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

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذر ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

کاربرد فناوری پلاسمای سرد در مهندسی آب و خاک

مهدی نورزاده حداد*، علی عبادی، هادی رضایی‌راد

گروه علوم و مهندسی آب و خاک، پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، کرج.
*m.nourzade@gmail.com

چکیده:

استفاده از فناوری پلاسمای سرد در علوم آب و خاک اخیرا شتاب زیادی در سطح جهانی داشته است به نحوی که هم در بخش تولید محصولات کشاورزی و هم در بخش محیط زیست کارایی آن اثبات شده است. افزایش قدرت جوانه‌زنی بذور، کاهش استفاده از کودهای شیمیایی، افزایش کمی و کیفی محصولات کشاورزی با استفاده از پلاسمای سرد از نتایج تحقیقات اخیر است. از سویی دیگر وجود مقادیر زیاد و روزافزون آلاینده‌ها در آب و خاک به ویژه در نواحی نزدیک به محل‌های دفن زباله و پساب به دغدغه‌ای جهانی تبدیل شده است. در این راستا فناوری پلاسمای سرد با داشتن سازگاری زیست محیطی مناسب، بازدهی بالا در حذف آلاینده‌ها و بازدهی انرژی بالا یک روش نوین و امیدوارکننده برای پالایش آب و خاک به شمار می‌رود. در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی به منظور بهینه‌سازی نحوه استفاده از این فناوری در علوم محیطی انجام شده است. هدف اصلی این مقاله معرفی فناوری پلاسمای سرد و کاربرد آن در علوم آب و خاک با توجه به پتانسیل‌ها و محدودیت‌های آن در ایران است. مهمترین فاکتورهایی که در این مقاله در خصوص به کارگیری فناوری پلاسمای سرد بررسی شده است شامل بازدهی انرژی، نوع آلاینده‌های قابل پالایش، عوامل و محدودیت‌های کلیدی، چشم‌انداز توسعه صنعتی و امکان‌پذیری استفاده از آن در شرایط واقعی زندگی است.

واژگان کلیدی: پلاسمای سرد، پالایش آب و خاک، بازدهی انرژی، حذف آلاینده‌ها

مقدمه:

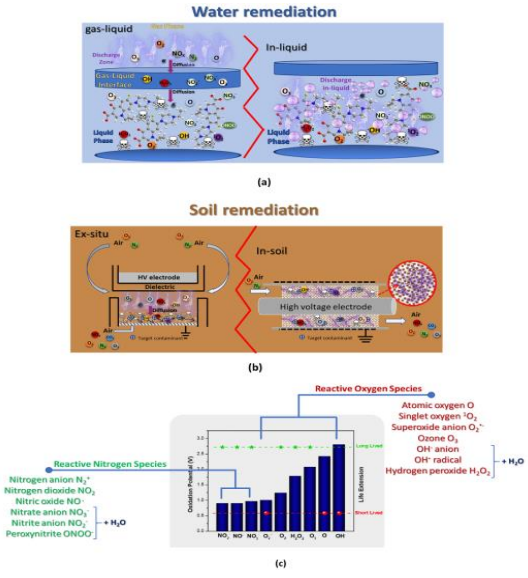
پلاسما یکی از چهار حالت اصلی مواد می‌باشد که با حرارت دادن مواد در حالت جامد، گذار فاز به حالت مایع، گاز و در نهایت پلاسما (در دمای فوق‌العاده زیاد) اتفاق می‌افتد. در حالت پلاسما، به دلیل دمای بالای محیط، برخی یا همه الکترون‌ها انرژی کافی برای خروج از قید پتانسیل هسته اتم‌ها را پیدا کرده و یک گاز یونیزه ایجاد می‌کنند. در نتیجه پلاسما شامل الکترون–یون‌های آزاد است و به همین دلیل رسانای الکتریکی است. از آنجا که در حالت عادی مواد دارای بار الکتریکی خنثی هستند، پلاسما نیز از نظر الکتریکی خنثی است. با توجه به این موضوع که بارهای الکتریکی متحرک میدان مغناطیسی ایجاد می‌کنند، پلاسما می‌تواند دارای میدان مغناطیسی نیز باشد. پلاسمای سرد یا پلاسمای غیرحرارتی، نوعی پلاسما است که در تعادل ترمودینامیکی قرار ندارد. در این حالت، دمای الکترون‌ها بسیار گرم‌تر از دمای انواع سنگین مانند یون‌ها و نوترون‌ها است. این پلاسما با استفاده از انرژی الکتریکی ایجاد می‌شود و توانایی گذر از میدان‌های مغناطیسی را دارد. پلاسمای سرد با استفاده از الکترون‌های فوق سریع ایجاد می‌شود که از طریق گازهایی مانند هلیوم و هوا عبور می‌کنند. این الکترون‌ها با انرژی زیادی به اتم‌ها و مولکول‌ها برخورد کرده و با از بین بردن بیرونی‌ترین الکترون‌های اتم‌ها و مولکول‌های موجود در گاز، ترکیبی غلیظ از الکترون‌های آزاد و یون‌های آزاد را ایجاد می‌کنند. پلاسمای سرد با

