

## نانوکامپوزیت‌های هوشمند پلیمری حافظه‌شکلی

مریم حیدرشناس\*

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی پلیمر

### چکیده ...

نانوکامپوزیت‌های هوشمند پلیمری حافظه‌شکلی در درجه نخست، به منظور ارتقای خواص مکانیکی و افزایش نیروی بازتابی شکلی پلیمرهای حافظه‌شکلی مطرح شدند. در حال حاضر تلاش‌های گسترده‌ای با هدف جایگزینی آلیاژهای فلزی حافظه‌شکلی به خصوص در کاربردهای زیست‌پزشکی با این نانوکامپوزیت‌ها در جریان است. در این تحقیق ضمن معرفی نانوکامپوزیت‌های هوشمند پلیمری حافظه‌شکلی، با مرور تلاش‌های تحقیقاتی صورت گرفته در این زمینه به بررسی روش‌های ساخت، مشخصه‌یابی و ارزیابی کارایی آن‌ها پرداخته می‌شود.

### واژه‌های کلیدی:

پلیمر حافظه‌شکلی  
نانوکامپوزیت هوشمند  
نانوذرات  
بازتابی شکلی  
اثر حافظه‌شکلی

\*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

maryam.heidarshenas@modares.ac.ir

## ۱ مقدمه

هوشمندی (Smartness) به معنای وجود هوشیاری و درک سریع، سرعت پاسخگویی بالا و توانایی محاسبات آگاهانه‌ی سامانه است. مواد هوشمند دسته‌ای از مواد هستند که دارای هوشمندی ذاتی بوده، قابلیت خودتطبیقی با تحریکات خارجی را دارند. این مواد کاربردهای وسیعی در صنایع خودروسازی، هوافضا، دفاعی، تجهیزات زیست‌پزشکی، ربائیک، ماشین‌سازی، وسایل ورزشی، ابزار دقیق، ساختمان‌سازی و پل‌سازی دارند [۱]. اگر مواد به گونه‌ای مهندسی شوند که بتوانند پاسخ مشخصی به مجموعه‌ای از تحریکات ورودی داشته باشند، به عنوان مواد بسیار هوشمند دسته‌بندی می‌شوند. مواد باحافظه‌شکلی به دسته مواد بسیار هوشمند تعلق دارند که می‌توانند شکل اولیه خود را به خاطر بسپارند. این مواد شامل آلیاژهای حافظه‌شکلی ((Shape Memory Alloy (SMA)، سرامیک‌های حافظه‌شکلی، ژل‌های حافظه‌شکلی و پلیمرهای حافظه‌شکلی ((Shape Memory Polymer (SMP) هستند [۲]. اثر حافظه‌شکلی در پلیمرهای حافظه‌شکلی در دمای پاسخ پایین امکان‌پذیر است، بنابراین در کاربردهای پزشکی و زیستی که استفاده از دمای بالا مجاز نیست، اهمیت به سزایی دارند [۳].

ساختار پلیمرهای حافظه‌شکلی متشکل از دو قسمت سخت و نرم است و اسلوب حافظه‌شکلی حرارتی در پلیمرها، برپایه‌ی این نوع ساختار است. ناحیه سخت می‌تواند شامل ساختار بلوری، اتصالات عرضی فیزیکی (مانند گره‌خوردگی‌ها) و اتصالات عرضی شیمیایی باشد. قسمت نرم نیز می‌تواند متشکل از نواحی بلوری یا بی‌شکل (آمورف) باشد که مانند نوعی کلید عمل می‌کند و عامل اصلی ایجاد اثر حافظه‌شکلی است. در صورتی که دما به بالاتر از دمای انتقال بخش‌های کلید (نرم) افزایش یابد، این بخش‌ها منعطف خواهند شد و پلیمر به صورت الاستیک تغییر شکل خواهد داد. در دماهای بالاتر از دمای انتقال فاز نرم، با اعمال نیرو، پلیمر می‌تواند به راحتی دچار تغییر شکل شود و به شکل ثانویه درآید. با کاهش دما و اعمال نیروی لازم برای حفظ تغییر شکل اعمال شده، تحرک زنجیره‌ها کاهش یافته، بلورینگی در آن القا می‌شود و شکل ثانویه در نمونه تثبیت می‌شود. یعنی حتی با حذف نیرو، نمونه شکل ثانویه‌ی خود را حفظ می‌کند. با افزایش مجدد دما به بالاتر از دمای انتقال بخش نرم، تحرک زنجیره‌ها افزایش می‌یابد و

زنجیره‌ها تمایل به بازگشت به حالت اولیه (مارپیچ) پیدا می‌کنند، بنابراین شکل اولیه‌ی نمونه بازیابی می‌شود [۲]. سامانه‌های SMP مرسوم عبارتند از: کوپلیمرهای پیوندخورده PE/Nylon6 و PE شبکه‌ای شده، پلی ایزوپرن ترانس (TPI)، کوپلیمر اتیلن وینیل استات شبکه‌ای شده، پلیمرهای برپایه استایرن، پلیمرهای برپایه اکریلات، پلی نوبورنن، پلی سیکلواکتن شبکه‌ای شده، پلیمرهای برپایه اپوکسی، پلیمرهای برپایه Thio-ene، پلی یورتان، زیست-پلیمرهایی مثل پلی ۳-هیدروکسی آلکانوات‌ها (PHAs)، کوپلیمرهای تشکیل شده از مونومرهای اسیدسباسیک یا (dodecanedioic acid) و پلی‌استرهای برپایه اسید [۴]. پلیمرهای حافظه‌شکلی، استحکام و سفتی کمی دارند و سفتی کم منجر به نیروی بازیابی کوچک می‌شود. به عنوان مثال استحکام مکانیکی برای آلیاژ حافظه‌شکلی بر پایه مس حدود ۸۰۰ MPa است، در حالی که برای پلیمر حافظه‌شکلی در محدوده ۱۰۰-۵ MPa است [۵]. استفاده از مواد تقویت‌کننده و ساخت نانوکامپوزیت راه حلی برای رفع این مشکل است. به طور کلی هدف از ساخت نانوکامپوزیت‌های حافظه‌شکلی پلیمری (SMPNC) (Shape Memory Polymer Nanocomposites) عبارت است از:

- بهبود خواص مکانیکی و نیروی بازیابی شکلی
- ایجاد حالت‌های جدید اثرات حافظه‌شکلی نظیر داشتن دو شکل موقت
- ایجاد عملکرد حافظه‌شکلی در کامپوزیت با استفاده از مواد فاقد حافظه‌شکلی
- افزودن کلیدهایی مثل الکتروسیسته، میدان مغناطیسی، نور (مادون قرمز، UV، مرئی) و رطوبت (آب) به پلیمرهای حافظه‌شکلی دارای کلید گرما
- ارتقای خواص حافظه‌شکلی نظیر نرخ ثابت، نرخ بازیابی کرنش، تنش بازیابی شکلی و سرعت بازیابی
- تنظیم دمای کلید و گسترش دامنه آن [۴ و ۵]

## ۲ روش‌های ساخت نانوکامپوزیت‌های حافظه‌شکلی

برای پیش‌پلیمرهای فعال گرماسخت مایع یا پلیمرهای گرمانرم حاوی نانوذرات جامد روش‌های محلولی، مذاب و آمیزه‌سازی روش‌های پلیمره شدن درجا، پلیمره شدن امولسیون و اختلاط با اعمال برش زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶].

