Review Article

DOI: 10.22034/ijche.2021.265587.1084

DOR: 20.1001.1.17355400.1400.20.117.3.0

A Review of Processing Methods and Modification of Reinforcements Used in Polypropylene Composites

Sh. Mahboubizadeh[1], M. Hasanzadeh[2*], F. Panahi[3], Z. Arzaqi[4]

1- Ph. D. Candidate of Materials Science, Islamic Azad University, Science and Research Branch

2- Assistant Professor of Textile Engineering, Yazd University

3- Ph.D. of Petroleum Engineering, National Iranian Gas Company

4- M. Sc. Student of Materials Science, Islamic Azad University, Science and Research Branch

Email: m.hasanzadeh@yazd.ac.ir

Abstract

The fabrication of polypropylene composites using various types of reinforcements to improve the mechanical properties has received much attention in recent years. In this paper, enhancing the mechanical properties of polypropylene composites by adding different classes of natural and synthetic particle and fiber reinforcements were reviewed. Accordingly, it was found that the fabrication of polypropylene composites leads to an increase either in the strength of samples and corresponding mechanical properties. Moreover, surface modification and processing reinforcements, especially natural fibers via chemical and physical methods were studied. The results show an increase in the adhesion of reinforcements surface inside the polypropylene, which results in strength enhancement and improving the mechanical properties of polypropylene composites. The evidence from this study points towards the idea that the increased use of modified natural fibers in polylropylene composites and those natural or synthetic reinforcements which form hybrid composites provide promising research topics in the future.

Received: 3 January 2021
Accepted: 18 February 2021
Page Number: 36-63

Keywords:
Composite,
Polypropylene,
Surface Modification,
Reinforcement

Please Cite this Article Using:

Mahboubizadeh, Sh., Hasanzadeh, M., Panahi, F., Arzaqi, Z., "A Review of Processing Methods and Modification of Reinforcements Used in Polypropylene Composites", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 20, No. 117, pp. 36-63, In Persian, (2021).

مقـــالـــه مـــروری

DOI: 10.22034/ijche.2021.265587.1084
DOR: 20.1001.1.17355400.1400.20.117.3.0

مروری بر روش‌های عمل‌آوری و اصلاح تقویت‌کننده‌های مورد استفاده در چندسازه‌های زمینه پلی‌پروپیلن

شهرام محبوبی‌زاده[۱]، مهدی حسن‌زاده[۲*]، فریبرز پناهی[۳]، زهرا ارزاقی[۴]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

۲- استادیار مهندسی نساجی، دانشگاه یزد

۳- دکتری مهندسی نفت، شرکت ملی گاز ایران

۴- دانشجوی کارشناسی مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

پیام نگار: m.hasanzadeh@yazd.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر پژوهشگران از ساخت چندسازه‌های پلی‌پروپیلن با استفاده از انواع مختلفی از تقویت‌کننده‌ها برای افزایش خواص مکانیکی آن‌ها استقبال کرده‌اند. در این مقاله، ابتدا چگونگی افزایش خواص مکانیکی چندسازه های پلی پروپیلن در اثر افزودن انواع مختلفی از تقویت‌کننده‌های ذره‌ای و الیافی با منشأهای مصنوعی و طبیعی مرور شده است. در همین راستا مشخص شد که ساخت چندسازه‌های پلی‌پروپیلن باعث افزایش استحکام نمونه‌ها و افزایش خواص مکانیکی آن‌ها می‌شود. سپس راه‌های اصلاح سطحی و عمل‌آوری تقویت‌کننده‌ها و به‌ویژه الیاف طبیعی با روش‌های شیمیایی و فیزیکی مطالعه شده است. نتایج نشان‌دهندهٔ افزایش چسبندگی سطح تقویت‌کننده‌ها در داخل زمینهٔ پلی‌پروپیلن است که منجر به افزایش استحکام و ارتقای خواص مکانیکی چندسازه‌های پلی‌پروپیلن شده است. براساس نتایج این مقاله می‌توان انتظار داشت که با استفادهٔ روزافزون از الیاف طبیعی اصلاح‌شده در چندسازه های پلی‌پروپیلن و افزودن سایر تقویت‌کننده‌های طبیعی یا مصنوعی به آن‌ها که منجر به شکل‌گیری چندسازه‌های هیبریدی می‌شود، بخش زیادی از پژوهش‌های آینده در این راستا متمرکز شود.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۳۰
شماره صفحات: ۳۶ تا ۶۳

کلیدواژه‌ها:
چندسازه،
پلی‌پروپیلن،
اصلاح سطح،
تقویت‌کننده

* یزد، دانشگاه یزد، دانشکدهٔ مهندسی نساجی

استناد به مقاله:
محبوبی‌زاده، ش.، حسن‌زاده، م.، پناهی، ف.، ارزاقی ز.، "مروری بر روش‌های عمل‌آوری و اصلاح تقویت‌کننده‌های مورد استفاده در چندسازه‌های زمینه پلی‌پروپیلن"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیستم، شماره ۱۱۷، صص. ۶۳-۳۶، (۱۴۰۰).

۱. مقدمه

پلی‌الفین‌ها از بسپارهای مهم صنعتی هستند که پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن از مهم‌ترین مواد این گروه به شمار می‌آیند. پلی‌پروپیلن، بسپاری ترموپلاستیک و نیمه‌بلورین است که در صنایع بسیاری کاربرد دارد[۱]. پلی‌پروپیلن دارای برتری‌های متعددی است که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به سمی نبودن، مقاومت شیمیایی خوب و توانایی کارکردن در محیط‌های مرطوب، در دسترس و ارزان‌قیمت بودن اشاره کرد که به‌دلیل وجود این برتری‌ها در صنایع گوناگونی نظیر صنعت بسته‌بندی مواد غذایی، صنعت ساخت قطعات خودرو، لوازم خانگی و ابزارهای الکتریکی استفاده می‌شود[۴-۲]. با این حال استفاده از پلی‌پروپیلن خالص در ساخت قطعات گوناگون صنعتی به‌دلایل متعددی مرسوم نیست که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از خواص مکانیکی، استحکام کششی و مقاومت به ضربهٔ ضعیف و نرخ نسبتاً بالای انقباض در حین سردشدن در کنار کاهش پایداری در اثر زمان[۶-۵]. یکی از راه حل‌های غلبه بر این مشکل، ساخت چندسازه است. به‌طور کلی، چندسازه‌ها دسته‌ای از موادند که از آمیختن دو یا چند ماده ساخته می‌شوند. چندسازه‌های پایه‌بسپاری یکی از انواع مواد چندسازه‌ای است که در تمامی آنان، فاز پیوسته که به‌عنوان زمینه مطرح است، بسپاری است و تقویت‌کننده‌های متفاوت از قبیل مواد سرامیکی، فلزی و یا بسپاری قابلیت افزوده‌شدن در ساختار زمینهٔ آن را دارند. در این راستا می‌توان گفت که خواص یک چندسازه، شامل میانگینی از خواص فازهای تشکیل دهندهٔ آن است[۷]. در فرایند ساخت چندسازه با زمینهٔ پلی‌پروپیلن می‌توان با افزودن ذرات، الیاف و یا اعمال ذرات دوبعدی شکل و پولکی به زمینهٔ پلی‌پروپیلن، چندسازه‌ای با خواص بسیار مطلوب مکانیکی، گرمایی، فیزیکی و شیمیایی به‌وجود آورد. در این فرایند مواد طبیعی و مصنوعی گوناگونی می‌توانند به‌عنوان تقویت‌کننده به فاز زمینهٔ پلی‌پروپیلنی افزوده شوند[۸].

در سال‌های اخیر استفاده از این دسته چندسازه‌ها و به‌خصوص چندسازه‌های ترموپلاستیکی که پلی‌پروپیلن نیز یکی از آنان است، افزایش پیدا کرده و علاقهٔ پژوهشگران بسیاری را به خود جلب کرده است؛ به‌طوری‌که تحقیقات زیادی برای ساخت این گونه چندسازه‌ها انجام شده و اختلاط بسپارها با تقویت‌کننده‌های متعدد و مخصوصاً با افزودن الیاف مختلف، گسترهٔ وسیعی از چندسازه‌های دارای خواص و کاربردهای گوناگون را ایجاد کرده است[۹]. در این میان، پژوهشگران مجموعهٔ وسیعی از مواد را با منشأ گوناگون طبیعی و مصنوعی و یا با شکل‌های مختلفی از جمله الیاف و نانولوله، ذرات و ساختارهای پولکی شکل، به‌عنوان تقویت‌کننده، در ساخت چندسازه‌های بسپاری و از جمله پلی‌پروپیلن، بررسی کرده‌اند؛ به‌دلیل تنوع بالای پژوهش‌ها بر روی اثر بخشی ذرات تقویت‌کننده بر خواص مکانیکی این نوع از چندسازه‌ها و بررسی‌های فراوان در مورد نقش اصلاح سطحی[۱] و عمل‌آوری‌های شیمیایی در افزایش خواص استحکامی تقویت‌کننده‌ها و به‌خصوص الیاف و مواد طبیعی با منشأ گیاهی، نگارش مقاله‌ای جامع که به بررسی پیشرفت‌های اخیر در ساخت چندسازه‌های پلی‌پروپیلنی بپردازد، و علاوه بر دسته‌بندی انواع تقویت‌کننده‌های افزوده شده به زمینهٔ پلی‌پروپیلن، نقش عمل‌آوری و اصلاح‌کننده‌های سطحی را نیز مطالعه کند، ضرورت دارد؛ لذا در تحقیق پیش رو، مطالعه بر روی پژوهش‌های محققان گوناگون، به دو بخش تقسیم شد؛ در بخش اول به معرفی و بررسی تقویت‌کننده‌های طبیعی و در بخش دوم به تقویت‌کننده‌های مصنوعی و همنهشتی استفاده شونده در چندسازه‌های زمینهٔ پلی‌پروپیلن پرداخته شده است. در قدم بعدی تأثیر هر کدام از افزودنی‌ها بر روی خواص مکانیکی و استحکام نمونه‌های ساخته شده، بررسی و راه‌های افزایش استحکام مکانیکی آن‌ها مطالعه شد. در پایان نیز به بررسی نقش عمل‌آوری و اصلاح سطحی الیاف بر روی خواص مکانیکی پرداخته شده است.

۲. اثر افزودنی‌ها بر خواص مکانیکی

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، پلی‌پروپیلن‌ها نوعی از مواد بسپاری ترموپلاستیک هستند که خواص مکانیکی مطلوبی نسبت به سایر مواد بسپاری ترموپلاستیک دارند و قابل استفاده در ساخت چندسازه و نیز به‌عنوان بستر بسپاری مناسب برای افزودن تقویت‌کننده‌های گوناگون هستند. در جدول (۱) به خواص مکانیکی برخی از بسپارهای ترموپلاستیک اشاره شده است.

۱.. به تغییر ویژگی‌های سطح یک ماده با هدف تأثیر گذاشتن بر خواص مختلف مورد نظر، اصلاح سطح گفته می‌شود.

جدول ۱. خواص مکانیکی برخی از بسپارهای ترموپلاستیک[۱۰].

Table 1. Mechanical properties of some thermoplastic polymers [10].

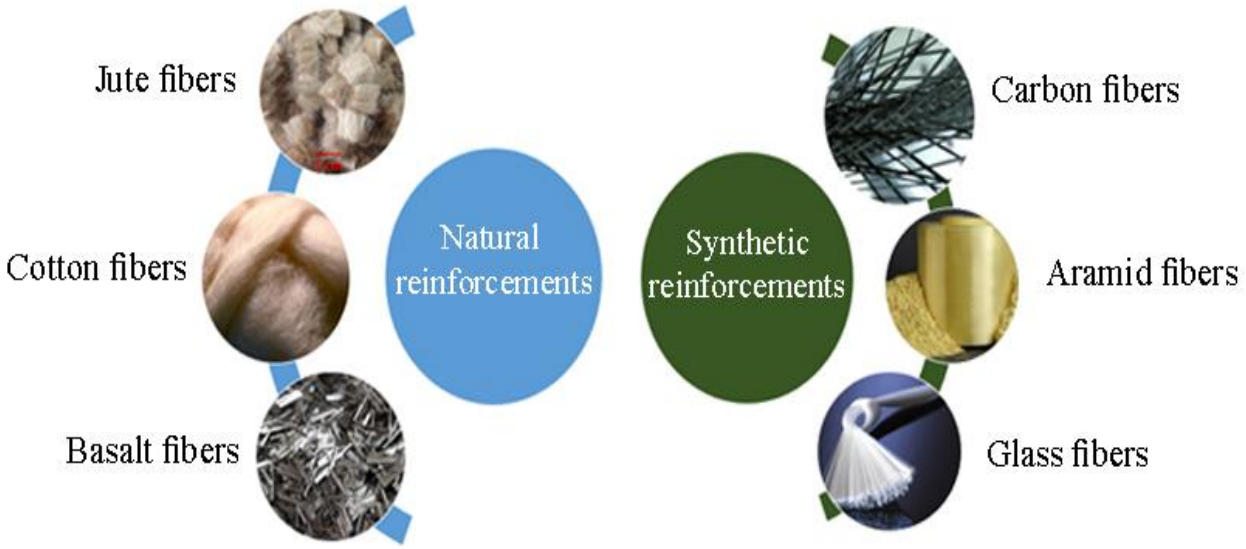
Composite	density (g/cm^3)	melting point (°C)	Mechanical properties		
			Elongation at break (٪)	Young modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)
polypropylene (PP)	0.91-0.90	175	50-145	1.1-1.6	20-40
polyethylene (PE)	0.95-0.91	115	450-1300	0.3-0.5	25-45
polyvinyl chloride (PVC)	1.38	212	25-58	3	38-53
polystyrene (PS)	1.05-1.04	240	---	2.5-3.5	35-60
High density poly propylene	0.97-0.94	137	---	0.5-1.1	30-40

خواص مکانیکی مواد و قطعات چندسازه‌ای، مهم‌ترین خواص مطالعه‌شده در بیشتر پژوهش‌هایچندسازه‌هاست که نشان‌دهندهٔ اهمیت این ویژگی در کاربردهای صنعتی مختلفی است که چندسازه‌ها در آن‌ها استفاده می‌شوند. به‌طور کلی، چندسازه‌های بسپاری به‌علت وزن پایینی که دارند توجه بسیاری از محققان و صنعتگران را جلب کرده‌اند؛ با این حال نداشتن استحکام مکانیکی مناسب از جمله استحکام تسلیم، مقاوت خمشی، مدول کشسانی مناسب و یا مقاومت سایشی و مقاومت ساختاری مناسب در محیط‌های دما بالا، محدودیت‌های بسیاری در استفاده از آن‌ها در شرایط کاربردی متفاوت ایجاد می‌کند. از این رو اغلب پژوهشگران سعی دارند تا با اعمال تغییرات و مهندسی در نحوهٔ ساخت و عوامل سازندهٔ چندسازه‌ها مانند تغییر و افزایش میزان تقویت‌کننده‌های افزوده‌شده به زمینهٔ چندسازه، خواص مکانیکی این دسته از مواد را افزایش دهند، سپس با انجام آزمایش‌های گوناگونی همچون آزمون کشش، سختی، خمش و سایش به چگونگی افزایش کیفیت خواص مکانیکی دست پیدا کنند[۱۴-۱۱]. در همین راستا برخی از مواد تقویت‌کنندهٔ استفاده شده در بخشی از پژوهش‌های اخیر در جدول (۲) درج شده است. در شکل (۱) تصاویری از الیاف طبیعی و مصنوعی به‌کار رفته در چندسازه‌های پلی‌پروپیلن نشان داده شده است. در ادامه با بررسی تحقیقات پیشین، میزان افزایش استحکام و خواص مکانیکی چندسازه‌های زمینه پلی‌پروپیلن به همراه روش‌های به‌کار رفته برای افزایش خواص مطرح شدهٔ آن‌ها مطالعه شده است.

جدول ۲. مواد تقویت‌کنندهٔ طبیعی و مصنوعی استفاده‌شده در چندسازه‌های پایه پلی‌پروپیلن[۲۴-۱۵].

Table 2. Natural and synthetic reinforcements for application in polypropylene-based composites [15-24].

Reinforcements	Shape	Examples
Natural reinforcements	Fibers	Sugarcane fiber, sisal fiber, coconut fiber, flax fiber, wood fiber, basalt fiber
	Particles	Kaolin, calcium carbonate, montmorillonite, talc
Synthetic reinforcements	Fibers	Carbon fiber, glass fiber
	Carbon	Graphene, carbon nanotubes
	Nanoparticles	Aerogel, silica nanoparticles, metal oxides, metal nitrides



شکل ۱. تصاویر الیاف گوناگون استفاده‌شده در چندسازه‌های زمینه پلی‌پروپیلن.