آسیب رساندن به DNA میکروبی و ساختارهای سطحی، بدون آسیب به بافت‌های انسانی، میکروب‌ها را از بین می‌برد. این ویژگی باعث شده است که پلاسمای سرد به‌عنوان یک روش نوین برای ضدعفونی محیط مورد استفاده قرار گیرد. همچنین پلاسمای سرد را می‌توان برای فعال کردن آب (Plasma-Activated Water یا PAW) استفاده کرد. این آب خواص فیزیکوشیمیایی متفاوتی دارد به نحوی که برای کاربردهای مختلف، از جمله پالایش آلاینده‌های آب و خاک، تسریع رشد بذور گیاهان، ضدعفونی در صنایع غذایی و کاربردهای پزشکی، قابل استفاده است.PAW با تولید گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن می‌تواند باکتری‌ها، ویروس‌ها و قارچ‌ها را از بین ببرد و به این ترتیب فرایند ضدعفونی را انجام دهد و یا با استفاده از آن آلاینده‌های آب، از جمله مواد آلی، فلزات سنگین و میکروارگانیسم‌ها را از بین برد. همچنین با فراهم کردن مواد مغذی و تحریک رشد سلولی، رشد گیاهان را بهبود ببخشد. تحقیقات مرتبط با کاربرد پلاسمای سرد در علوم و مهندسی آب و خاک و گیاه بسیار جدید و مربوط به سال‌های اخیر می‌باشد. به منظور حذف نیتروفنول‌ها در خاک Wang و همکاران (۲۰۱۱) از پلاسما استفاده نمودند و مشخص شد در مدت ۱۰ دقیقه حدود ۸۰ درصد این آیلاینده از خاک حذف شده است. همچنین محققین زیادی روی تاثیر آب فعال پلاسمایی مطالعه نمودند، از جمله Kucerova و همکاران (۲۰۱۸) در تحقیقات خود نشان دادند که PAW باعث بهبود جوانه‌زنی، رشد اولیه نهال‌ها، افزایش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی در برگ‌ها و افزایش محتوای پروتئین محلول در ریشه‌ها می‌شود و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را کاهش می‌دهد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که PAW می‌تواند به طور مؤثری رشد نهال‌های گندم را تحریک کرده و متابولیسم آن‌ها را به ویژه در خاک‌هایی با محتوای کم مواد مغذی بهبود بخشد.در یک مطالعه به منظور بررسی اثر PAW بر رشد گیاهان Punith و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که گیاهانی که با آبی که به مدت ۳۰ دقیقه با پلاسما فعال شده بود آبیاری شده بودند ۱/۵ برابر رشد طولی بیشتر، ۴ برابر تعداد برگ بیشتری و میانگین وزن تر ۶۱ درصد بیشتر از تیمار شاهد داشتند که با آب معمولی آبیاری شده بودند. برای اولین بار Simeckova و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از یک دستگاه پلاسما با فراکانس ۱۱ کیلوهرتز و کل انرژی ۶۰ ژول بر میلی‌لیتر آب فعال را با پلاسما تولید نمودند و تاثیرات آن را بر ویژگی‌های آب و خاک بررسی کردند. نتایج این تحقیق حاکی از آن بود که آب فعال شده توسط پلاسما هیچ تاثی سویی روی ویژگی‌های خاک نداشته و موجب شده تا ظرفیت نگهداری آب در خاک تا ۳۰ درصد افزایش پیدا کند. همچنین Stoleru و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی تاثیر PAW و غلظت‌های مختلف نیترات مشخص نمودند که میزان کلروفیل، سطح و وزن برگ کاهو به شکل معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد افزایش داشته است. همچنین Matra و همکاران (۲۰۲۳) در تحقیقات خود نشان دادند که پلاسما هوا تأثیر مثبت قابل توجهی بر ویژگی‌های خاک و گیاه داشته است به نحوی که نرخ جوانه‌زنی و طول جوانه‌های تمام بذرهای گل صبا که در خاک‌های تیمارشده با پلاسما کشت شده‌اند، به‌ترتیب تا ۱/۷۴ و ۱/۱۴ برابر بیشتر از گروه کنترل بوده است. همچنین تجزیه خاک نشان داد که محتوای نیتروژن کل کجلدال (TKN) در تمام نمونه‌های تیمارشده با پلاسما افزایش یافته است و بهترین شرایط در ولتاژ ۱۲ کیلوولت با زمان تخلیه ۱۵ دقیقه بود که مقدار TKN در آن ۴/۳۳ برابر بیشتر از تیمار شاهد بود. این نتایج نشان داد که استفاده از پلاسما هوا می‌تواند به عنوان روشی مؤثر برای بهبود کیفیت خاک و افزایش رشد گیاهان در کشاورزی پایدار مورد استفاده قرار گیرد. همچنین در تحقیقات اخیری که Binci و همکاران (۲۰۲۵) انجام دادند مشخص شد که استفاده از آبی که به مدت ۵ دقیقه با استفاده از پلاسما فعال شده بود موجب افزایش معنی‌داری در کلونی و همزیستی قارچ میکوریزا اربسکولار شد و این افزایش باعث بهبود توسعه سیستم ریشه و افزایش جذب فسفر در گیاه Lotus japonicus شد. با توجه به جدید بودن استفاده از فناوری

