



بررسی ساختار و رویکرد منسوجات خود ترمیم شونده

مهدیس زاهدی دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه مارلیک نوشهر

دکتر ریحانه فتاحیان استاد یار کارشناسی ارشد دانشگاه مارلیک

چکیده

یکی از فناوریهای جدید با نام منسوجات خود ترمیم شونده اشاره به توانایی خود ترمیمی منسوجات پس از آسیب دارد. در تحقیق پیشرو، رویکرد و ساختار منسوجات خود ترمیم شونده را مطالعه خواهیم کرد. ساختار این نوع از منسوجات (خود ترمیم شونده) به نحوی است که از قابلیت موجود زنده در ترمیم آسیبهای وارده، تقلید میشود. این دسته از مواد، ساختارهایی متفاوت دارند که در کل در دو طبقه دسته بندی میشوند: الف. منسوجات خود ترمیم شونده درونی: این دسته شامل پیوندهایی شیمیایی است که برگشت پذیر بوده و مراحل گوناگونی از بهبودی را دس از صدمه در ناحیه ای که آسیب دیده است، ممکن میسازد. ب. منسوجات خود ترمیم شونده بیرونی: این دسته شامل عاملی است که شغابخش بوده و داخل ماتریکسی پلیمری ترکیب شده است و بعد از وارد شدن آسیب این عامل آزاد شده و پس از آن پروسه خود ترمیمی شروع خواهد شد. منسوجات خود ترمیم شونده که میتوانند باعث افزایش طول عمر و کاهش هزینه های مرتبط با حفظ و نگهداری یا تعمیر و همچنین بهبود و تکامل دوام و ایمنی شوند، کاربردهای متعددی دارند که از آن جمله میتوان به کاربرد در زمینه های لباس، پزشکی، نظامی، وسایل نقلیه و زیرساختها اشاره کرد.

لغات کلیدی: ساختار، رویکرد، منسوجات خود ترمیم شونده، ساز و کار ترمیم



۱. مقدمه

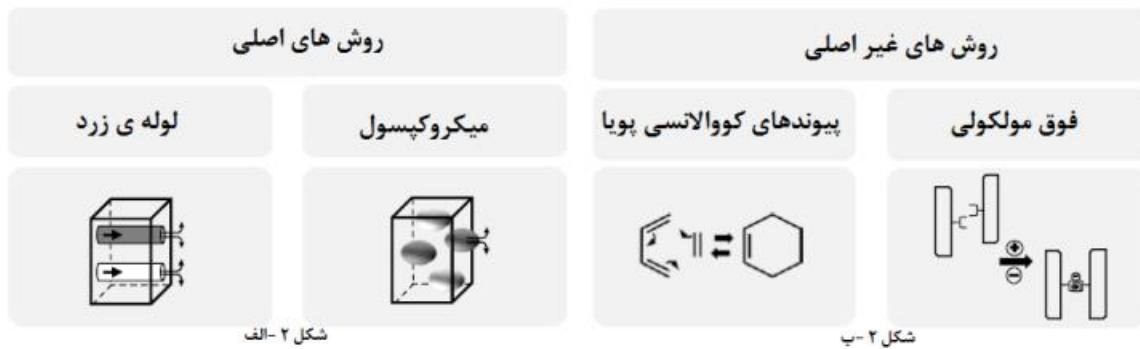
پیشرفتی که در منسوجات فنی حاصل شده است منجر به ایجاد امکاناتی نوین در حوزه تحقیقات نساجی میشود که به عنوان یکی از این امکانات میتوان به منسوجات خود ترمیم شونده اشاره کرد. ساختار این منسوجات به گونه‌ای است که آنها با تقلید از قابلیت موجود زنده اقدام به ترمیم ناحیه آسیب دیده پس از بروز صدمه شده و بدون اینکه دخالت بیشتری در این مورد شود، میتوانند یکپارچگی محل صدمه دیده را به حالت اول برگردانند. در واقع، از ترکیبات پلیمری که خود را بازسازی میکنند میتوان به عنوان اساس و پایه‌ی بافتهای خود ترمیم شونده نام برد.