Figure 1. Different fibers used in polypropylene-based composites.

همان‌طور که در بالا نیز به آن اشاره شد، تقویت‌کننده‌های به کار رفته در این گونه چندسازه‌ها به دو بخش تقسیم می‌شوند که دستهٔ اول الیاف و ذرات همنهشت شده است که شامل الیاف کربن، الیاف شیشه، نانو لوله‌های کربنی و غیره است و دستهٔ دوم متعلق به الیاف و ذرات طبیعی[1] است که به‌تازگی با استقبال پژوهشگران مواجه شده و شامل الیاف پوستهٔ گیاهان و درختانی هم‌چون کتان، شاهدانه، کنف و غیره است[۲۸-۲۵]. برتری‌های تقویت‌کننده‌های طبیعی از جمله الیاف طبیعی نسبت به تقویت‌کننده‌های مصنوعی سازگاری مناسب با محیط زیست و قابلیت بازیافت در کنار قیمت ارزان است. به‌طور مثال، خواص مکانیکی الیاف طبیعی نظیر کتان، کنف و سیسال بسیار مناسب و در مقایسه با الیاف شیشه دارای خصوصیات مشابه است[۳۲-۲۹] که با استفاده از این نوع تقویت‌کننده در ساخت چندسازه‌های استفاده‌شونده در صنایع گوناگون مانند برخی قطعات خودرو، صرفه‌های اقتصادی مناسبی به‌وجود می‌آید. در این راستا الیاف طبیعی شامل ترکیباتی چون سلولز، همی‌سلولز، لیگنین، موم و سایر موادی هستند که بیشتر آن‌ها به‌جز سلولز قابلیت حل‌شدن در آب را دارند [۳۵-۳۳]. در جدول (۳) به بررسی برخی از الیاف تقویت‌کنندهٔ استفاده‌شده در چندسازه‌های پایه بسپاری اشاره شده است.

در ادامه به بررسی برخی از تحقیقات متمرکز بر خواص مکانیکی نمونه‌های ساخته‌شده در اثر افزودن ذرات تقویت‌کننده به زمینهٔ پلی‌پروپیلنی پرداخته شده است.

۲-۱ افزودن تقویت‌کننده‌های طبیعی

چنان‌که گذشت، الیاف و ذرات طبیعی به کار رفته در چندسازه‌های پلی‌پروپیلن، دارای برتری‌های گوناگونی است که علاقهٔ پژوهشگران بسیاری را در سراسر جهان، به خود جلب کرده است؛ اما این‌گونه الیاف، به‌دلیل نداشتن ترشوندگی مناسب نیازمند اصلاح سطح هستند و پس از این عملیات، به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده می‌شوند و خواص مکانیکی و سایر مشخصه‌های آنان بررسی می‌شود. در همین راستا اثر افزودن نانوذرات رس (مونت موریلونیت) بر روی چندسازه‌های پایه بسپاری را آربلایز[2] و همکاران[۵۲] بررسی کردند. در این پژوهش از طیف وسیعی از مونت موریلونیت‌های تجاری مانند ذرات اصلاح‌شدهٔ سطحی و اصلاح‌نشده استفاده شد. در این راستا تنها نمونه‌های حاوی ذرات اصلاح‌شده با اصلاح‌کننده‌های طبیعی توانستند خواص مکانیکی بهتری از خودشان به نمایش بگذارند. هم‌چنین با افزودن ۵ درصد وزنی از اصلاح‌کننده‌های طبیعی به نمونه‌های چندسازه‌ای در حال ساخت، مقادیر مدول کشسانی و استحکام نمونه به‌ترتیب ۸۷۱ و ۲۹/۳ مگاپاسکال به‌دست آمد که

1. Organic

2. Arbelaiz

این مقادیر به ترتیب در حدود ۲۳ و ۴/۶ درصد نسبت به مقادیر به‌دست‌آمده در نمونه های پلی پروپیلن خالص افزایش داشته است. در تحقیق دیگری ونگ[1] و همکاران[۵۳]، خواص مکانیکی به‌همراه خاصیت مقاومت در برابر آتش و پایداری حرارتی چندسازهٔ پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با الیاف بازالت را بررسی کردند. از نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که با افزایش مقدار الیاف بازالت در فاز زمینه، شاهد افزایش سختی، سفتی و استحکام کششی در کنار کاهش درصد تغییر طول شکست نمونه‌ها بوده‌اند. در جدول (۴) خواص اندازه‌گیری شدهٔ نمونه‌های چندسازه‌ای ساخته شده قرار گرفته است.

جدول ۳. بررسی ویژگی‌های الیاف طبیعی و همنهشت‌شدهٔ متداول.

Table 3. Characteristics of some common natural and synthetic fibers.

Reinforcing fibers	density (g/m^3)	Young modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Ref.
Glass fibers E series	2.5	70	2000-3500	2.5-3	[36-39]
Glass fibers S series	2.5	86	4570	2.8	[36,40]
Carbon	1.4	230-240	4000	1.4-1.8	[41,42]
Aramid(Kevlar)	1.4	63.67	3000-3150	3.3-3.7	[39]
Sisal	1.33-1.5	9-38	400-700	2-14	[39]
Cotton	1.5-1.6	5.5-12.6	287-597	3-10	[39,40]
Kenaf	1.3-1.46	1.-30	393-800	1.5-1.8	[39,43,44]
Jute	1.4-1.5	27.6-80	345-1500	1.2-3.2	[39-45]
Coconut	1.2	4-6	175-220	15-30	[46]
Hemp	1.4	70	550-900	1.6	[39,47]
Basalt	2.8	40-89	872-2800	3.15	]48-50[
Nylon	1.3-1.45	5.5-5.17	400-800	15-30	[44,51]

جدول ۴. مؤلفه‌های مکانیکی به‌دست‌آمده از نمونه‌های چندسازه‌ای پایه پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با الیاف بازالت[۵۳].

Table 4. Mechanical parameters obtained from basalt fiber reinforced polypropylene-based composite samples [53].

Mechanical properties	Poly propylene	PP composite with 10 wt.% basalt fiber	Variation	PP composite with 20wt.% basalt fiber	Variation
Tensile strength (MPa)	12	18.79	56.6	22.91	90.8
Young modulus (GPa)	1.3	4.23	225	5.40	315
Yield strenght (MPa)	16.2	16.56	6.3	20.47	26.3
Elongation (%)	85	2.70	-96.8	1.23	-96.8

1. Wang

در پژوهشی دیگر تأثیر مقادیر گوناگون تالک را (با فرمول $3MgO.4SiO_2.H_2O$) بر چندسازه‌های زمینه پلی‌پروپیلن سوئتلیکی[1] و همکاران[۵۴] بررسی کردند و نمونه‌ها را از نظر مدول کشسانی، سختی، سایش و ساختار ارزیابی کردند. مقادیر گوناگونی از تالک به‌عنوان تقویت‌کنندهٔ فاز زمینه استفاده شد (از ۰ تا ۲۵ درصد وزنی). در این پژوهش، محققان دریافتند که با افزایش مقدار تالک در نمونه‌های چندسازهٔ ساخته شده، میزان سختی و مدول کشسانی افزایش می‌یابد. نکتهٔ قابل توجه دیگر این پژوهش، نقش اختلاط هموژن تقویت‌کننده‌ها در هنگام افزودن به ساختار زمینه است که منجر به ارتقای خواص مکانیکی چندسازه شده است. در تحقیقی دیگر کاستیلو[2] و همکاران[۵۵] اثر افزودن مقادیر مختلف تالک را به‌عنوان تقویت‌کنندهٔ چندسازه‌های زمینه پلی‌پروپیلنی بررسی کرده‌اند. در این پژوهش ذرات تقویت‌کنندهٔ تالک با دو ریخت‌شناسی مختلف ماکرو و میکروبلورین بررسی شد. نمونهٔ چندسازه‌ای با مقادیر ۱ تا ۵ درصد وزنی تالک به‌همراه یک نمونهٔ پلی‌پروپیلن خالص تهیه و در بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های مورد آزمایش مشخص شد که رفتار کششی چندسازه وابستگی معناداری به ریخت‌شناسی تالک دارد. در نمونه‌های حاوی ذرات تالک ماکروبلورین، خواص استحکام کششی و ضربه‌پذیری نسبت به ذرات تالک میکروبلوری، بسیار بهتر بوده است. یوسف‌زاده و همکاران[۵۶] در پژوهشی به بررسی چندسازهٔ تولیدشده با الیاف طبیعی باگاس/ نیشکر پرداختند. باگاس نیشکر یکی از فراوان‌ترین الیاف طبیعی است که به‌عنوان پسماند کارخانه‌های نیشکر مطرح بوده و در صورت استفاده از آن در ساختار چندسازه‌ها از منظر اقتصادی بسیار به صرفه خواهد بود. علاوه بر این به‌علت سازگاری مناسب با محیط زیست و خواص مکانیکی مطلوب مورد توجه پژوهشگران فراوانی قرار گرفته است. در این پژوهش، الیاف باگاس به‌صورت پودر خشک درآمد و با درصدهای مختلف وزنی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ به پلی‌پروپیلن افزوده شد. سپس نمونه‌های تهیه‌شده، تحت آزمون کشش و آزمون ضربه قرار گرفتند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که با افزایش میزان باگاس به‌عنوان تقویت‌کننده تا ۴۰ درصد وزنی، استحکام مکانیکی چندسازه افزایش پیدا می‌کند؛ اما با افزودن بیش از این و مقادیر بالای ۳۰ درصد وزنی مقاومت به ضربه و کرنش شکست کاهش می‌یابد. این مسأله به‌علت تغییر سازوکار شکست نمونه از حالت شکست الیاف به حالت بیرون کشیده‌شدن الیاف از داخل زمینه (Pull Out) مربوط است که این امر از نبود اتصال و پیوند مناسب بین تقویت‌کننده و زمینه نشأت می‌گیرد.

۲-۲ افزودن تقویت‌کننده‌های مصنوعی

به‌طور کلی رفتار مکانیکی چندسازه‌های پلی‌پروپیلن با تقویت‌کننده‌های مصنوعی، تفاوت محسوسی با نمونه‌های حاوی تقویت‌کننده‌های طبیعی ندارد و در این دسته از چندسازه‌ها نیز، مبحث استفاده از اصلاح‌کننده‌های سطحی به چشم می‌خورد. در ادامه به بررسی تعدادی از پژوهش‌های متمرکز بر روی چندسازه‌های پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با افزودنی‌های همنهشت‌شده و مصنوعی می‌پردازیم. به‌طور مثال در پژوهشی، چندسازهٔ پایه پلی‌پروپیلنی را با افزودن نانو ذرات سیلیکا اواد[3] و همکارن[۵۷] تهیه و مقادیر تقویت‌کننده را برای افزودن به ساختار و تهیهٔ نمونه‌ها، ۵، ۷ و ۱۰ درصد وزنی تعیین کردند. پس از بررسی ساختار چندسازهٔ مورد نظر به‌وسیلهٔ طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR) مشخص شد که واکنش بسیار مطلوبی بین فاز زمینه و ذرات تقویت‌کننده شکل گرفته است. در حالت کلی با افزودن نانو ذرات سیلیکا به ساختار زمینهٔ بسپاری، شاهد افزایش خواص مکانیکی و حرارتی نمونه‌ها بوده‌ایم که بیشترین استحکام کششی، مدول کشسانی و کرنش شکست در نمونهٔ ۱۰ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا به‌دست آمد. در پژوهشی دیگر، ذوالفقاری[4] و همکاران[۵۸]، مقادیر مختلف آیروژل سیلیکایی را به داخل فاز زمینهٔ پلی‌پروپیلن افزوده و به بررسی خواص مکانیکی آن مانند مدول کشسانی، درصد ازدیاد طول تا نقطهٔ شکست، استحکام کششی و سایر آزمون‌ها مانند تست ضربه به روش آیزود، آزمون سختی و مقاومت سایشی پرداختند. مشاهده کردند که در مقادیر ۱ تا ۳ درصد وزنی، پخش همگن ذرات در زمینه به خوبی انجام شده و افزایش خواص در اثر اضافه کردن تقویت‌کننده در مقادیر تا ۳ درصد وزنی ناچیز بوده و با بالاتر رفتن مقادیر تقویت‌کننده در درصدهای وزنی بیش از ۳، شاهد افزایش تجمع ذرات و مشکلات ناشی از آن بوده‌اند که خواص نمونه‌ها را

1. Świetlicki
2. Castillo
3. Awad
4. Zolfaghari

تحت تأثیر منفی قرار داده است. همین امر منجر به کاهش استحکام کششی و مقاومت به ضربه شد؛ اما سختی و مقاومت سایشی در اثر افزایش میزان تقویت‌کننده در فاز زمینه، افزایش یافت. در جدول (۵) به بررسی پاسخ آزمون‌های گرفته شده از نمونه‌های چندسازه‌ای پرداخته شده است.

کردانی[1] و همکاران[۵۹] با استفاده از نانو لولهٔ کربنی تک‌دیواره و افزودن آن در ساختار زمینهٔ پلی‌پروپیلن و ساخت چندسازه، به بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها پرداختند که در این بررسی‌ها خواص مکانیکی و حرارتی چندسازه‌ها در اثر افزایش میزان تقویت‌کننده به فاز زمینهٔ بسپاری افزایش پیدا کرد. در همین راستا، مدول کشسانی و استحکام کششی نمونه‌ها در بیشترین مقدار تقویت‌کننده، به‌ترتیب ۸۲ و ۲۷ درصد افزایش پیدا کرده است. ژو[2] و همکاران[۶۰] نیز به بررسی خواص چندسازه‌های پلی‌پروپیلن و نانولوله‌های کربنی چندلایه پرداختند. در این پژوهش نیز مانند سایر پژوهش‌ها به نحوهٔ اختلاط همگن نانولوله‌های کربنی در داخل زمینه اشاره شده که پخش همگن این ذرات با افزایش مقدار آنان دچار پیچیدگی‌های متعددی می‌شود. در همین راستا، خواص مکانیکی نمونه‌ها نشان داد که با افزایش میزان نانولوله‌های کربنی از ۳ wt.% تا ۷ wt.%، سختی و مدول کشسان چندسازه‌ها افزایش یافته و در نمونه‌های دارای مقادیر بیشتر تقویت‌کننده، خواص مکانیکی با کاهش روبرو شده که می‌توان آن را ناشی از توزیع و پخش نامناسب ذرات تقویت‌کننده در داخل زمینه دانست. کیس[3] و همکاران[۶۱] در بررسی اثر اصلاح سطح الیاف به‌وسیلهٔ اصلاح‌کننده‌های شیمیایی سطحی نظیر مالئیک، نمونه‌هایی با ۵۰ درصد حجمی الیاف شیشه ساختند و برای بررسی چسبندگی الیاف در داخل زمینه آزمون خمش سه‌نقطه‌ای گرفتند. استحکام خمشی نمونه‌ای با ۵۳ درصد حجمی شیشه و ۰/۱ درصد وزنی اصلاح‌کنندهٔ سطحی، ۴۵۰ Mpa و مدول کشسانی آن ۲۱ Gpa تعیین شد. نوبه[4] و همکاران[۶۲] به بررسی ساخت چندسازه‌های بر پایهٔ پلی‌پروپیلن پرداختند که در آن، الیاف کربن به‌عنوان تقویت‌کننده و از فوم پلی‌پروپیلن استفاده شد. مشاهده شد که مدول خمشی و مقاومت ضربه‌ای شارپی قطعات، با افزایش درصد وزنی الیاف کربن به زمینهٔ بسپاری افزایش می‌یابد. مقادیر به‌دست‌آمده برای دو معیار ذکر شده در نهایت به‌ترتیب ۱۴ Gpa (g/cm^3) و ۶/۲ Kj/m^2 شده است. ونگ[5] و همکاران[۶۳] نیز مقادیر متفاوتی از الیاف شیشه را به‌همراه مقادیر گوناگون سازگارکننده برای ساخت چندسازه‌های پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با الیاف استفاده کردند. در این مطالعه از نمونه‌های ساخته‌شده،

جدول ۵. بررسی مؤلفه‌های مختلف مکانیکی به‌دست‌آمده از نمونه‌های چندسازه‌ای پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با ذرات آئروژل[۵۸].

Table 5. Investigation of various mechanical parameters obtained from polypropylene composite reinforced with aerogel particles [58].