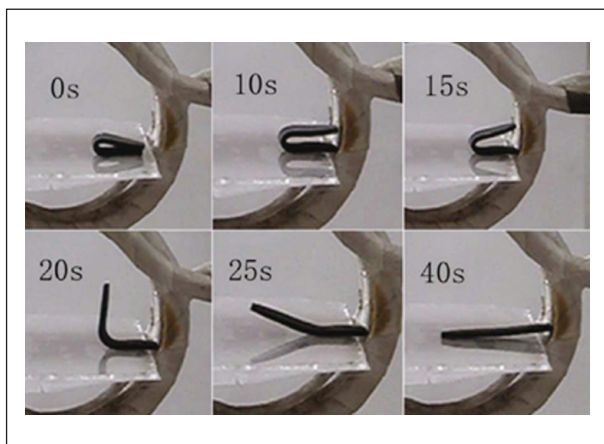
## ۳ مشخصه یابی و توصیف فیزیکی

### ۳-۱ ریخت‌شناسی

کارایی نانوکامپوزیت‌ها بستگی به نوع، نحوه‌ی پخش و میزان نانوپرکننده‌ها، میزان برهمکنش‌های بین سطحی بین آن‌ها و زمینه پلیمری و توانایی انتقال تنش بین سطحی دارد [۷]. بنابراین میزان پراکندگی نانوذرات و ریخت‌شناسی حاصل، موضوعی حائز اهمیت است. یکی از راه‌های بهبود پراکندگی نانوذرات در زمینه به کارگیری پلیمره شدن درجا است. به عنوان مثال Jana و Jimenez [۵] برای بهبود پخش نانوالیاف کربن (Carbon Nanofibers (CNF)) در زمینه پلی-یورتان، کامپوزیت CNF-SMPU را به روش پلیمره شدن درجا در مخلوط‌کن بی‌نظم، به وسیله اختلاط دو بعدی ساختند. راه دیگر، اکسایش یا عامل‌دار کردن شیمیایی سطح نانولوله‌های کربنی (Carbon Nanotubes (CNT)) یا نانوالیاف کربن (Carbon Nanofiber (CNF)) است که به طور گسترده به منظور بهبود کیفیت پخش و انتقال تنش بین نانوذره و زمینه پلیمر مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از اکسترودر دوماردون در مقیاس میکرو و نیز عوامل سطح فعال راه‌های دیگری برای بهبود پراکندگی این تقویت‌کننده‌ها هستند.

اثر حافظه‌شکلی القاشده به صورت الکترومغناطیسی یا گرمامغناطیسی در نانوکامپوزیت‌های بر پایه SMP می‌تواند با استفاده از تقویت‌کننده‌های فلزی یا اکسید فلزی نظیر اکسید آهن (III)، ذرات فرومغناطیس، ذرات NdFeB، تک بلورهای Ni-Mn-Ga و پودر نیکل حاصل شود. توزیع همگن این تقویت‌کننده‌ها در زمینه SMP برای دست یافتن به اثر حافظه‌شکلی مطلوب القاشده با مغناطیس، ضروری است. روش‌های مختلفی برای ارتقای سازگاری بین دو جز در این نانوکامپوزیت‌ها وجود دارد. به عنوان مثال ذرات اکسید آهن (III) قبل از استفاده در شبکه SMP در زمینه سیلیکا قرار داده می‌شوند تا تغییر شکل خوشه‌های میکرونی را کاهش دهند و سامانه همگن شکل گیرد. اصلاح نانوذرات با عامل جفت‌کننده سیلانی نیز روش دیگری است [۴]. فرآیند بازیابی شکلی نانوکامپوزیت CNT-PU پر شده با ۵۰٪ وزنی پودر Fe در میدان مغناطیسی متناوب (فرکانس ۴۵kHz و شدت میدان مغناطیسی ۶۷۰kA/m) در شکل ۱ نشان داده شده است. این فرآیند، ۴۰ s طول می‌کشد و بازیابی شکلی ۹۷/۴۱٪ حاصل می‌شود. وقتی نمونه در معرض میدان مغناطیس متناوب قرار می‌گیرد، مدت زمانی

طول می‌کشد تا دمای نانوکامپوزیت به دمای انتقال برسد. در طول این مدت هیچ‌گونه تغییر شکلی مشاهده نمی‌شود، اما به محض رسیدن به دمای انتقال، شکل نانوکامپوزیت به سرعت تغییر می‌کند [۸].



شکل ۱ فرآیند بازیابی شکلی نانوکامپوزیت CNT-PU پر شده با ۵۰٪ وزنی پودر Fe در میدان مغناطیسی [۸].

هنگامی که میزان پرکننده از حد خاصی تجاوز کند، خواص نانوکامپوزیت‌ها به دلیل برهم‌کنش ضعیف بین پرکننده و زمینه تنزل می‌یابد. در مورد SMPU تقویت شده با CNT این پدیده مشاهده شده است. برای رفع این مشکل Poulin و همکاران [۴] زمینه PVA را انتخاب کردند که برهم‌کنش قوی‌تری با CNT دارد. آن‌ها روش ریسندگی انعقادی خاصی با مقدار ۲۰٪ وزنی CNT برای ساخت الیاف نانوکامپوزیتی CNT-PVA به کار گرفتند. تنش بیشینه الیاف نانوکامپوزیتی حاصل یکی دو مرتبه بزرگ‌تر از SMP خالص و نزدیک تنش بیشینه SMA بود.

