



19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴۰۴ شهریور ۲۷ تا ۲۵



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



روش ترکیبی یادگیری ماشین و طیف‌سنجی FTIR برای شناسایی میکروپلاستیک‌ها

مصطفی ایلخانی پور^۱، میلاد میرزائی امینیان^{*۱}

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: میلاد میرزائی امینیان (mm.aminiyan@ut.ac.ir)

چکیده

همواره پیچیدگی تجزیه و تحلیل شناسایی میکروپلاستیک‌ها یک چالش بزرگ بوده است. این مطالعه یک رویکرد مبتنی بر یادگیری ماشینی را معرفی می‌کند که تجزیه و تحلیل میکروپلاستیک سریع‌تر و ایمن‌تری را نشان داده است. در ارزیابی، ما روش‌های تفسیر انسانی، یادگیری ماشینی و پردازش تصویر را با استفاده از شاخص شباهت ساختاری (SSIM) مقایسه می‌کنیم که نتایج کلی هم‌ترازی را نشان می‌دهد، هرچند در برخی از نمونه‌ها عملکرد یادگیری ماشین نسبت به تفسیر انسانی رضایت‌بخش است، اما در تشخیص انواع میکروپلاستیک در این نمونه‌ها اختلافاتی وجود دارد. نکته قابل توجه این است که این مطالعه میکروپلاستیک‌های HDPE و LDPE بالقوه را شناسایی می‌کند و مقداری جزئی نسبت به تفسیر انسانی متفاوت است.

واژگان کلیدی: پایتون، پلی‌اتیلن با چگالی کم، پلی‌اتیلن با چگالی بالا، طیف‌سنجی، میکروپلاستیک

مقدمه

امروزه تأثیر مخرب میکروپلاستیک‌ها بر اکوسیستم‌ها و سلامت انسان بسیار مورد توجه تحقیقات بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است (Aminiyan et al., 2024). خود میکروپلاستیک‌ها از تجزیه قطعات پلاستیکی بزرگتر، زباله‌های پلاستیکی و سایر اقسام ساخته شده از پلاستیک تولید می‌شوند (Mortula et al., 2021). به طور کلی، زباله‌های پلاستیکی مانند مشماهای بسته‌بندی یکی از مهمترین منابع قطعات پلاستیکی در محیط‌زیست هستند. محیط دریایی یا آبی به طور منظم حدود ۱/۰۸ تا ۹/۸ میلیون تن پلاستیک به‌عنوان آلاینده میکروپلاستیک آلوده می‌شود. نه تنها محیط دریایی، بلکه محیط‌های خشکی و خاک نیز به دلیل مقدار زیاد توسط زباله‌های پلاستیکی آلوده گردیده‌اند (Natesan et al., 2021). میزان زباله‌های پلاستیکی که خاک و محیط اطراف را آلوده می‌کند، تهدیدی فزاینده برای اکوسیستم طبیعی ایجاد می‌کند، که حیات جانداران مختلف را به خطر می‌اندازد (Shi et al., 2020). آلودگی زباله‌های پلاستیکی در خاک نه تنها به محیط زیست و تنوع زیستی آسیب می‌رساند، بلکه می‌تواند به سلامت انسان نیز آسیب برساند. تجزیه قطعات پلاستیکی بزرگتر توسط عوامل مختلف علت اصلی تولید اکثر میکروپلاستیک‌ها است (Sun et al., 2021). کشف میکروپلاستیک‌ها در دهه ۱۹۷۰ و افزایش اخیر مطالعات مربوط به آن‌ها منجر به افزایش شدید بررسی این ذرات از سال ۲۰۲۰ شده است، اما هنوز چیزهای زیادی برای شناخت و درک بهتر از این ذرات وجود دارد (Yu et al., 2024). پیچیدگی تجزیه و تحلیل میکروپلاستیک‌ها، همچنان یک نگرانی مهم است. عمده میکروپلاستیک‌ها در اراضی کشاورزی بر اساس ماهیت خود به ۲ نوع طبقه‌بندی می‌شوند که بر این اساس پلی‌اتیلن با چگالی کم (LDPE)، پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) می‌باشد.

