

## Introduction of Surface Modification Methods for Recycled Plastics to Enhance the Performance of Fiber-Reinforced Concrete

Ali Sa'adati<sup>1</sup>, Kianoosh Samimi<sup>2\*</sup>, Mohammadreza Hafezi<sup>3</sup>

1- Master's Student, Faculty of Architecture and Urbanism, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Assistance Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

3- Associate Professor, Faculty of Architecture and Urbanism, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

### ABSTRACT

With the unprecedented increase in plastic waste production and the growing demand for the development of sustainable materials in the construction industry, the use of concrete containing recycled plastic has become a highly popular area of scientific research. This type of concrete can help reduce plastic waste while simultaneously adding sustainability features to the construction sector. However, the main challenge in plastic-containing concrete is the weak adhesion of plastic particles to the cement matrix, which can reduce the mechanical properties of concrete and even weaken its longevity. This study investigates the effect of plasma treatment as an innovative and efficient method for surface modification of recycled polyethylene terephthalate (PET) fibers to improve adhesion and enhance the mechanical properties of concrete. Plasma treatment, by inducing surface modifications on PET fibers, increases the hydrophilicity and adhesion of these fibers to the cement matrix, thereby improving the bond and adhesion between concrete components. This improvement is particularly evident in the interfacial transition zone, which is prone to cracking, and can lead to enhanced compressive and tensile strength of the concrete. The results of various experiments, including compressive, tensile, and flexural strength tests, as well as evaluations of the concrete's durability against freeze-thaw cycles, clearly demonstrate the significant performance improvement of concrete containing plasma-treated fibers. Although the initial results of plasma treatment are promising and show a substantial increase in the mechanical properties of concrete, further research is required to optimize the process parameters and thoroughly assess its application on an industrial scale. Ultimately, this study suggests that plasma treatment, by improving the sustainability of PET-containing concrete, can contribute to reducing the environmental impact of concrete production and represent an effective step toward the development of environmentally friendly construction materials.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 05 December 2024

Revise Date: 03 March 2025

Accept Date: 06 May 2025

### Keywords:

Recycled Concrete

Plasma

Plastic Fibers

Interfacial Transition Zone

Surface Modification

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.490182.3580

\*Corresponding author: Kianoosh Samimi.

Email address: [k\\_samimi@sbu.ac.ir](mailto:k_samimi@sbu.ac.ir)

## معرفی روش‌های اصلاح سطح پلاستیک بازیافتی جهت افزایش عملکرد بتن‌های الیافی

علی سعادت<sup>۱</sup>، کیانوش صمیمی<sup>۲\*</sup>، محمدرضا حافظی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- دانشیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی تهران، ایران

### چکیده

با افزایش بی‌سابقه تولید زباله‌های پلاستیکی و نیاز فزاینده به توسعه مصالح پایدار در صنعت ساخت‌وساز، استفاده از بتن حاوی پلاستیک بازیافتی به یکی از حوزه‌های پرطرفدار در تحقیقات علمی تبدیل شده است. این نوع بتن می‌تواند به کاهش ضایعات پلاستیکی کمک کرده و هم‌زمان ویژگی‌های پایداری را به صنعت ساخت‌وساز اضافه کند. با این حال، چالش اصلی در بتن حاوی پلاستیک، ضعف چسبندگی ذرات پلاستیک به ماتریس سیمانی است که می‌تواند موجب کاهش خواص مکانیکی بتن و حتی تضعیف طول عمر آن شود. در این پژوهش، تأثیر تیمار پلاسما به عنوان روشی نوین و کارآمد برای اصلاح سطح الیاف بازیافتی پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) مورد بررسی قرار گرفته است تا بتواند چسبندگی و تقویت خواص مکانیکی بتن را بهبود بخشد. تیمار پلاسما از طریق ایجاد تغییرات سطحی بر روی الیاف PET، ویژگی‌های آبدوستی و چسبندگی این الیاف را به ماتریس سیمانی افزایش می‌دهد و بدین ترتیب موجب بهبود چسبندگی و پیوند بین اجزای بتن می‌شود. این بهبود به‌ویژه در ناحیه انتقال بین سطحی که مستعد ترک خوردگی است، قابل مشاهده بوده و می‌تواند منجر به افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن گردد. نتایج حاصل از آزمایش‌های مختلف، شامل تست‌های فشاری، کششی و خمشی، و همچنین بررسی دوام بتن در برابر شرایط چرخه‌های یخ‌زدگی و ذوب، بهبود قابل توجه عملکرد بتن‌های حاوی الیاف تیمار دیده را به‌طور واضح نشان می‌دهد. اگرچه نتایج اولیه تیمار پلاسما امیدوارکننده بوده و افزایش چشمگیری در خواص مکانیکی بتن نشان می‌دهد، این روش همچنان نیازمند انجام تحقیقات بیشتر برای بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند و ارزیابی دقیق آن در مقیاس‌های صنعتی است. در نهایت، این پژوهش نشان می‌دهد که تیمار پلاسما با ارتقای پایداری بتن‌های حاوی PET می‌تواند به کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید بتن کمک کرده و گامی مؤثر در جهت توسعه مصالح سازگار با محیط زیست باشد.

کلمات کلیدی: بتن بازیافتی، پلاسما، الیاف پلاستیک، ناحیه انتقال بین سطحی، اصلاح سطح.

| شناسه دیجیتال: |                                | سابقه مقاله: |                    |            |                 |            |
|----------------|--------------------------------|--------------|--------------------|------------|-----------------|------------|
| doi:           | 10.22065/jsce.2025.490182.3580 | چاپ          | انتشار آنلاین      | پذیرش      | بازنگری         | دریافت     |
|                | 10.22065/jsce.2025.490182.3580 | ۱۴۰۴/۱۱/۳۰   | ۱۴۰۴/۰۲/۱۶         | ۱۴۰۴/۰۲/۱۶ | ۱۴۰۳/۱۲/۱۳      | ۱۴۰۳/۰۹/۱۵ |
|                |                                |              | کیانوش صمیمی       |            | *نویسنده مسئول: |            |
|                |                                |              | k_samimi@sbu.ac.ir |            | پست الکترونیکی: |            |

## ۱- مقدمه

فرآیند شهرنشینی و رشد جمعیت از عوامل اصلی افزایش تولید زباله‌های جامد هستند. در حال حاضر، جهان سالانه حدود ۲/۰۱ میلیارد تن زباله شهری تولید می‌کند که حداقل ۳۳ درصد از آن به شیوه‌ای نامناسب و غیر ایمن مدیریت می‌شود. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ این مقدار به ۳/۴۰ میلیارد تن برسد [۱، ۲]. پلاستیک، به دلیل خواص منحصر به فردی مانند چگالی کم، استحکام بالا، مقاومت در برابر باکتری‌ها، و هزینه پایین، به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما همین ویژگی‌ها نیز به چالش‌های جدی در مدیریت زباله‌های پلاستیکی منجر شده است. پلاستیک زباله‌ای جمع‌آوری شده از جریان زباله‌های جامد مخلوطی از انواع پلاستیک‌های آلوده است که شناسایی، جداسازی و بازیافت آن‌ها را دشوار می‌سازد [۳-۵]. بر اساس جدول شماره ۱ سالانه ۲/۳۳ میلیون تن پلاستیک تولید می‌شود و مصرف آن هر سال ۷ تا ۸ درصد افزایش می‌یابد. این افزایش منجر به مشکلات مدیریت زباله، از جمله چالش‌های مرتبط با بازیافت، سوزاندن و دفع می‌شود. سوزاندن پلاستیک منجر به انتشار گاز کربن دی اکسید<sup>۱</sup> و دیگر آلاینده‌های خطرناک در جو می‌شود [۵-۷]. از طرفی، در میان ضایعات پلاستیکی، پلی‌اتیلن و پلی‌اتیلن ترفتالات بیشترین سهم را دارند. پلی‌اتیلن ترفتالات که به‌طور عمده از بطری‌های پلاستیکی به دست می‌آید، به عنوان یکی از مهم‌ترین مواد پلاستیکی در زباله‌های جامد مطرح است [۸]. با توجه به مقیاس بالای تولید پلی‌اتیلن ترفتالات، بازیافت و استفاده مجدد از این ماده در صنعت ساخت‌وساز به‌ویژه برای تولید بتن، یکی از رویکردهای پایداری به شمار می‌رود [۹]. توجه به کاهش اثرات زیست‌محیطی در صنعت ساخت و ساز از جمله مسائل مهم روز به شمار می‌آید. استفاده از نانوذراتی مانند گرافن، که قابلیت کاهش مصرف سیمان و در نتیجه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را دارد، نمونه‌ای از راهکارهای نوین برای دستیابی به پایداری در این صنعت است. [۱۰] بتن دومین ماده پرمصرف بر روی زمین است که به طور گسترده از آن در مصالح ساختمانی استفاده می‌گردد [۱۱] و به عنوان یک مصالح ساختمانی محبوب در صنعت ساختمان، دارای معایبی از جمله ظرفیت مقاومت پایین در برابر کشش است. در حالی که پلاستیک بازیافتی ممکن است کمی مقاومت فشاری بتن را کاهش دهد، مانند استحکام کششی و مقاومت در برابر انقباض و ترک خوردگی را افزایش می‌دهد و آن را برای کاربردهای غیر سازه‌ای مناسب می‌کند. بتن سبک تولید شده با استفاده از سنگدانه‌ها یا الیاف پلاستیکی بازیافتی به کاهش مصرف انرژی در حمل و نقل و ساخت و ساز کمک می‌کند. به طور معمول، الیاف را می‌توان با استفاده از پلیمرهای مختلف (پلاستیک)، شیشه، کربن یا سایر مواد طبیعی در دسترس ساخت. [۱۲-۱۴] با افزودن زباله‌های پلاستیکی مانند پلی‌اتیلن ترفتالات به بتن، می‌توان دهن زباله و مصرف منابع طبیعی را کاهش داد. این روش بازیافت پلاستیک را ترویج داده و ردپای کربن بتن سنتی را کم می‌کند. همچنین، ضایعات پلاستیکی می‌توانند برخی خواص بتن را بهبود دهند، اما ضعف چسبندگی الیاف پلاستیکی به ماتریس سیمانی چالشی اساسی است. [۱۵، ۱۶]

جدول ۱: انواع و مقادیر پلاستیک در زباله‌های جامد شهری در ایالات متحده آمریکا [۶]

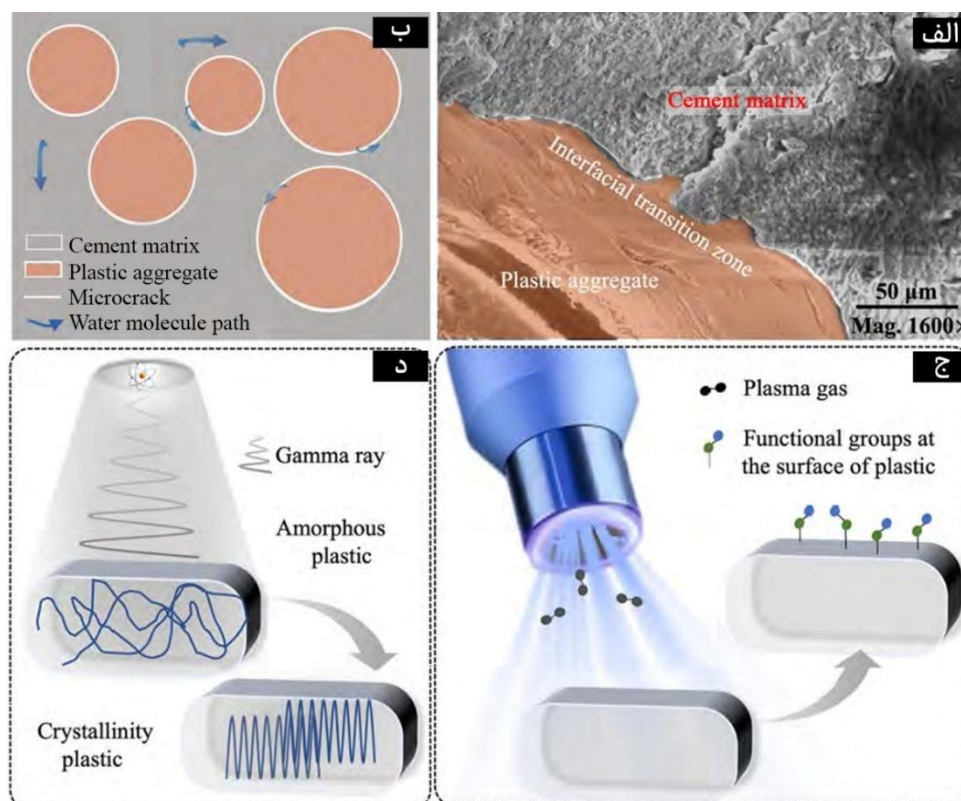
| نوع پلاستیک                    | مقدار (۱۰۰۰ تن) |
|--------------------------------|-----------------|
| پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)       | ۱۷۰۰            |
| پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) | ۴۱۲۰            |
| پلی‌اتیلن با چگالی کم (LDPE)   | ۵۰۱۰            |
| پلی‌پروپیلن (PP)               | ۲۵۸۰            |
| پلی‌استایرن (PS)               | ۱۹۹۰            |
| دیگر                           | ۳۱۳۰            |

