Ministry of Science, Research and Technology
Institute for Color Science & Technology

available online @ www.jcst.icrc.ac.ir
Journal of Color Science and Technology, 20, 3(2026), 207-226
Article type: Research article
Open access

نشریه علمی علوم و فناوری رنگ
Journal of Color Science and Technology
www.jcst.icrc.ac.ir

Effect of Hybrid Epoxy–Polyester Powder Coating Waste Particles on the Morphology and Thermal Properties of Polyamide 6

Sajedeh Jeddi[1], Davood Zaarei[*1], Ramin Khajavi[1], Morteza Ehsani[2]
1- Department of Chemical Polymer and Textile Engineering, ST.C., Islamic Azad University, P.O. Box: 1777613651, Tehran, Iran
2- Department of Polymer Processing, Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14975-112, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 08-10-2026
Accepted: 10-11-2026
Available online: 21-11-2026
Print ISSN: 1735-8779
Online ISSN: 2383-2169

DOI: 10.30509/jcst.2026.167898.1297

Keywords:
Coating wastes
Compatibilizer
Polymer compound
Epoxy / polyester

ABSTRACT

The objective of this research is to investigate the feasibility of reusing hybrid powder coating wastes within a Polyamide matrix, with a focus on environmental sustainability. Neat Polyamide served as the reference sample, while composite formulations were prepared containing 5, 15, and 25 wt. % powder coating waste, supplemented with 1, 3, and 5 wt. % of a compatibilizer. The materials were compounded in a twin-screw extruder, subsequently pelletized and molded into test specimens. FTIR confirmed the formation of covalent bonds between the functional groups of the compatibilizer and the amine groups of the Polyamide. Thermal analyses indicated that the optimal formulation enhanced thermal stability and acted as a nucleating agent within the material structure. Electron microscopy revealed a transition from a smooth fracture surface to a fully continuous morphology, free of interfacial voids. However, the addition of waste exceeding 5 wt. % resulted in agglomeration and the creation of stress concentration points. These findings suggest a pathway for the reuse of powder coating wastes while maintaining the desirable properties of the Polyamide.

***Corresponding author: * dzaarei@iau.ac.ir**

This work is licensed **under a Creative Commons Attribution 4.0 International License**

نشریه علمی علوم و فناوری رنگ
Journal of Color Science and Technology
www.jcst.icrc.ac.ir

دسترسی آنلاین: www.jcst.icrc.ac.ir
نشریه علمی علوم و فناوری رنگ/ ۲۰، (۱۴۰۵)۳، ۲۲۶ـ۲۰۷
نوع مقاله: پژوهشی
دسترسی آزاد

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
پژوهشگاه رنگ

تاثیر حضور ذرات ضایعات بازیافتی پوشش‌های پودری هیبرید(اپوکسی ـ پلی استر) بر روی ریخت و خواص حرارتی پلی آمید۶

ساجده جدی[۱]، داود زارعی[۲*]، رامین خواجوی[۳]، مرتضی احسانی[۴]

۱ـ دانشجوی دکترا، گروه مهندسی شیمی، پلیمر و نساجی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، صندوق‌پستی: ۱۷۷۷۶۱۳۶۵۱
۲ـ دانشیار، گروه مهندسی شیمی، پلیمر و نساجی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، صندوق‌پستی: ۱۷۷۷۶۱۳۶۵۱
۳ـ استاد، گروه مهندسی شیمی، پلیمر و نساجی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، صندوق‌پستی: ۱۷۷۷۶۱۳۶۵۱
۴ـ استاد، پژوهشکده فرایند پلیمرها، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران، صندوق‌پستی: ۱۱۲-۱۴۹۷۵

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۷/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۱۹
در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۵/۰۸/۳۰
شاپا چاپی: ۸۷۷۹-۱۷۳۵
شاپا الکترونیکی: ۲۱۶۹-۲۳۸۳

DOI: 10.30509/jcst.2026.167898.1297

واژه‌های کلیدی:
ضایعات پوشش
سازگارکننده
ترکیب پلیمری
اپوکسی /پلی استر

چکیده

هدف این پژوهش، بررسی امکان بازیابی و استفاده مجدد از ضایعات پوشش‌های پودری هیبرید در بستر پلی‌آمید ۶، با رویکرد زیست‌محیطی است. پلی‌آمید ۶ خالص به‌عنوان نمونه مرجع و ترکیباتی حاوی ۵، ۱۵ و ۲۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری، همراه با ۱، ۳ و ۵ درصد سازگارکننده، تهیه شدند. مواد پس از خشکانش و اختلاط در اکسترودر دومارپیچ، ریزدانه‌سازی و شکل‌دهی شدند. آزمون طیف‌سنجی فروسرخ تشکیل پیوندهای کووالانسی بین گروه‌های عاملی سازگارکننده و گروه‌های آمینی پلی آمید۶ را تأیید کرد. نتایج آزمون‌های حرارتی نشان داد که فرمول‌بندی بهینه حاوی ضایعات پودری و سازگار کننده ،پایداری حرارتی را بهبود بخشیده و به‌عنوان عامل هسته‌زا در ساختار عمل کرده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی گذار از سطح شکست صاف به ریخت کاملاً پیوسته را نشان داد که فاقد حفرات فصل مشترک است. افزودن ضایعات بیش از۵ درصد وزنی منجر به تجمع ذرات و ایجاد تمرکز تنش شد. این یافته‌ها مسیری را برای استفاده مجدد ضایعات پوشش پودری را با حفظ خواص پلی‌آمید پیشنهاد می‌دهد.

***Corresponding author: * dzaarei@iau.ac.ir**

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

۱ـ مقدمه

امروزه، برای برآوردن عادات مصرف به ظاهر غیرقابل کنترل بشر، تولیدکنندگان عموماً به مواد خامی روی می‌آورند که تولید آسان، یافتن ساده و کم‌هزینه باشد. در این مرحله، پلیمرها و مواد با بستر پلیمری در مقایسه با مواد دیگر در خط مقدم قرار می‌گیرند و در بسیاری از محصولات در زندگی روزمره از آنها استفاده می‌شود. با این حال، این وضعیت به ابعاد تقریباً غیرقابل مدیریت رسیده است و مقدار زیادی زباله پلیمری ایجاد می‌شود و آسیب‌های زیست محیطی بسیار جدی را به همراه دارد (۱، ۲).

از روکش‌های پودری در پوشش سطوح فلزی و غیرفلزی در صنعت با مقیاس میلیون‌ها تن استفاده می‌شود و در نتیجه این فرایندها مقدار قابل توجهی ضایعات ایجاد می‌شود (۳). مواد پوشش پودری بسته به نوع رزین و هاردنر موجود در آنها به دو گروه اصلی گرماسخت[1] و گرمانرم[2] تقسیم می‌شوند. تقریباً ۹۰ درصد از پوشش‌های پودری دارای ساختار گرماسخت هستند. تقریباً ۳۰ تا ۳۵ درصد هدر رفت در عملیات پوشش به دلیل اسپری بیش از حد، به ویژه در مقیاس‌های متوسط و کوچک رخ می‌دهد. اگرچه این میزان در فرایندهای تولید انبوه به ۵ درصد کاهش یافته است، اما با در نظر گرفتن افزایش استفاده بالقوه از پوشش‌های پودری، ضایعات تولید شده به مقادیر قابل توجهی می‌رسد (۴، ۵).

ضایعات رنگ پودری گرماسخت به دو دسته متمایز تقسیم می‌شود: اوراسپری بازیافتی سیکلون[3] که معمولا با نسبت اختلاط مشخص (معمولاً ۷۰:۳۰ پودر خام به بازیافتی (اختلاط با نسبت حداکثر ۳۰-۲۰ درصد پودر بازیافتی با ۸۰-۷۰ درصد پودر خام)) به چرخه پاشش بازگردانده می‌شود، و ضایعات نوع دوم شامل اجزای فوق‌ریز (ذرات کوچک‌تر از حدود ۱۰ میکرون) که در صافی‌های کیسه‌ای غبارگیر کارخانه‌های پودرسازی (مرحله آسیاب و طبقه‌بندی هوایی) و نیز در صافی‌های نهایی خطوط پاشش رسوب می‌نماید. از آنجا که سیکلون‌ها برای ذرات درشت‌تر از ۱۰ میکرون بازده جداسازی ۹۵-۹۰ درصدی دارند، ذرات ریز عملاً از سیکلون عبور کرده و در صافی‌های نهایی تجمع می‌یابند؛ این مواد که به‌دلیل سطح ویژه بالا، نیروهای چسبندگی بین‌ذره‌ای غالب، سیالیت و بارپذیری الکترواستاتیکی ناکافی، عملاً غیرقابل بازگشت به فرایند رنگ‌آمیزی هستند و سالانه مقدار عظیمی از آن (برآورد شده در حدود نیم میلیون تن در سطح جهانی) به دفن یا سوزاندن اختصاص می‌یابد و پیامدهای زیست‌محیطی جدی در پی دارد (۶، ۷). یکی از راه‌های بازیافت این مواد، کاربرد ضایعات پودر اپوکسی در بستر معدنی سیمانی به‌عنوان پرکننده ریزدانه می‌باشد که به‌دلیل تراکم‌سازی منافذ موئینه و امکان بازشدن حلقه‌های اپوکسی در محیط شدیداً قلیایی سیال درون‌حفره‌ای بتن، مقاومت و دوام بتن را بهبود بخشیده است [۷].

از منظر ترکیب شیمیایی، این ضایعات پیش‌پلیمر گرماسخت پخت‌نشده‌ای هستند که شامل ۶۵-۶۰ درصد رزین پایه (پلی‌استر، اپوکسی یا هیبرید (اپوکسی - پلی‌استر)، حدود ۵ درصد عامل پخت، ۲۵-۲۰ درصد پرکننده معدنی (نظیر باریت و کلسیت) و ۴-۸ درصد رنگدانه و افزودنی‌ها می‌باشند (۷، ۸).

راهبردهای کنونی به‌طور گسترده، اختلاط مذاب در بسترهای پلی‌الفینی غیرقطبی را هدف قرار داده‌اند. در پلی‌اتیلن‌های بکر و پسامصرفی (HDPE[4]، LDPE[5] و LLDPE[6])، این ضایعات تا سطوح ۳۰ الی ۴۰ درصد وزنی به‌عنوان تقویت‌کننده ذراتی به کار رفته‌اند؛ با این حال، عدم امتزاج ترمودینامیکی و اختلاف زیاد در انرژی سطحی در آمیزه‌های دوگانه اصلاح‌نشده، ناگزیر به جدایش فازی ماکروسکوپی، حباب‌زایی بین‌سطحی[7] و شکست مکانیکی ناشی از جدایش بین‌سطحی پیش‌رس منجر می‌شود (۸، ۹). برای رفع این نواقص فصل‌مشترک، سازگارسازی واکنشی با استفاده از پلی‌الفین‌های پیوندخورده با مالئیک انیدرید (نظیر PP-gg-MA[8] در مقادیر ۵-۲ درصد وزنی) یا اصلاح ماکرومولکولی پس از اکستروژن از طریق پرتودهی گاما، موجب کاهش شدید کشش بین‌سطحی و تسهیل انتقال تنش برشی در فصل‌مشترک شده است؛ به‌گونه‌ای که بارگذاری بهینه در محدوده ۲۰ الی ۳۰ درصد وزنی همراه با عامل اتصال، مدول الاستیک و استحکام کششی فراتر از بستر خالص ایجاد می‌کند (۹، ۱۲). به‌طور هم‌زمان، پژوهش‌ها بر روی بسترهای پلی‌پروپیلنی (شامل اکستروژن واکنشی ضایعات پسامصرفی) نشان داده است که واکنش‌های اتصالات عرضی درجا می‌تواند به تشکیل شبکه ژل چشمگیر (کسر ژل تا ۰/۶۴) منجر شود؛ با این وجود، یک آستانه نفوذ قطعی[9] بر ساختار پلیمر حاوی ضایعات حاکم است که فراتر از آن، کسر واکنش‌نکرده الیگومرهای ضایعات با وزن مولکولی پایین به‌عنوان نرم‌کننده بین‌زنجیره‌ای عمل کرده و افت ساختاری شدیدی را به بار می‌آورد (۱۳، ۱۴).

فو[10] و همکارانش با بررسی دقیق رفتار پودرهای بازیابی‌شده از کابین پاشش رنگ پودری الکتروستاتیک نشان دادند که اگرچه در فرایند تولید رنگ پودری، از نظر تئوری، تا ۱۰۰ درصد قابلیت بازچرخانی وجود دارد، ولیکن در عمل افت شدید سیالیت و عملکرد دینامیکی پودر بازیافتی مانع از استفاده مستقیم آن می‌شود (۱۰).

1. Thermoset
2. Thermoplastic
3. Cyclone Reclaimed Overspray
4. High-Density Polyethylene
5. Low-Density Polyethylene
6. Linear Low-Density Polyethylene
7. Cavitation
8. Polypropylene-grafted-Maleic Anhydride
9. Percolation threshold
10. Fu

نتایج تحقیق آن‌ها حاکی از آن بود که عامل اصلی این افت عملکرد، کاهش اندازه ذرات و جابه‌جایی توزیع اندازه ذرات به سمت ذرات فوق‌ریز (کمتر از ۳۰ میکرون) در طول فرایند پاشش است؛ به‌گونه‌ای که افزایش سطح ویژه و غلبه نیروهای واندروالسی بین‌ذره‌ای، رفتار پودر را به رژیم به شدت چسبنده سوق می‌دهد (۱۰). در ادامه همین رویکرد، کیسمت و وانگر اثر اصلاح ساختاری بر ضایعات رنگ پودری گرماسخت را با هدف افزایش قابلیت استفاده آن‌ها به‌عنوان فیلر در بستر پلی‌اتیلن سبک خطی (LLDPE) بررسی کردند؛ یافته‌های آن‌ها نشان داد که اعمال اصلاحات ساختاری هدفمند بر ذرات ضایعات، از طریق بهبود سازگاری بین‌سطحی و تعامل پرکننده-بستر، خواص رئولوژی، حرارتی و مکانیکی کامپوزیت را بهبود می‌بخشد (۱۵). به بیان دیگر، این دو مطالعه مکمل یکدیگرند: نخستین، ماهیت و ریشه‌های ناتوانی استفاده مستقیم از پودر بازیافتی را تبیین می‌کند (۱۰) و دوم، مسیر غلبه بر این محدودیت را از طریق اصلاح ساختاری ذرات نشان می‌دهد (۱۵).