این پلیمرها تنها در منسوجات کاربرد ندارند و میتوان از آنها به عنوان پوشش مثلا در دفع آب و به جز این نیز استفاده کرد. ساز و کار خود ترمیم شونده‌گی مثل انتشار عامل شفاف‌بخش و یا اتصال عرضی و قابل برگشت جهت بهبود مواد خود ترمیم شونده در موادی مانند فلزات و آلیاژها، پلیمرها و پلاستیکها، پوششها و رنگها و یا سرامیک و بتن وجود دارد. همچنین، برخی تکنولوژیها نیز نقشی اساسی در بهبود و گسترش مکانیسمهای خود ترمیمی دارند که از آن جمله میتوان به الکتروهِیدروپینامیک، تاثیر حافظه و یا حرکت نانوذرات و رسوب توام با آن اشاره کرد. در تحقیق حاضر، ما به بررسی ساز و کارهای اصول خود ترمیمی میپردازیم. آنچه در این تحقیق مورد تاکید قرار میگیرد، عملکردهای مرتبط با نساجی، مرور مواد خود ترمیم شونده، سازو کارهای ترمیم و شیوه‌های به وجود آمدن این منسوجات میباشد.

۱.۱. عملکرد و دسته بندی

موجودات زنده با اصطلاح خود ترمیمی به خوبی آشنا هستند و این امر میتواند در موجودات زنده منجر به حفظ زندگی و افزایش طول عمر شود. بر همین اساس و با الهام گرفتن از طبیعت، پژوهشگران موفق شده‌اند از ایده‌ی مواد خود ترمیم شونده برای مواد مصنوعی در معرض صدمه و به منظور افزایش طول عمر آنها و همچنین کاهش اثراتی که آنها روی زیست محیطی خواهند داشت، استفاده کنند. در کل مواد خود ترمیم شونده به موادی گفته میشود که قادر هستند آسیب مکانیکی وارد شده به خود را به طور کلی و یا جزئی ترمیم کرده و به ویژگیهای ابتدایی خود را بدست آورند. به بیانی دیگر، خود ترمیمی قابلیت از بین بردن آسیب به صورت مستقل و بدون دخالت است. برای روشن تر شدن این موضوع، واژه‌هایی مانند خود ترمیم و یا ترمیم خودمختار به کار میروند. لازم به ذکر است که برای اینکه بتوان ویژگیهای خود ترمیمی را در مواد مصنوعی القا کرد و برای به وجود آوردن تاثیر خود ترمیمی، محرکهایی خارجی باید وجود داشته باشند.

به طوری که گفته شد مواد خود ترمیم شونده به دو دسته درونی و بیرونی دسته بندی میشوند. به این دسته بندی باید مواد خود ترمیم شونده خودگردان و غیر خود گردان را نیز اضافه کرد. در موادی که در دسته خود ترمیم شونده بیرونی قرار میگیرند عاملی شفاف‌بخش به صورت کیوسوله و محصور در ماتریس پلیمری ترکیب میشود که بعد از وارد آمدن صدمه این عامل آزاد شده و فرایند خود ترمیمی شروع میشود. اما، در موادی که در دسته خود ترمیم شونده درونی قرار دارند، پیوندهای شیمیایی قابل برگشتی مانند واکنش دیلز-آلد و سیستمهای مبنی بر رادیکال و برهمکنشهای فوق مولکولی و یا برهمکنشهای یونی، برهمکنشهای فلز-لیگاند و غیره وجود دارند که بعد از آسیب امکان انجام مراحل گوناگون بهبودی و ترمیم را فراهم میکنند. در شکل زیر میتوان شیوه‌های کاری مواد خود ترمیمی بیرونی و درونی را مشاهده کرد.

