Review Article

Polymerization
Quarterly, 2025
Volume 15, Number 3
Pages 3-22
ISSN: 2252-0449

Application of Recycled Plastics in Producing Sustainable Materials for the Construction and Road Industries

Elham Khalaj Karimi and Ahdieh Amjadi*

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, P.O. Box 55181-83111, Maragheh, Iran

Received: 17 December 2024, Accepted: 13 April 2025

Abstract

The use of recycled plastics in the construction industry has been considered as a sustainable solution to reduce environmental pollution and the consumption of natural raw materials and improve the technical properties of these materials. In this study, the use of recycled plastics in the production of concrete, asphalt, bricks, and other construction materials was investigated and their effect on the mechanical properties, durability, and structural performance of the materials was also evaluated. The results show that although replacing traditional materials with recycled plastics may sometimes reduce compressive and tensile strength, it significantly improves workability, moisture resistance, and the thermal and acoustic insulation of the materials, as well as extending their lifespan Also, the use of these materials helps to reduce plastic waste, costs, and the carbon footprint. This study shows that by optimizing the replacement ratio and surface modification of plastics, the performance of construction materials can be improved and an effective step can be taken towards the development of sustainable construction technologies and the circular economy. Despite these advantages, there are challenges such as production costs, long-term durability, and how to process different plastics for use in the production of construction materials that need to be considered. This paper provides a thorough overview of the types of plastics suitable for various materials, processing methods, and the environmental impact of this approach, offering valuable insights into how recycled plastics can reshape the future of the construction industry.

Key Words

thermoplastic, sustainable construction and road materials, mechanical properties, asphalt and concrete, geosynthetic

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: a.amjadi@maragheh.ac.ir

مقاله مروری

بسپارش
فصلنامه علمی
سال پانزدهم، شماره ۳،
صفحه ۲۲-۳، ۱۴۰۴
ISSN: 2252-0449

کاربرد پلاستیک‌های بازیافتی در تولید مصالح پایدار برای صنایع ساختمانی و راه‌سازی

الهام خلج کریمی و عهدیه امجدی*

مراغه، دانشگاه مراغه، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی، صندوق پستی ۸۳۱۱۱-۵۵۱۸۱

دریافت: ۱۴۰۳/۹/۲۷، پذیرش: ۱۴۰۴/۱/۲۴

چکیده

استفاده از پلاستیک‌های بازیافتی در صنعت ساخت‌وساز به‌عنوان راهکار پایداری برای کاهش آلودگی زیست‌محیطی و مصرف مواد اولیهٔ طبیعی و ارتقای ویژگی‌های فنی این مصالح مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه، کاربرد پلاستیک‌های بازیافتی در تولید بتن، آسفالت، آجر و سایر مصالح ساختمانی بررسی و اثر آن‌ها بر خواص مکانیکی، دوام و کارایی مصالح نیز ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد، جایگزینی مصالح سنتی با پلاستیک‌های بازیافتی، مقاومت فشاری و کششی مواد را در برخی موارد کاهش می‌دهد، اما کارایی، مقاومت دربرابر رطوبت و عمر روسازی عایق گرمایی و صوتی را بهبود می‌بخشد. همچنین، استفاده از این مواد به کاهش پسماندهای پلاستیکی، صرفه‌جویی در هزینه‌ها و کاهش ردپای کربن کمک می‌کند. این مطالعه نشان می‌دهد، با بهینه‌سازی درصد جایگزینی و اصلاح سطح پلاستیک‌ها، می‌توان عملکرد مصالح ساخت‌وساز را بهبود بخشید و گامی مؤثر برای توسعه فناوری‌های ساخت‌وساز پایدار و اقتصاد چرخشی برداشت. باوجود این مزایا، چالش‌هایی نظیر هزینه‌های تولید، پایداری بلندمدت و چگونگی فراوری پلاستیک‌های مختلف برای استفاده در تولید مصالح ساختمانی وجود دارد که باید درنظر گرفته شوند. در این مقاله، انواع پلاستیک‌های قابل‌استفاده در مصالح مختلف، روش‌های فراوری و آثار زیست‌محیطی این رویکرد به‌تفصیل مرور شده است.

الهام خلج کریمی

عهدیه امجدی

واژگان کلیدی

گرمانرم،
مصالح پایدار ساختمانی و راه‌سازی،
خواص مکانیکی،
آسفالت و بتن،
زمین‌ساز

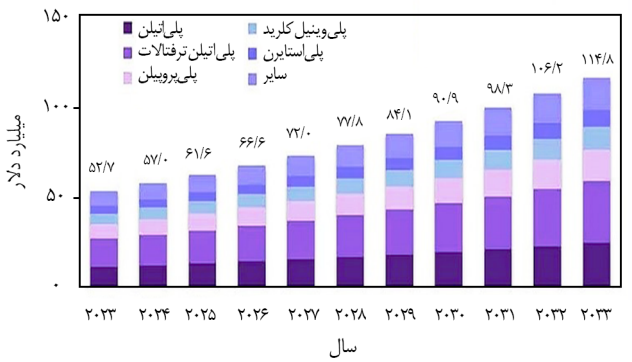
* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
a.amjadi@maragheh.ac.ir

مقدمه

انباشت پسماندهای پلاستیکی (PW) و فقدان روش‌های مناسب دفع، بحران بی‌سابقه‌ای را در محیط‌زیست به‌وجود آورده است. پسماندهای پلاستیکی، منابع آبی و آبراه‌ها را مسدود می‌کنند و در فضای دفن زباله‌ها سرریز شده و وارد خاک می‌شوند. ازطریق هوا منتقل می‌شوند و درنتیجه به آلودگی تمام منابع طبیعی محیط‌زیست منجر می‌شوند. طول عمر زیاد پلاستیک، که یکی از ویژگی‌های مفید آن است، به عاملی مضر در دفع ایمن آن تبدیل شده است. مواد پلاستیکی هرگز به‌طور کامل تجزیه نمی‌شوند، بلکه طی صدها سال به قطعه‌های کوچک‌تر تجزیه می‌شوند. براساس گزارشی از برنامه محیط‌زیست سازمان ملل متحد (United Nations Environment Programme)، سالانه حدود ۳۰۰ Mt پسماند پلاستیکی در جهان تولید می‌شود، درحالی‌که میزان پلاستیک بازیافتی تنها ۹٪ است مدیر اجرایی UNEP هشدار داده است تا سال ۲۰۵۰، حدود 1×10^{3} Mt پلاستیک در محل‌های دفن زباله خواهیم داشت که نیازمند تغییر اساسی است [۱]. ازاین‌رو، پژوهش‌هایی دربارهٔ روش‌های جدید مدیریت پسماندهای پلاستیکی در یک اقتصاد چرخشی سرعت گرفته است. اقتصاد چرخشی جایگزین سامانه خطی «برداشت، تولید، استفاده و دفع» بوده و هدف آن کاهش پسماند، استفاده بیشینه از منابع و بازیابی است [۲].

پسماندهای پلاستیکی را طبق اصل سلسله‌مراتب پسماند، ازطریق دفن، سوزاندن و بازیافت می‌توان تصفیه کرد. در حال حاضر دفن زباله به‌عنوان آخرین راه‌حل برای مدیریت پسماندهای پلاستیکی درنظر گرفته می‌شود، زیرا به فضای زیادی نیاز دارد و مشکلات آلودگی طولانی‌مدتی را ایجاد می‌کند. سوزاندن زباله‌ها در برخی کشورها به‌دلیل ارزش گرمایی زیاد پلیمر و حذف کامل پسماند پذیرفته شده است؛ اما این فرایند باعث انتشار مقدار زیادی کربن دی‌اکسید و مواد شیمیایی سمی می‌شود و خاکستر سمی نیز تولید می‌کند. بنابراین، بازیافت پسماندهای پلاستیکی به‌عنوان بهترین راه‌حل برای کاهش آثار زیست‌محیطی در زمینه مصرف منابع طبیعی و انرژی، آلودگی، دفع زباله و گرمایش جهانی پیشنهاد می‌شود [۳].

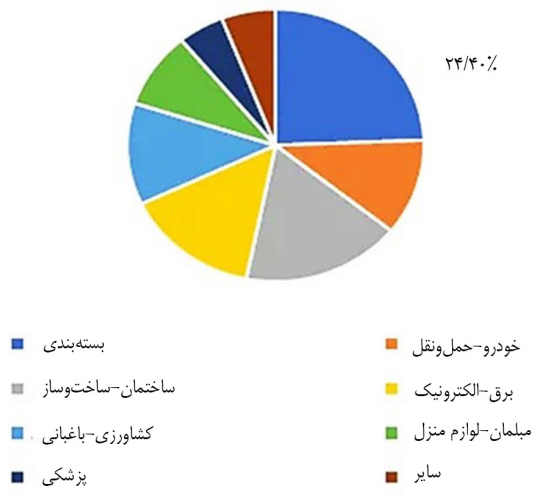
در گزارشی که در سال ۲۰۲۳ ارائه شده است، پیش‌بینی می‌شود بازار پلاستیک‌های بازیافتی تا سال ۲۰۳۳ به حدود $114/8\times10^{3}$ $M برسد، در حالی که این رقم در سال ۲۰۲۳ معادل $52/7\times10^{3}$ $M بوده است. انتظار می‌رود این بازار با سرعت رشد ترکیبی سالانه (Compound Annual Growth Rate) ۸/۱٪ طی دوره پیش‌بینی از ۲۰۲۳ تا ۲۰۳۳ رشد کند. رشد این بازار عمدتاً به‌دلیل افزایش استفاده



شکل ۱- پیش‌بینی اندازه بازار جهانی پلاستیک بازیافتی طی دوره ۲۰۲۳ تا ۲۰۳۳ [۴].

از پلاستیک در تولید قطعه‌های سبک‌وزن است که در صنایع مختلفی مانند الکتریکی، الکترونیکی و ساخت‌وساز کاربرد دارد. شکل ۱ سهم انواع مختلف مواد پلیمری را در بازار جهانی پلاستیک‌های بازیافتی نشان می‌دهد. پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) و سپس پلی‌اتیلن (PE) بیشترین سهم را در پلاستیک‌های بازیافتی دارند [۴].

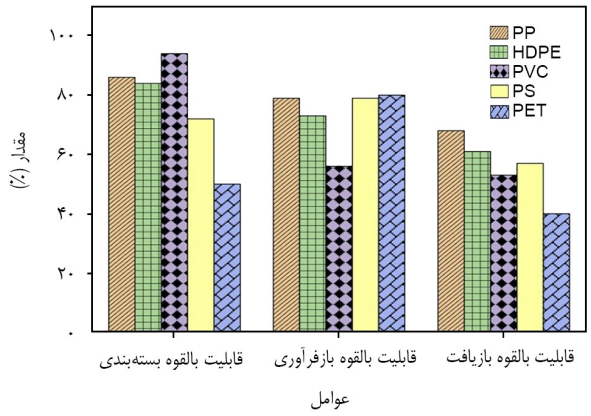
پلاستیک بازیافتی در حوزه‌های مختلف کاربرد دارند. نمودار شکل ۲، سهم بازار پلاستیک بازیافتی را در کاربردهای مختلف نشان می‌دهد. کاربردهای رایج در زمینه‌های بسته‌بندی، خودرو و حمل‌ونقل، ساختمان و ساخت‌وساز، الکترونیک و تجهیزات الکتریکی، کشاورزی و باغداری، مبلمان و لوازم خانگی و پزشکی است. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، کاربرد ساختمان و ساخت‌وساز پلاستیک بازیافتی سهم درخورتوجهی از بازار جهانی را دربرمی‌گیرد [۵]. بنابراین از میان روش‌های مختلف مدیریت



شکل ۲- سهم بازار جهانی پلاستیک بازیافتی برحسب کاربرد در سال ۲۰۲۳ [۵].

بازیافت، بازاستفاده از پسماند و مواد پلاستیکی بازیافتی در صنعت ساخت‌وساز می‌تواند روش ایده‌آلی محسوب شود. با این رویکرد، پلاستیک‌های بازیافتی می‌توانند بدون کاهش کیفیت در طول چرخه خدمات مجدداً استفاده شوند و مهم‌تر از آن، جایگزین مناسبی برای مصالح ساختمانی بکر شوند [۳].

صنعت ساخت‌وساز به‌عنوان بخش کلیدی در ترویج پایداری محیط‌زیست، می‌تواند نقش مهمی در بازیافت پلاستیک ایفا کند. اگرچه این صنعت خودبه‌خود بازیافت‌کننده اصلی پلاستیک نیست، اما با استفاده از پلاستیک‌های بازیافتی در تولید محصولات ساختمانی (مانند کانال‌ها، عایق‌ها، غشاهای مقاوم دربرابر رطوبت، زهکشی آب، لوله‌ها و غیره)، می‌تواند به کاهش پسماندهای پلاستیکی و حفظ منابع طبیعی کمک کند. با انتخاب دقیق مواد اولیه و استفاده از مواد افزودنی مناسب، محصولات ساخته‌شده از پلاستیک بازیافتی می‌توانند به‌خوبی با محصولات پلاستیکی بکر رقابت کنند و ازنظر کیفیت و عملکرد در سطح عالی قرار گیرند. این رویکرد نه‌تنها به حفظ محیط‌زیست کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری در صنعت ساخت‌وساز نیز منجر شود [۶]. در این راستا، طیف وسیعی از پسماندهای پلاستیکی مانند PET، پلی‌اتیلن پرچگالی (HDPE)، پلی‌وینیل کلرید (PVC)، پلی‌پروپیلن (PP) و همچنین پلی‌استیرن (PS) به‌دقت بررسی شده‌اند. این مواد به‌دلیل خواص عالی مانند دوام، سبک‌وزنی، استحکام، سختی و عایق‌بندی خوب دربرابر گرما، برای استفاده و بازیافت در صنعت ساخت‌وساز بسیار مناسب هستند [۷]. مطالعات نشان داده‌اند، این مواد، بسته به نوع و خواص پسماندهای پلاستیکی، پس از بازیافت می‌توانند در کاربردهای مختلف استفاده شوند. به‌عنوان مثال، HDPE به‌دلیل سختی و استحکام نسبی در تولید الوارهای پلاستیکی، میز، صندلی و سایر انواع مبلمان کاربرد دارد. پلی‌اتیلن کم‌چگالی (LDPE) به‌دلیل انعطاف‌پذیری زیاد، می‌تواند در تولید آجر و بلوک‌های ساختمانی استفاده شود. PP ماده‌ای سخت و



شکل ۳- بررسی و مقایسه ظرفیت‌ها و قابلیت‌های موجود برای مرتب‌سازی، بازفراوری و بازیافت انواع مختلف پلاستیک‌ها [۸].