احسانی و جهانی رفتار کامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن ـ تالک حاوی ضایعات پوشش پودری اپوکسی ـ پلی‌استر را ارزیابی کردند؛ نتایج آن‌ها نشان داد که حضور این ضایعات موجب بهبود پراکنش صفحات تالک، افزایش جهت‌گیری آن‌ها در راستای جریان قالب‌گیری و ارتقای پایداری در برابر پیرسازی حرارتی می‌شود (۱۱). با این حال، ماهیت شبکه‌ای، شکنندگی ذاتی ذرات و ایجاد مراکز تمرکز تنش، در درصدهای وزنی بالا می‌تواند به افت مقاومت ضربه‌ای و کاهش ازدیاد طول تا نقطه شکست منجر شود (۱۶، ۱۱). عملکرد نهایی کامپوزیت‌های حاوی ضایعات گرماسخت به‌طور مستقیم به اندازه ذرات، یکنواختی پراکنش و کیفیت چسبندگی در فصل مشترک ذره–بستر وابسته است (۱۷، ۱۶). در بسترهای غیرقطبی نظیر پلی‌اولفین‌ها، عدم سازگاری فازی، چالش اصلی انتقال تنش به شمار می‌رود، در حالی که در بسترهای مهندسی و قطبی مانند پلی‌آمید ۶ (PA6)[1]، امکان برهم‌کنش شیمیایی بین گروه‌های عاملی باقی‌مانده در پسماند پودری (نظیر اپوکسی و کربوکسیل) با گروه‌های آمیدی و آمینی انتهای زنجیر پلی‌آمید وجود دارد (۱۹، ۱۸). برای مهار واکنش‌های کنترل‌نشده و جلوگیری از افزایش شدید گرانروی مذاب یا ژل‌شدن موضعی در حین اکستروژن، غیرفعال‌سازی سطحی شیمیایی ذرات (به‌ویژه با استفاده از عوامل نوکلئوفیلی مانند آب و الکل) و کنترل دقیق رطوبت بستر PA6 ضروری است (۲۰، ۱۹). تیمار با آب و الکل از طریق واکنش‌های نوکلئوفیلی هیدرولیز و الکل‌کافت،[2] این گروه‌های فعال باقی‌مانده را باز کرده و با تبدیل آن‌ها به ساختارهای خنثی‌ترِ دی‌ال یا بتا- هیدروکسی‌اتر، پتانسیل چسبندگی و واکنش‌پذیری سطحی ذرات را از بین می‌برد تا بتوانند رفتار یک پرکننده خنثی را در گرمانرم ایفا کنند (۱۹، ۱۸).

پلی آمید (نایلون) اولین بار توسط دوپانت[3] در سال ۱۹۳۸ به عنوان رشته‌های مسواک با ساختار پلی آمید 6- 6[4] (PA66) در بازار معرفی شد. کاربرد آن با رشد پلاستیک در دهه ۱۹۵۰، به عنوان اولین پلاستیک مهندسی، توسعه روزافزونی یافته است. خواص این مواد مانند پایداری حرارتی (نقطه ذوب بالا)، مقاومت شیمیایی خوب، استحکام کششی نسبتاً بالا و سختی شناخته می‌شود (۲۲، ۲۱). پلی‌آمیدهای آلیفاتیک گرمانرم‌های نیمه‌بلوری هستند که حاوی گروه آمید (CONH) هستند و اکثریت قریب به اتفاق رزین‌های تجاری را شامل می‌شوند. فاز بلوری مسئول سفتی، استحکام، پایداری حرارتی، خواص الکتریکی، شیمیایی و مقاومت در برابر خزش است، در حالی که ناحیه بی‌شکل مسئول چقرمگی (مقاومت در برابر ضربه) و ازدیاد طول است (۲۲، ۲۱). کاربرد این پلیمر در خودرو، برق و الکترونیک، اتصالات، بلوک‌های ترمینال، قطع‌کننده‌های مدار، محفظه‌های سوئیچ و اجزای عایق‌های الکتریکی می‌باشد. به‌علاوه در ماشین آلات صنعتی در چرخ‌دنده‌ها، یاتاقان‌ها، بوش‌ها، غلتک‌ها، ریل‌های راهنما، اجزای نوار نقاله و نوارهای سایش می‌باشد و ترکیب مقاومت مکانیکی، مقاومت در برابر سایش و روانکاری طبیعی PA6، آن را به یک ماده استاندارد برای قطعات مکانیکی با کاربرد وسیع در صنایع تبدیل می‌کند که در صورت عدم استفاده از این پلیمر، به فلزات ماشین‌کاری‌شده نیاز خواهد بود.

پژوهش حاضر به بررسی استفاده از ضایعات رنگ پودری گرماسخت هیبریدی (اپوکسی - پلی‌استر) به‌عنوان ماده افزودنی و پرکننده در بستر پلی‌آمید 6 (PA6) و ارزیابی امکان بازیافت این پسماند صنعتی اختصاص دارد. برخلاف پژوهش‌های گذشته که اغلب این ضایعات را درون پلیمرهای خنثی و غیرقطبی (مانند پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن) و تنها با کمک افزودنی‌های واسطه به کار می‌بردند، در این پژوهش از واکنش‌پذیری طبیعی گروه‌های آمینی در زنجیره پلی‌آمید ۶ با گروه‌های فعال شیمیایی (اپوکسی و کربوکسیل) موجود در پیش‌پلیمرهای پخت‌نشده این ضایعات بهره گرفته شده است؛ این واکنش شیمیایی در حین فرایند اختلاط مذاب رخ داده است. افزون بر این، برای دستیابی به پخش یکنواخت‌تر ذرات در بستر پلیمر و جلوگیری از تجمع و کلوخه‌شدن آن‌ها، استفاده از عوامل سازگارکننده تکمیلی نیز بررسی شده است و اثر آن بر رفتار پایداری حرارتی، درصد بلورینگی و خواص مکانیکی و فیزیکی نهایی کامپوزیت مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است.

1. Polyamide 6
2. Alcoholysis
3. DuPont
4. Polyamide 6,6

۲ـ روش تجربی

۲ـ۱ـ مواد

مشخصات مواد مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ آورده شده است. پلی‌آمید ۶ مورد استفاده در این پژوهش یک پلی‌آمید ۶ بدون پرکننده، دارای روان‌کننده داخلی و خارجی و مناسب برای استفاده در فرایند تزریق است. طبق مشخصات فنی، چگالی آن ۱/۱۴ g/cm^3 و میزان رطوبت آن ۰/۱ درصد گزارش شده است.

۲ـ۲ـ آماده‌سازی نمونه‌ها

فرایند اختلاط ذرات پودری ضایعاتی با پلی آمید ۶ از طریق یک اکسترودر دو مارپیچه همسو گرد werner&pfliderer[1] ساخت آلمان ۲۰۰۲ مدل zsk 25 انجام شد. محل پیکربندی عناصر پیچ و درگاه‌های تهویه روی محفظه در شکل ۱ نشان داده شده است.

در اولین مرحله صرفا، فرایند پلی آمید ۶ خالص بدون پرکننده به وسیله اکسترودر دومارپیچ انجام شد، به این صورت که ابتدا پلی آمید ۶ در آون در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد رطوب‌گیری شد و سپس در اکسترودر دو مارپیچ با دمای ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد ریخته و پس از عبور و سپس خروج از اکسترودر و قرار گرفتن در دستگاه خردکن به صورت ریزدانه خارج شد.

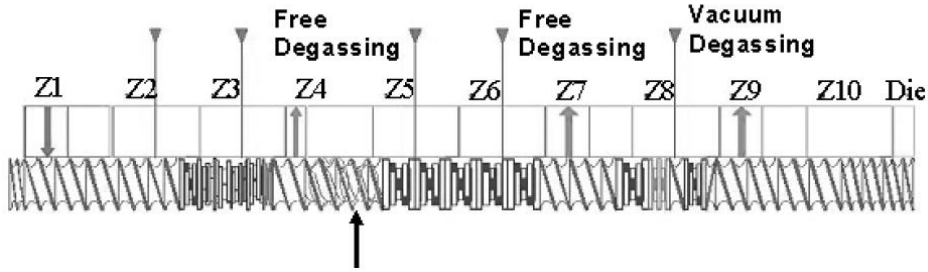
در مراحل بعدی طبق جدول ۲، پلی آمید ۶ با درصدهای متفاوت ضایعات پوشش پودری هیبرید (اپوکسی-پلی استر) و سازگار کننده[2] به همراه پایدارکننده[3] ترکیب شد. در این فرایند ابتدا پلی آمید ۶ در آون قرار داده شد تا رطوبت‌زدایی شود و متعاقبا ضایعات پوشش پودری هیبرید (اپوکسی ـ پلی استر) از الک مش شماره ۱۸ عبور داده شد و پس از توزین سازگارکننده و پایدارکننده، همه مواد به خوبی مخلوط شده و در اکسترودر دو مارپیچ با دمای ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد ریخته و پس از عبور از اکسترودر و خردکن در انتها به صورت ریزدانه خارج شدند. ترکیب اجزا و کد نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است. به‌منظور بررسی دقیق، گام‌به‌گام و هدفمندِ اثر متغیرهای فرمول‌بندی بر خواص نهایی کامپوزیت، از روش طراحی آزمایش فاکتوریل کامل ۳×۳ (3^2) استفاده شد. در این روش، دو متغیر مستقل شامل درصد وزنی پسماند رنگ پودری و درصد وزنی ماده سازگارکننده، هرکدام در ۳ سطح (کم، متوسط و زیاد) تعریف شدند. بدین ترتیب، ۹ترکیب آزمایشیِ متمایز حاصل آمد که در کنار یک نمونه شاهد (پلی‌آمید ۶ خالص)، مجموعاً ۱۰ ترکیب را برای ساخت و آزمون تشکیل می‌دهند.

1. Copperin
2. Copling agent
3. Stabilizer

جدول۱: مشخصات مواد اولیه.

Table 1: Material specifications

Material	Grade	Description	Company
Polyamide 6 (PA6(	EPLAMID 6 NC L K B4	Unfilled, injection-molding grade PA6 with internal and external lubrication	Epsan Plastik San. Ve Tic. Aş
Hybrid Powder Coating Waste	Bag filter	Recycled epoxy-polyester waste; particles collected from a bag filter; D50=4.288 µm D 50 =4.288µm , D90=13.978 µm D 90 =13.978µm	DLV
Compatibilizer	Exxelor™ VA 1801	Maleic-anhydride-functionalized elastomeric ethylene copolymer; improves interfacial adhesion	ExxonMobil Chemical
Stabilizer	IrgaStab 425	Thermal and processing stabilizer designed to mitigate polymer degradation during extrusion	BASF



شکل ۱: چیدمان پیچ و پورت‌های گاززدایی ترکیب‌کننده دو پیچ - ZSK 25 WLE.

Figure 1: Screw layout and degassing ports of twin-screw blender - ZSK 25 WLE.

جدول ۲: ترکیب اجرا و کدبندی نمونه‌ها.

Table 2: Composition of components and coding of samples.

Sample	PA6 wt. %	Powder Coating Waste Hybrid wt. %	Coupling Agent wt. %	Stabilizer wt. %
Sample 1 (Sample A)	100	----	----	----
Sample 2 (SampleB)	93.9	5	1	0.1
Sample 3 (Sample C)	91.9	5	3	0.1
Sample 4 (Sample D)	89.9	5	5	0.1
Sample 5 (Sample E)	83.9	15	1	0.1
Sample 6 (Sample F)	81.9	15	3	0.1
Sample 7 (Sample G)	79.9	15	5	0.1
Sample 8 (Sample H)	73.9	25	1	0.1
Sample 9 (Sample I)	71.9	25	3	0.1
Sample 10 (Sample J)	69.9	25	5	0.1

مزیت بنیادین این روش در مقایسه با روش‌های تک‌عاملی سنتی، توانایی ارزیابی هم‌زمان اثرات اصلی هر متغیر و همچنین اثر متقابل و هم‌افزایی میان دو متغیر بر چگونگی تشکیل فصل مشترک و رفتار کششی نمونه‌ها پوده است. این بستر آزمایشی همچنین بر قالب آرایه متعامد تاگوچی (L_9) منطبق بوده است که شرایط مناسبی را برای تحلیل واریانس و تعیین فرمول‌بندی بهینه فراهم می‌آورد.

۲ـ۳ـ مشخصات و ارزیابی خواص حرارتی و ریخت

بررسی مورفولوژی نمونه‌های تزریق‌شده با استفاده از دستگاه SEM(میکروسکوپ الکترون روبشی)، مدل VEGA در محدوده بزرگنمایی X ۱۰۰۰۰۰- ۲۰ و محدوده ولتاژ kV ۵-۳۰ و مقدار خلا pa ۵-۱۰، که شرایط نمونه باید به صورت پودر یا جامد، پایدار در خلا، عاری از هرگونه رطوبت و ماده فرار، تخریب‌ناپذیر در خلا و عدم تولید انفجار، رادیواکتیو، اثر آلرژی‌زا یا هرگونه پرتو مضر دیگری باشد، انجام شد. برای هر فرمول‌بندی نمونه مورد آزمون قرار گرفت و در مقیاس‌ها و بزرگنمایی‌های مختلف چندین عکس گرفته شد و مقدار گزارش‌شده ارائه گردید.

ارزیابی خواص حرارتی[۲] (DSC) با دستگاه HDT/VCAT، مدل MP3 و در محدوده دمایی ^{o}C ۲۵-۲۰۰ که در این پژوهش، آزمون DSC مطابق با استانداردهای ASTM D3418 و ISO 11357-3:2025 انجام می‌شود. در این روش، نمونه‌های کوچک از مواد در بوته‌های مناسب قرار گرفته و تحت نرخ گرمایش و سرمایش کنترل شده در بازه دمایی مشخص آزمون میشوند. داده‌های خروجی برای استخراج عواملی مانند[۳]Tg،[۴]Tc،[۵]Tm، آنتالپی ذوب و تبلور و در صورت نیاز، درصد بلورینگی به کار می‌روند.