این بررسی‌ها همچنین رابطه بین خواص زباله، دوز و خواص مکانیکی بتن با زباله‌های پلاستیکی را نشان می‌دهند و کشف کرده‌اند که سطح بالای افزودن زباله عملکرد مکانیکی بتن را بدتر می‌کند. با این حال، مکانیسم‌های بالقوه پشت این بدتر شدن عملکرد بتن هنوز به طور جامع آشکار نشده است. درک مکانیسم‌های تخریب بتن ضروری است زیرا می‌تواند به جلوگیری از عوامل مضر در جریان دستکاری عملکرد مکانیکی بتن که زباله‌های شهری را در خود جای می‌دهد کمک کند. برای مثال، پیوند سطحی ضعیف بین پلاستیک و

<sup>۱</sup> کربن دی اکسید یا Carbon dioxide به اختصار CO2

هیدرات‌های سیمان که ناحیه انتقال بین سطحی<sup>۲</sup> (ITZ) را تشکیل می‌دهد باید برطرف شود زیرا راندمان انتقال تنش سطحی و مقاومت فشاری بتن را کاهش می‌دهد. خواص مقاومتی کاهش یافته بتن حاوی پلاستیک عمدتاً به پیوند سطحی ضعیف بین سنگدانه‌های پلاستیکی و ماتریس سیمان مرتبط است، همان‌طور که در شکل ۱-الف نشان داده شده است. [۱۷] این ضعف پیوند ناشی از تفاوت میل ترکیبی سطحی بین مواد سیمانی آب‌دوست و پلاستیک آبریز است که مانع از ایجاد اتصال قوی بین این دو ماده می‌شود. در طول فرآیند هیدراسیون سیمان، دانه‌های سیمان در نواحی تماس با سنگدانه‌های پلاستیکی، مولکول‌های آب را جذب کرده و با آن‌ها واکنش می‌دهند. در نتیجه، ترک‌ها و منافذ در ناحیه انتقال سطحی (ITZ) بین سیمان و پلاستیک شکل می‌گیرند، که موجب تضعیف ساختار بتن می‌شود. [۱۸] از سوی دیگر، پلاستیک آبریز با دفع آب، مقدار آب در دسترس برای هیدراسیون سیمان را کاهش داده و مانع از پیشرفت مناسب واکنش‌های شیمیایی سیمان می‌شود، همان‌طور که در شکل ۱-ب نشان داده شده است. این پدیده منجر به کاهش درجه هیدراسیون و در نهایت، افت استحکام مکانیکی بتن می‌شود. [۷، ۱۹] برای بهبود پیوندهای سطحی ضعیف در سیستم‌های بتنی حاوی زباله‌های پلاستیکی، تکنیک‌های اصلاح سطح مانند تیمار پلازما در شکل ۱-ج و تابش گاما در شکل ۱-د پیشنهاد شده است. [۲۰] این روش با تغییر در ترکیب شیمیایی سطح پلاستیک، می‌تواند چسبندگی آن به سیمان را تقویت کند. با این حال، همچنان ضعف پیوند در نواحی انتقالی بتن می‌تواند منجر به افزایش تخلخل ساختاری شود که به‌عنوان یک نقص عمل کرده و توانایی انتقال تنش را کاهش می‌دهد. [۲۱] از طرف دیگر، تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از مواد نانو ساختاری مانند گرافن می‌تواند دوام بتن را در برابر واکنش‌های قلیایی-سیلیکا (ASR) بهبود بخشد. به‌عنوان مثال، مطالعه صمیمی و همکاران [۲۲] نشان داده است که ترکیب گرافن با پومیس تولید ژل ASR را کاهش داده و مقاومت ساختاری بتن را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، کنترل نفوذپذیری بتن در برابر یون‌های خورنده مانند کلرید یکی از چالش‌های مهم در محیط‌های دریایی و صنعتی است. استفاده از موادی مانند متاکائولین در ترکیب بتن، با ایجاد ساختار متراکم‌تر و کاهش تخلخل، می‌تواند مقاومت بتن را در برابر نفوذ یون‌های مخرب افزایش دهد. [۲۳، ۲۴] در نهایت، پلاستیک‌های آبریز علاوه بر تأثیرات منفی بر پیوند سطحی، می‌توانند منافذ بتن را پر کرده و چگالی کلی آن را افزایش دهند. این اثر متقابل می‌تواند تا حدی ضعف اولیه پیوند بین پلاستیک و سیمان را جبران کند. بنابراین، دستیابی به یک ریزساختار بتن متراکم با نواحی انتقال سطحی اصلاح‌شده، می‌تواند به کاهش افت مقاومت مکانیکی کامپوزیت‌های بتن پلاستیکی منجر شود. [۲۵]

<sup>۲</sup> ناحیه انتقال بین سطحی یا interfacial transition zone به اختصار ITZ



شکل ۱: (الف) منطقه انتقال بین سطحی ضعیف ITZ (ب) حرکت محدود مولکول‌های آب مانع هیدراسیون (ج) تیمار پلاسما (د) تابش گاما [۲۰]

## ۲- استفاده از پلاستیک در بتن

### ۲-۱- سنگدانه و الیاف پلاستیکی

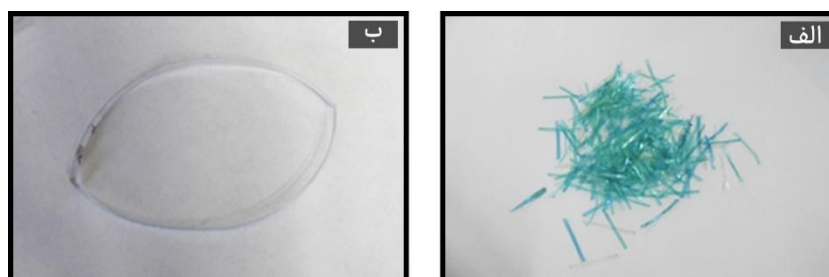
مطالعات موجود نشان داده‌اند که جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی با سنگدانه‌های پلاستیکی به طور کلی منجر به تغییر سطح کارایی، بهبود خواص عملکردی و مکانیکی می‌شود. تأثیر ضایعات پلاستیکی بر عملکرد کارایی بتن وابسته به شکل سنگدانه است. به طور خاص، سنگدانه‌های پلاستیکی لایه‌ای و زاویه‌دار اصطکاک داخلی بالایی را نشان می‌دهند که مانع حرکت بتن تازه می‌شود، در حالی که سنگدانه‌های پلاستیکی با اشکال کروی و منظم، اصطکاک داخلی پایینی را نشان می‌دهند که باعث افزایش روانی بتن تازه می‌شود. [۲۶] بیشتر مطالعات در مورد الیاف PET از الیاف با عرض چند میلی‌متر و طول چند سانتی‌متر استفاده می‌کنند که به طور یکنواخت در بتن توزیع می‌شوند. این الیاف با مهار ریزترک‌های انقباضی، تأخیر در انتشار آن‌ها و کنترل عرض ترک، عملکرد بتن را بهبود می‌بخشند. نقش اصلی آن‌ها تحت عنوان "اثر دوخت" در مقابله با ریزترک‌های اولیه ناشی از انقباض بتن است که به کاهش دامنه ترک‌ها و تقویت بتن کمک می‌کند. باریکی الیاف بر چسبندگی و کارایی مخلوط تأثیر مستقیم دارد. با این حال، چسبندگی بین الیاف مصنوعی و بتن، در مقایسه با تقویت‌کننده‌های فولادی، یک چالش اساسی در بتن الیافی (FRC)<sup>۳</sup> محسوب می‌شود. [۱۸]

### ۲-۲- شکل و درصد الیاف در کامپوزیت‌های سیمانی

مطالعات فُتی و همکاران نشان داده است که الیاف PET بازیافتی حاصل از بطری‌های پلاستیکی ضایعاتی، که در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند، می‌توانند انعطاف‌پذیری بتن را افزایش داده و ترک‌های ناشی از بارهای خارجی و جمع‌شدگی پلاستیک را کاهش دهند. این الیاف، به دلیل مقاومت بالا در محیط‌های قلیایی و هزینه تولید پایین، گزینه‌ای مناسب برای تقویت بتن محسوب می‌شوند. برای بررسی تأثیر این الیاف، دو سری آزمایش انجام شد. در آزمایش اول، نمونه‌های مکعب مستطیلی با دو نوع الیاف مختلف مورد بررسی قرار گرفتند: الیاف لاملار (شکل ۲-الف) و الیاف دایره‌ای (شکل ۲-ب) که تحت آزمایش خمشی قرار گرفتند و نتایج نشان داد که افزودن این الیاف

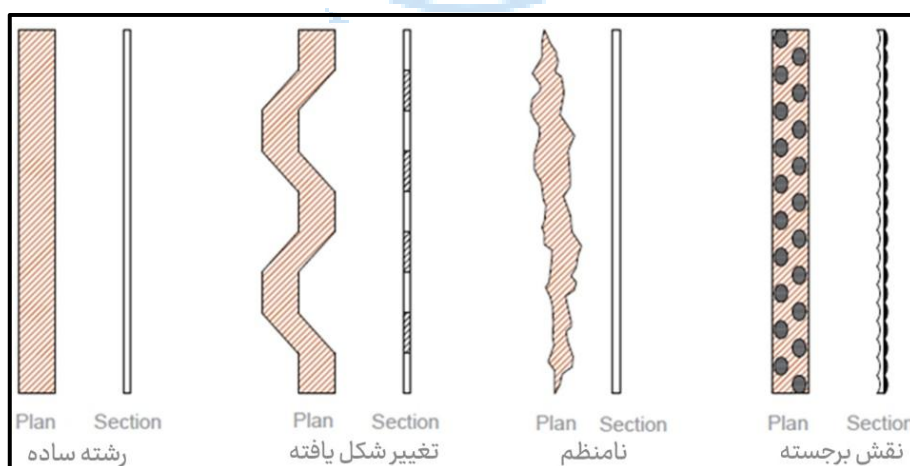
<sup>۳</sup> بتن الیافی یا Fiber Reinforced Concrete به اختصار FRC

موجب بهبود چقرمگی و کاهش گسترش ترک‌ها در بتن شد. در آزمایش دوم، تأثیر درصد‌های بالاتر الیاف (۰/۷۵٪ و ۰/۷۵٪ وزنی) بر خواص بتن بررسی شد که نشان داد بتن تقویت‌شده با الیاف دایره‌ای و مقدار ۰/۷۵٪ وزنی، بهترین عملکرد را از نظر چقرمگی و انعطاف‌پذیری دارد، که این نتایج اثربخشی الیاف PET بازیافتی را در بهبود مقاومت خمشی و کنترل ترک‌ها در بتن تأیید می‌کند. [۲۷] علاوه بر این، الیاف پلاستیکی در بتن به سه شکل اصلی شامل رزین، الیاف گسسته و نوارهای پیوسته شبکه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند که با جلوگیری از گسترش ترک‌ها، توزیع تنش‌های داخلی و افزایش دوام بتن، عملکرد سازه‌ای بتن را بهبود می‌بخشند. تحقیقات اخیر بر استفاده از الیاف پلاستیکی پراکنده در مخلوط بتن متمرکز بوده است که در این راستا، انواع مختلف الیاف با ویژگی‌هایی مانند شکل، اندازه و زبری سطح متفاوت بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که حجم الیاف افزوده تأثیر مستقیمی بر مقاومت فشاری و کششی بتن دارد، درحالی‌که طول الیاف به‌طور خاص بر مقاومت کششی بتن تأثیرگذار است. [۲۸، ۲۹]



