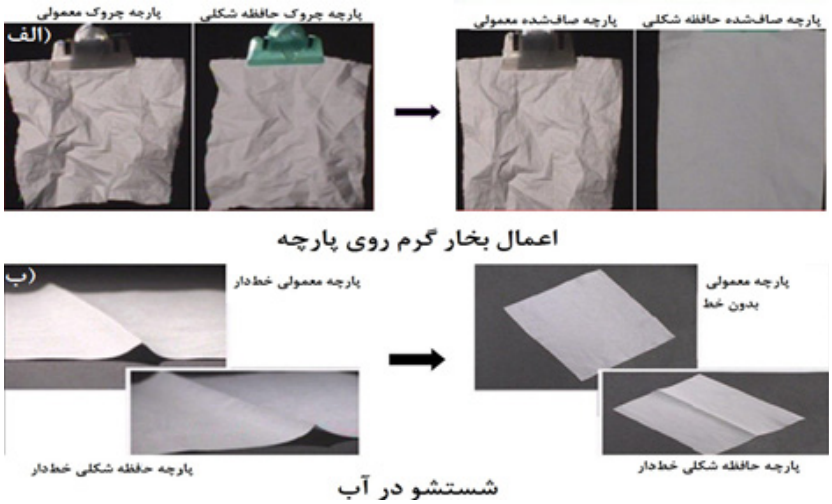
الیاف پلیمری حافظه شکلی دارای مزایایی از جمله ساختارهای گوناگون، مساحت سطح ویژه بالا و تخلخل قابل تنظیم است که می‌تواند به‌طور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف به خصوص در زیست‌پزشکی مورد استفاده قرار گیرد. امروزه این مواد به‌طور موفقیت‌آمیزی در رهایش دارو، کشت سلولی و داربست‌های بافت به کار می‌روند [۲۳،۲۴].

مواردی که به آن اشاره شد همگی نمونه‌هایی از کاربردهای تجاری این پلیمرها بودند. از کاربردهای پزشکی این پلیمر نیز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

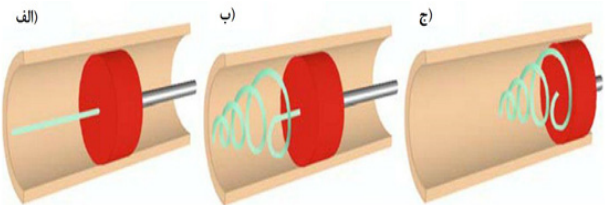
۳-۲ پزشکی

• خارج‌کردن لخته‌ی خون در رگ مغزی

شکل (۱۱) نشان می‌دهد که با استفاده از پلی‌یورتان حافظه شکلی، وسیله‌ای تهیه‌شده که وارد رگ شده بعد از عبور از



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



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

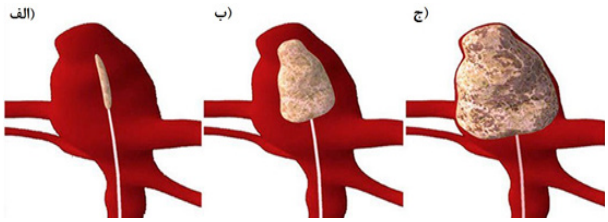
در این بیماری دیواره‌ی رگ مغزی نازک‌شده و حبابی در آن ایجاد می‌شود که در اثر برخورد خون با فشار به این قسمت ممکن است پارگی و خون‌ریزی مغزی ایجاد شود. اسفنج حافظه شکلی می‌تواند وارد این قسمت شده و با استفاده از لیزر حرارت داده شود و به شکل اصلی خود برگردد و بدین ترتیب حباب پر و خطر برطرف می‌شود (شکل ۱۲)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

• استفاده به‌عنوان عضو مصنوعی کاشتنی (Implant)

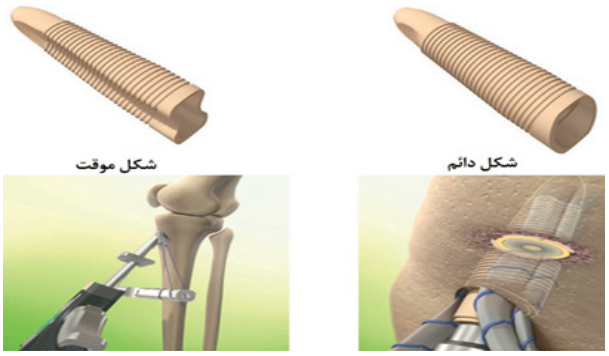
از پلیمر حافظه شکلی آکریلی پلاک‌های پیچی‌شکل تهیه شده که در بافت اسفنجی استخوان در محل مفاصل قرار می‌گیرند و سپس حرارت داده می‌شوند و شکل بافت اسفنجی اطراف را به خود می‌گیرند و بدین ترتیب سازگاری آن‌ها با بدن نسبت به سایر اعضای مصنوعی کاشتنی بیشتر است (شکل ۱۳) [۲۹].

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].



شکل ۱۳ SMP به‌صورت پلاک‌های پیچی‌شکل و قرار دادن آن در مفصل [۲۹].

