

## بررسی پارامترهای مقاومتی و زیست محیطی ملات سیمانی حاوی پسماند رنگ

سحر محمدی ، مصطفی زمانیان

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته ژئوتکنیک دانشگاه شهیدبهشتی، پردیس فنی مهندسی شهید عباسپور

۲- استادیار گروه ژئوتکنیک دانشگاه شهیدبهشتی، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور

Saharr.95mhm@gmail.com

### چکیده

امروزه با افزایش فعالیت انسانی آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از دفن زباله‌های صنعتی به شدت در حال افزایش است. حضور مواد زائد خطرناک و فلزات سنگین ناشی از زباله‌های صنعتی در خاک سبب بروز مشکلات بسیاری مانند آلوده‌سازی خاک و غیر قابل استفاده شدن آن شده‌است. در طی فرآیند خودروسازی پسماندهای مختلفی تولید می‌شود. یکی از مهم‌ترین منابع تولید پسماندهای خطرناک در کارخانه خودروسازی، فرآیند رنگ‌آمیزی خودرو می‌باشد. ترکیبات خطرناک موجود در پسماند رنگ مانند فلزات سنگین، مواد آلی و رزین‌ها، یک موضوع نگران‌کننده برای کارخانه‌های خودروسازی در جوامع پیشرفته می‌باشد. لذا در این پژوهش امکان‌سنجی استفاده از پسماند رنگ در ساخت ملات‌های سیمانی به‌منظور تثبیت زائادات خطرناک در آن مورد بررسی قرار گرفته‌است. بر این اساس ابتدا نمونه‌برداری و آنالیزهای آزمایشگاهی در خصوص شناسایی پسماند رنگ انجام شده‌است. سپس پسماند رنگ در درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی ماسه به ملات سیمانی ساخته شده اضافه گردید و بر روی نمونه‌های عمل‌آوری شده در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز آزمایش‌هایی همچون مقاومت فشاری محصورنشده، طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) و پراش اشعه ایکس (XRD) انجام گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش میزان پسماند رنگ در ملات سبب کاهش مقاومت فشاری آن شده‌است، بااینحال ملات سیمانی همراه با پسماند رنگ دارای ترکیبات جدید پوزولانی مانند  $CaO$  و  $TiO_2$  بوده و در تولید ملات‌های غیرسازه‌ای نظیر بلوک‌ها و جداول مناسب می‌باشد. همچنین بررسی‌ها نشان داد که استفاده از پسماند رنگ در ملات سیمانی از انتشار آلاینده‌های فلزات سنگین موجود در پسماند رنگ جلوگیری کرده‌است. مناسبترین مقدار پسماند ۲۰ درصد وزنی ماسه بدست آمد که نمونه حاوی ۲۰ درصد پسماند رنگ هم از لحاظ زیست‌محیطی و هم از لحاظ مقاومتی جهت ساخت ملات غیرسازه‌ای مناسب می‌باشد. درنهایت نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های شیمیایی نشان داد که فلزات سنگین و مواد آلی خطرناک موجود در پسماند رنگ به دلیل شرکت در واکنش‌های هیدراتاسیون به‌مقدار مطلوبی تثبیت شده‌اند. لذا می‌توان از این ملات به عنوان ماده دوست‌دار محیط‌زیست استفاده کرد و آن را در دسته مواد غیرخطرناک قرار داد.

کلمات کلیدی: ملات سیمانی، پسماند رنگ، مقاومت فشاری، طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس، پراش اشعه ایکس، جفت‌شده پلاسمای القایی.