شکل ۲: (الف) نمونه الیاف لاملار / (ب) نمونه الیاف دایره‌ای O [۲۷]

پژوهش رضوان و همکاران به بررسی استفاده از الیاف PET به‌عنوان تقویت‌کننده در بتن و کاربرد یادگیری ماشین برای پیش‌بینی خواص مکانیکی این نوع بتن پرداخته است. در این تحقیق، از شبکه عصبی مصنوعی (ANN)<sup>۴</sup> برای تحلیل داده‌های ۸۵ نمونه با ۱۲ ویژگی مختلف شامل مشخصات مواد تشکیل‌دهنده بتن (آب، سیمان، سنگدانه‌ها) و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی الیاف PET (استحکام کششی، مدول الاستیسیته، ابعاد، وزن واحد و شکل هندسی) استفاده شده است. نتایج نشان داد که ویژگی‌های هندسی الیاف PET که در شکل ۳ نشان داده شده است تأثیر زیادی بر مقاومت فشاری بتن دارند و تغییرات در ابعاد و شکل این الیاف می‌تواند موجب بهبود قابل توجه مقاومت فشاری شود. این تحقیق همچنین به کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از ضایعات پلاستیکی کمک می‌کند. استفاده از ANN به‌وسیله الگوریتم‌های بهینه‌سازی وزن‌ها، مدلی دقیق برای پیش‌بینی خواص بتن مسلح به PET ارائه داده که می‌تواند در طراحی سازه‌های مقاوم و پایدار و بهره‌برداری از مواد بازیافتی مفید باشد. [۱۲]



شکل ۳: ۴ نوع مختلف شکل PET در مجموعه داده‌ها [۱۲]

<sup>۴</sup> شبکه‌های عصبی مصنوعی یا Artificial Neural Networks به اختصار ANN

### ۳-۲- خواص سطحی پلاستیک

خواص بتن الیافی تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله نوع سیمان، نوع و درصد حجمی / وزنی الیاف پلاستیکی، هندسه و ویژگی‌های مکانیکی الیاف قرار دارد. این الیاف می‌توانند ترک خوردگی را کاهش داده و چقرمگی بتن را افزایش دهند، اما میزان این تأثیر به نسبت طول به قطر الیاف، تعداد، جهت‌گیری، توزیع الیاف در ماتریس سیمانی و ویژگی‌های سطحی الیاف بستگی دارد. به طور خاص، زبری بیشتر سطح الیاف باعث افزایش چسبندگی آن‌ها به ماتریس سیمانی شده و در نتیجه استحکام کششی بتن را بهبود می‌بخشد. [۳۰] برای ارتقای چسبندگی و عملکرد مکانیکی بتن تقویت‌شده با الیاف، روش‌های مختلفی مانند ایجاد زبری مکانیکی و حرارتی، انجام عملیات شیمیایی و اصلاح سطح الیاف پیشنهاد شده است. زبری مکانیکی را می‌توان در حین فرآیند اختلاط بتن به دست آورد، به‌ویژه زمانی که سطوح الیاف عمداً توسط لبه‌های تیز سنگدانه‌ها آسیب می‌بینند که این امر می‌تواند تعامل الیاف و ماتریس سیمانی را بهبود بخشد. [۳۱، ۳۲]

### ۴-۲- مزایای استفاده از الیاف و سنگدانه‌های پلاستیکی در بتن

#### ۱-۴-۲- افزایش مقاومت مکانیکی، جذب انرژی و شکل‌پذیری بتن

افزودن الیاف مصنوعی به بتن، عملکرد مکانیکی و دوام آن را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد و با ایجاد شبکه تقویت سه‌بعدی، تشکیل ترک‌های ثانویه را کاهش می‌دهد. اصلاحات سطحی روی الیاف توانایی انتقال انرژی به ماتریس بتنی را بهبود می‌بخشد که این ویژگی‌ها مقاومت در برابر ضربه، انعطاف‌پذیری و مناسب بودن بتن برای سازه‌های مقاوم در برابر زلزله را افزایش می‌دهد. [۳۳]

#### ۲-۴-۲- تاخیر و کنترل در ایجاد ترک‌ها

الیاف پلاستیکی موجب پیوند محکم‌تری میان بتن و الیاف شده و از ایجاد ترک‌های سطحی جلوگیری می‌کند. این الیاف همانند یک نگهدارنده یا پل عمل کرده و در صورت بروز ترک، انسجام و پیوستگی سازه را حفظ می‌کنند. این ویژگی بتن را در برابر ترک‌های ناشی از بارگذاری‌های مداوم و تغییرات دما مقاوم‌تر می‌سازد. بررسی دیگری تأیید می‌کند که استفاده از الیاف پلاستیکی در بتن می‌تواند مقاومت کششی و مقاومت در برابر ترک خوردگی را بهبود بخشد. این الیاف با مقاومت در برابر انتشار ترک‌ها، به افزایش مقاومت کششی و خمشی بتن کمک می‌کنند. [۳۴]

#### ۳-۴-۲- کاهش ۱۵ تا ۲۰ درصدی هزینه کاربرد الیاف فلزی

استفاده از پلاستیک به دلیل عدم استفاده مفید از آن و موجود بودن در اکثریت کشورها و تولید روزانه آن و صرفاً نیاز به فرآوری الیاف از آن، می‌تواند هزینه‌های پروژه‌های بزرگ را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد. این روش در مقایسه با استفاده از الیاف فلزی، هزینه‌های ساخت‌وساز را تا ۱۵ تا ۲۰ درصد کاهش می‌دهد. [۳۵]

### ۳- استفاده از تکنیک‌های مختلف اصلاح سطح پلاستیک (مکانیکی، شیمیایی و تابشی، فیزیکوشیمیایی)

#### ۱-۳- مکانیکی

##### ۱-۱-۳- اصلاح سطح در تماس با سنگدانه‌ها

مطالعه‌ای که توسط یان و همکاران انجام شد، تأثیر زبری سطح الیاف پولی‌ولفینی کوتاه را بر پیوند مکانیکی و رفتار بتن‌های الیافی (FRC) بررسی کرد. در این تحقیق، از الیاف با قطر ۰/۶۳۵ میلی‌متر و طول ۵۰/۸ میلی‌متر به‌عنوان عناصر تقویت‌کننده استفاده شد. نتایج نشان داد که زبری سطح الیاف، که در اثر آسیب‌های مکانیکی و تماس با ذرات سخت سنگدانه‌ها طی فرآیند اختلاط ایجاد می‌شود، نقش مهمی در بهبود عملکرد بتن دارد. این زبری سطحی شامل شیارها و برآمدگی‌های طولی است که با افزایش زمان اختلاط از ۶ به ۸۸ دقیقه، به تدریج افزایش یافته و ابعاد برآمدگی‌ها به کمتر از ۱۰ میکرومتر کاهش می‌یابد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که سطوح الیاف پولی‌ولفینی پس از مخلوط شدن، پوشیده از فیبرهای جداشده، حفره‌ها و شیارهایی است که عمق و شدت آن‌ها به مدت زمان اختلاط وابسته است. علاوه بر این، آزمایش‌های کشش و جداسازی الیاف از ماتریس سیمانی تأیید کرد که افزایش زبری سطحی موجب افزایش پیوند مکانیکی بین الیاف و سیمان شده و نیروی موردنیاز برای جدا کردن الیاف از ماتریس سیمانی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه، در زمان اختلاط ۳۵ دقیقه، نیروهای برشی در نواحی اتصال افزایش یافت و تأثیر مکانیکی زبری در

جلوگیری از حرکت الیاف برجسته تر بود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که کنترل میزان آسیب سطحی و زبری الیاف می‌تواند تأثیر قابل توجهی در بهبود عملکرد بتن‌های الیافی داشته باشد. [۳۱]

## ۲-۳- شیمیایی

### ۱-۲-۳- اصلاح سطح با هیدروکسید سدیم

مطالعه‌ای توسط تورنیکرافت و همکاران استفاده از زباله‌های پلاستیکی بازیافتی، به ویژه PET، را به عنوان جایگزینی جزئی برای ماسه در بتن بررسی کرد. در این پژوهش، ۱۰ درصد ماسه با پلاستیک‌های بازیافتی با اندازه مشابه ماسه جایگزین شد و مقاومت فشاری و کششی بتن پس از ۱۴ روز عمل‌آوری ارزیابی شد. نتایج نشان داد مخلوط‌های حاوی پلاستیک‌های فرآوری شده با مواد شیمیایی مانند هیدروکسید سدیم پیوند بهتری با ماتریس سیمانی داشتند و افت مقاومت کمتری نشان دادند. در مقابل، پلاستیک‌های بدون فرآوری منجر به کاهش قابل توجهی در مقاومت شدند. همچنین، استفاده از ذرات PET کوچک‌تر و درجه‌بندی شده کمترین تأثیر منفی را بر مقاومت بتن داشت. این مطالعه نشان داد که با کنترل اندازه و فرآوری پلاستیک، می‌توان از زباله‌های پلاستیکی به عنوان جایگزین ماسه در بتن سازه‌ای استفاده کرد و به کاهش استخراج ماسه و مدیریت زباله‌های پلاستیکی کمک کرد. [۱۸]

### ۲-۲-۳- اصلاح سطح با پودر سرباره و ماسه

طبق نتایج سایکا و همکاران، افزودن سنگدانه‌های پلاستیکی<sup>۵</sup> (PP) به بتن، به دلیل کاهش استحکام پیوند میان پلاستیک و خمیر سیمان و ماهیت آگریز پلاستیک، منجر به کاهش کارایی و خواص مکانیکی بتن می‌شود. مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن حاوی این سنگدانه‌ها معمولاً کمتر از بتن مرجع با سنگدانه‌های طبیعی است. بهبود عملکرد مکانیکی با استفاده از تیمارهای شیمیایی و پوشش پلاستیک با موادی مانند پودر سرباره و ماسه امکان‌پذیر است. همچنین، واکنش هیدرولیز قلیایی پلاستیک در شرایط شبه‌منفذی سیمان می‌تواند ترکیبات آلی تولید کرده و پیوند بین پلاستیک و محصولات هیدراسیون سیمان را تقویت کند، که به بهبود چسبندگی پلاستیک و خمیر سیمان منجر می‌شود. [۳۶، ۳۷] استفاده از سرباره کوره بلند دانه بندی شده<sup>۶</sup> (GBFS) یا خاکستر بادی به عنوان افزودنی‌های معدنی نیز برای بهبود رفتار مکانیکی بتن پیشنهاد می‌شود. [۳۷] شکل ۴ نمونه‌های بتن حاوی سنگدانه‌های پلاستیکی PP پس از شکست در آزمون کششی نشان می‌دهد که این سنگدانه‌ها به دلیل چسبندگی ضعیف با خمیر سیمان از ماتریس جدا شده‌اند. این ضعف در پیوند باعث کاهش مقاومت کششی بتن می‌شود.