آزمون[۶]TGA با دستگاه TGA ، مدل TGAI و در محدوده دمایی ^{o}C ۸۰۰ -RT، مورد بررسی قرار گرفت که این آزمون معمولاً مطابق با استاندارد ASTM D3418 برای تعیین دماهای گذار و آنتالپی ذوب و تبلور پلیمرها و همچنین استاندارد ISO 11357-3:2025 برای تعیین دما و آنتالپی ذوب و تبلور مواد پلیمری انجام می‌شود که برای این آزمون، مقدار مشخصی از نمونه در بوته مناسب قرار گرفته و تحت نرخ گرمایش و سرمایش کنترل شده در محدوده دمایی معین آزمون می‌شود. سپس منحنی‌های حاصل برای استخراج اطلاعات مربوط به گذارهای حرارتی و مقایسه رفتار نمونه‌های مختلف تحلیل می‌گردند.

آزمون[۷]FTIR برای مقایسه نمونه‌های PA6 خالص، پسماند پوشش پودری هیبرید (اپوکسی-پلی استر) و کامپوزیت‌های نهایی استفاده می‌شود تا مشخص شود پس از اختلاط، نشانه‌های از برهم‌کنش یا تغییر شیمیایی در ماده ایجاد شده یا نشده است. دستگاه FTIR-ATR مدل GOLDEN GATE ساخت کمپانی SPECAC انگلیس می‌باشد. از روش انعکاسی FTIR در این پژوهش استفاده شد و در این روش سطح نمونه بررسی می‌گردد. منشور مورد استفاده Zn-Se است. نمونه‌های مورد بررسی شامل فیلم و پودر و مایعات در محدوده pH= ۵-۹ هستند.

۳ـ بحث و نتایج

۳ـ۱ـ آزمون FTIR

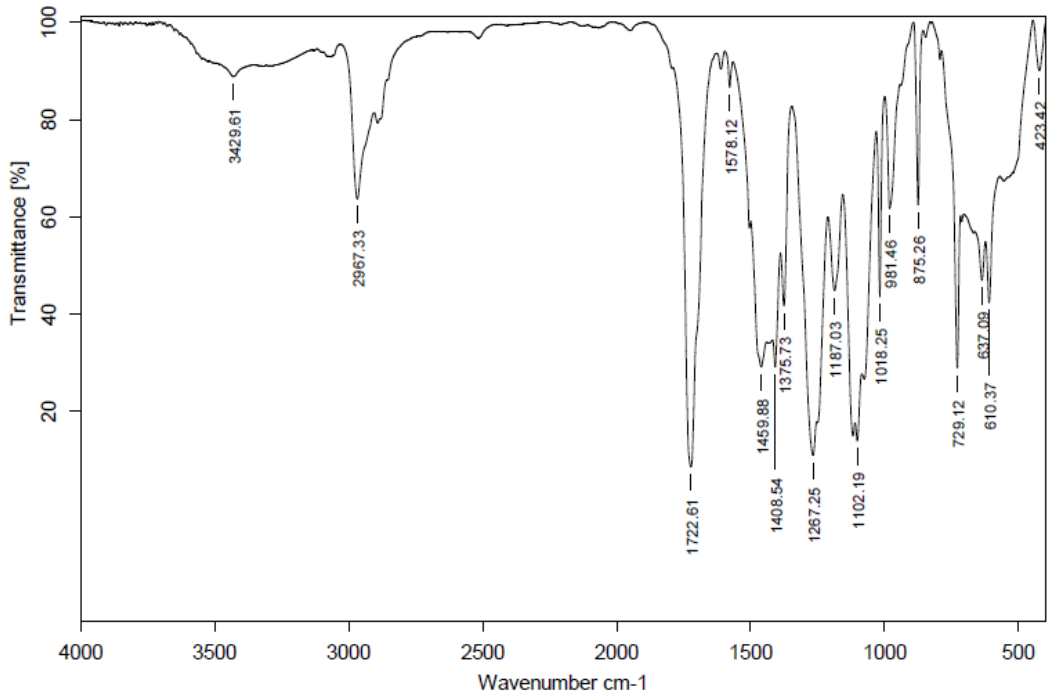
شکل ۲ طیف FTIR ضایعات پوشش پودری هیبرید، نوارهای مشخصه‌ای را نشان می‌دهد که حضور هم‌زمان اجزای اپوکسی–پلی‌استر و نیز برخی ترکیبات معدنی را تأیید می‌کند (۲۴، ۲۳). نتایج

طیف‌سنجی FTIR نشان داد که ضایعات پوشش پودری مورد بررسی، فاقد شبکه پلیمری کامل پخت‌شده هستند و بیشتر شامل ترکیبات رزینی پلیمری‌نشده و اجزای معدنی می‌باشند. حضور گروه‌های عاملی مربوط به رزین‌های اپوکسی و پلی‌استر بدون تشکیل پیوندهای شبکه‌ای کامل، بیانگر ماهیت پخت‌نشده این ضایعات است. همچنین، وجود نوارهای مربوط به پیوندهای فلز–اکسیژن (M–O)، حضور پرکننده‌های معدنی را در این مخلوط تأیید می‌کند. در مجموع، این تحلیل‌ها نشان‌دهنده وجود یک مخلوط ناهمگن از رزین‌های پلیمری‌نشده و پرکننده‌های معدنی است که با نتایج آزمون TGA (در خصوص میزان باقی‌مانده معدنی) هم‌خوانی دارد (۲۹-۲۵).

طبق شکل ۳ طیف FTIR نمونه PA6 خالص باندهای شاخصی را در نواحی ارتعاشی مربوط به گروه‌های آمیدی و زنجیره‌های آلیفاتیک نشان می‌دهد که با ساختار شیمیایی پلی‌آمید ۶ سازگار است (۳۱، ۳۰). وجود نوار پهن در ناحیه $3300\ cm^{-1}$ نشان‌دهنده ارتعاشات N–H و تشکیل پیوندهای هیدروژنی بین‌زنجیره‌ای است (۳۲، ۳۰). علاوه بر این، شناسایی قله‌های مربوط به آمید I، آمید II و ارتعاشات CH_2 در کنار نوارهای مربوط به فاز α در نواحی پایین‌تر، تاییدکننده حفظ ساختار شیمیایی مشخص و برخورداری نمونه از نظم بلوری است (۳۳، ۳۰). در مجموع، این نتایج صحت ساختار پلی‌آمید ۶ و ماهیت نیمه‌بلوری آن را اثبات می‌کند (۳۳، ۳۰).

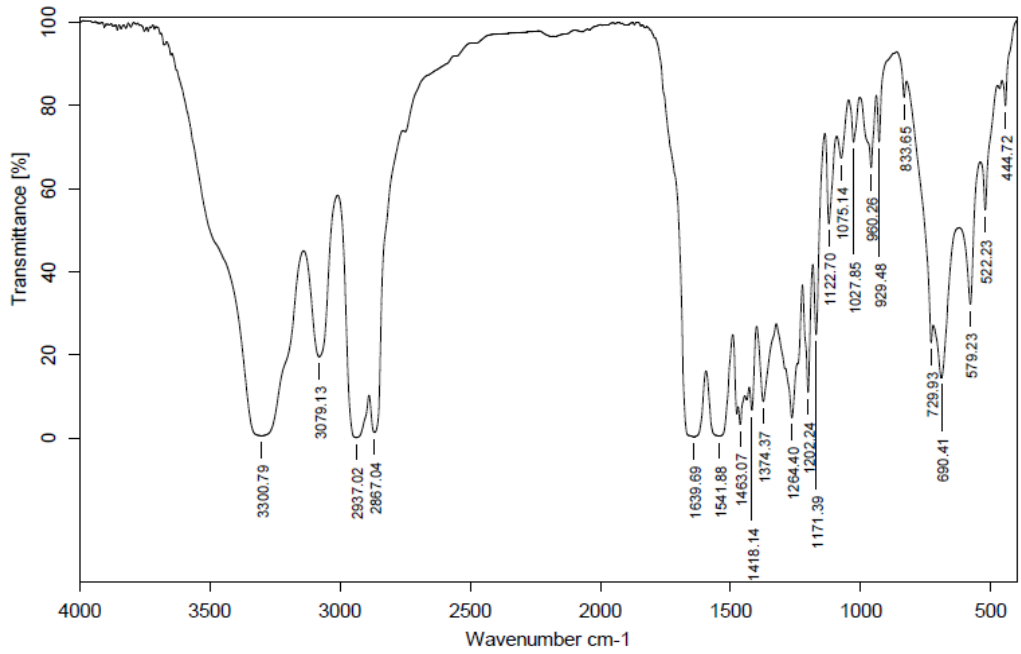
شکل ۴ طیف FTIR کامپوزیت PA6 حاوی ۵ درصد ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۵ درصد سازگارکننده (نمونه D)، شواهد مستقیمی از حضور اجزای افزوده شده و برهم‌کنش‌های بین‌فازی ارائه می‌دهد. ظهور نوارهای کربونیل استری (C=O) و فلز-اکسیژن (M–O) شواهد مستقیمی از حضور بخش پلی‌استری و پرکننده‌های معدنی ارائه می‌دهد (۳۴، ۲۹، ۲۴). جابه‌جایی در نوارهای آمید I و آمید II نشان‌دهنده تشکیل پیوندهای هیدروژنی بین‌فازی قوی بین زنجیره‌های PA6 و گروه‌های عاملی قطبیِ افزودنی‌ها است (۳۷، ۳۶، ۳۱). اگرچه فاز بلوری α در بستر PA6 حفظ شده است، اما تغییرات طیفی با تغییرات مشاهده شده در درجه بلورینگی همخوانی دارد (۳۵، ۳۱). به‌طور کلی، این نتایج توزیع مناسب فازها و برهم‌کنش‌های بین‌فازی مؤثر در کامپوزیت را تأیید می‌کند (۳۴، ۳۷).

1. Scanning Electron Microscopy
2. Differential Scanning Calorimetry
3. Glass Transition Temperature
4. Crystallization Temperature
5. Melting Temperature
6. Thermogravimetric Analysis
7. Fourier-Transform Infrared Spectroscopy



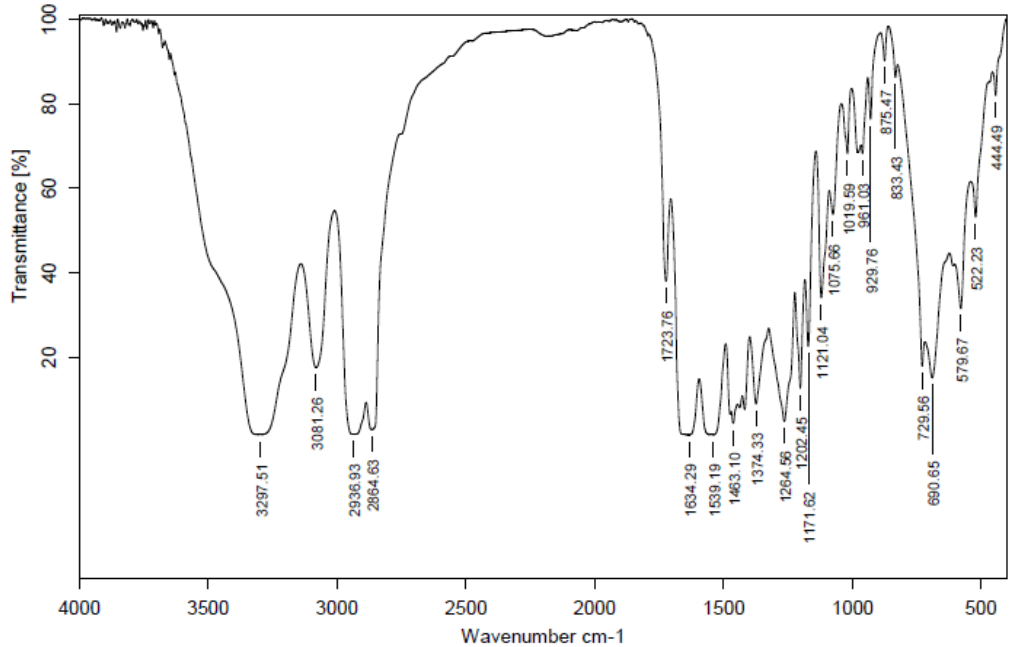
شکل ۲: طیف FTIR ضایعات پوشش پودری.

Figure 2: FTIR spectrum of powder coating waste.



شکل ۳: طیف FTIR پلی آمید 6.

Figure 3: FTIR spectrum of polyamide 6.



شکل ۴: طیف FTIR ترکیب پلی آمید 6 با ۵ درصد ضایعات پوشش پودری و ۵ درصد سازگارکننده.

Figure 4: FTIR spectrum of polyamide 6 blend with 5 % powder coating waste and 5 % compatibilizer.

طیف‌های FTIR سه نمونه مورد بررسی نشان دادند که ضایعات پوشش پودری هیبرید، PA6 خالص و کامپوزیت PA6/ضایعات/سازگارکننده هر یک دارای ویژگی‌های شیمیایی متمایز اما مرتبط هستند (۳۴، ۳۷). در ضایعات پوشش پودری، حضور نوارهای شاخص مربوط به O– H، C= O استری، ارتعاشات آروماتیک و پیوندهای C–O–C/C– O بیانگر ساختار پخت نشده اپوکسی–پلی‌استر و ماهیت قطبی آن است (۳۴، ۳۵). در مقابل، طیف PA6 خالص عمدتاً باندهای مشخصه گروه‌های آمیدی شامل آمید A، آمید B، آمید I، آمید، آمید II و آمید III را به‌همراه ارتعاشات گروه‌های CH_2 و نوارهای مرتبط با فاز بلوری α نشان داد که با ساختار نیمه‌بلورین پلی‌آمید ۶ مطابقت کامل دارد (۳۳، ۳۰). در نمونه کامپوزیت D، هم‌زمانی نوارهای شاخص هر دو جزء و ظهور پیک کربونیل استری در ۱۷۲۶/۷۶ cm^{-1}

شواهد طیفی مستقیمی از توزیع و تثبیت ضایعات پوشش پودری در بستر پلی‌آمیدی را اثبات نمود (۳۴، ۳۷). همچنین، جابه‌جایی نوار آمید I و آمید II به اعداد موج پایین‌تر، نشان‌دهنده تغییر در محیط پیوندهای هیدروژنی و وقوع برهم‌کنش‌های بین‌فازی میان زنجیره‌های PA6 و گروه‌های قطبی موجود در ضایعات و سازگارکننده است (۳۷، ۳۶). در مجموع، مشاهدات طیف‌سنجی FTIR تصدیق می‌کنند که عامل سازگارکننده با تسهیل برهم‌کنش‌های هیدروژنی متقابل، به بهبود چسبندگی بین‌فازی میان بستر PA6 و فاز دوم (ضایعات پوشش) منجر شده و سازگاری ریخت و ساختار شیمیایی سامانه را تقویت کرده است (۳۱، ۳۶، ۳۷).