پلاسمای سرد در علوم آب و خاک هدف اصلی این مقاله معرفی مزایا، معایب و پتانسیل‌های این فناوری در شاخه‌های مختلف با آب و خاک است.

مواد روش‌ها:

پلاسما سرد یک حالت یونیزه‌شده از گاز است که در دماهای نسبتاً پایین ایجاد می‌شود و شامل الکترون‌ها، یون‌ها، رادیکال‌های آزاد و مولکول‌های فعال است. این فناوری نوین به دلیل توانایی تولید گونه‌های واکنش‌پذیر قوی، در تصفیه آب، هوا، و حذف آلاینده‌ها کاربردهای گسترده‌ای دارد. با اعمال ولتاژ بالا، الکترون‌های پرانرژی در گاز یونیزه شده به وجود می‌آیند که با مولکول‌های آب و اکسیژن واکنش داده و رادیکال‌های هیدروکسیل($\cdot OH$) ، پراکسید هیدروژن(H_2O_2) ، اتم‌های اکسیژن و نیتروژن اکسیدها را تولید می‌کنند. این گونه‌ها بسیار واکنش‌پذیر بوده و می‌توانند آلاینده‌های آلی، میکروارگانیسم‌ها و ترکیبات سمی را تجزیه و غیرفعال کنند. همچنین در اثر تخلیه الکتریکی، حرارت موضعی و موج شوک نیز ایجاد می‌شود که به تخریب ساختار سلولی میکروب‌ها کمک می‌کند. توانایی حذف طیف وسیعی از آلاینده‌ها و میکروارگانیسم‌ها، عدم تولید آلودگی ثانویه و مصرف انرژی پایین‌تر نسبت به روش‌های حرارتی از مزایای پلاسمای سرد به شمار می‌رود که موجب استفاده روزافزون این فناوری در صنایع مختلف شده است.