شکل ۴: نمونه‌های بتنی حاوی PP پس از شکست در آزمون مقاومت شکافتگی کششی. [۳۷]

### ۳-۲-۳- اصلاح سطح رزین فنوکسی

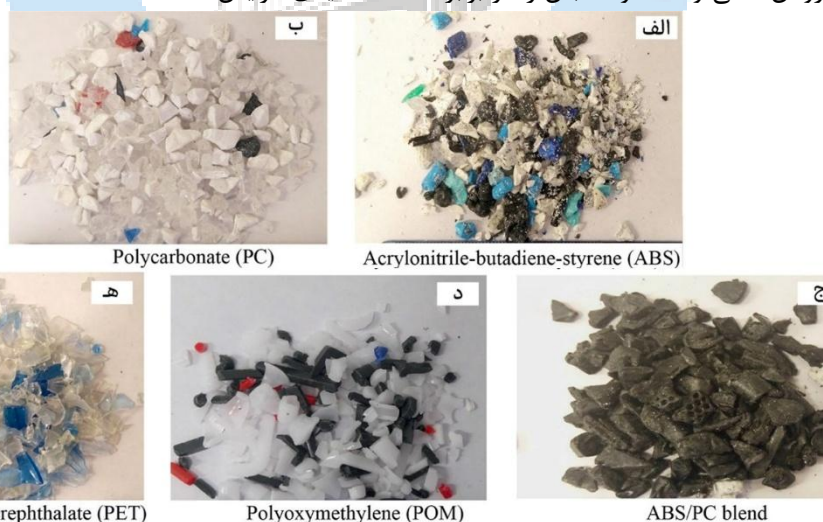
در پژوهشی از ال نوردی و همکاران، اصلاح شیمیایی PET با ترکیب ۵٪ پلی‌استایرن و ۵٪ رزین-PKHH فنوکسی برای بهبود پیوند سیمان-پلاستیک و افزایش زبری سطح انجام شد. ذرات PET به دانه‌بندی ماسه طبیعی تنظیم و در مخلوط‌های بتنی با نسبت‌های

<sup>۵</sup> (PP) pellet-shaped PET-aggregate سنگدانه PET به شکل گوله  
<sup>۶</sup> سرباره کوره بلند دانه‌بندی شده یا ground granulated blast furnace slag به اختصار GBFS

آب به سیمان ۰/۴ تا ۰/۶ و درصد جایگزینی ماسه ۵٪، ۲۰٪ و ۵۰٪ استفاده شدند. نتایج نشان داد که اصلاح شیمیایی، پیوند سیمان-پلاستیک را تقویت کرده و مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی را به ترتیب ۴۵٪، ۳۵٪ و ۶٪ نسبت به پلاستیک اصلاح‌نشده افزایش داده است. بهترین عملکرد مکانیکی در مخلوط‌های حاوی ۵٪ پلاستیک مشاهده شد، در حالی که جایگزینی ۲۰٪ نیز برای بتن سازه‌ای مناسب بود. زبری سطح پلاستیک افزایش یافت اما در محدوده قابل قبول باقی ماند. [۳۸]

#### ۴-۲-۳- اصلاح سطح با هیدروکسید سدیم و هیپوکلریت سدیم

مطالعه‌ای به بررسی اثر پیش‌ تیمار پلاستیک‌های بازیافتی (با استفاده از هیدروکسید سدیم و هیپوکلریت سدیم) بر برخی از خواص مهندسی کامپوزیت‌های سیمانی پرداخته است. در این پژوهش پنج نوع پلاستیک بازیافتی به‌عنوان جایگزین بخشی از ماسه با دو نسبت حجمی ۵ و ۱۵ درصد و دو روش مختلف پیش‌ تیمار شیمیایی مورد استفاده قرار گرفتند. روش اول بر اساس رویکردی است که توسط Naik و همکاران [۳۹] پیشنهاد شده است، در این روش پلاستیک‌ها به مدت ۶ روز در محلول هیدروکسید سدیم<sup>۷</sup> (NaOH) و هیپوکلریت سدیم<sup>۸</sup> (NaOCl) با نسبت ترکیبی (5% NaOCl + 4% NaOH) خیس‌اند و سپس به مدت ۱۲ ساعت در دمای اتاق خشک شدند. روش دوم با تغییرات جزئی از روش Thorneycroft و همکاران [۱۸] پلاستیک‌ها ابتدا با محلول NaOCl (۵٪) و NaOH (۴٪) شسته و سپس با آب شسته و خشک شدند. نتایج نشان داد افزودن پلاستیک‌های اصلاح شده به سیمان باعث ایجاد تخلخل و کاهش خواص مکانیکی ملات، به‌ویژه با افزایش مقدار پلاستیک، می‌شود. در میان پلاستیک‌ها (شکل ۵)، ملات‌های حاوی پلی‌اکسی‌متیلن (POM) و اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) عملکرد مکانیکی بهتری داشتند، در حالی که PET ضعیف‌ترین نتایج را ارائه کرد. شستشوی پلاستیک‌های اصلاح‌شده سطحی با آب، واکنش‌های شیمیایی سطح را کاهش داده و با خنثی کردن قلیائیت ماتریس، تخلخل را کاهش و ساختار ملات را بهبود داد. نوع پلاستیک و روش اصلاح سطح تأثیر کلیدی در خواص مکانیکی ملات دارند. [۴۰] هدف از عملیات شیمیایی، حکاکی سطوح الیاف با استفاده از محلول‌های قوی قلیایی است. با این حال، نشان داده شده است که چنین عملی اغلب زمان زیادی را می‌طلبد و چندین ساعت یا حتی چند روز زمان می‌برد. علاوه بر این، اغلب بر حجم توده الیاف تأثیر منفی می‌گذارد، از این رو خواص مکانیکی آن‌ها مستعد بدتر شدن است. [۴۱-۴۳] اصلاحات انجام‌شده در ساختار داخلی بتن، از جمله کاهش تخلخل و بهبود توزیع حفره‌ها، اثرات مثبتی بر دوام و مقاومت بتن دارند. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که افزودن گرافن به سیمان و ایجاد تغییرات در ساختار حفره‌ها به واسطه‌ی گرافن و پوزولان‌ها می‌تواند مقاومت بتن را در برابر حملات اسیدی افزایش دهد. [۴۴]



شکل ۵: انواع سنگدانه های پلاستیکی الف) اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS)، ب) پلی کربنات (PC)، ج) ترکیب ABS/PC، د) پلی اکسی متیلن (POM)، ه) پلی اتیلن ترفتالات (PET) [۴۰]

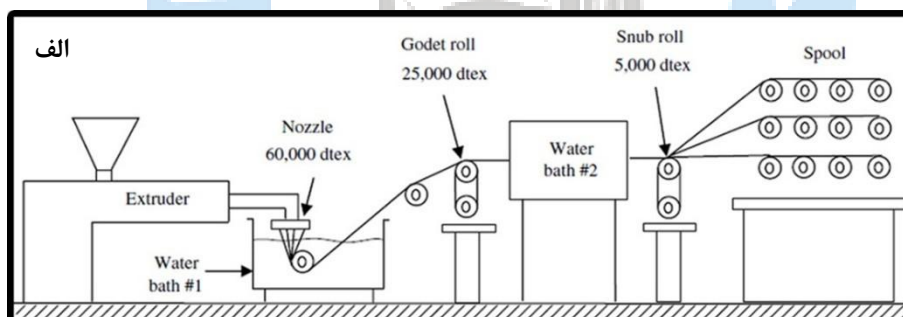
<sup>۷</sup> سدیم هیدروکسید یا (NaOH) Sodium hydroxide  
<sup>۸</sup> هیپوکلریت سدیم یا (NaOCl) Sodium hypochlorite

### ۵-۲-۳- اصلاح سطح در محیط قلیایی هیدروکسید سدیم و ایجاد دندان به روش مکانیکی

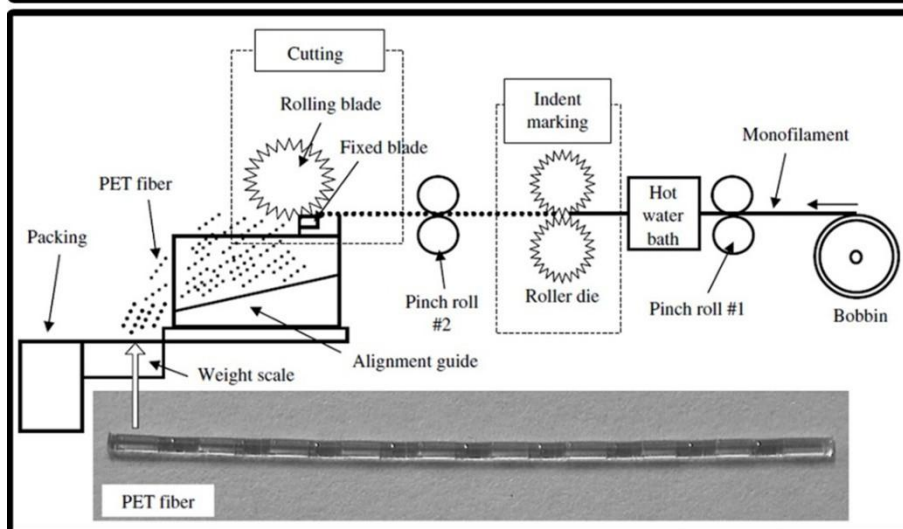
استفاده از PET در تولید بطری‌های پلاستیکی افزایش یافته و روش‌های مختلفی برای استفاده مجدد از آن‌ها پیشنهاد شده است. از جمله تبدیل به پلی‌استر غیر اشباع و ترکیب با بتن پلیمری [۴۵] و استفاده از خرده‌های PET به‌عنوان مصالح سبک در بتن [۴۶] با وجود مقاومت پایین الیاف PET مرسوم در برابر قلیاها [۹]، این الیاف به‌دردت در تقویت بتن به‌کار رفته‌اند. در این پژوهش، روش نوینی برای تولید الیاف تقویت‌کننده بتن از بطری‌های PET معرفی شد. در این فرآیند، در شکل ۶-الف گلوله‌های PET ذوب شده به فیلامنت‌های با استحکام بالا تبدیل شدند و در شکل ۶-ب با ایجاد فرورفتگی‌هایی روی آن‌ها، الیاف تولید گردید. دمای بهینه برای این فرآیند ۶۸ تا ۷۳ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. [۴۷] طبق جدول ۲ آزمایش مقاومت قلیایی الیاف PET عملکرد بهتری نسبت به PP (۰/۸۶) و PVA (۰/۵۶) داشت و توانست ۹۹٪ مقاومت کششی اولیه خود را حفظ کند. بتن تقویت‌شده با الیاف PET در نسبت‌های مختلف آب به سیمان و درصد‌های حجمی فیبر (۰٪، ۰/۱۵٪، ۰/۱٪، ۰/۱۵٪) آزمایش شد. این بتن مقاومت خمشی بین ۴ تا ۵ مگاپاسکال داشت، اما با افزایش مقدار، چقرمگی و انرژی جذب‌شده به‌طور چشمگیری افزایش یافت. الیاف PET تأثیر زیادی بر مقاومت فشاری، مدول یانگ و نسبت پواسون نداشتند، اما مقاومت چسبندگی آن‌ها (۲/۸ مگاپاسکال) مشابه PP (۲/۹ مگاپاسکال) بود. به دلیل مقاومت قلیایی بالا و چسبندگی مطلوب، این الیاف می‌توانند در شرایط سخت محیطی کاربرد داشته و از لحاظ اقتصادی با الیاف فولادی قابل‌رقابت باشند، که نشان‌دهنده پتانسیل استفاده بیشتر در ساخت‌وساز است. [۴۷]

جدول ۲ - نتایج آزمایش مقاومت قلیایی

| الیاف | قطر (میلی‌متر) | طول (میلی‌متر) | استحکام کششی (مگاپاسکال)             |                                      | نسبت قدرت % |
|-------|----------------|----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------|
|       |                |                | قبل از قرار گرفتن در معرض (۱۲۰ ساعت) | بعد از قرار گرفتن در معرض (۱۲۰ ساعت) |             |
| PET   | ۰.۷۵           | ۳۰             | ۳۵۲                                  | ۳۴۸                                  | ۹۹          |
| PP    | ۱.۲۱           | ۳۰             | ۱۷۰                                  | ۱۴۷                                  | ۸۶          |
| PVA   | ۰.۷۱           | ۳۰             | ۳۶۰                                  | ۲۰۲                                  | ۵۶          |