## مقدمه

امروزه آلودگی محیط‌زیست یکی از بزرگ‌ترین مشکلاتی است که بشر با آن روبه‌رو شده‌است. آلاینده‌های زیست‌محیطی شامل فلزات سنگین هستند که اثرات زیان‌آوری بر روی سلامت تمامی موجودات می‌گذارند. پسماندهای صنعتی دارای آلاینده‌های زیست‌محیطی فراوان و به‌ویژه فلزات سنگین می‌باشند. با توجه به افزایش نرخ رشد صنعتی شدن در بیشتر کشورها، تولید پسماندهای صنعتی در حال افزایش است و به تبع آن نیاز به دفن و تثبیت آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. حضور مواد زائد خطرناک ناشی از زباله‌های صنعتی در خاک، سبب بروز مشکلات فراوانی از جمله آلوده‌شدن خاک و آثار زیست‌محیطی مرتبط با آن می‌شود. این آلودگی‌ها علاوه بر اثرات مخرب زیست‌محیطی مانند نفوذ در آب‌های زیرزمینی، منجر به تغییر در پارامترهای مقاومتی و رفتاری خاک نیز می‌شوند که از دیدگاه مهندسی ژئوتکنیک بسیار حائز اهمیت است [۱]. یکی از این پسماندهای صنعتی، پسماند رنگ کارخانه‌های خودروسازی می‌باشد. آمار نشان می‌دهد تولید خودرو در سرتاسر جهان از ۵۶ میلیون دستگاه در سال ۱۹۹۹ به ۹۶ میلیون دستگاه در سال ۲۰۱۹ رسیده است [۴]. ایران نیز از این امر مستثنا نبوده و روند رو به رشدی را در سال‌های اخیر از خود نشان داده است [۵]. زائدات رنگ تولیدشده از کارخانه‌های خودروسازی همچون بقیه زائدات تولیدشده در فرایندهای مختلف، حاوی مقادیر قابل توجهی از آلاینده‌ها شامل فلزات سنگین می‌باشند. مقدار کمی از پسماند رنگ منجر به گسترش منابع آلاینده در خاک و آب و در نهایت آلودگی‌های زیست‌محیطی فراوانی می‌شود. در نتیجه لزوم توجه و دقت‌نظر در خصوص چگونگی دفن و تثبیت آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تدوین راهکارهای مقرون به صرفه و قابل قبول از نظر زیست‌محیطی به منظور بهره‌وری بهینه و تولید مواد ارزشمند نیز بسیار مهم و حیاتی می‌باشد. وجود عناصر و فلزات سنگین از جمله سرب، کادیوم، مس، نیکل، کروم، آرسنیک، روی و ... در پسماند رنگ سبب شده تا دفع این نوع پسماندها و جلوگیری از ورود این سطح از آلاینده‌ها به محیط‌زیست از حساسیت بالایی برخوردار باشد [۲]. تاکنون روش‌های مختلفی جهت دفن پسماندها و مواد ضایعاتی آلاینده مورد استفاده قرار گرفته‌است که یکی از این روش‌ها تثبیت آلاینده با استفاده از موادی همچون آهک و سیمان می‌باشد که طی یکسری واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی سبب ثابت و بی‌حرکت‌سازی فلزات سنگین می‌شوند. در این روش نمونه‌های تثبیت شده را هم می‌توان دفن کرد و هم می‌توان از آن‌ها استفاده‌ی مهندسی نمود [۱]. یکی از پرکاربردترین مصالح در تثبیت پسماندهای صنعتی سیمان پرتلند می‌باشد. سیمان پرتلند به دلیل ارزان بودن، تولید آسان و دسترسی سریع در میان سایر مصالح قابل استفاده محبوبیت خاصی دارد. پژوهش‌های گسترده‌ای بر روی زائدات صنعتی مختلف در سرتاسر جهان انجام شده‌است اما با توجه به تنوع زیاد پسماندهای صنعتی و انواع مختلف آلاینده‌های موجود در پسماندهای تولیدی کارخانه‌ها، نیاز به تحقیق جامعی در این زمینه می‌باشد. علاوه بر این، نمی‌توان از یک روش واحد برای دفن و به‌ویژه بازیافت مجدد تمامی زائدات استفاده نمود. رفینو و همکاران در سال ۲۰۲۰ به ارزیابی محیط‌زیستی و اقتصادی استفاده از پسماند رنگ در روسازی‌های آسفالتی پرداختند. در این پژوهش از پسماند رنگ به‌عنوان عامل تعدیل‌کننده بیندر مورد استفاده در آسفالت گرم روسازی استفاده شد. بررسی‌هایی که در این تحقیق صورت گرفت نشان داد، با توجه به مطالعات گذشته استفاده از پسماند رنگ در بیندر آسفالت گرم تأثیر منفی بر عملکرد فنی آن نداشته و همچنین آثاری بر محیط‌زیست از لحاظ انتشار گازی و کیفیت رواناب ندارد. از لحاظ هزینه‌ای هم این تحقیق نشان داد که هزینه‌های ناشی از استفاده از پسماند رنگ در آسفالت (خشک کردن و پودر کردن پسماند رنگ) هزینه‌ای کمتر از سوزاندن و یا دفن آن در خاک دارد [۷]. اوچی و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی و بازیافت پسماند رنگ با سیمان و آهک و تولید ملات سازه‌ای سبک پرداختند. در این پژوهش از پسماند رنگ به‌عنوان مصالح دانه‌ای در هر دو نوع ملات سیمانی و آهکی استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد افزودن پسماند رنگ به ملات سیمانی و آهکی از میزان ورود منابع سمی و خطرناک به محیط‌زیست می‌کاهد [۸]. مالیشکینه و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی تأثیر پسماند دباغی بازیافتی در ملات سیمانی

پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد جایگزینی ۶ درصد سیمان با پسماند دباغی سبب افزایش مقاومت خمشی، فشاری و میزان سرعت پالس در آزمایش اولتراسونیک می‌شود. این در حالی است که میزان جذب آب کاهش می‌یابد [۹]. نه‌دی و همکاران در سال ۲۰۰۳ اقدام به بازیافت رنگ لاتکس ضایعاتی در بتن نمودند. این تحقیق با هدف استفاده از رنگ لاتکس ضایعاتی در بتن پیاده‌روها انجام شد و محققین توانستند اثبات کنند که رنگ لاتکس ضایعاتی می‌تواند کارایی را بهبود بخشد، مقاومت خمشی را افزایش دهد، نفوذپذیری یون کلرید را کاهش داده و در یخ‌زدایی با استفاده از نمک سطح پیاده‌رو رو مقاومت بهتری داشته باشد [۱۰]. بررسی پژوهش‌های انجام‌شده نشان داد تثبیت پسماند رنگ در ملات‌های سیمانی با بررسی پارامترهای مقاومتی و زیست‌محیطی آنچنان که باید مورد توجه قرار نگرفته‌است. لذا در پژوهش حاضر تلاش شد تا تاثیر افزودن پسماند رنگ بر مقاومت فشاری ملات سیمانی و همچنین تثبیت میزان آلاینده‌گی پسماند رنگ در نمونه‌های سیمانی مورد ارزیابی قرار گیرد.