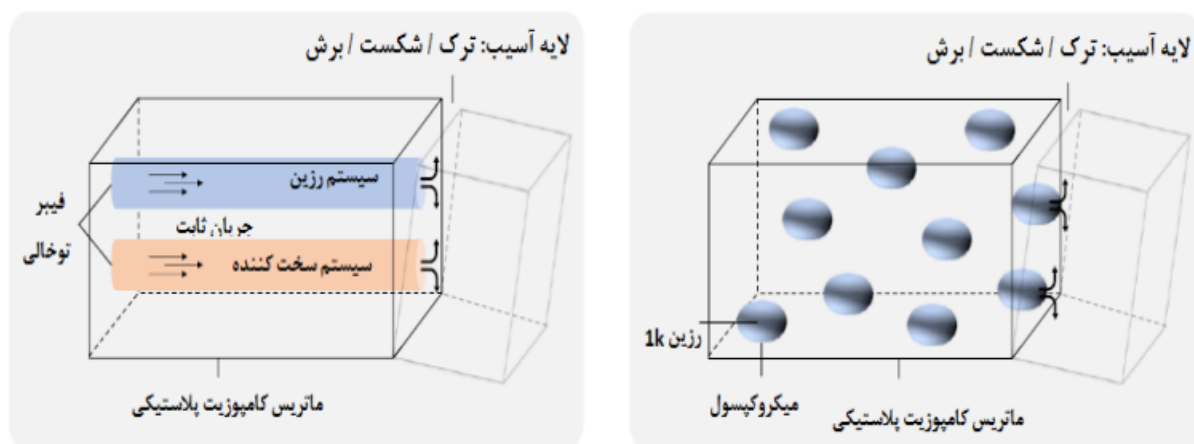


شکل ۱. الف) شیوه های مواد خودترمیم شونده بیرونی، ب) شیوه های مواد خودترمیم شونده درونی

در ادامه به بررسی این شیوه ها با جزئیات بیشتری خواهیم پرداخت.

الف. شیوه های مواد خودترمیمی بیرونی

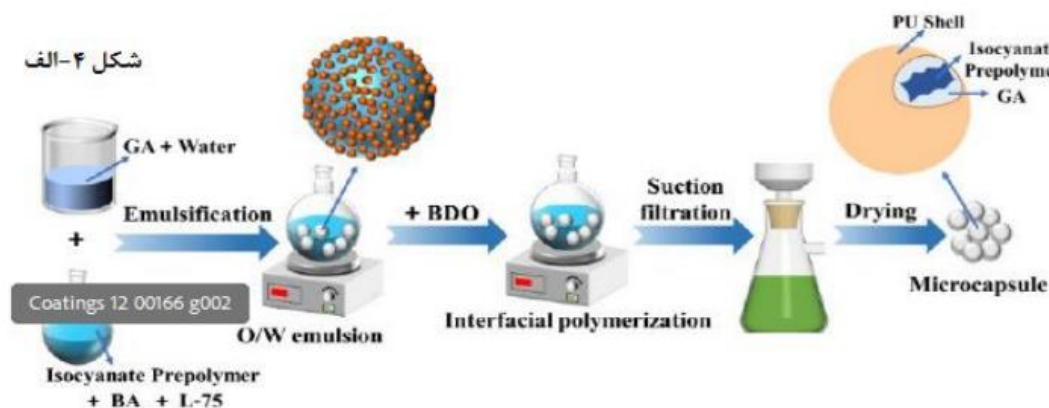
این مواد به وسیله یک عامل شفاعبخش و همچنین یک کاتالیزور کار میکنند که جداگانه از ماتریس ذخیره میشوند. از این روش خودترمیم، سه شیوه متفاوت موجود است. در شکل زیر سازوکار خودترمیمی لوله توخالی براساس میکروسکولار و همچنین میکروکپسولها نمایش داده شده است.