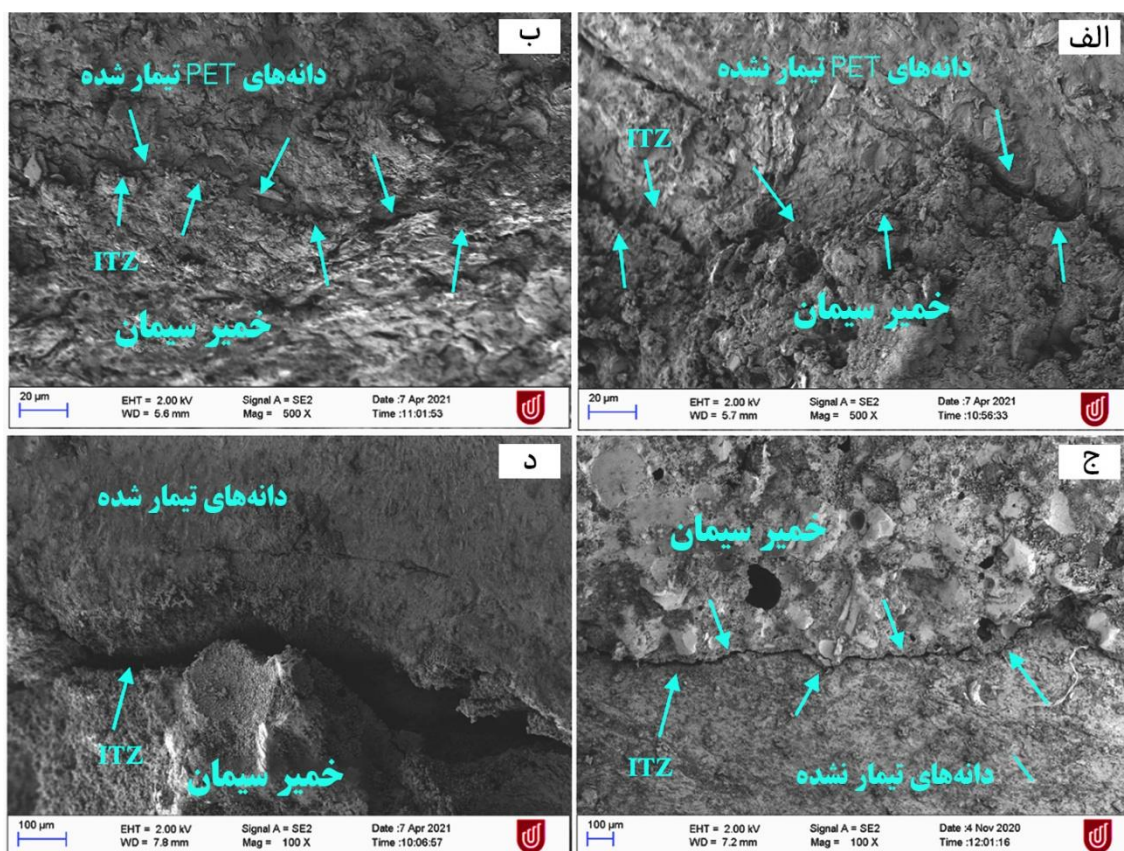
الف - دستگاه اکسترودژن رشته‌ها



ب - دستگاه برای علامت گذاری و برش تورفتگی فیبر



صرف فرآیندهای از دست رفتن انرژی شده به گرما تبدیل می‌شود، در حالی که تنها مقداری در واکنش‌های شیمی سطحی مصرف می‌شود. [۵۶]



شکل ۷: تصاویر SEM از ITZ گرفته شده برای ترکیب‌های تابش شده و تابش نشده: (الف) مخلوط PET تابش نشده، (ب) مخلوط PET تابش شده، (ج) مخلوط انواع پلاستیک مخلوط تابش نشده و (د) مخلوط انواع پلاستیک مخلوط تابش شده. [۴۹]

### ۱-۴-۳- تقسیم‌بندی پلاسما

#### ۱-۴-۳- پلاسما بر اساس تقسیم‌بندی دمایی

پلاسماها به طور کلی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: پلاسماهای دمایی بالا (یا پلاسماهای همجوشی) و پلاسماهای دمایی پایین (یا تخلیه‌های گازی). در پلاسماهای دمایی بالا، تمامی گونه‌ها (الکترون‌ها، یون‌ها و ذرات خنثی) در حالت تعادل حرارتی قرار دارند. پلاسماهای دمایی پایین به دو زیرمجموعه تقسیم می‌شوند: پلاسماهای حرارتی که به عنوان پلاسماهای شبه تعادلی نیز شناخته می‌شوند و در حالت تعادل حرارتی محلی<sup>10</sup> (LTE) قرار دارند و پلاسماهای غیرحرارتی که به عنوان پلاسماهای غیرتعادلی یا پلاسماهای سرد نیز شناخته می‌شوند<sup>11</sup> (NTP). [۵۶]

#### ۱-۴-۳-۱- پلاسماهای حرارتی<sup>۱۲</sup>

پلاسماهای حرارتی (پلاسماهای با دمایی بالا) به دلیل چگالی انرژی بالا و سرعت پردازش سریع، برای تغییر سطح الیاف پلاستیکی استفاده می‌شوند. در این نوع پلاسما، دمایی گاز و الکترون بالاست و مولکول‌های گاز به‌طور کامل یا تقریباً کامل یونیزه می‌شوند. [۵۷] این فرایند از دماهای بالا برای ذوب یا تبخیر جزئی لایه سطحی الیاف بهره می‌برد و ساختارهای سطحی جدیدی ایجاد

<sup>10</sup> local thermal equilibrium  
<sup>11</sup> non thermal plasma  
<sup>12</sup> Thermal Plasma

می‌کند که می‌تواند پیوند با ماتریس سیمانی را بهبود بخشد. با این حال، دمای بالا ممکن است منجر به کاهش خواص مکانیکی برخی از پلاستیک‌ها شود. این فرآیند به دلیل ماهیت حرارتی خود، با تمام ذرات هدف واکنش نشان داده و به صورت غیرانتخابی عمل می‌کند، که می‌تواند به واکنش‌های ناخواسته منجر شود. [۵۸]

### ۲-۱-۴-۳- پلاسماهای غیر حرارتی (سرد)<sup>۱۳</sup>

یک ویژگی مهم پلاسماهای غیر حرارتی این است که دمای الکترون بسیار بالاتر از دمای یون‌ها و خنثی‌ها است و در واقع در برخی موارد می‌تواند حتی از دمای الکترون در پلاسماهای حرارتی نیز بالاتر باشد. [۵۹] این ویژگی در پلاسماهای غیر حرارتی، گزینش پذیری آن به دلیل دمای بالای الکترونی آن است. [۶۰] این بدان معنی است که مسیرهای واکنش مورد نظر برای یک فرآیند معین را می‌توان به راحتی با استفاده از این نوع پلاسما طراحی کرد. از آنجایی که دمای گاز پایین است، پلاسماهای غیر حرارتی معمولاً بر خواص توده ای جامدات یا مایعات تأثیر نمی‌گذارند، بلکه فقط با سطوح آنها تعامل دارند. [۶۰-۶۳] بنابراین، پلاسماهای غیر حرارتی ترجیحاً روی سطح [۶۴، ۶۵] یا پردازش گاز [۶۶] اعمال می‌شوند. این فرآیند در دماهای پایین عمل می‌کند که برای پردازش مواد حساس به دما مانند پلاستیک ایده آل است. پلاسماهای سرد گروه‌های عاملی (مانند هیدروکسیل، کربوکسیل) را معرفی می‌کند که انرژی سطح و ترشوندگی را افزایش می‌دهند و منجر به پیوند بهتر با ماتریس سیمان می‌شوند. [۶۷]

### ۲-۱-۴-۳- پلاسما بر اساس تقسیم بندی فشار

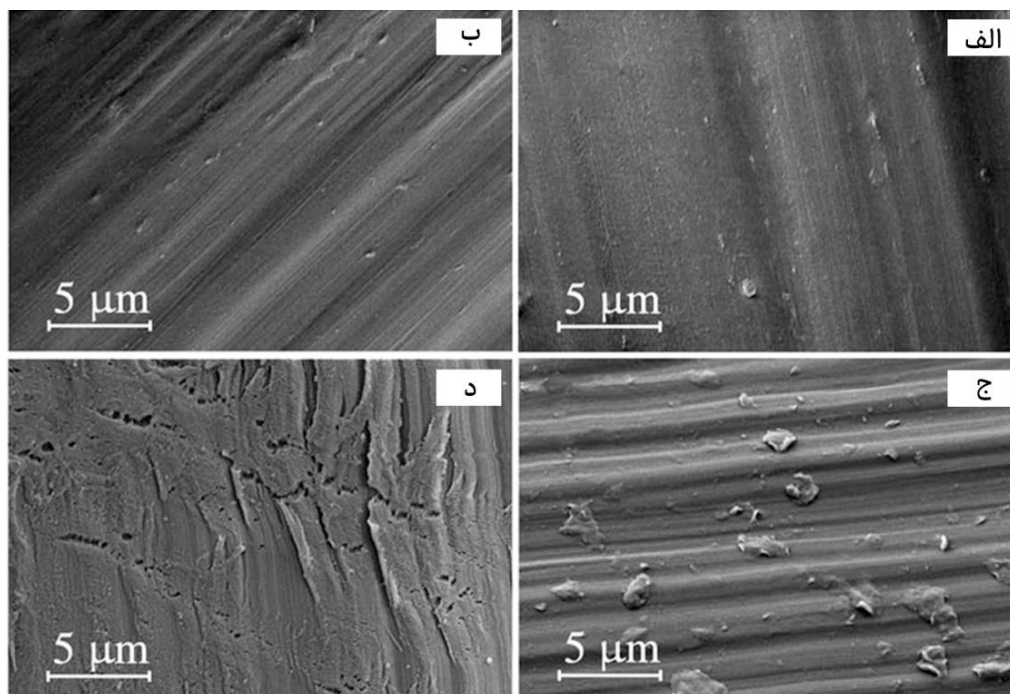
پلاسماها بسته به فشار عملیاتی به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند که هر کدام کاربردها و ویژگی‌های خاص خود را دارند. پلاسماهای فشار اتمسفر<sup>۱۴</sup> در فشار جو عمل می‌کند و به دلیل حذف نیاز به محیط‌های خلاء، برای کاربردهای صنعتی مقرون به صرفه‌تر و مقیاس پذیرتر است. این نوع پلاسما به ویژه در اصلاح شیمی سطح الیاف پلاستیکی کاربرد دارد. [۵۱] پلاسماهای کم فشار<sup>۱۵</sup> در محیط‌هایی با فشار پایین‌تر از فشار جو، مانند خلاء، تولید می‌شود و در صنایعی همچون تولید نیمه‌رساناها و پوشش‌دهی مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد. از انواع پلاسماهای کم فشار می‌توان به پلاسماهای تخلیه‌ی نورانی و پلاسماهای فرکانس رادیویی اشاره کرد [۶۸، ۶۹] در مقابل، پلاسماهای پرفشار<sup>۱۶</sup> در فشارهای نزدیک به فشار جو یا بالاتر تولید می‌شود و در کاربردهای صنعتی سنگین مانند جوشکاری و برش پلاسما استفاده می‌شود. این نوع پلاسما می‌تواند به دو شکل حرارتی (مانند پلاسما قوسی) یا غیر حرارتی (مانند تخلیه کرونا) باشد [۶۹، ۷۰]

### ۲-۱-۴-۳- اصلاح سطح با پلاسما سرد اکسیژن و افزودن RCP

در مطالعه هلزوک و همکاران تأثیر تیمار پلاسما و افزودن پودر بتن بازیافتی<sup>۱۷</sup> (RCP) بر خواص ماتریس سیمانی را بررسی کرد. دو نوع ماکروفیبر پلیمری پلی پروپیلن (PP) و پلی پروپیلن-پلی اتیلن پیچ خورده (PE+PP)، که از نظر شکل و خواص مکانیکی متفاوت بودند، برای تقویت بتن استفاده شدند. تیمار این الیاف با پلاسماهای اکسیژن با فشار کم انجام شد که با کاهش انرژی سطحی و ایجاد فرورفتگی‌های میکروسکوپی [۵۲]، آبدوستی سطوح را افزایش داد. در شکل ۸ نشان‌دهنده سطوح مختلف الیاف تحت بزرگنمایی 12k است. در شکل ۸-الف نشان‌دهنده یک فیبر پیچ خورده تیمار نشده، شکل ۸-ب یک فیبر پیچ خورده تیمار شده، شکل ۸-ج یک فیبر صاف تیمار نشده و شکل ۸-د یک فیبر صاف تیمار شده است. این تغییرات بهبود تعامل الیاف با ماتریس سیمانی و کاربرد بهتر آن‌ها در بتن را ممکن ساخت. [۷۱-۷۳] در این مطالعه برای ایجاد پلاسما سرد از یک دستگاه تسلا VT 214 (۵۰ sccm جریان اکسیژن، ۵۶ Pa گاز ۱۰۰ فشار) استفاده شد. شرایط ایجاد پلاسما برای یک تیمار بهینه الیاف پلیمری ماکروسکوپی بر اساس تحقیقات قبلی، یک منبع تغذیه ۱۰۰ وات برای ۳۰ ثانیه استفاده شد. [۷۴] این مطالعه تأثیر پیکربندی‌های مختلف الیاف و روش‌های بهبود پیوند آن‌ها با ماتریس، مانند تیمار پلاسما و افزودن RCP، بر خواص مکانیکی مواد مرکب را بررسی کرد. نتایج نشان داد که تیمار پلاسما باعث افزایش زبری سطح الیاف، کاهش آب‌گریزی و بهبود پیوند شیمیایی و مکانیکی با ماتریس شد که موجب افزایش استحکام پس‌ازبیشینه تا ۵۶ درصد گردید. افزودن RCP به