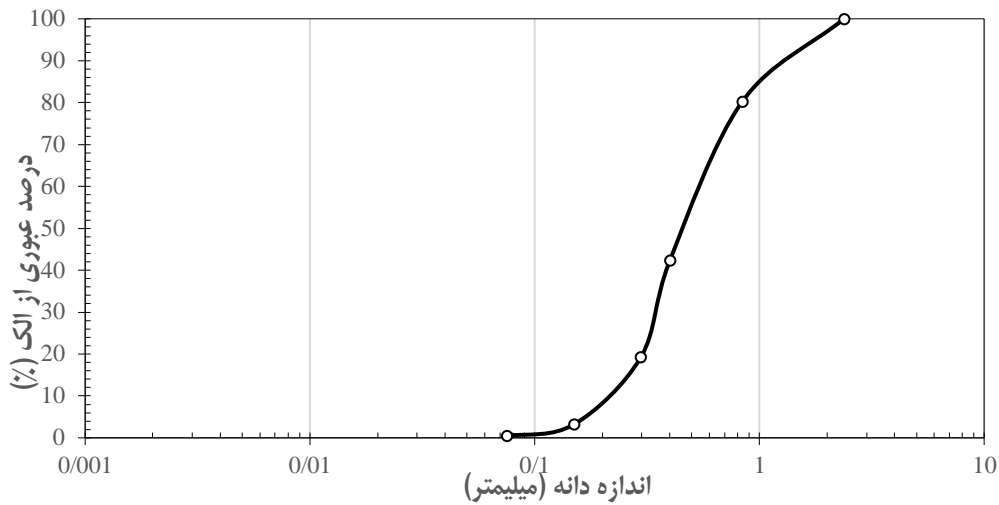
## مواد و روش‌ها

هدف از پژوهش حاضر، تثبیت فلزات سنگین موجود در پسماند رنگ و استفاده از آن در ملات‌های سیمانی می‌باشد. پسماند رنگ مورد استفاده در این تحقیق از کارخانه سایپا که یکی از بزرگ‌ترین کارخانه‌های خودروسازی در ایران به‌شمار می‌رود، تهیه شده‌است. شکل (۱) نشان‌دهنده شکل ظاهری پسماند رنگ می‌باشد. این پسماند به‌صورت توده‌ای خیس با بوی شدید رنگ می‌باشد. رنگ آن طوسی مایل به سفید است.



شکل ۱- پسماند رنگ تهیه‌شده از کارخانه خودروسازی سایپا

پسماند رنگ واکنش‌پذیری بالایی دارد و ترکیبات آن به‌سرعت تغییر می‌کند. لذا برای خشک کردن آن نمی‌توان از آون استفاده کرد. پسماند رنگ مورد استفاده در هوای آزاد به مدت دو هفته قرار گرفت تا کاملاً خشک شود سپس داخل هاون کوبیده و پودر شد. نمونه‌برداری از پسماند رنگ مطابق با استاندارد AASHTO T88-70 انجام گرفت. جهت دانه‌بندی پسماند، آزمایش دانه‌بندی به روش الک بر روی پسماند خشک مطابق با استاندارد ASTM D422-63 انجام گرفت [۱۱]. شکل (۲) نشان‌دهنده منحنی دانه‌بندی پسماند رنگ می‌باشد. برای انجام آزمایش‌ها و به‌منظور جایگزینی با ماسه استاندارد، مقداری از پسماند رنگ که از الک شماره ۲۰ عبور کرده و روی الک شماره ۳۰ مانده‌است، انتخاب شد.