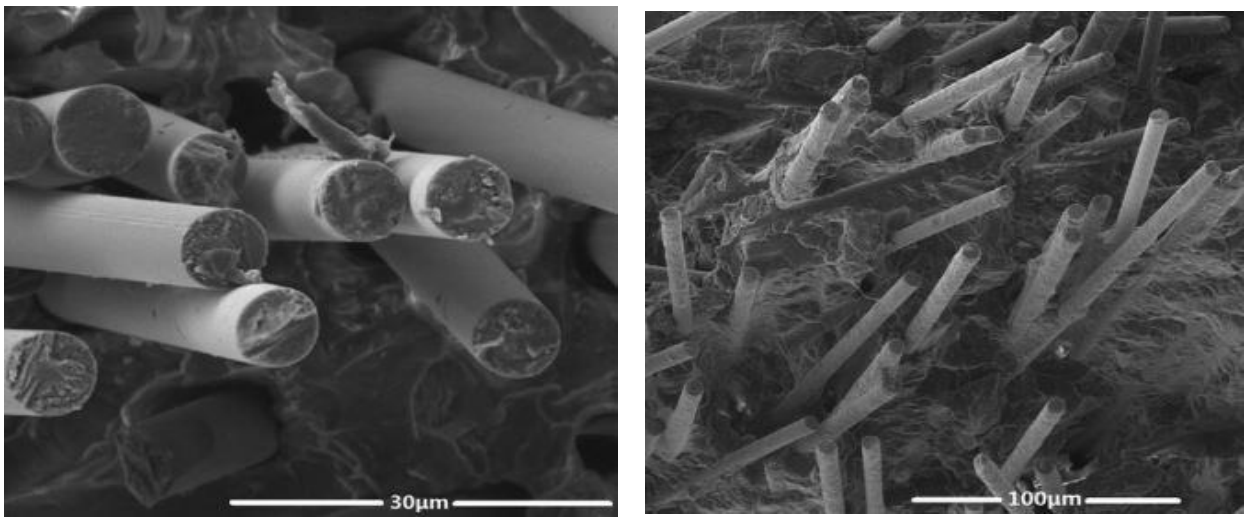
Sample	Tensile strength (MPa)	Young modulus (GPa)	Elongation (%)	Stress at break (MPa)
Neat PP composite	28.4	2.35	34.18	23.55
PP composite with 1wt.% aerogel	29.3	2.4	11.75	21.86
PP composite with 3wt.% aerogel	28.17	2.7	7.91	21.13
PP composite with 5wt.% aerogel	22.53	2.9	4.11	18.14
PP composite with 7wt.% aerogel	22.18	4.7	3.19	15.39

1. Kordani 2. Zhou 3. Kiss 4. Nobe 5. Wang

آزمون کشش و خمش گرفته شد و استحکام کششی، خمشی و مدول خمش نمونه‌ها بررسی و مشاهده شد که با افزودن الیاف شیشهٔ اصلاح‌شده به چندسازهٔ مورد نظر، هر سه مؤلفهٔ خواص مکانیکی افزایش یافت، به‌طوری که استحکام کششی در بالاترین میزان خود به ۴۳/۸ Mpa رسید که نسبت به نمونه‌های حاوی پلی‌پروپیلن خالص ۷۶/۶٪ افزایش را نشان می‌دهد. بررسی اثر اندازهٔ طولی و میزان الیاف کربن افزوده‌شده در چندسازه‌های زمینه پلی‌پروپیلنی در مطالعهٔ آنتروگر[1] و همکاران[۶۴]، نشان داد که میزان درصد حجمی الیاف کربن استفاده‌شده به‌عنوان تقویت‌کننده ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد حجمی بوده است. نمونه‌های ساخته‌شده از نظر مقاومت به ضربه و استحکام کششی بررسی شدند که در اثر افزودن مقادیر بیشتری از الیاف کربن به ساختار زمینهٔ بسپاری، شاهد افزایش استحکام کششی، مدول کشسانی و مقاومت ضربه‌ای بوده که در مقدار ۱۵ درصد وزنی الیاف کربن، استحکام تسلیم و مدول کششی به ترتیب، ۹۸ Mpa و ۱۴/۴ Gpa بوده است. برای درک بهتر از نحوهٔ قرارگیری الیاف در زمینهٔ بسپاری، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نمونهٔ چندسازهٔ بسپاری حاوی الیاف کربن در شکل (۲) نشان داده شده است.

۲-۳ خواص مکانیکی چندسازه‌های هیبریدی زمینه پلی‌پروپیلنی

چندسازه‌های هیبریدی نوعی از چندسازه‌های جدید هستند که در آن‌ها می‌توان انواع مختلفی از چند زمینه و یا تقویت‌کننده‌ها را به‌طور همزمان استفاده کرد؛ به این صورت که می‌توان یک چندسازهٔ متشکل از یک زمینه را به‌همراه چند تقویت‌کننده و یا چند زمینه به‌همراه یک تقویت‌کننده ایجاد کرد[۶۶-۶۵]. بخشی از پژوهش‌های اخیر محققان، به ساخت چندسازه‌های هیبریدی پایه پلی‌پروپیلن متمرکز شده که یکی از اجزای تقویت‌کنندهٔ آن‌ها، به‌طور کلی، منشأ طبیعی دارد و به‌وسیلهٔ تقویت‌کنندهٔ دیگری که می‌تواند جزو مواد همنهشت‌شده و یا طبیعی باشد، به‌طور همزمان در ساخت چندسازه استفاده می‌گردند. در ادامه تعدادی از این پژوهش‌ها بررسی شده است. روحانی و همکاران[۶۷] در پژوهشی به بررسی چندسازه‌های بسپاری با زمینهٔ پلی‌پروپیلن و الیاف شیشهٔ نوع E به همراه الیاف باگاس (نیشکر) پرداختند. این محققان نمونه‌هایی با میزان متفاوتی از تقویت‌کننده‌ها ساختند که درصد وزنی زمینه و تقویت‌کننده‌ها در جدول (۶) ارائه شده است.



شکل ۲. تصویر SEM چندسازهٔ پایه بسپاری حاوی الیاف کربن[۶۴].

Figure 2. SEM image of polymer-based composite containing carbon fibers [64].

1. Unterweger

جدول ۶. درصد وزنی اجزای تشکیل‌دهندهٔ نمونه‌های چندسازه‌ای تهیه‌شده[۶۷].

Table 6. Weight percent of the components of fabricated composite specimens [67].

Sample No.	Weight percent of components (%)			
	Poly propylene (PP)	Glass fiber	Bagasse	Compatibilizer
1	100	-	-	0
2	57	-	40	3
3		5	35	3
4		10	30	3
5		15	25	3

از نمونه‌های تهیه‌شده، آزمون گرماسنجی روبشی افتراقی (DSC) و آزمون مکانیکی دینامیکی (DMA) مطابق استاندارد ASTM E1640 به‌عمل آمد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که با افزودن الیاف باگاس و شیشه، دمای ذوب چندسازه‌های هیبریدی افزایش یافت؛ که این مسأله را باید به نارسانای حرارتی بودن الیاف شیشه مرتبط دانست. افزایش دمای بلورینگی و درجهٔ بلورینگی چندسازه‌ها ناشی از افزایش الیاف باگاس و شیشه است که الیاف تقویت‌کنندهٔ مورد بررسی باعث ایجاد بستری مناسب برای تشکیل جوانه‌های بلورینه می‌شود و به تبلور فاز زمینه کمک می‌کند. در نهایت افزودن این نوع از الیاف منجر به افزایش خواص مکانیکی و حرارتی نمونه‌های چندسازه‌ای تهیه‌شده می‌شود. یگانه و همکاران[۶۸] نیز به بررسی چندسازهٔ هیبریدی با زمینهٔ پلی‌پروپیلن که با استفاده از تقویت‌کننده‌های نانو ذرات خاک رس (کلوزیت 15A) و ذرات لاستیک ضایعاتی به‌روش اختلاط در حالت مذاب تهیه شده بودند، پرداختند. برای بررسی خواص مکانیکی، نمونه‌های ساخته‌شده تحت آزمون کشش قرار گرفتند تا در این راستا چقرمگی و استحکام آن‌ها بررسی شود. در این پژوهش با افزودن درصد مناسبی از تقویت‌کننده‌ها، استحکام کششی و مقاومت به ضربه، به‌ترتیب ۵۵/۷ و ۳۵/۷ درصد افزایش یافت و نقش پراکنده‌سازی مناسب تقویت‌کننده‌ها در فاز زمینه بسیار مهم است. در نهایت ذرات رس منجر به افزایش بلورینگی و مدول کشسانی می‌شود. در بررسی پلی‌پروپیلن‌های تقویت‌شده به‌وسیلهٔ سلولزهای نانوساختار و آتاپولژیت (رس سوزنی‌شکل) که لیو[1] و همکاران[۶۹] انجام دادند، نتایج بررسی‌ها و آزمون‌های گوناگون نشان دادند که نسبت مناسبی از ترکیب نانوذرات سلولزی و آپالوژیت‌ها می‌تواند در افزایش خواص مکانیکی اثر مناسبی داشته باشد که این امر وابستگی زیادی به میزان پخش یک‌نواخت و مناسب تقویت‌کننده‌ها در داخل ساختار فاز زمینه دارد. در این تحقیق، با استفاده از نسبت معینی از نانوسلولزها به به نانو ذرات رس (در حدود نسبت ۱۰۰ به ۳) به‌عنوان تقویت‌کننده، استحکام کششی و مقاومت ضربهٔ چندسازه به‌ترتیب ۳۲/۸۵ MPa و ۲۱/۶۱ J/m تعیین شد. در نهایت چندسازهٔ ساخته‌شده با سه درصد وزنی از نسبت تعریف‌شده برای تقویت‌کننده‌های پیش رو، در مقایسه با پلی‌پروپیلن خالص ۱۴/۷ درصد افزایش خواص مکانیکی را نشان داده است. زو[2] و همکاران[۷۰] به بررسی خواص مکانیکی، پایداری حرارتی و میزان بلورینگی ماتریس پلی‌پروپیلن حاوی ذرات تقویت‌کنندهٔ رسی مونت موریلونیت و الاستومرهای پلی‌الفینی پرداختند. در این راستا مشخص شد که پخش مناسب ذرات منجر به شکل‌گیری یکنواخت نقاط و هسته‌های جوانه‌زای فاز بلوری پلی‌پروپیلن در ساختار چندسازه می‌شود. هم‌چنین بررسی اثر افزودن ذرات مونت موریلونیت به ساختار فاز زمینهٔ چندسازهٔ ساخته شده نشان داد که افزایش خواص مکانیکی نظیر استحکام کششی و مقاومت به ضربه در کنار خواص حرارتی رخ می‌دهد و علاوه بر آن، منجر به افزایش بیشتر فاز بلوری پلی‌پروپیلن شده است. درصد اجزای تشکیل‌دهندهٔ نمونه‌های ساخته‌شده در این پژوهش، به شرح جدول (۷) است.

پس از انجام آزمون‌های مختلف مکانیکی ذکرشده بر روی نمونه‌ها، نتایج مطابق جدول (۸) به‌دست آمد:

1. Liu

2. Zhu

جدول ۷. بررسی درصد وزنی اجزای سازندهٔ نمونه‌های چندسازه‌ای پلی‌پروپیلن/مونت موریلونیت/الاستومر پلی الفین[۷۰].

Table 7. Weight percent of components of polypropylene / montmorillonite / polyolefin elastomer composites [70].

Sample No.	Weight percent of poly propylene (PP wt.%)	Weight percent of polyolefin elastomer (POE wt.%)	Weight percent of montmorillonite (OMMT wt.%)
1	100	0	0
2	92	0	3
3	77	15	3

* در تمامی نمونه‌های چندسازه‌ای، از سازگارکنندهٔ (پایدارکننده) PPMS[1] در حدود wt.% ۵ استفاده شده است.

جدول ۸. بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های چندسازه‌ای پلی‌پروپیلن/مونتموریلونیت/الاستومر پلی الفین[۷۰].

Table 8. Mechanical properties of polypropylene / montmorillonite / polyolefin elastomer composite samples [70]

Sample No.	Tensile strength (Mpa)	Flexural strength (MPa)	Impact strength ($kg.m^{-2}$)	Elongation at break (%)
1	30.9	36.8	6	560.3
2	33.8	42.9	10.1	830.6
3	27.2	35.3	14.9	270.5

۳. عمل‌آوری و اصلاح شیمیایی

یکی از بزرگ‌ترین مشکلاتی که تقویت‌کننده‌های طبیعی و مصنوعی متداول دارند، عدم ترشوندگی مناسب آن‌ها در داخل فاز زمینه است که این مسأله در بین الیاف طبیعی به‌عنوان تقویت‌کننده، بیشتر دیده می‌شود. بر این اساس تقویت‌کننده‌ها فصل مشترک مناسبی برای ایجاد پیوند و اتصال بین ذرات و الیاف تقویت‌کننده با زمینهٔ بسپاری چندسازه‌ها ایجاد نمی‌کنند و به همین علت باید تقویت‌کننده‌ها تحت عمل‌آوری و اصلاح سطحی قرار گیرند. این عمل منجر به فعال‌شدن گروه‌های هیدروکسیل و اتصال مناسب الیاف به‌وسیلهٔ زمینهٔ بسپاری می‌شود[۷۱]. از جمله روش‌های متداول به‌کار رفته برای اصلاح سطح مواد تقویت‌کننده می‌توان به اصلاح قلیایی، استیل‌دار کردن، اصلاح به روش سیلانی، اصلاح با ایزوسیانات و عامل جفت‌کننده[2] مالئات دار اشاره کرد. در همین راستا در جدول (۹) به بررسی بخشی از پژوهش‌های اصلاح سطوح الیاف طبیعی در چندسازه‌های پلی‌پروپیلنی اشاره و در ادامه به شرح و بررسی هر کدام از این روش‌ها پرداخته شده است.

1. Polypropylene-g-maleic anhydride/styrene

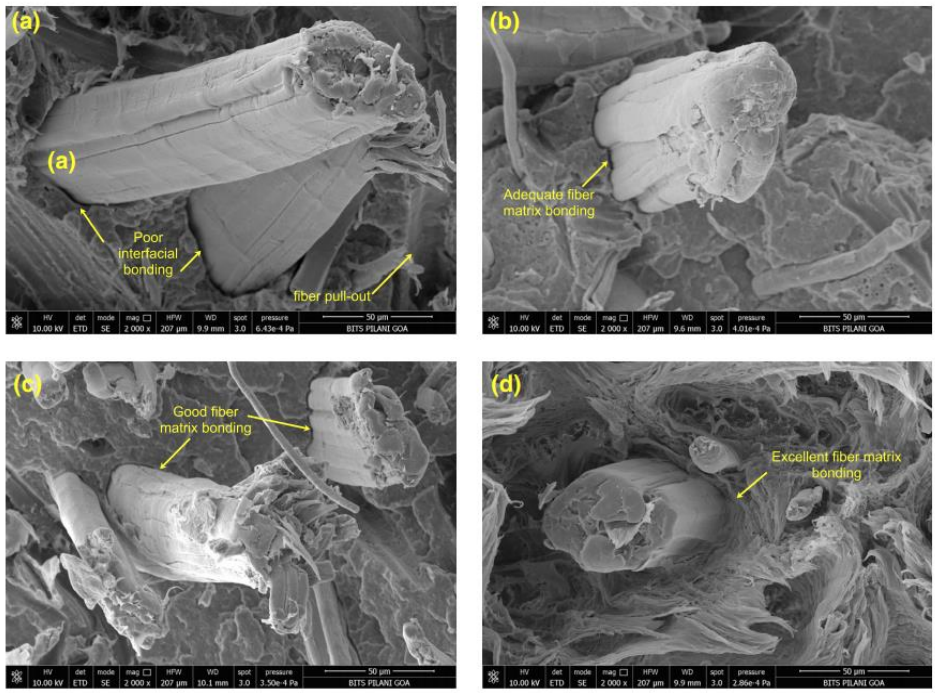
۲. بسیاری از مواد پرکنندهٔ معدنی با محیط بسپاری سازگاری نداشته، نمی‌توانند با آن ممزوج شوند؛ لذا برای بهبود چسبندگی در سطح مشترک بین پرکننده و بسپار از موادی به نام مواد جفت‌کننده (Coupling agents) استفاده می‌شود.

جدول ۹. روش‌های اصلاح و عمل‌آوری مختلف برای الیاف طبیعی.

Table 9. Different treatment and processing methods for natural fibers.