انواع پلاستیک با چگالی کم LDPE^۱ و با چگالی بالا HDPE^۲ برای بسته‌بندی مواد غذایی و پوشش‌های گلخانه‌ای استفاده می‌شوند که عموماً یکبار مصرف در نظر گرفته می‌شوند، چرا که هزینه جمع‌آوری آن‌ها بسیار بالا تخمین زده می‌شود (Aminiyan et al., 2024). اگر آزمایش پیچیدگی تجزیه و تحلیل میکروپلاستیک‌ها در غیاب روش‌های ویژه و تماس مستقیم انجام شود، این فرایند زمان زیادی طول می‌کشد و احتمال آلودگی وجود دارد که می‌تواند منجر به تهدید سلامتی شود (He et al., 2025). پیچیدگی میکروپلاستیک‌ها با استفاده از روش‌های مختلف توسط برخی مطالعات بر اساس تحقیقات قبلی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. با این حال، هنوز نیاز به توسعه بیشتر دارد. این تحقیق روشی را ارائه می‌دهد که می‌تواند پیچیدگی تجزیه و تحلیل میکروپلاستیک‌ها را با استفاده از پیشرفت‌های تکنولوژیکی فعلی در هوش مصنوعی و یادگیری ماشینی سریع‌تر و دقیق‌تر انجام دهد (Herb et al., 2025). هدف، ارائه راه‌حلی برای تجزیه و تحلیل پیچیدگی میکروپلاستیک‌ها با استفاده از روش‌هایی است که هم ایمن و هم غیرتماسی هستند. این روش کارآمدتر است و زمان زیادی نمی‌برد. در این روش، روش‌های یادگیری ماشینی با تغییرات و تنوع داده‌ها سازگار می‌شوند (Phan and Luscombe, 2023). علاوه بر این، استفاده گسترده از الگوریتم‌های یادگیری ماشینی به گزینه‌ای عالی تبدیل شده است (Lin et al., 2022). هدف اصلی این مطالعه شناسایی نوع میکروپلاستیک‌ها با دقت بالا با استفاده از تکنیک‌های پیچیده یادگیری ماشینی بود.

مواد و روش‌ها

ترکیب فناوری هوش مصنوعی و فناوری طیف‌سنجی موجود در این تحقیق، امکان دستیابی به نتایج تشخیص قوی‌تر یا دقیق‌تر را فراهم می‌کند (Bianco et al., 2020). تشخیص به دو روش انجام می‌شود، یعنی با تفسیر انسانی و با استفاده از پردازش تصویر یادگیری ماشین (Lin et al., 2022). تفسیر انسانی با مشاهده مقدار جابجایی پیک تبدیل فوریه مادون قرمز با بازتاب کل تضعیف‌شده (FTIR-ATR^۳) که از نتایج طیف‌سنجی FTIR-ATR به دست آمده است، انجام می‌شود. پایتون ۳،۱۲،۰ برای ترسیم داده‌ها و تولید نتایج این مشاهده مقدار پیک استفاده می‌شود. دلیل استفاده از این برنامه این است که می‌تواند تصاویر صافی تولید کند و مرحله تفسیر انسانی را در تعیین پیک جابجایی FTIR-ATR تسهیل کند (Prezgot et al., 2025). تضمین کیفیت پردازش تصویر توسط برنامه از تحقیقات قبلی، استفاده از پایتون نسخه ۳،۱۳،۰ را برای تشخیص یادگیری ماشینی امکان‌پذیر می‌سازد. نتایج هر دو با هم مقایسه و به‌عنوان نتیجه تشخیص استفاده می‌شوند. این کار از طریق این دو روش به امید تولید داده‌های دقیق‌تر انجام می‌شود.

پایگاه داده نمونه میکروپلاستیک‌ها

مجموعه داده‌های مورد استفاده در این مطالعه از نتایج طیف‌سنجی FTIR-ATR نمونه‌های خاک دارای ریزذرات پلاستیکی پژوهش پیشین نویسنده استخراج شده است (Aminiyan et al., 2024).

طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز با بازتاب کل تضعیف‌شده FTIR-ATR

طیف‌سنجی FTIR-ATR یک فناوری محبوب برای تجزیه و تحلیل ساختار ترکیبات است. فناوری طیف‌سنجی FTIR-ATR مزایای بسیاری دارد که عبارتند از:

- هر نوع پلاستیک را می‌توان با استفاده از طیف‌سنجی FTIR-ATR با گراف اولیه مولکولی دقیق انگشت‌نگاری کرد.
- طیف‌سنجی FTIR-ATR امکان دستیابی به نتایج سریع را فراهم می‌کند و می‌تواند مستقیماً در محل انجام شود.
- توانایی FTIR-ATR در شناسایی انواع مختلف پلاستیک‌ها با ترکیبات پایه مشابه به دلیل حساسیت آن به ساختار مولکولی امکان‌پذیر است.
- تجزیه و تحلیل مخلوط‌های پلاستیکی یا نمونه‌هایی با بیش از یک جزء را می‌توان با استفاده از طیف‌سنجی FTIR-ATR انجام داد (Kedzierski et al., 2019).

¹. Low Density Polyethylene (LDPE)

². High Density Polyethylene (HDPE)

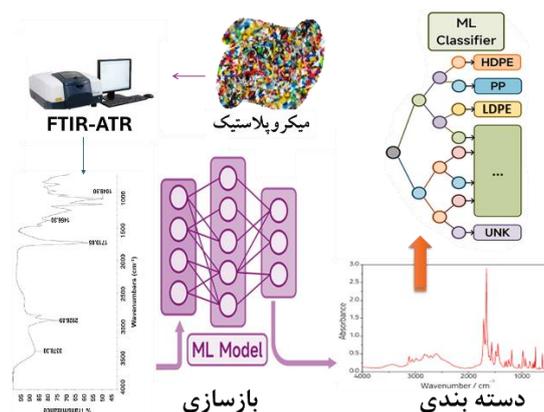
³. Fourier Transform Infrared Spectroscopy-Attenuated Total Reflectance

تفسیر انسانی

انجام طیف‌سنجی FTIR-ATR منجر به ایجاد پیک‌های زیادی می‌شود. نتایج توسط انسان‌ها برای انجام مشاهدات با استفاده از نمودار تغییر FTIR-ATR که توسط طیف‌سنجی FTIR-ATR ارائه شده است، استفاده شد. این مشاهده را می‌توان با مشاهده و ثبت مقدار پیک تغییر FTIR-ATR هر نمونه توسط نرم افزار OPUS انجام داد (Prezgot et al., 2025). طی فرایند تشخیص، مقدار پیک هر نمونه با مقدار تغییر پیک در گراف FTIR-ATR نمونه‌های اولیه LDPE و HDPE مطابقت داده می‌شود. این فرایند واقعاً دشوار است و نیاز به دقت بالایی دارد. نتایج به‌دست‌آمده ممکن است به دلیل خطاهای انسانی مستعد خطا باشند، حتی اگر با دقت بالایی انجام شده باشند. این امر در گذشته رایج بوده است زیرا عوامل زیادی می‌توانند بر عملکرد فرد تأثیر بگذارند. علاوه بر این، فرایند تفسیر انسانی امری زمانبر بوده و مدت زمان قابل توجهی را می‌طلبد (Kedzierski et al., 2019). داده‌های اولیه تولید شده توسط این تشخیص با داده‌های تولید شده توسط یادگیری ماشین، به‌ویژه پردازش تصویر، مقایسه می‌شوند (Phan and Luscombe, 2023).