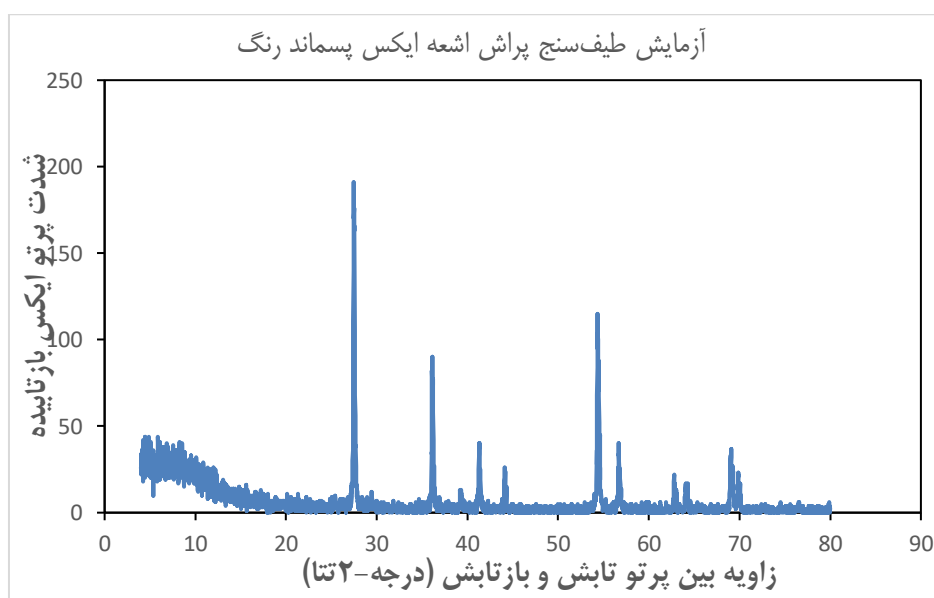
شکل ۲- نمودار دانه‌بندی پسماند رنگ

جهت تعیین عناصر، ترکیبات و مقادیر آن‌ها در پسماند رنگ، از آزمایش‌های طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس و پراش اشعه ایکس استفاده شد. جدول (۱) و شکل (۳) به ترتیب نشان‌دهنده نتایج حاصل از طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس و پراش اشعه ایکس می‌باشند. همان‌طور که از نتایج جدول (۱) مشخص است، تیتانیوم دی‌اکسید به مقدار قابل توجهی (حدود ۹۲٪/۶) در این پسماند یافت شده است زیرا این ماده در صنعت خودروسازی به دلیل ضریب شکست بالای آن به‌عنوان رنگ‌دانه سفید مورد استفاده قرار گرفته و بسیار پرکاربرد است. علاوه بر تیتانیوم دی‌اکسید، آلومینیوم اکسید (برای بهبود کیفیت رنگ) و کلسیم اکسید (به‌عنوان رنگ‌دانه سفید) با مقادیر ۲/۷۳ و ۱/۳٪ به ترتیب در این پسماند رنگ یافت شده‌اند و در تهیه ملات، منجر به تشکیل تری کلسیم سیلیکات  $C_3A$  (3CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) شدند.

جدول ۱- نتایج آزمایش طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس بر روی پسماند رنگ

ترکیب	غلظت (درصد وزنی)
MgO	۰/۳۸
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲/۷۳
SiO <sub>2</sub>	۰/۲۲
CaO	۱/۳
TiO <sub>2</sub>	۹۲/۶
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۵۳
Cl	۰/۰۱
K <sub>2</sub> O	۰/۰۶
ZrO <sub>2</sub>	۰/۳۹
L.O.I	۱/۵۸
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۲

شکل (۳) نشان‌دهنده الگوی پراش آزمون پراش اشعه ایکس پسماند رنگ می‌باشد. همان‌طور که از الگوی پراش مشخص است، نمونه حاوی فازهای مختلف یک ماده بوده و الگوی پراش به صورت ترکیبی از همه طیف‌هاست. دی‌اکسید تیتانیوم دارای هشت حالت اکسایش است. روتیل<sup>۱</sup>، آناتاز<sup>۲</sup>، بروکیت مهم‌ترین آن‌ها می‌باشند. نمونه به‌طور کامل آمورف نبوده و دربرگیرنده مقادیر قابل توجهی از فازهای بلوری است. محور افقی زاویه‌ی برخورد پرتوی ایکس به نمونه به صورت  $2\theta$  و محور عمودی شدت پرتوی ایکس بازگشتی را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۳) مشاهده می‌شود که در زوایای خاصی برای یک ماده‌ی مجهول، پیک‌های متفاوتی ثبت شده‌است. سپس زوایای مربوط به پیک‌های یک ماده‌ی معلوم (تیتانیوم دی‌اکسید) که از قبل تعیین شده‌اند بر روی شکل حاصل قرار داده شده‌است. هدف از این کار آن است که تطابق زوایای پیک برای ماده‌ی مجهول با ماده‌ی معلوم بررسی شود و اگر این دو بر یکدیگر منطبق باشند، نتیجه می‌شود که ماده‌ی مجهول همان تیتانیوم دی‌اکسید است.



شکل ۳- الگوی پراش آزمون XRD

با نتایج به‌دست آمده از تست‌های طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس و پراش اشعه ایکس، تیتانیوم دی‌اکسید ماده‌ی اصلی تشکیل‌دهنده پسماند رنگ بوده‌است. این ترکیب علاوه بر ایجاد مشکلات زیست‌محیطی فراوان، ترکیبی سرطان‌زاست. لذا تثبیت و ایزوله کردن آن اهمیت بسیاری دارد.