Treatment	Fibers	Results	Ref.
Alkali treatment	Sisal, jute, cotton fibers	Increasing surface roughness and removal of lignin, oils and wax	[72]
Acetylation	Sisal	Reducing the wettability of fibers and enhancing the thermal stability of prepared composites	[73-74]
Salinization	Sisal, cotton, palm oil fibers	formation of chemical bonds between fibers and matrix and enhancing the thermal stability of prepared composites	[65]
Maleate coupling agent	Jute, sisal, banana fibers	Wettability and improving the fiber-matrix adhesion	[75-77]

چندکار[1] و همکاران[۷۸] به بررسی و پژوهش بر روی تأثیر اصلاح‌کننده‌های مختلف الیاف طبیعی کنف هندی در چندسازه‌های زمینه پلی‌پروپیلنی پرداختند. در این راستا اضافه‌شدن الیاف اصلاح‌شده به ایجاد اتصال پیوند با زمینه کمک کرده که این مسأله منجر به افزایش خواص مکانیکی چندسازه می‌شود. به‌طور مثال با افزایش تنها ۱۴ درصد از الیاف اصلاح‌شده با اصلاح‌کننده‌های قلیایی، پتاسیم پرمنگنات و سیلانی، استحکام کششی به‌ترتیب ۲۳٪ ، ۳۱٪ و ۲۱٪ افزایش پیدا کرد. در ادامه و در شکل (۳) تصویری از سطح مقطع شکست نمونه‌های چندسازهٔ پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با الیاف کنف هندی ارائه شده است.



شکل ۳. سطح شکست نمونه‌های چندسازه‌ای پلی‌پروپیلن حاوی الیاف کنف هندی: (a) اتصال ضعیف در فصل مشترک و بیرون کشیدگی الیاف، (b) اتصال مناسب و کافی الیاف با زمینهٔ بسپاری، (c) اتصال مناسب زمینه و الیاف و (d) اتصال بسیار خوب زمینه و الیاف[۷۸].

Figure 3. Fracture surface of polypropylene composite containing jute fibers: (a) poor interfacial bonding and fiber pull-out, (b) adequate fiber matrix bonding, (c) good matrix bonding and (d) excellent fiber matrix bonding [78].

1. Chandekar

در پـژوهش دیگـری لیـو[1] و همکـاران[۷۹] بـه بررسـی اثـر اصلاح‌کننده‌های سطحی در چندسازه‌های پلی‌پروپیلنی حاوی الیاف کنف هندی پرداختند. در این مطالعه مدت زمان و تلفیق روش‌هـای مختلف اصلاح سطحی تأثیر بسـیار زیـادی بـر چسـبندگی مناسـب الیاف در داخل زمینهٔ پلی‌پروپیلن داشتند و اغلب الیافی که عمیـات اصلاح سطحی بر روی آن‌ها انجام‌شده دارای زبـری سـطح مناسـبی هستند که منجر بـه اتصـال مناسـب الیـاف در بسـتر پلـی‌پـروپیلن می‌شود. شکل (۴) بـه‌وسـیلهٔ میکروسـکوپ نیـروی اتمـی (AFM)[2] تهیه‌شده و میزان زبری سطحی الیاف اصلاح شده را نشان می‌دهد.

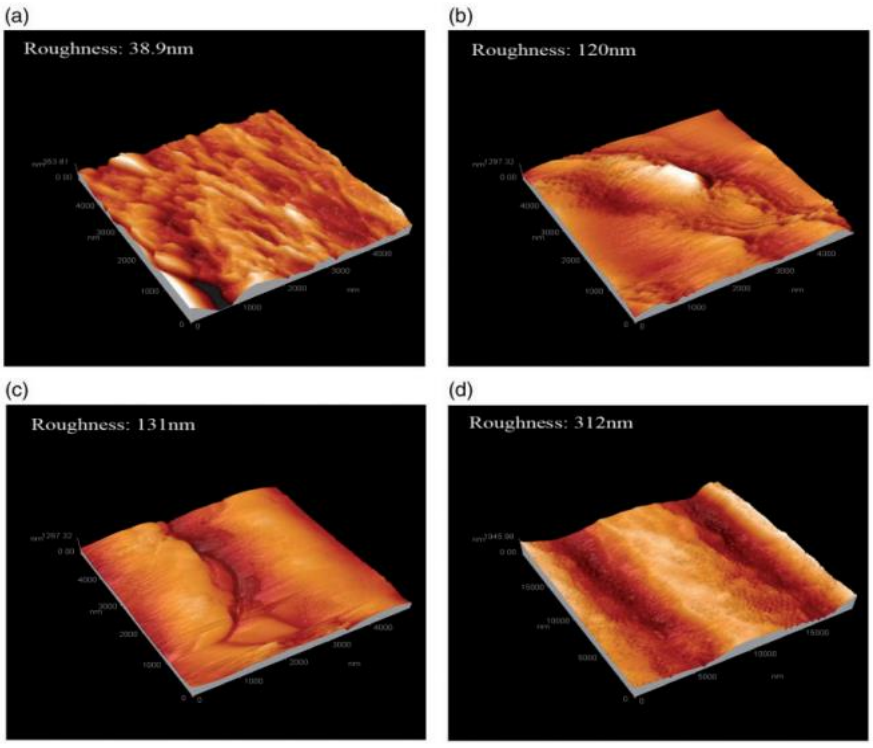
در ادامه به بررسی تعدادی از معروف‌ترین و پرکاربردترین روش‌های اصلاح سطحی برای الیاف و ذرات اسـتفاده‌شـده در چندسـازه‌هـای پلی‌پروپیلن پرداخته شده است.

۳-۱ عمل‌آوری و اصلاح قلیایی

اصلاح قلیایی یکی از روش‌های رایج برای بهبود قرارگیری الیـاف در زمینه‌های بسپاری گوناگون است که در ایـن عملیـات بـا گسسـتن پیوندهای هیدروژنی سـطح آن‌هـا، زبـری سـطح افـزایش یافتـه، در نتیجه اتصال ذرات یا الیاف در داخل زمینه بیشتر می‌شود[۸۲-۸۰].

۳-۲ استیل‌دارکردن الیاف و تقویت‌کننده‌ها

استیل به‌عنوان یک گروه عاملی با فرمول CH_3COO^- مطرح اسـت و در صورت افزودن آن به الیاف موجب نرم‌شدن آن مـی‌شـود و بـرای استفاده در چندسازه‌ها بسیار مفید است[۸۵-۸۳]. در همین راسـتا نیر[3] و همکـاران[۸۶] بـه اصـلاح سـطحی الیـاف سیسـال بـه روش استیل‌دار کردن آن‌ها پرداخته‌اند که الیاف سیسال اصلاح‌شده دارای زبری سطح مناسبی شده‌اند که این عمل منجر به اتصـال مکـانیکی بالا با ماتریس بسپاری شده است.



شکل ۴. تصاویر AFM از الیاف جوت استفاده شده در نمونه‌های چندسازه‌ی اعمال شده با اصلاح کننده‌های سطحی مختلف: (a) سطح الیاف بدون اصلاح، (b) اصلاح قلیایی، (c) اصلاح قلیایی/ اتیلن دیامین، (d) اصلاح اسیدی/ قلیایی[۷۹].

Figure 4. AFM images of jute fibers with different surface treatments: (a) control; (b) alkali treatment; (c) ethylenediamine/alkali treatment; (d) acid/alkali treatment [79].

1. liu
2. Atomic Force Microscope
3. Nair

۳-۳ اصلاح سیلانی

سیلان‌ها دارای فرمول SiH_4 و اغلب برای اصلاح سطح الیاف شیشه و برای استفاده از آن‌ها به‌عنوان تقویت‌کننده در چندسازه‌ها مطرح است[۸۹-۸۷]. به‌طور مثال کیم[1] و همکاران[۹۰] به بررسی خواص مکانیکی و رئولوژیکی چندسازه‌های پلی‌پروپیلنی تقویت‌شده با الیاف سلولزی میکروفیبریل شده (MFC) پرداختند. برای چسبندگی مناسب الیاف تقویت‌کننده با فاز زمینه، سطح الیاف MFC را با اصلاح‌کننده‌های سیلانی و استیلی، اصلاح کرده و در اثر این عمل، شاهد افزایش ترشوندگی و پراکنده‌سازی در داخل فاز زمینه بوده‌اند. به‌طور کلی میزان مدول کششی و خمشی نمونه‌هایی که الیاف آن‌ها اصلاح شده بودند به‌ترتیب ۳/۰۹ Gpa و ۳۱۳۳ Mpa اندازه‌گیری شد که نسبت به نمونه‌های حاوی پلی‌پروپیلن خالص به‌ترتیب ۶۴ و ۸۱ درصد و نسبت به نمونهٔ حاوی الیاف با سطح اصلاح‌نشده، ۱۶ و ۱۵ درصد افزایش داشته است.

۴-۳ اصلاح با ایزوسیانات

ایزوسیانات‌ها دارای گروه عاملی ایزوسیانات N=C=O هستند که می‌توان از آن‌ها به‌عنوان جفت‌کننده در چندسازه‌های تقویت‌شده با الیاف استفاده کرد[۹۲و۹۱].

۵-۳ عامل جفت‌کنندهٔ مالئات دار

این نوع عامل‌ها به‌طور وسیعی برای مقاوم‌سازی فصل مشترک بین زمینه و تقویت‌کننده در چندسازه‌ها استفاده می‌شود. مالئات‌ها نه‌تنها برای اصلاح سطح ذرات و الیاف مفید هستند، بلکه می‌توانند زمینهٔ بسپاری را نیز تا حدود زیادی بهبود بخشند و به استحکام آن‌ها کمک کنند[۹۴-۹۳]. تیان[2] و همکاران[۹۵] به بررسی چسبندگی سطح الیاف کربن و زمینهٔ بسپاری چندسازه‌های پروپیلنی پرداختند. بیشتر نمونه‌های ساخته‌شده در این پژوهش دچار شکست ترد شدند که این مسأله به‌دلیل رشد سریع، راحت و ناگهانی ترک در ساختار زمینه و انتقال آن به الیاف تقویت‌کنندهٔ کربنی است و ناشی از نبود چسبندگی مناسب بین ذرات تقویت‌کنندهٔ الیاف کربنی و زمینه پلی‌پروپیلنی است. یکی از راه‌های برطرف کردن این مشکل و مقاوم‌سازی این نوع از چندسازه‌ها، استفاده از اصلاح‌کننده‌های سطحی برای اتصال و پیوند مناسب الیاف با چندسازه‌هاست. در این پژوهش با اعمال اصلاح‌کننده‌های سطحی بر روی الیاف کربن، بهبود کیفیت نمونه‌ها مشاهده شد. اصلاح‌کنندهٔ سطحی استفاده‌شده در پژوهش این محققان مالئیک (PP-g-MAH) بوده که منجر به زبری سطح الیاف و اتصال مناسب آن‌ها شده است. در پژوهش دیگری تیو[3] و همکاران[۹۶] به بررسی ساخت چندسازه‌های هیبریدی پلی‌پروپیلن با استفاده از الیاف شیشه و بامبو پرداختند که اثر افزودن اصلاح‌کنندهٔ سطحی مالئیک انیدرید را نیز بررسی کردند. در این مطالعه مشخص شد که با افزودن اصلاح‌کنندهٔ مالئیک انیدرید به چندسازه، گروه‌های هیدروکسیل (OH) سطح الیاف بامبو و Si-O سطح الیاف شیشه واکنش می‌دهد و باعث ترکنندگی مناسب الیاف به‌وسیلهٔ زمینهٔ پلی‌پروپیلنی می‌شود. همین مسأله منجر به بهبود خواص مکانیکی، افزایش طول عمر قطعات و حفظ کیفیت آن‌ها و هم‌چنین بهبود استحکام و سختی در طی فرایند عملکردی می‌شود. موانتی[4] و همکاران[۹۷] نیز در پژوهش خود به بررسی خواص مکانیکی الیاف سیسال اصلاح‌شده با مالئیک انیدرید پیوندخورده با پلی پروپیلن[5] در چندسازه‌های پلی‌پروپیلنی پرداختند. مشخص شد که افزایش غلظت سازگارکننده تا ۱ درصد (in%) منجر به افزایش خواص مکانیکی شده؛ اما با افزودن بیش از این مقدار خواص مکانیکی کاهش یافته که این امر ممکن است ناشی از مهاجرت بیش از حد سازگارکننده‌ها به دور الیاف باشد که باعث خود-در هم تنیدگی آن‌ها و ایجاد لغزش شده است. جدول (۱۰) بخشی از فعالیت این محققان و اثر افزایش میزان سازگارکنندهٔ بررسی‌شده بر خواص مکانیکی چندسازه را بیان می‌کند.

در تحقیقی دیگر گل‌پرور و همکاران[۹۸] به بررسی خواص مکانیکی چندسازه‌های پلی‌پروپیلنی حاوی نانوذرات سیلیکا پرداختند. در این مطالعه مشخص شد که در اثر عدم افزودن سازگارکننده به نمونه‌های چندسازه‌ای در حین ساخت، نانو ذرات تقویت‌کنندهٔ موجود در زمینه به یکدیگر می‌چسبند و به کلوخه تبدیل می‌شوند. در اثر این فرایند و در صورت افزایش درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده و استفاده نکردن از سازگارکننده، کاهش استحکام کششی و مقاومت ضربه‌ای رخ می‌دهد؛ اما بر عکس این امر صادق است به نحوی که با افزودن همزمان مقادیر تقویت‌کننده و اصلاح‌کننده، خواص مکانیکی و به‌خصوص مدول کشش، افزایش چشمگیری می‌یابد.

1. Kim
2. Tian
3. Thwe
4. Moanty
5. MAPP

جدول ۱۰. اثر افزایش غلظت سازگارکنندۀ مالئیک انیدرید پیوندخورده با پلی‌پروپیلن (گرید G-3015) بر خواص مکانیکی چندسازه‌های پلی‌پروپیلنی حاوی ۳۰ درصد الیاف سیسال[۹۷].

Table 10. Effect of increasing concentration of compatibilizer of maleic anhydride bonded with polypropylene (grade G-3015) on the mechanical properties of polypropylene composites containing 30% of sisal fibers [97]

Concentration of MAPP (%)	Tensile strength (MPa)	Impact strength (J/m)	Flexural strength (MPa)
0	29.25	51.79	48.96
0.3	32.35	52.45	50.13
0.5	35.34	57.16	52.44
1	43.66	68.66	62.42
2	34.55	55.30	51.16

خادمی اسلام و همکاران[۹۹] نیز در پژوهشی به بررسی چندسازۀ هیبریدی پایه پلی‌پروپیلن با تقویت‌کننده‌های آرد چوب نوئل و نانوذرات رس (کلوزیت 30B) پرداختند. در این تحقیق از سازگارکنندۀ مالئیک انیدرید پیوندخورده با پلی‌پروپیلن استفاده کردند که دلیل آن را جلوگیری از به‌هم چسبیدن ذرات رسی و تجمع در حین ساخت چندسازه عنوان کردند. در این آزمایش آرد چوب نوئل ۴۰ درصد، مادۀ سازگارکنندۀ MAPP در دو مقدار ۲ و ۴ درصد وزنی به‌همراه مقادیر مختلفی از نانو ذرات رس (چهار درصد متفاوت ۰، ۱، ۳، ۵) استفاده شد. خواص مکانیکی نمونه‌های ساخته‌شده به‌وسیلۀ مقاومت کششی، مقاومت خمشی بررسی شد. با افزودن نانو ذرات رس مقاومت کششی و خمشی و مدول خمشی افزایش یافت. علاوه بر این، در تحقیق فوق، به بررسی اثر افزودن درصدهای مختلفی از مالئیک انیدرید نیز پرداخته و مشخص شد که افزودن این نوع اصلاح‌کننده در اندازه‌های معین، منجر به افزایش خواص مکانیکی می‌شود، اما افزودن مقادیر بیشتری از آنان، میزان خواص و استحکامی نمونه‌ها را کاهش می‌دهد. جدول (۱۱) به بررسی پژوهش‌های متمرکز بر روی نمونه‌های چندسازه‌ای تقویت‌شده با الیاف بازالت به‌همراه انواع گوناگونی از اصلاح‌کننده‌های سطحی الیاف اشاره کرده است. همان‌طور که مشخص است، با افزودن مقدار معینی از اصلاح‌کننده‌های سطحی به چندسازه‌های مورد نظر، خواص مکانیکی آن‌ها بهبود می‌یابد و در صورت افزودن بیش از حد اصلاح‌کننده، خواص مکانیکی مجدداً کاهش می‌یابد که در این مسأله پیداکردن میزان بهینۀ اصلاح‌کنندۀ سطحی برای ایجاد بهترین خواص استحکامی در چندسازه‌ها ضروری است، هم‌چنین در صورت حضور اصلاح‌کننده‌های سطحی به میزان ثابت در چندسازه‌ها، قادر به افزودن مقادیر بیشتری از تقویت‌کننده‌هاست که این امر نه تنها به چسبیدن تقویت‌کننده‌ها و تداخل آن‌ها به یکدیگر منجر نمی‌شود، بلکه باعث افزایش خواص مکانیکی و استحکام چندسازه‌های تولید شده می‌شود.