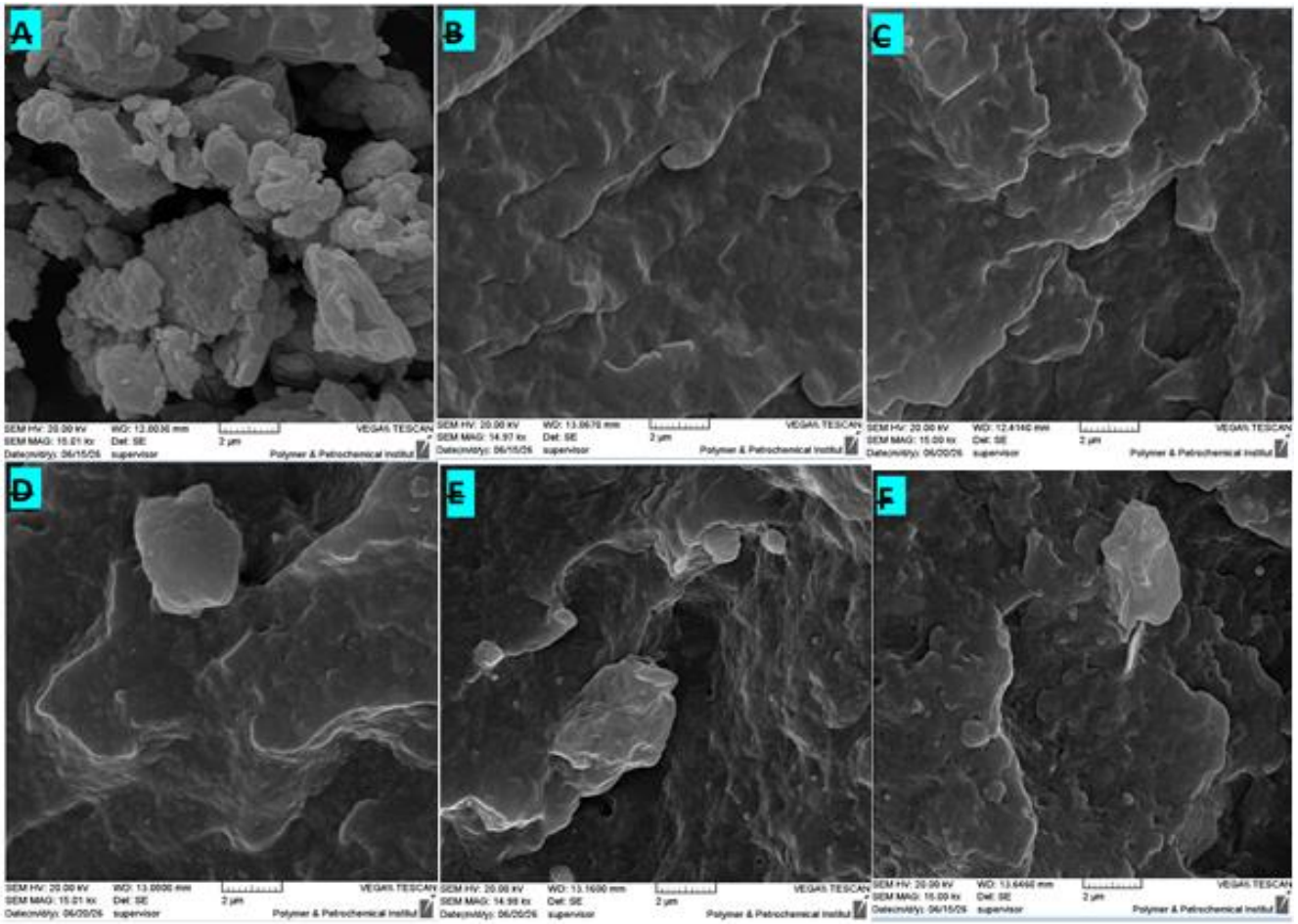
۳ـ۲ـ آزمون SEM:

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح شکست نمونه‌ها در مقیاس ۲ µm در شکل ۵ ارائه شده است تصویر A ریخت توده‌ای و نامنظم ذرات ضایعات پوشش پودری را نشان می‌دهد، در حالی که تصویر B سطح شکست نسبتاً همگن و یکنواخت بستر PA6 خالص را به تصویر می‌کشد. با مقایسه تصاویر C و D، اثر محتوای سازگارکننده بر چسبندگی بین‌فازی کاملاً مشهود است؛ در نمونه حاوی ۵ درصد وزنی سازگارکننده (تصویر D)، ذرات ضایعات به‌خوبی در بستر پلیمری مدفون شده و فصل مشترک یکپارچه‌ای ایجاد گردیده است که نشان‌دهنده سازگارسازی بهینه و تسهیل انتقال تنش بین‌فازی می‌باشد. این مشاهده با جابه‌جایی نوارهای جذبی شاخص آمیدی در طیف‌سنجی FTIR تطابق دارد که مؤید برهم‌کنش‌های بین‌فازی شیمیایی یا پیوندهای هیدروژنی مؤثر میان زنجیره‌های پلی‌آمید و گروه‌های فعال فاز پراکنده است. با افزایش درصد وزنی ضایعات به ۱۵ درصد (تصویر E) و ۲۵ درصد (تصویر F)، علیرغم حضور عامل سازگارکننده، افزایش چگالی ذرات و کاهش فاصله بین‌ذره‌ای منجر به تشکیل تجمعات موضعی[1] و تغییر در توپوگرافی سطح شکست شده است. در غلظت ۲۵ درصد وزنی، حضور خوشه‌های درشت‌تر و افزایش زبری سطح شکست، نشان‌دهنده محدود شدن تحرک بخش‌ها زنجیره پلیمری و افزایش تمرکز تنش موضعی است؛ پدیده‌ای که سیستم را به سمت حالت شکست تردتر سوق داده و افت انعطاف‌پذیری و خواص ضربه و کشش را در بارگذاری‌های بالا توجیه می‌کند.

شکل ۶، تصاویر SEM سطح شکست نمونه‌ها در بزرگ‌نمایی ۵ µm تغییرات ریخت ناشی از افزودن ضایعات پوشش پودری هیبرید اپوکسی–پلی‌استر و سازگارکننده را به‌وضوح نشان می‌دهند. ضایعات پوشش پودری (A) دارای ذرات نامنظم، توده‌ای و کلوخه‌شده با سطح زبر هستند که با ساختار پخت‌شده و ترد این فاز همخوانی دارد. PA6 خالص (B) سطح شکستی یکنواخت و متراکم با ریزساختار نسبتاً همگن نشان می‌دهد. در نمونه C، حضور ۵ درصد وزنی ضایعات به همراه ۳ درصد وزنی سازگارکننده موجب پراکنش ذرات در بستر شده، اما هنوز ناپیوستگی‌های موضعی و مرزهای بین‌فازی قابل تشخیص است که بیانگر کفایت نسبی کامل نشده، سازگارکننده در بهبود چسبندگی است. در مقابل، نمونه D حاوی ۵ درصد وزنی ضایعات و ۵ درصد وزنی سازگارکننده بهترین ریخت را نشان می‌دهد؛ ذرات به‌خوبی در بستر خیس شده و فصل مشترک منسجم‌تری ایجاد شده است که نشان‌دهنده چسبندگی بین‌فازی قوی و انتقال تنش مؤثر است. با افزایش محتوای ضایعات به 15 و 25 درصد وزنی در نمونه‌های E و F، تراکم ذرات و ناهمگنی سطح شکست افزایش یافته و نواحی تجمع ذرات و تمرکز تنش بیشتر می‌شود. بنابراین، اگرچه سازگارکننده توانسته است پراکنش فاز ضایعات را بهبود دهد، افزایش بیش از حد محتوای ضایعات منجر به افت یکنواختی ریزساختار و تضعیف کیفیت فصل مشترک می‌شود.

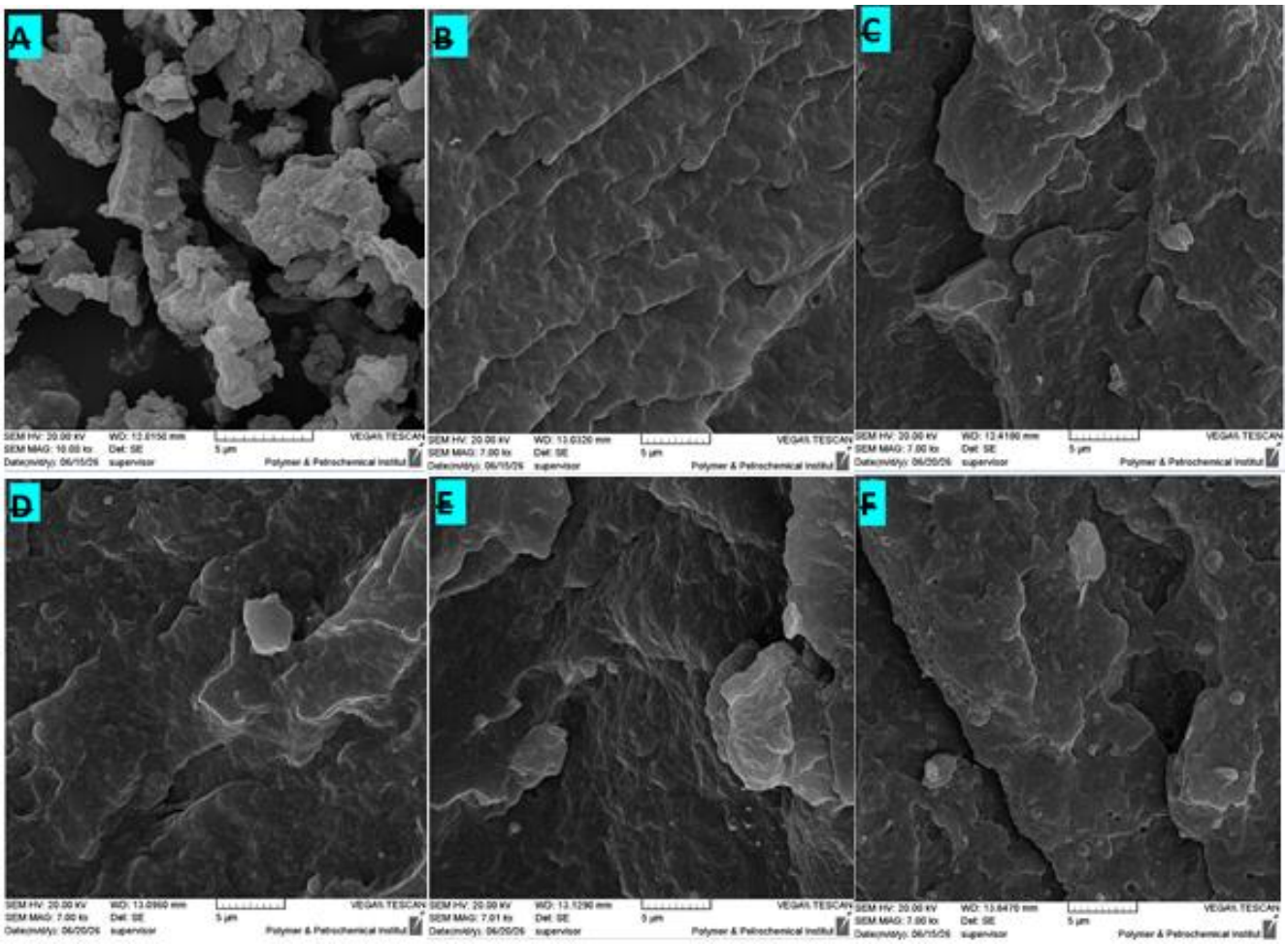
شکل ۷ میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) سطوح شکست نمونه‌ها در مقیاس ۱۰ µm را نشان می‌دهد که ضایعات پوشش پودری هیبرید اپوکسی– پلی‌استر (A) از ذرات نامنظم، ترد و تجمع‌یافته[2] با توزیع اندازه‌ای گسترده تشکیل شده‌اند، در حالی که سطح شکست PA6 خالص (B) ساختاری یکنواخت، متراکم و دارای الگوی پله‌ای نیمه‌بلورین را به تصویر می‌کشد. در نمونه حاوی ۵ درصد وزنی ضایعات و ۳ درصد وزنی سازگارکننده ، ذرات ضایعات در بستر پراکنده شده‌اند، با این حال حضور حفره‌های موضعی و مرزهای واضح فصل مشترک بیانگر آن است که میزان سازگارکننده برای ایجاد پیوند کافی بین فازها ناکافی بوده است. در مقابل، نمونه حاوی ۵ درصد وزنی ضایعات و ۵ درصد وزنی سازگارکننده (D) بهترین ریخت را از خود نشان می‌دهد؛ به‌طوری که ذرات ضایعات به‌طور کامل در بستر PA6 خیس و مستغرق شده و فصل مشترک تقریباً فاقد جدایش است. این چسبندگی بین‌فازی قوی و توزیع یکنواخت، انتقال مؤثر تنش و بهبود خواص مکانیکی را توجیه می‌کند. با افزایش محتوای ضایعات به ۱۵ درصد وزنی (E) و ۲۵ درصد وزنی (F)، تراکم ذرات و ناهمگنی سطح شکست افزایش یافته و تشکیل تجمعات ذراتی به‌همراه نقاط تمرکز تنش مشاهده می‌شود. در نمونه F، غلظت بالای ضایعات باعث محدود شدن توانایی بستر در پوشش‌دهی کامل ذرات شده و منجر به سطح شکست زبر، ناهمگن و مستعد تردی می‌گردد. بنابراین، نتایج SEM تأیید می‌کنند که ۵ درصد وزنی سازگارکننده با ۵ درصد وزنی ضایعات، ترکیب بهینه برای دستیابی به سازگاری و یکنواختی در ریخت کامپوزیت PA6/ضایعات پوشش پودری است.