انعطاف‌پذیر است که قابلیت بالقوهٔ استفاده به‌عنوان سنگ‌دانه را در مخلوط‌های آسفالت دارد. PS به‌دلیل سختی و شکنندگی، عمدتاً در قطعه‌هایی که تحت تنش مکانیکی زیادی قرار نمی‌گیرند، مانند مواد عایق، استفاده می‌شود. PVC به‌علت سختی و استحکام زیاد، قابلیت استفاده به‌عنوان سنگ‌دانه را در مواد سیمانی دارد. ازسوی‌دیگر، PET که ماده‌ای سخت و انعطاف‌پذیر است، معمولاً به‌عنوان الیاف در کامپوزیت‌های سیمانی به‌کار می‌رود. مقایسه قابلیت‌های بالقوهٔ مختلف در زمینه‌های مرتب‌سازی، بازفراوری و بازیافت پلاستیک‌ها در شکل ۳ نشاده داده شده است [۸]. در ادامه، جدول ۱ کاربرد پلاستیک‌های بازیافتی در صنعت ساخت‌وساز، فرصت‌ها و چالش‌های استفاده از این مواد را به‌عنوان مصالح ساختمانی نشان می‌دهد.

ازطرفی استانداردهای بین‌المللی نقش مهمی در تدوین معیارهای فنی و نظارتی برای استفاده از پلاستیک‌های بازیافتی را دارند. این استانداردها با تعیین مشخصات فنی، روش‌های آزمون و الزامات زیست‌محیطی به بهبود کیفیت محصولات و یکپارچه‌سازی مقررات کمک می‌کنند. استانداردهای ISO شامل واژگان و تعاریف

جدول ۱- فرصت‌ها و چالش‌های استفاده از پسماندهای پلاستیکی در صنعت ساخت‌وساز [۹].

ماده	کاربرد	چالش‌ها	فرصت‌ها
PET	بتن، گچ ساختمانی، آسفالت و بلوک	عملکرد، برنامه بازیافت، جمع‌آوری، جداسازی و فراوری	بهبود عملکرد، ارتقای کیفیت محیط‌زیست و کاهش هزینه
HDPE	روسازی آسفالت مخلوط گرم (HMA)	فراوری و عملکرد	
LDPE	بلوک آسفالتی مخلوط گرم (HMA)	فراوری و عملکرد	
PP	مخلوط آسفالت گرم (HMA) و آسفالت	فراوری و عملکرد	
PVC	بتن، ملات	فراوری، بازیافت‌پذیری و عملکرد	
PS	بتن، گچ ساختمانی و روسازی	فراوری، عملکرد و عملکرد میدانی	

کلیدی مرتبط با پلاستیک‌ها هستند که به‌طور رایگان دردسترس بوده و به‌طور منظم بازبینی و به‌روزرسانی می‌شوند. این استانداردها در مقررات ملی و اسناد قانونی بین‌المللی الزام‌آور، ازجمله کنوانسیون‌های بازل (Basel)، روتردام و استکهلم استناد شده و در فرایند ارزیابی انطباق برای اطمینان از رعایت استانداردها و کیفیت در سطوح ملی و بین‌المللی به‌کار گرفته می‌شوند. استانداردها ISO طیف گسترده‌ای از مراحل چرخه عمر پلاستیک را دربرمی‌گیرد و حوزه‌های کلیدی آن شامل ارزیابی پایان عمر (۲۴ استاندارد)، برچسب‌گذاری و شفافیت (۱۵ استاندارد)، بازیافت و کمپوست‌سازی (۱۳ استاندارد) و استانداردهای فراگیر مرتبط با اقتصاد چرخشی (۱۱ استاندارد) است [۱۰]. ازاین‌رو، با توجه به رشد سریع بازار پلاستیک‌های بازیافتی و اهمیت آن در صنایع مختلف، به‌ویژه صنعت ساخت‌وساز، این حوزه به‌عنوان فرصتی کلیدی برای کاهش پسماندهای پلاستیکی و ترویج پایداری محیط‌زیست مورد توجه قرار گرفته است.

استفاده از پلاستیک‌های بازیافتی در تولید مصالح ساختمانی نه‌تنها می‌تواند به کاهش وابستگی به منابع طبیعی کمک کند، بلکه با ارائه جایگزین‌های اقتصادی و باکیفیت، موجب ارتقای بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها در این صنعت می‌شود. در این پژوهش، ضمن بررسی جامع کاربرد پلاستیک‌های بازیافتی در ساخت‌وساز، به قابلیت بالقوهٔ این مواد در توسعه محصولات ساختمانی پایدار و سازگار با محیط‌زیست پرداخته می‌شود.

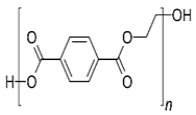
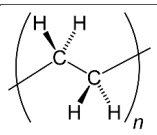
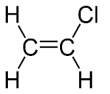
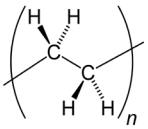
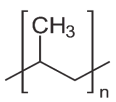
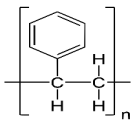
پلاستیک‌ها و انواع آن‌ها

اصطلاح پلاستیک از کلمه یونانی plastikos گرفته شده است که به معنای قابل‌قالب‌گیری است. این اصطلاح به خاصیت انعطاف‌پذیری و شکل‌پذیری مواد اشاره دارد که ریخته‌گری، اکسترود کردن یا شکل‌دهی با فشار آن‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد. مواد پلاستیکی از منابع مختلف تولید می‌شوند. مواد اولیه آن‌ها می‌تواند دارای منشأ فسیلی مانند نفت خام و گاز، منابع تجدیدپذیر مانند نیشکر، نشاسته و روغن‌های گیاهی یا حتی پایهٔ معدنی مانند نمک باشد [۱۱]. پلاستیک‌ها براساس عوامل مختلف مانند منشأ، ساختار، نیروهای مولکولی، سازوکار پلیمرشدن، رفتار گرمایی و فناوری‌های نگهداری طبقه‌بندی می‌شوند. براساس منبع، پلاستیک‌ها به سه دسته طبیعی، نیمه‌سنتزی و سنتزی تقسیم می‌شوند. آن‌ها را براساس ساختار، می‌توان به نوع خطی، شاخه‌ای و شبکه‌ای تقسیم کرد. طبقه‌بندی مبتنی بر مولکول شامل الاستومرها، الیاف، گرمانرم‌ها و گرماسخت‌ها می‌شود. همچنین، آن‌ها را براساس خواص فیزیکی شیمیایی پیش و پس از عملیات گرمایی می‌توان به گرمانرم‌ها و گرماسخت‌ها دسته‌بندی کرد.

گرماسخت‌ها به‌جای تغییرشکل، با گرمادهی تجزیه می‌شوند. درمقابل، گرمانرم‌ها در حین گرم شدن ذوب شده و در هنگام سرد شدن جامد می‌شوند و ازاین‌رو می‌توانند بارها و بارها شکل گیرند [۱۲]. سه نوع گرمانرم وجود دارد که با استفاده از فرایندهای مکانیکی، گرمایی و شیمیایی به‌راحتی بازیافت‌پذیرند. گروه اول شامل گرمانرم‌های بلوری است که دارای زنجیرای مولکولی شفاف و نظم‌یافته‌اند و مقاومت ضربه‌ای زیادی دارند. نمونه‌هایی از این‌گونه پلاستیک‌ها عبارت از PP، HDPE و LDPE است. گرمانرم‌های بی‌شکل، که مولکول‌های آن‌ها به‌طور تصادفی چیده شده‌اند، شامل موادی مانند آکریلونیتریل بوتادی‌ان استیرن (ABS)، PVC، پلی‌کربنات (PC)، PS و پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) هستند. گروه سوم، گرمانرم‌های نیمه‌بلوری مانند پلی‌آمید ایمید (PAI) و پلی‌بوتیلن ترفتالات (PBT) را دربرمی‌گیرد که ویژگی‌های آن‌ها میان گرمانرم‌های بلوری و بی‌شکل قرار دارند [۱۳]. انجمن صنعت پلاستیک (Society of the Plastics Industry) نوعی سامانهٔ کدگذاری عددی برای شناسایی انواع پلاستیک معرفی کرده است. جدول ۲ این طبقه‌بندی را همراه با قابلیت‌های کاربردی آن در صنعت ساخت‌وساز ارائه می‌دهد. در این سامانه، شماره‌های ۱ تا ۷ به انواع مختلف پلاستیک اختصاص داده شده‌اند: ۱ به PET، ۲ به HDPE، ۳ به PVC، ۴ به LDPE، ۵ به PP، ۶ به PS و ۷ به سایر انواع پلاستیک. این طبقه‌بندی به مصرف‌کنندگان و بازیافت‌کنندگان کمک می‌کند تا فرایند بازیافت را آسان سازند [۱۲].

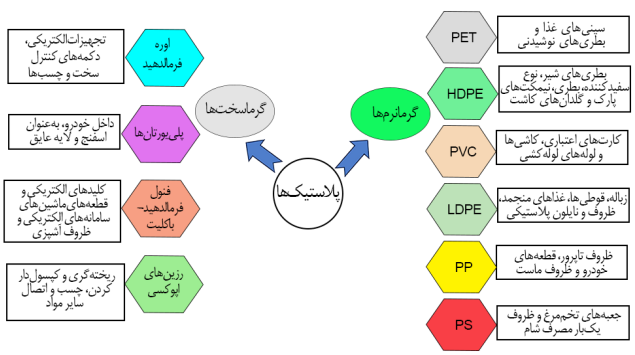
دراین‌میان، PET با سهم بازار ۲۹/۳٪ به‌دلیل کاربرد گستردهٔ آن در بسته‌بندی صنایع مختلف مانند مواد غذایی، نوشیدنی، کالاهای مصرفی و بخش‌های صنعتی بر بازار تسلط دارد. PP نیز به‌دلیل ویژگی‌های برجسته‌ای مانند استحکام مکانیکی و مقاومت دربرابر مواد شیمیایی، به‌طور گسترده در تجهیزات آزمایشگاهی، وسایل پزشکی و بسته‌بندی استفاده می‌شود. شکل ۴، طبقه‌بندی انواع پلاستیک‌ها و برخی کاربردهای آن‌ها را نشان می‌دهد. انتظار می‌رود، تقاضا برای PP در صنایع خودروسازی، بسته‌بندی و ساخت‌وساز افزایش یابد. بطری‌های پلاستیکی به‌عنوان منبع، سهم درخورملاحظه‌ای (۶۵٪) از درآمد جهانی پلاستیک‌های بازیافتی را در سال ۲۰۲۳ به خود اختصاص داده‌اند و در صنایع مختلف مانند روغن‌ها، داروسازی و نوشیدنی‌های گازدار کاربرد دارند [۴].

جدول ۲- طبقه‌بندی پلاستیک‌ها مطابق انجمن صنایع پلاستیک (SPI) [۱۴].

نام پلیمر-نماد	ساختار شیمیایی	کاربردها	بازیافت‌پذیری	قابلیت کاربرد مصالح ساختمانی
1 PET پلی‌تیلن ترفتالات		بطری‌های نوشابه، آب و سس سالاد و شیشه‌های دارو	بله	اصلاح آسفالت، بتن متخلخل، تثبیت خاک، تولید میل گرد پلیمر تقویت‌شده با الیاف شیشه
2 HDPE پلی‌اتیلن پرچگالی		بطری‌های مایع دستشویی، مواد شوینده و ظروف سفیدکننده و کیسه‌های زباله	بله	اصلاح آسفالت، اجزای سازه‌ای بتن و تثبیت خاک
3 PVC پلی‌وینیل کلرید		لوله‌های لوله‌کشی، کابل‌ها و حصارها	محدود	اصلاح آسفالت و بتن‌های بادوام
4 LDPE پلی‌اتیلن کم‌چگالی		سلوفان و کیسه‌های ساندویچ و خرید	محدود	اصلاح آسفالت و آجرهای سیمانی
5 PP پلی‌پروپیلن		ظروف غذایی قابل بازاستفاده، بطری‌های نسخه‌دار و درب بطری	محدود	اصلاح آسفالت، بتن سبک و گچ‌های پلاستری
6 PS پلی‌استیرن		ظروف پلاستیکی، اسفنج‌های بسته‌بندی و استیروفوم	خیر	اصلاح آسفالت و ملات‌های سیمانی سبک وزن
7 Other سایر پلاستیک‌ها (مثلاً آکریلیک، پلی‌کربنات)	-	بطری‌های آب خنک‌کننده، لیوان‌های کودک و فایبرگلاس	خیر	گچ‌های پلاستری و بتن بازیافتی

فرایندهای بازیافت پلاستیک‌ها

بازیافت پلاستیک‌ها شامل چند مرحله، ازجمله جمع‌آوری پسماندها از محل تولید یا دفع، جداسازی، فشرده‌سازی، خرد کردن و تبدیل آن‌ها به مواد اولیه است. این فرایندها با فراورش گرمایی، شیمیایی یا مکانیکی ادامه می‌یابند تا محصول نهایی تولید شود. بدینلیل، بازیافت پسماندهای پلاستیکی پیچیده‌تر از بازیافت سایر مواد مانند آلومینیم، شیشه، سرامیک و کاغذ است و کمتر ترجیح داده می‌شود [۱۵]. انتخاب روش مناسب بازیافت به معیارهای مختلف مانند انواع افزودنی‌های اضافه‌شده به پلیمرها، خلوص جریان پلیمر و ترکیبات شیمیایی موجود در پلیمرها بستگی دارد [۱۳]. فرایند بازیافت با جداسازی خودکار پلاستیک‌ها آغاز می‌شود که از فناوری‌هایی نظیر طیف‌سنجی زیرقرمز، فلوئورسانس، شناورسازی و الکتروستاتیک بهره می‌برد. در بازیافت مکانیکی، پسماندهای پلاستیکی ازطریق خرد کردن و آسیاب کردن به قطعه‌های کوچک‌تر تبدیل می‌شوند. بازیافت شیمیایی، پلاستیک‌ها را به مونومرها یا زنجیرهای کوچک‌تر تجزیه می‌کند و سپس به‌طور شیمیایی تغییر می‌دهد تا به مواد خام



شکل ۴- طبقه‌بندی انواع پلاستیک و کاربردهای آن‌ها [۱].