شکل ۱- شرح شماتیک مقایسه حالت‌های عملیاتی پلاسما در تصفیه آب و خاک. (a) مقایسه ویژگی‌های اصلی حالت گاز-مایع و حالت درون مایع (حباب‌های پلاسما) در تصفیه آب. (b) مقایسه ویژگی‌های اصلی روش‌های تصفیه خارج از محل (Ex-situ) و درون خاک (In-soil)برای پاکسازی خاک. (c) ویژگی‌های اصلی گونه‌های واکنش‌پذیر فعال (RONS) در اکسیداسیون مؤثر

نتایج و بحث

کاربرد پلاسمای سرد در آب و خاک

تصفیه خاک

تأثیر مثبت کاتالیزورها به طور گسترده‌ای در مطالعات متعددی برای تصفیه فاضلاب بررسی و اثبات شده است، در حالی که تعداد محدودی مطالعه درباره تصفیه خاک وجود دارد. ویژگی‌های خاک مانند ترکیب ماده آلی و رطوبت خاک می‌توانند به طور قاطع بر فرآیند تصفیه تأثیر بگذارند. افزایش ماده آلی خاک تأثیر منفی بر تخریب آلاینده‌ها دارد زیرا با آلاینده برای گونه‌های فعال پلاسما رقابت می‌کند (Wang et al., 2011; Geng et al., 2015). تأثیر رطوبت خاک بر این اساس است که الکترون‌های پرانرژی و گونه‌های واکنش‌پذیر تولید شده توسط پلاسما می‌توانند با مولکول‌های آب موجود در خاک واکنش دهند و در نتیجه عوامل اکسیدکننده قوی مانند $\cdot OH$ و H_2O_2 تولید کنند که قادر به پیشبرد بیشتر فرآیند هستند. با این حال، محتوای بالای آب (که بسته به پیکربندی راکتور پلاسما، نوع آلاینده و خاک در هر بار متفاوت است) باعث کاهش قابل توجهی در کارایی تخریب می‌شود، زیرا فاز آبی باعث مسدود شدن منافذ خاک شده و در نتیجه انتقال گونه‌های پلاسما در حجم خاک کاهش می‌یابد(Aggelopoulos et al., 2015).

تصفیه آب و تولید آب فعال

در یک چارچوب مشابه، ترکیب پلاسما سرد با سایر روش‌های تصفیه آب به منظور دستیابی به عملکرد بهینه، به طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. اخیراً، ترکیب پلاسما سرد با جذب و ازن‌زنی برای تصفیه آب مورد بررسی قرار گرفته است. به طور خاص، جذب با کربن فعال(AC) ، پلاسما تخلیه باریک پالسی (DBD) و ازن‌زنی برای حذف آفت‌کش کلردار پایدار آلاکلر ترکیب شده‌اند که نتایج بسیار امیدوارکننده‌ای به همراه داشته است . ترکیب پلاسما سرد با کربن فعال همچنین حذف فنول از آب را از ۲۸٪ به ۸۸٪ افزایش داده است ، در حالی که ترکیب آن با کربن فعال دانه‌ای عملکرد قابل توجهی در حذف بیسفنول A نشان داده است . بازی بودن بالای کربن فعال همراه با افزایش تعداد سایت‌های فعال و سطح سطحی بزرگ آن، باعث کارایی بیشتر در تبدیل اوزون (O_3) به رادیکال هیدروکسیل ($\cdot OH$) می‌شود. همچنین pH محلول آبی یکی از عوامل بسیار مهم در تصفیه آب با کمک پلاسما است. مطالعات گسترده نشان داده‌اند که تولید رادیکال هیدروکسیل ($\cdot OH$) در شرایط خنثی و قلیایی شدیدتر است. برخی گونه‌های فعال مانند پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و اوزون (O_3) در شرایط قلیایی سریع‌تر تجزیه می‌شوند و $\cdot OH$ تولید می‌کنند که باعث افزایش کارایی تخریب آلاینده‌ها می‌شود. این رفتار به تعادل‌های اسید-باز بین گونه‌های مختلف پلاسما مرتبط است که هم به تخریب کمک می‌کند و هم باعث تبدیل سریع رادیکال‌های هیدروکسیل به گونه‌های واکنش‌پذیر دیگری مانند اکسیژن سینگلت در محلول‌های قلیایی قوی می‌شود. هدایت الکتریکی محلول نیز عامل مهمی در تولید گونه‌های واکنش‌پذیر است. به طور کلی، هدایت بالا نشان‌دهنده غلظت بالای یون‌ها است که جریان الکتریکی بیشتری ایجاد کرده و تولید گونه‌های فعال را افزایش می‌دهد. اما پس از یک نقطه بحرانی، افزایش بیشتر هدایت باعث کاهش تولید گونه‌های واکنش‌پذیر و کاهش کارایی تخریب می‌شود. همچنین نوع آب مورد استفاده (آب مقطر، آب لوله‌کشی و غیره) نیز بر کارایی تخریب تأثیرگذار است. معمولاً آب لوله‌کشی به دلیل وجود یون‌هایی که باعث مهار تخریب می‌شوند، سرعت تخریب را کاهش می‌دهد، اما در برخی مطالعات اخیر تأثیر آن ناچیز بوده است. مطالعات نشان داده‌اند که با افزایش زمان تیمار پلاسما، pHآب فعال‌شده به طور قابل توجهی کاهش یافته و هدایت الکتریکی آن افزایش می‌یابد که ناشی از تشکیل اسیدهای قوی و افزایش غلظت نیترات و نیتریت است. در جدول شماره ۱ انواع روش‌های تصفیه خاک و آب نشان داده شده است.