به‌منظور دستیابی به نتیجه دقیق جهت تولید ملات سیمانی از ماسه مرجع استفاده شده‌است. با توجه به دانه‌بندی و نمونه‌برداری انجام شده بر روی پسماند رنگ، ماسه مورد استفاده از دانه‌بندی طبق استاندارد *ASTM C778*، *DIN EN196-1*، *ISIRI 1289* و *ISIRI 3040*- تهیه شده‌است. ماسه مرجع معمولاً طوری دانه‌بندی می‌شود که از الک شماره ۲۰ عبور کرده و روی الک شماره ۳۰ باقی بماند. سیمان مورد استفاده جهت تهیه ملات‌های سیمان پرتلندی از کارخانه سبزه‌وار تهیه شده‌است. این سیمان پرتلند تیپ ۲ می‌باشد. آب مصرفی، آب مقطر بوده‌است. دلیل استفاده از آب مقطر در تولید ملات‌ها، جلوگیری از تاثیر عوامل خارجی مانند املاح موجود در آب شرب شهری در نتایج بوده تا بتوان به نتایج آنالیز شیمیایی

<sup>1</sup> Rutile

<sup>2</sup> Anatase

با دقت بیشتر دست یافت. آب مقطر در آزمایشگاه شیمی دانشگاه شهید بهشتی پردیس فنی مهندسی عباسپور تحت شرایط آزمایشگاهی توسط دستگاه آب مقطر ساز تهیه و نگهداری شده است و مطابق با استانداردهای ISIRI 2349 و ISIRI 1728 می‌باشد.

پس از بررسی مصالح مورد استفاده در ساخت ملات‌ها، به شرح طرح اختلاط و روش تهیه نمونه‌ها و آزمایش‌های صورت گرفته پرداخته شده است.

تمامی ملات‌ها مطابق با جدول طرح اختلاط (۲) تهیه شد. ملات‌های سیمان پرتلندی با استفاده از استانداردهای ASTM C109 و ISIR 393 ساخته شده‌اند. همانطور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، از ۴ طرح اختلاط با نام‌های MC0، MC10، MC20 و MC30 به منظور تولید ملات‌های سیمانی استفاده شد. MC0 نمونه شاهد سیمانی بدون پسماند رنگ می‌باشد. در هر کدام از نمونه‌های MC10، MC20 و MC30 به ترتیب ۱۰ درصد، ۲۰ درصد و ۳۰ درصد از وزن ماسه استاندارد، با پسماند رنگ جایگزین شد.

جدول ۲- طرح اختلاط مورد استفاده

نوع ترکیب	نسبت آب به سیمان	آب gr	ماسه gr	پسماند %
MC0	۰/۵	۲۲۵	۱۳۵۰	۰
MC10	۰/۵	۲۲۵	۱۲۱۵	۱۰
MC20	۰/۵	۲۲۵	۱۰۸۰	۲۰
MC30	۰/۵	۲۲۵	۹۴۵	۳۰

عمل‌آوری نمونه‌های سیمانی به صورت غوطه‌ور در حوضچه آب صورت گرفت. در این شرایط عمل‌آوری، نمونه‌ها پس از گذشت یک روز از زمان تهیه، از قالب جدا شده و در ظروف پلاستیکی حاوی آب قرار گرفتند. به منظور بررسی تاثیر زمان بر پارامترهای مختلف مواد نمونه‌ها در سه سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری شدند.

بر روی نمونه‌ها آزمایش‌هایی همچون مقاومت فشاری، طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) و پراش اشعه ایکس (XRD) انجام شد. آزمایش آنالیز عنصری طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس مطابق با استاندارد ASTM-E 1621-13 به منظور بررسی عناصر شیمیایی موجود در مصالح مورد استفاده و نمونه‌های ساخته‌شده در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه انجام گرفت [۱۳]. به منظور بررسی ترکیبات و ساختار بلورین تشکیل‌شده در ملات‌های سیمانی، آزمایش پراش اشعه ایکس مطابق با استاندارد EN 13925-1:2008 در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه انجام گرفت [۵۹]. آزمایش مقاومت فشاری ملات سیمانی مطابق با استانداردهای ASTM C109، ASTM C349 و استاندارد ملی ایران ۱-۱۹۶ انجام شد [۱۴].

## بحث و بررسی نتایج

در پژوهش حاضر پسماند رنگ در درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی ماسه جایگزین آن شد تا تاثیر افزودن پسماند در ملات مورد بررسی قرار گیرد. در ادامه نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مقاومتی و شیمیایی انجام شده بر روی نمونه‌ها ارائه شده است. جدول (۳) نشان‌دهنده نتایج به دست آمده از آزمایش فلورسانس پرتو ایکس بر روی نمونه‌ها با درصدهای مختلف