اولیه تبدیل شوند که برای ساخت محصولات جدید به‌کار می‌رود. در فرایندهای گرمایی، پسماندهای پلاستیکی در دماهای زیاد گرم و ذوب شده و از مواد ذوب‌شده، محصولات جدید تولید می‌شوند [۱۵].

بازیافت پلاستیک شامل روش‌های مختلف است که به چهار دسته بازیافت اول، دوم، سوم و چهارم تقسیم می‌شود. هر روش، فرایندها و اهداف مشخصی دارد. بازیافت اول یا بازیافت حلقه‌بسته، شامل بازفراوری پسماندهای پلاستیکی برای تولید محصولی با خواص مشابه مواد اولیه است. بازیافت دوم، که به آن بازیافت کاهشی می‌گویند، به تولید محصولاتی با خواص متفاوت از پسماندهای پلاستیکی می‌پردازد. بازیافت سوم بر بازیابی مواد شیمیایی از پسماندهای پلاستیکی تمرکز دارد، درحالی‌که در بازیافت چهارم، انرژی موجود در پسماندهای پلاستیکی را برای تولید بخار و الکتریسیته استفاده قرار می‌دهد. بازیافت مکانیکی در هر دو بازیافت اول و دوم به‌کار می‌رود. فرایند بازیافت مکانیکی شامل مراحل کلیدی جمع‌آوری، جداسازی، شست‌وشو، کاهش اندازه و جداسازی است [۱۶].

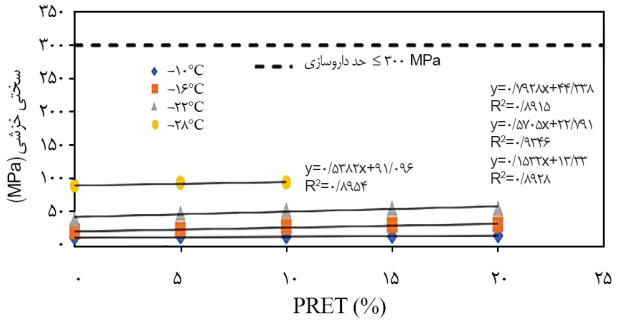
بازیافت مکانیکی پلاستیک‌ها به‌دلیل ترکیب پسماندهای مختلف و تغییرات گرمایی با محدودیت‌هایی روبروست. این مسئله بر زنجیرهای پلیمری و انتقال افزودنی‌ها و آلاینده‌ها اثر می‌گذارد. همچنین، گرماسخت‌ها به‌دلیل نداشتن قابلیت ذوب مجدد، بازیافت‌پذیر نیستند که باعث محدودیت در چرخه بازیافت آن‌ها می‌شود. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، فناوری‌های جایگزین مانند بازیافت شیمیایی و برپایهٔ حلال معرفی شده‌اند. این روش‌ها زنجیرهای پلیمر را تجزیه و به کمک کاتالیزگرها و واکنش‌دهنده‌ها به ساختارهای جدید تبدیل می‌کنند. بازیافت شیمیایی این امکان را می‌دهد که افزودنی‌ها و آلاینده‌ها حذف شوند. روش‌های رایج شامل گاز شدن، تجزیهٔ گرمایی و واپلیمر شدن هستند که برای انواع مختلف پلاستیک‌ها کاربرد دارند [۱۷].

پس از چندبار بازیافت پلاستیک‌ها با روش‌های اول، دوم و سوم، خواص مواد اغلب از دست می‌رود و دفن آن‌ها موجب آلودگی محیط‌زیست می‌شود. ازاین‌رو یکی از راه‌های مؤثرتر، بازیافت چهارم است که شامل سوزاندن پسماند برای بازیابی انرژی است. بازیافت انرژی از پسماندهای پلاستیکی هنگامی معنا می‌یابد که بازیافت به‌علت محدودیت‌ها امکان‌پذیر نباشد. با توجه به منشأ نفتی پلاستیک‌ها و ارزش گرمایی زیاد آن‌ها، این روش منطقی به‌نظر می‌رسد. بااین‌حال، سوزاندن پسماندها می‌تواند به نگرانی‌های زیست‌محیطی، به‌ویژه انتشار آلاینده‌هایی چون CO_2، NOx و SOx منجر شود [۱۸].

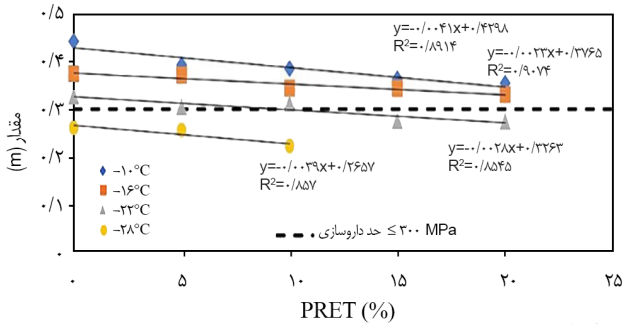
کاربرد پلاستیک‌های بازیافتی به‌عنوان پرکننده آسفالت

افزایش چشمگیر بار ترافیکی و حجم محورهای سنگین به شکست زودرس روسازی منجر می‌شود. عدم توانایی روسازی‌های انعطاف‌پذیر در تحمل این بارهای سنگین در دماهای بالا موجب یافتن راه‌حل‌هایی برای کاهش حساسیت دما و تنش در مواد شده است. در سال‌های اخیر، مواد مختلفی به‌عنوان اصلاح‌کننده برای مواد قیری ارزیابی شده‌اند. ازآنجاکه پلاستیک‌ها به‌عنوان چهارمین منبع بزرگ زباله شناخته می‌شوند و دفن پسماندهای پلاستیکی به‌دلیل تجزیه‌ناپذیری تهدید بزرگی محسوب می‌شود [۱۹]، بازیافت پسماندهای پلاستیکی در روسازی آسفالت به‌دلیل کاربرد گستردهٔ آن در سراسر جهان می‌تواند به‌طور درخورتوجهی در کاهش بحران پسماندهای پلاستیکی مؤثر باشد. افزودن مقدار کمی پسماندهای پلاستیکی به آسفالت، معمولاً بین ٪۲ تا ٪۲۰ وزنی قیر، می‌تواند مصرف پلاستیک در مخلوط آسفالت را افزایش دهد. برای مثال، در ایالات متحده در سال ۲۰۲۰ تولید کل مخلوط آسفالت گرم به ۳۷۵ Mt رسید. با فرض استفاده از ٪۱۰ پسماندهای پلاستیکی (نسبت به وزن قیر) در روسازی آسفالت، می‌توان تا ۱/۸۸ Mt از این پسماندها را مصرف کرد. افزون‌براین، استفاده از پسماندهای پلاستیکی در آسفالت به حفظ منابع تجدیدناپذیر مانند قیر و سنگ‌دانه‌ها نیز کمک می‌کند [۲۰].

ایجاد ابزاری برای انتخاب منابع پلاستیک بازیافتی مناسب در اصلاح قیر و آسفالت می‌تواند به بازیافت‌کنندگان کمک کند تا پلاستیک‌های مناسب جاده را با خطوط تولید اختصاصی برای صنعت قیر و آسفالت توسعه دهند. مطالعه‌ای ابزار رتبه‌بندی براساس هشت معیار اعمال‌شده بر ۳۱ منبع مختلف پلاستیک بازیافتی ارائه داد تا برآورد کند کدام نوع برای اصلاح قیر و آسفالت مناسب‌تر است. نتایج این مطالعه نشان داد، به‌طورکلی پلاستیک‌های برپایهٔ LDPE و LLDPE مناسب‌ترین گزینه‌ها هستند [۲۱]. ازسویی، مطالعات متعدد اثر پلاستیک‌های پسماند را بر بهبود ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های آسفالت بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد، افزودن ٪۲/۵ کیسه‌های پلاستیکی به مخلوط آسفالت، سبب بهبود خواص مکانیکی آن می‌شود. پژوهشگران در مطالعه‌ای مشاهده کردند، افزودن ٪۸ LDPE می‌تواند چقرمگی مخلوط‌های قیری را افزایش دهد. افزون‌براین، فرایند تفکافت LDPE موجب بهبود پایداری مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) و مقاومت فشاری آسفالت می‌شود. همچنین مطالعات نشان داده‌اند، افزودن بیش از ٪۳ HDPE بر مقاومت مخلوط‌های آسفالت اصلاح‌شده اثر می‌گذارد



شکل ۵- تغییرات سختی خزشی پیونده آسفالت پیرشده با PAV برحسب درصد R-PET [۲۲].



شکل ۶- تغییرات سرعت آسایش تنش (مقدار-m) پیونده آسفالت پیرشده با PAV دربرابر دما [۲۲].

[۱۹]. پژوهشگران با افزودن پلی‌استیرن انبساط‌یافته (EPS) و PE به آسفالت مشاهده کردند، هر اصلاح‌کننده آثار متفاوتی دارند. هر دو پلیمر نقطه نرمی، حساسیت دمایی و شکل‌پذیری پیوندهٔ آسفالت را بهبود بخشیدند. بااین‌حال، افزودن PE باعث کاهش نفوذ شد، درحالی‌که EPS این ویژگی را افزایش داد [۱۹].

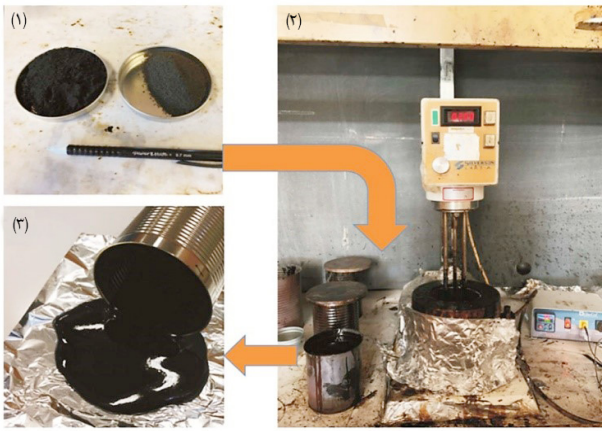
Abuaddous و همکاران از پلی‌اتیلن ترفتالات بازیافتی (R-PET) به‌عنوان اصلاح‌کننده پیوندهٔ آسفالت استفاده کردند. در این پژوهش، R-PET در پنج درصد مختلف ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ با درجه نفوذ ۷۰/۶۰ با پیوندهٔ آسفالت مخلوط شد. نتایج نشان داد، افزودن R-PET باعث کاهش انعطاف‌پذیری و مقدار نفوذ و افزایش نقطه نرمی و گران‌روی چرخشی پیوندهٔ آسفالت شد. همچنین، مقاومت شیارشدگی در دمای زیاد بهبود یافت و درجه عملکرد در دماهای زیاد از ۶۴ °C (نمونه شاهد) به ۷۰ °C در مقادیر ۱۵ و ۲۰٪ R-PET افزایش یافت. بااین‌حال، R-PET اثر منفی بر ترک‌خوردگی خستگی داشت. بررسی آن‌ها نشان داد، مقدار بهینه R-PET برای اصلاح پیوندهٔ آسفالت ۱۵٪ است. نتایج آزمون رئومتر تیرچه خمشی (bending beam rheometer, BBR) برای ارزیابی اثر افزودن R-PET بر مقاومت پیوندهٔ آسفالت دربرابر ترک‌خوردگی در دمای کم، در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است [۲۲].

باید گفت، دو روش فرایند مرطوب و خشک برای افزودن لاستیک و پلاستیک پسماند به آسفالت وجود دارد (شکل ۷). در روش مرطوب، پسماند به‌عنوان اصلاح‌کننده به قیر افزوده شده و با آن ترکیب می‌شوند و درنتیجه قیر اصلاح‌شده با پلیمر تولید می‌شود. در روش خشک، این افزودنی‌ها به‌عنوان پرکننده یا سنگ‌دانه در مخلوط آسفالت عمل می‌کنند، به‌طوری‌که می‌توان سنگ‌دانه‌های خام و پرکننده را با این پسماندها جایگزین کرد [۱۴]. براساس نتایج مطالعات مختلف، استفاده از پلاستیک‌ها در مخلوط‌های آسفالت با استفاده از روش خشک، به‌ویژه ازنظر فراوری پسماند و مسائل آمادی، ساده‌تر باشد. افزون‌براین در روش خشک می‌توان مقادیر درخورتوجهی پلاستیک را به مخلوط آسفالت افزود، زیرا این مواد به‌صورت وزنی دانه‌ها اضافه می‌شوند، درحالی‌که در روش مرطوب به‌صورت وزنی پیونده‌ها اضافه می‌شوند. هنگام بررسی انواع پلاستیک‌های مناسب برای هر روش اختلاط، ساده‌ترین راه این است که به دمای ذوب توجه شود. پلاستیک‌هایی با دمای ذوب

(الف)

(ب)

شکل ۷- (الف) فرایند مرطوب و (ب) فرایند خشک [۲۳].



شکل ۸- پیوندهٔ آسفالت فراوری‌شدهٔ مرطوب با خرده‌های لاستیک (CR) و پسماندهای پلاستیکی: (۱) پودرهای CR و پسماند پلاستیکی، (۲) اختلاط با پیوندهٔ آسفالت در دمای زیاد و (۳) پیوندهٔ آسفالت اصلاح‌شدهٔ پسماندهای پلاستیکی [۲۴].

کم، مانند PE و PP، برای فرایند مرطوب مناسب‌ترند. بااین‌حال، پلاستیک‌های با دمای ذوب کم حتی در روش خشک نیز می‌توانند کاربرد داشته باشند، زیرا دراینحالت فیلمی بر سطح دانه‌ها تشکیل می‌دهند که باعث بهبود چسبندگی می‌شود. ازاین‌رو، روش خشک نسبت به روش مرطوب به‌عنوان گزینه‌ای با قابلیت بالقوهٔ بیشتر درنظر گرفته می‌شود، به‌ویژه زمانی‌که پلاستیک‌هایی با دماهای ذوب زیاد و کم مدنظر باشد. هزینهٔ کلی ساخت با استفاده از روش مرطوب نیز نسبتاً بیشتر از روش خشک گزارش شده است [۲۳]. به‌عنوان مثال، پیوندهٔ آسفالت اصلاح‌شده با خرده لاستیک که با استفاده از فناوری فراورش مرطوب در آزمایشگاه آسفالت دانشگاه میشیگان تولید شده، در شکل ۸ نشان داده شده است [۲۴].