### ۳-۲ خواص مکانیکی

SMP توانایی بازیابی کرنش‌های زیادی را دارد. کرنش‌های قابل بازیابی نامحدود در مواد SMP در حدود ۱۰۰٪ است در حالی که در فلزات یا سرامیک‌های حافظه‌شکلی به ترتیب کرنش‌های حدود ۱۰٪ و ۱٪ قابل بازیابی هستند. با افزودن نانوذرات به زمینه پلیمری حافظه‌شکلی، خواص مکانیکی نظیر مدول الاستیک، مدول ذخیره، سفتی، تنش بازیابی و... بهبود می‌یابد. Meng و همکاران [۴] تأثیر میزان نانولوله‌های کربنی چند دیواره‌ای (MWCNT) را روی خواص الیاف نانوکامپوزیتی SMPU بررسی کردند و دریافتند که نیروی بازیابی و نرخ بازیابی شکلی الیاف با افزودن مقدار اندکی

### ۳-۳ خواص الکتریکی

تقاضا برای رهایی از گرم کردن مستقیم سامانه منجر به ساخت SMP های پر شده با پرکننده‌های رسانا نظیر نانولوله‌های کربن، نانوذرات کربن و ... شده است. Goo و همکارانش [۱۱] در دانشگاه Konkuk اولین کسانی بودند که بازیابی شکلی کامپوزیت SMP رسانا را با استفاده از نانولوله‌های کربنی و اعمال جریان الکتریکی به جای اعمال گرمای مستقیم مشاهده کردند. این دستاورد منجر به عملکرد SMP به عنوان محرک فعال الکتریکی نیز شد، که در بسیاری کاربردهای عملی نظیر محرک‌های هوشمند برای کنترل میکرو ابزارهای فضایی اهمیت دارد. آن‌ها برای بهبود پیوندهای فصل مشترک پلیمر و پرکننده و بهبود خواص مکانیکی، MWCNT را پس از اصلاح شیمیایی سطح با حلال‌های اسیدنیتریک و اسیدسولفوریک مورد استفاده قرار دادند. اما هدایت الکتریکی کامپوزیت‌های حاوی MWCNT اصلاح شده کمتر از هدایت الکتریکی کامپوزیت‌هایی بود که از MWCNT اصلاح نشده با همان میزان پرکننده استفاده کرده بودند. این رفتار می‌تواند به دلیل افزایش نقص‌ها در ساختار شبکه پیوندهای کربن موجود در سطح نانولوله‌های فراوری شده با اسید باشد. در عمل، اصلاح بیشتر سطح نانولوله‌ها هدایت الکتریکی را به طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد [۱۱].

به طور کلی افزودن نانوذرات رسانا به زمینه SMP های مختلف روشی آسان برای ساخت مواد حساس به الکتریسیته است. با رسیدن میزان این پرکننده‌ها به آستانه مشخصی، شبکه‌ای ایجاد می‌شود که رسانایی الکتریکی کامپوزیت را به طرز آشکاری بهبود می‌بخشد. وقتی نانوکامپوزیت در معرض میدان الکتریکی مناسبی قرار می‌گیرد، جریان الکتریکی از شبکه ایجاد شده، عبور می‌کند و گرمای ژول تولید شده باعث انتقال ذوب یا شیشه سگمنت‌های پلیمری می‌شود و در نهایت نانوکامپوزیت، بازیابی شکلی نشان می‌دهد [۷]. نسبت طول به قطر بالاتر باعث می‌شود هم‌پوشی الکتریکی در میزان پرکننده کم‌تری شکل بگیرد، به عنوان مثال این شبکه می‌تواند حتی وقتی که درصد وزنی MWCNT کم‌تر از ۱٪ است، شکل گیرد [۹]. ارتباط گرمای ژول با ولتاژ و مقاومت در رابطه ۳ بیان شده است، که در آن Q گرمای ژول، V ولتاژ و R مقاومت است. با اعمال ولتاژهای مختلف، دما تغییر می‌کند و بر فرآیند بازیابی فعال الکتریکی شامل میزان و سرعت بازیابی اثر خواهد داشت.

MWCNT بهبود می‌یابد.

مهم‌ترین نانوذرات استفاده شده در سامانه‌های حافظه شکلی پلیمری با هدف بهبود خواص مکانیکی عبارتند از: نانوساختارهای کربن، نانوسلولز، اکسید آهن (III) و نانورس. به عنوان مثال در کامپوزیت‌های PVA-MWCNT حافظه شکلی فعال الکتریکی با میزان ۲۰٪ وزنی MWCNT تنش بازیابی مطلوبی حاصل شده، با اعمال ولتاژ ثابت ۶۰ ولت در زمان ۳۵ ثانیه بازیابی شکلی به صورت کامل محقق شده است. این یافته می‌تواند برای تحریک سریع در مدارهای الکتریکی سودمند باشد [۹].

رفتار مکانیکی به عنوان تابعی از دما با استفاده از تحلیل دینامیکی مکانیکی گرمایی قابل مشخصه‌یابی است. این آزمون شامل ایجاد شکل موقت حین برنامه دهی و بازیابی تنش آزاد شکل دائمی است. برنامه‌دهی در شرایط کرنش کنترل در ۴ مرحله انجام می‌شود. ابتدا پیش از آن که نیروی لازم برای رساندن کرنش تا ۳۰٪ اعمال شود، نمونه در دمای بالای Tg نگه داشته می‌شود. سپس نمونه‌ها در تنش ثابت تا زیر Tg سرد می‌شوند. در مرحله بعد تنش برداشته می‌شود و نمونه در دمایی زیر Tg نگه داشته می‌شود تا شکل موقت تثبیت شود. در مرحله آخر نمونه دوباره تا بالای Tg گرم می‌شود و شکل اولیه بازیابی می‌شود. این آزمون برای ۳-۴ چرخه تکرار می‌شود. توانایی ثبات شکل موقت (R<sub>p</sub>) در زیر Tg و توانایی بازیابی شکل اصلی (R<sub>r</sub>) در بالای Tg از روابط ۱ و ۲ بدست می‌آید. در این روابط ε<sub>m</sub> حداکثر کرنش در چرخه N ام بعد از خنک کردن و قبل از برداشتن تنش، ε<sub>u</sub> کرنش تثبیت شده پس از برداشتن تنش نمونه در زیر Tg در همان چرخه و ε<sub>f</sub> کرنش باقیمانده نمونه پس از بازیابی است [۱۰].