شکل ۲. ساز و کار خودترمیمی الف) لوله توخالی و ب) میکروکپسولها

شیوه های اول شامل سیستم تغذیه ثابت و به دنبال آن ظرفیت مربوط به ترمیم صدمات بزرگ یا گوناگون است. شیوه بعدی که براساس میکروکپسولی با کاتالیزور و عامل شفاعبخش قرار گرفته در ماتریکس است و از اینرو، این مواد نمیتوانند تغذیه ثابتی داشته باشند و تنها صدمات کوچک با این شیوه ترمیم میشوند. از انواع مواد خود ترمیم شونده که از میکروکپسولها استفاده میکنند شامل خودترمیمی مبنی بر میکروکپسول کاتالیزور و خودترمیمی براساس دوتایی/چند کپسولی، خود ترمیم براساس سیستم رویکرد نهفته میکروکپسول و خودترمیمی توسط شیوه کاتالیزورهای کپسولی هستند.

شیانگ و همکارانش موفق به تهیه میکروکپسولهای پیش پلیمر ایزوسیانات با ویژگیهای خودترمیمی شدند که بعنوان ماده اصلی پوششهای محافظ خودترمیم شونده به کار میروند. همچنین، به منظور پلیمریزاسیون سطحی، نوعی سخت کننده پلی اورتان تجاری و همچنین بوتاندیول به عنوان توسعه دهنده زنجیره در محلول امولسیون به کار میروند. محققان دریافتند که پدیده چسبیدگی با اضافه کردن صمغ عربی کمتر شده و همچنین سطح میکروکپسول را از نظر ظاهری با صافتر کردن آن بهبود میدهد. در شکلی که در ادامه آمده است، در بخش الف طرح تهیه ریزپوشانی، در بخش ب سازوکار خودترمیمی میکروکپسول ایزوسیانات پیش پلیمری ارائه شده است.



، سیستم روغن - آب (BA)، بوتیل استات (GA) شکل ۳. الف) سازوکار خودترمیمی میکروکپسولهای پیش پلیمر ایزوسیانات و ب) صمغ عربی (PU) و پلی اورتان (O/W).

پس از وارد شدن آسیب در پوشش، میکروکپسولها شکسته شده و پیش پلیمر ایزوسیانات آزاد میشود و به موجب این امر محلی که ترک خورده است، بهبود یافته و ترمیم خواهد شد.

همه سیستمهای خودترمیم کننده بیرونی بعد از آسیب میتوانند به ویژگیهای اولیه خود برگردند. به طوری که بعد از روی دادن آسیب، واکنشی ماشه‌ای اتفاق میافتد و عامل شفاعش که درون ماتریکس است و یا بصورت کپسوله میباشد به عنوان کاتالیزوری عمل کرده و برهم کنش کرده و ترمیم شروع میشود. درواقع نوین ترین شیوه خود ترمیمی بیرونی از شبکه‌های مزوپور استفاده خواهد کرد. شیوه

