

هیئت داوران نشریه این دوره

دکتر احمدپور، جواد (دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل)
 دکتر اشرفی‌زاده، سید نظام‌الدین (دانشگاه علم و صنعت ایران)
 دکتر باقری، حمیدرضا (دانشگاه شهید باهنر کرمان)
 دکتر تقی‌زاده، مجید (دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل)
 دکتر جباری، آسیه (دانشگاه صنعتی سهند)
 دکتر خدیوپارسی، پریسا (دانشگاه تهران)

دکتر خسروی نیکو، محمدرضا (دانشگاه صنعت نفت اهواز)
 دکتر خضراآقا، همایون (دانشگاه صنعتی سهند)
 دکتر زاهدی، پیام (دانشگاه تهران)
 دکتر زینت‌لو عجب شیر، سحر (دانشگاه بناب)
 دکتر شرفی‌فرد، حکیمه (دانشگاه یاسوج)
 دکتر عاشوری، سیاوش (دانشگاه صنعت نفت اهواز)
 دکتر علمداری، امین (دانشگاه ارومیه)
 دکتر فنایی شیخ‌الاسلامی، محمدعلی (دانشگاه فردوسی مشهد)

دکتر قائمی، احد (دانشگاه علم و صنعت ایران)
 دکتر گل‌محمدی، مرتضی (دانشگاه صنعتی بیرجند)
 دکتر لشکر بلوکی، مصطفی (دانشگاه شیراز)
 دکتر میراویلیایی، علیرضا (دانشگاه محقق اردبیلی)
 دکتر نوروزی، علیرضا (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
 دکتر هاشمی‌پور رفسنجانی، حسن (دانشگاه ولیعصر رفسنجان)
 دکتر یوسفی، وجیهه (دانشگاه سیستان و بلوچستان)



رد پای کربن: چالش‌ها و فرصت‌های پیش روی پژوهش‌های علمی

فاطمه بهمن‌زادگان

دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران

استانداردهای بین‌المللی مانند ISO 14064 و پروتکل^۲ GHG توسعه یافته‌اند. این روش‌ها شامل ارزیابی چرخه عمر^۳ (LCA)، تحلیل ورودی-خروجی^۴ (IOA) و مدل‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای است.

LCA یکی از جامع‌ترین روش‌ها برای محاسبه رد پای کربن است که تمام مراحل تولید، استفاده و پایان عمر یک محصول یا فرایند را در نظر می‌گیرد. این روش به محققان امکان می‌دهد تا نقاط بحرانی را در چرخه عمر، شناسایی و راه‌حل‌های بهینه‌سازی را ارائه کنند. از سوی دیگر، IOA با استفاده از داده‌های اقتصادی، رد پای کربن را در سطح کلان‌تری مانند بخش‌های صنعتی یا ملی، حساب می‌کند. ترکیب این روش‌ها با مدل‌سازی ریاضی و فناوری‌های نوین - مانند یادگیری ماشین و اینترنت اشیا^۵ (IoT) - دقت و کارایی محاسبات رد پای کربن را به‌طور چشم‌گیری افزایش داده‌است.

رد پای کربن، ناشی از فعالیت‌های مختلف انسانی است که مهم‌ترین آن شامل تولید انرژی، حمل‌ونقل، صنعت، کشاورزی و تغییرات کاربری زمین است. تولید انرژی از سوخت‌های فسیلی مانند زغال

در چند دهه اخیر، تغییرات اقلیمی به یکی از جدی‌ترین تهدیدها برای زیست‌بوم‌های طبیعی و جوامع انسانی تبدیل شده‌است. عامل مهم این تغییرات، افزایش گازهای گلخانه‌ای در جو زمین است که عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی است. در این میان، مفهوم «رد پای کربن»^۱ به‌عنوان یک شاخص علمی و کاربردی، نقش محوری در درک و اندازه‌گیری تأثیرات زیست‌محیطی فعالیت‌های انسانی ایفا می‌کند. رد پای کربن، مقدار کل گازهای گلخانه‌ای منتشرشده در جو را نشان می‌دهد که معمولاً برحسب معادل دی‌اکسید کربن اندازه‌گیری می‌شود. این شاخص، نه‌تنها برای ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی، بلکه برای طراحی سیاست‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حرکت به‌سوی توسعه پایدار، ضروری است.