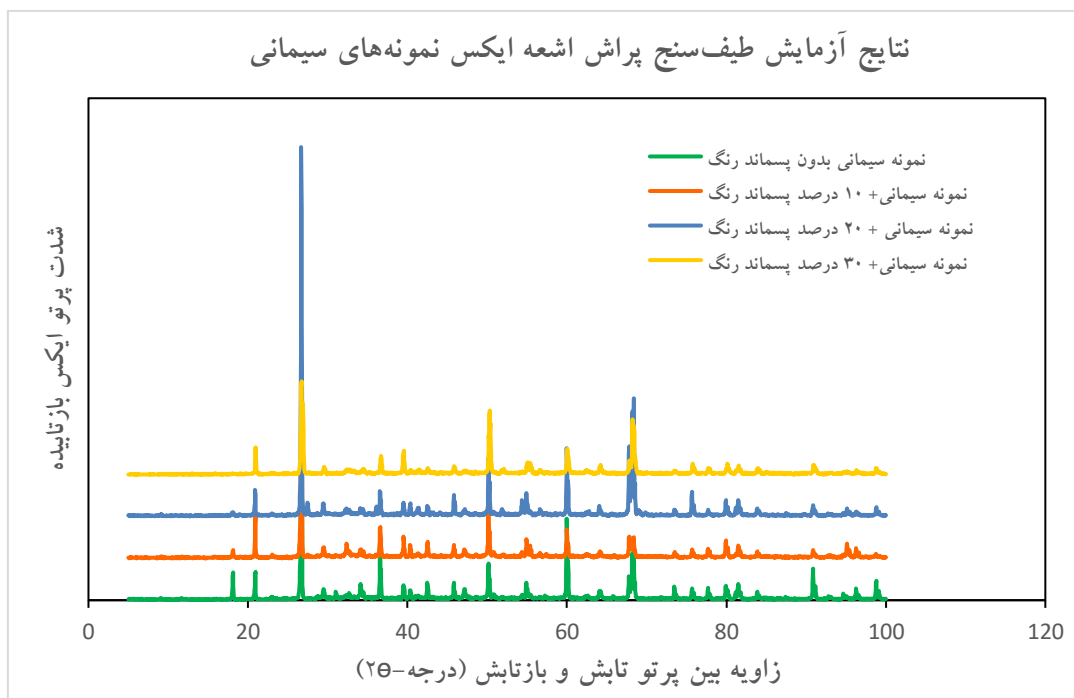
پسماند می باشد. همانگونه که مشاهده می شود، حضور پسماند رنگ در ملات سیمانی سبب افزایش غلظت مواد آلی فرار (LOI)<sup>۱</sup> در نمونه‌ها شده است. نتایج نشان‌دهنده افزایش درصد تیتانیوم دی‌اکسید با افزایش درصد پسماند رنگ می‌باشد. تیتانیوم دی‌اکسید در نمونه ملات سیمانی با ۳۰ درصد پسماند رنگ نسبت به ملات سیمانی بدون پسماند رنگ، افزایش ۲ درصدی داشته است. علاوه بر تیتانیوم دی‌اکسید، کلسیم دی‌اکسید نیز از اکسیدهای مهم در رنگ‌آمیزی خودرو و به عنوان رنگ‌دانه سفید به کار می‌رود. در نمونه‌ها با افزایش مقدار پسماند رنگ، کلسیم دی‌اکسید نیز افزایش می‌یابد. همچنین میزان غلظت عنصر سیلیسیم دی‌اکسید در نمونه‌های سیمانی کاهش یافته است. با افزایش مقدار پسماند رنگ در نمونه‌ها و برهم زدن واکنش‌ها و ترکیبات شیمیایی مقدار اکسید سیلیسیم کاهش می‌یابد آلومینیوم دی‌اکسید، اکسید کیفیت رنگ خودروسازی می‌باشد و با افزایش مقدار پسماند رنگ مقدار آن بصورت جزئی افزایش یافته است. مقدار سیمان در تمامی نمونه‌ها ثابت است لذا پسماند رنگ جایگزین ماسه، در ترکیبات شیمیایی ملات‌ها نقش به‌سزایی دارد.

جدول ۳- درصد عناصر مختلف در نمونه‌های سیمانی به‌دست آمده از آزمون فلورسانس پرتو ایکس

LOI	CuO	Zn	Fe2O3	Na2O	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	SO3	K2O	CaO	TiO2	اکسیدها ( wt%) نوع ماده
۷	-	-	۵/۲۰۸	-	۰/۶۸۱	۱/۳۵۷	۴۸/۱۹۲	-	۱/۸۲۳	۰/۲۳۰	۱۹/۵۰۴	۰/۳۴۳	نمونه سیمانی بدون پسماند رنگ
۱۵	-	<<	۳/۱۷۶	<<	۰/۴۶۳	۱/۸۱۴	۴۶/۹۵۵	<<	۱/۶۰۶	۰/۲۲۴	۲۲/۴۹۱	۶/۱۳۸	نمونه سیمانی با ۱۰ درصد پسماند رنگ
۱۸/۵	-	-	۳/۱۴۸	<<	۰/۵۳۲	۱/۹۳۵	۳۸/۳۸۱	<<	۱/۵۰۸	۰/۲۴۱	۲۳/۳۸۹	۱۳/۲۶۴	نمونه سیمانی با ۲۰ درصد پسماند رنگ
۳۴	۰/۰۷۲	<<	۲/۶۶۰	<<	۰/۳۹۴	۲/۶۰۷	۳۷/۵۰۸	<<	۱/۳۹۳	۰/۱۷۳	۳۵/۱۵۴	۱۴/۹۴۰	نمونه سیمانی با ۳۰ درصد پسماند رنگ