چالش اختلاط پلاستیک بازیافتی و آسفالت

استفاده از پسماندهای پلاستیکی در ترکیب مخلوط‌های آسفالتی، رویکرد بالقوه‌ای برای کاهش مشکلات مربوط به دفع این مواد محسوب می‌شود. بااین‌حال، روش مزبور نگرانی‌های زیست‌محیطی و بهداشتی متعددی را به همراه دارد. بدین‌دلیل، ارزیابی انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از گرم شدن پلاستیک‌ها در فرایند ساخت ضروری است. افزون‌براین، انتشار ذرات پلاستیکی و مواد شیمیایی سمی در طول عمر مفید آسفالت از جنبه‌های مهمی است که نیازمند بررسی و بحث دقیق است [۲۳]. ازسویی، استفاده از پسماندهای پلاستیکی بازیافتی در آسفالت با وجود مزایای آن، نگرانی‌های اقتصادی و فنی نیز به همراه دارد. از لحاظ اقتصادی، تولید اولیهٔ مخلوط‌های آسفالت با پلاستیک ممکن است به تجهیزات اضافی و هزینه‌های بیشتر نیاز داشته باشد. ازجنبهٔ فنی، روغن مایع حاصل از تفکافت پلاستیک‌ها حاوی ناخالصی‌هایی است که ممکن است کاربرد آن را در آسفالت محدود کند. همچنین، برخی پلاستیک‌ها ممکن است عملکرد مخلوط آسفالت را کاهش دهند و مقاومت کمتری دربرابر آسیب‌های رطوبتی نشان دهند. دمای زیاد مورد نیاز و بسامد بارگذاری کم نیز می‌توانند به مشکلاتی مانند فرورفتگی در این مخلوط‌ها منجر شوند [۲۴].

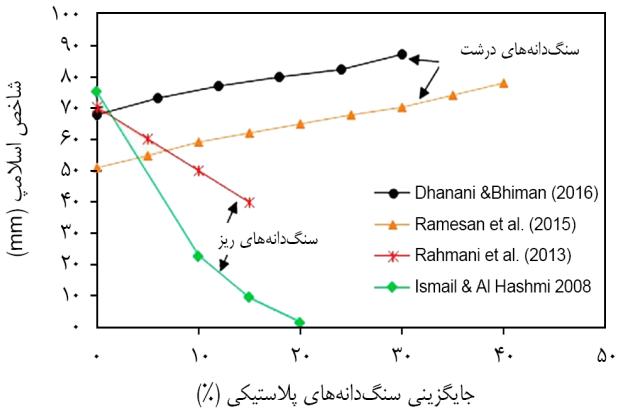
Yin و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی استفاده از پلی‌اتیلن بازیافتی (R-PE) و نوعی ترپلیمر الاستومری فعال (RET) برای اصلاح مخلوط‌های آسفالت پرداختند. نتایج نشان داد، استفاده از R-PE و ترکیب آن با RET موجب بهبود مقاومت دربرابر شیار شدن و افزایش مقاومت دربرابر رطوبت می‌شود. باوجوداین این اصلاحات اثر شایان توجهی بر ترک‌خوردگی بازتابی و مقاومت ترک‌خوردگی گرمایی نداشتند. بنابراین، درحالی‌که برخی ویژگی‌های مکانیکی بهبود می‌یابد، چالش‌هایی مانند حساسیت به ترک‌خوردگی وجود دارند که نیازمند بررسی بیشتر است [۲۵].

هرچند استفاده از پلاستیک‌های پسماند در روسازی‌های آسفالت می‌تواند به بهبود عملکرد روسازی و کاهش دفن زباله کمک کند، اما نگرانی‌هایی نیز دربارهٔ تجزیهٔ این پلاستیک‌ها به میکروپلاستیک‌ها و احتمال ورود آن‌ها به منابع آبی و آسیب به بوم‌سازگان وجود دارد، بنابراین این موضوع نیازمند پژوهش‌های بیشتری است [۲۴].

بتن

بتن به‌عنوان کاربردی‌ترین مادهٔ ساختمانی در جهان شناخته می‌شود، زیرا ویژگی‌های مفید و قابل اعتمادی ارائه می‌دهد. این ماده از ترکیب سادهٔ سیمان، دانه‌های ریز و درشت و آب تشکیل شده است و ازنظر اقتصادی در مقایسه با سایر مواد ساختمانی مقرون‌به‌صرفه‌تر، محکم‌تر و بادوام‌تر است. بااین‌حال، بتن معایب شایان‌ملاحظه‌ای نیز دارد. ازجمله برخورداری از مقاومت کششی کمتر که به‌راحتی تحت تنش‌های کششی دچار شکست می‌شود. افزون‌براین، تولید بتن به انتشار درخورتوجه کربن دی‌اکسید و تخریب بوم‌سازگان منجر می‌شود [۲۶].

پژوهشگران برای کاهش آلودگی ناشی از تولید بتن در حال بررسی روش‌های بهبود آن هستند. از روش‌های نوآورانه، جایگزینی مواد افزودنی جامد مانند پلاستیک و لاستیک به‌جای سنگ‌دانه‌های خام است. این تغییر می‌تواند موجب کاهش انتشار کربن دی‌اکسید ناشی از استخراج مواد خام و حفظ منابع طبیعی شود. بتن‌های پلاستیکی



شکل ۹- اثر سنگ‌دانه‌های پلاستیکی ریز و درشت بر اسلامپ بتن [۲۷].

با جایگزینی جزئی دانه‌های درشت یا ریز بتن با انواع پلاستیک‌ها تولید می‌شوند. بااین‌حال، اغلب کاهش مقاومت مکانیکی و کارایی این نوع بتن‌ها گزارش شده است که علت آن پیوند ضعیف دانه‌های پلاستیکی با فاز ملات سیمانی و نیز مقاومت خردشدگی کم دانه‌های پلاستیکی است. برای مثال، استفاده از PET و HDPE به‌عنوان دانه می‌تواند مقاومت کششی را افزایش داده، اما مقاومت فشاری و خمشی را کاهش دهد. باوجوداین، استفاده از PET می‌تواند صرفه‌جویی معادل Mt ۸۲۰ شن در سال داشته باشد. بنابراین، توسعه بتن‌های پلاستیکی تعادلی میان کاهش مقاومت مکانیکی و مزایای زیست‌محیطی ایجاد می‌کند [۱۴].

اسلامپ بتن معمولاً برای اندازه‌گیری قابلیت کارایی مخلوط تازه استفاده می‌شود. عواملی مانند اندازه و شکل ذرات، نسبت آب به سیمان و مقدار نرم‌کننده به‌طور مستقیم بر کارایی بتن اثرگذارند. پژوهشگران مختلف اثر پلاستیک‌های بازیافتی به‌عنوان دانه‌های پسماند پلاستیکی بازیافتی (recycled waste plastic aggregates, RWPA) بر کارایی بتن را بررسی کرده‌اند. یافته‌های آن‌ها نشانگر اثر متناقض RWPA بر کارایی بتن بوده که در شکل ۹ نمایش داده شده است [۲۷]. در ادامه، دو روش اصلی برای استفاده از پسماندهای پلاستیکی در بتن توضیح داده می‌شود.

پلاستیک بازیافتی به‌عنوان الیاف تقویت‌کننده در بتن

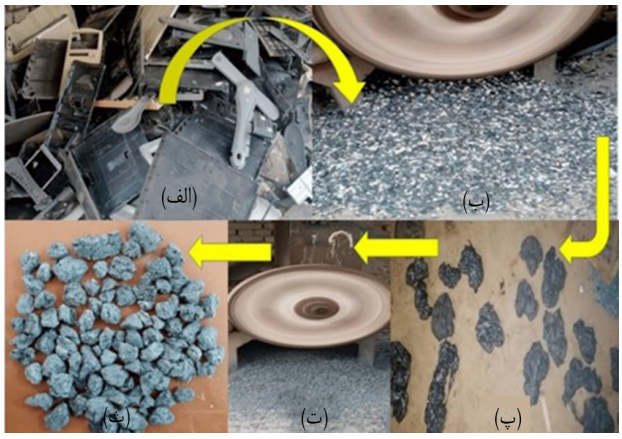
چهار نوع الیاف اصلی برای تقویت بتن وجود دارد: الیاف فولادی، شیشه‌ای، طبیعی و سنتزی. الیاف فولادی مقاومت کششی و خمشی بتن را بهبود می‌بخشند و به کنترل ترک‌ها کمک می‌کنند، اما مشکل خوردگی آن‌ها می‌تواند به زوال سریع سازه‌ها منجر شود. الیاف شیشه‌ای اثر تقویتی خوبی دارند، اما مقاومت قلیایی کمتری نشان می‌دهند. الیاف طبیعی مانند چوب ارزان و دردسترس هستند، اما دوام کمتری دارند. الیاف سنتزی، که از موادی مانند پلی‌اولفین، آکریلیک، آرامید و کربن ساخته می‌شوند، می‌توانند از ترک‌های ناشی از انقباض جلوگیری کنند و رفتار بتن را پس از ترک‌برداری بهبود دهند [۲۸]. به‌کارگیری الیاف پلاستیکی به‌عنوان عامل تقویت‌کننده در بتن، می‌تواند به بهبود پایداری، عملکرد و دوام سازه‌ها بیانجامد. بهینه‌سازی ترکیب بتن و میزان الیاف پراکنده‌شده در آن، نقش حیاتی در تضمین عملکرد مطمئن و توجیه اقتصادی سازه ایفا می‌کند. استفاده از پلیمرها به‌عنوان تقویت‌کننده، به‌دلیل عدم اکسایش برخلاف فولاد، می‌تواند انعطاف‌پذیری بتن را افزایش دهد [۲۶].

Nhabih و همکاران در پژوهشی، الیاف پلاستیکی (PFs) را ازطریق بازیافت پسماندهای پلاستیکی مضر با روش نوآورانه و مقرون‌به‌صرفه تولید کردند. این فرایند شامل برش پلاستیک‌ها، غوطه‌وری در نیتروژن مایع و تبدیل آن‌ها به الیاف توسط مخلوط‌کن چرخان حاوی توپ‌های آهنی بود. این روش هزینه‌ای ۲۵ برابر کمتر از تولید پلاستیک تقویت‌شده با الیاف کربن (CFRP) دارد. PFهای تولید شده خواصی مشابه با CFRP داشتند. در آزمایش آن‌ها، پنج تیر بتن مسلح ساخته شد. نتایج، عملکرد قابل‌قبولی ازنظر افزایش بار نهایی و محدودیت عرض ترک‌ها نشان دادند. تفاوت در شکست نیز مشاهده شد، تیرهای تقویت‌شده با PF شکست نرم و تدریجی داشتند، درحالی‌که تیرهای دارای CFRP دچار شکست شکننده و ناگهانی شدند [۲۹].

بازیافت پسماندهای پلاستیکی و تبدیل آن‌ها به الیاف پلاستیکی بازیافتی رویکردی پایدار و مؤثر برای کاهش مشکلات ناشی از دفع زباله است. این الیاف بسته به منبع می‌توانند به انواع مختلفی ازجمله الیاف پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن ترفتالات، پلی‌وینیل کلرید و نایلون بازیافتی؛ پلی‌اتیلن کم‌چگالی و پرچگالی و الیاف پلاستیک فلزپوش‌شده بازیافتی تقسیم شوند [۳۰]. درحال‌حاضر، دو روش اصلی برای تولید الیاف پلاستیکی بازیافتی از پسماندهای پلاستیکی وجود دارد. روش اول، عملیات شیمیایی است که محصولات پلاستیکی جدیدی تولید می‌کند که عملکردی مشابه محصولات اصلی دارند، اما هزینه‌های دفع زیادی را به‌همراه دارد. روش دوم، استفاده از دستگاه ریسندگی مذاب است که به‌طور مستقیم الیاف را از پسماندهای پلاستیکی تولید می‌کند [۳۰].

پلاستیک بازیافتی به‌عنوان سنگ‌دانه در بتن

استفاده از پلاستیک‌های بازیافتی در بتن قابلیت بالقوهٔ زیادی برای کاهش پسماندهای پلاستیکی بازیافتناپذیر دارد. از میان انواع



شکل ۱۰- سنگ‌دانه‌های پلاستیکی تولیدشده: پسماندهای الکترونیکی (الف) خام و (ب) خام خردشده، (پ) سنگ‌های پلاستیکی، (ت) سنگ‌شکن الکتریکی و (ث) دانه‌های درشت پلاستیکی بازیافتی [۳۱].

مختلف پلاستیک مانند PET، پلی لاکتیک اسید (PLA)، PP، PVC، HDPE، و PS؛ پلاستیک‌های رزینی و PET بیشترین کاربرد را در تولید بتن دارند. بااین‌حال، سایر انواع پلاستیک به‌میزان کمتری بازیافت می‌شوند. اگرچه استفاده از پلاستیک‌های بازیافتی به‌عنوان دانه در بتن ازنظر زیست‌محیطی مفید است، اما خواص مهندسی آن‌ها، مانند خواص مکانیکی و گرمایی با دانه‌های طبیعی بسیار متفاوت است. همچنین، کیفیت بتن پلاستیکی بازیافتی حاصل به پیش‌فراوری پلاستیک‌های مصرفی بستگی دارد. مقاومت پیوندی دانه‌های پلاستیکی و خمیر سیمان می‌تواند به‌طور درخورتوجهی تحت‌تأثیر این پیش‌فراوری قرار گیرد [۲۷].

در مطالعه‌ای، استفاده از دانه‌های درشت پلاستیکی (plastic coarse aggregate, PAC) بازیافتی حاصل از پسماندهای الکترونیکی، به‌عنوان جایگزین جزئی برای دانه‌های درشت طبیعی (natural coarse aggregate, NCA) در بتن بررسی شد. شش مخلوط بتن با جایگزینی ٪۱۰ تا ٪۵۰ NCA با PCA تهیه و خواص آن‌ها ارزیابی شد. شکل ۱۰ مراحل تولید سنگ‌دانه‌های پلاستیکی از پسماندهای الکترونیکی خام را در این مطالعه نشان می‌دهد. نتایج نشان داد، با افزایش درصد جایگزینی PCA، مقاومت‌های فشاری، کششی برشی و خمشی بتن به‌ترتیب ٪۵۲/۷-۹/۹، ٪۴۷/۵-۷/۸ و ٪۳۹/۴-۱۱ کاهش یافت. بااین‌حال، افزودن PCA به بتن سبب بهبود کارایی و دوام آن شد. کاهش شایان‌توجه در ضریب جذب آب و افت سایش با جایگزینی PCA مشاهده شد. همچنین، بتن حاوی PCA مقاومت بهتری دربرابر چرخه‌های مرطوب و خشک نسبت به بتن معمولی نشان داد [۳۱].