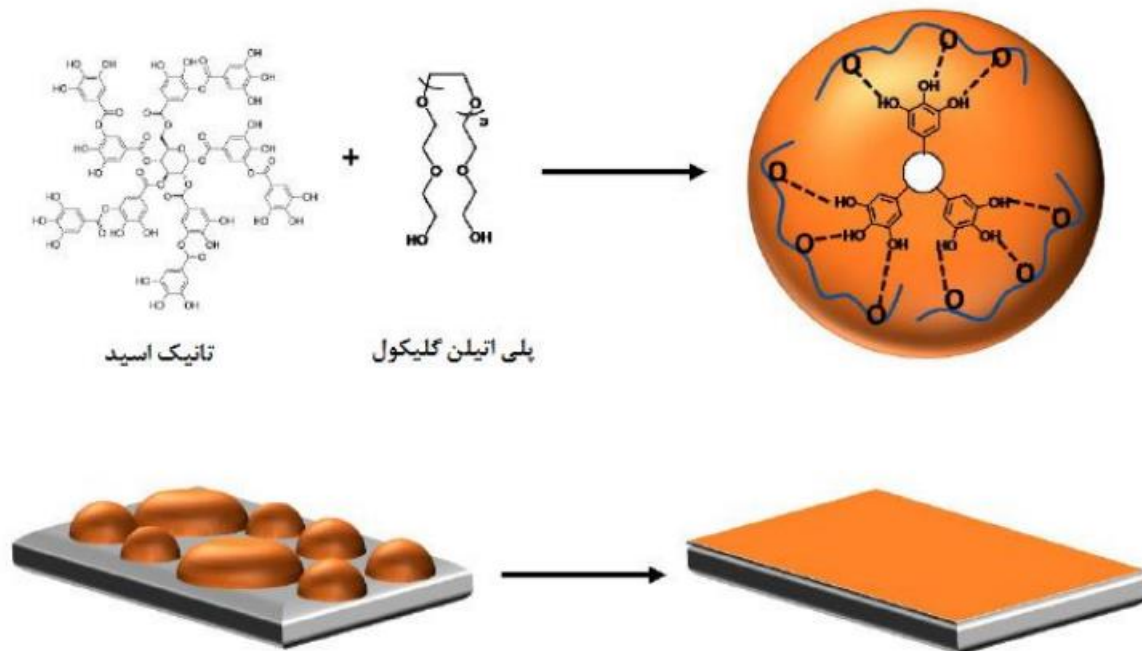
میکرواسکولار بعنوان روشی بهینه از کارکرد لوله توخالی بکار میرود. لوله های توخالی که در ماتریکس ترکیب شده اند به مثابه سیاهرگ موجود در بدن انسان میباشند و تغذیه توانان از عامل التیم بخش ممکن بوده و به موجب آن میتوان مواد را چندین مرتبه تعمیر کرد.

ب. شیوه های مواد خود ترمیمی درونی

در قیاس با شیوه های خودترمیمی بیرونی مستقل نبوده و برای اینکه فرایند ترمیم موادی که به وسیله سیستم های درونی ترمیم میشوند شروع شود، به محرک خارجی نیاز است، در این مواد یکپارچگی به صورت درونی و ذاتی برگردانده میشود. کار این شیوه ها با خواصی است که هرکدام بصورت جداگانه تعریف شده اند. این مواد با شیوه های مذکور این قابلیت را دارند که از طریق خواص فیزیکی و شیمیایی و یا رفتارشان در معرض گرما یا آب کار کنند. سه سیستم معروف در خودترمیمی ذاتی یا درونی وجود دارد که عبارتند از:

- سیستمی مبتنی بر واکنش های قابل برگشت که از جمله واکنش های پر کاربرد میتوان به دیلز-توسکا دیلز-آلدر و رترو-دایلز-آلدر اشاره کرد.
- سیستمی مبتنی بر اینومرها که از جمله واکنش های رایج آنها میتوان به فعل و انفعالات فیزیکی و قابل برگشت حرارتی اشاره کرد.
- سیستمی مبتنی بر سوپرامولکولی که همانند هماهنگی بین فلز و یا پیوند هیدروژنی کار میکنند.

در شکلی که در ادامه میبینید، یک پوشش خودترمیم شونده با آب نشان داده میشود که برای زیرلایه های متفاوت با ترکیب کمپلکس در محیط های آبی مناسب میباشد. (PGA) و پلی اتیلن گلیکول (TA) پیوند هیدروژنی رسوب شده اسید تانیک



و ساخت پوشش TA-PEG شکل ۴. تشکیل کمپلکس های پیوند هیدروژنی

از این شکل مشخص میشود که مجموعه های به وجود آمده به سرعت آزاد شده و توسط پیوندهای هیدروژنی بر روی لایه زیرین ترکیب شده تا به موجب آن پوشش نرم به وجود آید که بتواند ترک های کوچک را در محدوده میکرومتر به صورت مکرر ترمیم کند.