Non-Thermal (Cold) Plasma<sup>۱۳</sup>  
Atmospheric Pressure Plasma<sup>۱۴</sup>  
Low-pressure plasma<sup>۱۵</sup>  
High-pressure plasma<sup>۱۶</sup>  
RCP = recycled concrete powder<sup>۱۷</sup>

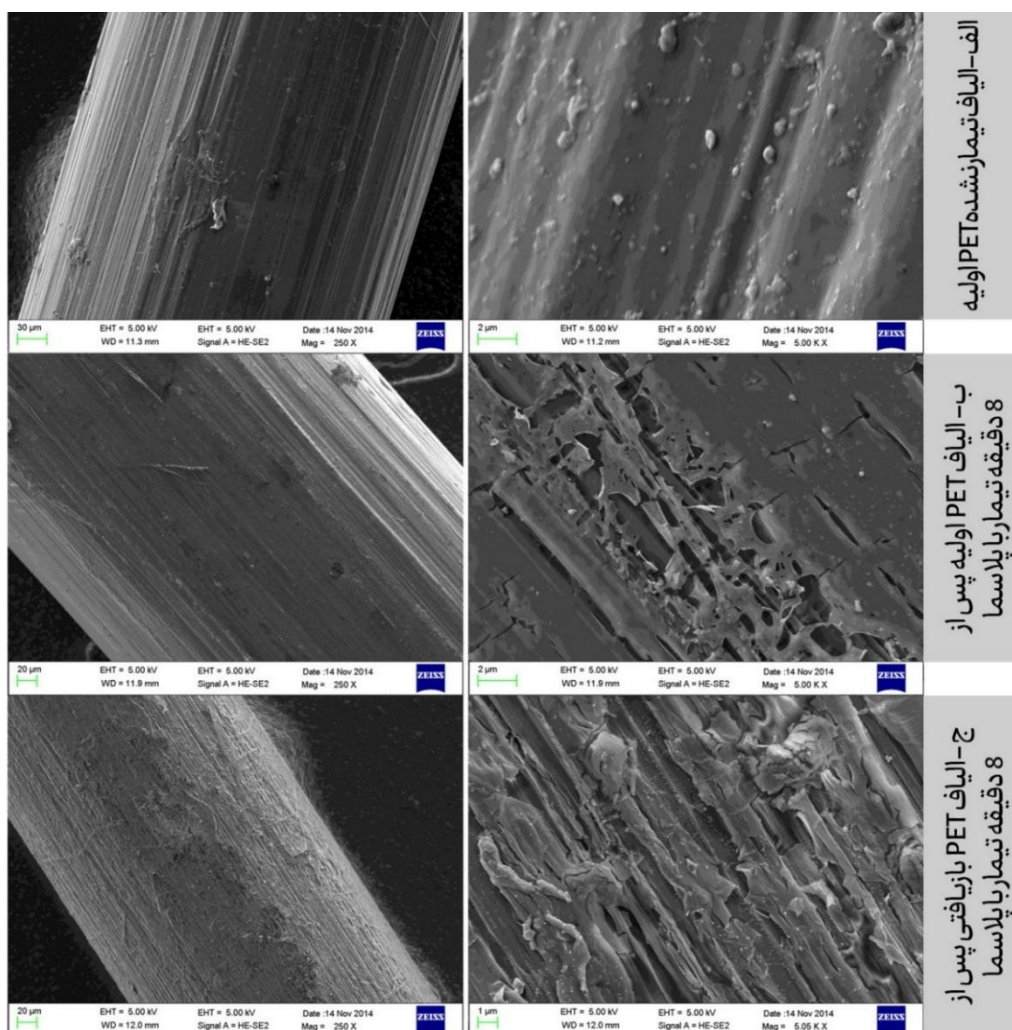
الیاف تخت موجب افزایش استحکام کششی شد، ولی در الیاف گرد بدون تیمار تأثیر کمتری داشت و در برخی موارد استحکام ماتریس را کاهش داد. این مطالعه نتیجه گرفت که تیمار پلاسما، با وجود محدودیت سرعت، به دلیل هزینه پایین و اثربخشی در بهبود پیوند الیاف-ماتریس، پتانسیل بالایی برای تقویت مواد مرکب دارد و با بهینه‌سازی و ترکیب با RCPI، می‌تواند به کاربردهای گسترده‌تر دست یابد. [۷۵]



شکل ۸: سطح الیاف با بزرگنمایی ۱۲k: (الف) یک فیبر پیچ خورده تیمار نشده، (ب) یک فیبر پیچ خورده تیمار شده، (ج) یک فیبر صاف تیمار نشده (د) یک فیبر صاف تیمار شده. [۷۵]

### ۳-۴-۳- اصلاح سطح با پلاسمای سرد اکسیژن

در مطالعه‌ی انجام شده توسط ترجبال و همکاران به منظور آبدوست کردن الیاف PET و افزایش چسبندگی به ماتریکس سیمانی تحت پلاسمای سرد با اکسیژن در یک محفظه خلاء متوجه کارآمدی پلاسمای استفاده شده در کاهش انرژی سطحی سطحی پلیمرها شدند. [۷۱، ۷۳] برای تثبیت رادیکال‌های آزاد تشکیل شده در سطح تحت تیمار، باید از اکسیژن یا گازهای نجیب در طول تیمار پلاسما استفاده شود. مناسب‌ترین مدت تیمار ایجاد شده ۸ دقیقه بود و این قرار گرفتن در معرض سطح بالایی از زبری سطح بدون ذوب، سوزاندن و تاب برداشتن الیاف PET را تضمین می‌کرد که تصاویر SEM از الیاف اولیه تیمار نشده در شکل ۹-الف، الیاف اولیه پس از ۸ دقیقه تیمار پلاسما در شکل ۹-ب و الیاف باز یافتی پس از ۸ دقیقه تیمار پلاسما در شکل ۹-ج را نشان می‌دهد. از این فرآیند در فشار گاز پایین برابر با ۱۱۰ Pa، با منبع تغذیه ۱۰۰ وات، در فرکانس ۴۰ هرتز و با منبع گاز برابر با ۱۶/۹ sccm انجام شد. در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (نمونه‌های ۴۰ × ۴۰ × ۸۰ میلی‌متر، نرخ بارگذاری ۰/۳ میلی‌متر در دقیقه)، الیاف PET باز یافتی تیمار شده با پلاسما تأثیر اندکی بر مقاومت فشاری داشتند، اما الیاف اولیه اصلاح شده با پلاسما مقاومت فشاری را تا ۳۶٪ افزایش دادند. استفاده از الیاف با قطر بزرگ‌تر برای بهبود بیشتر پیشنهاد شده است. در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای (نمونه‌های ۴۰ × ۴۰ × ۱۶۰ میلی‌متر)، نمونه‌های تقویت شده با الیاف رفتار انعطاف پذیرتری نسبت به نمونه‌های مرجع نشان دادند و پس از حد الاستیک توانستند بارگذاری را تحمل کنند. [۵۲]



شکل ۹: تصاویر SEM از الیاف PET اولیه و باز یافتی با تیمار پلاسما [۵۲]

#### ۴-۳- اصلاح سطح با پلاسمای آرگون

پژوهش چانگ و همکاران استفاده از پلاسمای آرگون در دمای محیط را برای اصلاح سطح پلی اتیلن ترفتالات (PET) بررسی کرد. این فرآیند موجب افزایش هیدروفیلیسیته سطح PET شد و شرایط مناسبی برای پیوند اکریلیک اسید روی این پلیمر فراهم آورد. بهینه ترین شرایط اصلاح سطح در توان ۸۰۰ وات و زمان ۱۰ ثانیه حاصل شد که بهبود قابل توجهی در ویژگی های سطحی PET ایجاد کرد. پس از اصلاح، گرافتینگ اکریلیک اسید روی PET، آن را به یون مبادلی مناسب برای جذب فلزات سنگین تبدیل کرد. این اصلاحات نه تنها خواص شیمیایی PET را بهبود داد، بلکه امکان استفاده از این مواد را در تصفیه آب و پساب های صنعتی فراهم نمود. علاوه بر این، مطالعات پیشین نشان داده اند که PET باز یافتی می تواند به عنوان تقویت کننده مکانیکی در بتن نیز به کار رود، که کاربرد دوگانه آن را در حوزه های ساخت و ساز و محیط زیست برجسته می کند. [۷۶] به عنوان مثال، بیاسی و زنگ [۷۷] و پیرا دی اولیویرا و کاسترو-گومز [۷۸] نشان داده اند که بتن های تقویت شده با الیاف پلاستیکی باز یافتی عملکرد مکانیکی مطلوبی دارند. اصلاح الیاف PET با پلاسما، با افزایش هیدروفیلیسیته و بهبود چسبندگی میان الیاف و ماتریس سیمانی، امکان استفاده از این الیاف را در بتن های تقویت شده فراهم می کند. این رویکرد نه تنها موجب بهبود خواص مکانیکی بتن می شود، بلکه به کاهش ضایعات پلاستیکی و ارتقاء پایداری در ساخت و ساز کمک می کند. پلاستیک های باز یافتی اصلاح شده با پلاسما، به عنوان گزینه ای پایدار و اقتصادی، می توانند به ویژه در مناطق شهری با محدودیت منابع زمین، در ساخت و ساز مورد استفاده قرار گیرند. [۷۶]

## ۵-۴-۳- اصلاح سطح با پلاسما کم فشار بر الیاف PET و شیشه‌ای

مطالعه‌ای توسط ترجیال و همکاران تأثیر تیمار پلاسما با فشار کم بر خواص سطحی و مکانیکی الیاف PET و الیاف شیشه‌ای را بررسی کرد. هدف پژوهش بهبود ترشوندگی و چسبندگی این الیاف به ماتریس‌های سیمانی و آهکی بود. نتایج نشان داد که تیمار پلاسما زاویه تماس الیاف PET را از ۶۶/۵ درجه به ۲۴ درجه و الیاف شیشه‌ای را از ۷۸/۹ درجه به ۵۷/۹ درجه کاهش داد. تصاویر SEM تغییرات سطحی قابل توجهی در الیاف PET نشان داد، در حالی که تغییرات در الیاف شیشه‌ای کمتر بود. آزمایش‌های خمشی نشان داد که تیمار پلاسما رفتار خمشی الیاف PET را بهبود داده، اما آسیب‌های سطحی ناشی از پلاسما باعث کاهش ظرفیت باربری نهایی شد. در الیاف شیشه‌ای، کاهش استحکام خمشی کمتر بود. این تحقیق تأکید کرد که تیمار پلاسما می‌تواند چسبندگی الیاف به ماتریس را بهبود بخشد، اما آسیب‌های سطحی الیاف PET ممکن است استحکام نهایی را کاهش دهد. در نتیجه، باید تعادلی بین بهبود چسبندگی و جلوگیری از آسیب‌های سطحی در استفاده از الیاف پلاسما شده در بتن حفظ شود. [۷۹]