یادگیری ماشین

پایتون زبان برنامه‌نویسی مورد استفاده برای تمام برنامه‌های تحلیل داده بود. در این مطالعه، داده‌های طیف‌سنجی FTIR-ATR از طریق دو فرایند پردازش می‌شوند. رسم داده‌ها برای نمایش گراف اولیه^۴ نتایج طیف‌سنجی FTIR-ATR هر نمونه ضروری است. در این روش از کتابخانه‌های Python Script, NumPy, Python, Matplotlib, Panda, SciPy استفاده می‌گردد. در طول این فرایند، برنامه داده‌ها را می‌خواند، تحلیل داده‌ها را انجام می‌دهد و در نهایت نمودارهایی برای مصورسازی داده‌ها تولید می‌کند. برای بهبود همواری^۵ آن‌ها، نتایج پلات‌های گراف اولیه را می‌توان تنظیم کرد (شکل ۱). تصاویر داده‌های تصویری، ذخیره شده و در مرحله بعدی پردازش می‌شوند. پردازش تصویر فرایند دوم است و از همان کتابخانه فرایند اول استفاده می‌کند. در مرحله دوم، آزمون وجود دارد که از توابع معیار که از کتابخانه Sci-kit-Learn می‌آیند، استفاده می‌کند. برای آسان‌تر کردن این فرایند، از توابعی از جعبه ابزار GUI و کتابخانه تصویربرداری پایتون (PIL)^۶ استفاده می‌کند. باید از داده‌های همراه به‌عنوان مرجعی برای تشخیص در طول فرایند شناسایی استفاده نمود. در نتیجه این تشخیص، یک مقدار شاخص شباهت ساختاری ایجاد می‌شود. این ارزیابی شاخص شباهت ساختاری^۷ (SSIM) به دلیل عوامل متعدد، تأثیر قابل توجهی بر نتایج خواهد داشت (Bianco et al., 2020; Herb et al., 2025). برای آزمایش مقدار SSIM، مهم است که اطمینان حاصل شود از ابتدای فرایند، با داده‌های هر دو نمونه به طور یکسان رفتار شده است.



شکل ۱- مراحل انجام مطالعه

نتایج و بحث

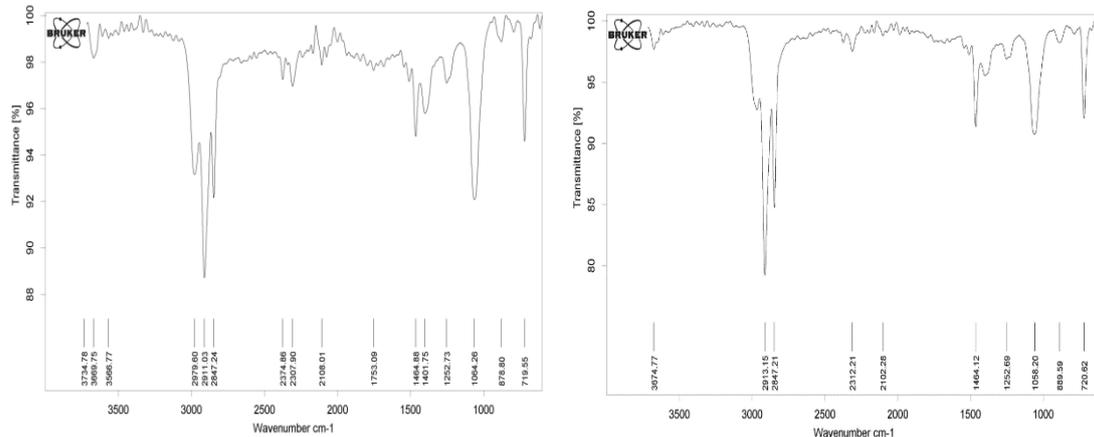
⁴ . Finger Print Graph

⁵ . Smoothness

⁶ . Python Imaging Library (PIL)

⁷ . Structural Similarity Index (SSIM)

مقایسه مقادیر SSIM و تفسیر انسانی، مبنای ارزیابی هر دو روش است. تجزیه و تحلیل هر پیک تولید شده از گراف اولیه نمونه و مقایسه آن با مرجع‌های گراف اولیه پلیاستیکی، شامل تفسیر انسانی است. شکل ۲، هم‌ترازی دقیق هر پیک از گراف اولیه مرجع در تجزیه و تحلیل خام را با بررسی موقعیت‌های آن‌ها بر اساس FTIR-ATR نشان می‌دهد. جدول ۱ نشان می‌دهد که نتایج مشابهی را می‌توان با استفاده از روش‌های تفسیر انسانی و پردازش تصویر یادگیری ماشین به دست آورد. این نشان می‌دهد که روش پردازش تصویر یادگیری ماشین ایجاد شده، هم کارآمد و هم قابل اعتماد است.