بتن سبک که برای کاربردهای خاص طراحی شده است با استفاده از پلاستیک خام به شکل گرانول تولید می‌شود. در این نوع بتن، دانه‌های پلاستیکی بازیافتی به‌کار می‌روند که از منابع مختلف ازجمله بطری‌های پلاستیکی دورریز به‌دست آمده‌اند. جایگزینی جزئی دانه‌های طبیعی با پسماندهای گرمانرم بازیافتی به‌دلیل چگالی کمتر پلاستیک‌های بازیافتی نسبت به دانه‌های طبیعی، باعث کاهش وزن بتن می‌شود. مزایای استفاده از بتن سبک شامل کاهش حجم اجزای سازه‌ای، افزایش انعطاف‌پذیری در طراحی، کاهش بار مرده سازه، بهبود پاسخ به نیروهای دینامیکی، کاهش میزان نیاز به فولاد تقویتی و کاهش کلی هزینه‌های ساخت‌وساز است. از تغییرات مهم دیگر در بتن حاوی پلاستیک بازیافتی، بهبود خاصیت عایق گرمایی آن بوده که از اهمیت زیادی برای مصرف بهینه انرژی برخوردار است [۳۲].

آجر

آجر به‌عنوان یک مصالح ساختمانی حیاتی در سراسر جهان به‌طور گسترده استفاده شده و یکی از پرتقاضاترین مصالح برای ساخت‌وساز محسوب می‌شود. هند، چین و اسپانیا از کشورهای پیشرو در تولید آجرند و سالانه بیش از ۲۴۰ میلیارد آجر تولید می‌کنند. با توجه به آثار منفی تولید پسماندهای پلاستیکی بر بوم‌سازگان و ارتباط آن با آلودگی هوا، بررسی قابلیت استفاده از آن‌ها به‌عنوان جایگزینی در تولید آجر مطرح شده است. این اقدام نه‌تنها به حفظ محیط‌زیست کمک می‌کند، بلکه نیازهای مواد و استانداردهای مرتبط را نیز تأمین می‌کند. بدین‌دلیل، تلاش‌های زیادی برای افزودن پسماندهای پلاستیکی در تولید آجر انجام و خواص فیزیکی و مکانیکی این آجرها بررسی شده است [۳۳].

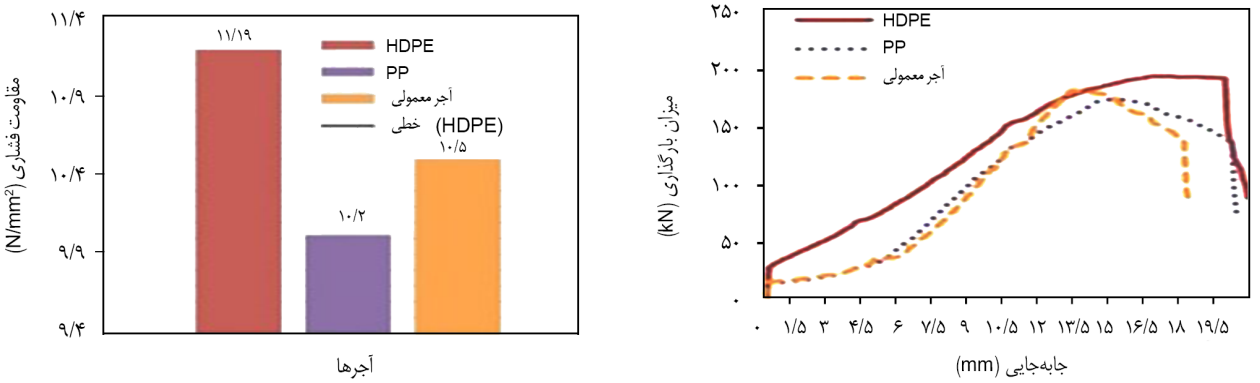
در مطالعه‌ای، بطری‌های پلاستیکی PET به‌عنوان جایگزین آجرهای سنتی استفاده شدند. بطری‌های دورریز از هتل‌ها و فروشگاه‌ها جمع‌آوری شده، با خاک محلی الک‌شده پر و سپس فشرده و مهر و موم شدند. در پایان، نتایج زیر گزارش شد:

۱- ازآنجاکه این روش نیازی به فرایند پخت ندارد به کاهش انتشار CO_2 منجر می‌شود.

۲- بطری‌های PET به خاطر مقاومت زیاد و زمان طولانی تجزیهٔ آن‌ها بیش از ۳۰۰ سال، نسبت به آجرهای استاندارد دوام بیشتری دارند.

۳- ازنظر اقتصادی نیز با توجه به ارزانی دسترسی به این بطری‌ها، ساخت این آجرها مقرون‌به‌صرفه‌تر است.

۴- مقاومت فشاری این آجرها تقریباً مشابه آجرهای سفالی است،



(الف) (ب)

شکل ۱۱- نمودار: (الف) بارگذاری دربرابر جابه‌جایی نمونه‌های آجر و (ب) مقاومت فشاری نمونه‌های آجر [۳۳].

بنابراین برای استفاده در دیوارهای داخلی و خارجی سازه‌های قاب‌دار ایده‌آل محسوب می‌شوند [۳۴].

Kulkarni و همکاران از HDPE و PP برای تولید آجرهای پلاستیکی به روش بازیافت فیزیکی طبق استاندارد IS 1077:1992 استفاده کردند. آن‌ها دیواری به ابعاد ۵۰۰ mm×۱۱۰ mm×۵۰۰ mm با این آجرها ساختند و آزمون بارگذاری آن با دستگاه UTM را طبق استاندارد ISO ۱۹۰۵:۱۹۸۷ انجام دادند. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری آجرهای پلاستیکی HDPE برابر با ۱۱/۱۹ N/mm² و PP برابر با ۱۰/۰۲ N/mm² بوده که معادل آجرهای سنتی کلاس اول با مقاومت ۱۰/۵ N/mm² است (شکل ۱۱). همچنین، دیوار پلاستیکی بار نهایی ۱۹۷/۵۰ kN را تحمل کرد و در زاویه ۴۵٪ دچار شکست برشی شد، درحالی‌که دیوار آجری سنتی در ۱۵۳/۹۵ kN دچار شکست عمودی شد (شکل ۱۱). در آزمون مقاومت دربرابر آتش طبق National Building Code 2005 دیوار پلاستیکی پس از ۳۰ min گرمادهی عملکرد بهتری در کاهش اختلاف دما نسبت به دیوار آجری سنتی داشت. آجرهای HDPE و PP به‌ترتیب دارای جذب آب ۰/۷۵ و ۰/۳۷٪ بودند و دربرابر نفوذ آب مقاومت نشان دادند. این مقاومت آن‌ها را برای کاربردهایی مناسب می‌سازد که نشت آب در آن‌ها مشکل‌ساز است [۳۳].

آجرهای ساخته‌شده از پلاستیک، به‌عنوان راهکار پایداری برای استفاده از پسماندهای پلاستیکی مطرح می‌شوند. این آجرها در مقایسه با آجرهای ماسه‌ای محلی، مقاومت فشاری بیشتر و جذب آب و وزن کمتری دارند. بازاستفادهٔ پلاستیک در تولید این آجرها به کاهش پسماندهای پلاستیکی در محل‌های دفن کمک می‌کند و آثار زیست‌محیطی منفی پلاستیک‌ها را کاهش می‌دهد. پلاستیک‌ها، باوجود ناپایداری و تجزیه‌ناپذیری زیست‌محیطی، به‌دلیل ویژگی‌های مثبتی چون دوام، استحکام و قابلیت قالب‌گیری، می‌توانند به‌عنوان مادهٔ سبز نقش مؤثری در کاهش آلودگی ایفا کند. این آجرها، به‌ویژه برای کشورهایی که با مشکلات دفع پلاستیک مواجه‌اند، مناسب هستند و با ارائه عایق بهتر با تخلخل کم و دسترسی آسان، به افزایش ارزش کلی ساخت‌وساز کمک می‌کنند [۳۵].

خاک

خاک، لایهٔ بالایی سطح زمین است که کاربرد فراوانی در صنعت ساخت‌وساز دارد. اما همهٔ خاک‌ها برای ساخت‌وساز مناسب نیستند. خاک‌های نامناسب مانند خاک‌های رسی با مقاومت برشی کم و قابلیت بالقوهٔ تغییر شکل‌های پیشرونده، چالش‌هایی را برای سازه‌ها ایجاد می‌کنند. افزایش تقاضا برای زمین‌های مرغوب، مهندسان را به سمت روش‌های نوآورانه‌تر برای تثبیت خاک سوق داده است. روش‌های مرسوم تثبیت خاک با مواد شیمیایی، گرچه مؤثرند، اما ازنظر زیست‌محیطی و اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیستند. بنابراین، نیاز به روش‌های پایدارتر و اقتصادی‌تر برای تثبیت خاک‌های ضعیف و کاهش هزینه‌های ساخت‌وساز احساس می‌شود [۱۴]. بررسی مقالات مختلف نشان داده است، نوارهای پلاستیکی با ابعاد مناسب و مقدار بهینه می‌توانند به بهبود خواص مهندسی خاک کمک کنند. پلاستیک به‌عنوان تثبیت‌کنندهٔ خاک می‌تواند در نسبت‌های مشخصی استفاده شود تا CBR خاک (ظرفیت باربری) را افزایش دهد. این فناوری اقتصادی و سودآور در ساخت‌وساز، به‌ویژه در پروژه‌هایی که با کمبود خاک باکیفیت مواجه هستند، کاربرد دارد. استفاده از نوارهای پلاستیکی می‌تواند به‌طور مؤثری چالش‌های موجود در مهندسی عمران را حل کند و خواص خاک را در زیرساخت‌های جاده، بنیادها و تثبیت خاکریزها بهبود بخشد [۳۶].

پلاستیک‌های رایج استفاده‌شده برای تثبیت خاک، PET و LDPE حاصل از بطری‌ها و کیسه‌های پلاستیکی بازیافتی هستند. این

پلاستیک‌ها دوام خاک را دربرابر یخ‌زدگی و ذوب افزایش می‌دهند، مقاومت فشاری آن را بهبود می‌بخشند و انعطاف‌پذیری خاک را بیشتر می‌کنند. با افزایش مقدار پلاستیک در خاک، حداکثر چگالی خشک افزایش و رطوبت بهینه کاهش می‌یابد. این تغییرات به‌دلیل وزن مخصوص کم پسماندهای پلاستیکی است. اندازه و درصد بهینه الیاف به ماهیت پلاستیک بستگی دارد. برای تقویت مناسب خاک ضعیف با پلاستیک‌های نرم مانند LDPE، در مقایسه با به‌کار بردن پلاستیک سفت‌تر مانند PET به درصد بیشتری از پلاستیک حدود ۱٪ پلاستیک و قطعه‌های پلاستیکی بلندتر با طول ۲ cm تا ۳ cm نیاز است [۱۴].

در مجموع، تثبیت خاک با بهبود خواص فیزیکی آن مانند مقاومت برشی و ظرفیت حمل بار، پایداری سازه‌ها را افزایش می‌دهد و نقش حیاتی پی را در تحمل بار سازه‌ها برجسته می‌سازد. با توجه به حجم زیاد پسماندهای پلاستیکی و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از آن‌ها، استفاده از این پسماندها به‌عنوان تثبیت‌کنندهٔ خاک، راهکار کارآمدی برای مدیریت پسماند و کاهش آثار زیست‌محیطی آن ارائه می‌دهد [۳۶].

زمین‌ساز

در دنیای پویا و ساخت‌وساز مدرن، زمین‌سازها به‌عنوان راه‌حل‌های نوین و همه‌کاره نقش حیاتی در حل چالش‌های مختلف ایفا می‌کنند و شیوه‌های سنتی را متحول کرده‌اند. مشکلاتی مانند ناپایداری شیب، زهکشی ضعیف و فرسایش خاک موجب شد تا مهندسان و پژوهشگران به‌دنبال راه‌حل‌های خلاقانه باشند. زمین‌سازها با ویژگی‌های چندمنظوره، تحولی بنیادی در نحوهٔ مواجهه با این مشکلات ایجاد کردند. استفاده از آن‌ها در روش‌های ساخت‌وساز بر تعهد به بهبود دوام، کاهش آثار زیست‌محیطی و افزایش پایداری تمرکز دارد. کاربردهای جدیدی مانند سامانه‌های روکشی برای محل‌های دفن زباله، موانع جلوگیری از آلایندگی، خاکریزها، سامانه‌های زهکشی روسازی، تثبیت شیب‌ها، پی‌های کم عمق و موانع در سدهای خاکی تنها تعدادی از کاربردهای این مواد است [۳۷]. زمین‌سازها شامل مجموعه‌ای متنوع از مواد هستند که برای مواجهه با چالش‌های مختلف مهندسی و ساخت‌وساز طراحی شده‌اند. هر نوع ماده زمین‌ساز دارای عملکردها و کاربردهای خاص آن است. در جدول ۳ انواع رایج آن‌ها درج شده است [۳۷].

ترکیب زمین‌سازها با مواد افزودنی، مزایای زیست‌محیطی بیشتری را به‌همراه دارد. این ترکیب‌ها با کاهش یا حذف نیاز به مواد طبیعی باکیفیت که در بسیاری از مناطق کمیاب و گران هستند و کاهش

جدول ۳- انواع زمین‌ساز [۳۷].