III. کاربرد مواد خود ترمیم شونده

از آنجا که تولیدات انبوه در صنایع نساجی که با مراحل تولید متعدد و افزایش تقاضای مشتریان همراه است، موجب افزایش حجم زیادی از کربن و تولید زباله‌های خطرناکی ناشی از فراوری نساجی میشوند، لذا در زیست محیطی مشکلات و مسائل زیادی به وجود آمده است. ضایعاتی ناشی از صنایع نساجی باعث تخریب محیط زیست و جامعه میشود. از جمله این تأثیرات مخربی که بر زیست محیطی و آب و فرسایش خاک اشاره کرد. به منظور سازگاری با محیط زیست، صنایع مذکور موادی را در این راستا ساخته است و فناوری نانو نیز بر همین امر تأکید دارد. برای مثال، نانو الیاف نانو کامپوزیت با به کار بردن نانو کامپوزیتهایی که با محیط سازگار هستند، و در آن نانو پرکننده‌های متفاوت نانوکربنی و معدنی تقویت میشوند و به دنبال آن مواد نساجی به وجود می‌آیند. در این بین پلی آمید و پلی اتیلن و پلی استر همانند نانولوله‌های کربنی و کربن سیاه، با نانوکربن محصور میشوند و همین باعث ایجاد نانوالیاف میشود. در ساخت منسوجاتی که با محیط زیست سازگاری دارند (مانند منسوجات الکترونیکی، بهبود منسوجات نظامی، ارتباط ضد میکروبی و منسوجات خودترمیم شونده) از نانوکامپوزیتهای پلیمری/نانو کربنی استفاده میشود. از مشخصه‌هایی که حاکی از آینده‌نگری و پایداری صنعت مد و لباس است، ترکیب کارکرد خود ترمیم شونده‌گی در این صنعت است. به عنوان مثال در صنعت جوراب بافی، به این دلیل که جوراب در تماس با جسمی تیز و یا در اثر ساییدگی و استفاده طولانی مدت پاره و سوراخ میشود، لذا روکش یا پوشش غشای خود ترمیم شونده در داخل جوراب استفاده میشود که میتواند باعث کاهش سوراخ شدگی احتمالی جوراب در شرایط حساس شود. به عنوان مثالی دیگر میتوان به این موضوع اشاره کرد که در لباسهای بافتنی، به کار بردن پوشش یا روکشهای خود ترمیم شونده میتواند با کاهش آسیب‌هایی که از باز شدگی ناشی میشود، کیفیت این لباسها را افزایش بدهد. همچنین به غیر از صنعت مد نیز میتوان به این نکته اشاره کرد که میتوان برای افزایش کارکرد درمانی و محافظتی منسوجات پزشکی، از پارچه‌های خود ترمیم شونده در ساخت آنها استفاده کرد.

IV. بحث و نتیجه‌گیری

یکی از فناوریهای نوین که توانایی انقلاب در صنعت نساجی را دارد، منسوجات خود ترمیم شونده هستند. این دسته از منسوجات این قابلیت را دارند که آسیب‌هایی را که به آنها وارد میشود، به طور خودکار ترمیم کنند و همین میتواند باعث افزایش طول عمر آنها و گاهی هزینه‌های مربوط به نگهداری و تعمیر و همچنین بهبود دوام و ایمنی آنها شود. مواد خود ترمیم شونده به دو شیوه بیرونی و درونی دسته بندی میشوند که در شیوه بیرونی، این مواد حاوی عاملی التیام بخش است که در ماتریکهای پلیمری قرار دارد و بعد از بروز صدمه آزاد خواهد شد. در شیوه درونی، مواد مزبور حاوی پیوندی شیمیایی و قابل برگشت است که روی دادن مراحل ترمیم و بهبود بعد از صدمه را ممکن می‌سازد. منسوجات خودترمیم شونده کاربردهای متعددی از جمله در صنعت مد و لباس، منسوجات پزشکی و تجهیزات نظامی و وسایل نقلیه و زیرساختها دارند. با این حال، براساس پیشرفتهای زیادی که در حوزه مواد و فناوریهای خودترمیم شونده روی میدهد، افزایش این کاربردها در آینده دور از انتظار نیست. لازم به ذکر است که هنوز هم در توسعه و گسترش این فناوری چالشهایی وجود دارد که میتوان با غلبه بر آنها این منسوجات را به فناوری‌ای تجاری موفق تبدیل کرد. برخی از این چالشها عبارتند از هزینه تولید این منسوجات، ترمیم و حساسیت به شرایط محیطی.