شکل ۲- گراف طیف سنجی FTIR-ATR پلی‌اتیلن با چگالی کم (LDPE) تصویر سمت چپ، پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) تصویر سمت راست

جدول ۱- شاخص شباهت ساختاری دو نوع میکروپلاستیک مشاهده شده در نمونه‌ها

نمونه	مقادیر شاخص شباهت ساختاری	
	LDPE	HDPE
1	0.83	0.83
2	0.83	0.82
3	0.80	0.80
4	0.83	0.83
5	0.79	0.77
6	0.76	0.76
7	0.70	0.70
8	0.83	0.83

جدول ۲- مقایسه نتایج شناسایی نوع میکروپلاستیک موجود در نمونه‌ها با روش شاخص شباهت ساختاری و تفسیر انسانی

نمونه	شاخص شباهت ساختاری	تفسیر انسانی
1	LDPE	LDPE
2	LDPE	LDPE
3	LDPE	LDPE
4	LDPE	LDPE
5	HDPE	HDPE
6	HDPE	HDPE
7	HDPE	HDPE
8	HDPE	HDPE

میکروپلاستیک‌های LDPE و HDPE در نمونه‌ها که از طریق پیک‌های موجود در گراف اولیه طیف‌سنجی FTIR-ATR شناسایی شده‌اند، همانند آنچه که توسط تفسیر انسانی نشان داده شده است، وجود دارند. بر اساس نتایج حاصل از پردازش تصویر یادگیری ماشین، هر دو نوع میکروپلاستیک بالاترین مقادیر SSIM به دست آمده را دارند. علاوه بر این، شواهدی

وجود دارد که این موضوع را تأیید می‌کند زیرا چندین نمونه نتایج SSIM تولید شده یکسانی را از هر یک از دو نوع میکروپلاستیک دارند. نتایج نشان می‌دهد که روش یادگیری ماشین ایجاد شده خوب است، اما برای تولید داده‌های دقیق‌تر به بهینه‌سازی یا توسعه بیشتری نیاز دارد. فرایند تشخیص می‌تواند دارای نواقصی باشد که منجر به خطا یا تفاوت در نتایج به‌دست‌آمده می‌شود که می‌تواند ناشی از ترسیم تصویر غیربهینه یا وضوح ناکافی باشد. خطاهای تفسیر انسانی همچنین می‌تواند ناشی از عوامل خارجی و طبیعی باشد که انسان با آن‌ها مواجه می‌شود و امکان بروز خطا را فراهم می‌کند.

نتیجه‌گیری

برای تشخیص میکروپلاستیک‌ها در این تحقیق از دو روش، شامل تفسیر انسانی و پردازش تصویر یادگیری ماشین، استفاده و ارزیابی گردید. مقایسه مقادیر SSIM و تجزیه و تحلیل انسانی از مراجع گراف اولیه پلاستیکی، نحوه انجام ارزیابی است. به طور کلی نتایج نشان دادند که روش یادگیری ماشین در بسیاری از موارد توانست شباهت قابل قبولی با تفسیر انسانی ارائه دهد و در تشخیص کلی ساختارهای میکروپلاستیکی عملکرد مناسبی داشت. با این حال، در برخی نمونه‌ها، به‌ویژه در شرایط پیچیده یا تصاویر با کیفیت پایین، اختلافاتی بین خروجی دو روش مشاهده شد که نشان‌دهنده محدودیت‌های مدل در تشخیص دقیق انواع خاصی از میکروپلاستیک‌ها است. این تفاوت‌ها اهمیت بهینه‌سازی بیشتر الگوریتم‌های یادگیری ماشین را برجسته می‌سازد، به‌ویژه در مواجهه با داده‌های محیطی با تنوع بالا، نویز تصویری، یا ساختارهای غیرخطی. در نهایت، این مطالعه درک کامل از پتانسیل روش‌های یادگیری ماشین در پشتیبانی از تجزیه و تحلیل میکروپلاستیک‌ها در نمونه‌ها، با امکان بهبود بیشتر را نشان می‌دهد، به طوری که می‌تواند منجر به نتایج دقیق‌تر و قابل اعتمادتری شود. بنابراین، تحقیقات آینده می‌تواند از یافته‌های این تحقیق برای بهبود این روش و ارائه اطلاعات ارزشمند برای مدیریت کیفیت و پایداری محیط زیست استفاده کنند.