زمین‌ساز	عملکرد	توضیحات	کاربردها
زمین‌بافت	صافش، جداسازی، تقویت و زه‌کشی	پارچه‌های نفوذپذیر از الیاف سنتزی مانند PP یا پلی‌استر ساخته می‌شوند. این پارچه‌ها می‌توانند بافته یا نبافته باشند.	راه‌سازی، کنترل فرسایش، تثبیت خاک و سامانه‌های زه‌کشی
زمین‌غشا	موانع نفوذناپذیر برای مهاجرت سیال یا گاز	ورق‌های نازک از پلیمرهای سنتزی مانند HDPE، PVC و EPDM با نفوذپذیری بسیار کم	لایه‌های دفن زباله، مخازن، نگه‌داری زباله و حفاظت از محیط‌زیست
زمین‌شبکه	تقویت خاک، بهبود پایداری و ظرفیت باربری	شبکه‌های پلیمری با سوراخ‌های بزرگ که معمولاً از موادی مانند PE یا پلی‌استر ساخته می‌شوند.	دیوارهای حائل، خاکریزها و تقویت خاک در روسازی‌ها
زمین‌توری (geonet)	تقویت خاک، بهبود پایداری و ظرفیت باربری	ساختارهای مشبک بازساخته از مواد پلیمری	سامانه‌های زه‌کشی، لایه‌های دفن زباله و کنترل فرسایش
زمین‌الیاف	بهبود تقویت و پایداری خاک	الیاف سنتزی مانند پلی‌استر و PP برای تقویت خاک‌ها استفاده می‌شوند.	تقویت شیب‌ها، خاکریزها و دیوارهای حائل
زمین‌کیسه	فراهم کردن کنترل و مهار فرسایش	کیسه‌ها از زمین‌بافت‌هایی ساخته شده‌اند که با خاک یا سایر مواد پر شده‌اند.	حفاظت از سواحل، تثبیت بستر رودخانه و مهار رسوبات
زمین‌لوله	تسهیل زه‌کشی و انتقال مایعات	لوله‌های سوراخ‌دار یا شیاردار که با یک زمین‌بافت یا زمین‌شبکه احاطه شده‌اند.	سامانه‌های زه‌کشی و جمع‌آوری شیرابه در محل‌های دفن زباله
لایه‌های خاک رس زمین‌ساز	ترکیب خاک رس و زمین‌سازها برای ایجاد موانع نفوذناپذیر	لایه‌های خاک رس فشرده که بین زمین‌بافت‌ها قرار گرفته‌اند.	لایه‌های دفن زباله و سامانه‌های مهار
زمین‌اسفنج	مواد پرکننده سبک برای ساخت‌وساز	بلوک‌های EPS	خاک‌ریزهای جاده، تثبیت شیب و پرکننده سبک
زمین‌سل	ساختار تقویتی برای تثبیت خاک و کنترل فرسایش	زمین‌سل نوعی سامانهٔ محصورسازی سلولی سه‌بعدی است که معمولاً از PE پرچگالی یا سایر پلیمرهای بادوام ساخته شده و با خاک، مصالح سنگی یا بتن پر می‌شوند.	تثبیت خاک، کنترل فرسایش، تحمل بار و فضای سبز
زمین‌کامپوزیت	ترکیب چند نوع زمین‌ساز برای اهداف چندمنظوره	ترکیبی از زمین‌بافت، زمین‌غشا، زمین‌شبکه یا زمین‌نت	کاربردهای چندمنظوره به مواد سازنده بستگی دارند.

بهره‌برداری از این منابع، آثار مثبتی بر محیط‌زیست می‌گذارند. ترکیب زمین‌سازها با لاستیک‌های بازیافتی، پلاستیک‌ها و زباله‌های ساختمانی، نمونه‌هایی از این دست هستند [۳۸].

زمین‌شبکه‌های (geogrid) ساخته‌شده از پلاستیک‌های بازیافتی به‌طور گسترده به‌عنوان راهکار مؤثری برای تثبیت شیب‌ها استفاده شده‌اند. پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند، این زمین‌شبکه‌ها ازنظر خواص مکانیکی و عملکردی با پلاستیک‌های بکر قابل‌مقایسه هستند. این یافته‌ها اهمیت زیادی دارند، زیرا تضمین می‌کنند که استفاده از مواد بازیافتی به یکپارچگی ساختاری و عملکرد زمین‌شبکه‌ها آسیبی نمی‌زند. بنابراین، زمین‌شبکه‌های پلاستیک بازیافتی، نه‌تنها ازنظر فنی قابل‌اعتمادند، بلکه راه‌حلی پایدار و دوستدار محیط‌زیست را نیز ارائه می‌دهند [۳۹]. پژوهش‌های اخیر قابلیت بالقوهٔ استفاده از HDPE و PP در ساخت زمین‌شبکه‌ها را برای تثبیت شیب‌ها بررسی کرده‌اند. پژوهشگران به خواص مثبت این مواد، ازجمله سختی کششی زیاد و مقاومت دربرابر کشیدگی اشاره کرده‌اند که امکان تحمل بارهای کششی زیاد را فراهم می‌آورد و به پایداری شیب‌ها کمک می‌کند. همچنین، طراحی ساختار باز زمین‌شبکه‌ها موجب درهم‌گیری مؤثر با مواد پرکننده طبیعی می‌شود و خاکریزی پایدار ایجاد می‌کند که ازنظر عملکرد با دیوار گرانشی قابل مقایسه است [۳۹].

Ogundairo و همکاران به بررسی عملکرد تقویت خاک با استفاده از آزمون صفحه بار پرداختند و سه حالت مختلف خاک یعنی تقویتنشده، تقویت‌شده با زمین‌شبکه‌های معمولی و تقویت‌شده با پلاستیک بازیافتی را مقایسه کردند. نتایج نشان داد، استفاده از پسماندهای پلاستیکی برای تقویت خاک می‌تواند تا ٪۶۰ صرفه‌جویی در هزینه‌ها را به‌همراه داشته باشد. حداکثر ظرفیت باربری برای خاک بدون تقویت kPa ۲۵۴ تعیین شد. در حالی که خاک تقویت‌شده با زمین‌شبکه به kPa ۳۱۰ (افزایش ٪۲۲) و خاک تقویت‌شده با پلاستیک به kPa ۲۹۲ (افزایش ٪۱۵) رسید. این نتایج بهبود درخورتوجه خواص مقاومتی و صرفه‌جویی اقتصادی را درنتیجه استفاده از پسماندهای پلاستیکی در زمین‌سازها نشان می‌دهد [۴۰].

از چالش‌های اصلی در استفاده از زمین‌سازها دوام آن‌هاست که توسط برخی از دست‌اندرکاران صنعت ساخت‌وساز مطرح شده است. آسیب‌های ناشی از اقدامات مکانیکی در حین نصب و همچنین تخریب شیمیایی و زیستی، جنبه‌های کلیدی هستند که باید در ارزیابی رفتار زمین‌سازها مدنظر قرار گیرند. هنگام ارزیابی ارزش طراحی استحکام کششی بلندمدت زمین‌ساز، معمولاً عوامل کاهش برای درنظر گرفتن آسیب‌های در حین نصب، اثر خزش و آثار ناشی از تخریب شیمیایی و زیستی پلیمرها، ملاحظه می‌شوند. این عوامل به‌طور مستقیم بر عملکرد و طول عمر زمین‌سازها اثرگذارند و باید به‌دقت بررسی شوند [۴۱].

مواد عایق

عایق صدا

آلودگی صوتی یکی از عوامل محیطی است که بر سلامتی انسان به‌صورت آسیب‌های فیزیولوژیکی یا روانی ازطریق سازوکارهایی چون ازدست دادن شنوایی، فشار خون بالا، افزایش تنش و بیماری‌های عصبی بروز می‌کند. طبق مطالعات انجام‌شده دربارهٔ کاهش آلودگی صوتی، می‌توان از مواد عایق صوتی طبیعی چون پنبه، سلولوز و کنف و مواد بازیافتی مانند لاستیک، الیاف سنتزی، پلاستیک و چوب‌پنبه استفاده کرد. استفاده از این مواد می‌تواند به‌طور مؤثر در کاهش آلودگی صوتی و بهبود کیفیت زندگی افراد مؤثر باشد [۴۲].

ازسویی قابلیت بتن در جذب انرژی صوتی به ضریب جذب صدا و مقدار کاهش صدا وابسته است. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد، بتن ترکیب‌شده با پلاستیک به‌عنوان مادهٔ پرکننده، ظرفیت جذب بیشتری نسبت به بتن معمولی دارد. به‌طور ویژه، مقدار کاهش صدا برای بتن پلاستیکی یا سبک تا ٪۵۷ بیشتر از بتن معمولی است. به‌عنوان مثال مطالعات نشان داده‌اند، جایگزینی ٪۷۵ از هر دو نوع دانه‌های ریز و درشت با پسماندهای پلاستیکی PVC، امکان توسعه کامپوزیتی با ویژگی‌های عایق صوتی درخورتوجه را فراهم می‌کند. این نتایج نشانگر قابلیت بالقوهٔ بتن پلاستیکی در بهبود عملکرد عایق صوتی در پروژه‌های ساخت‌وساز است [۲۶]. معمولاً مواد جاذب صدا به‌شکل قطعه‌هایی طراحی می‌شوند که به دیوارها و سطوح سقف متصل می‌شوند. بدین‌دلیل، این مواد باید دارای وزن سبک، هزینه کم و شکل‌پذیری باشند [۴۳]. در پژوهشی عبدالحکیم و همکاران از کامپوزیت خاک اره و EPS به‌عنوان جاذب صدا استفاده کردند. آن‌ها دو نمونه کامپوزیت با و بدون سوراخ را بررسی کردند. نتایج نشان داد، کامپوزیت‌های حاوی سوراخ قابلیت جذب صوت بهتری دارند [۴۳]. پسماندهای پلاستیکی مانند EPS می‌توانند در فرایندهای ساخت‌وساز به‌عنوان مواد عایق سبزتر استفاده شوند. با ترکیب موادی مانند پسماندهای PVC و خاک اره با EPS، می‌توان به تولید مواد عایق کارآمدتری دست یافت. استفاده از این پسماندها، نه‌تنها به حفاظت از محیط‌زیست ازطریق کاهش تولید پسماند کمک می‌کند، بلکه هزینه تولید مواد عایق را نیز کاهش

می‌دهد. بااین‌حال باید توجه داشت، استفاده از این نوع پسماندهای پلاستیکی به‌دلیل چگالی کم و ویژگی‌های اشتعال‌پذیری زیاد، محدودیت‌هایی دارد [۱۵].

عایق گرمایی

از چالش‌های اصلی قرن بیست و یکم، حفظ پایداری انرژی و محیط‌زیست است. در بخش انرژی، نگرانی اصلی عدم تعادل بین مصرف و منابع محدود است و در بخش محیط‌زیست، افزایش جمعیت به افزایش زباله‌ها منجر می‌شود. ساختمان‌ها و خودروها از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی هستند. ساختمان‌ها به‌تنهایی مسئول مصرف ٪۴۰ از انرژی جهانی و تولید یک سوم کربن دی‌اکسید هستند. کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است و عایق گرمایی در مصالح ساختمانی می‌تواند با کاهش تلفات انرژی، نقش مهمی در این زمینه ایفا کند. عایق‌های کارآمد می‌توانند تا ٪۶۵ در مصرف انرژی ساختمان‌ها صرفه‌جویی کرده و آثار کربنی را به‌شدت کاهش دهند [۴۴]. مهم‌ترین بخش یک ساختمان برای افزایش بازده گرمایی، پوشش آن است. عایق‌های گرمایی برای کاهش انتقال گرما در ساختمان‌ها استفاده می‌شوند. انرژی تجسم‌یافته عایق‌ها یک عامل کلیدی است. تراز خالص انرژی مثبت و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای برای ساختمان‌های عایق‌شده زمانی حاصل می‌شود که کاهش انرژی عملیاتی از انرژی تولید عایق‌ها پیشی گیرد [۴۵].

پشم‌های معدنی و اسفنج‌های پلاستیکی به‌عنوان مواد عایق گرمایی پرمصرف در جهان شناخته می‌شوند، اما تولید آن‌ها آثار زیست‌محیطی نامطلوبی دارد و پسماندهای تجزیه‌ناپذیر ایجاد می‌کند. درمقابل مواد عایق با منشأ طبیعی، گزینهٔ سازگار با محیط‌زیست برای عایق‌های ساختمانی هستند. بااین‌حال، این مواد به‌دلیل محدودیت‌های دسترسی و نیاز به انتخاب و آماده‌سازی برای دستیابی به عملکرد بهینه، مقیاس‌پذیری کمتری دارند. ازسوی دیگر، مواد عایق بازیافتی از محصولات صنعتی به‌راحتی دسترس‌پذیر و کم‌هزینه هستند و با کاهش نیاز به تولید مواد خام جدید، مزایای زیست‌محیطی درخورتوجهی دارند [۴۶]. PET در صنعت مصالح ساختمانی بسیار مورد توجه است، زیرا ٪۱۰۰ بازیافت‌پذیر است. هزینه R-PET بین ٪۲۰ تا ٪۶۰ کمتر از PET تولیدی از مواد خام است. همچنین، مصرف انرژی و مواد اولیهٔ نفتی با بازیافت کاهش شایان‌ملاحظه‌ای دارد. در سطح جهانی بیش از ٪۷۰ از R-PET برای تولید الیاف استفاده می‌شود. مطالعات نشان می‌دهند، الیاف پلیمری بازیافتی می‌توانند برای تولید مواد عایق گرمایی نبافته در ساخت‌وساز استفاده شوند که به حفظ منابع طبیعی و کاهش آثار زیست‌محیطی کمک می‌کند [۴۷].

کامپوزیت‌های سیمانی

الیاف پلاستیک‌های بازیافتی به‌عنوان تقویت‌کننده

اخیراً استفاده از الیاف ماکروپلاستیکی بکر و بازیافتی به‌عنوان تقویت‌کننده در مصالح ساختمانی توجه زیادی را جلب کرده است. الیاف بازیافتی به‌دلیل دسترس‌پذیری، هزینه و ردپای محیطی پایین کم جذاب‌تر شده‌اند. این الیاف به‌دلیل دوام زیاد، وزن سبک و خواص گرمایی، به‌ویژه در تقویت نگرش ضدریزش، مورد توجه قرار گرفته‌اند. در میان مواد سنتزی، PET و پلی‌اولفین‌ها، به‌ویژه PP و PE، به‌دلیل بازیافت‌پذیری خوب و خواص مکانیکی برجسته، به‌عنوان گزینه‌های جذابی برای تولید الیاف بازیافتی شناخته می‌شوند [۴۸]. الیاف به‌طور گسترده در تولید کامپوزیت‌های سبک برپایه سیمان با حداقل چگالی و ظرفیت عایق گرمایی زیاد و نیز در بتن خودمتراکمی استفاده می‌شوند که در مهندسی عمران، بدون نیاز به لرزش مکانیکی تراکم خوبی می‌یابد [۴۹]. نقش اصلی الیاف جلوگیری از ایجاد و انتشار ترک‌هاست. استفاده از الیاف مستحکم در کسر حجمی زیاد، مزایای درخورملاحظه‌ای در بهبود استحکام خمشی و کششی مصالح فراهم می‌آورد [۵۰].