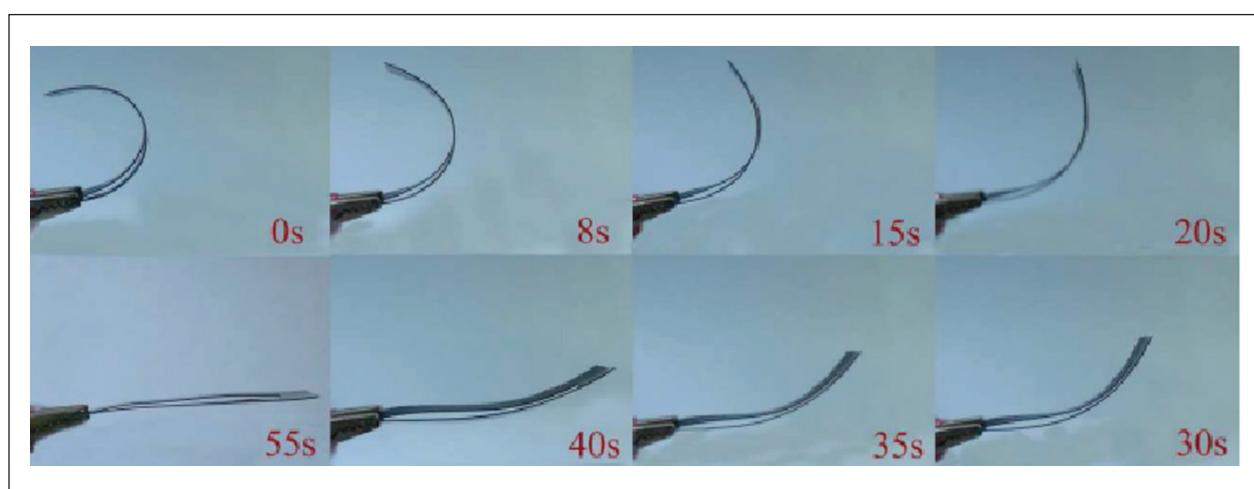
$$R_r(N) = \frac{\varepsilon_u(N)}{\varepsilon_m(N)} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_p(N) = \frac{\varepsilon_m(N) - \varepsilon_f(N)}{\varepsilon_m(N) - \varepsilon_f(N-1)} \times 100\% \quad (2)$$

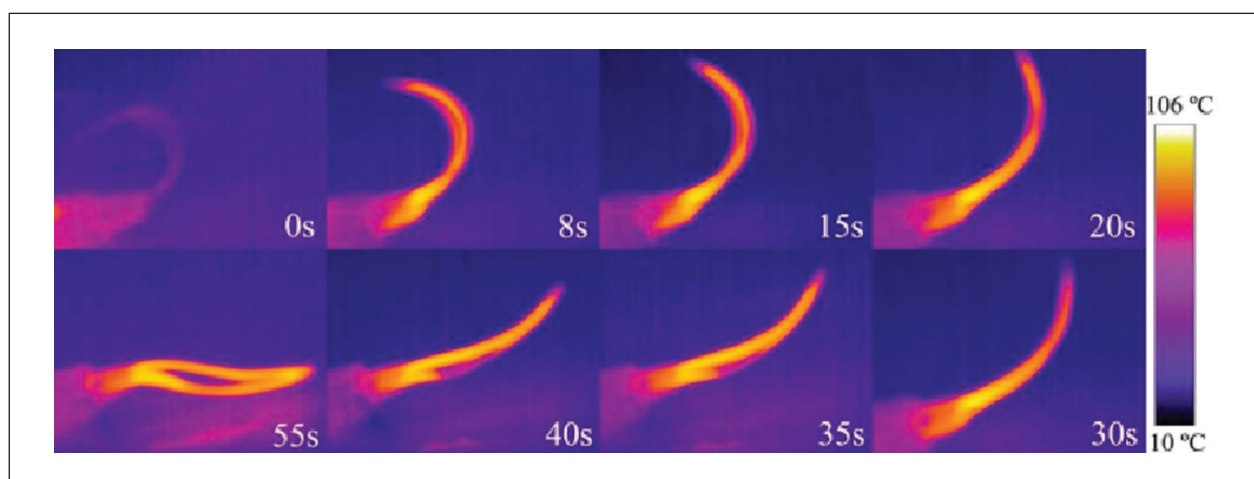
$$Q=V^2/R \quad (۳)$$

با میزان بازیابی و ثبات شکل بالایی برخوردارند. در واقع میزان بازیابی و سرعت آن بستگی به مقاومت یا رسانایی مواد دارد و نمونه‌های با رسانایی بیشتر، بازیابی سریع‌تری دارند، درحالی‌که وقتی رسانایی کافی نیست، فرآیند بازیابی نمی‌تواند به طور کامل صورت گیرد. از آنجایی‌که سگمنت سخت تعیین‌کننده فرآیند بازیابی است با کاهش میزان آن و نیز طول زنجیر سگمنت، زمان بازیابی افزایش می‌یابد. در این نانوکامپوزیت‌ها با افزایش سگمنت نرم یعنی پلی اتیلن گلایکول از ۳۸٪ وزنی به ۶۰٪ وزنی زمان بازیابی از ۵۷s به ۶۸s افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان با کنترل میزان سگمنت، طول زنجیر و میزان پرکننده، نانوکامپوزیت حافظه‌شکلی با سرعت بازیابی مشخص طراحی کرد.

شکل ۲ (الف) و (ب) فرآیند بازیابی را برای فیلم نانوکامپوزیتی کوپلیمر بلاک پلی اتیلن گلایکول و پلی بوتیلن سوسینات حاوی ۱٪ وزنی (PBSEG/CNT)CNT تحت ولتاژ ۶۰V نشان می‌دهد که به ترتیب با دوربین معمولی و دوربین فیلم برداری گرمایی مادون قرمز ثبت شده است. با توجه به شکل ۲ (ب) دمای نانوکامپوزیت با اعمال ولتاژ به سرعت تا بالای دمای انتقال افزایش می‌یابد که با اعمال ولتاژ زیاد، شاهد بازیابی شکلی حدود ۹۷٪ در ۵۵ ثانیه هستیم. به طور کلی این نانوکامپوزیت‌ها با میزان ۰/۵ درصدوزنی CNT یا بیشتر، از عملکرد حافظه‌شکلی خوب



(الف)



(ب)

شکل ۲ فرآیند بازیابی فیلم نانوکامپوزیتی PBSEG/CNT تحت ولتاژ ۶۰V ثبت شده با (الف) دوربین معمولی (ب) دوربین فیلم برداری گرمایی مادون قرمز [۱۲].