فهرست منابع

- Aminian, M. M., et al., 2024. Mitigating the detrimental impacts of low-and high-density polyethylene microplastics using a novel microbial consortium on a soil-plant system: Insights and interactions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 283, 116805.
- Bianco, V., et al., 2020. Microplastic identification via holographic imaging and machine learning. *Advanced Intelligent Systems*. 2, 1900153.
- He, M., et al., 2025. Research on hybrid microplastic recognition method based on dual-branch convolutional neural network combined with attention mechanism. *Microchemical Journal*. 115131.
- Herb, F., et al., 2025. Machine learning outperforms humans in microplastic characterization and reveals human labelling errors in FTIR data. *Journal of Hazardous Materials*. 487, 136989.
- Kedzierski, M., et al., 2019. A machine learning algorithm for high throughput identification of FTIR spectra: application on microplastics collected in the Mediterranean Sea. *Chemosphere*. 234, 242–251.
- Lin, J.-y., et al., 2022. Recent advances in the application of machine learning methods to improve identification of the microplastics in environment. *Chemosphere*. 307, 136092.
- Mortula, M. M., et al., 2021. Leachability of microplastic from different plastic materials. *Journal of environmental management*. 294, 112995.
- Natesan, U., et al., 2021. Spatial distribution of microplastic concentration around landfill sites and its potential risk on groundwater. *Chemosphere*. 277, 130263.
- Phan, S., Luscombe, C. K., 2023. Recent trends in marine microplastic modeling and machine learning tools: Potential for long-term microplastic monitoring. *Journal of Applied Physics*. 133.
- Prezgot, D., et al., 2025. Automated Machine-Learning-Driven Analysis of Microplastics by TGA-FTIR for Enhanced Identification and Quantification. *Analytical Chemistry*. 97, 8833–8840.
- Shi, J., et al., 2020. (Nano) microplastics promote the propagation of antibiotic resistance genes in landfill leachate. *Environmental Science: Nano*. 7, 3536–3546.
- Sun, J., et al., 2021. Revisiting microplastics in landfill leachate: unnoticed tiny microplastics and their fate in treatment works. *Water Research*. 190, 116784.
- Yu, F., et al., 2024. Interaction of microplastics with perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in water: A review of the fate, mechanisms and toxicity. *Science of the Total Environment*. 948, 175000.

A combined method of machine learning and FTIR spectroscopy for the identification of microplastics

Mostafa Eilkhani Pour¹, Milad Mirzaei Aminiyan^{1*}

1- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran

* **Corresponding author:** Milad Mirzaei Aminiyan (mm.aminiyan@ut.ac.ir)

Abstract

The identification and analysis of microplastics have consistently posed significant challenges due to their inherent complexity. This research presents a machine learning-based methodology that facilitates more rapid and secure microplastic detection. In the comparative assessment, human interpretation, machine learning algorithms, and image processing techniques were evaluated using the Structural Similarity Index (SSIM), which reflects the overall consistency among methods. While machine learning demonstrated satisfactory performance in certain samples relative to human analysis, notable discrepancies were observed in the classification of microplastic types. Importantly, the study highlights the potential identification of high-density polyethylene (HDPE) and low-density polyethylene (LDPE) microplastics, with results exhibiting slight deviations from human-based interpretations.

Keywords: Python, Low-density polyethylene, High-density polyethylene, Spectroscopy, Microplastics