<sup>1</sup> Loss On Ignition

شکل (۴) نشان‌دهنده نتایج آزمایش طیف‌سنج پراش اشعه ایکس نمونه‌های سیمانی می‌باشد. دمای انجام آزمایش ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فاصله هر  $0.4/0.2$  است. در این گراف داده‌ها به ترتیب از ۱۰ درصد پسماند رنگ، ۲۰ درصد و ۳۰ درصد شیفت ۵۰۰ تایی بر روی محور عمودی داشته‌اند. همانطور که از شکل مشخص است، بلندترین پیک نمودارها در تمامی نمونه‌های سیمانی با پسماند رنگ، مربوط به زاویه ۲۵ درجه است. بیشترین شدت پرتو ایکس در این زاویه مربوط به نمودار آبی رنگ سیمانی همراه با ۲۰ درصد پسماند رنگ است. به طور کلی شدت پرتو ایکس در ۲۵ درجه در ملات‌های سیمانی با ۲۰ و ۳۰ درصد پسماند رنگ بیشتر از ملات‌های سیمانی بدون و با ۱۰ درصد پسماند رنگ نشان داده شده‌است. در زوایای ۳۸، ۵۰، ۶۰ و ۶۴ نیز تقریباً تمامی نمودارها پیک داشته‌اند. فاز روتیل فقط در نمونه سیمانی ساخته شده همراه با ۲۰ درصد از پسماند رنگ به مقدار کم مشاهده شده‌است. این امر تثبیت مطلوب فاز روتیل از تیتانیوم دی‌اکسید در نمونه‌های سیمانی را به خوبی نشان می‌دهد. از طرفی دیگر فازهای کوارتز، و سوویانیت<sup>۱</sup> و سیلیکون اکسید دارای عناصر اکسیژن و سیلیس می‌باشند که با افزایش درصد پسماند رنگ مقادیر آنها کاهش یافته‌است.

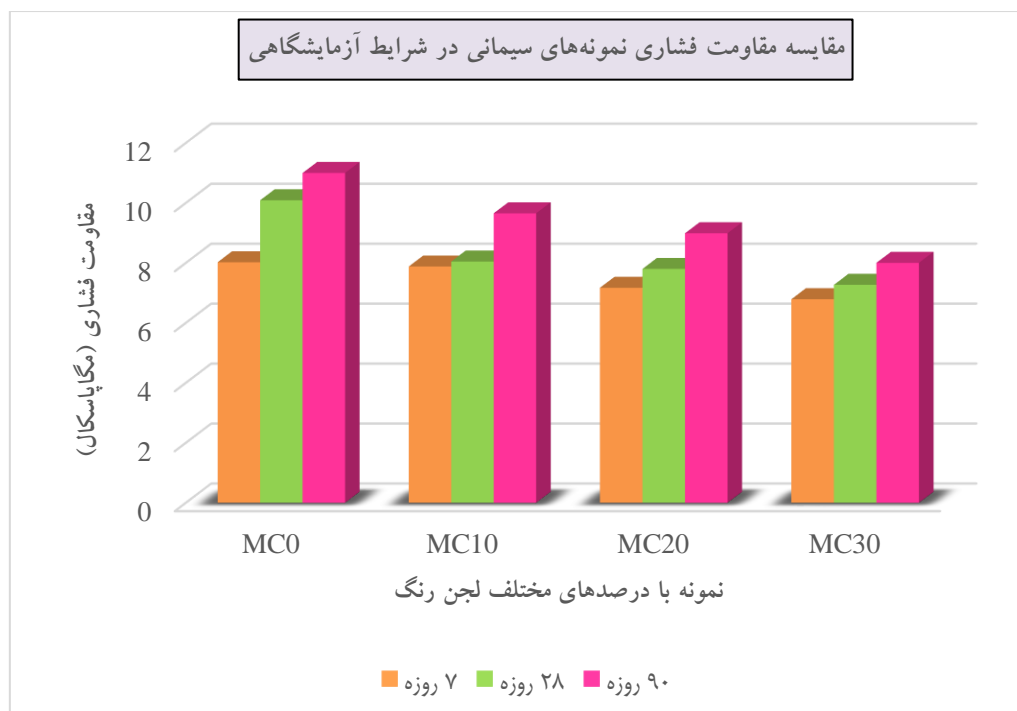


شکل ۴- نتایج آزمایش طیف‌سنج پراش اشعه ایکس نمونه‌های سیمانی

شکل (۵) نشان‌دهنده نتایج به دست آمده از مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های سیمانی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه می‌باشد. همانطور که مشخص است، می‌توان نتیجه گرفت که اندرکنش ترکیبات شیمیایی پسماند رنگ و سیمان و واکنش‌های پوزولانیک سبب ایجاد ترکیبات سیمانی جدید و کمتر شدن سرعت روند کاهش مقاومت نمونه‌ها در سنین بالاتر شده‌است. در واقع افزایش میزان پسماند رنگ سبب کاهش غلظت و ترقیق مواد سیمانی در ملات شده که نتیجه آن کاهش واکنش‌های مربوط به هیدراتاسیون سیمان و در نتیجه کاهش تولید ژل کلسیم سیلیکات هیدرات C-S-H و کاهش مقاومت فشاری بتن می‌باشد. بیشترین مقاومت فشاری ملات‌ها مربوط به ملات سیمان بدون پسماند رنگ (MC0) می‌باشد و با افزایش سن نمونه مقاومت افزایش یافته‌است. همانطور که انتظار می‌رفت، مقاومت نمونه‌ها در سن ۹۰ روزه طولانی مدت نسبت به ۲۸ روز به مقدار کمی افزایش یافته‌است.