نانوویسکرهای سلولز (CNW) نیز به دلیل حساس بودن به آب، منجر به نوع جدیدی از نانوکامپوزیت‌های SMP می‌شوند. نانوکامپوزیت CNW-SMPU با دو کلید ناهمسان توسط Hu و همکاران [۴] سنتز شد. این نانوکامپوزیت وقتی در معرض عوامل تحریک آب و گرما قرار می‌گیرد، اثر حافظه‌شکلی با دو شکل موقت نشان می‌دهد. این تحقیق نشان داد که CNW ها در SMPU بلوری نه تنها کامپوزیت را قادر به حفظ اثر حافظه‌شکلی با گرمای القاشده خود که ذاتاً در زمینه پلیمر وجود دارد، می‌سازد، بلکه اثر حافظه شکلی القاشده با آب هم ایجاد می‌کند و دلیل آن شبکه همپوشی CNW، است. توانایی CNW برای عمل کردن به عنوان کلیدهای حساس به آب، راهبرد جدیدی برای تعبیه انواع مختلف کلیدها در ماده با روش کامپوزیت کردن فراهم می‌کند. علاوه بر این نانوکامپوزیت‌ها در حالت خشک بسته به میزان CNW بازیابی شکلی تنظیم‌پذیر نشان می‌دهند. این یافته‌ها روش‌های احتمالی برای تنظیم اثر حافظه شکلی، متناسب با کاربردهای مختلف مورد تقاضا ایجاد می‌کند.

#### ۴-۲ کاربرد نانوکامپوزیت‌های حافظه شکلی در هوافضا

امروزه محققان بسیاری روی کارایی نانوکامپوزیت‌ها و کامپوزیت‌های پلیمری حافظه شکلی در هوافضا متمرکز شده‌اند. محیط فضا به گونه‌ای است که عوامل مهم بسیاری نظیر خلأ زیاد، اثر چرخه دمای بسیار کم یا بسیار زیاد، تابش فرابنفش و ... باید در انتخاب مواد سازه‌ای فضایی در نظر گرفته شوند. سازه‌های قدیمی معایبی همچون وزن زیاد، هزینه بالا و اثر شوک زیاد ناشی از گستردگی داشتند. این سازه‌ها فضای زیادی در فضاپیما می‌گرفتند و بازده مأموریت فضایی را پایین می‌آوردند. نانوکامپوزیت‌ها و کامپوزیت‌های حافظه شکلی خودگسترش‌دهنده به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردی نظیر وزن کم، قیمت پایین، چگالی پایین، نسبت استحکام به وزن بالا، تعداد قسمت‌های کم و طراحی ساده، قابلیت ساخت و تولید خوب و شکل‌پذیری بالا یکی از بهترین مواد در مهندسی هوافضا هستند.

سامانه پیچیده لولاهای مکانیکی و اثر شوک زیاد در لولاهای فنری فولادی مانع گسترش موفقیت‌آمیز سازه‌ها در فضا می‌شود. برای رفع این مشکل از لولاهای SMPC در سازه‌های خودگسترش‌دهنده استفاده می‌شود. این لولاهای تنوع زیادی دارد که یکی از انواع آن لولاهای کامپوزیتی حافظه الاستیک (EMC) است. Leng و همکارانش [۱۴] نوعی لولای SMPC تقویت شده با الیاف کربن ساختند که شامل

برخلاف مواد حافظه‌شکلی بازیابی شده به روش تحریک مستقیم گرمایی در آن یا حلال، فرآیند بازیابی فعال الکتریکی می‌تواند شکل نمونه را در هر مرحله‌ای از بازیابی کنترل کند زیرا با قطع ولتاژ، دما سریعاً پایین می‌آید. در واقع هر مرحله از تغییر شکل را قبل از بازیابی کامل می‌توان رصد کرد. بنابراین می‌توان ابزار را با اثر حافظه‌شکلی چندگانه طراحی کرد. در حالی که، در پلیمرهای تحریک شده با گرما برای درک اثر حافظه شکلی چندگانه لازم است پلیمرهایی با دمای انتقال چندگانه یا دمای انتقال شیشه‌ای گسترده در اختیار داشت [۱۲].

#### ۳-۴ خواص نوری

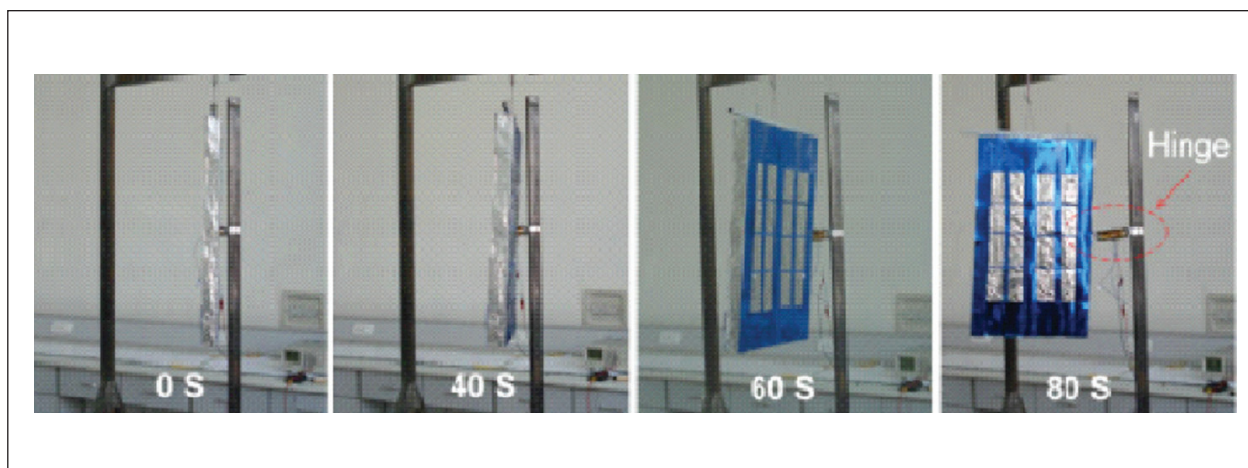
تحریک نانوکامپوزیت‌های SMP از راه دور به دلیل کاربردهای بالقوه فراوان مورد توجه قرار گرفته است. افزودن CNT و گرافن به زمینه پلیمر، روشی عملی برای به دام انداختن فوتون‌های مادون قرمز و تبدیل انرژی نور به گرما و در نتیجه انتقال گرمایی است. Leng و همکاران [۴] دریافتند که SMP گرماسخت پر شده با ذرات نانوکربن با قرارگیری در معرض نور مادون قرمز در خلأ، توانایی بازیابی شکلی و سرعت بازیابی بالاتری نسبت به SMP خالص دارد. Liang و همکاران [۴] از گرافن به عنوان جاذب نوری و واحد انتقال انرژی در مقیاس نانو استفاده کردند. آن‌ها نانوکامپوزیت گرافن-TPU را با استفاده از ۱٪ وزنی گرافن سولفون‌دار شده ساختند که با نور مادون قرمز تحریک می‌شد.