جدول ۴ - جزئیات پلاستیک استفاده شده در طرح اختلاطها و روش اصلاح سطح هر کدام

| شماره | نوع استفاده از پلاستیک      | روش اصلاح سطح  | مقاله |
|-------|-----------------------------|--|-------|
| ۱     | الیاف پولی‌ولفینی           | آسیب‌های مکانیکی و تماس با ذرات سخت سنگدانه‌ها در طول فرآیند اختلاط  | [31]  |
| ۲     | سنگدانه پلاستیکی            | مکانیکی با سنگدانه‌های تیز گوشه  | [37]  |
| ۳     | سنگدانه پلاستیکی            | حرارتی با امواج مایکروویو (۱۱۰۰ وات و ۲۴۵۰ مگاهرتز)  | [49]  |
| ۴     | الیاف پلاستیکی              | شیمیایی با ۵٪ وزنی پلی‌استایرن (PS) و ۵٪ رزین PKHH-فنوکسی  | [38]  |
| ۵     | الیاف پلاستیکی              | شیمیایی با غوطه‌وری در محلول قلبایی (۱۰ گرم هیدروکسید سدیم در ۱ دسی‌متر مکعب آب مقطر و دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲۰ ساعت)  | [47]  |
| ۶     | الیاف پلاستیکی              | شیمیایی با پلاسما  | [27]  |
| ۷     | الیاف پلاستیکی              | ماشین لرنینگ و بررسی ابعاد اندازه در سایر تحقیقات و بهینه سازی   | [12]  |
| ۸     | سنگدانه پلاستیکی فرآوری شده | شیمیایی با سدیم هیدروکسید و هیپو کلریت سدیم  | [18]  |
| ۹     | سنگدانه و تکه‌های پلاستیکی  | پرتو دهی گامای کبالت-۶۰ از نوع خودکار  | [50]  |
| ۱۰    | الیاف پلاستیکی              | فیزیکوشیمیایی با پلاسما آرگون در دمای محیط   | [76]  |
| ۱۱    | الیاف پلاستیکی              | فیزیکوشیمیایی با پلاسما سرد با اکسیژن در یک محفظه خلاء به مدت زمان ۸ دقیقه / فشار گاز ۱۰۱۰ (mbar) / دبی گاز ۱۶/۹ (sccm) / منبع تغذیه ۱۰۰ (W) / فرکانس ۴۰ (kHz)         | [80]  |
| ۱۲    | الیاف پلاستیکی              | فیزیکوشیمیایی با پلاسما به مدت زمان (ثانیه) ۳۰ / فشار گاز ۵۶ (Pa) / دبی گاز ۵۰ (sccm) / منبع تغذیه ۱۰۰ (W)   | [75]  |
| ۱۳    | الیاف پلاستیکی              | فیزیکوشیمیایی با پلاسما به مدت زمان (دقیقه) ۱۶ / فشار گاز ۱۱۰ (Pa) / دبی گاز ۱۶/۹ (sccm) / منبع تغذیه ۱۰۰ (W) / فرکانس ۴۰ (Hz)   | [52]  |
| ۱۴    | الیاف پلاستیکی              | فیزیکوشیمیایی با پلاسما به مدت زمان (ثانیه) ۵ تا ۴۸۰ / فشار گاز ۲۰ (Pa) / دبی گاز ۵۰ (sccm) / منبع تغذیه ۱۰۰ (W) / فرکانس ۱۳.۵۶ (MHz)                                  | [81]  |
| ۱۵    | الیاف پلاستیکی              | فیزیکوشیمیایی با پلاسما به مدت زمان ۸ دقیقه / فشار گاز ۱۱۰ (Pa) / دبی گاز اکسیژن ۱۷ (sccm) / منبع تغذیه ۱۰۰ (W)  | [79]  |
| ۱۶    | الیاف پلاستیکی              | الیاف با فواصل ۵ سانتی‌متری و چهار زمان مختلف (۰، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ ثانیه) در معرض جت پلاسما قرار گرفتند - ولتاژ: ۱۰/۸ کیلوولت - فرکانس: ۲۷/۴ کیلوهرتز - توان: ۱۵ تا ۲۰ وات. | [82]  |

## ۴- چالش‌ها موجود در اصلاح سطح پلاستیک‌های باز یافتی

در مطالعات بررسی شده، فرآیند تولید پلاسما با چالش‌هایی مانند نیاز به تجهیزات پیشرفته، محیط‌های کنترلی خاص، زمان‌بندی دقیق و استفاده از گازهای پرهزینه روبه‌رو است که می‌تواند هزینه‌های تولید را افزایش داده و برای کاربردهای صنعتی گسترده محدودکننده باشد. علاوه بر این، تیمار پلاسما یا ماکروویو ممکن است باعث آسیب به سطح الیاف و ایجاد زبری بیش از حد شود که می‌تواند استحکام مکانیکی و خمشی بتن را کاهش دهد. استفاده مکرر از مواد شیمیایی یا مقادیر زیاد آن‌ها نیز می‌تواند منجر به خوردگی

سطح الیاف شود که مقاومت مکانیکی الیاف و بتن را کاهش می‌دهد. همچنین، برخی از الیاف پلاستیکی اصلاح شده با پلازما ممکن است در مواجهه با محیط‌های قلیایی مقاومت خود را از دست بدهند، که این مسئله در محیط بتن به ویژه چالش برانگیز است.

## ۵- نتیجه گیری

این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که فناوری پلازما ابزار ایمن تر و مقرون به صرفه تر برای استفاده در اصلاح سطوح زباله‌های پلاستیکی است، اگرچه مسائل طول عمر آن باید در نظر گرفته شود. به طور کلی، تیمار با پلازما مقدار قابل توجهی تغییر در الیاف و تکه‌های پلاستیکی ایجاد می‌کند که ناشی از سطوح پردازش شده است و سبب فعال شدن مولکول‌های قطبی، ایجاد زبری و در نهایت آبدوستی بر روی سطح آن می‌شود و باعث ایجاد پتانسیل‌های متفاوت در یک ترکیب سیمانی می‌شود. کار بیشتر برای درک اینکه چگونه عملیات پلازما باعث تغییر الیاف پلیمری شده و چگونه ممکن است بر پیوند ترکیب سیمانی به پلاستیکی تأثیر بگذارد، ضروری است. سایر نتایج این تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

۱. در صنعت پلاستیک و پلیمر، روش‌های اصلاح سطح برای بهبود ویژگی‌هایی نظیر چسبندگی، آب‌گریزی و مقاومت در برابر سایش بسیار ضروری است. یکی از مزایای کلیدی روش پلازما فشار اتمسفری، حذف نیاز به محیط‌های قلیایی یا اسیدی است که در روش‌های مرسوم اصلاح سطح به‌ویژه با مواد شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مزیت علاوه بر کاهش هزینه‌های مرتبط با تهیه مواد شیمیایی، فرآیند را ساده‌تر کرده و مخاطرات زیست‌محیطی و ایمنی را کاهش می‌دهد. همچنین، استفاده از هوا به عنوان گاز اصلی در پلازما فشار اتمسفری، به جای گازهای نجیب مانند آرگون و هلیوم، هزینه‌ها را به شکل چشمگیری کاهش داده و فرآیند را از نظر اقتصادی به صرفه‌تر می‌سازد.
۲. در روش‌های سنتی فشار پایین، ایجاد و حفظ شرایط خلأ نیازمند تجهیزات پیچیده و پرهزینه‌ای است که نه تنها هزینه نصب و راه‌اندازی بالایی دارند، بلکه نگهداری و تأمین گازهای نجیب نیز هزینه‌بر و زمان‌بر است. پلازما فشار اتمسفری به دلیل عملکرد در فشار محیط و استفاده از هوا به جای گازهای نجیب، علاوه بر کاهش چشمگیر هزینه‌ها، از پیچیدگی فرآیند نیز می‌کاهد. این ویژگی‌ها این روش را به انتخابی مناسب برای کاربردهای صنعتی گسترده تبدیل کرده است.
۳. اصلاحات سطحی در اشکال مختلف الیاف، از طراحی زبری ماکروسکوپی تا اصلاحات میکروسکوپی از طریق تیمار پلازما، نقش مهمی در بهبود تعامل بین الیاف و ماتریس سیمانی دارند. این اصلاحات موجب ایجاد پیوند مکانیکی قوی‌تر و توزیع مناسب‌تر تنش‌ها می‌شوند که نه تنها مقاومت ساختار کامپوزیتی را افزایش می‌دهند، بلکه از جدایش زود هنگام الیاف نیز جلوگیری می‌کنند. به کارگیری زبری در دو مقیاس مختلف، باعث افزایش دوام و پایداری ساختار در شرایط محیطی دشوار می‌شود.
۴. مطالعات میکروسکوپ الکترونی SEM نشان داده‌اند که اصلاح سطح به‌طور قابل توجهی ناحیه انتقال بین سطحی را بهبود می‌بخشد. این بهبود، ناشی از کاهش تخلخل و افزایش پیوند بین فازهای مختلف است که توزیع مناسب‌تر تنش‌ها را ممکن می‌سازد. با این حال، ضعف‌هایی مانند وجود میکروتکرک‌ها و توزیع غیر یکنواخت تنش همچنان مشاهده می‌شود که برای رفع آن‌ها به ترکیب این روش با سایر تکنیک‌های تقویت‌کننده و بهینه‌سازی بیشتر نیاز است.
۵. استفاده از الیاف PET به جای سنگدانه در مخلوط‌های سیمانی، تأثیر بسزایی در تقویت ساختار و توزیع تنش‌ها در سه محور  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  دارد. این الیاف با نقش پل‌زنی در برابر ترک‌های احتمالی و ایجاد پیوندهای چندجهتی، مانع از تمرکز تنش در نقاط آسیب‌پذیر می‌شوند. نتیجه این تغییر، افزایش دوام، پایداری و مقاومت ساختار در برابر شکست و گسترش ترک‌ها است.

## مراجع

- [۱] Rodseth, C., P. Notten, and H. Von Blottnitz. (2020). "A revised approach for estimating informally disposed domestic waste in rural versus urban South Africa and implications for waste management." *South African Journal of Science*, 116 (1-2), 1-6.
- [۲] Kaza, S., et al. (2018). "What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050." City published: World Bank Publications ,
- [۳] Awoyera, P.O. and A. Adesina. (2020). "Plastic wastes to construction products: Status, limitations and future perspective." *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00330.

- [۴] Al-Fakih, A., et al. (2020). "Bituminous mineral compositions for paving with cullet." *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00317.
- [۵] Siddique, R., J. Khatib, and I. Kaur. (2008). "Use of recycled plastic in concrete: A review." *Waste management*, 28 (10), 1835-1852.
- [۶] Radusin, T., et al. (2020). "Use of recycled materials as mid layer in three layered structures-new possibility in design for recycling." *Journal of Cleaner Production*, 259, 120876.
- [۷] Mohammadinia, A., et al. (2019). "Strength evaluation of utilizing recycled plastic waste and recycled crushed glass in concrete footpaths." *Construction and Building Materials*, 197, 489-496.
- [۸] Subramanian, P. (2000). "Plastics recycling and waste management in the US." *Resources, Conservation and Recycling*, 28 (3-4), 253-263.
- [۹] Silva, D.A.d., et al. (2005). "Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials." *Cement and concrete research*, 35 (9), 1741-1746
- [۱۰] Samimi, K., et al. (2022). "Investigation of two different water-dispersed graphene on the performance of graphene/cement paste: Surfactant and superplasticizer effect." *Construction and Building Materials*, 349, 128756.
- [۱۱] Samimi, K. and M. Pakan. (2023). "Study of mechanical properties and microstructure of cement paste containing graphene based on surfactant." *Journal of Structural and Construction Engineering*, 9 (12), 61-80.
- [۱۲] Rezvan, S., et al. (2023). "Application of machine learning to predict the mechanical characteristics of concrete containing recycled plastic-based materials." *Applied Sciences*, 13 (4), 2033.
- [۱۳] Babafemi, A.J., et al. (2018). "Engineering Properties of Concrete with Waste Recycled Plastic: A Review." *Sustainability*, 10 (11), 3875.
- [۱۴] Ojeda, J.P. and I.T. Mercante. (2023). "Sustainability of recycling plastic waste as fibers for concrete: A review." *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25 (5), 2753-2765.
- [۱۵] Yazdani, M., et al. (2021). "Improving construction and demolition waste collection service in an urban area using a simheuristic approach: A case study in Sydney, Australia." *Journal of Cleaner Production*, 280, 124138.
- [۱۶] Li, V.C. (2003). "On engineered cementitious composites (ECC) a review of the material and its applications." *Journal of advanced concrete technology*, 1 (3), 215-230.
- [۱۷] Goli, V.S.N.S., A. Mohammad, and D.N. Singh. (2020). "Application of municipal plastic waste as a manmade neo-construction material: issues & wayforward ". *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 105008.
- [۱۸] Thorneycroft, J., et al. (2018). "Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand." *Construction and Building Materials*, 161, 63-69.
- [۱۹] Sharma, R. and P.P. Bansal. (2016). "Use of different forms of waste plastic in concrete – a review." *Journal of cleaner production*, 112, 473-482.
- [۲۰] Chen, H., C.L. Chow, and D. Lau. (2022). "Developing green and sustainable concrete in integrating with different urban wastes." *Journal of Cleaner Production*, 368, 133057.
- [۲۱] Shalchy, F. and N. Rahbar. (2015). "Nanostructural characteristics and interfacial properties of polymer fibers in cement matrix." *ACS applied materials & interfaces*, 7 (31), 17278-17286.
- [۲۲] Samimi, K., M. Pakan, and J. Eslami. (2023). "Investigating the compressive strength and microstructural analysis of mortar containing synthesized graphene and natural pozzolan in the face of alkali-silica reactions." *Journal of Building Engineering*, 68, 106126.
- [۲۳] Samimi, K., S. Kamali-Bernard, and A.A. Maghsoudi. (2018). "Resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes: pumice and zeolite effect." *Int J Civ Environ Eng*, 12 (3), 250-259.
- [۲۴] Samimi, K., et al. (2022). "Influence of pumice and metakaolin on compressive strength and durability of concrete in acidic media and on chloride resistance under immersion and tidal conditions." *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46 (2), 1153-1175.
- [۲۵] Pedrosa, H.C., et al. (2020). "Hydration of Portland cement accelerated by CSH seeds at different temperatures." *Cement and Concrete Research*, 129, 105978.