<sup>1</sup> Vesuvianit





شکل ۵- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های سیمانی در شرایط عمل‌آوری مرطوب با درصدهای مختلف پسماند و در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز

### نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به منظور بررسی قابلیت تثبیت پسماند رنگ به عنوان یک آلاینده محیط‌زیستی در ملات سیمانی صورت گرفت. بدین منظور پسماند رنگ در درصدهای مختلف جایگزین ماسه شده و نمونه‌ها در سنین مختلف مورد آزمایش‌های مقاومتی و شیمیایی قرار گرفتند. در کل از پژوهش حاضر نتایج زیر حاصل شد.

جایگزینی پسماند رنگ به عنوان درصدی از ماسه در ملات سیمانی، می‌توان فلزات سنگین و آلاینده‌های زیست‌محیطی موجود در آن را تا حدودی تثبیت کرده و از توزیع آن در محیط‌زیست جلوگیری نمود.

اندرکنش پسماند رنگ با سایر مصالح موجود در ملات‌ها مانند سیمان به‌عنوان همبندکننده، سبب ایجاد ترکیبات و فازهای جدید در نمونه‌ها شده‌است.

افزودن پسماند رنگ به‌عنوان درصدی از وزن ماسه در ملات‌های سیمانی، سبب کاهش غلظت عناصر سنگین موجود در پسماند رنگ مانند: باریم، آرسنیک، جیوه و منیزیم شده‌است که این نشان از تثبیت این مواد در ملات‌ها می‌دهد. در برخی از نمونه‌ها کاهش ۱۳ درصدی این عناصر مشاهده شده‌است.

با توجه به نتایج آزمون مقاومت فشاری، افزودن پسماند رنگ سبب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها ملات‌های سیمانی شده‌است. این کاهش مقاومت فشاری با افزایش درصد پسماند افزایش می‌یابد.

با افزایش سن نمونه‌ها، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافته‌است که این به دلیل تکمیل فرایند هیدراتاسیون در نمونه‌های سیمانی با گذشت زمان می‌باشد.

## منابع

1. Anjan Patel, *Geotechnical Investigations and Improvement of Ground Conditions, soil stabilization, chapter 3*, (2019)
2. J.F.Artiola, *Environmental and Pollution Science, Industrial waste and municipal solid waste treatment and disposal, chapter 21*, (2019)
3. Luhar, S., Chaudhary, S., & Luhar, I. (2019). *Development of rubberized geopolymer concrete: Strength and durability studies. Construction and Building Materials*, 204, 740-753.
4. Riyap, H. I., Bewa, C. N., Banenzoué, C., Tchakouté, H. K., Rüscher, C. H., Kamseu, E., ... & Leonelli, C. (2019). *Microstructure and mechanical, physical and structural properties of sustainable lightweight metakaolin-based geopolymer cements and mortars employing rice husk. Journal of Asian Ceramic Societies*, 7(2), 199-212.
5. Ma, C. K., Awang, A. Z., & Omar, W. (2018). *Structural and material performance of geopolymer concrete: A review. Construction and Building Materials*, 186, 90-102.
6. Chithambaram, S. J., Kumar, S., Prasad, M. M., & Adak, D. (2018). *Effect of parameters on the compressive strength of fly ash based geopolymer concrete. Structural Concrete*, 19(4), 1202-1209.
7. Ruffino, B., Farina, A., Dalmazzo, D., Blengini, G., Zanetti, M., & Santagata, E. (2020). *Cost analysis and environmental assessment of recycling paint sludge in asphalt pavements. Environmental Science and Pollution Research*, 1-11.
8. Avci, H., Ghorbanpoor, H., Topcu, I. B., & Nurbas, M. (2017). *Investigation and recycling of paint sludge with cement and lime for producing lightweight construction mortar. Journal of environmental chemical engineering*, 5(1), 861-869.
9. Malaiškienė, J., Kizinievič, O., & Kizinievič, V. (2019). *A study on tannery sludge as a raw material for cement mortar. Materials*, 12(9), 1902.
10. Nehdi, M., & Sumner, J. (2003). *Recycling waste latex paint in concrete. Cement and concrete research*, 33(6), 857-863.
11. American Society for Testing and Materials. (2002). *ASTM D422-63—standard test method for particle-size analysis of soils. Annual Book of ASTM standards*.
12. Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2002). *Design and control of concrete mixtures (Vol. 5420, pp. 60077-1083). Skokie, IL: Portland Cement Association*.
13. ASTM E1621-13. (2013). *Standard Guide for Elemental Analysis by Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry*.
14. ASTM C 109. *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar*.