همان‌طور که پیش‌تر نیز ذکر شد، ترشوندگی الیاف طبیعی در داخل ماتریس‌هایی نظیر پلی‌پروپیلن محدود است؛ البته این مشکل در الیاف مصنوعی نیز وجود دارد؛ اما به اندازۀ الیاف طبیعی مخاطره آمیز نیست. به‌طور کلی در مقادیر کم ترشوندگی مشکلاتی نظیر شکل گیری فصل مشترک ضعیف الیاف با ماتریس منجر به کاهش شدید خواص مکانیکی چندسازه می‌شود. به همین علت و با گسترش روز افزون استفاده از ضایعات محصولات گیاهی که الیاف طبیعی بسیاری در داخل خود دارند، استفاده از این تقویت‌کننده‌ها نه‌تنها به کاهش میزان ضایعات تولیدشده کمک می‌کند، بلکه با استفاده از الیاف طبیعی قادر به تولید محصولات مناسب سازگار با محیط زیست می‌شود و به همین علت روش‌های اصلاح سطحی مورد استقبال واقع شده و تمرکز بیشتری بر روی الیاف طبیعی دارند. در ابتدا برای اصلاح این الیاف از روش‌های شیمیایی استفاده شد که به‌علت هزینه های بسیار در زمینۀ خرید، نگهداری و اعمال این‌گونه مواد بر روی الیاف مشکلات بسیاری را برای تولیدکنندگان قطعات چندسازه‌ای دربرداشت. از این رو استفاده از اصلاح‌کننده‌های شیمیایی بیشتر برای الیاف طبیعی انجام می‌گرفت تا برای الیاف مصنوعی نظیر کربن و شیشه. استفاده از روش‌های اصلاح سطحی فیزیکی باعث کاهش مشکلات از جمله هزینه‌های اصلاح و

جدول ۱۱. بررسی خواص مکانیکی چندسازه‌های پلی‌پروپیلنی تقویت‌شده با الیاف اصلاح‌شدهٔ بازالت.

Table 11. Mechanical properties of polypropylene composites reinforced with modified basalt fibers.

Composite	Surface modification	percent of surface modification (%)	Yield strength (MPa)	Impact strength (j/m)	elongation (Elongation%)	Ref.
Neat polypropylene	-	-	29.5	6	17.5	[100]
PP+10% Basalt fiber	-	-	27.1	25.2	13.8	
PP+10% Basalt fiber	PP-g-MA	5	29.8	28.5	11.9	
PP+10% Basalt fiber	PP-g-MA	10	31.2	32.6	11.6	
PP+10% Basalt fiber	PP-g-MA	20	35.5	32.8	10.8	
PP+20% Basalt fiber	-	-	26.5	2.19	-	[101]
PP+20% Basalt fiber	PP-g-MA	0.4	30.2	2.33 kJ/m^2	-	
Pure homopolymer polypropylene	-	-	28.7	77.3 kJ/m^2	More than 200	[102]
PP+5% Basalt fiber + 5% carbon	MAPP	3	55.6	27.9 kJ/m^2	2.6	
PP+7.5% Basalt Fiber+ 7.5% Carbon	MAPP	3	68.7	33.2 kJ/m^2	2.5	
PP+10% Basalt fiber+ 10% Carbon	MAPP	3	73	25.9 kJ/m^2	2.3	
PP+ Basalt fiber	-	-	24.4	41.9	-	
PP+6% Basalt fiber	Silane	-	۵۶/۱	45	-	

عمل‌آوری الیاف می‌شود که همین مسأله منجر به افزایش روز افزون استفاده از روش های فیزیکی اصلاح الیاف شده و به‌علت کاهش مخاطرات اصلاح در کنار افزایش خواص مکانیکی و کیفیت چندسازه‌ها، شاهد هستیم تا علاوه بر عمل‌آوری الیاف طبیعی، الیاف مصنوعی نیز به این روش اصلاح سطحی شوند. بدیهی است که در ابتدای استفاده از این روش ممکن است تا سرمایه‌گذاری برای تهیهٔ ابزارآلات هزینه‌بر باشد؛ اما در ادامه و در مدت زمان استفاده از این روش هیچ هزینهٔ جانبی اعم از خرید مواد مصرفی، نگهداری مواد شیمیایی و اجرای پروتکل های حفاظتی و بهداشتی ندارد و مخاطرات محیط زیستی بسیار کمی دارد. در حال حاضر بیشتر فعالیت‌های پژوهشگران بر روی استفاده از روش های نوین اصلاح و عمل آوری سطحی الیاف به روش‌های فیزیکی متمرکز شده و محققان این حوزه، انواع مختلفی از الیاف را با روش های گوناگون و با تغییر مؤلفه‌های مختلف تأثیرگذار در این روش تولید و بررسی می‌کنند.

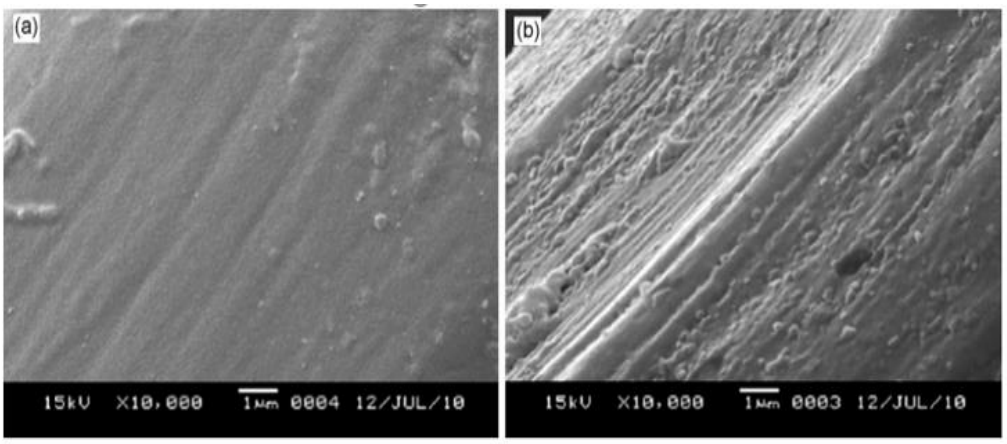
۴. روش‌های فیزیکی اصلاح و عمل‌آوری الیاف

روش‌های فیزیکی اصلاح و عمل‌آوری الیاف شامل انواع روش‌های تخلیهٔ الکتریکی نظیر کرونا، پلاسمای سرد و برخی روش‌های دیگر می‌شود[۱۰۳] که از میان آن‌ها روش پلاسما به‌عنوان رایج‌ترین روش صنعتی مطرح است و در حال حاضر روش پلاسمای سرد بسیار مؤثر است و برای اصلاح سطح الیاف بدون تأثیرات مخرب بر روی سایر مشخصه‌های آن‌ها استفاده می‌شود. با به کارگیری روش‌های فیزیکی عمل‌آوری و اصلاح سطح الیاف، شاهد افزایش و تأثیر پیوندهای مکانیکی بین الیاف تقویت‌کننده و زمینه چندسازه‌های بسپاری هستیم. در اصل، عمل‌آوری و اصلاح فیزیکی، خواص ریخت‌شناسی سطح را بدون تغییر خواص شیمیایی آن‌ها تغییر می‌دهند. بعد از اصلاح فیزیکی الیاف، سطح آن‌ها زبرتر می‌شود که همین مسأله منجر به افزایش سطح تماس بین الیاف و زمینه می‌شود و اتصال فیزیکی بین آن‌ها را به طور قابل ملاحظه‌ای بالا می‌برد[۱۰۴]. شکل (۵) میزان افزایش زبری سطح الیاف طبیعی رامی را به وضوح نشان می‌دهد.

چنان که پیش‌تر نیز به آن اشاره شد، تمامی الیاف طبیعی به‌دلیل وجود گروه‌های هیدروکسیل در ساختار خود، دارای خاصیت آبگریزی هستند[۱۰۶]. همین عامل باعث انطباق ناپذیری مناسب الیاف طبیعی با برخی از زمینه‌های بسپاری می‌شود که آبگریز به حساب می‌آیند؛ مانند پلی‌پروپیلن و یا پلی لاکتیدها[۱۰۷] شاخصه‌های دیگری که حضور الیاف طبیعی را برای ساخت چندسازه محدود می‌کند، پایین‌بودن پایداری حرارتی آنان است. به همین دلیل و برای پرهیز از جدایش الیاف موجود در چندسازه در حین ساخت آن، دمای مورد استفاده باید در حدود ۲۰۰ درجهٔ سلسیوس باشد و فرایند ساختی که دارای کمترین زمان اجراست به سایر فرایندها ترجیح داده می‌شود[۱۰۸].

روش‌های شیمیایی که در قسمت‌های قبلی بیان شدند، بسیار مناسب و مفید هستند؛ اما کاستی‌هایی نیز دارند که از جملهٔ آن‌ها می‌توان به استفاده از برخی مواد سمی در طی فرایند اصلاح سطح الیاف که برای محیط زیست خطرناک است، اشاره کرد. هم‌چنین چگونگی دفع یا نگهداری باقی پسماندها و ضایعات مواد سمی و خطرناک ذکر شده یکی دیگر از مشکلات همیشگی است. از همین رو استفاده از روش‌های شیمیایی، نه‌تنها از نظر بهداشتی دارای چالش‌های فراوان است، بلکه از نظر ایجاد هزینه‌های اضافی در فرایند ساخت چندسازه نیز مؤثر هستند و بیشتر صنعتگران و پژوهشگران به همین دلیل به دنبال راه‌های جایگزین مناسب برای عمل‌آوری و اصلاح سطح الیاف بوده‌اند.

در این راستا بخش بزرگی از پژوهشگران به دنبال بررسی راه‌های اصلاح و عمل‌آوری الیاف با روش‌های فیزیکی بوده و به همین دلیل از روش عمل‌آوری با پلاسما استقبال زیادی کرده‌اند. به‌طور کلی پلاسما چهارمین حالت ماده محسوب می‌شود که به‌صورت یک محیط گازی حاوی ذرات برانگیخته‌ای است که دارای چگالی بار کلی صفر است. پلاسما توانایی اصلاح سطح بسپارهای ترموپلاستیک و الیاف طبیعی یا همنهشت‌شده مانند الیاف کربن را داراست[۱۱۰و۱۰۹]. در واقع عمل‌آوری با استفاده از تخلیهٔ کرونا یا پلاسما این امکان را می‌دهد تا خواص سطحی الیاف از راه تشکیل و ایجاد رادیکال‌های آزاد، یون‌ها و یا الکترون بر روی سطح آن‌ها تغییر یابد[۱۱۱].



شکل ۵. بررسی سطح الیاف طبیعی رامی بعد از اصلاح به‌وسیلهٔ پلاسما فشار اتمسفری[۱۰۵].

Figure 5. SEM photographs of (a) control and (b) treated ramie fibers with atmospheric plasma [105].

در طی فرایند عمل‌آوری فیزیکی با تخلیهٔ کرونا یا پلاسما سطح الیاف مورد نظر با ذرات پر انرژی بمباران می‌شود؛ در نتیجه خواص سطحی مانند ترشوندگی و مؤلفهٔ شیمیایی سطح و زبری آن توانایی تغییر می‌یابد که در انجام این فرایند هیچ مادهٔ خطرناک و حلالی استفاده نمی‌شود. اغلب اصلاح به روش پلاسما برای الیاف طبیعی برای اهداف زیر استفاده می‌شود[۱۱۲]:

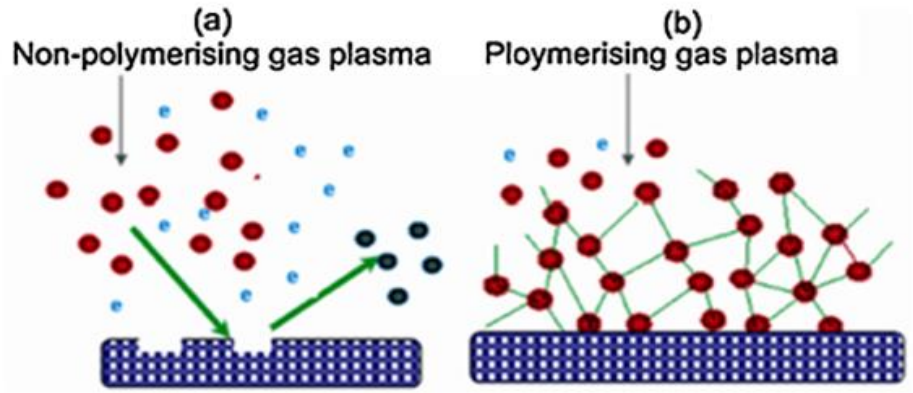
الف- حذف لایه‌های سطحی با چسبندگی‌های ضعیف

ب- شکل‌گیری گروه‌های عاملی جدید

پ- عامل‌دار کردن و شبکه‌سازی

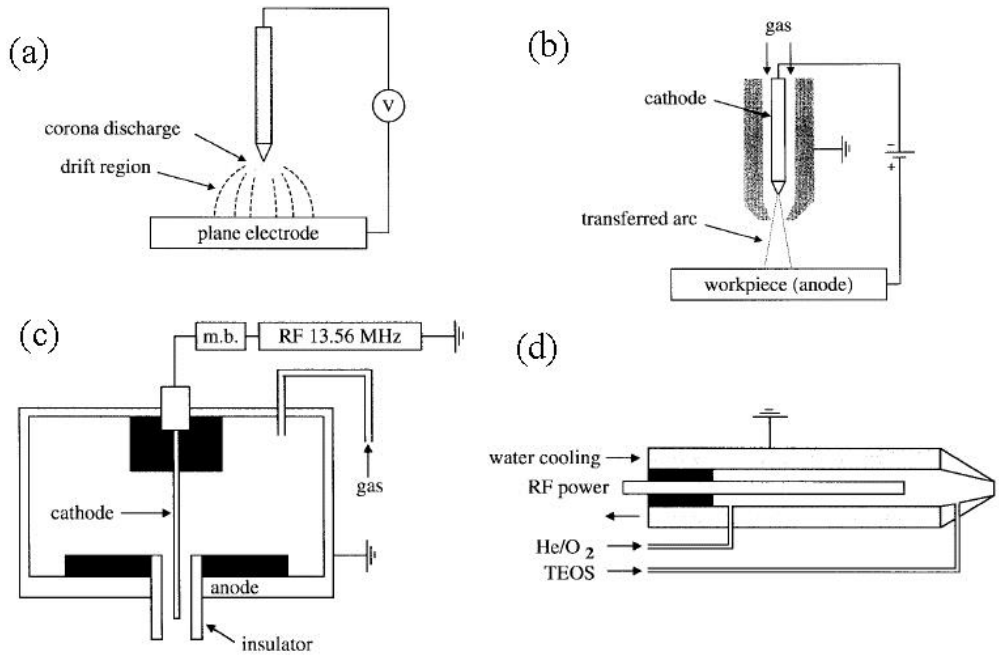
در شکل (۶) به بیان طرحوارهٔ پاکسازی و حذف لایه‌های سطحی و ایجاد پیوندهای شبکه‌ای و بسپارش به‌وسیلهٔ پلاسما پرداخته شده است.

در ادامه و برای برای درک تفاوت‌های ساختاری و منـابع پلاسـمایی متعددی که وجود دارد، تصاویر نحوهٔ ایجاد انـواع پلاسـما و کرونـا و هم‌چنین تفاوت‌های آنان در شکل (۷) بیان شده است. در شکل (۸) نیز به بیان تفاوت‌های شعله‌های روش‌های گوناگون تخلیه پرداختـه است.