به‌طورکلی، الیاف بازیافتی که در کامپوزیت‌های پایه‌سیمانی (CBCs) استفاده می‌شوند به سه دسته اصلی الیاف پلاستیکی بازیافتی پسماند (WRPF)، الیاف فرش بازیافتی پسماند (WRCF)، الیاف لاستیکی پسماند (WRSF) تقسیم می‌شوند. تولید الیاف پلاستیکی در کارخانه‌ها با استفاده از بطری‌های PET صورت می‌گیرد. این فرایند شامل چرخش، کشش، تثبیت و سایر عملیات‌های صنعتی است. برخی از دانشمندان بهره‌گیری از پوشش‌های خاص (مانند پلی‌پروپیلن پیوندیافته با هیدرید مالئیکون) روی سطح WRPF را برای بهبود توزیع و جداسازی بهتر الیاف در بتن پیشنهاد کرده‌اند. فرایند بازیافت WRCF با دسته‌بندی فرش‌های پسماند براساس نوع الیاف و تولید آن‌ها آغاز می‌شود. سپس، الیاف از پشت فرش‌ها جدا می‌شوند. این جداسازی ازطریق فرایندهای مکانیکی شامل غربالگری، خرد کردن و تمیز کردن انجام می‌شود. WRSF بیش از لاستیک‌های تاریخ‌گذشته تولید می‌شوند و می‌توان آن‌ها را به‌طور مکانیکی با خرد کردن یا ازطریق فرایندهای گرمایی مانند تفکافت تولید کرد. این سه نوع الیاف برای تقویت کامپوزیت‌های سیمانی به‌کار می‌روند، درنتیجه ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌ها را بهبود می‌بخشند [۴۹].

در حال حاضر، پژوهش‌های زیادی برای بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی ملات سیمانی و بتن حاوی الیاف پلاستیکی بازیافتی (RPF) انجام شده که برخی نتایج امیدوارکننده‌ای نیز به‌دست آمده است. براساس مطالعات مختلف، الیاف پلاستیکی بازیافتی به دسته‌های مختلف تقسیم می‌شوند، ازجمله الیاف R-PP، R-PVC، R-PET، نایلون بازیافتی، R-HDPE، R-LDPE و پلاستیکی فلزپوش بازیافتی (R-MP). این الیاف به‌طور مؤثر می‌توانند به بهبود کارایی و پایداری مکانیکی مواد ساختمانی کمک کنند و راهکاری پایدار برای کاهش پسماندهای پلاستیکی باشند [۳۰].

پلاستیک‌های بازیافتی به‌عنوان جایگزین سنگ‌دانه

ترکیب‌پذیری مواد مختلف در فرایند اختلاط کامپوزیت‌های سیمانی، امکان ادغام مواد مختلف در آن را فراهم کرده است. دراین‌میان، پسماندهای گوناگونی به‌عنوان پیونده و سنگ‌دانه در کامپوزیت‌های سیمانی استفاده شده‌اند. پسماندهای پلاستیکی که به‌طور مکانیکی بازیافت می‌شوند، به‌دلیل سختی و پایداری می‌توانند به‌عنوان سنگ‌دانه و پرکننده در ترکیبات سیمانی به‌کار روند. استفاده از PW به‌عنوان جایگزین سنگ‌دانه‌های طبیعی نه‌تنها به کاهش برداشت منابع طبیعی کمک می‌کند، بلکه با کاهش وزن مرده سازه برای کاربردهای مختلف ساختاری نقش مؤثری ایفا می‌کند [۵۱]. استفاده از پسماندهای پلاستیکی به‌عنوان سنگ‌دانه، به معنای جایگزینی قسمتی از سنگ‌دانه‌های طبیعی با انواع مختلف پسماندهای پلاستیکی است. این پسماندها می‌توانند به دو صورت به‌جای سنگ‌دانه‌های طبیعی به‌کار برده شوند: به‌عنوان سنگ‌دانهٔ درشت یا سنگ‌دانهٔ ریز [۷]. در پژوهشی، استفاده از پلاستیک بازیافتی به‌عنوان پرکننده سنگ‌دانه (RPA) جایگزین شن و ماسه معمولی و گرد و غبار معدن تا ٪۷۰ بررسی شد. نتایج نشان داد، پیوند قوی‌تری میان دانه‌های RPA و مواد پرکننده می‌تواند خواص فشاری بتن را تقویت کند. ذرات زاویه‌دار ریزدانه‌های معدن نسبت به پرکننده‌های شن و ماسه معمولی، خواص استحکامی بهتری را نشان می‌دهند. بااین‌حال، کاهش مقاومت فشاری در بتن‌های حاوی RPA مشاهده شد که عمدتاً به علت خواص ضعیف سطح مشترک سنگ‌دانه‌های پلاستیکی و ملات سیمان بود. سه نوع مختلف از پلاستیک‌های بازیافتی به‌عنوان جایگزین بخشی از سنگ‌دانه‌های معمولی استفاده و مشخص شد، خواص مکانیکی بتن با جایگزینی حجم زیادی از RPA به‌طور شایان‌توجهی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بنابراین در کاربردهای عملی، دقت در استفاده از RPA برای حفظ خواص فشاری و مکانیکی مطلوب ضروری است [۵۰].

پلاستیک به‌عنوان مادهٔ افزودنی بالقوه می‌تواند به سه روش مختلف در بتن و ملات استفاده شود:

۱- به‌عنوان رزین که پس از واپلیمر شدن، بتن و ملات پلیمری تولید می‌کند.

۲- به‌عنوان پیونده پس از ذوب با ماسه و خاک رس؛

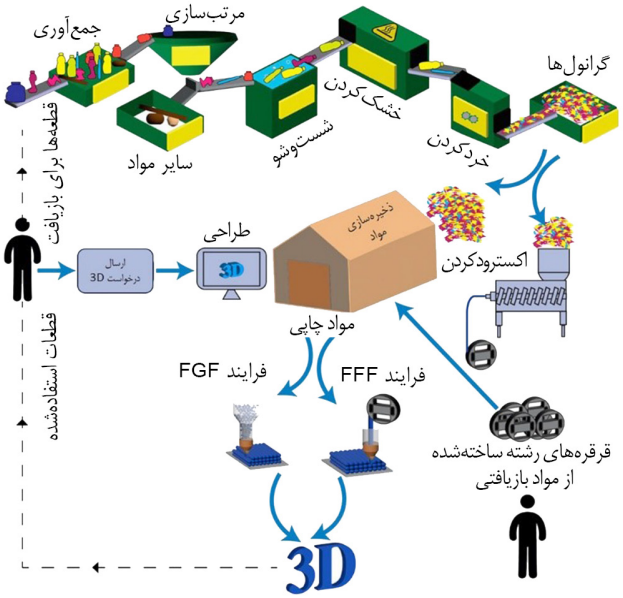
۳- به‌شکل ذرات، الیاف یا حبه‌ها به‌عنوان جایگزین سنگ‌دانه‌های ریز یا درشت [۵۲].

صنعت ساخت‌وساز بخش امیدوارکننده‌ای است که در آن PW می‌تواند به‌طور مؤثر در کاربردهای مختلف استفاده شود. این مسئله، به‌ویژه به‌دلیل جایگاه آن به‌عنوان بزرگ‌ترین صنعت در اقتصادهای مختلف و عمده‌ترین مصرف‌کنندهٔ مواد خام است. پسماندهای پلاستیکی می‌توانند به‌عنوان مصالح ساختمانی برای سنگ‌دانه در مخلوط‌های سیمانی و آسفالتی، پرکننده، عایق و موارد دیگر به‌کار روند. بااین‌حال، با وجود قابلیت بالقوه زیاد استفاده از PW در صنعت ساخت‌وساز، توسعه و کاربرد آن همچنان بسیار محدود باقی مانده است [۵۱].

پلاستیک‌های بازیافتی در چاپ سه‌بعدی

چاپ سه‌بعدی(3DP) یا تولید افزایشی (AM)، فناوری نوظهوری در تولید است که نوعی روش پایدار نیز تلقی می‌شود. در مقایسه با فرایندهای سنتی کاهشی، چاپ سه‌بعدی قابلیت کاهش پسماند، تقاضای انرژی و انتشار کربن را نشان داده است. افزون‌براین، AM می‌تواند مواد سبک‌تری را با استفاده از مواد کمتر ایجاد کرده و با چاپ ساختارهای توخالی با پرشدگی کمتر به صرفه‌جویی در مواد کمک کند. AM به‌طور روزافزونی در کاربردهای مختلف ازجمله صنایع هوایی، خودروسازی، غذایی، پزشکی و رباتیک ارزش یافته است. فناوری‌های خاص AM شامل مدل‌سازی مذاب‌نشانی (FDM)، تفجوشی لیزری گزینشی، لیتوگرافی سه‌بعدی و تولید شیء چندلایه هستند [۵۳]. همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده، در آماده‌سازی پسماندهای پلاستیکی برای چاپ سه‌بعدی، مجموعه‌ای از مراحل ضروری لازم است تا این مواد دورریز به مواد اولیه قابل‌استفاده تبدیل شوند. این فرایند با جمع‌آوری و جداسازی پسماندهای پلاستیکی آغاز می‌شود. پس از آن، تمام پسماندها به‌طور کامل شسته شده و به قطعه‌های کوچک‌تر خرد می‌شوند. در مرحله بعد، پلاستیک خرد شده تحت فرایندهای اکسترود کردن یا سایر فناوری‌های فراوری قرار می‌گیرد تا رشته‌ها یا گرانول‌های مناسب برای چاپ سه‌بعدی تولید شوند [۱۶].

در مقطع جهانی، هفت گروه اصلی از پلاستیک‌ها بازیافت‌پذیر



شکل ۱۲- تبدیل پسماندهای پلاستیکی به مواد اولیه چاپ سه‌بعدی ازطریق فرایند بازیافت محلی [۱۶].

هستند: PET، PS، LDPE، HDPE، PVC، PP و سایر موارد که شامل ABS و پلی‌کربنات (PC) می‌شود. پژوهش‌ها نشان داده که تمام این پلاستیک‌ها قابلیت بالقوهٔ بازاستفاده به‌صورت فیلامنت‌های چاپ سه‌بعدی را دارا هستند (طبق منابع موجود). بااین‌حال، تحقیقات گسترده‌ای روی پلی‌لاکتیک اسید (PLA) با منشأ طبیعی انجام گرفته است، که بزرگ‌ترین بخش تحقیقات در زمینه چاپ سه‌بعدی را به خود اختصاص داده است [۵۴].

روش FDM به‌عنوان فناوری برجسته‌ای در تولید افزایشی، با استفاده از پلیمرها و نیاز انرژی کمتر، در حال ظهور است. PLA، به‌دلیل قابلیت تجزیه‌پذیری زیستی و ویژگی‌های زیست‌محیطی، به‌عنوان ماده خام اصلی در چاپ سه‌بعدی FDM شناخته می‌شود. ویژگی‌هایی مانند بازیافت‌پذیری زیاد، سختی، استحکام، و سهولت در چاپ به‌دلیل نقطه ذوب کم، PLA را به گزینه‌ای موفق برای مواد بازیافتی تبدیل کرده است. تولید PLA به سرعت در حال افزایش است و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۲۷ به بیش از ۲/۴ Mt متریک برسد. تعامل چاپ سه‌بعدی و بازیافت می‌تواند نقشی کلیدی در کاهش پسماند و ترویج اقتصاد چرخشی داشته باشد، بنابراین استفاده از مواد اولیه پایدار برای افزایش پایداری در چاپ سه‌بعدی ضروری است [۵۳].

چشم‌انداز آیندهٔ استفاده از پسماندهای پلاستیکی به‌عنوان مصالح بازیافتی

چشم‌انداز آیندهٔ استفاده از پسماندهای پلاستیکی به‌عنوان مصالح بازیافتی، امیدوارکننده اما نیازمند تلاش‌های بیشتر است. پژوهش‌ها نشان می‌دهد، استفاده از پلاستیک‌های بازیافتی در تولید مصالح ساختمانی، مانند بتن، نه‌تنها می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی مواد کمک کند، بلکه امکان کاهش حجم پسماندهای دفن‌شده یا سوزانده‌شده را نیز فراهم می‌آورد. با توسعه راهکارهای نوین مانند بازیافت شیمیایی و فناوری‌های تولید افزودنی (AM/3DP)، این امکان به‌وجود می‌آید که پسماندهای پلیمری به محصولاتی باارزش‌تر تبدیل شوند. برای دستیابی به این اهداف، پژوهش‌های بیشتری دربارهٔ تعیین درصد بهینه پلاستیک در مصالح بازیافتی، ارزیابی طول عمر سازه‌ها و کاهش مصرف انرژی در فرایندهای بازیافت ضروری است. افزون‌براین، برای افزایش پذیرش این مصالح ازسوی صنایع و پیمانکاران، دولت‌ها و مقامات باید اقداماتی نظیر برقراری مشوق‌های مالی و ترویج مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی این مواد را ارائه دهند. چشم‌انداز آینده بر گسترش همکاری‌های بین دولت‌ها، صنایع و جوامع محلی استوار است تا با استفاده از مدل‌های اقتصاد چرخشی، فرایندهای بازیافت غیرمتمرکز و فناوری‌های نوآورانه، نیازهای محلی را به‌شکل پایداری برآورده سازند. این رویکرد می‌تواند به کاهش چشمگیر تولید پسماندهای پلاستیکی و تقویت بازاستفاده از آن‌ها به‌همراه صرفه‌جویی اقتصادی و ارتقای پایداری جهانی منجر شود.