1. Calized agglomerations
2. Agglomerated
3. Step-like



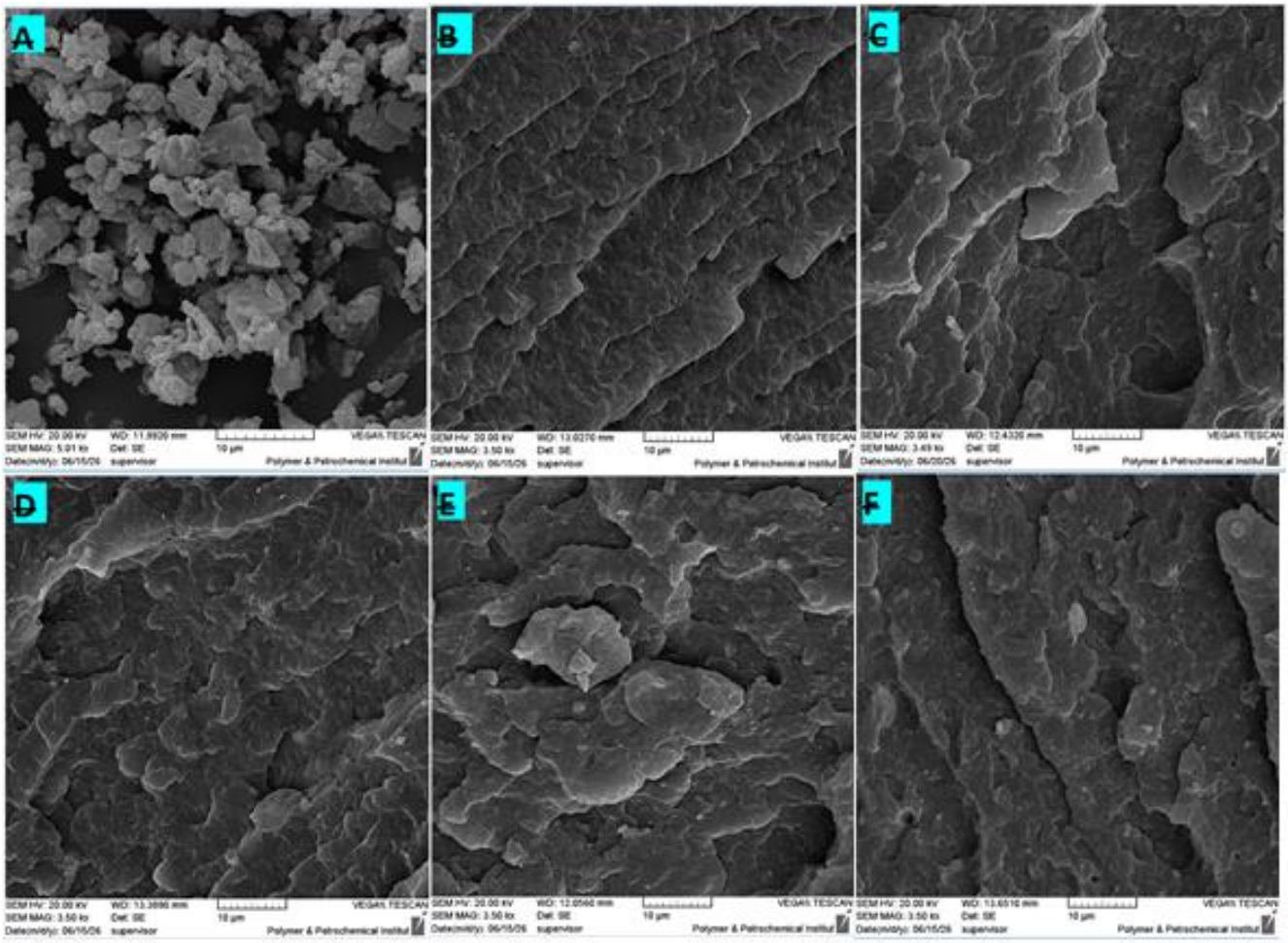
شکل ۵: آزمون SEM در مقیاس 2 میکرومتر، A) نمونه ضایعات پوشش‌های پودری هیبرید(اپوکسی-پلی استر)، B) نمونه پلی آمید6 خالص، C) نمونه پلی آمید ۶ با ۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۳ درصد وزنی سازگار کننده، D) نمونه پلی آمید ۶ با ۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۵ درصد وزنی سازگار کننده، E) نمونه پلی آمید ۶ با ۱۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۵درصد وزنی سازگار کننده و F) نمونه پلی آمید ۶ با ۲۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۵ درصد وزنی سازگار کننده.

Figure 5: SEM test at 2 micrometer scale, A) Sample of hybrid powder coating waste (epoxy-polyester), (B) Sample of pure polyamide 6, (C) Sample of polyamide 6 with 5% hybrid powder coating waste and 1% compatibilizer, (D) Sample of polyamide 6 with 5% hybrid powder coating waste and 5% compatibilizer, (E) Sample of polyamide 6 with 15% hybrid powder coating waste and 5% compatibilizer, and (F) Sample of polyamide 6 with 25% hybrid powder coating waste and 5% compatibilizer.



شکل ۶: آزمون SEM در مقیاس 5 میکرومتر، A) نمونه ضایعات پوشش‌های پودری هیبرید (اپوکسی-پلی استر)، B) نمونه پلی آمید ۶ خالص، C) نمونه پلی‌آمید ۶ با ۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۳ درصد وزنی سازگار کننده، D) نمونه پلی آمید ۶ با ۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۵ درصد وزنی سازگار کننده، E) نمونه پلی آمید ۶ با ۱۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۵ درصد وزنی سازگار کننده، F) نمونه پلی آمید ۶ با ۲۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۵ درصد وزنی سازگارکننده.

Figure 6: SEM test at 5 µm scale, A) Sample of hybrid powder coating waste (epoxy-polyester), (B) Sample of pure polyamide 6, (C) Sample of polyamide 6 with 5% hybrid powder coating waste and 1% compatibilizer, (D) Sample of polyamide 6 with 5% hybrid powder coating waste and 5% compatibilizer, (E) Sample of polyamide 6 with 15% hybrid powder coating waste and 5% compatibilizer, and (F) Sample of polyamide 6 with 25% hybrid powder coating waste and 5% compatibilizer.



شکل ۷: آزمون SEM در مقیاس ۱۰ میکرومتر، A) نمونه ضایعات پوشش‌های پودری هیبرید (اپوکسی-پلی استر)، B) نمونه پلی آمید6 خالص، C) نمونه پلی آمید ۶ با ۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۳ درصد وزنی سازگار کننده، D) نمونه پلی آمید ۶ با ۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۵ درصد وزنی سازگار کننده، E) نمونه پلی آمید ۶ با ۱۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۵ درصد وزنی سازگار کننده و F) نمونه پلی آمید ۶ با ۲۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۵ درصد وزنی سازگار کننده.

Figure 7: SEM test at 10 μm scale, A) Sample of hybrid powder coating waste (epoxy-polyester), (B) Sample of pure polyamide 6, (C) Sample of polyamide 6 with 5 % hybrid powder coating waste and 3% compatibilizer, (D) Sample of polyamide 6 with 5% hybrid powder coating waste and 5 % compatibilizer, (E) Sample of polyamide 6 with 15% hybrid powder coating waste and 5 % compatibilizer, and (F) Sample of polyamide 6 with 25 % hybrid powder coating waste and 5 % compatibilizer.

شکل ۸ نشان می‌دهد که افزایش میزان ضایعات، منجر به افزایش ناهمگنی و تضعیف فصل مشترک می‌شود. غلظت ۵ درصد وزنی سازگارکننده در ترکیب با ۵ درصد وزنی ضایعات (نمونه D)، بهینه‌ترین شرایط را برای دستیابی به پراکندگی مطلوب ذرات، خیس‌شوندگی خوب و چسبندگی قوی بین‌فازی فراهم می‌آورد که این امر نقش حیاتی در بهبود خواص کامپوزیت دارد.

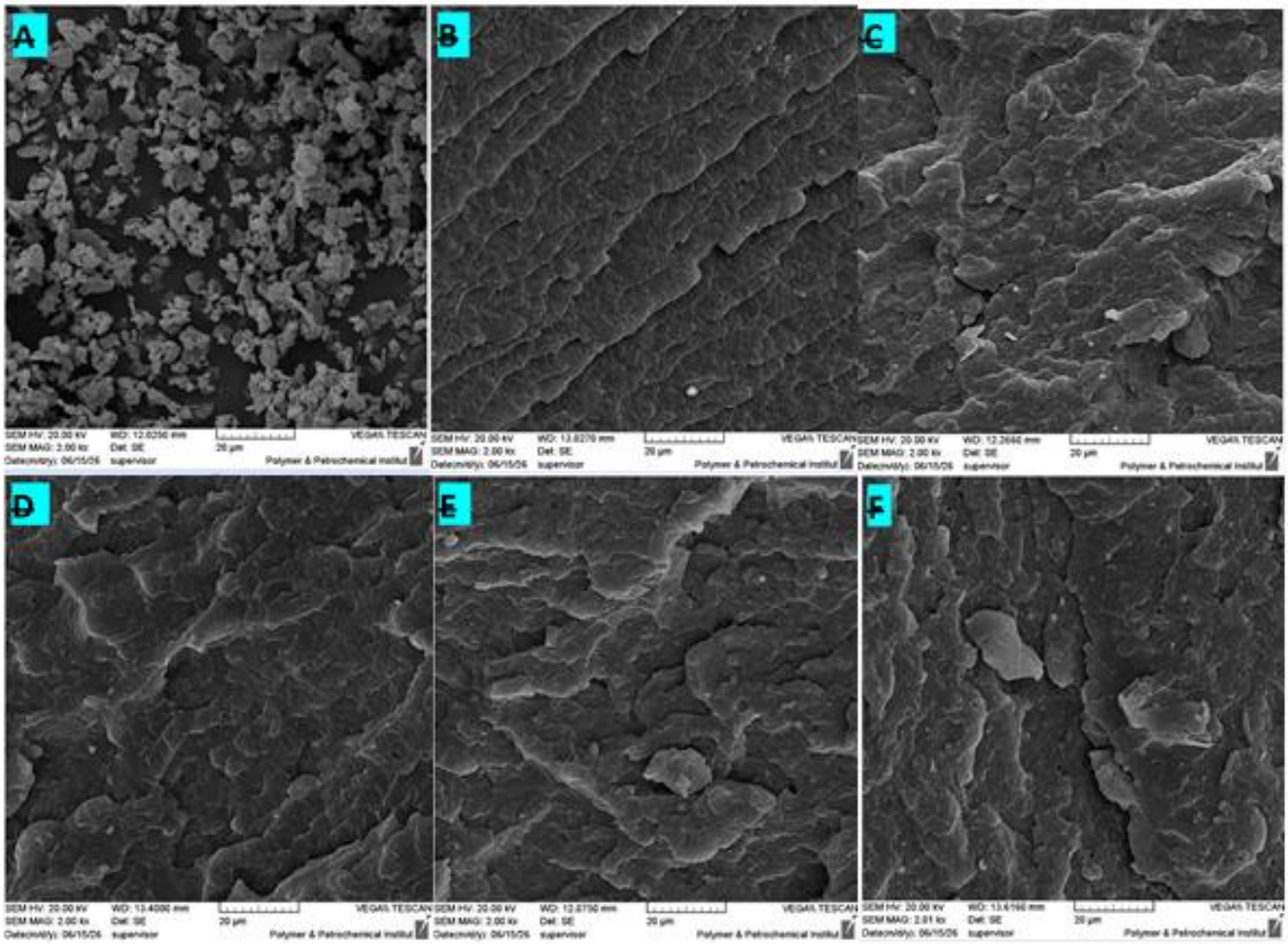
شکل ۹ ارزیابی تصاویر SEM با بزرگ‌نمایی ۵۰ μm تغییرات ساختاری و رفتار برهم‌کنش بین‌فازی را در کامپوزیت‌های PA6/ضایعات به‌وضوح آشکار می‌سازد. سطح شکست ماتریس PA6 خالص (تصویر B) ساختاری کاملاً همگن و یکپارچه را نشان می‌دهد. در نمونه C (۵ درصد وزنی ضایعات/ ۳ درصد وزنی سازگارکننده)، حضور حفرات و مرزهای مشخص فصل مشترک، حاکی از عدم کفایت غلظت سازگارکننده در دستیابی به خیس‌شوندگی کامل است. نمونه D (۵ درصد وزنی ضایعات/ ۵ درصد وزنی سازگارکننده) بهترین کیفیت در ریخت را با سطحی یکنواخت و فاقد جدایش بین‌فازی به نمایش می‌گذارد که مؤید بهینه‌سازی چسبندگی و

انتقال مؤثر تنش در این ترکیب است. در مقابل، افزایش محتوای ضایعات به ۱۵ درصد وزنی (E) و ۲۵ درصد وزنی (F)، منجر به تشکیل خوشه‌های ذرات[1] و پدیده جدایش بین‌فازی[2] می‌گردد؛ امری که نشان‌دهنده اشباع ظرفیت بستر در پوشش‌دهی ذرات و ظهور مناطق تمرکز تنش است. این نتایج در ریخت، به‌صورت مکمل تأیید می‌کنند که نسبت ۵ درصد وزنی ضایعات به ۵ درصد وزنی سازگارکننده، نقطه بهینه برای حصول یکپارچگی ساختاری در کامپوزیت‌های حاصل از ضایعات پودری است.