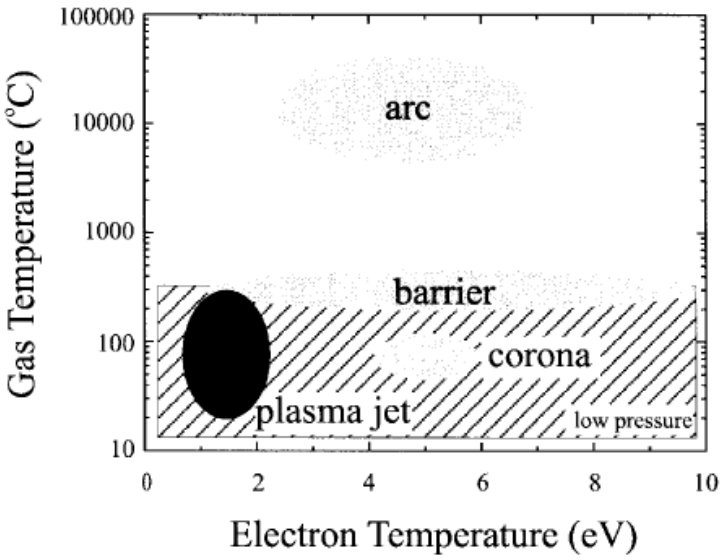
شکل ۶. (a) حذف و پاکسازی لایه‌های سطحی و (b) ایجاد ساختار و شبکه‌سازی و بسپارش به‌وسیلهٔ پلاسما در فرایند اصلاح الیاف[۱۱۳].

Figure 6. (a) Cleaning the surface layers and (b) networking and polymerization by plasma in fiber modification [182].



شکل ۷. بررسی طرحواره‌ای دستگاه‌های تولیدکنندهٔ حالت‌های گوناگون شعله‌های حاصل از تخلیهٔ الکتریکی: (a) تخلیهٔ الکتریکی کرونا، (b) انتقال‌دهندهٔ قوس الکتریکی، (c) پلاسمای سرد، (d) پلاسماجت اتمسفری[۱۱۴].

Figure 7. Schematic of devices for manufacturing different states of flames from electric discharge: (a) corona discharge, (b) arc transmitter, (c) cold plasma, (d) atmosphere plasma jet.



شکل ۸. مقایسهٔ انواع شعله‌های حاصل از تخلیهٔ الکتریکی از نظر دمای گاز و دمای الکترونی[۱۱۴].

Figure 8. Comparison of various flames of electric discharge in terms of gas and electron temperature [114].

با اینکه بخش بزرگی از پژوهشگران به بررسی اصلاح سطح الیاف به‌وسیلهٔ پلاسما پرداخته‌اند؛ اما برخی از پژوهش‌ها نیز به بررسی سایر روش‌ها معطوف شده است، به‌طور مثال راگوبی[1] و همکاران[۱۱۵] پژوهشی را بر روی الیاف کنف عمل‌آوری شده به‌وسیلهٔ تخلیهٔ کرونا به‌عنوان تقویت‌کننده در چندسازه‌های پلی‌پروپیلن پرداختند که مشاهده شد چندسازه‌های حاوی الیاف اصلاح‌شده در حدود ۳۰ درصد نسبت به نمونه‌های چندسازه‌ای حاوی الیاف اصلاح نشدهٔ دارای مدول یانگ بالاتری بوده‌اند و ساختار آن‌ها دارای بیشترین و مناسب‌ترین حالت پیوندگی بین الیاف و زمینه را داراست. انواع مختلف گازهای استفاده شونده در ایجاد پلاسما شامل هوا، هیدروژن (H_2)، هلیم (He)، نئون (Ne) ، ازت (N_2) و آرگون (Ar) است که با استفاده از آن‌ها، خصوصیات پلاسمای شکل گرفته تغییر و خواص متفاوتی پیدا می‌کند.

تخلیهٔ پلاسما می‌تواند در شرایط خلأ (فشار پایین) انجام پذیرد و یا در فشار اتمسفر به‌وقوع بپیوندد؛ پلاسمای ساخته شده می‌تواند برای اصلاح و تنظیم انرژی سطحی الیاف طبیعی و شبکه‌سازی و ایجاد پیوندهای عرضی در الیاف و ایجاد رادیکال‌های آزاد برای بسپارش اولیه یا ساخت گروه‌های عاملی بر روی سطح الیاف استفاده شود[۱۱۸-۱۱۶]. در ادامه به بررسی دو روش مطرح‌شده می‌پردازیم.

1. Ragoubi

۴-۱ عمل‌آوری با پلاسمای فشار پایین برای الیاف طبیعی

بزرگ‌ترین نتیجهٔ استفاده از اصلاح و عمل‌آوری الیاف با پلاسمای فشار پایین این است که می‌توان پلاسمایی با خروجی فشار کم داشته باشیم که این عمل در یک بیشینهٔ توانی در حد ۱۰کیلو وات[۱۱۹] اتفاق می‌افتد. از طرفی برخی از پژوهش‌ها عنوان کرده‌اند که توان خروجی این روش می‌تواند در محدودهٔ ۶ تا ۱۰۰ کیلو وات انجام گیرد[۱۲۱و۱۲۰]. خواص مکانیکی الیاف طبیعی اصلاح‌شده، تا حد زیادی به درجهٔ حرارت بستگی دارد که الیاف طبیعی در آن تحت اصلاح و عمل‌آوری قرار گرفته است. به همین دلیل استفاده از توان خروجی کمتر می‌تواند صدمات حرارتی ایجاد شده با این روش را کاهش دهد و خواص مطلوب الیاف را حفظ کند.

یکی از نقاط حساس ایجاد پلاسما با فشار پایین، ایجاد شرایط خلأ و کاهش فشار محیط است که این امر در محیط‌های کنترل‌شده نظیر راکتورهای کنترل‌کنندهٔ فشار امکان‌پذیر است. بنا بر این طراحی مطلوب یک راکتور پلاسمایی بسیار مهم و مستلزم دارا بودن پمپ خلأ مناسب و آب‌بندی خوب است[۱۲۳و۱۲۲].

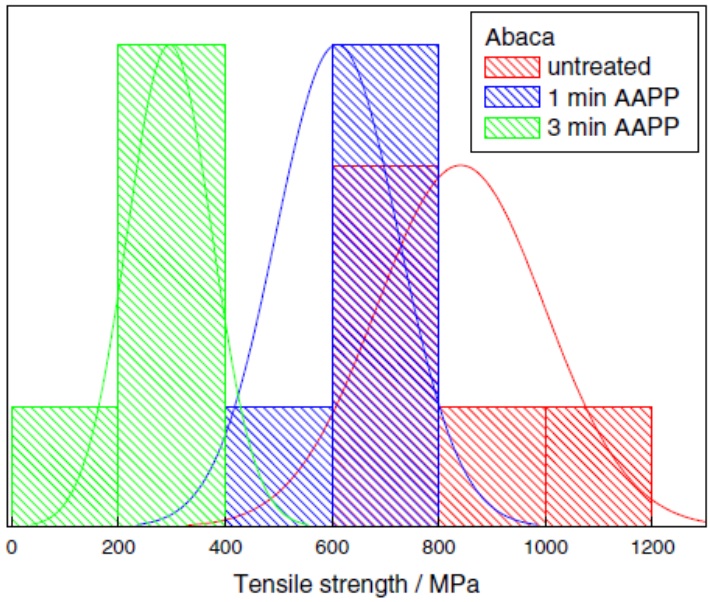
۴-۲ اصلاح سطح الیاف طبیعی با استفاده از پلاسمای فشار هوای اتمسفری

برای افزایش قابلیت ترکنندگی و چسبندگی سطحی بین الیاف

طبیعی و زمینه بسپاری علاوه بر استفاده از پلاسمای فشار پایین از پلاسمای فشار هوای اتمسفر (AAPP) نیز استفاده می‌شود. نتایج استفاده از این روش، کاهش هزینه‌های اجرایی، زمان کم عمل‌آوری و انعطاف‌پذیر شدن بیشتر است که دلیل آن بی‌نیازی از سامانه‌های خلأ است[۱۲۴]. در برخی از پژوهش‌ها استفاده از پلاسمای نیتروژن و اکسیژن منجر به کاهش تنش‌های سطحی بحرانی الیاف طبیعی شده که تأثیراتی مانند خوردگی (اچینگ) الیاف را به همراه داشته است که استفاده از هوای فشرده می‌تواند به‌عنوان منبع گازی مناسب برای جلوگیری از مشکلات این چنینی در نظر گرفته شود. طبق یک قانون کلی، چسبندگی خوب زمانی ایجاد می‌شود که کشش‌های سطحی الیاف طبیعی بزرگتر از زمینه باشند. در شکل (۹) استحکام الیاف طبیعی آباکا اصلاح‌شده در مدت زمان‌های مختلف عمل‌آوری به‌وسیلهٔ پلاسما فشار هوای اتمسفری بررسی شده است.

در همین راستا بالتازار[1] و همکاران[۱۱۹و۱۲۵] در سلسله تحقیقات خود به بررسی اثر اصلاح الیاف طبیعی با استفاده از پلاسمای فشار هوای اتمسفری پرداختند. مشخص شد که تنش سطحی بحرانی الیاف آباکا در اثر افزایش زمان عمل‌آوری با این روش کاهش پیدا کرد؛ اگرچه الیاف کنف و سیسال چیز دیگری را نشان می‌داد. در این مطالعات مشخص شد که با افزایش عملیات AAPP تنش سطحی بحرانی افزایش می‌یابد. فرض آن‌ها بر این بود که زمان عمل‌آوری طولانی‌تر الیاف کنف و سیسال منجر به ایجاد ساختار شبکه بر روی سطح الیاف و رسوب گروه‌های هیدروفوبیک شده. اثر عمل‌آوری به‌وسیلهٔ پلاسمای فشار هوای اتمسفری بر خواص چندسازه‌های استات بوتیرات سلولزی CAB تقویت‌شده با الیاف طبیعی مطالعه شد که با ۳۰ درصد وزنی الیاف طبیعی مدول ذخیره شده به‌وسیلهٔ الیاف ۳۷۰ درصد افزایش پیدا کرد که این امر ناشی از افزایش چسبندگی سطح الیاف زمینه و غیره است.

در پژوهش دیگری کان[2] و همکاران[۱۲۶] نیز به اصلاح چند نوع از الیاف طبیعی با پلاسمای دما پایین پرداختند. در این راستا و برای بررسی ریخت‌شناسی سطح الیاف قبل و بعد از عمل‌آوری و اصلاح، از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده کردند که در بررسی تصویر به دست آمده مشاهده شد که سطح الیاف زبرتر و میزان جهت‌گیری الیاف در راستای یک محور واحد افزایش یافته است.



شکل ۹. استحکام الیاف طبیعی آباکا پس از عمل‌آوری و اصلاح به روش پلاسمای اتمسفری با زمان‌های گوناگون اعمال [۱۲۵و۱۱۹].

Figure 9. Tensile stress of Abaca natural fibers after treatment and modification by atmospheric plasma with different application times [119,125].

1. Baltazar
2. Kan

البته بحث اصلاح سطح الیاف استفاده شده به‌عنوان تقویت‌کننده در چندسازه‌های زمینه بسپاری معطوف به الیاف طبیعی نیست و بخشی از پژوهشگران برای بالابردن استحکام و خواص مکانیکی چندسازه‌های ساخته‌شده، از روش‌های عمل‌آوری و اصلاح الیاف با پلاسما استفاده می‌کنند، به‌طور مثال باقری و همکاران[۱۲۷] بر روی اصلاح سطح الیاف کربن با استفاده از فناوری پلاسما به بررسی پرداختند که الیاف کربن را به‌عنوان تقویت‌کننده در زمینهٔ اپوکسی قرار دادند و مشاهده کردند که تنش برشی بین لایه‌ای نمونه‌های حاوی الیاف اصلاح‌شدهٔ کربنی ۲۸ درصد نسبت به نمونه‌های دارای الیاف کربن اصلاح نشده افزایش از خود نشان می‌دهد.

در پایان نیز با توجه به بررسی مقالات مختلفی که از روش‌های اصلاح و عمل‌آوری شیمیایی و فیزیکی استفاده کرده‌اند، می‌توان تأثیرات هر کدام از روش‌ها را در کنار برتری‌ها و کاستی‌های آن‌ها بیان کرد. جدول (۱۲) به بررسی و مقایسهٔ روش‌های اصلاح سطح الیاف به‌صورت شیمیایی و فیزیکی تهیه شد.

۵. جمع‌بندی

در این مقاله، پژوهشی در راستای بررسی رفتار مکانیکی چندسازه‌های پایه پلی‌پروپیلن و اثر افزودنی‌های مختلف در آن‌ها انجام گرفت. مشخص شد که برخی از چندسازه‌های پایه پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با افزودنی‌های طبیعی، نسبت به نمونه‌های مشابه تقویت‌شده با افزودنی‌های مصنوعی متداول، خواص نسبتاً ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهند. از این رو، عده‌ای از پژوهشگران درصدد ساخت چندسازه‌های هیبریدی برآمده‌اند و در حال ساخت چندسازه‌های با انواع افزودنی‌های طبیعی و مصنوعی به‌صورت هم‌زمان با یکدیگر هستند. نتایج این تحقیقات بسیار رضایت بخش است و استحکام چندسازه‌های هیبریدی ساخته شده در اثر افزودن دو یا چند تقویت‌کننده به‌صورت همزمان، افزایش پیدا کرده است. علاوه بر این مسأله، برخی از تقویت‌کننده‌های اضافه شده، سبب افزایش درصد بلورینگی نمونه‌های چندسازه‌ای می‌شوند که این مسأله نیز باعث افزایش خواص حرارتی در کنار افزایش سایر مؤلفه‌های مکانیکی می‌شود. به‌طور کلی انتظار می‌رود که به‌سبب

جدول ۱۲. بررسی برتری‌ها و کاستی‌های روش‌های اصلاح و عمل‌آوری الیاف به‌صورت شیمیایی و پلاسمای فیزیکی.

Table 12. Advantages and disadvantages of chemical and physical plasma fiber modification and treatment methods.

Method	Results	Advantages	Disadvantages	Ref.
Chemical treatment	• Removing surface impurities, • Surface chemical modification, • Increasing surface roughness, • Good adhesion, • Improving mechanical properties of fibers.	• Simple and useful process for various applications, • Applicable on industrial scales, • Wide range of industrial applications.	• Toxic and hazardous chemicals, • Hazardous wastewater, • Expensive	[128-130]
Plasma treatment	• Removing weak surface layer, • Formation of new functional group, • Improving mechanical properties, • Improving surface adhesion.	• Non toxic and hazardous chemicals, • Environmentally friendly, • Cost-effective, • low processing time.	• Necessity for using high-tech instruments, • Not-applicable for continuous process.	[112, 131]

فراوانی الیاف و تقویت‌کننده‌های طبیعی که دارای قیمت پایین و خاصیت غیر سمی هستند، استفاده از تقویت‌کننده‌های مورد نظر افزایش یابد و در جهت استفاده از چندسازه‌های هیبریدی برای کاربردهای گوناگون گسترش پیدا کند. در ادامه مشخص شد که یکی از مشکلات عمدهٔ به‌وجود آمده درچندسازه‌های پایه پلی‌پروپیلن، چسبندگی نامناسب تقویت‌کننده‌ها در داخل زمینه، فصل مشترک ضعیف و پیوندهای سستی است که تقویت‌کننده‌ها را به زمینه پلی‌پروپیلن متصل می‌کند. یکی از علل به‌وجود آمدن چنین شرایطی، ترشوندگی نامناسب تقویت‌کننده‌ها در هنگام ساخت چندسازه و به‌وسیلهٔ زمینه است. این مهم در الیاف طبیعی نسبت به الیاف مصنوعی به‌علت ویژگی و خواص ذاتی، به‌عنوان یک چالش بسیار مهم‌تر نسبت به سایر تقویت‌کننده‌ها مطرح است. برای حل این مشکل و برای افزایش خواص مکانیکی، از اصلاح‌کننده‌های سطحی استفاده شده است که منجر به افزایش زبری سطح و اتصال مناسب‌تر الیاف تقویت‌کننده در داخل زمینه شده است. هم‌چنین در ذرات نانو مقیاس که مستعد چسبیده شدن به یکدیگر و تجمع‌اند، پراکنده‌سازی ذرات در داخل زمینه و افزایش خواص مکانیکی را به‌همراه دارد. این امر، امکان افزودن مقادیر بیشتر تقویت‌کننده‌های لیفی و یا ذره‌ای را در داخل ساختار میسر می‌سازد و به دو صورت امکان پذیر است: صورت اول آن، اصلاح و عمل‌آوری به‌روش شیمیایی است که در حال حاضر بخش بزرگی از فرایند اصلاح الیاف استفاده‌شده در چندسازه‌های پلی‌پروپیلن به این روش انجام می‌شود. نکته‌ای که در این‌جا مطرح است یافتن درصد مناسبی از میزان اصلاح‌کننده‌ها برای افزودن و استفاده در ساختار چندسازه است که این میزان به‌صورت بهینه است و اغلب اوقات با افزایش مقدار آن، خواص استحکامی چندسازه افزایش می‌یابد و بعد از افزودن مقدار بیشتری از آن، خواص مکانیکی دچار کاهش می‌شود. صورت دوم، روش‌های فیزیکی است که به‌علت استفاده نشدن از مواد شیمیایی و نداشتن پسماندهای خطرناک، دوستدار محیط زیست و دارای هزینه‌های اضافی برای خرید مواد شیمیایی و نگهداری آن‌ها نیست. به همین علت، مورد استقبال عموم پژوهشگران قرار گرفته است. با توجه به این‌که این روش‌ها دارای روش‌های جدید هستند و هنوز مطالعات کافی بر روی عمل‌آوری الیاف برای استفاده در چندسازه‌های پلی‌پروپیلن انجام نگرفته است، امکان دارد تا در آینده بخش بیشتری از تحقیقات بر روی ساخت چندسازه‌های پلی‌پروپیلن با استفاده از الیاف تقویت‌کنندهٔ اصلاح‌شده با این روش انجام گیرد. در پایان می‌توان انتظار داشت که بخش زیادی از پژوهش‌های آینده در این راستا متمرکز شود و پژوهشگران بسیاری برای ساخت قطعات مورد استفاده در صنایع گوناگون، از چندسازه‌های هیبریدی حاوی الیاف طبیعی استفاده کنند. انتظار آن می‌رود تا در آینده بخش بزرگی از پژوهش‌ها به بررسی روش‌های اصلاح سطحی الیاف طبیعی با روش پلاسما اختصاص یابد که در آن‌ها متغیرهای شکل‌گیری پلاسما و مدت زمان استفاده از آن مطالعه شده باشد.