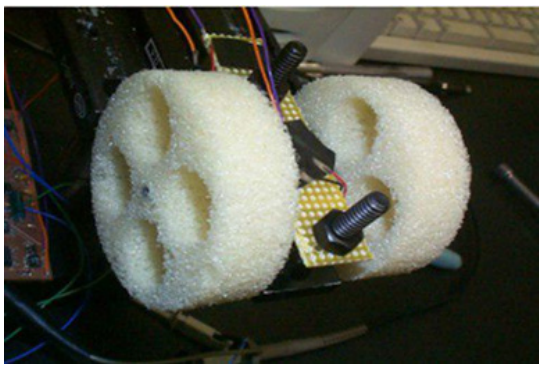
به‌همین دلیل استفاده از این پلیمرها در ساخت وسایل موجود در سفینه برای رفع این مشکل بسیار مؤثر خواهد بود؛ چون این پلیمرها در حالت فشرده‌شدن (شکل موقت) حجم کمی را اشغال می‌کنند و در مقایسه با آلیاژها جرم کمتری دارند. به این علت محققان در این زمینه بسیار مشغول فعالیت هستند [۳۱].

•چرخ مریخ‌نورد

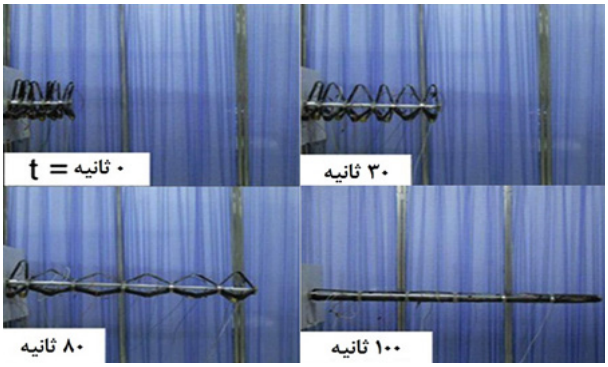
جنس این چرخ‌ها از اسفنج است که تا ۵۰۰ برابر حجم فشرده‌شده می‌توانند بزرگ‌تر شوند. قطر این چرخ‌ها در حالت فشردگی فقط ۶ سانتی‌متر است (شکل موقت در جو زمین و با سرد کردن تا دمای اتاق ایجاد می‌شود). پس از حرارت دادن تا دمای ۸۰ °C، قطر آن‌ها افزایش می‌یابد (شکل ۱۴) [۳۱،۳۲].

•استفاده در خرپا

برای تهیه‌ی خرپا معمولاً از کامپوزیت حافظه شکلی (Shape-Memory Composites) یا به اختصار SMCs برپایه‌ی رزین اپوکسی استفاده می‌شود که در اثر حرارت تا دمای ۱۵۰ °C در مدت زمان ۸۰ ثانیه، شکل اولیه‌ی خود را بازیابی می‌کند (شکل ۱۵) [۳۱].



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



شکل ۱۵ خرپای 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 سهمی‌شکلی تهیه شده است که در دمای ۷۰ °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

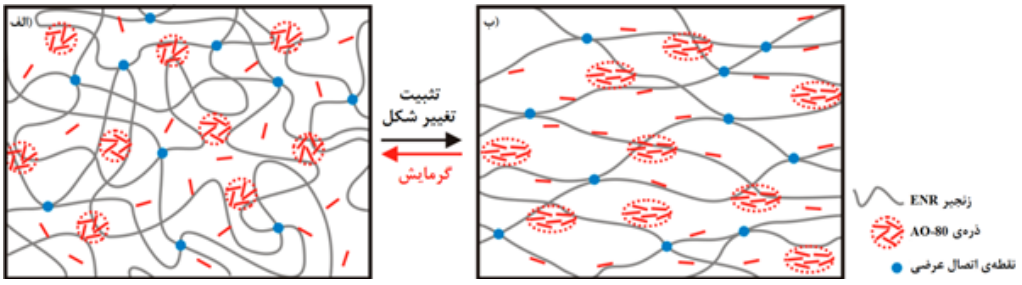
مواد خودترمیم‌شونده به کمک حافظه شکلی (Shape Memory Assisted Self-Healing)، در دمای اتاق متحمل تغییر شکل پلاستیک‌شده، به محض حرارت دیدن بازیابی می‌شوند؛ بنابراین هر دو تغییر شکل موقتی نواحی الاستیک و پلاستیک را بهبود می‌بخشند. این پدیده‌ی جدید به‌عنوان حافظه شکلی پلاستیسیته‌ی برگشت‌پذیر (Reversible Plasticity 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.

مطابق شکل در طول فرایند کشش، ذرات AO-۸۰ (فنول دارای گروه‌های عاملی بسیار زیاد) در امتداد محور بارگیری می‌لغزند و پیوند هیدروژنی بین فنول عامل‌دار و لاستیک طبیعی اپوکسی‌دار 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 به‌تدریج از شیشه‌ای به لاستیکی تغییر میکند. زنجیرهای ENR به‌دلیل 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 ۱۶ سازوکار حافظه شکلی پلاستیسیته‌ی برگشت‌پذیر لاستیک طبیعی اپوکسی‌دار 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 an 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_2 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 Metallosupramolecular 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/polycaprolactane 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**.