رد پای کربن به‌عنوان یک شاخص کمی، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی را در طول چرخه عمر یک محصول، فرایند یا سازمان اندازه‌گیری می‌کند. این گازها شامل دی‌اکسید کربن (CO₂)، متان (CH₄)، اکسید نیتروژن (N₂O) و سایر گازهای گلخانه‌ای است. روش‌های محاسبه رد پای کربن براساس

2. Greenhouse Gas Protocol
 3. Life Cycle Assessment
 4. Input-Output Analysis
 5. Internet of Things

1. Carbon Footprint

انرژی است. بخش‌های حمل‌ونقل، مسکن و غذا بیشترین سهم را در رد پای کربن دارند. برای مثال، متوسط رد پای کربن تولید انرژی در شبکه کشور حدود ۶۰۰ گرم به‌ازای هر کیلووات ساعت است، درحالی‌که در دنیا با استفاده از مدل‌های سیکل ترکیبی و توربین‌های گازی پیشرفته، این عدد به زیر ۴۰۰ گرم کاهش یافته است.

برای مقابله با افزایش رد پای کربن، راه‌حل‌های متعددی در سطح فردی، ملی و جهانی وجود دارد. در سطح فردی، کاهش مصرف انرژی، استفاده از وسایل نقلیه عمومی یا خودروهای الکتریکی، کاهش مصرف گوشت و بهینه‌سازی مصرف منابع می‌تواند تأثیر زیادی داشته باشد. در سطح ملی، سیاست‌هایی مانند افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر، بهبود بهره‌وری انرژی، توسعه حمل‌ونقل پایدار و اجرای برنامه‌های جنگل‌کاری و احیای زیست‌بوم‌ها می‌تواند به کاهش رد پای کربن کمک کند. در سطح جهانی، همکاری بین‌المللی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ضروری است. توافق‌نامه‌هایی مانند پاریس، که هدف آن محدود کردن افزایش دمای جهانی به کمتر از ۲ درجه سلسیوس است، گام‌های مهمی در این راستا محسوب می‌شود. با این حال، اجرای مؤثر این توافق‌نامه‌ها نیازمند تعهد جدی کشورها و مشارکت فعال بخش‌های خصوصی و عمومی است.

حوزه رد پای کربن به‌عنوان یک زمینه پژوهشی میان‌رشته‌ای، فرصت‌های بی‌شماری را برای محققان در رشته‌های مختلف از جمله علوم محیط زیست، مهندسی، اقتصاد، علوم اجتماعی و فناوری اطلاعات فراهم می‌کند. برخی از زمینه‌های پژوهشی امیدوارکننده در این حوزه عبارت است از:

توسعه روش‌های دقیق‌تر و کارآمدتر برای محاسبه رد پای کربن در سطح محصول، سازمان و ملی.

پژوهش در زمینه فناوری‌های نوین مانند جذب و ذخیره کربن^۱ (CCS)، انرژی‌های تجدیدپذیر و مواد پایدار.

بررسی راه‌حل‌های اقتصادی برای کاهش رد پای کربن، از جمله قیمت‌گذاری کربن و توسعه بازارهای کربن.

مطالعه تأثیرات تغییرات اقلیمی بر جوامع و رفتارهای فردی و طراحی سیاست‌های مؤثر برای تغییر رفتار.

استفاده از مدل‌های ریاضی و فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی برای پیش‌بینی روندهای آینده و طراحی سناریوهای کاهش انتشار.