منابع:

- Balitaan, J. N. I., Hsiao, C. D., Yeh, J. M., & Santiago, K. S. (2020). Innovation inspired by nature: Biocompatible self-healing injectable hydrogels based on modified- β -chitin for wound healing. *International Journal of Biological Macromolecules*, 162, 723-736.
- Cheung, T. W., & Li, L. (2018). Sustainable development of smart textiles: A review of 'selffunctioning' abilities which makes textiles alive. *Journal of Fashion Technology & Textile Engineering*, 4(2), 151-156.
- Cremaldi, J. C., & Bhushan, B. (2018). Bioinspired self-healing materials: lessons from nature. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 9(1), 907-935.
- Dannehl, A., Buhr, A., Leyton, A. S., Hellweg, L., Beer, M., & Sabantina, L. (2023). Self-healing materials for potential use in textile and clothing applications. *Communications in Development and Assembling of Textile Products*, 4(1), 27-41.
- Das, R., Melchior, C., & Karumbaiah, K. M. (2016). Self-healing composites for aerospace applications. In *Advanced composite materials for aerospace engineering* (pp. 333-364). Woodhead Publishing.
- Gadwal, I. (2020). A brief overview on preparation of self-healing polymers and coatings via hydrogen bonding interactions. *Macromol*, 1(1), 18-36.
- Garcia, S. J. (2014). Effect of polymer architecture on the intrinsic self-healing character of polymers. *European Polymer Journal*, 53, 118-125.
- Geitner, R., Kötteritzsch, J., Siegmann, M., Bocklitz, T. W., Hager, M. D., Schubert, U. S., ... & Popp, J. (2015). Two-dimensional Raman correlation spectroscopy reveals molecular structural changes during temperature-induced self-healing in polymers based on the Diels–Alder reaction. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17(35), 22587-22595.
- Ghosh, S. K. (Ed.). (2009). *Self-healing materials: fundamentals, design strategies, and applications* (Vol. 18). Weinheim: Wiley-vch.
- Li, Y., Zhang, D., Li, J., Lu, J., Zhang, X., & Gao, L. (2022). Application of hierarchical bonds for construction an anti-corrosion coating with superior intrinsic self-healing function. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 639, 128388.
- Miyake, S., Nagahama, S., & Sugano, S. (2019). Development of self-healing linear actuator unit using thermoplastic resin. *Advanced Robotics*, 33(23), 1235-1247.
- Ramesh, M., Ramnath, R. A., Khan, A., Khan, A. A. P., & Asiri, A. M. (2020). Electrically conductive self-healing materials: preparation, properties, and applications. In *Self-healing composite materials* (pp. 1-13). Woodhead Publishing.
- Rovira, J., & Domingo, J. L. (2019). Human health risks due to exposure to inorganic and organic chemicals from textiles: A review. *Environmental Research*, 168, 62-69.
- Syduzzaman, M., Hassan, A., Anik, H. R., Akter, M., & Islam, M. R. (2023). Nanotechnology for High-Performance Textiles: A Promising Frontier for Innovation. *ChemNanoMat*, 9(9), e202300205.
- Wen, N., Song, T., Ji, Z., Jiang, D., Wu, Z., Wang, Y., & Guo, Z. (2021). Recent advancements in self-healing materials: Mechanicals, performances and features. *Reactive and Functional Polymers*, 168, 105041.
- Xiang, G., Tu, J., Xu, H., Ji, J., Liang, L., Li, H., ... & Guo, X. (2022). Preparation and self-healing application of isocyanate prepolymer microcapsules. *Coatings*, 12(2), 166.