SMP‌های تقویت شده با CNT خواص محافظت UV خوبی نیز دارند که دلیل آن امکان جذب UV در CNT است. نانوکامپوزیت‌های حساس به نور در ابزار درمانی درون عروقی فعال شده با لیزر قابل استفاده‌اند. این مواد می‌توانند به صورت مکانیکی لخته را بازیابی کنند و جریان خون را بازگردانند [۵].

#### ۴ کارایی

##### ۴-۱ نانوکامپوزیت‌های حافظه شکلی پاسخگو به دو عامل تحریک

برخی نانوکامپوزیت‌ها نظیر نانوکامپوزیت‌های حافظه‌شکلی حاوی CNT، توانایی پاسخ‌گویی به دو نوع عامل تحریک متفاوت یعنی الکتریسیته و آب را دارند. در واقع استفاده از CNT نه تنها رسانایی را در کامپوزیت‌ها القا می‌کند بلکه آب-دوستی را نیز بهبود می‌بخشد [۱۳].



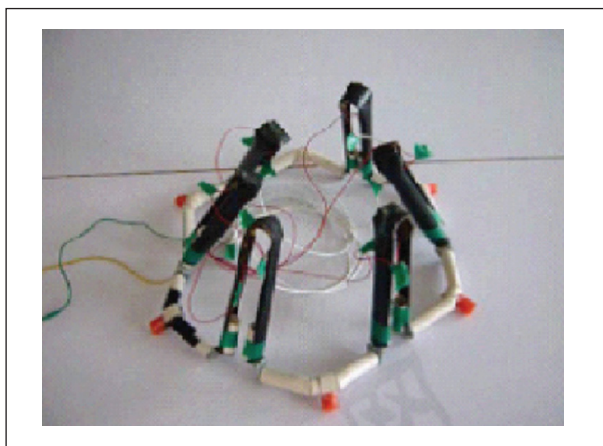
شکل ۳ فرآیند حافظه‌شکلی با استفاده از لولاهای SMPC در پیکان خورشیدی [۱۴]

زیاد، سفتی محسوس و سبکی وزن بستگی دارد. Lan و همکاران [۱۴] نوعی لولای SMPC تقویت شده با الیاف کربن برای تحریک پیکان خورشیدی و گسترده‌سازی آن تولید و فرایند گسترده‌سازی آن را در محیط بدون جاذبه شبیه سازی کردند. پیکان خورشیدی تا بالای دمای انتقال گرم شده، با اعمال نیروی خارجی خم می‌شود، سپس با حفظ نیرو تا دمای اتاق خنک می‌شود. با اعمال ولتاژ و رسیدن به دمای انتقال، شکل اصلی در ۸۰ s بازیابی می‌شود. فرایند گسترده شدن در شکل ۳ به تصویر کشیده شده است.

ماهواره و زمین هستند و می‌توانند اطلاعات مهمی در مورد فضا بدهند، از دیگر سازه‌های فضایی هستند که با SMPC ها ساخته می‌شوند. دو عامل دقت و روزنه انعکاس‌دهنده در مورد آنتن‌ها حائز اهمیت است. مطلوب بودن هم‌زمان این دو عامل، سازه آنتن را بسیار پیچیده می‌کند. علاوه بر این وزن و حجم فشرده آنتن‌های خودگسترش‌دهنده نیز در طراحی مهم است. SMPCها در اینجا نیز نگرانی در مورد وزن، دقت سطح و روزنه انعکاس‌دهنده را برطرف کرده، نقش مهمی در آنتن‌های خودگسترش‌دهنده ایفا می‌کنند. Yang و همکاران [۱۴] نوع جدیدی از آنتن‌ها با سطح مش‌بندی شده را تولید کرده‌اند که با نوارهای SMPC، همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، گسترش می‌یابد. این سازه شامل ۶ قطعه نوار پوسته نازک SMPC، ۶ اتصال‌دهنده نواری، ۶ دنده هدایتی، تکیه‌گاهی فولادی و ۶ گرم‌کننده مقاومتی است. آزمایش گسترده شدن با استفاده از گرمای حاصل از جریان الکتریکی انجام گرفت. نتایج حاکی از آن بود که آنتن‌های SMPC می‌توانند در حجم کوچکی

دو پوسته نازک لوله‌ای در جهت مخالف، دو وسیله برای ثابت نگه داشتن در انتها و دو گرم‌کننده مقاومتی چسبیده به سطح پوسته‌های نازک در جهت محوری برای تحریک الکتریکی می‌شود. در این لولاهای سرعت در طول فرایند گسترده شدن تغییر می‌کند به نحوی که سرعت در مراحل اول و مراحل پایانی کمتر از سرعت مراحل میانی است. این روند به کاهش اثر شوک در سازه‌های خودگسترش‌دهنده کمک می‌کند. کارایی پیکان‌های خورشیدی که سامانه‌های اصلی تولید انرژی در سازه‌های خودگسترش‌دهنده برای دریافت انرژی در فضا هستند، به مساحت گسترده‌سازی آزمایش‌هایی نظیر آزمون گسترده شدن بدون حضور جاذبه و آزمون ارتعاش نامنظم برای تعیین امکان‌سنجی استفاده از لولاهای EMC برای باز شدن بدون آسیب پیکان خورشیدی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که لولاهای EMC می‌توانند جایگزین مواد فلزی مرسوم در برخی بخش‌های خودگسترش‌دهنده نه چندان مهم در ماهواره‌ها شوند.

لولاهای EMC همچنین در بدنه قابل گسترش ماهواره هوشمند عملیاتی Nanosat به کار رفته‌اند که با همکاری مشترک شرکت‌های JPL و CTD ساخته شده‌اند. این لولاهای برای ایجاد ارتباط میان بخش‌های اصلی ماهواره و دو بال بدنه قابل گسترش در دو انتها طراحی شده‌اند. بال‌ها می‌توانند جهت انحراف ماهواره را با باز و بسته شدن لولاهای EMC کنترل کنند. در باز شدن بدنه‌ها و پیکان‌های خورشیدی که با استفاده از لولاهای SMPC تحریک می‌شوند، سلول‌های گسترش‌یابنده محدود و نسبتاً کوچک هستند، بنابراین میزان از دست رفتن انرژی به مأموریت فضایی لطمه نمی‌زند. آنتن‌ها نیز که ابزار ارتباطی مهمی بین



(ب)