مراجع

[1] McIntyre, J. E. Ed., Synthetic fibres: nylon, polyester, acrylic, polyolefin. Taylor & Francis US., (2005).

[2] Borah, J. S., Kim, D. S., "Recent development in thermoplastic/wood composites and nanocomposites: A review", Korean J. Chem. Eng., 33, pp. 3035–3049, (2016).

[3] Jaleh, B., Etivand, E. S., Mohazzab, B. F., Nasrollahzadeh, M., Varma, R. S., "Improving wettability: Deposition of TiO_2 nanoparticles on the O_2 plasma activated polypropylene membrane", Int. J. Mol. Sci., 20, p. 3309, (2019).

[4] Ghasemi, F. A., Niyaraki, M. N., Ghasemi, I., Daneshpayeh, S., "Predicting the tensile strength and elongation at break of PP/graphene/glass fiber/EPDM nanocomposites using response surface methodology", Mech. Adv. Mater. Struct., pp. 1-9, (2019).

[5] Tang, W., Han, J., Zhang, S., Sun, J., Li, H., Gu, X., "Synthesis of 4A zeolite containing la from kaolinite and its effect on the flammability of polypropylene", Polym. Compos., 39, pp. 3461–3471, (2018).

[6] Shah, A. ur R., Prabhakar, M. N., Saleem, M., Song, J. Il, "Development of biowaste encapsulated polypropylene composites: Thermal, optical, dielectric, flame retardant, mechanical, and morphological properties", Polym. Compos., 38, pp. 236–243, (2017).

[7] Xin, Z. X., Zhang, Z. X., Pal, K., Byeon, J. U., Lee, S. H., Kim, J. K., "Study of microcellular injection-molded polypropylene/waste ground rubber tire powder blend", Mater. Des., 31, pp. 589–593, (2010).

[8] Zhang, D., He, M., Qin, S., Yu, J., "Effect of fiber length and dispersion on properties of long glass fiber reinforced thermoplastic composites based on poly (butylene terephthalate)", RSC Adv., 7, pp. 15439–15454, (2017).

[9] Ornaghi, H. L., Bolner, Fiorio, A. S., Zattera, R., A. J., Amico, S. C., "Mechanical and dynamic mechanical analysis of hybrid composites molded by resin transfer molding", J. Appl. Polym. Sci., 118, pp. 887–896, (2010).

[10] Yashas Gowda, T. G., Sanjay, M. R., Subrahmanya Bhat, K., Madhu, P., Senthamaraikannan, P., Yogesha, B., "Polymer matrix-natural fiber composites: An overview", Cogent Eng., 5, (2018).

[11] Kumar, A., Sharma, K., Dixit, A. R., "A review on the mechanical properties of polymer composites reinforced by carbon nanotubes and graphene", Carbon Lett., pp. 1-17, (2020).

[12] Hemath, M., Mavinkere Rangappa, S., Kushvaha, V., Dhakal, H. N., Siengchin, S., "A comprehensive review on mechanical, electromagnetic radiation shielding, and thermal conductivity of fibers/inorganic fillers reinforced hybrid polymer composites", Polym. Compos., 41, pp. 3940–3965, (2020).

[13] Arumugam, S., Kandasamy, J., Md Shah, A. U., Hameed Sultan, M. T., Safri, S. N. A., Abdul Majid, M. S., Basri, A. A. Mustapha, F., "Investigations on the Mechanical properties of glass fiber/sisal fiber/chitosan reinforced hybrid polymer sandwich composite scaffolds for bone fracture fixation applications", Polymers (Basel)., 12, pp. 1–19, (2020).

[14] Kulkarni, P., Mali, K. D., Singh, S., "An overview of the formation of fibre waviness and its effect on the mechanical performance of fibre reinforced polymer composites", Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., 137, p. 106013, (2020).

[15] Fu, S., Yu, B., Tang, W., Fan, M., Chen, F., Fu, Q., "Mechanical properties of polypropylene composites reinforced by hydrolyzed and microfibrillated Kevlar fibers", Compos. Sci. Technol., 163, pp. 141–150, (2018).

[16] Tang, G., Gu, B., Hu, X., Wei, G., Claramunt, C., Liu, C., "Mechanical properties and characteristic of surface treated bamboo fiber reinforced PP/PS blends", Surf. Interface Anal., 50, pp. 603–607, (2018).

[17] Bozkurt, Ö. Y., Erkliğ, A., Bulut, M., "Hybridization effects on charpy impact behavior of basalt/aramid fiber reinforced hybrid composite laminates", Polym. Compos., 39, pp. 467–475, (2018).

[18] Correa-Aguirre, J. P., Luna-Vera, F., Caicedo, C., Vera-Mondragón, B., Hidalgo-Salazar, M. A., "The effects of reprocessing and fiber treatments on the properties of polypropylene-sugarcane bagasse biocomposites", Polymers (Basel)., 12, p. 1440, (2020).

[19] Pak, S., Park, S., Song, Y. S., Lee, D., "Micromechanical and dynamic mechanical analyses for characterizing improved interfacial strength of maleic anhydride compatibilized basalt fiber/polypropylene composites", Compos. Struct., 193, pp. 73–79, (2018).

[20] Liang, C., "Superior electromagnetic interference shielding 3D graphene nanoplatelets/reduced graphene oxide foam/epoxy nanocomposites with high thermal conductivity", J. Mater. Chem. C, 7, pp. 2725–2733, (2019).

[21] Sinha, A. K., Narang, H. K., Bhattacharya, S., "Mechanical properties of hybrid polymer composites: a review", J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng., 42, pp.1-13, (2020).

[22] Balan, A. K., Mottakkunnu Parambil, S., Vakyath, S., Thulissery Velayudhan, J., Naduparambath, S., Etathil, P., "Coconut shell powder reinforced thermoplastic polyurethane/natural rubber blendcomposites: effect of silane coupling agents on the mechanical and thermal properties of the composites", J. Mater. Sci., 52, pp. 6712–6725, (2017).

[23] Sahin, M., "Tailoring the interfaces in glass fiber-reinforced photopolymer composites", Polymer (Guildf)., 141, pp. 221–231, (2018).

[24] Wang, S., Ma, J., Feng, X., Cheng, J., Ma, X., Zhao, Y., Chen, L., "An effective surface modification of UHMWPE fiber for improving the interfacial adhesion of epoxy resin composites", Polym. Compos., 41, pp. 1614–1623, (2020).

[25] Gatenholm, P., Bertilsson, H., Mathiasson, A., "The effect of chemical composition of interphase on dispersion of cellulose fibers in polymers. I. PVC-coated cellulose in polystyrene", J. Appl. Polym. Sci., 49, pp. 197–208, (1993).

[26] Keller, A., "Compounding and mechanical properties of biodegradable hemp fibre composites", Compos. Sci. Technol., 63, pp. 1307–1316, (2003).

[27] Rana, A. K., Mandal, A., Bandyopadhyay, S., "Short jute fiber reinforced polypropylene composites: Effect of compatibiliser, impact modifier and fiber loading", Compos. Sci. Technol., 63, pp. 801–806, (2003).

[28] Rouison, D., Sain, M., Couturier, M., "Resin transfer molding of natural fiber reinforced composites: Cure simulation", Compos. Sci. Technol., 64, pp. 629–644, (2004).

[29] Mohanty, A. K., Wibowo, A., Misra, M., Drzal, L. T., "Effect of process engineering on the performance of natural fiber reinforced cellulose acetate biocomposites", Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., 35, pp. 363–370, (2004).

[30] Baley, C., "Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness

increase", Compos. - Part A Appl. Sci. Manuf., 33, pp. 939–948, (2002).

[31] Van De Velde, K., Kiekens, P., "Thermal degradation of flax: The determination of kinetic parameters with thermogravimetric analysis", J. Appl. Polym. Sci., 83, pp. 2634–2643, (2002).

[32] Wallenberger, F. T., Weston, N., Natural fibers plastics and composites. Springer Science & Business Media, (2003).

[33] Pervaiz, M., Sain, M. M., "Carbon storage potential in natural fiber composites", Resour. Conserv. Recycl., 39, pp. 325–340, (2003).

[34] Wu, H., Lin, X., Zhou, A., "A review of mechanical properties of fibre reinforced concrete at elevated temperatures", Cem. Concr. Res., 135, p. 106117, (2020).

[35] Mohanty, A. K., Misra, M., Drzal, L. T., "Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: An overview", Compos. Interfaces, 8, pp. 313–343, (2001).

[36] Saechtling, H., Woebcken, W., Haim, J., Hyatt, D., "International Plastics Handbook: for the technologist, engineer, and user. Hanser, (1995).

[37] Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G., V, alenza, A., "A review on basalt fibre and its composites", Compos. Part B Eng., 74, pp. 74–94, (2015).

[38] Militký, J., Kovačič, V., Rubnerová, J., "Influence of thermal treatment on tensile failure of basalt fibers", Eng. Fract. Mech., 69, pp. 1025–1033, (2002).

[39] (Rik) Brouwer, W. D., "Natural Fibre Composites in Structural Components: Alternative Applications", Altern. Appl. Sisal Henequen, pp. 75–82, (2000).

[40] Bisanda, E. T. N., Ansell, M. P., "Properties of sisal-CNSL composites", J. Mater. Sci., 27, pp. 1690–1700, (1992).

[41] Safiuddin, M., Yakhlaf, M., Soudki, K. A., "Key mechanical properties and microstructure of carbon fibre reinforced self-consolidating concrete", Constr. Build. Mater., 164, pp. 477–488, (2018).

[42] Shirvanimoghaddam, K., Hamim, S. U., Akbari, M. K., Fakhrhoseini, S. M., Khayyam, H., Pakseresht, A. H., Ghasali, E., Zabet, M., Munir, K. S., Jia, S., Davim, J. P., "Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties", Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., 92, pp. 70–96, (2017).

[43] Ozawa, M., Morimoto, H., "Effects of various fibres on high-temperature spalling in highperformance concrete", Constr. Build. Mater., 71, pp. 83–92, (2014).

[44] Pakravan, H. R., Latifi, M., Jamshidi, M., "Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review", Constr. Build. Mater., 142, pp. 280–294, (2017).

[45] Bos, H. L., Van Den Oever, M. J. A. and Peters, O. C. J. J., "Tensile and compressive properties of flax fibres for natural fibre reinforced composites", J. Mater. Sci., 37, pp. 1683–1692, (2002).

[46] Lumingkewas, R. H., Husen, A., Andrianus, R., "Effect of fibers length and fibers content on the splitting tensile strength of coconut fibers reinforced concrete composites", Key Eng. Mater., 748, pp. 311–315, (2017).

[47] Eichhorn, S. J., Sirichaisit, J., Young, R. J., "Deformation mechanisms in cellulose fibres, paper and wood", J. Mater. Sci., 36, pp. 3129–3135, (2001).

[48] Kizilkanat, A. B., Kabay, N., Akyüncü, V., Chowdhury, S., Akça, A. H., "Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: An experimental study", Constr. Build. Mater., 100, pp. 218–224, (2015).

[49] Liu, S., Zhu, D., Ou, Y., Yao, Y., Shi, C., "Impact response of basalt textile reinforced concrete subjected to different velocities and temperatures", Constr. Build. Mater., 175, pp. 381–391, (2018).

[50] Behera, P., Baheti, V., Militky, J., Louda, P., "Elevated temperature properties of basalt microfibril filled geopolymer composites", Constr. Build. Mater., 163, pp. 850–860, (2018).

[51] Kalaj, M., Denny, M. S., Bentz, K. C., Palomba, J. M., Cohen, S. M., "Nylon–MOF Composites through Postsynthetic Polymerization", Angew. Chemie - Int. Ed., 58, pp. 2336–2340, (2019).

[52] Arbelaiz, A., Fernández, G., Orue, A., "The effect of montmorillonite modification and the use of coupling agent on mechanical properties of polypropylene–clay nanocomposites", Polym. Polym. Compos., p. 0967391120930613, (2020).

[53] Wang, S., Zhong, J., Gu, Y., Li, G., Cui, J., "Mechanical properties, flame retardancy, and thermal stability of basalt fiber reinforced polypropylene composites", Polym. Compos., 41, pp. 4181–4191, (2020).

[54] Świetlicki, M., Chocyk, D., Klepka, T., Prószyński, A., Kwaśniewska, A., Borc, J., Gładyszewski, G., "The structure and mechanical properties of the surface layer of polypropylene polymers with talc additions", Materials (Basel)., 13, p. 698, (2020).

[55] Castillo, L. A., Barbosa, S. E., "Influence of processing and particle morphology on final properties of polypropylene/talc nanocomposites", Polym. Compos., 41, pp. 3170–3183, (2020).

[56] Yousefzadeh, Kashfi, S. M., Kahhal, Ansari-asl, P. A., "An Experimental Investigation on Tensile and Impact Properties of Bagasse/Polypropylene Natural Composite," Amirkabir Journal of Mechanical Engineering., Vol. 52, no. 8, pp. 81-90, In Persian, (2019), doi: 10.22060/MEJ.2019.15715.6197.

[57] Awad, S. A., Khalaf, E. M., "Investigation of improvement of properties of polypropylene modified by nano silica composites", Compos. Commun., 12, pp. 59–63, (2019).

[58] Zolfaghari, S., Paydayesh, A., Jafari, M., "Mechanical and Thermal Properties of Polypropylene/Silica Aerogel Composites", J. Macromol. Sci. Part B Phys., 58, pp. 305–316, (2019).

[59] Kordani, N., Fereidoon, A., Sadoddin, S. Ghorbanzadeh, A. M., "Investigation of Mechanical and Thermal Behavior of Reinforced Polypropylene with Single Walled Carbon Nanotube", Aerosp. Mech. J., 6, pp. 1–10, (2010).

[60] Zhou, S., Hrymak, A. N., Kamal, M. R., "Electrical, thermal, and mechanical properties of polypropylene/ multiwalled carbon nanotube micromoldings", Polym. Compos., 41, pp. 1507–1520, (2020).

[61] Kiss, P., Stadlbauer, W., Burgstaller, C., Archodoulaki, V. M., "Development of highperformance glass fibre-polypropylene composite laminates: Effect of fibre sizing type and coupling agent concentration on mechanical properties", Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., 138, p. 106056, (2020).

[62] Nobe, R., Qiu, J., Kudo, M., Zhang, G., "Morphology and mechanical investigation of microcellular injection molded carbon fiber reinforced polypropylene composite foams", Polym. Eng. Sci., 60, pp. 1507–1519, (2020).

[63] Wang, Y., Cheng, L., Cui, X., Guo, W., "Crystallization behavior and properties of glass fiber reinforced polypropylene composites", Polymers (Basel)., 11, p. 1198, (2019).