۳ـ۳ـ آزمون DSC

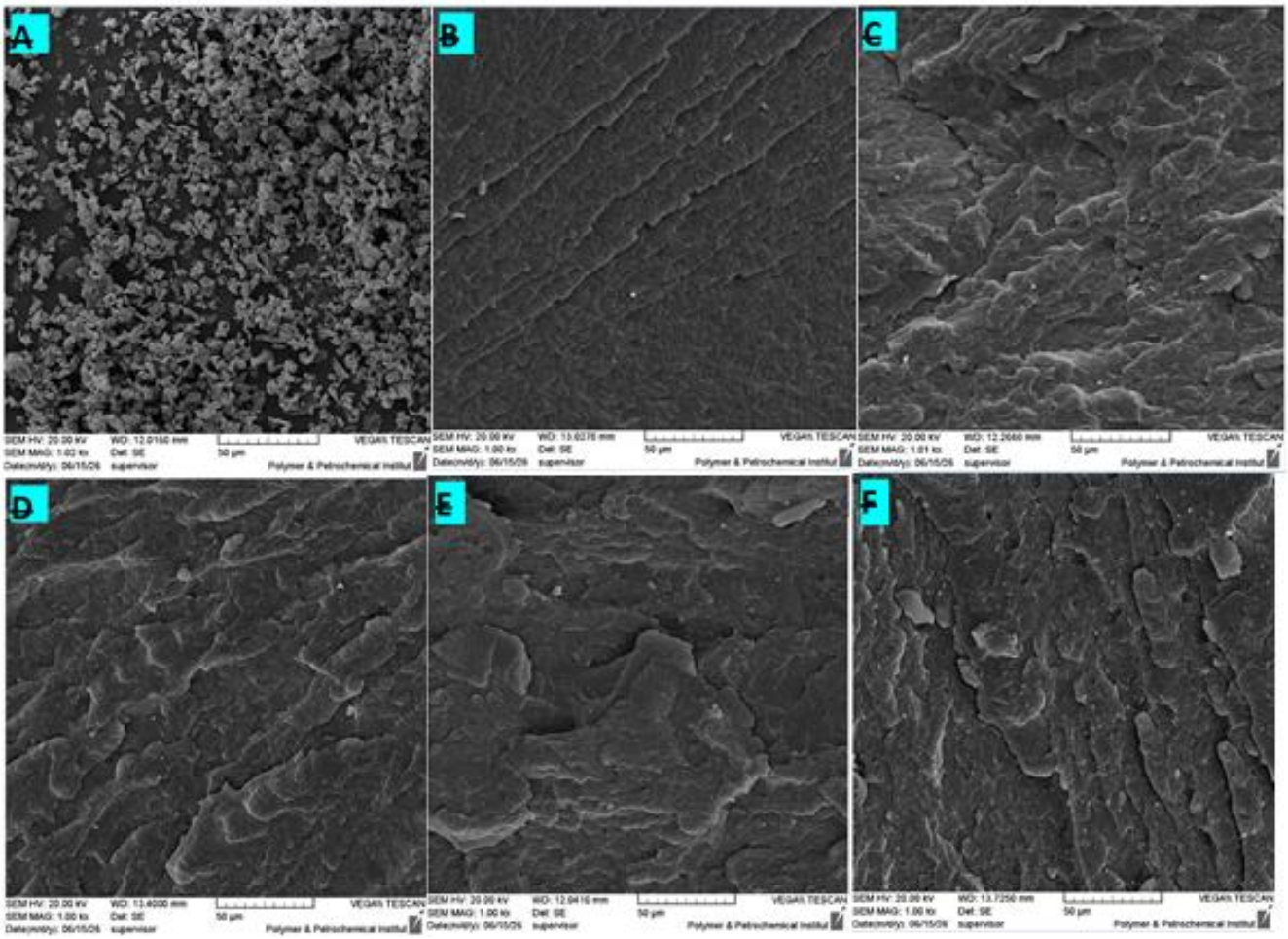
شکل ۱۰ نمودار DSC برای نمونه PA6 خالص شامل یک قله گرمازا[3] در حدود ۱۹۰/۹۰ °C است که مربوط به دمای ذوب فاز بلورین α پلی‌آمید ۶ می‌باشد. این قله باریک و نسبتاً تیز، نشان‌دهنده ساختار بلوری متوسط با درجه بلورینگی قابل‌توجه است.

1. Particle agglomerates
2. Debonding
3. Endothermic



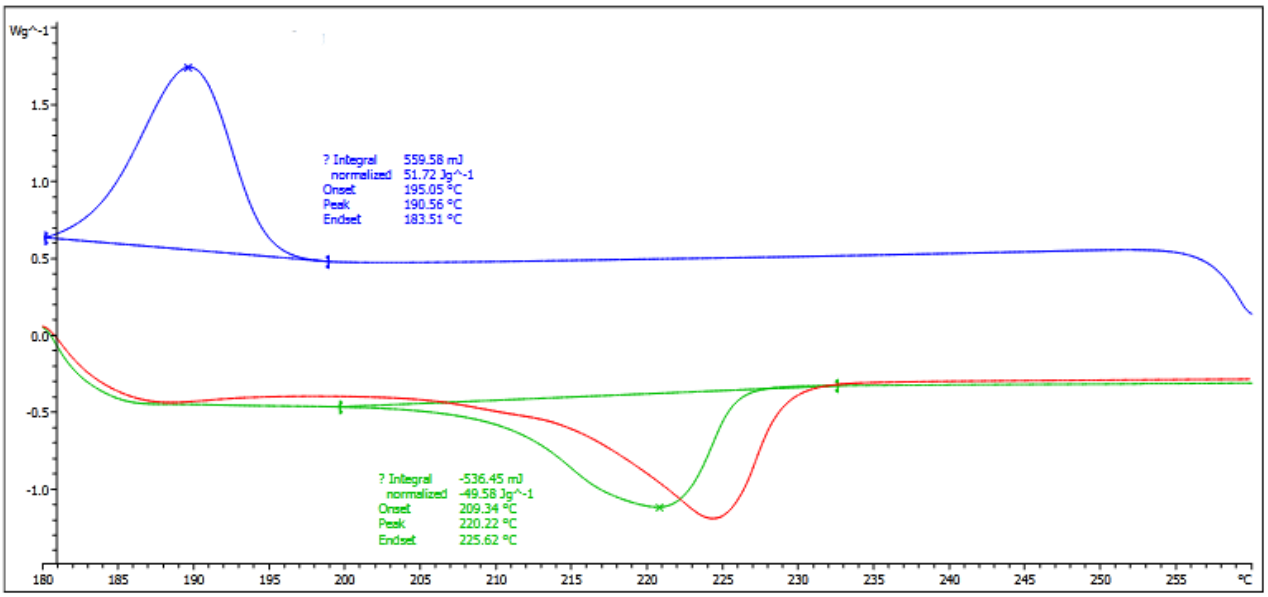
شکل ۸: آزمون SEM در مقیاس ۲۰ میکرومتر، A) نمونه ضایعات پوشش‌های پودری هیبرید (اپوکسی-پلی استر)، B) نمونه پلی آمید ۶ خالص، C) نمونه پلی آمید ۶ با ۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۳ درصد وزنی سازگار کننده، D) نمونه پلی آمید ۶ با ۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۵ درصد وزنی سازگار کننده، E) نمونه پلی آمید ۶ با ۱۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۵ درصد وزنی سازگار کننده، F) نمونه پلی آمید ۶ با ۲۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۵ درصد وزنی سازگار کننده.

Figure 8: SEM test at 20 μm scale, A) Sample of hybrid powder coating waste (epoxy-polyester), (B) Pure polyamide 6 sample, (C) Polyamide 6 sample with 5% hybrid powder coating waste and 3 % compatibilizer, (D) Polyamide 6 sample with 5 % hybrid powder coating waste and 5 % compatibilizer, (E) Polyamide 6 sample with 15 % hybrid powder coating waste and 5 % compatibilizer, and (F) Polyamide 6 sample with 25 % hybrid powder coating waste and 5 % compatibilizer.



شکل ۹: آزمون SEM در مقیاس 50 میکرومتر، A) نمونه ضایعات پوشش‌های پودری هیبرید (اپوکسی-پلی استر)، B) نمونه پلی آمید ۶ خالص، C) نمونه پلی آمید ۶ با ۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۳ درصد وزنی سازگار کننده، D) نمونه پلی آمید ۶ با ۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۵ درصد وزنی سازگار کننده، E) نمونه پلی آمید ۶ با ۱۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۵ درصد وزنی سازگار کننده و F) نمونه پلی آمید ۶ با ۲۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۵ درصد وزنی سازگار کننده

Figure 9: SEM test at 50 µm scale, A) Sample of hybrid powder coating waste (epoxy-polyester), (B) Pure polyamide 6 sample, (C) Polyamide 6 sample with 5% hybrid powder coating waste and 3 % compatibilizer, (D) Polyamide 6 sample with 5 % hybrid powder coating waste and 5 % compatibilizer, (E) Polyamide 6 sample with 15 % hybrid powder coating waste and 5% compatibilizer, and (F) Polyamide 6 sample with 25 % hybrid powder coating waste and 5 % compatibilizer.



شکل ۱۰: آزمون DSC برای نمونه پلی آمید ۶ خالص (رفتار تبلور از مذاب حین سرمایش غیرهم‌دما (منحنی آبی، T_c=190.56 °C و ΔH_c=51.72 J·g^{-1})، پویش گرمایش اول (منحنی قرمز، بیانگر تاریخچه حرارتی نمونه) و پویش گرمایش دوم (منحنی سبز، T_m=220.22 °C و ΔH_m=49.58 J·g^{-1})

Figure 10: DSC test graph for pure polyamide 6 sample (the non-isothermal melt crystallization curve during cooling (blue line, T_c=190.56 °C, ΔH_c=51.72 J·g^{-1}), the first heating scan (red line, reflective of thermal history), and the second heating scan (green line, T_m=220.22 °C, ΔH_m=49.58 J·g^{-1}))

شکل ۱۱ نشان‌دهنده یک تغییر پله‌ای[1] در خط مبنا[2] است که مطابق با دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) می‌باشد. برخلاف پلیمرهای نیمه‌بلورین مانند PA6، در اینجا قله ذوب[3] مشاهده نمی‌شود. این امر کاملاً منطقی است، زیرا پوشش‌های پودری هیبرید اپوکسی-پلی‌استر پس از فرایند پخت،[4] به یک شبکه سه‌بعدی گرماسخت تبدیل شده‌اند که ذاتاً بی‌شکل بوده و ذوب نمی‌شوند.

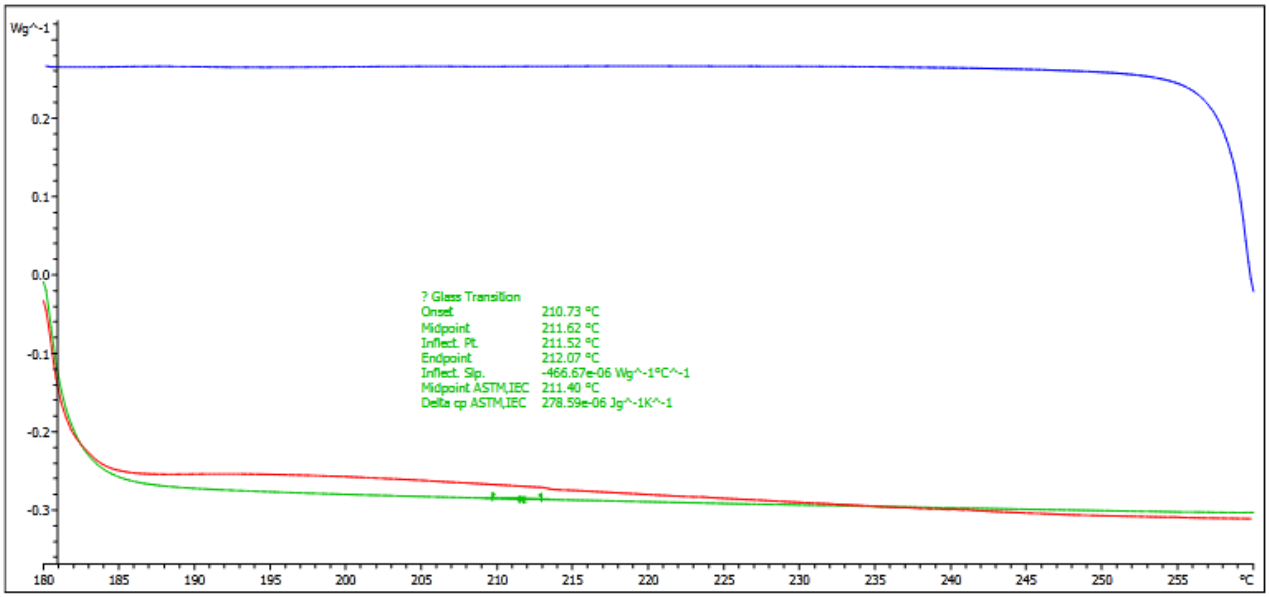
شکل ۱۲ بررسی تحلیل حرارتی DSC نشان می‌دهد که افزودن ۵ درصد وزنی ضایعات به همراه ۵ درصد وزنی سازگارکننده، باعث تغییر در رفتار بلوری بستر PA6 شده است. کاهش درجه بلورینگی و دمای ذوب، مؤید برهم‌کنش شیمیایی/فیزیکی قوی بین گروه‌های عاملی ضایعات و زنجیره‌های آمیدی PA6 توسط سازگارکننده است. این تغییرات ساختاری (کاهش بلورینگی و افزایش برهم‌کنش بین‌فازی) مستقیماً با نتایج SEM (ترشوندگی و چسبندگی بهینه) در راستای بهبود عملکرد کامپوزیت سازگار است.

مقایسه نتایج DSC نشان می‌دهد که افزودن ۵ درصد ضایعات پوشش پودری هیبرید (با ساختار گرماسخت و Tg≈211.6 °C) به ماتریس PA6، به دلیل محدود کردن حرکت زنجیره‌های پلیمری توسط سازگارکننده، منجر به کاهش دمای ذوب (از 190.9 به 188.9 °C) و افت درجه بلورینگی (از ۲۲/۵ به ۱۹/۷ درصد) در نمونه D شده است. این تغییرات ساختاری، همراه با ظهور پیک تبلور مجدد در دمای ۲۲۰/۴ °C، به‌وضوح نشان‌دهنده شکل‌گیری یک فصل‌مشترک قوی و پیوند شیمیایی مؤثر بین گروه‌های عاملی ضایعات و زنجیره‌های پلی‌آمیدی است؛ فرایندی که باعث تغییر ماهیت ضایعات از یک ناخالصی صرف به یک فاز تقویت‌کننده صلب و سازگار در بستر کامپوزیت شده است.