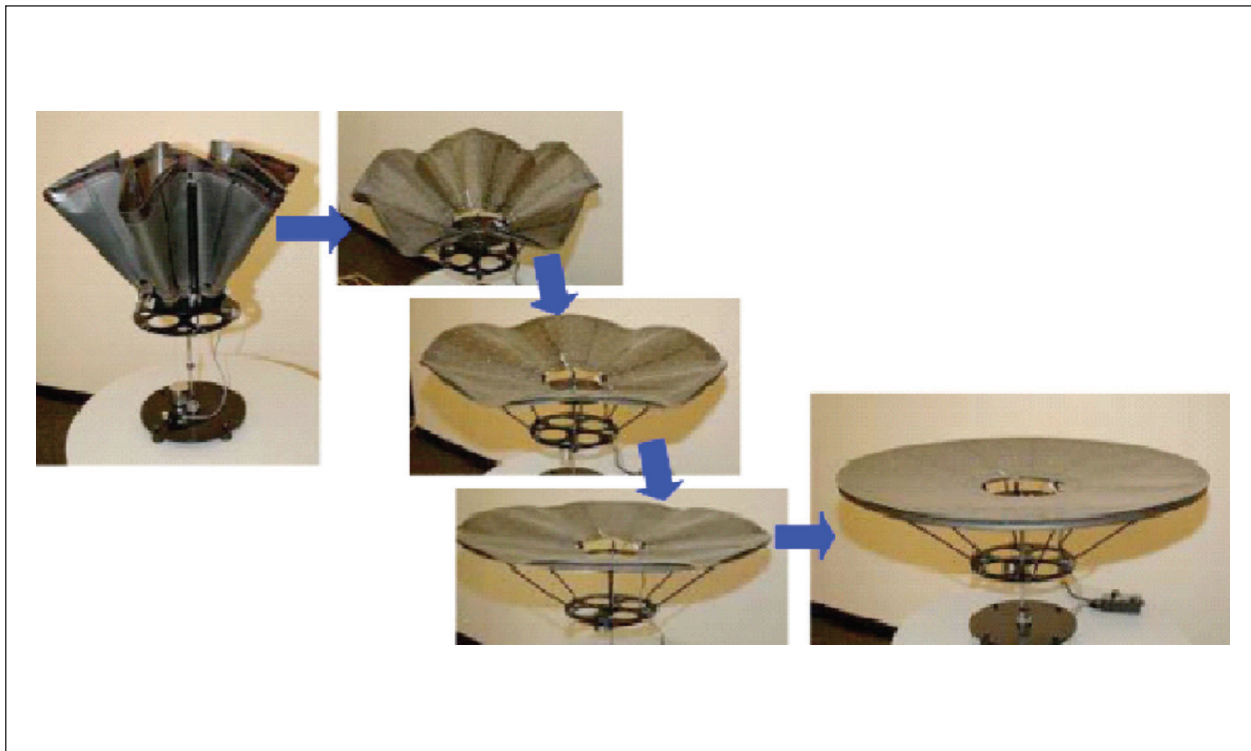


(الف)

شکل ۴ مدل آنتن خودگسترش دهنده با سطح مش بندی الف) آنتن SMPC باز شده ب) پوسته‌های نازک SMPC فشرده شده [۱۴]

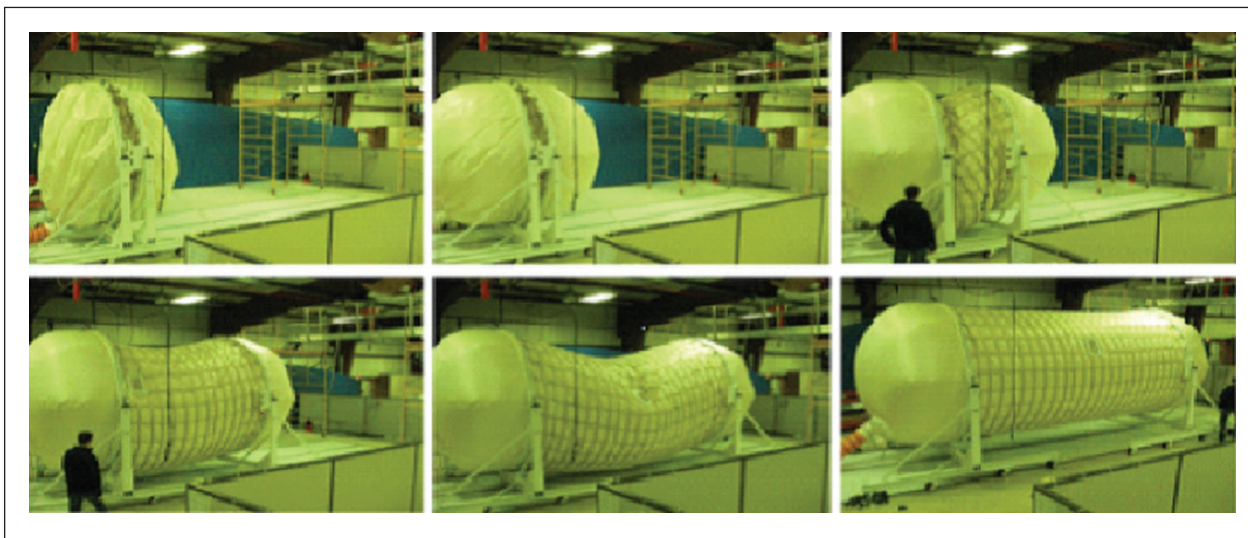
بهره‌گیری از مفهوم SMPCها، نوع جدیدی از منعکس‌کننده‌های قابل‌گسترش هوشمند با سطح یکپارچه را طراحی کرده است که انعکاس دهنده منعطف دقیق (FRP) نامیده می‌شود. این سازه فشرده همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، با تحریک نوری یا گرمایی گسترده می‌شود.

فشرده شوند و با گرما دادن کاملاً باز شوند. این سازه‌ها در مقایسه با آنتن‌هایی که به صورت مکانیکی گسترش می‌یابند و آلیاژهای حافظه‌شکلی مرسوم، بسیار سبک‌تر هستند. اگرچه دقت سطح در این آنتن‌ها در حد قابل ملاحظه‌ای بهبود نیافته است. شرکت Harris با



شکل ۵ مراحل گسترش FPR [۱۴]





شکل ۶ آزمون گسترده شدن پناهگاه فضایی [۱۴]

است. فرایند گسترش یافتن این سازه خودگسترش‌دهنده همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، در آزمایش‌های زمینی بررسی شده است. نتایج حاکی از آن است که این مواد خواص بازیابی خوبی تحت فشار هوا دارند [۱۴].