سنگ، نفت و گاز طبیعی، از عوامل اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای است؛ به‌عنوان مثال، نیروگاه‌های زغال‌سنگی یکی از مهم‌ترین منابع انتشار دی‌اکسید کربن است که حدود ۴۰ درصد از کل انتشار CO₂ جهانی را به‌خود اختصاص می‌دهد. هم‌چنین، بخش حمل‌ونقل، به‌ویژه وسایل نقلیه موتوری که از بنزین و دیزل استفاده می‌کنند، سهم بزرگی در رد پای کربن جهانی دارد. صنایع سنگین مانند فولاد، سیمان و پتروشیمی نیز به‌دلیل مصرف بالای انرژی و فرایندهای شیمیایی، مقدار چشم‌گیری گازهای گلخانه‌ای منتشر می‌کنند. به‌عنوان مثال، تولید سیمان به‌تنهایی عامل حدود ۸ درصد از کل انتشار CO₂ جهانی است. علاوه بر این، کشاورزی و دامداری به‌دلیل انتشار متان و اکسید نیتروژن، نقش مهمی در افزایش رد پای کربن ایفا می‌کند. تغییرات کاربری زمین، مانند جنگل‌زدایی و تبدیل اراضی طبیعی به زمین‌های کشاورزی یا شهری، نیز به کاهش ظرفیت جذب دی‌اکسید کربن به‌وسیله طبیعت منجر شده است.

افزایش رد پای کربن و به‌دنبال آن، تشدید اثرات تغییرات اقلیمی، پیامدهای گسترده‌ای برای محیط زیست، اقتصاد و جامعه دارد. گرمایش جهانی باعث ذوب یخ‌های قطبی، افزایش سطح آب دریاها، تغییر الگوهای بارش و وقوع پدیده‌های آب‌وهوایی شدید مانند سیل، خشک‌سالی و طوفان‌های شدید شده است. این تغییرات، نه‌تنها زیست‌بوم‌های طبیعی را تحت تأثیر قرار داده، بلکه زندگی میلیون‌ها نفر را در سراسر جهان تهدید می‌کند. ازمنظر اقتصادی، افزایش رد پای کربن می‌تواند به کاهش بهره‌وری کشاورزی، افزایش هزینه‌های انرژی و خسارات ناشی از بلایای طبیعی منجر شود. هم‌چنین، نابرابری‌های اجتماعی را تشدید می‌کند؛ چراکه جوامع فقیر و کشورهای در حال توسعه بیشترین آسیب را از تغییرات اقلیمی متحمل می‌شوند. به‌عنوان مثال، افزایش سطح آب دریاها می‌تواند منجر به جابه‌جایی میلیون‌ها نفر در مناطق ساحلی شود که این امر چالش‌های اجتماعی و اقتصادی بی‌سابقه‌ای را در پی خواهد آورد.

ایران به‌عنوان یکی از کشورهای پرمصرف انرژی در دنیا، نقش پررنگی در این حوزه دارد و سهم قابل توجهی از تولید گازهای گلخانه‌ای را از آن خود کرده است. براساس آمارهای جدید، سرانه رد پای کربن در ایران حدود هشت تن دی‌اکسید کربن معادل در سال است، درحالی‌که میانگین جهانی حدود چهار تن است. این مقدار بالا نشان‌دهنده مصرف زیاد انرژی‌های فسیلی و ناکارآمدی در بهره‌وری

1. Carbon Capture and Storage

نتیجه‌گیری

رد پای کربن به‌عنوان یک شاخص علمی، نقش محوری در درک و مقابله با تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند. کاهش رد پای کربن نه تنها یک ضرورت زیست‌محیطی، بلکه یک مسئولیت اخلاقی و اجتماعی است. برای دستیابی به آینده‌ای پایدار، نیازمند تغییر در الگوهای تولید و مصرف، توسعه فناوری‌های پاک و تقویت همکاری‌های جهانی هستیم. محققان و دانشمندان در سراسر جهان می‌توانند با مشارکت

فعال در این حوزه، راه‌حل‌های نوآورانه و مؤثری برای کاهش رد پای کربن ارائه کنند. تنها با اقدامات جمعی و مسئولانه می‌توانیم از پیامدهای فاجعه‌بار تغییرات اقلیمی جلوگیری کنیم و زمینی سالم برای نسل‌های آینده به ارث بگذاریم. این چالش بزرگ، فرصتی بی‌نظیر برای پیشرفت علمی و فناوریانه است که می‌تواند آینده بشریت را به سوی پایداری سوق دهد.