جدول ۱. مقایسه روش‌های تصفیه خاک و آب

	روش	زمان فرآیند	هزینه (یورو/تن خاک)	مشکل اصلی	مزیت روش
تصفیه خاک	زیست پالایی	بسیار کند	۲۵–۷۵	آزادسازی میکروارگانیسم ها	هزینه عملیاتی کم

استخراج بخار خاک (Soil Vapor Extraction)	متوسط	۳۵–۳۲۰	کاربرد محدود در خصوص مواد آلی فرار	بازده انرژی مناسب و کارایی مناسب
جداسازی حرارتی (Thermal Desorption)	سریع	۶۰–۴۰۰	هزینه عملیاتی زیاد	بازده انرژی نسبتا بالا و کارایی مناسب
اکسیدان شیمیایی (Chemical oxidation)	سریع	۲۲۰–۳۸۰	خطرات مواد اکسیدکننده	تخریب کامل آلاینده های هدف
پلاسما سرد (Ex-situ Cold Plasma)	سریع	۱۵–۲۰	حجم بالای پلاسما در سطوح کلان	بازده انرژی بالا-قابلیت استفاده برای دامنه زیادی از مواد

تصفیه آب

روش	زمان فرایند	کیلووات ساعت/مترمکعب	مشکل اصلی	مزیت
جذب (Adsorption)	بسیار کند	–	آلودگی ثانویه	موثر برای چندین آلاینده آلی
انعقلاد (Coagulation)	متوسط	–	آلومینیوم باقی مانده	مقرون به صرفه بودن
فیلتراسیون غشایی (Membrane filtration)	کند	–	گرفتگی غشا	حذف آلاینده ها با نرخ بیش از ۹۹ درصد
تخریب زیستی (Biodegradation)	بسیار کند	–	آزادسازی میکروارگانیسم‌ها	هزینه عملیاتی پایین

فوتوکاتالیزور (Photocatalysis)	سریع	> ۱۰۰	آزادسازی کاتالیزور	بازده انرژی بالا-قابلیت استفاده برای دامنه زیادی از مواد
UV/Fenton	سریع	< ۱۰	آهن باقی مانده	بازده انرژی بالا-قابلیت استفاده برای دامنه زیادی از مواد
پلاسما سرد (Cold Plasma)	بسیار سریع	< ۱۰	دشواری در مقیاس بالا	بازده انرژی بالا-قابلیت استفاده برای دامنه زیادی از مواد

فهرست منابع

Aggelopoulos, C.A., Tsakiroglou, C.D., Ognier, S., Cavadias, S. (2015). Non-aqueous phase liquid-contaminated soil remediation by ex situ dielectric barrier discharge plasma. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12, 1011–1020.