- [۲۶] Li, X., T.-C. Ling, and K.H. Mo. (2020). "Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete—A review." *Construction and building materials*, 240, 117869.
- [۲۷] Foti, D. (2011). "Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers." *Construction and building materials*, 25 (4), 1906-1915.
- [۲۸] Fraternali, F., et al. (2013). "On the use of R-PET strips for the reinforcement of cement mortars." *Composites Part B: Engineering*, 46, 207-210.
- [۲۹] Pereira, E.L., A.L. de Oliveira Junior, and A.G. Fineza. (2017). "Optimization of mechanical properties in concrete reinforced with fibers from solid urban wastes (PET bottles) for the production of ecological concrete." *Construction and Building Materials*, 149, 837-848.
- [۳۰] Foti, D. (2019). *Recycled waste PET for sustainable fiber-reinforced concrete. Use of recycled plastics in eco-efficient concrete.* Elsevier. 387-410.
- [۳۱] Yan, L., R. Pendleton, and C. Jenkins. (1998). "Interface morphologies in polyolefin fiber reinforced concrete composites." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29 (5-6), 643-650.
- [۳۲] Dobias, D., P. Pokorny, and R. Pernicova. (2017). "Evaluation of resistance of intermetallic Fe-Zn coating in the model environment as concrete pore solution." *Procedia Engineering*, 172, 226-231.
- [۳۳] Sun, L., et al. (2024). "Investigating the Effect of Various Fibers on Plasticity and Compressive Strength of Concrete Samples." *Strength of Materials*, 56 (1), 200-208.
- [۳۴] Permanoon, A., et al. (2024). "Improving Mixed-Mode Fracture Properties of Concrete Reinforced with Macrosynthetic Plastic Fibers: An Experimental and Numerical Investigation." *Buildings*, 14 (8), 2543.
- [۳۵] Minde, P., et al. (2024). "Comprehensive review on the use of plastic waste in sustainable concrete construction." *Discover Materials*, 4 (1), 58.
- [۳۶] Saikia, N. and J.d. Brito. (2013). "Waste polyethylene terephthalate as an aggregate in concrete." *Materials Research*, 16, 341-350.
- [۳۷] Saikia, N. and J. De Brito. (2014). "Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate." *Construction and building materials*, 52, 236 - 244.
- [۳۸] El-Nadoury, W.W. (2022). "Chemically treated plastic replacing fine aggregate in structural concrete." *Frontiers in Materials*, 9, 948117.
- [۳۹] Naik, T.R., et al. (1996). "Use of post-consumer waste plastics in cement-based composites." *Cement and concrete research*, 26 (10), 1489-1492.
- [۴۰] Kaur, G. and S. Pavia. (2021). "Chemically treated plastic aggregates for eco-friendly cement mortars." *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23 (4), 1531-1543.
- [۴۱] Machovič, V., et al. (2013). "Microstructure of interfacial transition zone between pet fibres and cement paste." *Acta Geodyn. Geomater*, 10 (169), 121-127.
- [۴۲] Trejbal, J. (2018). "Mechanical properties of lime-based mortars reinforced with plasma treated glass fibers." *Construction and Building Materials*, 190, 929-938.
- [۴۳] Elsaka, S.E. (2013). "Influence of chemical surface treatments on adhesion of fiber posts to composite resin core materials." *Dental materials*, 29 (5), 550-558.
- [۴۴] Samimi, K. and M. Zareechian. (2022). "Chemical resistance of synthesized graphene-modified cement paste containing natural pozzolans to acid attack." *Journal of Building Engineering*, 60, 10.۵۱۷۴
- [۴۵] Rebeiz, K. (1995). "Time-temperature properties of polymer concrete using recycled PET." *Cement and Concrete Composites*, 17 (2), 119-124.
- [۴۶] Choi, Y.-W., et al. (2005). "Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete." *Cement and concrete research*, 35 (4), 776-781.
- [۴۷] Ochi, T., S. Okubo, and K. Fukui. (2007). "Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber." *Cement and Concrete Composites*, 29 (6), 448-455.
- [۴۸] Askar, M.K., Y.S. Al-Kamaki, and A. Hassan. (2023). "Utilizing polyethylene terephthalate PET in concrete: a review." *Polymers*, 15 (15), 3320.
- [۴۹] Abu-Saleem, M., et al. (2021). "Microwave radiation treatment to improve the strength of recycled plastic aggregate concrete." *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00728.
- [۵۰] Lee, H., et al. (2021). "State-of-the-art modification of plastic aggregates using gamma irradiation and its optimization for application to cementitious composites." *Applied Sciences*, 11 (21), 10340.

- [۵۱] Tang, W., et al. (2019). "Influence of Surface Treatment of Recycled Aggregates on Mechanical Properties and Bond Strength of Self-Compacting Concrete." *Sustainability*, 11 (15), 4182.
- [۵۲] Trejbal, J., et al. (2016). "Impact of surface plasma treatment on the performance of PET fiber reinforcement in cementitious composites." *Cement and Concrete Research*, 89, 276-287.
- [۵۳] Trejbal, J., et al. (2018). "Deterioration of bonding capacity of plasma-treated polymer fiber reinforcement." *Cement and Concrete Composites*, 89, 205-215.
- [۵۴] Wu, H.-C. and V.C. Li. (1999). "Fiber and cement interface tailoring with plasma treatment." *Cement and Concrete Composites*, 21 (3), 205-212.
- [۵۵] Samimi, K., G.R. Dehghan Kamaragi, and R. Le Roy. (2019). "Microstructure ,thermal analysis and chloride penetration of self-compacting concrete under different conditions." *Magazine of Concrete Research*, 71 (3), 126-143.
- [۵۶] Nehra, V., A. Kumar, and H. Dwivedi. (2008). "Atmospheric non-thermal plasma sources." *International Journal of Engineering*, 2 (1), 53-68.
- [۵۷] Kusano, R. and Y. Kusano. (2023). "Hybrid plasmas for materials processing." *Materials*, 16 (11), 4013.
- [۵۸] Kusano, R. and Y. Kusano. (2024). "Applications of Plasma Technologies in Recycling Processes." *Materials*, 17 (7), 1687.
- [۵۹] Lichtenberg, A. and M. Lieberman. (1995). "Department of Electrical Engineering and Computer Sciences." Office of Scientific and Technical Information, 247.
- [۶۰] Fridman, A. and L.A. Kennedy. (2004). "Plasma physics and engineering ". City published: CRC press ,
- [۶۱] Kusano, Y. (2019). "Atmospheric pressure plasmas for polymer surface modification: Alternating current gliding arcs and ultrasound enhanced plasmas." City published: DTU Wind Energy ,
- [۶۲] Kusano, Y. (2014). "Atmospheric pressure plasma processing for polymer adhesion: A review." *The Journal of Adhesion*, 90 (9), 755-777.
- [۶۳] Kogoma, M., A. Takeda, and Y. Kusano. (2011). "Generation And Applications Of Atmospheric Pressure Plasma." City published.
- [۶۴] Fang, C., Y. Kusano ,and A. Bardenshtein. (2022). "High-speed plasma treatment of polyethylene terephthalate films using ultrasound assisted dielectric barrier discharge." *Packaging Technology and Science*, 35 (9), 643-649.
- [۶۵] Cederløf, D.J.H., Y. Kusano, and S. Fæster. (2020). "Fluorination of sized glass fibres for decreased wetting by atmospheric pressure plasma treatment in He/CF<sub>4</sub>." *The Journal of Adhesion*, 96 (1-4), 2-12.
- [۶۶] Fateev, A., et al. (2005). "Plasma chemistry in an atmospheric pressure Ar/NH<sub>3</sub> dielectric barrier discharge." *Plasma Processes and Polymers*, 2 (3), 193-200.
- [۶۷] Lee, J.U. and J.-Y. Hong. (2021). "Comparison of Surface Modification Methods for Improving the Compatibility of Recycled Plastic Film-Based Aggregates." *Polymers*, 13 (22), 3956.
- [۶۸] Boulos, M.I., P.L. Fauchais, and E. Pfender. (2023). *The plasma state. Handbook of thermal plasmas.* Springer. 3-55.
- [۶۹] D'Angola, A., G. Colonna, and E. Kustova. (2022). Thermal and non-thermal plasmas at atmospheric pressure. *Frontiers Media SA*. 10, 852905.
- [۷۰] Rahman, Z., H. Rahman, and A. Rahman. (2014). "Classification and generation of atmospheric pressure plasma and its principle applications." *Int. J. Math. Phys. Sci. Res*, 2, 127-146.
- [۷۱] Mittal, K.L. (2004). "Polymer surface modification: relevance to adhesion." City published: CRC Press ,
- [۷۲] Mutlu, S., et al. (2008). "Preparation and characterization of ethylenediamine and cysteamine plasma polymerized films on piezoelectric quartz crystal surfaces for a biosensor." *Thin solid films*, 516 (6), 1249-1255.
- [۷۳] Öktem, T., et al. (2000). "Modification of polyester and polyamide fabrics by different in situ plasma polymerization methods." *Turkish journal of chemistry*, 24 (3), 275-286.
- [۷۴] Trejbal, J., et al. (2018). Interaction assessment between fiber reinforcement and cement matrix containing finely ground recycled concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing.
- [۷۵] Hlůžek, R., et al. (2022). "Improvement of bonding between synthetic fibers and a cementitious matrix using recycled concrete powder and plasma treatment: from a single fiber to FRC." *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26 (9), 3880-3897.

- [۷۶] Chang JuuEn, C.J., et al. (2013). "Heavy metal removal by ambient-temperature argon plasma modified polyethylene terephthalate (PET) fibers with surface acrylic acid grafting".
- [۷۷] Bayasi, Z. and J. Zeng. (1993). "Properties of polypropylene fiber reinforced concrete." *Materials Journal*, 90 (6), 605-610.
- [۷۸] de Oliveira, L.A.P. and J.P. Castro-Gomes. (2011). "Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar." *Construction and Building Materials*, 25 (4), 1712-1717.
- [۷۹] Trejbal, J., et al. (2015). Wettability enhancement of polymeric and glass micro fiber reinforcement by plasma treatment. *Nanocon 2015 7th international conference on nanomaterials—research and application—conference proceedings*.
- [۸۰] Trejbal, J., et al. (2016). "Influence of Oxygen Plasma Surface Treatment of PET Micro Fibers on Flexural Strength of Reinforced Cement Pastes." *Applied Mechanics and Materials*, 825, 73-76.
- [۸۱] Hlůžek, R., et al. (2017). "Plasma treatment impact on physical and chemical properties of polymeric fibers." *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 13, 49-54.
- [۸۲] Thibodeaux ,N., et al. (2021). "Effect of cold plasma treatment of polymer fibers on the mechanical behavior of fiber-reinforced cementitious composites." *Fibers*, 9 (10), 62.