نتیجه‌گیری

استفاده از پلاستیک‌های بازیافتی در تولید مصالح ساختمانی، رویکرد امیدبخشی برای کاهش پسماندهای پلاستیکی و توسعه فناوری‌های ساخت‌وساز پایدار است. بررسی‌ها نشان می‌دهد، این مواد می‌توانند افزون‌بر کاهش حجم زباله‌های جامد و آثار زیست‌محیطی ناشی از آن، خواص مکانیکی، عملکردی، و ویژگی‌های عایق‌بندی گرمایی و صوتی مصالح را نیز بهبود بخشند. پلاستیک‌های بازیافتی در صنعت ساخت‌وساز و راه‌سازی به‌منظور بهبود عملکرد روسازی و حفظ منابع تجدیدناپذیر مانند قیر و سنگ‌دانه‌ها کاربرد پیدا کرده‌اند. این مواد در تولید بلوک‌ها و آجرهای ساختمانی نیز به‌کار می‌روند که نسبت به مصالح سنتی سبک‌تر و مقاوم‌تر هستند. افزون‌براین، آن‌ها در تولید عایق‌های گرمایی و صوتی برای دیوارها و سقف ساختمان‌ها نیز کاربرد دارند و به کاهش مصرف انرژی کمک می‌کنند. همچنین، به‌عنوان تقویت‌کننده‌های خاک و لایه‌های زمین‌ساز به بهبود پایداری و مقاومت خاکریزها و

سازه‌های خاکی کمک می‌کنند. بااینحال، برای تبدیل‌شدن به جایگزینی مناسب برای مصالح سنتی، نیازمند بهینه‌سازی در ترکیب و فراورش هستند. این راهکار، نه‌تنها فرصتی برای مدیریت پایدار پسماندهای پلاستیکی فراهم می‌کند، بلکه مسیر نوینی برای ارتقای پایداری در فناوری‌های ساخت‌وساز ارائه می‌دهد. با وجود پیشرفت‌های حاصل، چالش‌هایی نظیر هزینه‌های تولید، پایداری بلندمدت و محدودیت‌های مرتبط با فراورش پلاستیک‌ها همچنان مطرح هستند. این مطالعه تأکید می‌کند که با پژوهش و توسعه بیشتر، بهینه‌سازی فرایندها و تدوین استانداردهای دقیق، می‌توان از قابلیت بالقوهٔ کامل پلاستیک‌های بازیافتی برای ایجاد تحولی مثبت در صنعت ساخت‌وساز بهره‌برداری کرد.

مراجع

1. Lamba P., Kaur D.P., Raj S., and Sorout J., Recycling/Reuse of Plastic Waste as Construction Material for Sustainable Development: A Review, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **29**(57), 86156-86179, 2022.
2. Al-Sinan M.A. and Bubshait A.A., Using Plastic Sand as a Construction Material Toward a Circular Economy: A Review, *Sustainability*, **14**(11), 6446. 2022.
3. Gu L. and Ozbakkaloglu T., Use of Recycled Plastics in Concrete: A Critical Review, *Waste Manag.*, **51**, 19-42, 2016.
4. Mrket Us., Global Recycled Plastics Market Plastic Type, https://Market.Us/Report/Recycled-Plastics-Market/, available in Nov 2023.
5. Market R.T., Recycled Thermoplastic Market - by Type (Bio-Degradable, Non-Biodegradable), by Form (Flakes, Pellets, Granules), by Technology (Extrusion, Injection Molding, Blow Molding), by Product (Polyethylene, Polyethylene Terephthalate, Polypropylene) & Global Forecast, 2023-2032,https://www.gminsights.com/industry-analysis/recycled-thermoplastic-market/, available in Mar 2023.
6. Eneh A.E., Application of Recycled Plastics and Its Composites in the Built Environment, *Best: Int. J. Manag., Inf. Technol. Eng.*, **3**(3), 9-16, 2015.
7. Zulkernain N.H., Gani P., Chuan N.C., and Uvarajan T., Utilisation of Plastic Waste as Aggregate in Construction Materials: A Review, *Constr. Build. Mater.*, **296**, 123669, 2021.
8. da Silva, T.R., de Azevedo A.R.G., Cecchin D. et al., Application of Plastic Wastes in Construction Materials: A Review Using the Concept of Life-Cycle Assessment in the Context of Recent Research for Future Perspectives, *Materials*, **14**, 3549, 2021.
9. Rahat M.H.H., Massarra D., and Wang D., Using Plastic Wastes in Construction: Opportunities and Challenges, *Epic Series in Built Environ.*, **3**, 785-794, 2022.
10. ISO, Standards and Plastic Pollution, https://www.iso.org/plasticpollution, available in 2025.
11. Almeshal I., Tateh B.A., Alyousef R. et al., Use of Recycled Plastic as Fine Aggregate in Cementitious Composites: A Review, *Constr. Build. Mater.*, **253**, 119146, 2020.
12. Pilapitiya P.N.T. and Ratnayake A.S., The World of Plastic Waste: A Review, *Clean. Mater.*, **11**, 100220, 2024.
13. Jagadeesh P., Rangappa S.M., Siengchin S. et al., Sustainable Recycling Technologies for Thermoplastic Polymers and Their Composites: A Review of the State of the Art, *Polym. Compos.*, **43**(9), 5831-5862, 2022.
14. Kazemi M., Kabir S.F., and Fini E.H., State of the Art in Recycling Waste Thermoplastics and Thermosets and Their Applications in Construction. Resources, *Conserv. Recycl.*, **174**, 105776, 2021.
15. Nyika J. and Dinka M., Recycling Plastic Waste Materials for Building and Construction Materials: A Minireview, *Mater. Today: Proc.*, **62**, 3257-3262, 2022.
16. Kassab A., Al Nabhani D., Mohanty P., Pannier C., and Ayoub G.Y., Advancing Plastic Recycling: Challenges and Opportunities in the Integration of 3D Printing and Distributed Recycling for a Circular Economy, *Polymers*, **15**(19), 3881, 2023.
17. Klotz M., Oberschelp C., Salah C., Subal L., and Hellweg S., The Role of Chemical and Solvent-Based Recycling Within a Sustainable Circular Economy for Plastics, *Sci. Total Environ.*, **906**, 167586, 2024.
18. Singh N., David Hui D., Singh R., Ahuja I.P.S., Feo L., and Fraternali F., Recycling of Plastic Solid Waste: A State of Art Review and Future Applications, *Compos. Part B: Eng.*, **115**, 409-422, 2017.
19. Goli A., Rout B., Cyril T., and Govindaraj V., Evaluation of Mechanical Characteristics and Plastic Coating Efficiency in Plastic-Modified Asphalt Mixes, *Int. J. Pavement Res. Technol.*, **16**, 693-704, 2023.
20. Hao G., He M., Lim S.M. et al., Recycling of Plastic Waste in Porous Asphalt Pavement: Engineering, Environmental, and Economic Implications, *J. Clean. Prod.*, **440**, 140865, 2024.
21. Enfrin M. and Giustozzi F., Recent Advances in the Construction of Sustainable Asphalt Roads with Recycled Plastic, *Polym. Int.*, **71**(12), 1376-1383, 2022.
22. Abuaddous M., Taamneh M.M., and Rabab'ah S.R., The

Plastic Waste, (*IRJET): Int. J. Res. Eng. Technol.*, **6**, 4056-4060, 2019.

37. Chatrabhuj and K. Meshram, Use of Geosynthetic Materials as Soil Reinforcement: an Alternative Eco-Friendly Construction Material, *Discov. Civ. Eng.*, **1**(1), 41, 2024.
38. Palmeira E.M., Araújo G.L., and Santos E.C., Sustainable Solutions with Geosynthetics and Alternative Construction Materials—A Review, *Sustainability*, **13**, 12756, 2021.
39. Vicuña L., Jaramillo-Fierro X., Cuenca P.E. et al., Evaluation of the Effectiveness of Geogrids Manufactured from Recycled Plastics for Slope Stabilization—A Case Study, *Polymers*, **16**, 1151, 2024.
40. Ogundairo T.O., Olukanni D.O., Akinwumi I.I., and Adegoke D.D., A Review on Plastic Waste as Sustainable Resource in Civil Engineering Applications, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **1036**, 012019, 2021.
41. Vieira C.S. and Pereira P.M., Short-Term Tensile Behaviour of Three Geosynthetics after Exposure to Recycled Construction and Demolition Materials, *Constr. Build. Mater.*, **273**, 122031, 2021.
42. Koh H.W., Le D.K., Ng G.N. et al., Advanced Recycled Polyethylene Terephthalate Aerogels from Plastic Waste for Acoustic and Thermal Insulation Applications, *Gels*, **4**, 43, 2018.
43. Abdel-Hakim A., El-Basheer T.M., Abd El-Aziz A.M., and Afifi M., Acoustic, Ultrasonic, Mechanical Properties and Biodegradability of Sawdust/Recycled Expanded Polystyrene Eco-Friendly Composites, *Polym. Test.*, **99**, 107215, 2021.
44. Islam S. and Bhat G., Environmentally-Friendly Thermal and Acoustic Insulation Materials from Recycled Textiles, Journal of Environmental Management, **251**, 109536, 2019.
45. Zhao J.R., Zheng R., Tang J., Sun H.J., and Wang J., A Mini-Review on Building Insulation Materials from Perspective of Plastic Pollution: Current Issues and Natural Fibres as A Possible Solution, *J. Hazard. Mater.*, **438**, 129449, 2022.
46. Reynoso L.E., Carrizo Romero A.B., Viegas G.M., and San Juan G.A., Characterization of an Alternative Thermal Insulation Material Using Recycled Expanded Polystyrene, *Constr. Build. Mater.*, **301**, 124058. 2021.
47. Hegyi A., Vermesan H., Lăzărescu A.-V., Petcu C., and Bulacu C., Thermal Insulation Mattresses Based on Textile Waste and Recycled Plastic Waste Fibres, Integrating Natural Fibres of Vegetable or Animal Origin, *Materials*, **15**(4), 1348, 2022.
48. Signorini C. and Volpini V., Mechanical Performance of Fiber Reinforced Cement Composites Including Fully-Recycled Plastic Fibers, *Fibers*, **9**(3), 16, 2021.
49. Ming Y., Chen P., Li L., Gan G., and Pan G., A Comprehensive Review on the Utilization of Recycled Waste Fibers in Cement-Based Composites, *Materials*, **14**(13), 3643, 2021.

Potential Use of Recycled Polyethylene Terephthalate (RPET) Plastic Waste in Asphalt Binder, *Int. J. Pavement Res. Technol.*, **14**, 579-587, 2021.

23. Ashish P.K., et al., Closing the Loop: Harnessing Waste Plastics for Sustainable Asphalt Mixtures–A Comprehensive Review, *Constr. Build. Mater.*, **400**, 132858, 2023.
24. You L., Long Z., Tou Z. et al., Review of Recycling Waste Plastics in Asphalt Paving Materials, *J. Traffic Transp. Eng.*, **9**(5), 742-764, 2022.
25. Yin F., Fortunatus M., Moraes R. et al., Performance Evaluation of Asphalt Mixtures Modified with Recycled Polyethylene via the Wet Process, *Transp. Res. Rec.*, **2675**(10), 491-502, 2021.
26. Almohana A.I., Abdulwahid M.Y., Galobardes I., Mushtaq J., and Almojil S.F., Producing Sustainable Concrete with Plastic Waste: A Review, *Environ. Chall.*, **9**, 100626, 2022.
27. Babafemi A.J., Šavija B., Paul S.C., and Anggraini V., Engineering Properties of Concrete with Waste Recycled Plastic: A Review, *Sustainability*, **10**(11), 3875, 2018.
28. Yin, S., Tuladhar R., Shi F. et al., Use of Macro Plastic Fibres in Concrete: A Review, *Constr. Build. Mater.*, **93**, 180-188, 2015.
29. Nhabih H.T., Al-Badkubi M.R.K.M., El-barbary A.A., and Salman M.M., Recycling Harmful Plastic Waste to Produce a Fiber Equivalent to Carbon Fiber Reinforced Polymer for Reinforcement and Rehabilitation of Structural Members, *Curv. Layer. Struct.*, **11**(1), 20240003, 2024.
30. Duan Z., Deng Q., Liang C., Ma Z., and Wu H., Upcycling of Recycled Plastic Fiber for Sustainable Cementitious Composites: A Critical Review and New Perspective, *Cem. Concr. Compos.*, **142**, 105192, 2023.
31. Ahmad F., Jamal A., Mazher K.M., Umer W., and Iqbal M., Performance Evaluation of Plastic Concrete Modified with E-Waste Plastic as a Partial Replacement of Coarse Aggregate, *Materials*, **15**(1), 175, 2021.
32. Basha S.I., Ali M.R., Al-Dulaijan S.U., and Maslehuddin M., Mechanical and Thermal Properties of Lightweight Recycled Plastic Aggregate Concrete, *J. Build. Eng.*, **32**, 101710, 2020.
33. Kulkarni, P., Ravekar V., Rao P.R., Waigokar S., and Hingankar S., Recycling of Waste HDPE and PP Plastic in Preparation of Plastic Brick and Its Mechanical Properties, *Clean. Mater.*, **5**, 100113, 2022.
34. Dadzie D.K., Kaliluthin A.K., and Kumar D.R., Exploration of Waste Plastic Bottles Use in Construction, *Civ. Eng. J.*, **6**(11), 2262-2272, 2026.
35. Kumar R., Kumar M., Kumar I., and Srivastava D., A Review on Utilization of Plastic Waste Materials in Bricks Manufacturing Process, *Mater. Today: Proc.*, **46**(15), 6775-6780, 2021.
36. Mali, S. and Bindu Mani T., Soil Stabilization by Using

50. Anandan S. and Alsubih M., Mechanical Strength Characterization of Plastic Fiber Reinforced Cement Concrete Composites, *Appl. Sci.*, **11**(2), 852, 2021.
51. Awoyera P.O. and Adesina A., Plastic Wastes to Construction Products: Status, Limitations and Future Perspective, *Case Stud. Constr. Mater.*, **12**, E00330, 2020.
52. Mercante I., Alejandrino C., Ojeda J.P. et al., Mortar and Concrete Composites with Recycled Plastic: A Review, *Sci. Technol. Mater.*, **30**, 69-79, 2018.
53. Hasan M.R., Davies I.J., Pramanik A., John M., and Biswas W.K., Potential of Recycled PLA in 3D Printing: A Review, *Sustain. Manuf. Serv. Econo.*, **3**, 100020, 2024
54. Mikula K., Skrzypczak D., Izydorczyk G. et al., 3D Printing Filament as a Second Life of Waste Plastics—A Review, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **28**, 12321-12333, 2021.