Aggelopoulos, C.A., Tataraki, D., Rassias, G. (2018). Degradation of atrazine in soil by dielectric barrier discharge plasma – Potential singlet oxygen mediation. *Chemical Engineering Journal*, 347, 682–694.

Binci, F., Cortese, E., Nouri, E., et al. (2025). Plasma-activated water promotes and finely tunes arbuscular mycorrhizal symbiosis in *Lotus japonicus*. *BMC Plant Biology*, 25, 544. https://doi.org/10.1186/s12870-025-06563-1

Geng, C., Wu, C.-D., Wang, H.-J., Yi, C.-W. (2015). Effect of chemical parameters on pyrene degradation in soil in a pulsed discharge plasma system. *Journal of Electrostatics*, 73, 38–42.

Kučerová, K., Henselová, M., Slováková, Ľ., Hensel, K. (2018). Effects of plasma activated water on wheat: Germination, growth parameters, photosynthetic pigments, soluble protein content, and antioxidant enzymes activity. *Plasma Processes and Polymers*, e1800131. https://doi.org/10.1002/ppap.201800131

Matra, K., Tanakaran, Y., Sangwang, W., Promping, J., Theepharaksapan, S. (2023). Plasma activated soil: A novel technique for agricultural soil enhancement. *Engineering Journal*, 27(3), 1–10.

Punith, N., Harsha, R., Lakshminarayana, R., Hemanth, M., Anand, S.M., Dasappa, S. (2019). Plasma activated water generation and its application in agriculture. *Advanced Materials Letters*, 10(10), 700–704. https://doi.org/10.5185/amlett.2019.0042

Šimečková, J., Krčma, F., Klofáč, D., Dostál, L., Kozáková, Z. (2020). Influence of plasma-activated water on physical and physical–chemical soil properties. *Water*, 12, 2357. https://doi.org/10.3390/w12092357

Stoleru, V., Burlica, R., Mihalache, G., et al. (2020). Plant growth promotion effect of plasma activated water on *Lactuca sativa* L. cultivated in two different volumes of substrate. *Scientific Reports*, 10, 20920. https://doi.org/10.1038/s41598-020-77355-w

Wang, T.C., Lu, N., Li, J., Wu, Y. (2010). Evaluation of the potential of pentachlorophenol degradation in soil by pulsed corona discharge plasma from soil characteristics. *Environmental Science & Technology*, 44, 3105–3110.

Wang, W., Li, H., Ding, Z., Wang, X. (2011). Effects of advanced oxidation pretreatment on residual aluminum control in high humic acid water purification. *Journal of Environmental Sciences*, 23, 1079–1085.

Zhao, J., Zhang, A., H´eroux, P., Sun, Z., Liu, Y. (2021). Remediation of diesel fuel polluted soil using dielectric barrier discharge plasma. *Chemical Engineering Journal*, 417, 128143.

Application of Cold Plasma Technology in Water and Soil Engineering

Mehdi Nourzadeh Hadad*, Ali Ebadi, Hadi Rezaei Rad

Soil and Water Engineering Department, Nuclear Agriculture Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Karaj, Iran

*m.nourzade@gmail.com

Abstract

The application of cold plasma technology in water and soil sciences has recently gained significant momentum worldwide, demonstrating efficacy both in agricultural production and environmental sectors. Recent studies have shown that cold plasma can enhance seed germination rates, reduce the use of chemical fertilizers, and improve both the quantity and quality of agricultural products. Conversely, the increasing presence of pollutants in water and soil especially in areas adjacent to waste disposal sites and effluent discharge zones has become a global concern. In this context, cold plasma technology, with its favorable environmental compatibility, high pollutant removal efficiency, and energy efficiency, represents a novel and promising method for water and soil remediation. Considerable efforts have been made in recent years to optimize the application of this technology in environmental sciences. The primary objective of this paper is to introduce cold plasma technology and its applications in water and soil sciences, with particular emphasis on its potentials and limitations within the context of Iran. The key factors examined in this study include energy efficiency, types of remediable pollutants, critical factors and constraints, prospects for industrial development, and the feasibility of its implementation under real-life conditions.

Keywords: Cold plasma, water and soil remediation, energy efficiency, pollutant removal