۳ـ۴ـ آزمون TGA

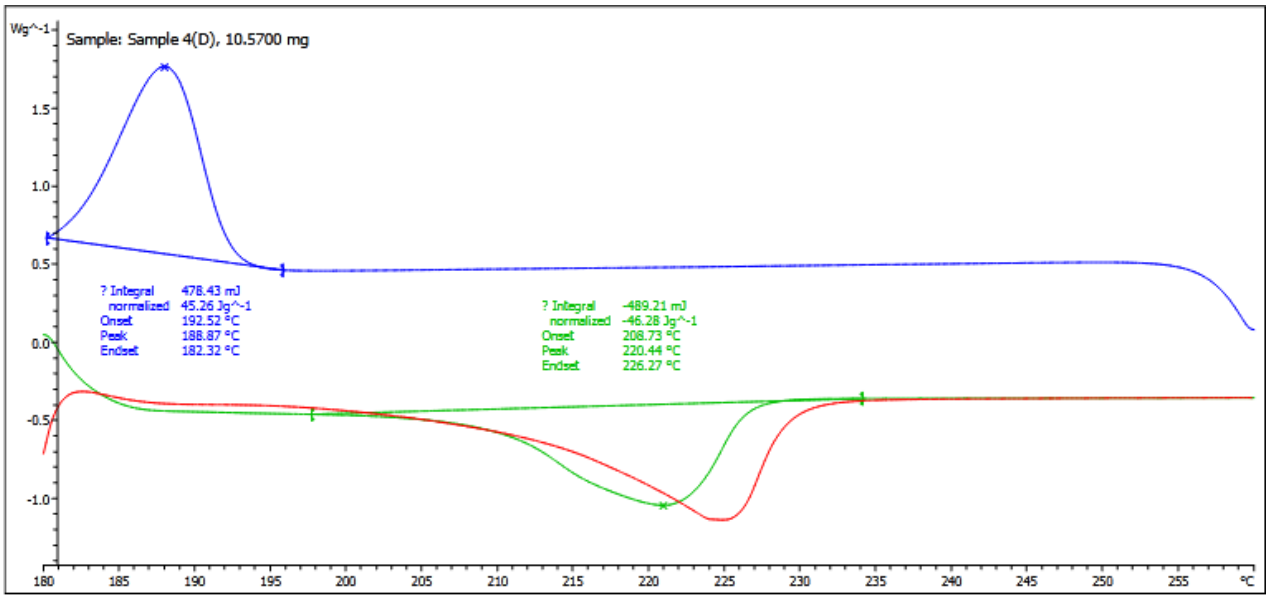
شکل ۱۳ آزمون TGA برای پلی‌آمید ۶ خالص، یک الگوی تخریب حرارتی تک‌مرحله‌ای را نشان داد که بیانگر پایداری حرارتی مناسب بستر تا دمای حدود ۳۳۰ °C است. کاهش وزن اصلی در محدوده دمایی ۳۷۰ تا ۴۵۰ °C رخ داده و دمای بیشینه تخریب حرارتی (T_{max})، استخراج شده از منحنی DTG، در ۴۰۳/۴ °C مشاهده شد. این پایداری حرارتی بالا، پنجره فرایندی گسترده‌ای را برای اختلال مذاب و افزودن ضایعات پوشش پودری فراهم می‌کند. همچنین، میزان ناچیز باقی‌مانده (۳/۰۷ درصد در دمای ۶۰۰ °C) مؤید خلوص بالای نمونه اولیه است.

1. Step change
2. Baseline
3. Melting Peak
4. Curing



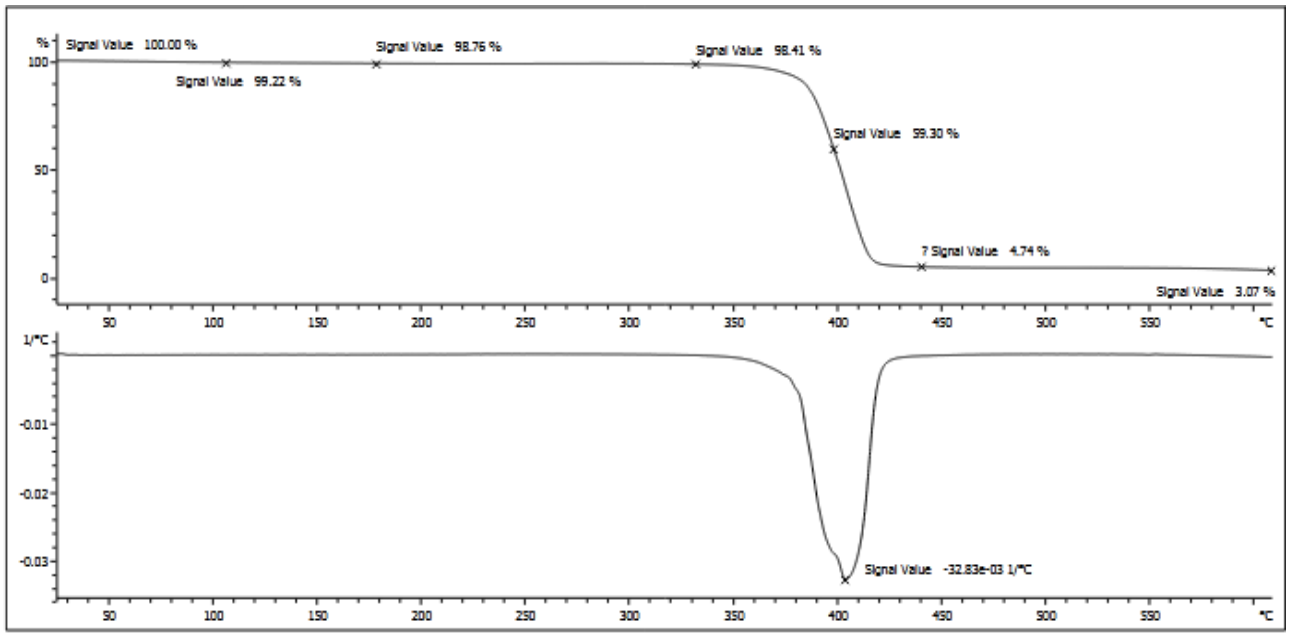
شکل ۱۱: آزمون DSC برای نمونه ضایعات پوشش‌های پودری هیبرید (اپوکسی-پلی استر)، چرخه سرمایش (آبی): T_{onset}=195.05 °C ، ΔH=51.72 J·g $^{-1}$؛ چرخه گرمایش اول (قرمز): Tpeak=220.22 °C، ΔH=−49.58 J·g^{-1} و چرخه گرمایش دوم (سبز): $T_{g,mid}$=211.62 °C.

Figure 11: DSC test graph for waste samples of hybrid powder coatings (epoxy-polyester), Thermal data: Cooling cycle (blue): T_{onset}=195.05 °C, ΔH=51.72 J·g^{-1}; First heating cycle (red): T_{peak}=220.22 °C, ΔH=−49.58 J·g^{-1}; and Second heating cycle (green): $T_{g,mid}$=211.62 °C.



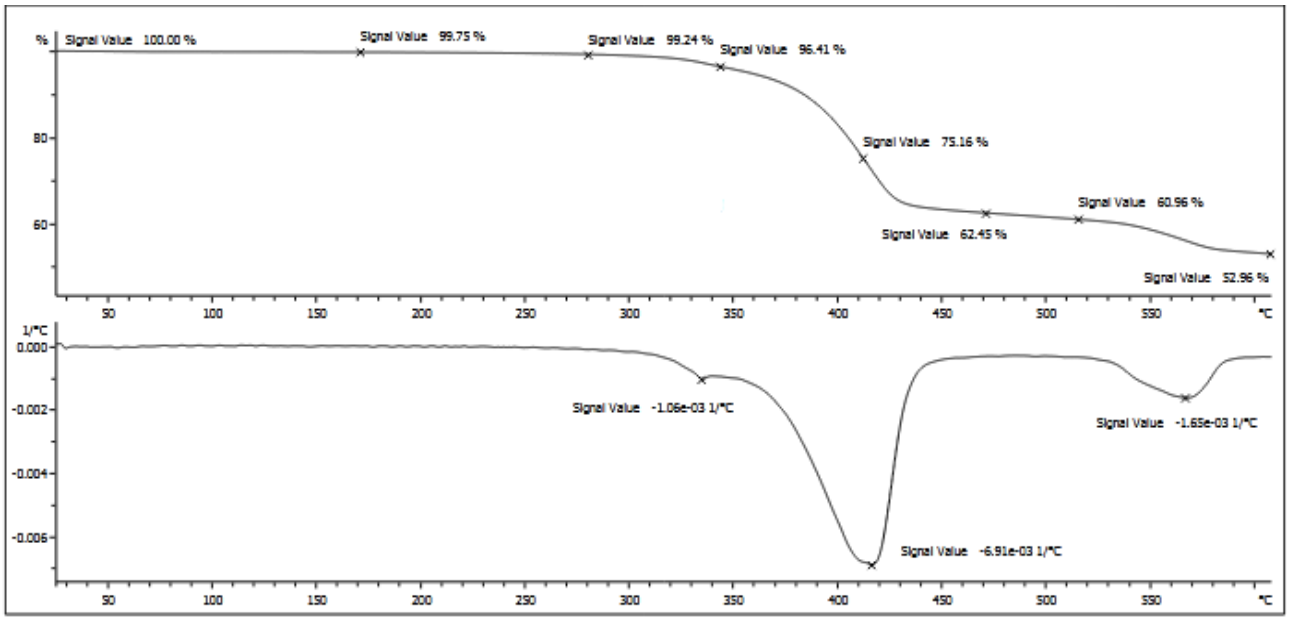
شکل ۱۲: آزمون DSC برای نمونه پلی آمید۶ با ۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۵درصد وزنی سازگارکننده، چرخه سرمایش (آبی): T_{peak}=182.32 °C، ΔH=51.32 J·g^{-1} و چرخه گرمایش (سبز): T_{peak}=220.44 °C، ΔH=−49.23 J·g^{-1}.

Figure 12: DSC thermograms of polyamide 6 incorporating 5 wt. % hybrid (epoxy–polyester) powder coating waste and 5 wt% compatibilizer, and Cooling cycle (blue): Tpeak=182.32 °C, ΔH=51.32 J·g−1; Heating cycle (green): Tpeak=220.44 °C, ΔH=−49.23 J·g−1.



شکل ۱۳: آزمون TGA/DTG برای نمونه پلی آمید ۶ خالص.

Figure 13: TGA/DTG test diagram for pure polyamide 6 sample.



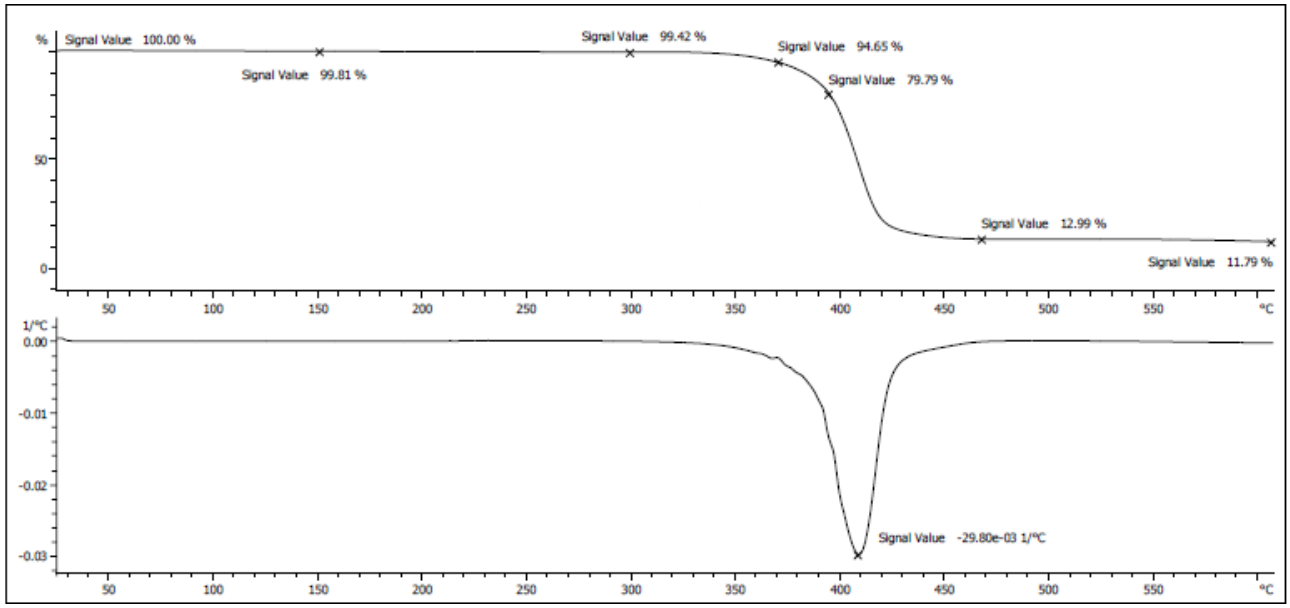
شکل ۱۴: آزمون TGA/DTG برای نمونه ضایعات پوشش‌های پودری هیبرید (اپوکسی-پلی استر).

Figure 14: TGA/DTG test graph for hybrid (epoxy-polyester) powder coating waste sample.

همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، بررسی TGA ضایعات پوشش پودری هیبرید نشان‌دهنده رفتاری چندمرحله‌ای ناشی از ترکیب رزین‌های اپوکسی و پلی‌استر است. دمای حداکثر تخریب (T_{max}) در ۴۲۰ °C مشاهده شد. یکی از یافته‌های کلیدی، مقدار بالای باقی‌مانده[1] معادل ۵۳ درصد در دمای ۶۰۰ °C است که به حضور قابل‌توجه پرکننده‌های معدنی[2] نسبت داده می‌شود. این ویژگی، ضایعات مذکور را به یک فاز تقویت‌کننده معدنی-آلی تبدیل کرده است که نه تنها پایداری حرارتی کامپوزیت نهایی را افزایش می‌دهد، بلکه به دلیل ماهیت سرامیکی-مانند باقی‌مانده، نقش مؤثری در بهبود خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌های حاصل (به ویژه نمونه D) ایفا می‌کند.

1. Residue

2. Inorganic fillers



شکل ۱۵: آزمون TGA/DTG برای نمونه پلی آمید ۶ با ۵ درصد وزنی ضایعات پوشش پودری هیبرید و ۵ درصد وزنی سازگارکننده

Figure 15: TGA/DTG test graph for polyamide 6 sample with 5 wt. % hybrid powder coating waste and 5 wt. % compatibilizer

مطالعه TGA در شکل ۱۵ نشان داد که افزودن ۵ درصد ضایعات پوشش پودری و ۵ درصد سازگارکننده (نمونه D)، پایداری حرارتی بستر PA6 را بهبود بخشیده است. انتقال دمای حداکثر تخریب (T_{max}) از 403.4 °C به 408.8 °C و افزایش میزان خاکستر باقی‌مانده از ۳/۰۷ به ۱۱/۷۹ درصد بیانگر نقش مؤثر ذرات ضایعات به‌عنوان تقویت‌کننده‌های معدنی است. این ذرات به دلیل تشکیل پیوندهای قوی با زنجیره‌های PA6 (تسهیل‌شده توسط سازگارکننده)، باعث ایجاد یک اثر مانع حرارتی[1]شده و تخریب زنجیره‌های پلیمری را به تأخیر انداخته‌اند. این نتایج در کنار تحلیل‌های SEM و FTIR، تأییدکننده این است که فرمول‌بندی نمونه D به ساختاری بهینه با پیوستگی فازی بالا دست یافته است که ضمن حفظ پایداری حرارتی، گامی مؤثر در بازیافت ارزش‌افزوده ضایعات صنعتی به شمار می‌رود.

۴ـ نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی اثر متقابل ضایعات پوشش پودری هیبرید اپوکسی-پلی‌استر و عامل سازگارکننده بر ویژگی‌های کامپوزیت‌های PA6 اختصاص یافت. نتایج طیف‌سنجی FTIR تایید کرد که افزودنی‌ها با موفقیت در بستر پلی‌آمیدی توزیع شدند؛ جابه‌جایی قله‌های آمید I و آمید II به سمت اعداد موج پایین‌تر و ظهور باندهای مربوط به گروه‌های کربونیل استری (C=O) و پیوندهای فلز-اکسیژن (M–O)، نشان‌دهنده ایجاد برهم‌کنش‌های بین‌فازی قوی و پیوندهای هیدروژنی میان زنجیره‌های اصلی پلی‌آمید و گروه‌های قطبی فاز افزودنی بوده است.این تعاملات شیمیایی، منجر به بهبود قابلیت اختلاط و اصلاح ریخت سیستم شده است. مشاهدات SEM نشان داد که در غلظت بهینه (۵ درصد وزنی از هر دو جزء ضایعات رنگ پودری و سازگارکننده)، پراکندگی ذرات در بستر بسیار یکنواخت بوده و چسبندگی بین‌فازی به حداکثر رسیده است، در حالی که در غلظت‌های بالاتر، ناهمگونی فازی و تجمع ذرات مشاهده شد. همچنین، تغییرات در رفتار بلورینگی و دمای ذوب در آزمون‌های DSC، با تغییرات ساختاری حاصل از حضور فازهای ثانویه هم‌خوانی داشت. در نهایت، پایداری حرارتی سیستم ،در حضور مقادیر بهینه پرکننده و سازگار کننده، موجب افزایش دمای حداکثر تخریب (T_{max}) و افزایش چشمگیر وزن باقی‌مانده (از ۳/۰۷ به ۱۱/۷۹ درصد) در آزمون TGA گردیدکه این امر ناشی از نقش پرکننده‌ها در ایجاد اثر سد حرارتی و محدود کردن مسیر نفوذ محصولات فرار تخریب بوده است . به‌طور کلی، نتایج نشان داد که استفاده از ترکیب نسبت ۵ درصد ضایعات رنگ پودری و ۵ درصد سازگار کننده ، راهکاری مؤثر برای تبدیل ضایعات پوشش پودری به تقویت‌کننده‌های موثر در بستر PA6 می‌باشد .در مجموع می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با مهندسی فصل‌مشترک و تعیین نسبت بهینه سازگارکننده، می‌توان ضایعات پوشش پودری را می‌توان به پلی آمید ۶ اضافه نمود و ترکیب حاصله با حفظ شکل‌پذیری، بهبود چشمگیر مقاومت به ضربه و حتی نزدیک بودن استحکام کششی نسبت به نمونه خالص، قابلیت کاربرد در تولید قطعات مهندسی را دارا خواهد

1. Thermal Barrier Effect

بود.

پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آینده ارائه شده که به شرح زیر می‌باشد:

۱- بازیافت ضایعات پوشش پودری در ماتریس‌های پلیمری دیگر

۲- استفاده از ضایعات پوشش پودری به‌عنوان پرکننده یا تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های پلیمری

۳- اصلاح شیمیایی سطح ضایعات پوشش پودری برای بهبود سازگاری با ماتریس پلیمری

۴- بررسی تأثیر اندازه و شکل ذرات ضایعات پوشش پودری بر خواص کامپوزیت‌های پلیمری

۵- استفاده از ضایعات پوشش پودری در تولید کامپوزیت‌های دارای خواص ویژه

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله مراتب سپاس و قدردانی خالصانه خود را از استاد ارجمند، جناب آقای دکتر شروین احمدی، به‌سبب رهنمودهای علمی و همکاری‌های ارزشمندشان در پیشبرد این پژوهش، صمیمانه قدردانی می‌کنم. همچنین از امکانات و بستر علمی فراهم‌شده در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران که نقش مهمی در تسهیل فرآیندهای پژوهشی و ارتقای سطح علمی این فعالیت داشته است، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

۵ـ مراجع

1. Lu JX, Poon CS, Recycling of waste glass in construction materials, New Trends Eco-efficient Recycl. Concr. (2019); 153-167. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102480-5.00006-3.
2. Yoshioka T, Grause G, Recycling of Waste Plastics: Topical Themes in Energy and Resources, Springer, Tokyo, 2015.
3. Kismet Y, Wagner MH. Mechanical, thermal, and morphological properties of powder coating waste reinforced acetal copolymer. Polym Test. 2020;82: 06322. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106322.
4. Du Z, Wen S, Wang J, Yin C, Yu D, Luo J. The review of powder coatings. J Mater Sci Chem Eng. 2016;4:54-59. https://doi.org/10.4236/msce.2016.43007
5. Nannetti P. Lack für Einsteiger. Vincentz Network GmbH, Hannover, 2013
6. Enhancing the Mechanical Recycling of Plastics. Alexis Hocken 2026.
7. Konkol J, Dębska B, Huts A, Pilch-Pitera B, et al. Potential Application of Epoxy Powder Coating Waste in Concrete: Strength Properties and Durability of Concrete. Mater. 2026;19(9).1756. https://doi.org/10.3390/ma19091756
8. Kısmet Y. Powder coating waste filler in high-density polyethylene-Variations in morphology, mechanical and thermal performance. Mater Sci Eng Technol, 2024;55(6): 773-782. https://doi.org/10.1002/mawe.202300257.
9. Powder Coating Waste Utilisation as a Filler in High-Density Polyethylene (HDPE) Coupled with PP-g-MA S. D. Ariantika, M. Chalid, A. I. Pangest 2025. https://doi.org/10.55981/jsmi.4963. https://doi.org/10.55981/jsmi.4963.
10. Fu SY, Feng XQ, Lauke B, Mai YW. Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites. Compos Part B. 2008;39(6):933-961. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2008.01.002.
11. Jahani, Y, Ehsani M. The rheological modification of talc-filled polypropylene by epoxy-polyester hybrid resin and its effect on morphology, crystallinity, and mechanical properties. Polym Eng Sci. 2009;49(3):619-629. https://doi.org/ 10.1002/pen.21294.
12. Kısmet Y, Wagner MH. Mechanical and flow properties of blends of polypropylene and powder coating recyclates with and without addition of maleic anhydride. Adv Polym Technol. 2018;37(8):3511-3518. https://doi.org/10.1002/adv.22135.
13. Kismet Y. Change of mechanical properties of powder recyclate reinforced polyolefin based on gamma radiation. Polym. 2017;9(9):384. https://doi.org/10.3390/polym9090384.
14. Boukheit A, Ylla N, Chamczyk É, Bounor-Legaré V, Cassagnau P. Reactive extrusion of waste coating powders with recycled polypropylene: Rheological and mechanical properties. Polym Eng Sci. 2026;66(7):4871-4884. https://doi.org/10.1002/pen.70542.
15. Barletta M, Lusvarghi L, Pighetti Mantini F, Rubino G. Epoxy-based thermosetting powder coatings: Surface appearance, scratch adhesion and wear resistance, https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.02.017.
16. Jahani Y, Ehsani M. The effects of epoxy resin nano particles on shrinkage behavior and thermal stability of talc-filled polypropylene. Polymer Bulletin,2009;63:743-754. https://doi.org/10.1007/s00289-009-0145-9.
17. Kismet Y, Dogan A, Wagner MH. Thermoset powder coating wastes as filler in LDPE-Characterization of mechanical, thermal and morphological properties. Polym Testing, 2021;93:106897. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106897.
18. Kismet Y. Investigation of the changes in melt flow indexes (MFI) and densities of polyamide 6 (PA6) and polyoxymethylene (POM) related with hydrolyzed powder coating waste amount. Pamukkale University J Eng Sci. 2016;22(4):241-245. https://doi.org/10.5505/pajes.2015.98215.
19. Chiono V, Filippi S, Yordanov H, Minkova L, Magagnini, P. Reactive compatibilizer precursors for LDPE/PA6 blends. III: Ethylene–glycidylmethacrylate copolymer. Polym. 2003;44(8):2423-2432. https://doi.org/10.1016/S0032-3861(03)00134-4.
20. Rothon RN. Particulate-Filled Polymer Composites (2nd Ed.). Rapra Technology Limited, Shawbury, UK.2003. ISBN: 978-1859573822.
21. M. I. Kohan, Nylon Plastic Handbook, New York (1995).

22. Mark HF. Encyclopidea of Polymer Science and Technology, Pittsburgh (2014).
23. Calderón-Perea NE, Velasco F, Bautista A, Fernández-Álvarez M. The role of curing conditions in the wear behavior of hybrid epoxy-polyester powder coatings. Prog Org Coat. 2026;215:110075. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2026.110075.
24. Marras SI, Zuburtikudis I, Panayiotou C. Nanostructured powder coatings: Effect of the filler type on the thermal stability and morphology. Prog Org Coat. 2007;58(4): 316-323. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat. 2007.01.008
25. González MG, Cabanelas JC, Baselga J. Applications of FTIR on epoxy resins. In Infrared Spectroscopy-Materials Science. Eng Technol. 2012;261-284. https://doi.org/10.5772/36383.
26. Radoman TS, Džunuzović JV, Jeremić KB, Grgur BN, Miličević DS, Popović IG. Novel hybrid polyester/epoxy powder coatings: Curing kinetics and thermal properties. Prog Org Coat. 2014;77(1):168-176. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.08.016.
27. Smith BC. The Infrared Spectra of Polymers V: Epoxies. Spectroscopy, 2022;37(1):8-12. https://doi.org/10.56530/spectroscopy.wb6882h7
28. Pretsch E, Bühlmann P, Badertscher M. Structure Determination of Organic Compounds: Tables of Spectral Data (5th Ed.). Springer-Verlag. 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-662-62439-5.
29. Farmer VC. The Infra-Red Spectra of Minerals. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland. 1974.
30. Deopura BL, Alagirusamy R Joshi M, Gupta B. (Eds.). Polyesters and Polyamides. Woodhead Publishing/Elsevier. 2008. https://doi.org/10.1533/9781845694609.
31. Fornes TD, Paul DR. Crystallization behavior of nylon 6 nanocomposites. Polym. 2003;44(14):3945-3961. https://doi.org/10.1016/S0032-3861(03)00344-6.
32. Skrovanek DJ, Painter PC, Coleman MM. Hydrogen bonding in polymers: 2. Infrared temperature studies of nylon 11 and nylon 12. Macromolecules, 1986;19(3):699-705. https://doi.org/10.1021/ma00157a037.
33. Quarti C, Milani A, Castiglioni C. Ab initio calculation of the crystalline structure and IR spectra of the αα and γγ crystalline polymorphs of nylon 6. J Phys Chem B. 2013;117(2):706-718. https://doi.org/ 10.1021/jp309489m.
34. Calderón-Perea NE, Velasco F, Bautista A, Fernández-Álvarez M. The role of curing conditions in the wear behavior of hybrid epoxy-polyester powder coatings. Prog Org Coat. 2026;215:110075. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2026.110075.
35. Radoman TS, Džunuzović JV, Jeremić KB, Grgur BN, Miličević DS, Popović IG. Novel hybrid polyester/epoxy powder coatings: Curing kinetics and thermal properties. Prog Org Coat. 2014;77(1):168-176. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.08.016.
36. Coleman MM, Graf JF, Painter PC. Specific Interactions and the Miscibility of Polymer Blends. CRC Press/ Technomic. 1995. https://doi.org/10.1201/9781482273762.
37. Zhang Q, Yang H, Fu Q. Preparation with very low compatibilizer concentration and characterization of polypropylene/polyamide 6 blends. Polym. 2004;45(6): 1913-1922. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.01.024

How to cite this article:
Jeddi S, Zaarei D, Khajavi R, Ehsani M. Effect of Hybrid Epoxy-Polyester Powder Coating Waste Particles on the Morphology and Thermal Properties of Polyamide 6. J Color Sci Tech. 2026;20(3):207-226. https://doi.org/10.30509/jcst.2026.167898.1297 [In Persian]