ازهم‌گسیختگی با چند عامل تحریک را نشان می‌دهد. اما ماده‌ای رایج برای استفاده‌ی تولیدکنندگان الکترونیک نیست. پلی(متیل متاکریلات) (PMMA) و اکریلونیتریل بوتادی ان استایرن/پلی کربنات (ABS/PC) برای استفاده در محصولات الکترونیکی معمول‌تر هستند و خواص حافظه‌شکلی نیز نشان می‌دهند [۱۵].

## ۵ نتیجه‌گیری

در این مطالعه علاوه بر معرفی و لزوم ساخت نانوکامپوزیت‌های هوشمند پلیمری حافظه‌شکلی، به بررسی روش ساخت، مشخصه‌یابی و کارایی این مواد پرداخته شد. با مرور مطالعات انجام شده و با توجه به خواصی که برای نانوکامپوزیت پلیمری حافظه‌شکلی گزارش شد، از جمله خواص مکانیکی و الکتریکی بهتر نسبت به پلیمر حافظه‌شکلی و نیز کارایی بالای این مواد در زمینه‌های مختلف، می‌توان نتیجه گرفت که این مواد می‌توانند جایگزین مناسبی برای آلیاژهای حافظه‌شکلی به خصوص در کاربردهای زیست‌پزشکی باشند.

## قدردانی

این مقاله برگرفته از سمینار کارشناسی ارشد اینجانب است که با راهنمایی و ویرایش استادراهنما، آقای دکتر مهرداد کوکبی ارائه شده است و لازم می‌داند مراتب قدردانی خود را ابراز نماید.

اگر اکتشاف در فضا به طول انجامد، پناهگاهی خوب برای زندگی و دور ماندن از آسیب تابش فرابنفش ضروری است. شرکت Dover ILC با همکاری مرکز تحقیقات ناسا پناهگاهی قابل گسترش از SMPC ها در فضا ساخته

## ۴-۳ فرآیند ازهم‌گسیختن فعال

یکی دیگر از کاربردهای نانوکامپوزیت‌های حافظه‌شکلی، استفاده از آن‌ها در فرآیند ازهم‌گسیختگی فعال (Active Disassembly (AD)) است. این فرآیند که در سال‌های اخیر مطرح شده است، در مقایسه با ازهم‌گسیختگی معمولی مزیت‌های زیادی دارد. به عنوان مثال نیاز به ماشین‌آلات، هزینه و کارگر کمتری دارد. اما مشکلاتی هم دارد که می‌توان به ازهم‌گسیختگی تصادفی اشاره کرد. در فرآیند AD جدید از نانوکامپوزیت‌های SMP استفاده شده است. این فرآیند جدید نیاز به تحریک چفت و بست‌های نانوکامپوزیت SMP با چند میدان (میدان مغناطیسی و گرمایی) دارد. تحریک با چند میدان، احتمال ازهم‌گسیختگی تصادفی را محدود خواهد کرد و می‌تواند راهی برای اقتصادی‌تر کردن این فرآیند برای تولیدکنندگان باشد. ساخت ماده‌ی هوشمند با چند عامل تحریک، راهی جدید برای ایجاد و به کارگیری مواد هوشمند گشوده است. چفت و بست‌های قابل رها شدن جدید با چند عامل تحریک، شیوه‌ی رایج ازهم‌گسیختگی را تغییر خواهند داد و فرآیند ازهم‌گسیختگی کارآمدتری برای شماری از محصولات نظیر ابزار الکترونیکی کوچک که فروپاشی دشوار و گران قیمت دارند ایجاد می‌کنند. نانوکامپوزیت Diaplex SMP سازوکار

## مراجع

1. Rezanezhad S., Smart Shape Memory Nanocomposites MSc Seminar, Tarbiat Modares University, February **2005**.
2. Golbang A., Smart Nanocomposite Systems, based on Shape Memory Polymers., MSc Seminar, Tarbiat Modares University, February **2009**.
3. Ebrahimi A., Shape Memory Polymers., MSc Seminar , Tarbiat Modares University, February **2003**.
4. Hu J., zhu Y., Huang H., Lu J., “Recent Advances in Shape Memory Polymers: Structure, Mechanism, Functionality, Modeling and Applications”, *Progress in Polymer Science*, 37, 1720– 1763, **2012**.
5. Meng Q., Hu J., “A Rreview of Shape Memory Polymer Composites and Blends”. *Applied Science and Manufacturing*, 40, 1661–1672, **2009**.
6. Koo J., Polymer Nanocomposites, The McGraw-Hill Companies, USA, **2005**.
7. Kalita H., Karak N., “Bio-based Hyperbranched Polyurethane/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanocomposites as Shape Memory Materials”, *Polymers Advanced Technologies*, 24, 819-823, **2013**.
8. Cai Y., Feng X., Jiang J., “Novel Kind of Functional Gradient Poly (ε-caprolactone) Polyurethane Nanocomposite: A Shape-Memory Effect Induced in Three Ways”, *Journal of Applied Polymer Science*, 131, 1-8, **2014**.
9. Du F., Ye E., Yang W., “Electroactive Shape Memory Polymer Based on Optimized Multi-Walled Carbon Nanotubes/Polyvinyl Alcohol Nanocomposites”, *Materials Letters*, 68, 170–175, **2015**.
10. Sonseca A. , Camarero S., Peponi L., “ Mechanical and Shape-Memory Properties of Poly(Mannitol Sebacate)/Cellulose Nanocrystal Nanocomposites”, *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 52, 3123-3133, **2014**.
11. Yanju L., Haibao L., Xin L., “Review of Electro-active Shape-memory Polymer Composite”,- *Composites Science and Technology*, 69, 2064-2068, **2009**.
12. Huang C., He M., Huo M., “A Facile Method to Produce Pbs-Peg/Cnts Nanocomposites with Controllable Electro-Induced Shape Memory Effect”, *Polymer Chemistry*, 4, 3987-3997, **2013**
- 13 . Luo H., Li Z., Yi G., “Multi-Stimuli Responsive Carbonnanotube Shape Memory Polymeric Composites”, *Materials Letters*, 137, 385-388, **2014**.
14. Liu Y., Du H., Liu L., Leng J., “Shape Memory Polymers and Their Composites in Aerospace Applications: a Review”, *Smart Materials and Structures*, 23, 023001, **2014**.
15. Carrell J., Zhang H., Wang Sh., “Shape Memory Polymer Nanocomposites for Application of Multiple-Field Active Disassembly: Experiment and Simulation”, *Environmental Science and Technology*, 47, 13053-13059, **2013**.