[64] Unterweger, C., Mayrhofer, T., Piana, F., Duchoslav, J., Stifter, D., Poitzsch, C., Fürst, C., "Impact of fiber length and fiber content on the mechanical properties and electrical conductivity of short carbon fiber reinforced polypropylene composites", Compos. Sci. Technol., 188, p. 107998, (2020).

[65] Thwe, M. M., Liao, K., "Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites", Compos. Sci. Technol., 63, pp. 375–387, (2003).

[66] Chow, W. S., Bakar, A. A., Ishak, Z. M., Karger-Kocsis, J. and Ishiaku, U. S., "Effect of maleic anhydride-grafted ethylene–propylene rubber on the mechanical, rheological and morphological properties of organoclay reinforced polyamide 6/polypropylene nanocomposites." Eur. Polym. J., 41, pp. 687-696, (2005).

[67] Roohani, M., Kord, B., "Dynamic mechanical and thermal properties of bagasse/ glass fiber/ polypropylene hybrid composites," Iranian journal of wood and paper industries., Vol. 7, No. 1, pp. 103-114, In Persian, (2016).

[68] Payganeh, G., Ashnaie Ghasemi, F., Afshari, P., "Experimental study of propylene/waste rubber/Nano clay Nano composites," Iranian Journal of Mechanical Engineering., Vol. 15, no. 1, pp. 82-99, In Persian, (2013).

[69] Liu, Y., Zhang, S., Wang, X., Pan, Y., Zhang, F., Huang, J., "Mechanical and aging resistance properties of polypropylene (PP) reinforced with nanocellulose/attapulgite composites (NCC/AT)", Compos. Interfaces, 27, pp. 73–85, (2020).

[70] Zhu, B., Li, W., Song, J., Wang, J., "Structure and Properties of Polypropylene/Polyolefin Elastomer/ Organic Montmorillonite Nanocomposites", J. Macromol. Sci. Part B Phys., 58, pp. 73–87, (2019).

[71] Kalagar, M., Marzban Moridani, E., "Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review," basparesh., Vol. 3, No. 3, pp. 76-87, In Persian, (2013), doi: 10.22063/BASPARESH.2013.1006.

[72] Naik, J. B., Mishra, S., "The compatibilizing effect of maleic anhydride on swelling properties of plant-fiber-reinforced polystyrene composites", Polym.-Plast. Technol. Eng., 45, pp. 923–927, (2006).

[73] Joseph, P. V., Joseph, K., Thomas, S., "Effect of processing variables on the mechanical properties of sisal-fiber-reinforced polypropylene composites", Compos. Sci. Technol., 59, pp. 1625–1640, (1999).

[74] Madsen, B., Lilholt, H., "Physical and mechanical properties of unidirectional plant fibre composites-an evaluation of the influence of porosity", Compos. Sci. Technol., 63, pp. 1265–1272, (2003).

[75] Mwaikambo, L. Y., Martuscelli, E., Avella, M., "Kapok/cotton fabric polypropylene composites", Polym. Test., 19, pp. 905–918, (2000).

[76] Pickering, K. L., Ji, C., "The effect of poly[methylene(polyphenyl isocyanate)] and maleated polypropylene coupling agents on New Zealand radiata pine fiber-polypropylene composites", J. Reinf. Plast. Compos., 23, pp. 2011–2024, (2004).

[77] Hambali, A., Sapuan, M. S., Ismail, N., Nukman, Y., "Material selection of polymeric composite automotive bumper beam using analytical hierarchy process", J. Cent. South Univ. Technol., 17, pp. 244–256, (2010).

[78] Chandekar, H., Chaudhari, V., Waigaonkar, S., Mascarenhas, A., "Effect of chemical treatment on mechanical properties and water diffusion characteristics of jute-polypropylene composites", Polym. Compos., 41, pp. 1447–1461, (2020).

[79] Liu, X., Hao, S. J., Cui, Y. H., Chen, H. Y., "Improvement on the interfacial compatibility of jute fiber-reinforced polypropylene composites by different surface treatments", J. Ind. Text., 49,

pp. 906–922, (2020).

[80] Ray, D., Sarkar, B. K., Rana, A. K., Bose, N. R., "Effect of alkali treated jute fibres on composite properties", Bull. Mater. Sci., 24, pp. 129–135, (2001).

[81] Agrawal, R., Saxena, N. S., Sharma, K. B., Thomas, S., Sreekala, M. S., "Activation energy and crystallization kinetics of untreated and treated oil palm fibre reinforced phenol formaldehyde composites", Mater. Sci. Eng. A, 277, pp. 77–82, (2000).

[82] Jähn, A., Schröder, M. W., Füting, M., Schenzel, K., Diepenbrock, W., "Characterization of alkali treated flax fibres by means of FT Raman spectroscopy and environmental scanning electron microscopy", Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc., 58, pp. 2271–2279, (2002).

[83] Mishra, S., Mohanty, A. K., Drzal, L. T., Misra, M., Parija, S., Nayak, S. K., Tripathy, S.S., "Studies on mechanical performance of biofibre/glass reinforced polyester hybrid composites", Compos. Sci. Technol., 63, pp. 1377–1385, (2003).

[84] Hill, C. A. S., Khalil, H. P. S. A., Hale, M. D., "A study of the potential of acetylation to improve the properties of plant fibres", Ind. Crops Prod., 8, pp. 53–63, (1998).

[85] Sreekala, M. S., Thomas, S., "Effect of fibre surface modification on water-sorption characteristics of oil palm fibres", Compos. Sci. Technol., 63, pp. 861–869, (2003).

[86] Manikandan Nair, K. C., Thomas, S., Groeninckx, G., "Thermal and dynamic mechanical analysis of polystyrene composites reinforced with short sisal fibres", Compos. Sci. Technol., 61, pp. 2519–2529, (2001).

[87] Van de Weyenberg, I., Ivens, J., De Coster, A., Kino, B., Baetens, E., Verpoest, I., "Influence of processing and chemical treatment of flax fibres on their composites", Compos. Sci. Technol., 63, pp. 1241–1246, (2003).

[88] Mohd Ishak, Z. A., Ariffin, A., Senawi, R., "Effects of hygrothermal aging and a silane coupling agent on the tensile properties of injection molded short glass fiber reinforced poly(butylene terephthalate) composites", Eur. Polym. J., 37, pp. 1635–1647, (2001).

[89] Lee, G.-W., "Effects of surface modification on the resin-transfer moulding (RTM) of glassfibre/ unsaturated-polyester composites", Compos. Sci. Technol., 62, pp. 9–16, (2002).

[90] Kim, S. H., Kim, E. S., Choi, K., Cho, J. K., Sun, H., Yoo, J. W., Park, I. K., Lee, Y., Choi, H. R., Kim, T., Suhr, J., "Rheological and mechanical properties of polypropylene composites containing microfibrillated cellulose (MFC) with improved compatibility through surface silylation", Cellulose, 26, pp. 1085–1097, (2019).

[91] Valadez-Gonzalez, A., Cervantes-Uc, J. M., Olayo, R., Herrera-Franco, P. J., "Effect of fiber surface treatment on the fiber-matrix bond strength of natural fiber reinforced composites", Compos. Part B Eng., 30, pp. 309–320, (1999).

[92] Joseph, K., Thomas, S., Pavithran, C., "Effect of chemical treatment on the tensile properties of short sisal fibre-reinforced polyethylene composites", Polymer (Guildf)., 37, pp. 5139– 5149, (1996).

[93] Sreekala, M. S., Kumaran, M. G., Joseph, S., Jacob, M., Thomas, S., "Oil palm fibre reinforced phenol formaldehyde composites: influence of fibre surface modifications on the mechanical performance", Appl. Compos. Mater., 7, pp. 295–329, (2000).

[94] Joseph, P. V., Joseph, K., Thomas, S., Pillai, C. K. S., Prasad, V. S., Groeninckx, G., Sarkissova, M., "The thermal and crystallisation studies of short sisal fibre reinforced polypropylene composites", Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., 34, pp. 253–266, (2003).

[95] Tian, H., Yao, Y., Wang, C., Jv, R., Ge, X., Xiang, A., "Essential work of fracture analysis for surface modified carbon fiber/polypropylene composites with different interfacial adhesion", Polym. Compos., 41, pp. 3541–3551, (2020).

[96] Thwe, M. M., Liao, K., "Environmental effects on bamboo-glass/polypropylene hybrid composites", J. Mater. Sci., 38, pp. 363–376, (2003).

[97] Mohanty, S., Nayak, S. K., Verma, S. K., Tripathy, S. S., "Effect of MAPP as a Coupling Agent on the Performance of Jute-PP Composites", J. Reinf. Plast. Compos., 23, pp. 625–637, (2004).

[98] Golparvar, M., Fasihi, M., "Investigation of mechanical properties of polypropylene-based hybrid nanocomposites using experimental design," Scientific Information Database., Vol. 5, No. 3, pp. 307-314, In Persian, (2018).

[99] Khademi Eslam, H., Yousefnia, Z., Ghasemi, E., Talaeipoor, T.,"Investigating the mechanical properties of wood flour/ polypropylene/ nanoclay composite," Iranian journal of wood and paper science research., Vol. 28, No. 1, pp. 153-168, In Persian, (2013). doi: 10.22092/IJWPR.2013.3112

[100] Botev, M., Betchev, H., Bikiaris, D., Panayiotou, C., "Mechanical properties and viscoelastic behavior of basalt fiber-reinforced polypropylene", J. Appl. Polym. Sci., 74, pp. 523– 531, (1999).

[101] Matkó, S., Anna, P., Marosi, G., Szep, A., Keszei, S., Czigány, T., Pölöskei, K., "Use of Reactive Surfactants in Basalt Fiber Reinforced Polypropylene Composites", Macromol. Symp., 202, pp. 255–268, (2003).

[102] Kuciel, S., Kufel, A., "Novel hybrid composites based

on polypropylene with basalt/carbon fiber", Polimery, 63, pp. 387-390 (2018).

[103] Kalia, I. K., Susheel, Kaith, B. S., "Cellulose fibers: bio-and nano-polymer composites: green chemistry and technology", Springer Science & Business Media., (2011).

[104] Kim, T. J., Lee, Y. M., Im, S. S., "The preparation and characteristics of low-density polyethylene composites containing cellulose treated with cellulase", Polym. Compos., 18, pp. 273–282, (1997).

[105] Zhou, Z., Liu, X., Hu, B., Wang, J., Xin, D., Wang, Z., Qiu, Y., "Hydrophobic surface modification of ramie fibers with ethanol pretreatment and atmospheric pressure plasma treatment", Surf. Coatings Technol., 205, pp. 4205– 4210, (2011).

[106] Hill, C. A. S., Norton, A., Newman, G., "The water vapor sorption behavior of natural fibers", J. Appl. Polym. Sci., 112, pp. 1524–1537, (2009).

[107] Pommet, M., Juntaro, J., Heng, J. Y., Mantalaris, A., Lee, A. F., Wilson, K., Kalinka, G., Shaffer, M. S. and Bismarck, A., "Surface modification of natural fibers using bacteria: Depositing bacterial cellulose onto natural fibers to create hierarchical fiber reinforced nanocomposites", Biomacromolecules, 9, pp. 1643–1651, (2008).

[108] Wielage, B., Lampke, T., Marx, G., Nestler, K., Starke, D., "Thermogravimetric and differential scanning calorimetric analysis of natural fibres and polypropylene", Thermochim. Acta, 337, pp. 169–177, (1999).

[109] Bismarck, A., Kumru, M. E., ürgen Springer, J., "Influence of oxygen plasma treatment of PAN-based carbon fibers on their electrokinetic and wetting properties", J. Colloid Interface Sci., 210, pp. 60–72, (1999).

[110] Ho, K. K. C., Lee, A. F., Lamoriniere, S., Bismarck, A., "Continuous atmospheric plasma fluorination of carbon fibres", Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., 39, pp. 364–373, (2008).

[111] Morales, J., Olayo, M. G., Cruz, G. J., Herrera-Franco, P., Olayo, R., "Plasma modification of cellulose fibers for composite materials", J. Appl. Polym. Sci., 101, pp. 3821–3828, (2006).

[112] Bismarck A, S. J., "Wettability of Materials: Plasma Treatment Effects, Encyclopedia of Surface and Colloid Science", Somasundaran, Ed. Taylor & Francis, pp. 6592–6610, (2006).

[113] Kale, K. H., Desaia, A. N., "Atmospheric pressure plasma treatment of textiles using nonpolymerising gases", Indian J. Fibre Text. Res., 36, pp. 289–299, (2011).

[114] Schütze, A., Jeong, J. Y., Babayan, S. E., Park, J., Selwyn, G. S., Hicks, R. F., "The atmosphericpressure plasma jet: A review and comparison to other plasma sources", IEEE Trans. Plasma Sci., 26, pp. 1685–1694, (1998).

[115] Ragoubi, M., Bienaimé, D., Molina, S., George, B., Merlin, A., "Impact of corona treated hemp fibres onto mechanical properties of polypropylene composites made thereof", Ind. Crops Prod., 31, pp. 344–349, (2010).

[116] Kaith, B. S., Kalia, S., "Graft copolymerization of MMA onto flax under different reaction conditions: A comparative study", Express Polym. Lett., 2, pp. 93–100, (2008).

[117] Podgorski, L., Chevet, B., Onic, L., Merlin, A., "Modification of wood wettability by plasma and corona treatments", Int. J. Adhes. Adhes., 20, pp. 103–111, (2000).

[118] Baltazar-Y-Jimenez, A., Bismarck, A., "Surface modification of lignocellulosic fibres in atmospheric air pressure plasma", Green Chem., 9, pp. 1057–1066, (2007).

[119] Baltazar-y-Jimenez, A., Juntaro, J., Bismarck, A., "Effect of atmospheric air pressure plasma treatment on the thermal behaviour of natural fibres and dynamical mechanical properties of randomly-oriented short fibre composites", J. Biobased Mater. Bioenergy, 2, pp. 264– 272, (2008).

[120] Yuan, X., Jayaraman, K., Bhattacharyya, D., "Effects of plasma treatment in enhancing the performance of woodfibre-polypropylene composites", Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., 35, pp. 1363–1374, (2004).

[121] Yuan, D. B., Xiaowen, Krishnan Jayaraman, "Mechanical properties of plasma-treated sisal fibre-reinforced polypropylene composites." J. Adhes. Sci. Technol., 18, pp.1027-1045, (2004).

[122] Marais, S., Gouanvé, F., Bonnesoeur, A., Grenet, J., Poncin-Epaillard, F., Morvan, C., Métayer, M. "Unsaturated polyester composites reinforced with flax fibers: Effect of cold plasma and autoclave treatments on mechanical and permeation properties", Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., 36, pp. 975–986, (2005).

[123] Sinha, E., Panigrahi, S., "Effect of plasma treatment on structure, wettability of jute fiber and flexural strength of its composite", J. Compos. Mater., 43, pp. 1791–1802, (2009).

[124] Shenton, M. J., Stevens, G. C., "Surface modification of polymer surfaces: Atmospheric plasma versus vacuum plasma treatments", J. Phys. D. Appl. Phys., 34, pp. 2761–2768, (2001).

[125] Baltazar-y-Jimenez, A., Bistritz, M., Schulz, E., Bismarck, A., "Atmospheric air pressure plasma treatment of lignocellulosic fibres: Impact on mechanical properties and adhesion to cellulose acetate butyrate", Compos. Sci. Technol., 68, pp. 215–227, (2008).

[126] Kan, C. W., Yuen, C. W. M., "Influence of low

temperature plasma treatment on the properties of tencel and viscose rayon fibers", IEEE Trans. Plasma Sci., 37, pp. 1615– 1619, (2009).

[127] Baghery Borooj, M., Mousavi Shoushtari, A., Haji, A., "The influence of plasma treatment on the surface characterization and mechanical properties of the carbon fiber used in composites," The first national conference on the use of composites in the manufacturing industry, Tehran, In Persian, (2016).

[128] John, M. J., Anandjiwala, R. D., "Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites", Polym. Compos., 29, pp. 187–207, (2008).

[129] Li, X., Tabil, L. G., Panigrahi, S., "Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiberreinforced composites: A review", J. Polym. Environ., 15, pp. 25–33, (2007).

[130] Lee, K. -Y., Delille, A., Bismarck, A., "Greener Surface Treatments of Natural Fibres for the Production of Renewable Composite Materials", Cellul. Fibers Bio- Nano-Polymer Compos., pp. 155–178, (2011).

[131] Noeske, M., Degenhardt, J., Strudthoff, S., Lommatzsch, U., "Plasma jet treatment of five polymers at atmospheric pressure: Surface modifications and the relevance for adhesion", Int. J. Adhes. Adhes., 24, pp. 171–177, (2004).